



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

Σχεδίαση Συστημάτων Ανίχνευσης Αστάθειας Τάσεως και Προστασίας από Κατάρρευση

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χαράλαμπος Α. Λάμπρου

Αθήνα, Μάρτιος 2017



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

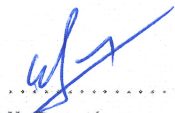
Σχεδίαση Συστημάτων Ανίχνευσης Αστάθειας Τάσεως και Προστασίας από Κατάρρευση


ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ


Χαράλαμπος Α. Λάμπρου


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

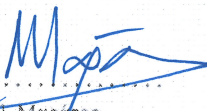
Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 31^η Μαρτίου 2017.



.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ



.....
Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Γ. Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Π. Γεωργιάκης
Επ. Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Ν. Μαράτος
Καθηγητής ΕΜΠ


.....
Αν. Μπακιρτζής
Καθηγητής ΑΠΘ


.....
Β. Νικολαΐδης
Επ. Καθηγητής ΔΠΘ

Αθήνα, Μάρτιος 2017

.....

Χαράλαμπος Α. Λάμπρου

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

Copyright © Χαράλαμπος Λάμπρου, 2017

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 τους συγγραφείς.

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.

Στην οικογένεια μου και ιδιαίτερα στην κόρη μου Κατερίνα

Πρόλογος

Η διατριβή αυτή είναι το αποτέλεσμα επίμονης και πολύχρονης προσπάθειας η οποία ολοκληρώνει ένα σημαντικό κύκλο της ζωής μου, που ξεκίνησε με τις προπτυχιακές μου σπουδές στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου το 2002.

Θα ήθελα να εκφράσω, καταρχάς, τις πιο θερμές μου ευχαριστίες και ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Κώστα Βουρνά για τη συνεχή καθοδήγηση, ανιδιοτέλεια και υπομονή που επέδειξε όλα τα χρόνια της συνεργασίας μας. Τον θεωρώ από τους πιο αξιόλογους ανθρώπους που έχω γνωρίσει, ενώ οι γνώσεις του, η επιστημονική του κατάρτιση και καθοδήγηση έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση της διατριβής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Επ. Καθηγητή κ. Βασίλη Νικολαΐδη, για τη συνεργασία μας σε διάφορα ερευνητικά θέματα και ιδιαίτερα για την παροχή των απαραίτητων στοιχείων προσομοίωσης σχετικά με το στιγμιότυπο της διακοπής του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος της 12^{ης} Ιουλίου 2004, το οποίο χρησιμοποιείται στο 6^ο κεφαλαίο.

Σε προσωπικό επίπεδο, θέλω να κάνω ιδιαίτερη αναφορά στη σύζυγο και σύντροφο της ζωής μου Βασιλική Μπιλιλή για τη συνεχή, πολύπλευρη συμπαράσταση και στήριξη της όλα αυτά τα χρόνια εκπόνησης της διατριβής. Επιπλέον, θα ήταν αδύνατον να μην αναφέρω την πολυαγαπημένη μου κόρη, Κατερίνα, η οποία μου έδωσε περισσότερη ενέργεια και κίνητρα για την ολοκλήρωση της διατριβής.

Τέλος, ευχαριστώ ειλικρινά τους γονείς μου, Θανάση και Κατερίνα, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει.

*Χαράλαμπος Λάμπρου
Αθήνα, Μάρτιος 2017*

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η σχεδίαση συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση.

Για το σκοπό αυτό σε πρώτη φάση χρησιμοποιείται η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο με το ακρωνύμιο LIVES (Local Identification of Voltage Emergency Situations), η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση της ρυθμιζόμενης δευτερεύουσας τάσης των ΣΑΤΥΦ που βρίσκονται εγκατεστημένα στους μετασχηματιστές υποβιβασμού των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ. Η μέθοδος LIVES ενσωματώνεται αρχικά σε σύστημα απλής επιτήρησης ευστάθειας τάσης, για σήμανση μόνο συναγερμού, το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται από αυτόνομα ολοκληρωμένα συστήματα προστασίας. Τα συστήματα αυτά μετά την ανίχνευση της αστάθειας εφαρμόζουν αποτρεπτικά μέτρα για την αποφυγή της κατάρρευσης τάσης. Όλα τα συστήματα προστασίας που αναπτύσσονται είναι τοπικά, με λογική κλειστού βρόχου και δυνατότητα επαναληπτικών εφαρμογών.

Το πρώτο σύστημα προστασίας που αναπτύσσεται στηρίζεται σε λογική εκτάκτου ελέγχου των αντίστοιχων ΣΑΤΥΦ, με αντιστροφή της λειτουργίας τους, μόλις σημειωθεί συναγερμός και μέχρι να αποκατασταθεί η ευστάθεια, εφαρμόζοντας στην ουσία έμμεση αποκοπή φορτίου. Επιπλέον, διαθέτει υποσύστημα για την αποκατάσταση της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, όταν αυτά εξαντλήσουν το εύρος των διαθέσιμων λήψεων τους, αποκαθιστώντας έτσι τη λειτουργικότητα του συστήματος ανίχνευσης και προστασίας, το οποίο στηρίζεται σε ενεργά ΣΑΤΥΦ.

Το δεύτερο σύστημα προστασίας είναι παραλλαγή του προηγούμενου, ενσωματώνοντας επιπλέον τη δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου όταν σημειωθεί συναγερμός αστάθειας και η τάση πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος είναι κάτω από συγκεκριμένα κατώφλια. Η άμεση αποκοπή φορτίου είναι απαραίτητη για την περίπτωση που η αποκατάσταση των φορτίων στα κατάντη των ΣΑΤΥΦ γίνεται και με άλλους δυναμικούς μηχανισμούς, με αποτέλεσμα η έμμεση αποκοπή φορτίου να προσφέρει μόνο προσωρινή ανακούφιση στο σύστημα.

Το τρίτο σύστημα προστασίας χρησιμοποιεί τη σήμανση αστάθειας LIVES για απευθείας εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου στον υποσταθμό που σημαίνεται συναγερμός.

Στη συνέχεια η μέθοδος ανίχνευσης LIVES επεκτείνεται για χρήση σε ζυγούς όπου δεν υπάρχουν ΣΑΤΥΦ, όπως για παράδειγμα ζυγούς ΥΤ και ΥΥΤ του συστήματος μεταφοράς, με χρήση μόνο μετρήσεων φασιθετών τάσεως και ρεύματος. Με αυτόν τον τρόπο σχεδιάζεται ένα νέο σύστημα ανίχνευσης που κάνει χρήση των προαναφερθεισών μετρήσεων για την εξαγωγή ενός δείκτη NLI (New LIVES Index), ο οποίος μπορεί να σημαίνει την αστάθεια σε μια ευάλωτη περιοχή του συστήματος στα πρώιμα στάδια εκδήλωσης της.

Όλα τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας ενσωματώνονται στο ψηφιακό πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης και ανάλυσης ευστάθειας τάσης WPSTAB, του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των προαναφερθέντων συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας τόσο σε συστήματα δοκιμών όσο και στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.

Τα βασικά συστήματα δοκιμών που χρησιμοποιείται είναι το πρότυπο δίκτυο για ανάλυση ευστάθειας τάσης του IEEE με την επωνυμία Nordic Test System, ενώ από το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα χρησιμοποιούνται ευσταθή και ασταθή σενάρια που παρήχθησαν από τα ιστορικά αρχεία της ολικής διακοπής του Νοτίου τμήματος τον Ιούλιο του 2004, αλλά και νεότερα στιγμιότυπα από το καλοκαίρι του 2010. Στην τελευταία περίπτωση γίνεται μελέτη αύξησης των περιθωρίων φόρτισης του συστήματος με χρήση στατής άεργης αντιστάθμισης στα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου και στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Λέξεις - Κλειδιά

Ευστάθεια ΣΗΕ, Συστήματα Προστασίας, Ανίχνευση Αστάθειας Τάσης, Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης, Όρια Φόρτισης Συστήματος, Χρονική Προσομοίωση, Οιονεί Στατική Προσέγγιση, Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο, Αποκοπή Φορτίου, Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος, Μέτρηση Φασιθετών

Abstract

The scope of this thesis is the design and development of on-line voltage instability detection systems and protection schemes against voltage collapse.

For this purpose, the Local Identification of Voltage Emergency Situations (LIVES) method is utilized. This method relies on monitoring the secondary controlled voltage of bulk power delivery transformers equipped with Load Tap Changer (LTC) in order to detect instability. LIVES is incorporated in a simple detection system which can be used either for stability monitoring only, or as a part of a System Protection Scheme (SPS) against voltage collapse. All SPS designed in the framework of this thesis are local, closed-loop systems.

The first SPS designed is based in emergency tap control, after the detection of instability and up to the point where stability is restored. The emergency control is based on the reverse operation of LTC in favor of transmission voltage. Furthermore, this SPS is equipped with a module for restoring LTC control range in case a hard tap limit is reached and thus restoring the operability of the SPS, which is based on active LTCs.

The second SPS is a variation of the previous one, with the additional function of direct load shedding from the respective substation, when an instability alarm is issued and the transmission or the distribution side voltage is below predefined thresholds. The direct load shedding is inevitable in case the loads are self-restored with dynamics other than LTCs.

The third SPS applies a pre-specified percentage of the firm load shedding from the distribution substation where the instability is detected by the LIVES detection system.

The LIVES method is then extended into a New LIVES Index (NLI), suitable for any transmission bus feeding a weak area, regardless if the bus is controlled by LTC or not. The NLI can be easily computed using voltage and current phasor measurements from PMUs.

All detection and protection schemes are modeled and incorporated into the WPSTAB software package, suitable for long term simulation and voltage stability analysis. WPSTAB is then used for simulation of all the detection and protection schemes in various test systems as well as, in the Hellenic Interconnected System.

The main test system used is the IEEE Nordic Test System, proposed for voltage stability studies by the relevant IEEE Task Force. Also, stable and unstable scenarios from the Hellenic Interconnected System where used, based on the historical data from July 12, 2004 blackout, as well as from the summer of 2010. In the latter case, a study is carried out to determine the improvement of system security margins by using dispersed and centralized static compensation in the wind farms of Peloponnese and Megalopoli thermal plant respectively.

Keywords

Power System Stability, System Protection Schemes, Voltage Instability Detection, Long Term Voltage Instability, Loadability Limits, Time Simulation, Quasi Steady State Approximation, Load Tap Changers, Load Shedding, Static Compensation, Phasor Measurement Units

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	xiii
Κατάλογος Σχημάτων	xv
Συντομογραφίες	xix
1 Εισαγωγή	1
1.1 Μαθηματικό υπόβαθρο (διαφορικές εξισώσεις)	2
1.1.1 Θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας των λύσεων	2
1.1.2 Σημεία ισοροπίας - Γραμμικοποίηση	3
1.1.3 Αναλλοίωτες πολλαπλότητες	4
1.1.4 Διακλαδώσεις	6
1.1.5 Διακλάδωση σαγματικού κόμβου	7
1.1.6 Συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς	8
1.1.7 Πολλαπλές χρονικές κλίμακες	9
1.2 Ευστάθεια ΣΗΕ	12
1.2.1 Ευστάθεια γωνίας	13
1.2.2 Ευστάθεια συχνότητας	15
1.2.3 Ευστάθεια τάσης	15
1.3 Εισαγωγή στους μηχανισμούς αστάθειας τάσης	18
1.3.1 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς	18
1.3.2 Χαρακτηριστικές δικτύου	20
1.3.3 Χαρακτηριστικές φορτίου	22
1.3.4 Περιγραφή μηχανισμών κατάρρευσης	24
1.4 Μέτρα αντιμετώπισης αστάθειας τάσης	26
1.4.1 Χρήση διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος	26
1.4.2 Έκτακτος έλεγχος γεννητριών	27
1.4.3 Έκτακτος έλεγχος ΣΑΤΥΦ	28
1.4.4 Αποκοπή φορτίου	29
1.5 Ασφάλεια ΣΗΕ	30
1.5.1 Γενικά	30
1.5.2 Εποπτεία ασφάλειας (security monitoring)	32
1.5.3 Ανάλυση ασφάλειας (security analysis)	32
1.5.4 Προσδιορισμός περιθωρίων ασφαλείας (security margin determination)	32
1.5.5 Εκτίμηση ασφάλειας τάσεως (Voltage Security Assessment)	32
1.6 Σχήματα προστασίας συστήματος	33
1.6.1 Ορισμός και απαιτήσεις προστασίας	33

1.6.2	Κατηγοριοποίηση σχημάτων προστασίας συστήματος	34
1.7	Επισκόπηση βιβλιογραφίας	35
1.7.1	Ανίχνευση αστάθειας τάσης	35
1.7.2	Σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης	38
1.8	Αντικείμενο και δομή της διατριβής	40
1.8.1	Αντικείμενο της διατριβής	40
1.8.2	Δομή της διατριβής	41
2	Πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB	45
2.1	Χωρισμός μοντέλου ΣΗΕ σε χρονικές κλίμακες	45
2.2	Μοντελοποίηση διατάξεων ΣΗΕ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα	48
2.2.1	Σύγχρονες γεννήτριες	49
2.2.2	Ρυθμιστές στροφών	52
2.2.3	Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης	52
2.2.4	Σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης	52
2.2.5	Σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου	56
2.2.6	Προστασία υπότασης γεννητριών	58
2.2.7	Φορτία	58
2.2.8	Συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο	60
2.2.9	Αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης - απόζεύξης στατών διατάξεων αντιστάθμισης	61
2.2.10	Εξισώσεις δικτύου	62
2.3	Μέθοδος προσομοίωσης	63
2.3.1	Χρονική προσομοίωση	63
2.3.2	Αραιότητα πινάκων και υπολογιστικές τεχνικές	66
2.4	Ανάλυση ευστάθειας τάσεως	67
2.4.1	Ιακωβιανοί πίνακες συστήματος	67
2.4.2	Υπολογισμός κρίσιμης ιδιοτιμής	69
2.4.3	Προσδιορισμός οριών φόρτισης	70
2.4.4	Υπολογισμός ευαισθησιών	73
3	Ανίχνευση αστάθειας τάσης	75
3.1	Ανίχνευση αστάθειας τάσης με επιτήρηση ΣΑΤΥΦ	75
3.1.1	Παραδοχές και ικανή συνθήκη ευστάθειας	76
3.1.2	Μέθοδος LIVES	78
3.2	Ανίχνευση αστάθειας τάσης με μέτρηση φασιθετών	80
3.2.1	Γενίκευση συνθηκών ευστάθειας τάσης σε ακτινικά δίκτυα χωρίς απώλειες	81
3.2.2	Συνθήκες ευστάθειας σε γενικευμένα βροχοειδή δίκτυα	87
4	Συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση	93
4.1	Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας βασισμένο στη μέθοδο LIVES (ΣΑ1)	94
4.2	Αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας (ΣΠ1.1)	96
4.2.1	Υποσύστημα αποκατάσταση ευστάθειας	96
4.2.2	Υποσύστημα αποκατάσταση λειτουργίας ΣΑΤΥΦ	99
4.2.3	Παραλλαγή με άμεση αποκοπή φορτίου (ΣΠ1.2)	102
4.3	Άμεση αποκοπή φορτίου βασισμένη στη μέθοδο LIVES (ΣΠ1.3)	103
4.4	Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας βασισμένο σε μετρήσεις φασιθετών (ΣΑ2)	104
4.5	Υλοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB	107
4.5.1	Υλοποίηση συστημάτων με βάση LIVES	107

4.5.2	Υλοποίηση ανίχνευσης ΣΑ2	119
5	Εφαρμογές συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας (μέθοδος LIVES)	123
5.1	Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με δυναμικά επαναφερόμενα φορτία	124
5.1.1	Περιγραφή συστήματος	124
5.1.2	Εφαρμογή προστασίας στο Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές	126
5.1.3	Εφαρμογή προστασίας στο Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές	129
5.2	Nordic Test System	135
5.2.1	Περιγραφή και προσομοίωση συστήματος	136
5.2.2	Εφαρμογή συστήματος ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1	140
5.2.3	Εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.1	145
5.2.4	Εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.3	154
5.2.5	Σύγκριση συστημάτων προστασίας ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3	163
5.3	Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα του 2010	165
5.3.1	Περιγραφή στιγμιότυπου και διαταραχής	166
5.3.2	Αύξηση ικανότητας μεταφοράς με χρήση άεργης αντιστάθμισης	167
5.3.3	Εφαρμογή συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας	171
6	Εφαρμογές ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μέτρηση φασιθετών	177
6.1	Εφαρμογή στο τυποποιημένο σύστημα Nordic Test System	177
6.1.1	Συνοπτική περιγραφή συστήματος δοκιμών και διαταραχής	178
6.1.2	Περιγραφή συστήματος ανίχνευσης	178
6.1.3	Ανίχνευση αστάθειας μέσω οιονεί στατικής προσομοίωσης	181
6.1.4	Ανίχνευση αστάθειας μέσω λεπτομερούς προσομοίωσης	186
6.1.5	Επίδραση ευαισθησίας φορτίου ως προς την τάση	191
6.1.6	Επίδραση χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών στον δείκτη NLI	193
6.2	Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα	196
6.2.1	Περιγραφή Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος και παραμέτρων ΣΑ2	196
6.2.2	Διακοπή της 12 ^{ης} Ιουλίου 2004	201
6.2.3	Παραλλαγή ενισχυμένου συστήματος και σενάρια διαταραχών	202
6.2.4	Εφαρμογή ΣΑ2 στο ασταθές σενάριο	204
6.2.5	Εφαρμογή ΣΑ2 στο ευσταθές σενάριο	211
7	Συμπεράσματα, συμβολή και προοπτικές	215
7.1	Συμπεράσματα	215
7.2	Συμβολή της διατριβής	218
7.3	Προοπτικές περαιτέρω έρευνας και εφαρμογές	221
A	WPSTAB Ver. 5.004 2016	223
A.1	Δομή φακέλου WPSTAB	223
A.2	Απαιτήσεις για τη χρήση του Plot	224
A.3	Επεξεργασία πηγαίου κώδικα WPSTAB	224
A.4	Ανάλυση ευαισθησιών	224
A.5	Επιλογή LIVES Protection	227
A.6	New LILVES Index (NLI)	227
A.7	Επιλογή τύπων Συστημάτων Προστασίας Υπερδιέγερσης	228

A.8	Νέες αποκρίσεις - Plots	228
A.9	Νέα μηνύματα εξόδου κεντρικής κονσόλας	229
B	Συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας	231
Γ	Δεδομένα εφαρμογών	235
Γ.1	Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών	235
Γ.2	Τυποποιημένο σύστημα δοκιμών Nordic Test System της IEEE Task Force	237
Γ.3	Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα	239
	Βιβλιογραφία	241
	Δημοσιεύσεις του συγγραφέα	249

Κατάλογος πινάκων

5.1	Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2	130
5.2	Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2 μόνο στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής	132
5.3	Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη και εφαρμογή ΣΠ1.1 στους αυτομετασχηματιστές και ΣΠ1.2 στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής	134
5.4	Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses	141
5.5	Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB	147
5.6	Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB	151
5.7	Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.3 και 8% αποκοπή φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB	155
5.8	Ιεράρχηση ζυγών φορτίου Κεντρικής περιοχής Nordic Test System, ασταθές σενάριο, χωρίς εφαρμογή προστασίας, με βάση τα στοιχεία του κάθετου διανύσματος \tilde{n}_i , σε προσομοίωση WPSTAB	159
5.9	Ακολουθία ενεργοποιήσεως ΣΠ1.3 για διάφορα ποσοστά αποκοπής φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, σε προσομοίωση WPSTAB	161
5.10	Επίδραση εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, σε προσομοίωση WPSTAB	162
5.11	Επίδραση σεναρίων διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, σε προσομοίωση WPSTAB	163
5.12	Αρχικά δεδομένα ζυγών ΥΤ αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15 ^{ης} Ιουνίου 2010	168
5.13	Δεδομένα πλευράς ΜΤ αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15 ^{ης} Ιουνίου 2010	169
5.14	Στοιχεία μετασχηματιστών ανύψωσης των αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15 ^{ης} Ιουνίου 2010	170
5.15	Στοιχεία συστοιχιών πυκνωτών αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010	170
5.16	Αλληλουχία γεγονότων, ΕΔΣ 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, με απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ και εφαρμογή μόνο επιτήρησης ευστάθειας τάσης ΣΑ1	172
5.17	Αλληλουχία γεγονότων, ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, με απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ και εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.1	174
6.1	Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses	187
6.2	Επίδραση κοινών εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΑ2, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, σε προσομοίωση WPSTAB	192

6.3	Επίδραση διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΑ2, Nordic Test System, ασταθή σενάρια, σε προσομοίωση WPSTAB	194
6.4	Συνοριακοί ζυγοί άφιξης περιοχής Αθηνών για εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης ΣΑ2 και αντίστοιχοι συνοριακοί ζυγοί αναχώρησης, μέσω διασύνδεσης γραμμών 400 kV	198
6.5	Αλληλουχία σημαντικότερων γεγονότων νότιου συστήματος, προσομοίωση ασταθούς σεναρίου με απώλεια Αλιβερίου ΙΙΙ και εφαρμογή ΣΑ2	205
6.6	Αλληλουχία σημαντικότερων γεγονότων νότιου συστήματος, προσομοίωση ευσταθούς σεναρίου χωρίς απώλεια Αλιβερίου ΙΙΙ και εφαρμογή ΣΑ2	211
B.1	Συνοπτική περιγραφή συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση	231
Γ.1	Δεδομένα μετασχηματιστών διανομής και αυτομετασχηματιστών Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών	235
Γ.2	Δεδομένα γεννητριών και μετασχηματιστών ανύψωσης Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών .	235
Γ.3	Δεδομένα γραμμών Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών	236
Γ.4	Δεδομένα φορτίων Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών	236
Γ.5	Δεδομένα αρχικής χρονικής καθυστέρησης T_1 και διαδοχικής χρονικής καθυστέρησης T_2 ΣΑΤΥΦ μετασχηματιστών Nordic Test System	237
Γ.6	Κατανάλωση ισχύος στους ζυγούς διανομής υπό ονομαστική τάση 20 kV, Nordic Test System	237
Γ.7	Δεδομένα σεναρίων με διαφοροποιημένους εκθέτες φορτίου, για την Κεντρική περιοχή του Nordic Test System	238
Γ.8	Επιβαλλόμενες διαταραχές στο σύστημα κατά την προσομοίωση	239
Γ.9	Ονομαστική ισχύς θερμικών μονάδων νοτίου συστήματος 12 ^{ης} Ιουλίου 2004	240

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ	13
1.2	Σύστημα άπειρου ζυγού - απομονωμένου φορτίου	19
1.3	Κανονικοποιημένες αποκρίσεις ενεργού ισχύος, τάσης και ρεύματος συναρτήσει της αντίστασης του φορτίου	20
1.4	Καμπύλες PV	22
1.5	Χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίου και δικτύου	23
1.6	Μηχανισμοί αστάθειας τάσης σε εκθετικό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, με $\alpha = \beta = 0$	25
1.7	Μηχανισμοί αστάθειας τάσης σε εκθετικό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, με $\alpha = \beta = 0.77$	25
1.8	Διαχωρισμός λειτουργικών καταστάσεων ΣΗΕ	31
2.1	Χωρισμός σε χρονικές κλίμακες και προσεγγιστικά μοντέλα ΣΗΕ	48
2.2	Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής	50
2.3	Διάγραμμα βαθμίδων αθροιστικού τύπου ΣΠΥ	53
2.4	Διάγραμμα βαθμίδων διακοπτικού ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος ελέγχου	55
2.5	Διάγραμμα βαθμίδων διακοπτικού ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος σφάλματος	56
2.6	Μοντέλο συστήματος προστασίας ρεύματος στάτη	57
2.7	Ισοδύναμο κύκλωμα π μετασχηματιστή.	61
2.8	Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ	62
2.9	Χρονική εξέλιξη προσομοίωσης WPSTAB	64
2.10	Απόκριση ρεύματος στάτη και μακροπρόθεσμη τιμή ισορροπίας για ανάλυση ευστάθειας	69
2.11	Επιφάνεια ορίων φόρτισης και κάθετο διάνυσμα	73
3.1	Μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ που τροφοδοτεί φορτίο ευαίσθητο ως προς την τάση	76
3.2	Ακτινικό δίκτυο χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$	81
3.3	Κανονικοποιημένες αποκρίσεις ενεργού ισχύος, τάσης και ρεύματος συναρτήσει της αγωγιμότητας του φορτίου	82
3.4	Ακτινικό δίκτυο με ενδιάμεσο ζυγό, χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$	83
3.5	Ακτινικό δίκτυο με μετασχηματιστή εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ	84
3.6	Ακτινικό δίκτυο με ενδιάμεσο ζυγό, ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$	87
3.7	Διάδρομος μεταφοράς που αποτελεί σύνολο διαχωρισμού (cut-set) μεταξύ δύο περιοχών ενός ΣΗΕ με τους αντίστοιχους συνοριακούς ζυγούς	89
3.8	Επιφάνεια ορίων φόρτισης και κρίσιμων σημείων στο χώρο των φορτίων	90

4.1	Λειτουργία συστήματος ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1	95
4.2	Λειτουργία ΣΠ1.1	99
4.3	Αναστολή λειτουργίας LTC-range restoration	101
4.4	Ενεργοποίηση LTC-range restoration	102
4.5	Διάγραμμα ροής αρχείων LIVES στο WPSTAB	120
4.6	Λεπτομέρεια διαγράμματος ροής ρουτινών NLI στο WPSTAB	121
5.1	Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών	125
5.2	Αποκρίσεις Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές, χωρίς προστασία	127
5.3	Συνολική καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς και ζήτηση Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2	128
5.4	Αποκρίσεις ζυγού 3 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2	129
5.5	Αποκρίσεις Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές, χωρίς προστασία	131
5.6	Αποκρίσεις ζυγού 1 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2 μόνο στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής	133
5.7	Αποκρίσεις ΑΜ/Σ-1 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη και εφαρμογή ΣΠ1.1 στους αυτομετασχηματιστές και ΣΠ1.2 στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής	135
5.8	Μονογραμμικό διάγραμμα Nordic Test System	137
5.9	Απόκριση τάσης ζυγού YYT 4044 και ΗΕΔ διεγέρσεως γεννήτριας g12, Nordic Test System, ασταθές σενάριο χωρίς προστασία, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses	139
5.10	Αποκρίσεις ζυγού MT 3, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΑ1, προσομοίωση WPSTAB και Ramses	142
5.11	Αποκρίσεις ζυγού MT 43, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση Ramses	143
5.12	Αποκρίσεις ζυγού MT 31, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses	144
5.13	Φιλτράρισμα ψευδούς συναγερωμού LIVES στον ζυγό MT 31, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση Ramses	145
5.14	Απόκριση ΗΕΔ διεγέρσεως γεννήτριας g15, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB	147
5.15	Αποκρίσεις μετασχηματιστή 1–1041, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB	148
5.16	Αποκρίσεις μετασχηματιστή 1–1041, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB	152
5.17	Αποκρίσεις ζυγού MT 5, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB	153
5.18	Αποκρίσεις ζυγού MT 43, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, προσομοίωση WPSTAB	156
5.19	Αποκρίσεις τάσεων ζυγών μεταφοράς, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB	156
5.20	Απόκριση κρίσιμης ιδιοτιμής μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα συστήματος, Nordic Test System, ασταθές σενάριο χωρίς προστασία, σε προσομοίωση WPSTAB	158
5.21	Απόκριση τάσης ζυγού YYT 4044, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ελάχιστης αποκοπής φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB	159

5.22	Συνολική αποκοπή φορτίου συναρτήσει του εφαρμοζόμενου ποσοστού αποκοπής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με εφαρμογή ΣΠ1.3, μέχρι τρεις ενεργοποιήσεις ανά ζυγό, σε προσομοίωση WPSTAB	160
5.23	Απόκριση τάσης ζυγού YYT 4044, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με και χωρίς εφαρμογή προστασίας, σε προσομοίωση WPSTAB	164
5.24	Κατανάλωση ισχύος Κεντρικής περιοχής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο με και χωρίς εφαρμογή προστασίας, σε προσομοίωση WPSTAB	165
5.25	Απόκριση τάσεων κρίσιμων ζυγών 794 και 625, ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III, χωρίς προστασία	167
5.26	Καμπύλες PV ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III, χωρίς προστασία	168
5.27	Μοντέλα παράστασης αιολικών πάρκων στο πρόγραμμα WPSTAB	169
5.28	Καμπύλες PV ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III και χρήση αντιστάθμισης στα αιολικά πάρκα Πελοποννήσου	171
5.29	Αποκρίσεις ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III και χρήση αντιστάθμισης στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης	172
5.30	Καμπύλη PV ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III με εφαρμογή ΣΑ1	173
5.31	Καμπύλες PV ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III με και χωρίς εφαρμογή ΣΠ1.1	175
5.32	Απόκριση τάσης ζυγού 794 (GROUF_31), ΕΔΣ, 15 ^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III με και χωρίς εφαρμογή ΣΠ1.1	176
6.1	Μονογραμμικό διάγραμμα Nordic Test System και συνοριακοί ζυγοί Κεντρικής περιοχής	179
6.2	Απόκριση τάσεων στους συνοριακούς ζυγούς 4041, 4042 και 4044 YYT, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο και εφαρμογή του ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB	181
6.3	Απόκριση φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G και μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο και εφαρμογή του ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB	182
6.4	Μεταβολή ΔG και ΔP στον οριακό ζυγό 4041, ΣΔ-3, ευσταθές σενάριο, ΣΑ2, προσομοίωση WPSTAB	183
6.5	Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB	184
6.6	Απόκριση YYT τάσεων στους οριακούς ζυγούς, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, εφαρμογή ΣΑ2, προσομοίωση WPSTAB	184
6.7	Απόκριση ευαισθησίας και κρίσιμης ιδιοτιμής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB	185
6.8	Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB	186
6.9	Απόκριση P και G συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, ΣΔ-3, ασταθές σενάριο, εφαρμογή ΣΑ2, προσομοίωση WPSTAB	187
6.10	Απόκριση μέτρου τάσης με και χωρίς θόρυβο μέτρησης, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, προσομοίωση Ramses	188
6.11	Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση Ramses	189
6.12	Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση Ramses	190
6.13	Απόκριση $\bar{P}(t_k)$ και $\bar{G}(t_k)$ συνοριακού ζυγού 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο, εφαρμογή ΣΑΑ-2, προσομοίωση Ramses	191

6.14	Επίδραση κοινών εκθετών φορτίου στους δείκτες NLI, Nordic Test System, ευσταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας B), σε προσομοίωση WPSTAB	193
6.15	Επίδραση διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στους δείκτες NLI, Nordic Test System, ευσταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας B), σε προσομοίωση WPSTAB	194
6.16	Επίδραση χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών ΔT του ΣΑ2 στο δείκτη NLI, Nordic Test System, ασταθές σενάριο	195
6.17	Διάδρομος μεταφοράς 400 kV από το Βόρειο σύστημα προς την περιοχή των Αθηνών. Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα 2004	197
6.18	ΚΥΤ περιοχής Αθηνών	199
6.19	Απόκριση τάσης ζυγού ΥΥΤ 620, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές και ευσταθές σενάριο	203
6.20	Απόκριση ενεργού παραγωγής θερμικών μονάδων νότιου συστήματος, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	204
6.21	Καμπύλη PV συστήματος, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	206
6.22	Απόκριση τάσης ζυγού ΥΤ 710, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	207
6.23	Απόκριση ΣΑΤΥΦ περιοχής πρωτεύουσας, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	207
6.24	Απόκριση ευαισθησίας και κρίσιμης ιδιοτιμής, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	208
6.25	Απόκριση δεικτών NLI, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	209
6.26	Απόκριση P και G συνοριακών ζυγών 610, 620, 648, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	210
6.27	Λεπτομέρεια απόκρισης P οριακών ζυγών 620, 648, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ασταθές σενάριο	211
6.28	Απόκριση ενεργού παραγωγής θερμικών μονάδων νότιου συστήματος, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ευσταθές σενάριο	212
6.29	Καμπύλη PV συστήματος και απόκριση τάσεων ζυγών, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ευσταθές σενάριο	213
6.30	Απόκριση δεικτών NLI και P , G , 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ευσταθές σενάριο	213
6.31	Απόκριση ευαισθησίας και κρίσιμης ιδιοτιμής, 12 ^{ης} Ιουλίου 2004, ευσταθές σενάριο	214
A.1	Επιλογή ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004	225
A.2	Επιτυχής καταχώρηση επιλογής ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004	225
A.3	Επιλογές ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004	226
A.4	Επιλογή ποσοστού αποκοπής προστασίας LIVES, WPSTAB 5.004	227
A.5	Νέες επιλογές γραφικών αποκρίσεων, WPSTAB 5.004	229

Συντομογραφίες

DC	Direct Current
FACTS	Flexible A.C. Transmission System
HVDC	High Voltage Direct Current
LA	LIVES-alarm
LIVES	Local Identification of Voltage Emergency Situations
LR	LIVES-restore
LTC-rr	LTC-range restoration
NLI	New LIVES Index
OEL	Over Excitation Limiter
PMU	Phasor Measurement Unit
pu	ανά μονάδα (αμ)
QSS	Quasi Steady State
RAS	Remedial Action Scheme
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SIPS	System Integrity Protection Schemes
SPS	System Protection Schemes
STATCOM	STATic synchronous COMpensator
SVC	Static Var Compensator
TVE	Total Vector Error
UPS	Uninterruptible Power Supply
UV	Undervoltage
UVLS	Undervoltage Load-Shedding
VSA	Voltage Security Assessment
WAMS	Wide Area Monitoring System
ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΗΣ	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός
ΑΜ/Σ	Αυτομετασχηματιστής
ΑΡΤ	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης
Αλγ.	Αλγόριθμος
Β/Κ	Βραχυκύκλωμα
Β/Π	Βραχυπρόθεσμη
ΕΔΣ	Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα
Εικ.	Εικόνα
Εν.	Ενότητα
ΗΕΔ	Ηλεκτρεργετική Δύναμη
ΚΕΕ	Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας
ΚΜΟ	Κινητός Μέσος Όρος

ΚΥΤ	Κέντρα Υπερηψηλής Τάσης
Κεφ.	Κεφάλαιο
ΛΑΓΗΕ	Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
Μ/Π	Μακροπρόθεσμη
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΜΕΔ	Μαγνητεργετική Δύναμη
ΜΤ	Μέση Τάση (MV)
ΝΖ	Νεκρή Ζώνη
ΠΡΤ	Περιοριστής Ρεύματος Τυμπάνου
Πίν.	Πίνακας
Παρ.	Παράγραφος
ΣΑ1	Σύστημα επιτήρησης τάσης μέσω LIVES
ΣΑ2	Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας βασισμένο σε μετρήσεις φασιθετών
ΣΑΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΙ	Συντελεστής Ισχύος
ΣΠ1.1	Αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης
ΣΠ1.2	Παραλλαγή ΣΠ1.1 με επιπλέον δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου για δυναμικά επαναφερόμενα φορτία
ΣΠ1.3	Ανίχνευση αστάθειας τάσης μέσω LIVES και εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου
ΣΠΣ	Σχήμα Προστασίας Συστήματος
ΣΠΥ	Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης
Σχ.	Σχήμα
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση (HV)
ΥΥΤ	Υπερυψηλή Τάση (EHV)
Υποεν.	Υποενότητα
ΧΠ	Χωρίς Προστασία

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η βιομηχανική ανάπτυξη και εξέλιξη των κοινωνιών, αναμφίβολα, στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία παρέχει έναν πολύ αποδοτικό τρόπο μεταφοράς και απεριόριστη σχεδόν ευελιξία στην μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας. Για αυτό το λόγο από τις αρχές του προηγούμενου αιώνα αναπτύχθηκαν τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), τα οποία αποτελούνται από ένα σύνολο στοιχείων και εγκαταστάσεων που στόχο έχουν να καλύψουν τις ανάγκες των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αν και τα διάφορα ΣΗΕ διαφέρουν ως προς την έκταση και τα δομικά τους στοιχεία, όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά, παρόμοια δομή και κοινό στόχο. Συγκεκριμένα όλα τα ΣΗΕ αποτελούνται από τρία υποσυστήματα, ήτοι το *Σύστημα Παραγωγής*, το *Σύστημα Μεταφοράς* και το *Δίκτυο Διανομής*, ενώ στόχος είναι η τροφοδότηση των τελικών καταναλωτών με την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ, η οποία πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιεί:

- Τη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση
- υπό σταθερή συχνότητα του δικτύου
- και σταθερή τάση
- με υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας

και όλα αυτά με το μικρότερο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος, στο οποίο τα τελευταία χρόνια συνυπολογίζεται το θέμα των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (CO₂)

Αν και παλαιότερα υπήρχε η τάση να σχεδιάζονται τα ΣΗΕ με μεγάλα περιθώρια ασφαλείας, τις τελευταίες τρεις δεκαετίες οι περιβαλλοντικές πιέσεις (που κάνουν πιο δύσκολη την δημιουργία νέων σταθμών παραγωγής και γραμμών μεταφοράς), η ανισομερής κατανομή του φορτίου (μακριά από την παραγωγή) και η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των υφιστάμενων υποδομών, με αποτέλεσμα νέα φαινόμενα αστάθειας να εμφανίζονται όλο και συχνότερα.

Τέτοια φαινόμενα είναι μεταξύ άλλων αυτά που χαρακτηρίζονται διεθνώς με τον όρο αστάθεια τάσης και περιλαμβάνουν την αργή, βαθμιαία βύθιση των τάσεων των ζυγών μιας περιοχής, η οποία μπορεί να επεκταθεί και στο υπόλοιπο ΣΗΕ καταλήγοντας σε αστάθεια και ολική σβέση του συστήματος, γνωστή ως κατάρρευση τάσης. Αυτά τα φαινόμενα, που επηρεάζουν εκατομμύρια καταναλωτές, έχουν αρχίσει να εμφανίζονται από την δεκαετία του 1970¹, ενώ και στην Ελλάδα έχουν καταγραφεί παρόμοια περιστατικά, με την τελευταία κατάρρευση να λαμβάνει χώρα τον Ιούλιο του 2004, πριν την έναρξη των

¹Χαρακτηριστικά παραδείγματα: Νέα Υόρκη 1970, Βέλγιο 1982, Ιαπωνία 1983, Γαλλία 1987, αλλά και πιο πρόσφατα Βορειοανατολικής Ακτής ΗΠΑ, Καναδά 2003, Ινδία 2012, Βραζιλία 1999, 2009, Σουηδία 2003 κλπ.

Ολυμπιακών Αγώνων, που οδήγησε το νότιο διασυνδεδεμένο σύστημα εκτός λειτουργίας για αρκετές ώρες.

Δεδομένου ότι η ενίσχυση του συστήματος, που είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης αυτών των φαινομένων, γίνεται με μεγαλύτερη δυσκολία σε σχέση με παλαιότερες εποχές, ενώ τα κόστη και ο χρόνος αποπεράτωσης των ενισχυτικών έργων είναι αρκετά μεγάλα, το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει στραφεί στην ανάλυση της ευστάθειας τάσεως των ΣΗΕ και στο σχεδιασμό διατάξεων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση, κάτι που αποτελεί και αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Η διάρθρωση του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου είναι η ακόλουθη. Στην Εν. 1.1 γίνεται μια σύντομη αναφορά στις απαραίτητες μαθηματικές έννοιες και σχέσεις που διέπουν την δυναμική γραμμικών και μη γραμμικών συστημάτων και θα βοηθήσουν στην ανάλυση και εξήγηση της ευστάθειας. Στη συνέχεια, στην Εν. 1.2 γίνεται κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ, για να ακολουθήσει στην Εν. 1.3 μια περιγραφή των μηχανισμών αστάθειας τάσης και στην Εν. 1.4 συνοπτική αναφορά συγκεκριμένων μέτρων αντιμετώπισης της. Στην Εν. 1.5 περιγράφεται το εννοιολογικό πλαίσιο εντός του οποίου ορίζεται η ασφάλεια ΣΗΕ για να ακολουθήσει στην Εν. 1.6 ο ορισμός και η περιγραφή των σχημάτων προστασίας συστήματος, ενώ στην Εν. 1.7 γίνεται επισκόπηση της βιβλιογραφίας. Το κεφάλαιο κλείνει με την Εν. 1.8, όπου παρουσιάζεται το αντικείμενο και η δομή της υπόλοιπης εργασίας.

1.1 Μαθηματικό υπόβαθρο (διαφορικές εξισώσεις)

Οι βασικές έννοιες και τα εργαλεία ανάλυσης των ΣΗΕ προέρχονται από το πεδίο των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων και την ποιοτική θεωρία των διαφορικών εξισώσεων, όπως αναλύεται στη συνέχεια.

1.1.1 Θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας των λύσεων

Όλα τα συνεχή δυναμικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν από ένα σύνολο n διαφορικών εξισώσεων το οποίο μπορεί να γραφεί με την ακόλουθη διανυσματική μορφή [HK96, BD99]:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

όπου \mathbf{x} είναι το $n \times 1$ διάνυσμα κατάστασης, \dot{x}_i , ($i = 1, \dots, n$) είναι η παράγωγος ως προς το χρόνο t των αντίστοιχων μεταβλητών κατάστασης x_i , $i = 1, \dots, n$ και f_i , ($i = 1, \dots, n$) είναι μη γραμμικές, συνεχείς ή/και διαφορίσιμες συναρτήσεις όλων των μεταβλητών κατάστασης x_i .

Η απόκριση κάθε δυναμικού συστήματος στο πεδίο του χρόνου καθορίζεται από την επίλυση του συστήματος (1.1) για μια δεδομένη αρχική συνθήκη t_0 , που συνήθως λαμβάνεται για την χρονική στιγμή $t_0 = 0$:

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.2)$$

Οι σχέσεις (1.1) και (1.2) συνιστούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών του οποίου οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για ύπαρξη λύσεων δίνονται από το παρακάτω θεώρημα “*ύπαρξης και μοναδικότητας των λύσεων*” [HK96]:

1. Εάν $\mathbf{f} \in C^0(U \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n)$, είναι δηλαδή συνεχείς συναρτήσεις στο πεδίο U , τότε για κάθε $\mathbf{x}_0 \in U$, υπάρχει λύση η οποία ορίζεται σε ένα μέγιστο διάστημα ύπαρξης I_{x_0} , το οποίο εξαρτάται από την αρχική συνθήκη: $I_{x_0} : \alpha_{x_0} < t < \beta_{x_0}$. Τόσο το α_{x_0} ή το β_{x_0} ή και τα δύο μπορεί να είναι άπειρα, οπότε η λύση υπάρχει για όλες τις θετικές/αρνητικές τιμές του χρόνου.
2. Εάν επιπλέον $\mathbf{f} \in C^k$, είναι δηλαδή k φορές διαφορίσιμη, τότε η λύση είναι και μοναδική και έχει k συνεχείς παραγώγους. Συνεπώς, η ικανή συνθήκη μοναδικότητας είναι η \mathbf{f} να είναι ομαλή.

3. Όταν το μέγιστο διάστημα ύπαρξης είναι πεπερασμένο, τα οριακά σημεία της λύσης $\mathbf{x}(t)$ καθώς $t \rightarrow \beta^-$ ή $t \rightarrow \alpha^+$, είτε ανήκουν στο σύνορο του U , όταν αυτό είναι φραγμένο, είτε απειρίζονται όταν είναι μη φραγμένο.

Μια λύση $\mathbf{x}(t)$ του προβλήματος αρχικών τιμών συνιστά στο χώρο κατάστασης μια τροχιά. Η τροχιά για $t > 0$ καλείται θετική, ενώ για $t < 0$, αρνητική. Η απεικόνιση του συνόλου των τροχιών για διάφορες αρχικές συνθήκες δημιουργεί εκείνο που στην ανάλυση συστημάτων είναι γνωστό σαν *πορτραίτο φάσεων*.

1.1.2 Σημεία ισορροπίας - Γραμμικοποίηση

Σημεία ισορροπίας ονομάζονται τα σημεία εκείνα $\bar{\mathbf{x}}$ που πληρούν το σύστημα εξισώσεων (1.1) και επιπλέον:

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (1.3)$$

Τα σημεία αυτά είναι σταθερές λύσεις του συστήματος διαφορικών εξισώσεων και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, *τα ευσταθή και ασταθή* σημεία ισορροπίας [BD99]. Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ είναι κατά Liapunov ευσταθές όταν για κάθε περιοχή V του $\bar{\mathbf{x}}$ στο U μπορεί να βρεθεί μια περιοχή $V_1 \subset V$, τέτοια ώστε για κάθε \mathbf{x}_0 που ανήκει στη V_1 , υπάρχει λύση $\mathbf{x}(t)$ και βρίσκεται μέσα στο V για κάθε χρόνο $t > 0$. Αν επιπλέον, όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες εντός της περιοχής V_1 τείνουν στο $\bar{\mathbf{x}}$ καθώς ο χρόνος τείνει στο άπειρο ($t \rightarrow \infty$), τότε το $\bar{\mathbf{x}}$ ονομάζεται *ασυμπτωτικά ευσταθές*. Ένα σημείο ισορροπίας που δεν είναι ευσταθές καλείται ασταθές.

Όπως φαίνεται από τον ανωτέρω ορισμό, η ευστάθεια ή μη ενός σημείου ισορροπίας είναι μια τοπική ιδιότητα του συστήματος. Αν κάποιος ενδιαφέρεται για μια πιο εποπτική εικόνα της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος θα πρέπει να καταφύγει στο πορτραίτο φάσεων του και να δει για ποιες αρχικές συνθήκες οι τροχιές συγκλίνουν ή αποκλίνουν από τα αντίστοιχα σημεία ισορροπίας.

Η μεγαλύτερη περιοχή A του χώρου κατάστασης, γύρω από ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$, για την οποία όλες οι τροχιές με αρχική συνθήκη μέσα σε αυτήν, συγκλίνουν στο $\bar{\mathbf{x}}$, ονομάζεται *περιοχή έλξης* του $\bar{\mathbf{x}}$. Είναι δηλαδή το μεγαλύτερο υποσύνολο $A(\bar{\mathbf{x}})$ του χώρου κατάστασης για το οποίο:

$$\mathbf{x}_0 \in A(\bar{\mathbf{x}}) \Leftrightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x}(t) = \bar{\mathbf{x}} \quad (1.4)$$

Στην εξιδανικευμένη περίπτωση που το δυναμικό σύστημα είναι γραμμικό, η σχέση (1.1) παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1.5)$$

όπου \mathbf{A} είναι ένας $n \times n$ πίνακας σταθερών συντελεστών.

Η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι το $\mathbf{x} = \mathbf{0}$, χαρακτηρίζεται αποκλειστικά από τις ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} και συγκεκριμένα από το πραγματικό τους μέρος. Έτσι, όταν το πραγματικό μέρος είναι αρνητικό το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές και η αντίστοιχη περιοχή έλξης όλος ο χώρος κατάστασης, ενώ όταν έστω και μια ιδιοτιμή έχει πραγματικό μέρος μεγαλύτερο του μηδενός, τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές.

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, τα μη γραμμικά μπορούν να έχουν ένα, περισσότερα του ενός ή κανένα σημείο ισορροπίας, ενώ και η περιοχή έλξης μπορεί να είναι πεπερασμένη. Ωστόσο η μελέτη της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας των μη γραμμικών συστημάτων μπορεί να γίνει με γραμμικοποίηση των μη γραμμικών εξισώσεων γύρω από μια περιοχή των αντίστοιχων σημείων ισορροπίας, χρησιμοποιώντας τους πρώτους όρους του αναπτύγματος Taylor. Συνεπώς, ορίζοντας:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} \quad (1.6)$$

το γραμμικοποιημένο σύστημα λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (1.7)$$

όπου ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του μη γραμμικού συστήματος που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{f}_{\mathbf{x}}(\bar{\mathbf{x}}) \quad (1.8)$$

Με αυτόν τον τρόπο η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη του αντίστοιχου γραμμικοποιημένου και συγκεκριμένα στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα \mathbf{A} .

Ανάλογα με τις τιμές των ιδιοτιμών αυτών τα σημεία ισορροπίας μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες [VV08a]:

- *Υπερβολικά σημεία ισορροπίας*, καλούνται τα σημεία ισορροπίας των οποίων οι ιδιοτιμές έχουν πραγματικό μέρος μη μηδενικό και μπορούν να χωριστούν περαιτέρω στις εξής κατηγορίες:
 - *Ευσταθείς κόμβοι ή καταβόθρες*, καλούνται τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας των οποίων το πραγματικό μέρος των ιδιοτιμών είναι αρνητικό.
 - *Ασταθείς κόμβοι ή πηγές*, καλούνται τα ασταθή σημεία ισορροπίας για τα οποία όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης έχουν θετικό πραγματικό μέρος.
 - *Σαγματικά σημεία ή διάσελα*, καλούνται τα ασταθή σημεία ισορροπίας για τα οποία ορισμένες ιδιοτιμές έχουν θετικό πραγματικό μέρος και οι υπόλοιπες αρνητικό.
- *Μη υπερβολικά σημεία ισορροπίας*, τα οποία περιλαμβάνουν και ιδιοτιμές με πραγματικό μέρος ίσο με μηδέν. Στην περίπτωση αυτή η γραμμικοποίηση δεν προσφέρει καμιά πληροφορία σχετικά με την ευστάθεια και θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο ορισμός της ευστάθειας που έχει ήδη δοθεί. Μια ιδιαίτερη κατηγορία μη υπερβολικών σημείων ισορροπίας είναι η εξής:
 - *Κέντρα*, καλούνται τα σημεία ισορροπίας τα οποία χαρακτηρίζονται από ένα συζυγές ζευγάρι μιγαδικών ιδιοτιμών με μηδενικό πραγματικό μέρος.
 - *Σαγματικοί κόμβοι*, πρόκειται για έναν συγκεκριμένο τύπο μη υπερβολικού σημείου ισορροπίας του οποίου μία τουλάχιστον ιδιοτιμή είναι ίση με μηδέν. Η χαρακτηριστική ιδιότητα ενός σαγματικού κόμβου είναι ότι υπάρχει μια κατεύθυνση στο χώρο καταστάσεων, τέτοια ώστε οι τροχιές με αρχικές συνθήκες στη μία πλευρά του σημείου ισορροπίας να συγκλίνουν σε αυτό, ενώ από την άλλη μεριά να αποκλίνουν από αυτό.

1.1.3 Αναλλοίωτες πολλαπλότητες

1.1.3.1 Ιδιοτιμές-Ιδιοδιανύσματα

Η απόκριση ενός γραμμικού συστήματος (1.5) ή (1.7) μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια των ιδιοτιμών (λ) και των δεξιών (\mathbf{v}) και του αριστερών (\mathbf{w}) ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα κατάστασης \mathbf{A} . Το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα, που αντιστοιχούν στην ιδιοτιμή λ_i , ορίζονται αντίστοιχα ως εξής:

$$\mathbf{A} \mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.9\alpha)$$

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{w}_i^T, \quad i = 1, \dots, n \quad (1.9\beta)$$

Αν επιπλέον θεωρηθεί ότι οι n ιδιοτιμές λ_i είναι διακριτές (δεν υπάρχουν δηλαδή πολλαπλές ιδιοτιμές), τότε το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα διαφορετικών ιδιοτιμών είναι επιπλέον ορθογώνια μεταξύ τους, δηλαδή ικανοποιούν τη σχέση:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_j = 0, \forall i \neq j \quad (1.10)$$

Χρησιμοποιώντας τις ιδιοτιμές και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα, η χρονική απόκριση ενός γραμμικού συστήματος με αρχική συνθήκη \mathbf{x}_0 δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_0 \quad (1.11)$$

Η σχέση (1.11), πέρα από τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος συναρτήσει των αρχικών συνθηκών, αποδεικνύει ότι εάν το σύστημα έχει αρχική τιμή πάνω σε ένα δεξιό ιδιοδιάνυσμα, τότε η απόκριση $\mathbf{x}(t)$ θα παραμείνει σε αυτό για όλο το χρόνο, $t \rightarrow \infty$.

Πράγματι, αν θεωρηθεί ότι η αρχική συνθήκη είναι συγγραμμική με ένα δεξί ιδιοδιάνυσμα, έστω \mathbf{v}_i , δηλαδή ισχύει:

$$\mathbf{x}_0 = a \mathbf{v}_i, a \in \mathfrak{R} \quad (1.12)$$

αντικαθιστώντας τη σχέση (1.12) στην (1.11) και κάνοντας χρήση της (1.10), η χρονική απόκριση του συστήματος λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{x}(t) = a e^{\lambda_i t} (\mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T) \mathbf{v}_i = b \mathbf{v}_i \quad (1.13)$$

Η σχέση (1.13) εκφράζει την *αναλλοίωτη ιδιότητα* ενός ιδιοδιανύσματος, η οποία μπορεί να επεκταθεί και στους υποχώρους που ορίζονται από έναν αριθμό διαφορετικών ιδιοδιανυσμάτων. Επομένως, η απόκριση του συστήματος βρίσκεται πάντα πάνω στο γραμμικό υπόχωρο που ορίζουν τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα που αποκαλύπτεται από τη μελέτη της σχέσης (1.11) είναι το γεγονός πως ιδιοτιμές με αρνητικό πραγματικό μέρος θα έχουν σαν αποτέλεσμα η απόκριση του συστήματος να τείνει στο 0 καθώς ο χρόνος $t \rightarrow \infty$ (το μηδέν είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας των γραμμικών συστημάτων), ενώ ιδιοτιμές με θετικό πραγματικό μέρος έχουν σαν αποτέλεσμα οι αποκρίσεις να πηγαίνουν από το 0 καθώς ο χρόνος $t \rightarrow -\infty$.

Με βάση αυτά μπορούν να οριστούν διάφοροι υπόχωροι, ανάλογα με τις ιδιοτιμές και τις αποκρίσεις του συστήματος. Συγκεκριμένα ο γραμμικός υπόχωρος που ορίζεται από τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε ιδιοτιμές με αρνητικό πραγματικό μέρος ονομάζεται ευσταθής ιδιόχωρος του γραμμικού συστήματος, ενώ ο υπόχωρος που αρίζεται από τα ιδιοδιανύσματα των ιδιοτιμών με θετικό πραγματικό μέρος ονομάζεται ασταθής ιδιόχωρος. Τέλος, ιδιοδιανύσματα με μηδενικό πραγματικό μέρος ιδιοτιμών διαμορφώνουν τον κεντρικό ιδιόχωρο.

1.1.3.2 Πολλαπλότητες

Όλες οι έννοιες και οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν προηγουμένως και αφορούν τα γραμμικά συστήματα, μπορούν να γενικευτούν και να εφαρμοστούν και στα μη γραμμικά με τη βοήθεια της έννοιας της *πολλαπλότητας*, η οποία παίζει τον ίδιο ρόλο με τα ιδιοδιανύσματα και τους γραμμικούς υποχώρους.

Οι πολλαπλότητες είναι λείες καμπύλες, επιφάνειες ή υπερεπιφάνειες (ανάλογα με το πλήθος των μεταβλητών κατάστασης), οι οποίες δεν τέμνονται μεταξύ τους, ούτε με τον εαυτό τους και δεν έχουν ιδιόμορφα σημεία, ώστε να μπορούν να αντιστοιχηθούν ένα προς ένα με αντίστοιχους γραμμικούς χώρους ιδίων διαστάσεων.

Οι πολλαπλότητες, όπως ακριβώς και τα ιδιοδιανύσματα, διαθέτουν την αναλλοίωτη ιδιότητα, με την έννοια ότι η απόκριση ενός μη γραμμικού συστήματος με αρχική συνθήκη πάνω σε μια πολλαπλότητα θα παραμείνει για όλη τη διάρκεια του χρόνου σε αυτή. Επομένως κατ' αναλογία με τα γραμμικά συστήματα, η ευσταθής, ασταθής και κεντρική πολλαπλότητα του μη γραμμικού συστήματος αντιστοιχούν σε τροχιές που συγκλίνουν (ευσταθείς) ή αποκλίνουν (ασταθείς) από αυτό. Κοντά στα σημεία ισορροπίας οι πολλαπλότητες εφάπτονται των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων που προκύπτουν από τη γραμμικοποίηση του συστήματος.

1.1.4 Διακλαδώσεις

Οι διακλαδώσεις είναι μια έννοια η οποία εμφανίζεται σε μη γραμμικά συστήματα, τα οποία έχουν εξάρτηση από τις τιμές κάποιων παραμέτρων, με αποτέλεσμα μικρή μεταβολή των τιμών αυτών των παραμέτρων να οδηγεί σε αλλαγή της ποιοτικής δομής του συστήματος. Με τον όρο ποιοτική δομή εννοούμε:

- Αριθμό σημείων ισορροπίας
- Αριθμό οριακών κύκλων ⁱⁱ
- Είδος ευστάθειας σημείων ισορροπίας και οριακών κύκλων
- Περίοδος περιοδικών λύσεων

Έστω ένα σύστημα (οικογένεια συστημάτων) που περιγράφεται από τις ακόλουθες ομαλές διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (1.14)$$

όπου \mathbf{x} το $n \times 1$ διάνυσμα κατάστασης και \mathbf{p} το $k \times 1$ διάνυσμα παραμέτρων. Για κάθε τιμή των παραμέτρων \mathbf{p} τα σημεία ισορροπίας του συστήματος δίνονται από τις ακόλουθες αλγεβρικές εξισώσεις:

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (1.15)$$

Η σχέση (1.15) ορίζει μια k -διάστατη πολλαπλότητα στο χώρο κατάστασης και παραμέτρων διάστασης $n + k$. Θεωρώντας τώρα ένα σημείο ισορροπίας $\mathbf{x}^{(1)}$ που αντιστοιχεί σε τιμή των παραμέτρων \mathbf{p}_0 , στο οποίο ο ιακωβιανός πίνακας της \mathbf{f} ως προς \mathbf{x} είναι αντιστρέψιμος, ότι δηλαδή ισχύει:

$$\det \mathbf{f}_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{p}_0) \neq 0 \quad (1.16)$$

τότε, από το θεμελιώδες θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων, συνάγεται ότι υπάρχει συνάρτηση $\mathbf{g}^{(1)}$ τέτοια ώστε:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{g}^{(1)}(\mathbf{p}) \quad (1.17)$$

Δηλαδή τα σημεία ισορροπίας δίνονται από έναν κλάδο (πολλαπλότητα) συναρτήσεων των τιμών των παραμέτρων. Αν στην τιμή των παραμέτρων \mathbf{p}_0 αντιστοιχούν και άλλα σημεία ισορροπίας, έστω $\mathbf{x}^{(2)}$, για τα οποία επίσης ο ιακωβιανός πίνακας είναι ομαλός (δηλαδή αντιστρέψιμος) τότε και πάλι από το θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων έχουμε άλλη μια ομαλή συνάρτηση $\mathbf{g}^{(2)}$:

$$\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p}) \quad (1.18)$$

ⁱⁱΠρόκειται για ειδική περίπτωση απομονωμένης περιοδικής τροχιάς, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ευσταθής, οπότε όλες οι τροχιές που αρχίζουν στην εγγύτητα του προσεγγίζουν τον οριακό κύκλο, είτε ασταθής οπότε όλες οι τροχιές που αρχίζουν στην εγγύτητα του απομακρύνονται από αυτόν.

τέτοια ώστε η $\mathbf{x}^{(2)} = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p}_o)$ να δίνει έναν άλλο κλάδο (πολλαπλότητα) σημείων ισορροπίας της (1.14) συναρτήσει των παραμέτρων \mathbf{p} .

Ο όρος *διακλάδωση* προκύπτει από το γεγονός ότι διαφορετικοί κλάδοι των συναρτήσεων που ορίζονται από εξισώσεις σαν τις (1.17) και (1.18), συγχωνεύονται και ως εκ τούτου «διακλαδίζονται». Στα σημεία διακλαδώσεων ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{f}_x είναι ιδιάζων, δηλαδή μη αντιστρέψιμος και το θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων δεν μπορεί να εφαρμοστεί.

Γενικά μια διακλάδωση εμφανίζεται σε κάθε σημείο του χώρου των παραμέτρων, στο οποίο παρατηρείται αλλαγή στην ποιοτική δομή του συστήματος (1.14) για μια μικρή μεταβολή των παραμέτρων \mathbf{p} . Πιθανές μεταβολές στην ποιοτική δομή ενός συστήματος που συνιστούν διακλαδώσεις είναι [VV08a]:

- Μεταβολή του πλήθους των σημείων ισορροπίας ή των οριακών κύκλων.
- Μεταβολή του είδους της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας ή των οριακών κύκλων.
- Μεταβολή της περιόδου των περιοδικών λύσεων.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διακλαδώσεων ανάλογα με το είδος της αλλαγής της δομικής συμπεριφοράς του συστήματος καθώς και διάφορες υποκατηγορίες αυτών, που χαρακτηρίζονται από τον ελάχιστο αριθμό αναγκαίων συνθηκών που απαιτούνται για την εμφάνισή τους, που αποτελεί και τη συνδιάσταση της κάθε διακλάδωσης [HK96].

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας οι διακλαδώσεις που εμφανίζονται πιο συχνά και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια τάσης, είναι αυτές οι *διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου*, οι οποίες και αναλύονται παρακάτω.

1.1.5 Διακλάδωση σαγματικού κόμβου

Η διακλάδωση σαγματικού κόμβου εμφανίζεται όταν δυο σημεία ισορροπίας συγχωνεύονται και εξαφανίζονται (ή, αντίστροφα, αναδύονται) ταυτόχρονα. Ένα από τα σημεία ισορροπίας έχει θετική ιδιοτιμή και το άλλο αρνητική ιδιοτιμή που μηδενίζονται ταυτόχρονα στο σημείο της διακλάδωσης. Αν επιπλέον όλες οι υπόλοιπες ιδιοτιμές του συστήματος έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος τότε το ένα από τα δύο σημεία ισορροπίας που συμμετέχουν στην διακλάδωση είναι ευσταθές και το άλλο ασταθές.

Οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για την εμφάνιση διακλάδωσης σαγματικού κόμβου είναι [Σακ10]:

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (1.19\alpha)$$

$$\det \mathbf{f}_x(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) = 0 \quad (1.19\beta)$$

$$\mathbf{w} \cdot \mathbf{f}_p^T(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) \neq \mathbf{0} \quad (1.19\gamma)$$

$$\mathbf{v}^T \cdot \left(\sum_{i=1}^n w_i \cdot \mathbf{H}_i \right) \cdot \mathbf{v} \neq 0 \quad (1.19\delta)$$

όπου \mathbf{v} , \mathbf{w} το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα αντίστοιχα της μηδενικής ιδιοτιμής του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης και \mathbf{H}_i ο Εσσιανός πίνακας (δεύτερης παραγώγου) της \mathbf{f} , τα στοιχεία του οποίου δίνονται από τον τύπο:

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_i \cdot \partial x_j} \quad (1.20)$$

Η προβολή όλων των σημείων ύπαρξης διακλάδωσης σαγματικού κόμβου στον k -διάστατο χώρο των παραμέτρων δημιουργεί μια επιφάνεια διάστασης $k - 1$, η οποία καλείται *επιφάνεια διακλαδώσεων*. Η επιφάνεια διακλαδώσεων φράσσει την *περιοχή ύπαρξης λύσης* του συστήματος στον χώρο των

παραμέτρων, δηλαδή καθορίζει την περιοχή του χώρου των παραμέτρων στην οποία υπάρχουν σημεία ισοροπίας.

Να σημειωθεί ότι οι (1.19α) και (1.19β) αποτελούν τις αναγκαίες συνθήκες εμφάνισης διακλάδωσης σαγματικού κόμβου και όπως θα εξηγηθεί στην Εν. 2.4 το σημείο στο οποίο ικανοποιούνται αντιστοιχεί σε σημείο αστάθειας.

1.1.6 Συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς

Τα συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς περιγράφονται από ένα σύνολο ομαλών n διαφορικών και m αλγεβρικών εξισώσεων, της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (1.21\alpha)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (1.21\beta)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα των n μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{y} το διάνυσμα των m αλγεβρικών μεταβλητών και \mathbf{p} το διάνυσμα των k παραμέτρων του συστήματος.

Τότε, οι m αλγεβρικές εξισώσεις της (1.21β) ορίζουν μια πολλαπλότητα διάστασης $n + k$, που ονομάζεται *πολλαπλότητα αλγεβρικών περιορισμών*, στον $n + m + k$ χώρο των $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}$.

Αυτού του τύπου τα συστήματα αναλύονται με εφαρμογή του *θεωρήματος των πεπλεγμένων συναρτήσεων*. Θεωρώντας 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 είναι αντιστρέψιμος, τότε με βάση το προαναφερθέν θεώρημα, υπάρχει μια τοπικά μοναδική, ομαλή συνάρτηση \mathbf{F} , τέτοια ώστε:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (1.22)$$

από την οποία έχουν απαλειφθεί οι αλγεβρικές μεταβλητές.

Δεδομένου ότι η \mathbf{F} είναι ομαλή συνάρτηση σε κάθε σημείο που ο πίνακας \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος προκύπτει από το *θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας* ότι υπάρχει μια μοναδική χρονική λύση για το αλγεβρικό-διαφορικό σύστημα των εξισώσεων (1.21). Συμβολίζοντας με U_p το πεδίο ορισμού της πεπλεγμένης συνάρτησης \mathbf{F} στο χώρο κατάστασης, για δεδομένη τιμή των παραμέτρων, η περιοχή αυτή φράσσεται από τα σημεία εκείνα στα οποία ο πίνακας \mathbf{g}_y είναι μη αντιστρέψιμος, όπου και ισχύει:

$$\det \mathbf{g}_y = 0 \quad (1.23)$$

Το πεδίο ορισμού της \mathbf{F} μπορεί επίσης να φράσσεται και από τα φυσικά όρια των μεταβλητών κατάστασης.

Για δεδομένη τιμή των παραμέτρων \mathbf{p} , το σύστημα των (1.21) έχει σημεία ισοροπίας που ικανοποιούν το εξής σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (1.24\alpha)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (1.24\beta)$$

Γραμμικοποιώντας τις εξισώσεις (1.21α) και (1.21β), γύρω από το σημείο ισοροπίας, το σύστημα περιγράφεται από τις εξής σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

όπου \mathbf{J} είναι ο *Ιακωβιανός* πίνακας του αλγεβρικού-διαφορικού συστήματος, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

Θεωρώντας ότι ο πίνακας \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος, μπορούν να απαλειφθούν από την (1.25) οι αλγεβρικές μεταβλητές Δy παίρνοντας το παρακάτω σύστημα εξισώσεων αποτελούμενο μόνον από μεταβλητές κατάστασης:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x] \Delta \mathbf{x} \quad (1.27)$$

Από τη σχέση (1.27) προκύπτει ότι ο πίνακας κατάστασης \mathbf{A} του γραμμικοποιημένου συστήματος είναι ο:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_x = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x \quad (1.28)$$

ο οποίος είναι το συμπλήρωμα Schur [Jen77] του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{g}_y στον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J} . Ο πίνακας \mathbf{A} ονομάζεται και *ελαττωμένος* Ιακωβιανός πίνακας κατάστασηςⁱⁱⁱ εν αντιθέσει με τον *επαυξημένο* Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}^{iv} .

Με βάση τα όσα έχουν ήδη αναφερθεί, γίνεται φανερό ότι η ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας του γραμμικοποιημένου συστήματος και κατ'επέκταση και του μη γραμμικού, εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} .

Από την (1.26) και για αντιστρέψιμο πίνακα \mathbf{g}_y προκύπτει ότι:

$$\det \mathbf{J} = \det \mathbf{g}_y \det [\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x] \quad (1.29)$$

η οποία χρησιμοποιώντας την (1.28) δίνει:

$$\det \mathbf{J} = \det \mathbf{g}_y \det \mathbf{A} \quad (1.30)$$

Επομένως ο μηδενισμός της ορίζουσας του επαυξημένου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J} συμπίπτει με το μηδενισμό της ορίζουσας του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης \mathbf{A} .

1.1.7 Πολλαπλές χρονικές κλίμακες

1.1.7.1 Ιδιάζουσες διαταραχές - Οιονεί στατική προσέγγιση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς οποιουδήποτε φυσικού συστήματος και κατ'επέκταση και των ΣΗΕ γίνεται μέσα από συστήματα διαφορικών εξισώσεων. Σε πολλές περιπτώσεις όμως οι διαφορικές εξισώσεις που περιλαμβάνονται αφορούν φαινόμενα που εξελίσσονται σε διάφορες χρονικές κλίμακες, από τις οποίες άλλες είναι πιο *γρήγορες* και άλλες πιο *αργές*. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυσκολία χρήσης όλων των διαφορικών εξισώσεων σε ένα ενιαίο μοντέλο που να περιγράφει συνολικά το σύστημα. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα και να απλοποιηθεί η ανάλυση, η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι να θεωρηθεί ότι στα ταχέα μεταβατικά φαινόμενα οι αργές μεταβλητές παραμένουν πρακτικά σταθερές, ενώ αντίστοιχα στα αργά μεταβατικά φαινόμενα θεωρείται ότι οι γρήγορες μεταβλητές έχουν ισορροπίσει ακαριαία. Με αυτόν τον τρόπο εισάγεται η έννοια του διαχωρισμού του ενιαίου συστήματος πολλών χρονικών κλιμάκων σε υποσυστήματα με μια χρονική κλίμακα το καθένα.

Όταν είναι εφικτός ο διαχωρισμός των φαινομένων ενός συστήματος σε χρονικές κλίμακες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μοντέλα μειωμένης τάξης (μεταβλητών κατάστασης) για την περιγραφή της κάθε κλίμακας. Ο τρόπος που γίνεται αυτό είναι μέσω της *ανάλυσης των ιδιάζουσών διαταραχών* [O M74, KKO99, VV08a].

Η τυπική μορφή ενός συστήματος ιδιάζουσας διαταραχής είναι εκείνο στο οποίο μια μικρή παράμετρος ϵ πολλαπλασιάζει μία ή περισσότερες από τις παραγώγους των μεταβλητών κατάστασης. Ως εκ

ⁱⁱⁱΟ πίνακας \mathbf{A} ονομάζεται και *Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης*. Στη συνέχεια οι όροι *ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης* και *Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης* θα χρησιμοποιούνται εξίσου.

^{iv}Ο πίνακας \mathbf{J} ονομάζεται και *Ιακωβιανός πίνακας*. Οι όροι *επαυξημένος Ιακωβιανός πίνακας* και *Ιακωβιανός πίνακας* θα χρησιμοποιούνται εξίσου.

τούτου για $\epsilon = 0$ η τάξη του συστήματος αλλάζει. Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει ένα τέτοιο σύστημα είναι η εξής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \epsilon) \quad (1.31\alpha)$$

$$\epsilon \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \epsilon) \quad (1.31\beta)$$

όπου \mathbf{x} το $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης που παρουσιάζουν αργή δυναμική συμπεριφορά, \mathbf{y} το $m \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης που παρουσιάζουν γρήγορη δυναμική συμπεριφορά, ενώ οι \mathbf{f} & \mathbf{g} είναι ομαλές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές \mathbf{x} ονομάζονται *αργές* και οι \mathbf{y} *γρήγορες*.

Αν και τόσο οι εξισώσεις \mathbf{f} όσο και οι \mathbf{g} εξαρτώνται εν γένει από τον όρο ϵ , στην συνέχεια δεν θα αναφέρεται ρητά αυτή η σχέση για λόγους απλότητας. Εδώ θα πρέπει να τονιστεί επίσης ότι ένα φυσικό σύστημα μπορεί να περιγραφεί με περισσότερα από ένα μοντέλα που να έχουν την μορφή των εξισώσεων (1.31).

Ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες συνίσταται στην εξαγωγή δύο υποσυστημάτων μειωμένης τάξης. Ένα περιγράφει τα αργά δυναμικά φαινόμενα και ένα τα γρήγορα. Θεωρώντας $\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s$ τις μεταβλητές κατάστασης του αργού υποσυστήματος και $\mathbf{x}_f, \mathbf{y}_f$ τις μεταβλητές του γρήγορου, αυτές ικανοποιούν τις εξής σχέσεις:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_f \quad (1.32\alpha)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_s + \mathbf{y}_f \quad (1.32\beta)$$

Λόγω του όρου ϵ , μια συχνά αποδεκτή προσέγγιση που γίνεται για την παράσταση των αργών δυναμικών φαινομένων είναι να θεωρηθεί ότι $\epsilon = 0$, στην εξίσωση (1.31β). Αυτός είναι ο ορισμός της *Οιονεί Στατικής Προσέγγισης - Quasi Steady State (QSS)* του αργού υποσυστήματος.

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) \quad (1.33\alpha)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) \quad (1.33\beta)$$

Για δεδομένο \mathbf{x}_s η (1.33β) είναι προφανώς η συνθήκη ισορροπίας για τα \mathbf{y} , αλλά καθώς έχει θεωρηθεί ότι αυτό επιτυγχάνεται θέτοντας $\epsilon = 0$, αυτό μπορεί να γίνει και για $\dot{\mathbf{y}}_s \neq \mathbf{0}$, δηλαδή το διάνυσμα \mathbf{y}_s μπορεί να αλλάζει και η (1.33β) να ικανοποιείται καθώς το διάνυσμα \mathbf{x}_s αλλάζει κατά τη διάρκεια αργών μεταβολών. Ο ρυθμός της αλλαγής του \mathbf{y} , κατά τη διάρκεια αργών, οιονεί στατικών αλλαγών, μπορεί να υπολογιστεί από την διαφορίση της (1.33β) χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας και την (1.31α).

Η οιονεί στατική προσέγγιση από τις εξισώσεις (1.33α) και (1.33β), μετατρέπει ουσιαστικά το αρχικό σύστημα σε σύστημα διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων, για την ανάλυση του οποίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τεχνικές που αναφέρθηκαν στην Υποεν. 1.1.6. Συγκεκριμένα η ευστάθεια του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί από τον ελαττωμένο πίνακα \mathbf{A} της σχέσης (1.28), η μη αντιστρεψιμότητα του οποίου συμπίπτει με ιδιάζον σημείο και του Ιακωβιανού πίνακα (1.26).

Έστω ότι οι γρήγορες συνιστώσες των μεταβλητών κατάστασης δεν διεγείροντα και επομένως ισχύει $\mathbf{x} = \mathbf{x}_s, \mathbf{y} = \mathbf{y}_s$. Αν μπορεί να προσδιοριστεί μια συνάρτηση \mathbf{h} (διάστασης m), τέτοια ώστε:

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{h}(\mathbf{x}_s) \quad (1.34)$$

όπου \mathbf{y}_s και \mathbf{x}_s είναι λύσεις του αρχικού συστήματος (1.31) και οι εξισώσεις \mathbf{h} πρέπει να ικανοποιεί τις εξισώσεις των γρήγορων μεταβλητών:

$$\epsilon \mathbf{h}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x})) \Rightarrow \epsilon \mathbf{h}_x \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}) \quad (1.35)$$

όπου \mathbf{h}_x είναι ο ιακωβιανός πίνακας του \mathbf{h} ως προς \mathbf{x} .

Η συνάρτηση \mathbf{h} ορίζει στον χώρο των $n + m$ μεταβλητών μια $n -$ διάστατη πολλαπλότητα η οποία ονομάζεται *αργή ολοκληρωτική πολλαπλότητα*. Λόγω της (1.35), για αρχικές συνθήκες πάνω στην αργή πολλαπλότητα, οι μεταβολές του \mathbf{y} θα παραμένουν πάντα πάνω στην συγκεκριμένη πολλαπλότητα. Κατά συνέπεια και η αργή πολλαπλότητα είναι μια αναλλοίωτη πολλαπλότητα του συστήματος (1.31).

Εάν οι αρχικές συνθήκες του συστήματος είναι εκτός της αργής πολλαπλότητας, η απόκριση του θα αποτελείται από δύο συνιστώσες ένα γρήγορο μεταβατικό που καταλήγει στην αργή πολλαπλότητα και ένα αργό μεταβατικό που παραμένει πάνω στην αργή πολλαπλότητα.

Η αργή πολλαπλότητα (1.34) μπορεί να προσδιοριστεί από την ολοκλήρωση της μερικής διαφορικής εξίσωσης (1.35), κάτι που όμως είναι πρακτικά δύσκολο έως αδύνατον, με ελάχιστες ειδικές εξαιρέσεις [SAP84]. Γι αυτό το λόγο η αργή πολλαπλότητα προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας μια τεχνική γνωστή ως ασυμπτωτική ανάπτυξη (asymptotic expansion), η οποία στηρίζεται στο ανάπτυγμα Taylor της \mathbf{h} ως προς ϵ :

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_s) = \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_s) + \epsilon \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_s) + \epsilon^2 \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_s) + \dots \quad (1.36)$$

Για $\epsilon = 0$, παίρνουμε τον μηδενικό όρο του αναπτύγματος Taylor της αργής πολλαπλότητας για την οποία η (1.35) γίνεται:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}_0) = \mathbf{0} \quad (1.37)$$

Για αυτό το λόγο για $\epsilon \rightarrow 0$ η αργή πολλαπλότητα προσεγγίζεται από την Οιονεί Στατική Προσέγγιση (1.33β). Το σφάλμα προσέγγισης σε κάθε περίπτωση είναι τάξης ϵ και τείνει στο μηδέν καθώς $\epsilon \rightarrow 0$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια της Οιονεί Στατικής Προσέγγισης μπορεί να βελτιωθεί με τη χρήση περισσότερων όρων της σειράς Taylor της $\mathbf{h}(\mathbf{x}_s)$.

1.1.7.2 Αργά και γρήγορα δυναμικά φαινόμενα

Όταν η αργή πολλαπλότητα \mathbf{h} έχει υπολογιστεί με την απαιτούμενη ακρίβεια, η συμπεριφορά των αργών δυναμικών φαινομένων του συστήματος περιγράφεται από το μειωμένης τάξης υποσύστημα της (1.33α), όπου η αργή συνιστώσα \mathbf{y}_s των \mathbf{y} δίνεται από την (1.34).

Προκειμένου να προσεγγιστεί το γρήγορο υποσύστημα, θεωρείται ότι οι μεταβλητές \mathbf{x} κυριαρχούνται από τις αργές τους συνιστώσες ($\mathbf{x} \simeq \mathbf{x}_s$). Ως εκ τούτου οι μεταβλητές κατάστασης των γρήγορων φαινομένων που έχουν οριστεί στην (1.32β) και καλούνται μεταβλητές εκτός της ολοκληρωτικής πολλαπλότητας (off-manifold):

$$\mathbf{y}_f = \mathbf{y} - \mathbf{y}_s = \mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_s) \quad (1.38)$$

Με αντικατάσταση της (1.38) στην (1.31β) προκύπτει το προσεγγιστικό γρήγορο υποσύστημα:

$$\epsilon \dot{\mathbf{y}}_f = \epsilon \dot{\mathbf{y}} - \epsilon \dot{\mathbf{y}}_s \simeq \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_f + \mathbf{h}(\mathbf{x}_s)) \quad (1.39)$$

Εδώ θα πρέπει να επισημανθεί ότι η (1.39) ορίζει ένα σύστημα, του οποίου τα σημεία ισορροπίας βρίσκονται πάνω στην αργή πολλαπλότητα (όπου $\mathbf{y}_f = \mathbf{0}$) και παραμέτρους τις αργές μεταβλητές \mathbf{x}_s .

Γραμμικοποίηση της (1.39) σε ένα σημείο $(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s))$, το οποίο βρίσκεται πάνω στην αργή πολλαπλότητα, έχει σαν αποτέλεσμα:

$$\epsilon \Delta \dot{\mathbf{y}}_f = \mathbf{g}_y \Delta \mathbf{y}_f \quad (1.40)$$

Ως εκ τούτου, η ευστάθεια της γρήγορης πολλαπλότητας καθορίζεται από τον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{g}_y .

Τα θεωρήματα της ασυμπτωτικής επέκτασης [O M74, KKO99] εγγυώνται την ισχύ του διαχωρισμού σε χρονικές κλίμακες όταν πληρούνται ορισμένες συνθήκες. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχτεί ότι μετά την

παρέλευση του απαιτούμενου χρόνου για την απόσβεση των αρχικών γρήγορων μεταβατικών φαινομένων, το σφάλμα της προσέγγισης του αργού υποσυστήματος με την Οιονεί Στατική Προσέγγιση είναι της τάξης ϵ :

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_s + O(\epsilon) \quad (1.41\alpha)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_s + O(\epsilon) \quad (1.41\beta)$$

όταν πληρούνται οι ακόλουθες συνθήκες:

1. Ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος.
2. Τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα είναι ευσταθή, δηλαδή ο πίνακας \mathbf{g}_y έχει ιδιοτιμές με αυστηρά αρνητικά πραγματικά μέρη.
3. Όλες οι διαταραχές παραμένουν στην περιοχή έλξης των ευσταθών σημείων ισορροπίας του γρήγορου υποσυστήματος.

Αν και η πρώτη συνθήκη είναι απόρροια της δεύτερης, παρουσιάζεται ξεχωριστά, λόγω της σημασίας της για τον ορισμό της αργής πολλαπλότητας $\mathbf{h}(\mathbf{x})$.

Όπως έχει τονιστεί προηγουμένως, κατά τη διάρκεια αργών μεταβατικών, οι αργές μεταβλητές δρουν σαν παράμετροι για το υποσύστημα που διέπει τα γρήγορα μεταβατικά. Για αυτό το λόγο καθώς ένα αργό μεταβατικό εξελίσσεται, το γρήγορο υποσύστημα (1.39) μπορεί να παρουσιάσει μια διακλάδωση (π.χ. σαγματικού κόμβου). Σε τέτοια σημεία ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες παύει να ισχύει καθώς δεν ισχύουν οι προηγούμενες υποθέσεις (1) & (2). Στην πράξη ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες θα καταρρεύσει και η τροχιά του συστήματος θα φύγει από την αργή πολλαπλότητα, πριν το σημείο της διακλάδωσης, λόγω συρρίκνωσης της περιοχής έλξης των γρήγορων μεταβατικών που οδηγεί σε παραβίαση και της τρίτης υπόθεσης.

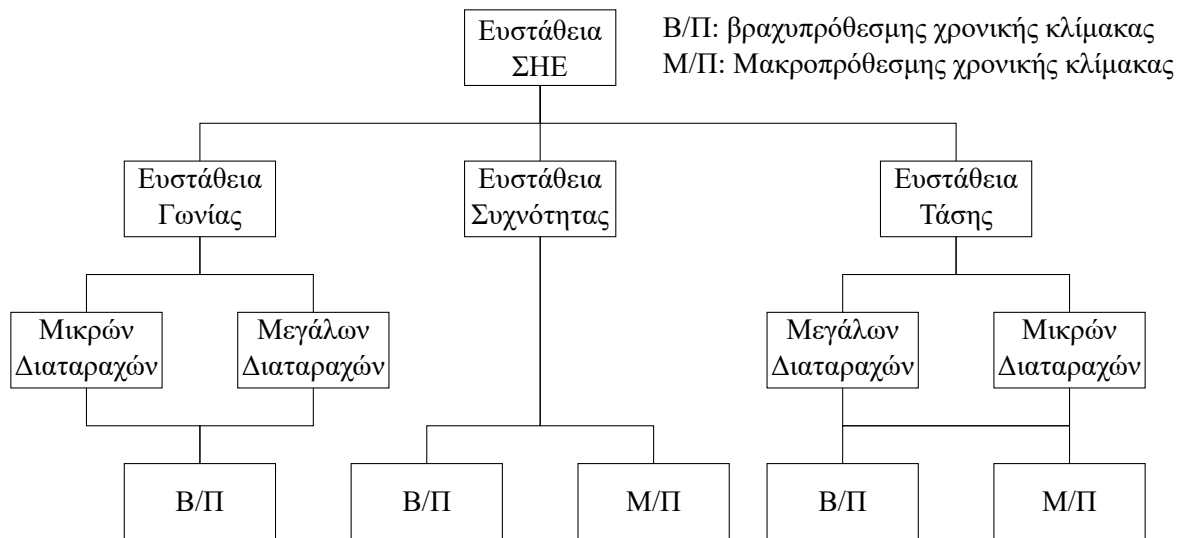
1.2 Ευστάθεια ΣΗΕ

Ο τυπικός ορισμός της ευστάθειας ενός ΣΗΕ, όπως έχει προταθεί από την κοινή ομάδα εργασίας IEEE/CIGRE πάνω σε όρους και ορισμούς ευστάθειας αναφέρεται στο [ΚΡΑ04, σελ. 1388] και είναι ο εξής:

Ευστάθεια είναι η ικανότητα ενός ΣΗΕ, για δεδομένες αρχικές συνθήκες λειτουργίας, να επανακτήσει ένα σημείο λειτουργίας όταν υποστεί μια φυσική διαταραχή, με τις περισσότερες μεταβλητές (στοιχεία) του συστήματος εντός ορίων, ώστε να παραμείνει άθικτο.

Αναλύοντας περισσότερο τον ανωτέρω ορισμό είναι προφανές πως η ευστάθεια των ΣΗΕ (όπως και όλων των δυναμικών συστημάτων) είναι ένα στοιχείο που εξαρτάται αφενός από τις αρχικές συνθήκες του συστήματος όσο και από το μέγεθος και το είδος της διαταραχής. Επομένως αν το σύστημα βρίσκεται σε μια δεδομένη αρχική κατάσταση, μια διαταραχή μπορεί να το οδηγήσει σε ευστάθεια, ενώ μια άλλη σε αστάθεια. Με άλλα λόγια, σε κάθε δεδομένη κατάσταση λειτουργίας υπάρχει ένα όριο μέσα στο οποίο το σύστημα μπορεί να δεχθεί διαταραχές και να φτάσει σε μια νέα κατάσταση ισορροπίας. Το συγκεκριμένο όριο δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται συνεχώς καθώς μεταβάλλεται και το σημείο λειτουργίας του συστήματος.

Όσον αφορά τις διαταραχές, αυτές μπορεί να είναι διαφόρων ειδών. Από μικρές και αργές μεταβολές των ίδιων των παραμέτρων του ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα μεταβολές στην ζήτηση του φορτίου, οι οποίες λαμβάνουν χώρα συνεχώς, μέχρι μεγάλης κλίμακας διαταραχές όπως π.χ. βραχυκλώματα,



Σχήμα 1.1: Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ. Πηγή [ΚΡΑ04]

απώλειες μονάδων παραγωγής κλπ., που οδηγούν σε απότομη αλλαγή των δομικών και τοπολογικών χαρακτηριστικών του συστήματος.

Δεδομένου ότι το σύστημα αποτελείται από διάφορα στοιχεία, η δυναμική του συμπεριφορά καθορίζεται από τις επιμέρους συμπεριφορές των εν λόγω στοιχείων, καλύπτοντας διάφορες περιοχές φαινομένων (ηλεκτρικής, μηχανικής, θερμικής φύσης). Αποτέλεσμα αυτού είναι η χρονική εξέλιξη της απόκρισης του συστήματος να εξαρτάται άμεσα από τις διατάξεις που εμπλέκονται κάθε φορά και οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε αποκρίσεις που κυμαίνονται από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου έως δεκάδες λεπτά.

Αν και η ευστάθεια ΣΗΕ αποτελεί ένα ενιαίο πρόβλημα, οι διάφοροι τύποι αστάθειας που μπορούν να εκδηλωθούν δεν μπορούν να γίνουν σωστά κατανοητοί και να αντιμετωπιστούν σαν μια ενιαία δομή. Λόγω της πολυπλοκότητας και της μεγάλης διάστασης του συγκεκριμένου προβλήματος, είναι χρήσιμο να γίνονται κατάλληλες απλοποιητικές υποθέσεις ανά περίπτωση, διατηρώντας το επιθυμητό επίπεδο ακρίβειας στην μοντελοποίηση και χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα εργαλεία ανάλυσης.

Για το σκοπό αυτό γίνεται μια κατηγοριοποίηση, η οποία βασίζεται στα παρακάτω κριτήρια [Kun94]:

- Τη φυσική σημασία της αστάθειας που προκύπτει, όπως υποδεικνύεται από τις κύριες μεταβλητές του συστήματος στις οποίες παρατηρείται η εν λόγω αστάθεια.
- Το μέγεθος της διαταραχής που εξετάζεται, η οποία επηρεάζει τη μέθοδο υπολογισμού και πρόβλεψης της αστάθειας.
- Τις συσκευές, τις διαδικασίες και το χρονικό διάστημα (κλίμακα) τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εκτίμηση της ευστάθειας.

Με βάση όλα αυτά, η κατηγοριοποίηση των φαινομένων ευστάθειας που μπορούν να εντοπιστούν σε ένα ΣΗΕ φαίνεται στο Σχ. 1.1, τα οποία και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.

1.2.1 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου συστήματος να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά την εμφάνιση διαταραχών. Το συγκεκριμένο είδος

ευστάθειας εξαρτάται από την δυνατότητα διατήρησης/αποκατάστασης ισορροπίας μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής στον άξονα κάθε σύγχρονης μηχανής του συστήματος. Η αστάθεια που σχετίζεται με την συγκεκριμένη κατηγορία εμφανίζεται με τη μορφή αυξανόμενων ταλαντώσεων στη γωνία του δρομέα κάποιων σύγχρονων μηχανών, που οδηγεί σε απώλεια του συγχρονισμού με τις υπόλοιπες γεννήτριες.

Το πρόβλημα της ευστάθειας γωνίας περιλαμβάνει τη μελέτη των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και σχετίζεται με τον τρόπο που η παραγόμενη ισχύς των σύγχρονων μηχανών μεταβάλλεται καθώς αλλάζει η αντίστοιχη γωνία του δρομέα. Σε μόνιμη κατάσταση υπάρχει ισορροπία μεταξύ της επιβαλλόμενης μηχανικής ροπής στον άξονα της μηχανής και της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Αν συμβεί μια διαταραχή αυτή η ισορροπία διαταράσσεται με αποτέλεσμα άλλες μηχανές να επιβραδύνονται και άλλες να επιταχύνονται, μεταβάλλοντας και τις αντίστοιχες γωνίες των δρομέων τους. Η αστάθεια προκύπτει αν το σύστημα δεν μπορεί να απορροφήσει τις μεταβολές στην κινητική ενέργεια που οφείλεται σε αυτές τις μεταβολές των γωνιακών ταχυτήτων.

Για δεδομένη κατάσταση του συστήματος, η ευστάθεια γωνίας εξαρτάται εξαρτάται από την ύπαρξη ή όχι ροπής αποσβέσεως και ροπής συγχρονισμού. Η ροπή απόσβεσης είναι συγγραμμική με την γωνιακή ταχύτητα του δρομέα, ενώ η ροπή συγχρονισμού είναι συγγραμμική με την γωνία του δρομέα. Έλλειψη της πρώτης οδηγεί σε ταλαντώσεις αυξανόμενου πλάτους, ενώ έλλειψη της δεύτερης οδηγεί σε απεριοδική (μονότονη) αύξηση της γωνιακής απόκλισης και εν τέλει σε αποσυγχρονισμό.

Για ευκολία στην ανάλυση, η ευστάθεια γωνίας κατηγοριοποιείται περαιτέρω, όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.1, σε δύο υποκατηγορίες:

- **Ευστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών**, η οποία αφορά την ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει τον συγχρονισμό του όταν υπόκειται σε μικρές διαταραχές. Οι εν λόγω διαταραχές θεωρούνται αρκούντως μικρές ώστε μπορεί να γίνει γραμμικοποίηση των εξισώσεων του συστήματος και να χρησιμοποιηθεί ανάλυση με ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα.

Η συγκεκριμένη κατηγορία ευστάθειας εξαρτάται μόνο από το αρχικό σημείο λειτουργία του συστήματος, ενώ η εκδήλωση της αστάθειας μπορεί να πάρει και τις δύο μορφές που έχουν αναφερθεί. Στα σύγχρονα ΣΗΕ η αστάθεια γωνίας μικρών διαταραχών οφείλεται σε έλλειψη επαρκούς ροπής απόσβεσης και ως εκ τούτου εμφανίζεται σαν ταλαντώσεις συνεχώς αυξανόμενου πλάτους. Αν και οι σύγχρονοι Αυτόματοι Ρυθμιστές Τάσης (ΑΡΤ) προσφέρουν επαρκή ροπή συγχρονισμού, η απεριοδική εκδήλωση της αστάθειας με αύξηση της γωνίας μπορεί και πάλι να εμφανιστεί σε γεννήτριες που λειτουργούν με σταθερή διέγερση, π.χ. λόγω ενεργοποίησης της προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ).

- **Ευστάθεια γωνίας μεγάλων διαταραχών**, ή μεταβατική ευστάθεια όπως ονομάζεται συνήθως, σχετίζεται με την ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρήσει τον συγχρονισμό του όταν υπόκειται σε σοβαρή διαταραχή, όπως ένα βραχυκύκλωμα σε γραμμή μεταφοράς. Η επακόλουθη απόκριση του συστήματος περιλαμβάνει μεγάλες αποκλίσεις στις γωνίες των δρομέων και επηρεάζεται από τη μη γραμμική σχέση των γωνιών αυτών με την ισχύ.

Η συγκεκριμένη κατηγορία ευστάθειας επηρεάζεται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας όσο και από το μέγεθος της διαταραχής. Η αστάθεια σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζεται συνήθως σαν μονότονη αύξηση στις γωνίες των δρομέων λόγω έλλειψης ροπής συγχρονισμού, που ονομάζεται και αστάθεια πρώτου κύκλου. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που η αστάθεια μπορεί να εκδηλωθεί και μετά την πρώτη ταλάντωση.

Γενικά η ευστάθεια γωνίας χαρακτηρίζεται σαν βραχυπρόθεσμο φαινόμενο, με την μελέτη ευστάθειας μικρών διαταραχών να εκτείνονται σε χρόνο 10 με 20 δευτερόλεπτα μετά τη διαταραχή και τις

αντίστοιχες μελέτες ευστάθειας γωνίας μεγάλων διαταραχών, ανάλογα και με το μέγεθος του συστήματος, από 3 έως 20 δευτερόλεπτα.

1.2.2 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερή τη συχνότητα μετά από μια μεγάλη διαταραχή στην ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, εξασφαλίζοντας την μικρότερη δυνατή απώλεια φορτίου.

Η αστάθεια που μπορεί να εμφανιστεί σε αυτήν την περίπτωση έχει σαν αποτέλεσμα ταλαντώσεις στη συχνότητα που μπορεί να οδηγήσουν σε αποσύνδεση μονάδων ή και φορτίου, λόγω της ενεργοποίησης σχετικής προστασίας.

Στα σύγχρονα ΣΗΕ προβλήματα ευστάθειας συχνότητας μπορούν να εμφανιστούν μετά από μια σοβαρή διαταραχή που οδηγεί σε νησιδοποίηση του συστήματος. Η ευστάθεια σε αυτήν την περίπτωση εξαρτάται από το αν κάθε νησίδα θα φτάσει σε νέο σημείο ισορροπίας με τις ελάχιστες δυνατές αποκοπές φορτίου. Γενικά, προβλήματα ευστάθειας συχνότητας σχετίζονται με αστοχίες στην απόκριση του εξοπλισμού προστασίας, κακό συντονισμό μεταξύ διατάξεων ελέγχου και προστασίας ή τέλος με έλλειψη στρεφόμενης εφεδρείας ή/και περίσσεια παραγωγής μετά από νησιδοποίηση.

Καθώς οι μεταβολές της συχνότητας σχετίζονται με αποκρίσεις διεργασιών και εξοπλισμού, οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από κλάσματα δευτερολέπτου (όπως ηλεκτρονόμοι προστασίας υποσυχνότητας) μέχρι μερικά δεκάδες λεπτά (π.χ. απόκριση ατμοπαραγωγού λιγνιτικής μονάδας), η ευστάθεια συχνότητας μπορεί να ανήκει τόσο στην βραχυπρόθεσμη όσο και στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

1.2.3 Ευστάθεια τάσης

Με τον όρο ευστάθεια τάσης αναφέρεται η ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρήσει τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς του σε ανεκτά επίπεδα (εντός προδιαγεγραμμένων ορίων), μετά την επιβολή μιας διαταραχής. Εξαρτάται επομένως από την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί/αποκαθιστά την ισορροπία μεταξύ της ζήτησης φορτίου και του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Από την άλλη πλευρά, ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης εκδηλώνεται με τη μορφή της βαθμιαίας και συνεχούς πτώσης της τάσης σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Πιθανά αποτελέσματα της αστάθειας τάσης είναι το άνοιγμα κάποιων γραμμών μεταφοράς, η αποσύνδεση άλλου εξοπλισμού λόγω της ενεργοποίησης σχετικής προστασίας που οδηγεί σε διαδοχική αποσύνδεση και άλλων στοιχείων σε μεταγενέστερο χρόνο και τελικά η κατάρρευση τάσης.

Αν και έχουν προταθεί πολύ ορισμοί στη βιβλιογραφία για την αστάθεια τάσης από σχετικές ομάδες εργασίας τόσο της IEEE [Man90] όσο και της GIGRE [CIG95b], ο ακόλουθος ορισμός της αστάθειας τάσης περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου [VV08a]:

Η αστάθεια τάσης προκύπτει από την απόπειρα των φορτίων (μέσω της δυναμικής τους συμπεριφοράς) να αποκαταστήσουν ισχύ μεγαλύτερη από το όριο φόρτισης του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Η αστάθεια τάσης επομένως σχετίζεται με τη δυναμική των φορτίων. Μετά από μια διαταραχή, η καταναλισκόμενη ισχύς από τα φορτία τείνει να αποκατασταθεί στα προ της διαταραχής επίπεδα, είτε άμεσα όπως π.χ. για κινητήρες επαγωγής, θερμοστατικά φορτία, κλπ., είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος, όπως τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)^v. Όλα αυτά ενισχύουν την αστάθεια τάσης που οφείλεται στη ροή ενεργού και άεργου ισχύος σε ένα ουσιαστικά επαγωγικό

^vΠρόκειται για μηχανισμούς που βρίσκονται κυρίως εγκατεστημένοι στους μετασχηματιστές υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και μεταβάλλουν τις λήψεις τους (εντός συγκεκριμένων ορίων) ώστε να κρατάνε την τάση διανομής εντός μιας νεκρής ζώνης. Περιγραφή της λειτουργίας και του μοντέλου τους γίνεται στην Υποεν. 2.2.8.

σύστημα μεταφοράς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον περιορισμό της ικανότητας μεταφοράς ισχύος, εμποδίζοντας την στήριξη των τάσεων στην ευπαθή περιοχή του συστήματος, η οποία γίνεται ακόμα δυσχερέστερη όταν ορισμένες γεννήτριες φτάσουν στα όρια τους (είτε υπερδιέγερσης είτε ρεύματος στάτη), μην μπορώντας να καλύψουν την ζήτηση αέργου ισχύος μαζί με τις υπόλοιπες συσκευές χωρητικής αντιστάθμισης.

Καθώς η ευστάθεια τάσης περιλαμβάνει διάφορα συστήματα που λειτουργούν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, τα αντίστοιχα φαινόμενα αστάθειας εκτείνονται από μερικά δευτερόλεπτα μέχρι δεκάδες λεπτά, δίνοντας την δυνατότητα κατηγοριοποίησης της αστάθειας τάσης (και ως εκ τούτου της ευστάθειας) σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη.

1.2.3.1 Βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης

Η αστάθεια τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα περιλαμβάνει ταχέως αποκρινόμενους μηχανισμούς αποκατάστασης των φορτίων όπως κινητήρες επαγωγής, ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία και λοιπές διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος όπως οι σύνδεσμοι συνεχούς ρεύματος (HVDC links). Η ανάλυση τέτοιων βραχυπρόθεσμων φαινομένων απαιτεί την επίλυση κατάλληλων διαφορικών εξισώσεων και εξισώσεων διαφορών, ενώ η επίδραση μεγάλων διαταραχών, όπως τα βραχυκυκλώματα κοντά στα φορτία, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Ακολουθώντας μια διαταραχή, τρεις είναι οι κύριοι μηχανισμοί που μπορούν να οδηγήσουν σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια και οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ως εξής [VV08a]:

- B/Π1: Απώλεια σημείου ισορροπίας βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- B/Π2: Έλλειψη επαρκούς έλξης προς το ευσταθές (μετά τη διαταραχή) σημείο ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων φαινομένων.
- B/Π3: Ταλαντωτική αστάθεια γύρω από το σημείο ισορροπίας μετά τη διαταραχή.

Τυπική περίπτωση της αστάθειας B/Π1 είναι αυτή της οριστικής επιβράδυνσης κινητήρων επαγωγής (stalling) μετά από μια διαταραχή. Η χαρακτηριστική ροπής-ολίσθησης των κινητήρων μπορεί να μην έχει σημείο τομής με την χαρακτηριστική ροπής του φορτίου, αφήνοντας στην ουσία το σύστημα χωρίς σημείο ισορροπίας. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι κινητήρες θα ακινητοποιηθούν και η τάση θα καταρρεύσει, λόγω της μεγάλης απορρόφησης αέργου ισχύος στο σημείο εκκίνησης.

Ένα παράδειγμα αστάθειας B/Π2 είναι η επιβράδυνση των κινητήρων μετά από ένα βραχυκύκλωμα. Αν οι κινητήρες είχαν μεγάλο φορτίο ή/και η εκκαθάριση του σφάλματος καθυστέρησε, υπάρχει ενδεχόμενο οι κινητήρες να μην μπορούν να επιταχύνουν ξανά. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει σημείο τομής των χαρακτηριστικών των ροπών φορτίου και κινητήρα, αλλά κατά την εκκαθάριση του σφάλματος η ολίσθηση του κινητήρα ήδη υπερβαίνει το ασταθές σημείο ισορροπίας (και πλέον δεν μπορεί να γίνει έλξη προς το ευσταθές).

Η τρίτη περίπτωση αστάθειας B/Π3, είναι πολύ σπάνια, αν και έχουν αναφερθεί ταλαντωτικές συμπεριφορές μεταξύ γεννητριών και κινητήρων [MF96].

1.2.3.2 Μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης

Αν υποθεθεί, μετά από μια διαταραχή, ότι το σύστημα ξεπέρασε επιτυχώς τη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (δηλαδή έφτασε σε σημείο βραχυπρόθεσμης ισορροπίας), από εκεί και πέρα η συμπεριφορά του θα καθορίζεται από τη δυναμική των στοιχείων που λειτουργούν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Σε αυτήν την χρονική κλίμακα εμπλέκονται κυρίως διατάξεις με αργή απόκριση, όπως ΣΑΤΥΦ, θερμοστατικά φορτία, περιοριστές υπερδιέγερσης γεννητριών. Αν υποθεθεί ότι τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα είναι ευσταθή, υπάρχουν και εδώ τρεις μηχανισμοί αστάθειας, οι οποίοι είναι:

- M/Π1: Απώλεια σημείου ισορροπίας μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- M/Π2: Έλλειψη επαρκούς έλξης προς το ευσταθές (μετά τη διαταραχή) σημείο ισορροπίας των μακροπρόθεσμων φαινομένων.
- M/Π3: Αργές ταλαντώσεις τάσης, αυξανόμενου πλάτους.

Η πιο τυπική περίπτωση αστάθειας τάσης είναι αυτή του μηχανισμού M/Π1, με τα φορτία να προσπαθούν να φτάσουν στα προ της διαταραχής επίπεδα ζήτησης, είτε μέσω δράσης του μηχανισμού των ΣΑΤΥΦ, είτε μέσω άλλων μηχανισμών εγγενούς αποκατάστασης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα του δεύτερου μηχανισμού αποτελεί η περίπτωση ενός σεναρίου τύπου M/Π1 ακολουθούμενο από καθυστερημένη εφαρμογή διορθωτικών μέτρων (π.χ. ενεργοποίηση αντιστάθμισης ή αποκοπής φορτίου), τα οποία αποκαθιστούν ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας με καθυστέρηση, ώστε η απόκριση να μην μπορεί να κατευθυνθεί προς αυτό.

Η τρίτη περίπτωση αστάθειας δεν έχει εμφανιστεί σε πρακτικά συστήματα. Θεωρητικά όμως θα μπορούσε να εμφανιστεί σε περίπτωση π.χ. κακού συντονισμού δύο ΣΑΤΥΦ σε διαδοχικά επίπεδα τάσης.

1.2.3.3 Βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης προκαλούμενη από μακροπρόθεσμη δυναμική

Καθώς όπως έχει αναφερθεί, το πρόβλημα της ευστάθειας είναι ενιαίο, αλλά η κατηγοριοποίηση του βοηθάει στην καλύτερη ανάλυση και κατανόηση των μηχανισμών που το καθορίζουν, στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στην περίπτωση που η εξέλιξη στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπάρχουν πάλι τρεις τύποι:

- B-M/Π1: Απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας που προκαλείται από την ασταθή συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- B-M/Π2: Απώλεια έλξης προς το ευσταθές βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας λόγω συρρίκνωσης της αντίστοιχης περιοχής έλξης από την ασταθή συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.
- B-M/Π3: Ταλαντωτική αστάθεια βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων προκαλούμενες από την ασταθή συμπεριφορά των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Τυπική περίπτωση B-M/Π1 εμφανίζεται όταν η συνεχής επιδείνωση της κατάστασης του συστήματος, που οφείλεται σε αστάθεια M/Π1 ή M/Π2, οδηγεί είτε σε απώλεια συγχρονισμού των γεννητριών είτε σε επιβράδυνση των ασύγχρονων μηχανών.

Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι η αιτία και η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης το αποτέλεσμα. Όταν εμφανίζεται η αστάθεια τύπου B-M/Π1 η αρχική, αργή, υποβάθμιση των τάσεων καταλήγει σε απότομη κατάρρευση. Αν η εξέλιξη των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων είναι αρκούντως αργή, αυτή η περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί σαν διακλάδωση των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, με τα μακροπρόθεσμα θεωρούμενα σαν παραμέτρους.

Η αστάθεια τύπου B-M/Π2 στην πράξη θα εμφανιστεί πριν το σύστημα φτάσει σε διακλάδωση σαματικού κόμβου των βραχυπρόθεσμων φαινομένων, λόγω μείωσης της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας καθώς το πλησιάζει το ασταθές σημείο ισορροπίας. Ως εκ τούτου μια πολύ μικρή αλλαγή σε παραμέτρους του συστήματος ή μια διακριτή μεταβολή μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια έλξης.

Η τρίτη κατηγορία αυτού του τύπου αστάθειας (B-M/Π3) εμφανίζεται σπάνια και αφορά συστήματα που έχουν ταυτόχρονα προβλήματα ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων και ταλαντώσεων τάσης

1.2.3.4 Κατάρρευση τάσης

Έχοντας ήδη αναλύσει τις κατηγορίες αστάθειας τάσης, στην συγκεκριμένη παράγραφο θα γίνει αναφορά στο αποτέλεσμα τους, αν δεν εφαρμοστεί κάποιο μέτρο αποτροπή.

Η εξέλιξη της αστάθειας τάσεως ενός συστήματος μπορεί να διαρκέσει από μερικά δευτερόλεπτα έως μερικές δεκάδες λεπτών και μπορεί να έχει μια από τις παρακάτω καταλήξεις:

- Μια μη ομαλή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε χαμηλό επίπεδο τάσεων (π.χ. κάτω από 0.8 αμ στο σύστημα μεταφοράς). Η κατάσταση αυτή εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια συναντούν τα όρια λειτουργίας τους. Τυπική περίπτωση είναι τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, των οποίων οι λήψεις έχουν περιορισμένο εύρος ρύθμισης. Η κατάληξη αυτή χαρακτηρίζεται ως *μερική κατάρρευση τάσης*, όπως αναφέρεται και στα [CIG93, Tay94]. Σε αυτήν την κατάσταση “ψευδοισοροπίας” μπορούν να καταλήξουν οι αστάθειες M/Π1, M/Π2 που δεν οδηγούν σε αστάθειες M-B/Π1, M-B/Π2. Υπάρχει κάποιος κίνδυνος ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση να ενεργοποιηθούν προστασίες λόγω χαμηλών τάσεων και υψηλού ρεύματος.
- Μια επιτάχυνση του φαινομένου, η οποία οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος (συντά αυτή καλείται και *ευάλωτη περιοχή*). Η κατάληξη αυτή ονομάζεται *κατάρρευση τάσεως*. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα οδηγείται σε μερική ή ολική σβέση.

Κοντά στο σημείο κατάρρευσης, η χρονική απόκριση των τάσεων γίνεται ολοένα και πιο γρήγορη, για να καταλήξει σε κατακόρυφη πτώση τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης [You94]. Επομένως στο σημείο της κατάρρευσης υπάρχει μια ασυνέχεια στη λειτουργία του συστήματος. Η ασυνέχεια αυτή οφείλεται στην ίδια τη δυναμική του συστήματος και όχι σε εξωτερικά αίτια (π.χ. βραχυκύκλωμα, άνοιγμα γραμμής, κλπ.). Συνοπτικά η έννοια της κατάρρευσης δίνεται από τον παρακάτω ορισμό [VV08a]:

Με τον όρο κατάρρευση εννοείται η απότομη (πρακτικά ακαριαία) καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος η οποία οφείλεται στη συνεχή δυναμική του.

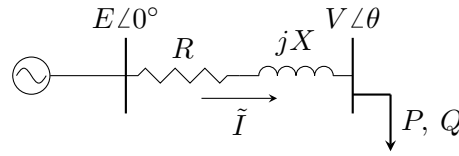
Η *πρακτικά ακαριαία* μετάβαση προϋποθέτει τον απειρισμό των χρονικών παραγώγων. Με βάση αυτά που αναφέρονται και στην Υποεν. 1.1.7 είναι προφανές πως η κατάρρευση τάσης ενός συστήματος μπορεί να ερμηνευθεί σαν μια αστάθεια που προκαλείται σε χρονική κλίμακα ταχύτερη από την εξεταζόμενη. Ουσιαστικά πρόκειται για τις αστάθειες στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα που προκαλούνται από την εξέλιξη των μακροπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος.

1.3 Εισαγωγή στους μηχανισμούς αστάθειας τάσης

Όπως αναφέρθηκε στην Υποεν. 1.2.3, η αστάθεια τάσης σχετίζεται με την προσπάθεια των φορτίων να αυξήσουν την κατανάλωση τους πέρα από το όριο φόρτισης του συστήματος. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, το όριο φόρτισης αυτό μπορεί (υπό προϋποθέσεις) ή όχι να συμπίπτει με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε ένα δίκτυο. Για το σκοπό αυτό στις επόμενες υποενότητες γίνεται αναφορά στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, στα όρια φόρτισης καθώς και στη μεταξύ τους σχέση, για να ακολουθήσει μια ποιοτική περιγραφή του μηχανισμού αστάθειας τάσης.

1.3.1 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς

Για λόγους απλότητας θα θεωρηθεί ένα απλό σύστημα αποτελούμενο από δύο μόνο ζυγούς, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.2, στο οποίο ο ζυγός φορτίου τροφοδοτείται από έναν άπειρο ζυγό μέσω μιας γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση $Z = R + jX$.



Σχήμα 1.2: Σύστημα άπειρου ζυγού - απομονωμένου φορτίου

Θεωρώντας ότι το φορτίο έχει δεδομένο επαγωγικό συντελεστή ισχύος ($\cos \phi = \text{σταθερός}$)^{vi} η σύνθετη αντίσταση του δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Z_\ell = R_\ell + jX_\ell = R_\ell + jR_\ell \tan \phi \quad (1.42)$$

ενώ το ρεύμα που ρέει στη γραμμή μεταφοράς μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}}{(R + R_\ell) + j(X + R_\ell \tan \phi)} \quad (1.43)$$

Η αντίστοιχη ενεργός ισχύς που καταναλώνει το φορτίο είναι:

$$P = I^2 R_\ell = \frac{R_\ell E^2}{(R + R_\ell)^2 + (X + R_\ell \tan \phi)^2} \quad (1.44)$$

Για τον υπολογισμό της μέγιστης καταναλισκόμενης ισχύος θα πρέπει να βρεθεί το ακρότατο της (1.44), από την ακόλουθη αναγκαία συνθήκη:

$$\frac{\partial P}{\partial R_\ell} = 0 \quad (1.45)$$

Παραγωγίζοντας την (1.44) ως προς την μεταβλητή R_ℓ και αντικαθιστώντας στην (1.45) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$(R^2 + X^2) - R_\ell^2 (1 + \tan^2 \phi) = 0 \Rightarrow (R^2 + X^2) = R_\ell^2 (1 + \tan^2 \phi) \quad (1.46)$$

η οποία είναι ισοδύναμη με:

$$|Z_\ell| = |Z| \quad (1.47)$$

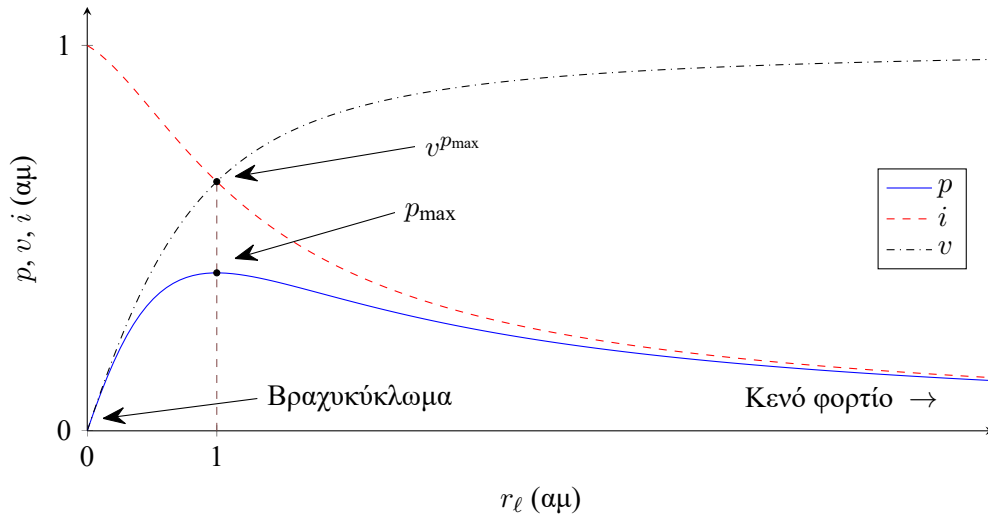
Η δεύτερη παράγωγος της (1.44) είναι:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_\ell^2} = -2R_\ell (1 + \tan^2 \phi) \quad (1.48)$$

που είναι πάντα αρνητική για επαγωγικό συντελεστή ισχύος, υποδεικνύοντας ότι το ακρότατο που υπολογίστηκε προηγουμένως αντιστοιχεί σε μέγιστο. Επομένως:

Με σταθερό συντελεστή ισχύος, η αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο μεγιστοποιείται όταν το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου γίνει ίσο με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς.

^{vi} Η συγκεκριμένη επιλογή, που προσεγγίζει τη φύση των ΣΗΕ αποτελεί μια ειδική περίπτωση του θεωρήματος μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.



Σχήμα 1.3: Ενεργός ισχύς $p = P/(X/E^2)$, τάση φορτίου $v = V/E$ και ρεύμα $i = I/(E/X)$, συναρτήσει της αγωγιμότητας φορτίου $r_\ell = (R_\ell/\cos\phi)/X$, για σταθερό συντελεστή ισχύος $\cos\phi = 0.98$

Η παραπάνω συνθήκη αποτελεί το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος υπό σταθερό συντελεστή ισχύος^{vii} και αναφέρεται σαν *συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων*.

Στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύς η ωμική αντίσταση και αντίδραση του φορτίου είναι:

$$R_\ell^{P_{\max}} = |Z| \cos\phi \quad (1.49\alpha)$$

$$X_\ell^{P_{\max}} = |Z| \sin\phi = R_\ell^{P_{\max}} \tan\phi \quad (1.49\beta)$$

ενώ η αντίστοιχη ισχύς:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \frac{E^2 \cos\phi}{\sqrt{R^2 + X^2} + R \cos\phi + X \sin\phi} \quad (1.50)$$

Στο Σχ. 1.3 φαίνεται η αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο, η τάση του και το ρεύμα της γραμμής, για την ειδική περίπτωση που η ωμική αντίσταση της γραμμής είναι μηδέν ($R = 0 \Omega$) και σταθερό συντελεστή ισχύος που αντιστοιχεί σε $\tan\phi = 0.2$ για κανονικοποιημένες τιμές. Συγκεκριμένα, η ισχύς, η τάση και το ρεύμα δίνονται από τις σχέσεις $p = P/(X/E^2)$, $v = V/E$ και $i = I/(E/X)$ αντίστοιχα, ενώ η κανονικοποιημένη αντίσταση από τη σχέση $r_\ell = (R_\ell/\cos\phi)/X$. Από το συγκεκριμένο σχήμα είναι εμφανές πως από συνθήκες ανοιχτοκυκλώσεως ($R_\ell \rightarrow \infty$) μέχρι και τιμές μεγαλύτερες από $R_\ell^{P_{\max}}$ ($r_\ell = 1$) η αύξηση στο I^2 υπερκαλύπτει την μείωση του R_ℓ και ως εκ τούτου η καταναλισκόμενη ισχύς αυξάνει. Από εκεί και πέρα, καθώς η R_ℓ γίνεται μικρότερη από την $R_\ell^{P_{\max}}$ μέχρι και το βραχυκύκλωμα ($R_\ell \rightarrow 0$), συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί πως η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ που δίνεται από την (1.50) εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του δικτύου μεταφοράς (R , X) και όχι από την χαρακτηριστική του φορτίου (δηλαδή την εξάρτηση του από την τάση, που θα περιγραφεί στην Υποεν. 1.3.3).

1.3.2 Χαρακτηριστικές δικτύου

Η *χαρακτηριστική δικτύου* είναι μια σχέση που εκφράζει την εξάρτηση διαφόρων μεγεθών (συνήθως επιλέγεται η τάση ενός αντιπροσωπευτικού ζυγού) του συστήματος από την καταναλισκόμενη ισχύ ενός

^{vii}Στη γενική περίπτωση η μέγιστη ισχύ μεταφέρεται όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου είναι ίση με την συζυγή σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

φορτίου (ενεργού ή άεργου). Η σχέση αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις που εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στο δίκτυο (εξισώσεις ροής φορτίου) και τις συνθήκες ισορροπίας των διατάξεων του συστήματος για διάφορες τιμές του φορτίου.

Χρησιμοποιώντας το σύστημα των δύο ζυγών του Σχ. 1.2 και χωρίς βλάβη της γενικότητας αγνοώντας την αντίσταση της γραμμής, η τάση στον ζυγό φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{V} = \tilde{E} - jX\tilde{I} \quad (1.51)$$

ενώ η αντίστοιχη καταναλισκόμενη ισχύς:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (1.52\alpha)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (1.52\beta)$$

Οι σχέσεις (1.52) αποτελούν τις εξισώσεις ροής ισχύος ή φορτίου για το σύστημα των δύο ζυγών και για δεδομένο φορτίο (P , Q), η επίλυση τους ως προς V και θ θα δώσει όλες τις άλλες μεταβλητές του συστήματος.

Απαλείφοντας τη γωνία θ από τις εξισώσεις (1.52) προκύπτει η κλασσική διτετράγωνη εξίσωση:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2) V^2 + (P^2 + Q^2) (X^2) = 0 \quad (1.53)$$

η οποία είναι ένα τριώνυμο ως προς τη V^2 . Ως εκ τούτου, η απαραίτητη συνθήκη ύπαρξης πραγματικών λύσεων της (1.53) είναι η ακόλουθη:

$$(2QX - E^2)^2 - 4(P^2 + Q^2) X^2 \geq 0 \quad (1.54)$$

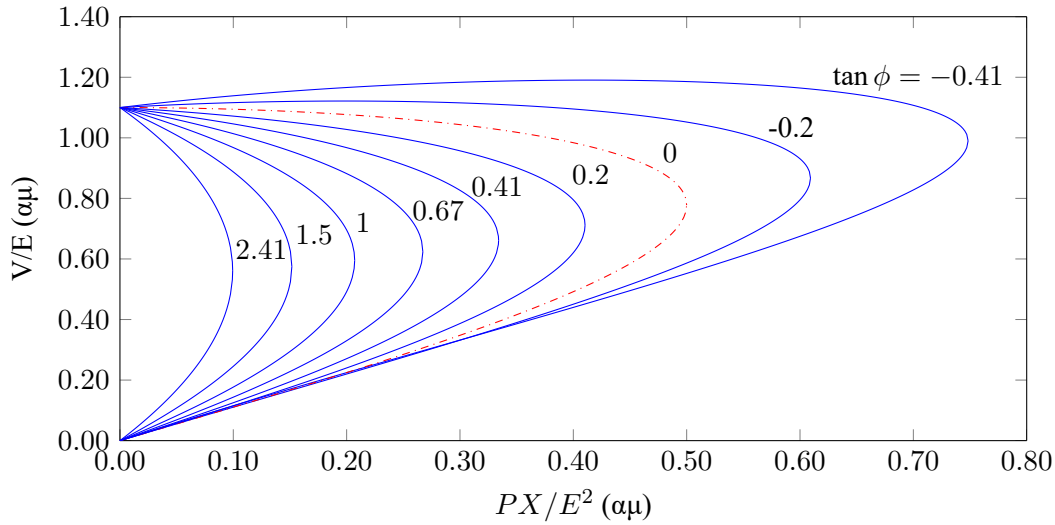
Όταν ισχύει η (1.54) η επίλυση της (1.53) ως προς την τάση του ζυγού φορτίου παράγει δύο λύσεις που δίνονται από την σχέση:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - X E^2 Q} \quad (1.55)$$

Η απεικόνιση της σχέσης (1.55) στον τρισδιάστατο χώρο των (P , Q , V) είναι μια δισδιάστατη επιφάνεια, ωστόσο για σταθερό συντελεστή ισχύος μπορεί να απεικονιστεί στο επίπεδο (P , V) σαν καμπύλη, διαμορφώνοντας τις πολύ γνωστές ομώνυμες καμπύλες PV, όπως αυτές που φαίνονται στο Σχ. 1.4. Η λύση της (1.55) με το θετικό πρόσημο αντιστοιχεί στο πάνω μέρος των καμπυλών, ενώ η λύση με το αρνητικό πρόσημο στο κάτω μέρος.

Οι καμπύλες PV, σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες καμπύλες φορτίου (οι οποίες αναλύονται στην Υποεν. 1.3.3) είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση ευστάθειας τάσης, για αυτό θα πρέπει να γίνουν και οι ακόλουθες επισημάνσεις σε σχέση με τη μορφή τους, που φαίνεται και στο Σχ. 1.4:

- Το φορτίο μπορεί να αυξηθεί μέχρι να φτάσει μια μέγιστη τιμή (πρόκειται για τη μύτη των καμπυλών PV), που αντιστοιχεί στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ της σχέσης (1.50).
- Για δεδομένο φορτίο, μικρότερο από τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, υπάρχουν δύο λύσεις. Μια με υψηλότερη τιμή τάσης και χαμηλότερο ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλότερο ρεύμα. Η πρώτη λύση αντιστοιχεί σε “κανονικές” συνθήκες λειτουργίας, με τις τάσεις πιο κοντά στις ονομαστικές τιμές. Παρατεταμένη λειτουργία στο κάτω μέρος των καμπυλών θεωρείται απαράδεκτη, αν και παροδικά μπορεί να γίνει αποδεκτή.



Σχήμα 1.4: Καμπύλες PV συστήματος δύο ζυγών για διάφορους σταθερούς συντελεστές ισχύος του φορτίου

- Καθώς το φορτίο αρχίζει και αντισταθμίζεται (αντιστοιχώντας σε χαμηλότερες τιμές $\tan \phi$) το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος αυξάνεται. Όμως αυξάνει ταυτόχρονα και η τάση στην οποία εμφανίζεται αυτή η μέγιστη ισχύς. Η εν λόγω κατάσταση είναι επικίνδυνη καθώς το όριο μεταφοράς προσεγγίζεται σε τάσεις πολύ κοντά στις ονομαστικές. Επιπλέον, σε περίπτωση πολύ μεγάλης αντιστάθμισης και με το φορτίο κοντά στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, οι δύο τιμές των τάσεων πλησιάζουν πολύ, κάνοντας σχεδόν αδύνατο τον προσδιορισμό της “κανονικής” τάσης χωρίς περαιτέρω ανάλυση. Αυτό σημαίνει πως η χρήση μόνο του επιπέδου των τάσεων είναι ένας ανεπαρκής δείκτης ευστάθειας τάσης.
- Για φορτία που έχουν υπεραντισταθμιστεί ($\tan \phi < 0$), υπάρχει ένα τμήμα της καμπύλης για το οποίο καθώς αυξάνεται η καταναλισκόμενη ισχύς η τάση ανεβαίνει. Η εξήγηση για αυτό το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός πως καθώς αυξάνεται η ενεργός ισχύς που καταναλώνει το φορτίο αυξάνει ταυτόχρονα και η άεργος ισχύς που παράγει, με αποτέλεσμα για μικρά φορτία (σε σχέση με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ) η πτώση τάσης που οφείλεται στο ενεργό φορτίο να αντισταθμίζεται από την άεργο παραγωγή. Όσο πιο αρνητικό είναι το $\tan \phi$ του φορτίου τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της καμπύλης PV που λαμβάνει χώρα αυτό το φαινόμενο.

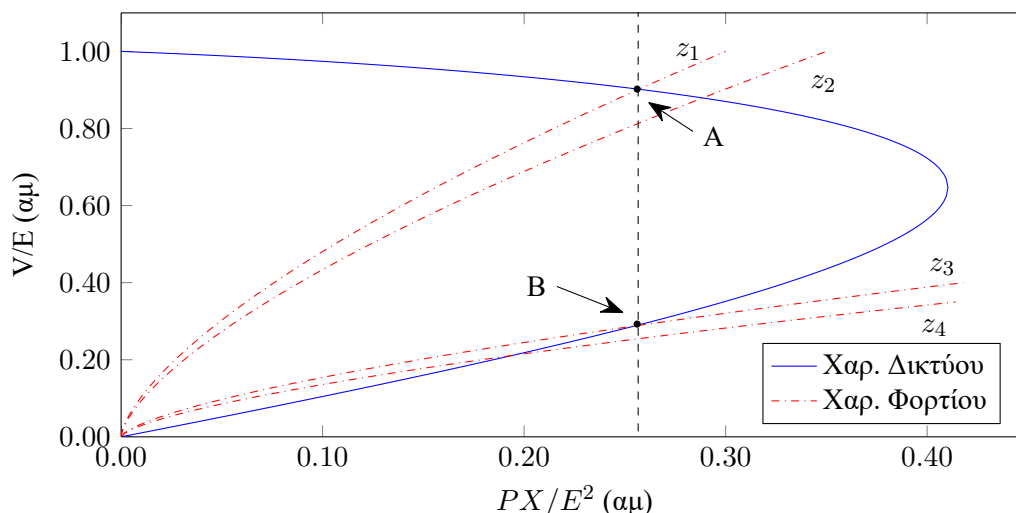
1.3.3 Χαρακτηριστικές φορτίου

Μέχρι στιγμής δεν έχει γίνει καμία αναφορά στη σύνθεση του φορτίου και στον τρόπο που αυτό μεταβάλλεται σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η *χαρακτηριστική φορτίου*, που αποτελεί μια σχέση που εκφράζει τον τρόπο που μεταβάλλεται το ενεργό και άεργο μέρος του φορτίου συναρτήσει της τάσης και μιας άλλης ανεξάρτητης μεταβλητής z , που καλείται ζήτηση και εξαρτάται από το πλήθος του συνδεδεμένου εξοπλισμού. Η γενική μορφή των χαρακτηριστικών φορτίου δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P = P(V, z) \quad (1.56\alpha)$$

$$Q = Q(V, z) \quad (1.56\beta)$$

Για δεδομένη τιμή της ζήτησης z , οι σχέσεις (1.56) ορίζουν στον τρισδιάστατο χώρο (P, Q, V) μια καμπύλη που συναντά την χαρακτηριστική (επιφάνεια) δικτύου σε ένα ή περισσότερα σημεία. Αυτά



Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίου και δικτύου του συστήματος των δύο ζυγών του Σχ. 1.2. Το φορτίο θεωρείται εκθετικό στη με $\alpha = \beta = 1.5$ και σταθερού ΣΙ με $P_o/Q_o = \tan \phi = 0.2$. Για τη μεταβλητή ζήτησης z ισχύει: $z_1 < z_2$ και $z_3 < z_4$. A, B: σημεία με ίδια κατανάλωση P , αλλά διαφορετική ζήτηση

είναι τα δυνατά σημεία ισορροπίας για τη δεδομένη τιμή της ζήτησης. Αν προβληθούν όλα τα σημεία τομής για όλες τις τιμές της ζήτησης στο επίπεδο (P, V) , αυτό που θα προκύψει είναι η καμπύλη PV του δικτύου για το δεδομένο φορτίο^{viii}. Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η καμπύλη δικτύου δεν μπορεί να εξαχθεί αν δεν έχει οριστεί προηγουμένως η ακριβής σχέση μεταξύ καταναλισκόμενης ισχύος και τάσης.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε μελέτες ευστάθειας τάσης είναι το λεγόμενο εκθετικό, του οποίου η χαρακτηριστική φορτίου περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P = zP_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\alpha \quad (1.57\alpha)$$

$$Q = zQ_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\beta \quad (1.57\beta)$$

όπου P_o, Q_o είναι η ενεργός και άεργος ισχύς που καταναλώνεται για $z = 1$ και τάση V ίση με την ονομαστική τάση V_o , ενώ α και β είναι οι αντίστοιχοι εκθέτες που εξαρτώνται από τη φύση του φορτίου^{ix}.

Θεωρώντας ένα εκθετικό φορτίο με $\alpha = \beta = 1.5$ και σταθερό συντελεστή ισχύος που αντιστοιχεί σε $P_o/Q_o = \tan \phi = 0.2$, οι χαρακτηριστικές φορτίου αντιστοιχούν στις κόκκινες στικτές-διακεκομμένες γραμμές του Σχ. 1.5, ενώ η μπλε συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική δικτύου, που προκύπτει από την τομή της χαρακτηριστικής φορτίου με την επιφάνεια που ορίζεται από την σχέση (1.55) στον χώρο (P, Q, V) ^x καθώς μεταβάλλεται η ζήτηση z του φορτίου. Τα σημεία A και B αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας με ίδια καταναλισκόμενη ισχύ, αλλά διαφορετικά επίπεδα ζήτησης z .

^{viii}Οι καμπύλες PV που παρουσιάστηκαν στην Υποεν. 1.3.2, όπως αναφέρθηκε και εκεί, είναι η ειδική περίπτωση όπου το φορτίο έχει σταθερό συντελεστή ισχύος. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση η καμπύλη PV του δικτύου προκύπτει από την τομή της επιφάνειας που ορίζεται από τη σχέση (1.55) με την καμπύλη της χαρακτηριστικής φορτίου των σχέσεων (1.56).

^{ix}Βλ. και Υποεν. 2.2.7.

^xΠροφανώς η χαρακτηριστική δικτύου ταυτίζεται με την καμπύλη PV του Σχ. 1.4 για $\tan \phi = 0.2$. Ωστόσο αυτό παύει να ισχύει αν ο συντελεστής ισχύος δεν είναι σταθερός.

1.3.4 Περιγραφή μηχανισμών κατάρρευσης

Έχοντας ορίσει τις χαρακτηριστικές φορτίου και δικτύων, στην παρούσα υποενότητα θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των μηχανισμών κατάρρευσης.

Χρησιμοποιώντας τα εκθετικά φορτία της Υποεν. 1.3.3 θα υποθεθεί ότι γίνεται μια μεταβολή στην ζήτηση. Αν η ζήτηση αυξηθεί, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.5, από $z_1 \rightarrow z_2$ και $z_3 \rightarrow z_4$, στο μεν σημείο Α, η αύξηση αυτή προκαλεί μια μείωση στην τάση του φορτίου, αλλά αύξηση στην καταναλισκόμενη ισχύ, στο δε σημείο Β, η αύξηση της ζήτησης προκαλεί ταυτόχρονη μείωση τόσο της τάσης όσο και της ισχύος. Ως εκ τούτου το σημείο λειτουργίας Α είναι ευσταθές. Από την άλλη πλευρά, αν το φορτίο θεωρηθεί στατικό (χωρίς κάποιο μηχανισμό αποκατάστασης) το σημείο Β θα μπορούσε να αποτελεί σημείο λειτουργίας, αν και πιθανότητα μη βιώσιμο, λόγω της χαμηλής τάσης και του υψηλού ρεύματος. Αντίθετα, αν θεωρηθεί ότι υπάρχει δυναμικός μηχανισμός που αυξάνει τη ζήτηση με στόχο την αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος, τότε το σημείο Β είναι ασταθές. Όπως έχει αναφερθεί πλήθος φορτίων παρουσιάζει τέτοια συμπεριφορά (π.χ. φορτία πίσω από ΣΑΤΥΦ, κινητήρες επαγωγής, θερμοστατικά φορτία κλπ.).

Ας θεωρηθεί τώρα ότι αμέσως μετά από μια διαταραχή το φορτίο συμπεριφέρεται βραχυπρόθεσμα με βάση τις στικτές διακεκομμένες γραμμές του Σχ. 1.5, ενώ μακροπρόθεσμα τείνει να αποκαταστήσει την κατανάλωση σε μια σταθερή τιμή, όπως φαίνεται από τη μαύρη κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή στο ίδιο σχήμα. Σε αυτήν την περίπτωση η κατακόρυφη γραμμή αποτελεί τη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική του φορτίου και οι κόκκινες γραμμές τις βραχυπρόθεσμες. Η χαρακτηριστική δικτύου εξακολουθεί να αντιστοιχεί στις συνθήκες ισορροπίας του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

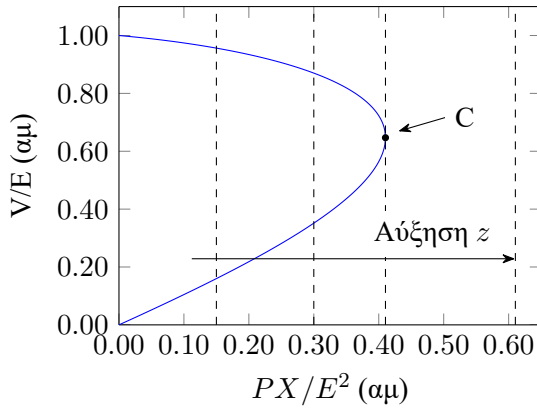
Μια προφανής απαίτηση για ομαλή λειτουργία του συστήματος είναι η ύπαρξη σημείων ισορροπίας και από τις δύο χαρακτηριστικές του φορτίου με την αντίστοιχη χαρακτηριστική του δικτύου. Ακριβώς αυτή η αλλαγή στο πλήθος των σημείων ισορροπίας που οφείλεται σε αλλαγή των παραμέτρων του συστήματος, είναι που δημιουργεί τα περισσότερα προβλήματα αστάθειας τάσης, όπως θα εξηγηθεί ποιοτικά στη συνέχεια.

Ένας τέτοιος μηχανισμός αστάθειας φαίνεται στο Σχ. 1.6α, όπου απεικονίζεται η μετατόπιση της μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής του φορτίου (διακεκομμένη γραμμή), που θεωρείται σταθερής ισχύος ($\alpha = \beta = 0$), καθώς αυξάνει η ζήτηση z , ως προς τη χαρακτηριστική του δικτύου (συνεχής καμπύλη), η οποία παραμένει σταθερή. Καθώς αυξάνει το z η χαρακτηριστική φορτίου μετακινείται προς τα δεξιά με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν από κάποιο σημείο και μετά σημεία τομής με την χαρακτηριστική δικτύου. Ένας πιο ρεαλιστικός μηχανισμός αστάθειας, που εμφανίζεται συχνά στα ΣΗΕ, αφορά την συμπεριφορά τους μετά από μια μεγάλη διαταραχή, όπως για παράδειγμα την απώλεια γραμμών μεταφοράς ή/και μονάδων παραγωγής. Αυτό οδηγεί σε αλλαγή της χαρακτηριστικής του δικτύου, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.6β. Έτσι ενώ αρχικά υπήρχαν σημεία ισορροπίας μετά την διαταραχή παύουν να υπάρχουν, με αποτέλεσμα την κατάρρευση τάσης.

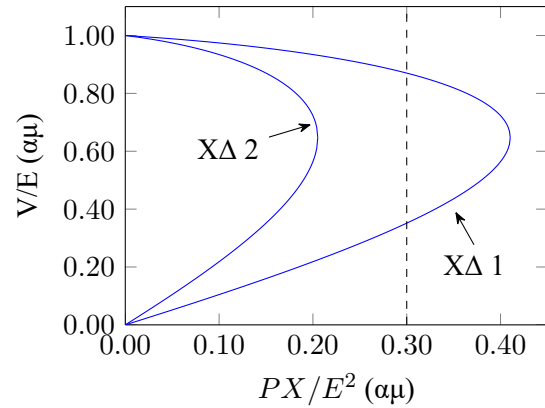
Στα Σχ. 1.7α και 1.7β παρουσιάζονται οι δύο προαναφερθέντες μηχανισμοί για εκθετικά φορτία με τιμή εκθετών $\alpha = \beta = 0.7$.

Εξετάζοντας το πρώτο είδος αστάθειας, λόγω αύξησης της ζήτησης του φορτίου z , που περιγράφεται στα Σχ. 1.6α, 1.7α, φαίνεται ότι υπάρχει ένα σημείο στο οποίο, καθώς τροποποιείται η χαρακτηριστική καμπύλη του φορτίου (διακεκομμένη γραμμή) εφάπτεται σε ένα μόνο σημείο με την χαρακτηριστική δικτύου (συνεχής γραμμή). Το σημείο αυτό, που στα προαναφερθέντα σχήματα φαίνεται με C, αποτελεί το όριο φόρτισης του συστήματος, πέρα από το οποίο αύξηση της ζήτησης έχει σαν συνέπεια απουσία σημείων ισορροπίας (λύσεων εξισώσεων δικτύου και φορτίου) με αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρέει.

Στο Σχ. 1.6α το όριο φόρτισης συμπίπτει με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (μύτη της καμπύλης), καθώς έχει υποθεθεί ότι το φορτίο είναι σταθερής ισχύος, που συμβαίνει πολλές φορές σε πρακτικά συστήματα είτε λόγω της ίδιας της φύσης των φορτίων, είτε λόγω των μηχανισμών αποκατάστασης της τάσης. Από την άλλη πλευρά, για φορτία μη σταθερής ισχύος το όριο φόρτισης δεν συμπίπτει

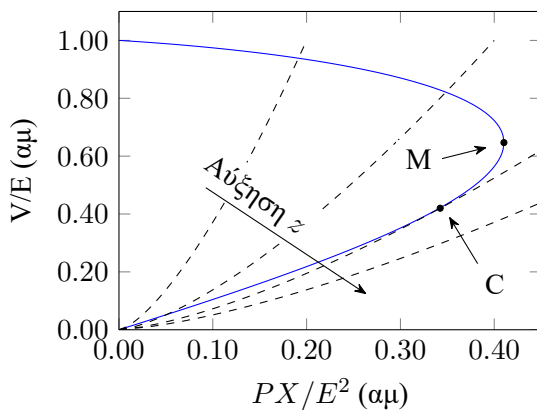


(α) Αστάθεια τάσης λόγω μεταβολής της ζήτησης. C: όριο φόρτισης συστήματος, που στην συγκεκριμένη περίπτωση ταυτίζεται με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος

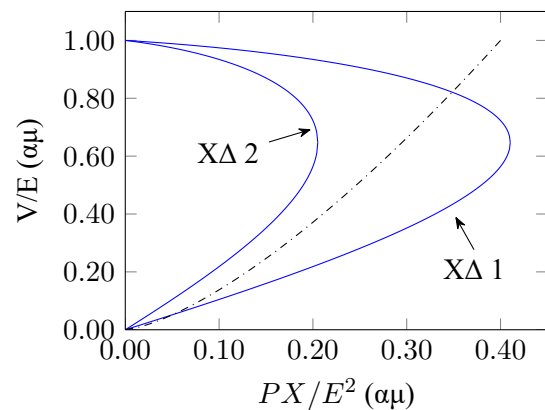


(β) Αστάθεια λόγω αλλαγής της χαρακτηριστικής δικτύου μετά από διαταραχή. XΔ 1: χαρ. δικτύου πριν τη διαταραχή, XΔ 2: χαρ. δικτύου μετά τη διαταραχή

Σχήμα 1.6: Μηχανισμοί αστάθειας τάσης σε εκθετικό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, με $\alpha = \beta = 0$



(α) Αστάθεια τάσης λόγω μεταβολής της ζήτησης. C: όριο φόρτισης συστήματος, M: σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος



(β) Αστάθεια λόγω αλλαγής της χαρακτηριστικής δικτύου μετά από διαταραχή. XΔ 1: χαρ. δικτύου πριν τη διαταραχή, XΔ 2: χαρ. δικτύου μετά τη διαταραχή

Σχήμα 1.7: Μηχανισμοί αστάθειας τάσης σε εκθετικό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, με $\alpha = \beta = 0.77$

με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, καθώς εξαρτάται από την χαρακτηριστική του φορτίου. Αυτό φαίνεται και στο Σχ. 1.7α, όπου το σημείο μέγιστη μεταφερόμενης ισχύος, C, είναι διαφορετικό από το όριο φόρτισης, M.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν και φορτία για τα οποία δεν υπάρχει όριο φόρτισης (όπως για παράδειγμα το φορτίο του Σχ. 1.5), αν και οι προκύπτουσες λύσεις μπορεί να μην είναι εφικτές, λόγω π.χ. απαράδεκτα χαμηλών τάσεων.

1.4 Μέτρα αντιμετώπισης αστάθειας τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο βασικός μηχανισμός αστάθειας τάσης είναι η δυναμική των φορτίων που προσπαθούν να αποκαταστήσουν την ζήτηση σε επίπεδα πέρα από το όριο φόρτισης του συστήματος. Ως εκ τούτου, καθώς το σύστημα πλησιάζει την κατάρρευση, διάφορα μέτρα αντιμετώπισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος προς το φορτίο και να μειώσουν ή να επιβραδύνουν την δυναμική των φορτίων κατά την κρίσιμη περίοδο. Το συγκεκριμένο θέμα έχει ήδη αναλυθεί και παρουσιαστεί σε πλήθος δημοσιεύσεων και βιβλίων, όπως για παράδειγμα [Tay92, Tay94, ILK97, MLC00, VV08a, CCW09].

Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των μέτρων που μπορούν να εφαρμοστούν είτε προληπτικά, πριν την εκδήλωση της αστάθειας τάσης, για ενίσχυση του συστήματος, είτε αποτρεπτικά, μετά την εμφάνιση της αστάθειας τάσης για την αποτροπή της κατάρρευσης. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μέτρα, όπως για παράδειγμα ο έκτακτος έλεγχος ΣΑΤΥΦ και η αποκοπή φορτίου, τα οποία μπορούν να ενταχθούν σε σχήματα προστασίας συστήματος, τα οποία θα περιγραφούν στην Υποεν. 1.6 που ακολουθεί.

1.4.1 Χρήση διατάξεων αντιστάθμισης αέργου ισχύος

Γενικά μιλώντας η αντιστάθμιση στηρίζεται στην έγχυση αέργου ισχύος για τη βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος. Στόχος της είναι η διατήρηση των τάσεων κοντά στις ονομαστικές τιμές, μειώνοντας το ρεύμα των γραμμών και ως εκ τούτου τις απώλειες, συμβάλλοντας στην ευστάθεια του συστήματος. Η χρήση της αντιστάθμισης μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και συσκευές, όπως περιγράφεται στην συνέχεια.

1.4.1.1 Αντιστάθμιση σειράς

Η (χωρητική) αντιστάθμιση σειράς χρησιμοποιείται βασικά για να μειώσει τη σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ παραγωγής και φορτίου, αυξάνοντας το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

1.4.1.2 Εγκάρσια χωρητική αντιστάθμιση

Οι εγκάρσιες συστοιχίες πυκνωτών αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή αντιστάθμισης αέργου ισχύος και είναι διατάξεις που χρησιμοποιούνται ευρέως από τις εταιρείες ηλεκτρισμού για την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς και βελτίωσης των προφίλ των τάσεων τόσο στο σύστημα μεταφοράς όσο και στο δίκτυο διανομής. Σε φυσιολογικές συνθήκες δεν συνδέονται όλες οι συστοιχίες. Ανάλογα με το ύψος του φορτίου, ένας συγκεκριμένος αριθμός συστοιχιών πυκνωτών επιλέγεται, με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαθέσιμες συστοιχίες για περίπτωση ανάγκης. Ως εκ τούτου, σε περίπτωση εμφάνισης αστάθειας τάσης όλες οι διαθέσιμες συστοιχίες στην ευπαθή περιοχή θα πρέπει να συνδέονται.

Στο σημείο αυτό ωστόσο θα πρέπει να γίνει μια διευκρίνιση. Η χρήση εγκάρσιας χωρητικής αντιστάθμισης δεν είναι πανάκεια για την αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης. Αυτό οφείλεται στο

γεγονός πως σε μείζονες περιοχές φορτίου χωρίς τοπική παραγωγή, καθώς το φορτίο αυξάνει όλο και μεγαλύτερες ποσότητες άεργης αντιστάθμισης χρειάζονται για να διατηρηθούν οι τάσεις σε φυσιολογικά επίπεδα. Ωστόσο, όπως φαίνεται και στο Σχ. 1.4, καθώς το φορτίο υπεραντισταθμίζεται τα δύο σημεία λειτουργίας πλησιάζουν προς το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που περιγράφηκαν στην Υποεν. 1.3.4.

1.4.1.3 Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (FACTS), αποτελούν συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά ισχύος και άλλο στατικό εξοπλισμό προσφέροντας έλεγχο σε μία ή περισσότερες παραμέτρους των συστημάτων μεταφοράς, ενισχύοντας την ελεγχιμότητα τους κι αυξάνοντας το όριο μεταφοράς ισχύος [Edr97].

Στα FACTS ανήκουν δύο κατηγορίες συσκευών εγκάρσιας αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως στα ΣΗΕ, τα SVC και STATCOM. Πρόκειται για ταχύτατα αποκρινόμενες συσκευές των οποίων η εγκάρσια αγωγιμότητα που συνδέεται σε ζυγό MT μεταβάλλεται πολύ γρήγορα για να διατηρήσει την τάση στον ζυγό YT ή YYT σχεδόν σταθερή. Για αυτό το λόγο είναι πολύ αποτελεσματικές στην αντιμετώπιση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Για τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας τους σε τέτοιες περιπτώσεις θα πρέπει να διατηρείται η εφεδρεία τους σε άεργο ισχύ σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Αυτό είναι όμως κάτι που δεν επιτυγχάνεται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Καθώς η χρήση των εν λόγω συσκευών αποσκοπεί κυρίως στη ρύθμιση της τάσης, μπορούν πολύ εύκολα να εξαντλήσουν τα αποθέματα άεργου ισχύος που διαθέτουν. Από την άλλη πλευρά όμως ο εγκατεστημένος αριθμός αυτών των συσκευών αυξάνεται συνεχώς, δημιουργώντας νέες δυνατότητες για συντονισμό των πηγών άεργης αντιστάθμισης, κρατώντας τα απαραίτητα αποθέματα αέργου ισχύος για πιθανή αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης.

1.4.1.4 Εγκάρσια επαγωγική αντιστάθμιση

Η εγκάρσια επαγωγική αντιστάθμιση (πηνία) χρησιμοποιείται στις γραμμές μεταφοράς πολύ μεγάλου μήκους ώστε να απορροφήσει την άεργο ισχύ που παράγει η ίδια η γραμμή και να αποφευχθούν επικίνδυνες υπερτάσεις. Σε περίπτωση όμως αστάθειας τάσης, αυτές οι συσκευές θα πρέπει να αποσυνδεθούν, μειώνοντας τη ζήτηση άεργου ισχύος του φορτίου και αυξάνοντας τα προφίλ των τάσεων και την ικανότητα μεταφοράς.

1.4.2 Έκτακτος έλεγχος γεννητριών

1.4.2.1 Ταχεία εκκίνηση ή σβέση μονάδων

Η ταχεία εκκίνηση μονάδων παραγωγής (π.χ. αεριοστροβίλων) αποτελεί ένα μέτρο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Καθώς η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι μια αργή διαδικασία που η απόκριση της μπορεί να ξεπεράσει την ώρα, η έναυση τοπικών αεριοστροβιλικών ή άλλου τύπου ταχείας εκκίνησης μονάδων στην περιοχή που παρουσιάζει το πρόβλημα είναι από τα πιο αποδοτικά μέτρα απέναντι στην αστάθεια τάσης. Μόλις αυτές οι μονάδες συγχρονιστούν, η άεργος υποστήριξη που μπορούν να προσφέρουν είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την ενίσχυση της τάσης του δικτύου.

Η σβέση μονάδων σχετίζεται περισσότερο με την αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας γωνίας, εντούτοις μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις που υπάρχουν μεγάλες μεταφορές ισχύος από συγκεκριμένες διαδρομές, σε συστήματα με γεωγραφική ανισοκατανομή της παραγωγής και του φορτίου. Η σβέση μονάδων θα πρέπει να συνδυάζεται είτε με έναρξη μονάδων είτε με απόρριψη φορτίου κοντά στην προβληματική περιοχή, ούτως ώστε να υπάρξει ανακατανομή της παραγωγής και μείωση της μεταφοράς ισχύος από διαδρόμους που έχουν φτάσει στα όρια τους.

1.4.2.2 Έλεγχος τάσης αναφοράς

Η αύξηση της τάσης αναφοράς των γεννητριών είναι ένα μέτρο που μπορεί να αυξήσει την άεργο παραγωγή από τις αντίστοιχες μηχανές και να ενισχύσει τα προφίλ των τάσεων στο σύστημα. Ωστόσο αυτό το μέτρο μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε γεννήτριες που δεν έχουν φτάσει τα λειτουργικά τους όρια (όριο υπερδιέγερσης, ρεύματος στάτη, κλπ.).

Η ανύψωση των τάσεων που μπορεί να προσφέρει αυτό το μέτρο βοηθάει και τις συσκευές αέργου αντιστάθμισης να παράξουν και να εγχύσουν περισσότερη άεργο ισχύ στο δίκτυο. Ωστόσο το μέτρο αυτό μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι ένα όριο αέργου παραγωγής, το οποίο καθορίζεται από την ενεργοποίηση της προστασίας υπερδιέγερσης των μονάδων, ειδικά στην περιοχή που εμφανίζει προβλήματα αστάθειας τάσης. Από το σημείο αυτό και έπειτα οι τερματικές τάσεις μένουν πρακτικά ανεξέλεγκτες.

1.4.2.3 Ρύθμιση παραγόμενης ισχύος

Η ρύθμιση της παραγόμενης ισχύος αφορά γεννήτριες στην περιοχή που παρουσιάζει προβλήματα αστάθειας τάσης. Οι συγκεκριμένες γεννήτριες, έχουν ένα συγκεκριμένο βαθμό ελευθερίας για να μετριάσουν ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν τόσο την ενεργό όσο και την άεργο παραγωγή τους, πάντα μέσα στα λειτουργικά τους όρια, για να αυξήσουν το όριο φόρτισης του συστήματος. Αυτή η λειτουργία των γεννητριών έχει μελετηθεί στο [Joh99].

Για παράδειγμα, θεωρώντας ότι μια μονάδα λειτουργεί εντός των καμπυλών ορίων φόρτισης της, μπορεί σε περίπτωση αστάθειας τάσης να επιλεγεί να μεγιστοποιήσει την ενεργό της παραγωγή, γεγονός που θα μειώσει την μεταφορά ισχύος από απομακρυσμένα κέντρα παραγωγής και μπορεί να αυξήσει την ικανότητα φόρτισης του συστήματος. Αυτή η κίνηση όμως θα μειώσει την άεργο παραγωγή της μονάδας, γεγονός που θα οδηγήσει σε μείωση των τάσεων στην περιοχή. Αντίθετα αν αυξήσει την άεργο παραγωγή της θα πρέπει να μειώσει την ενεργό της ισχύ. Σε κάθε περίπτωση, κάθε μία κίνηση από τις δύο προαναφερθείσες, αλλάζει τα όρια φόρτισης του συστήματος. Ποια από αυτές (ή κάποιος άλλος συνδυασμός) είναι πιο αποδοτική και θα εφαρμοστεί εξαρτάται από άλλους παράγοντες, όπως για παράδειγμα, την παραγωγή των άλλων γεννητριών στην ευπαθή περιοχή, την δυναμική των φορτίων, την τοπολογία του δικτύου, κλπ. Για να λυθεί το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να χρειάζονται τεχνικές βελτιστοποίησης. Εδώ οι προκλήσεις εστιάζονται στην ευρωστία των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, στην αξιοπιστία των μετρήσεων που απαιτούνται για την πλήρη παρατηρησιμότητα του συστήματος και στον περιορισμένο χρόνο που είναι διαθέσιμος για την εύρεση λύσης, καθώς η δυναμική του ΣΗΕ αλλάζει πολύ γρήγορα καθώς πλησιάζει στην αστάθεια.

1.4.3 Έκτακτος έλεγχος ΣΑΤΥΦ

Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής αποτελούν τον κύριο μηχανισμό αποκατάστασης των φορτίων και συνεπώς αποτελούν βασικό παράγοντα που μπορεί να οδηγήσει σε μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί έκτακτος έλεγχος της λειτουργίας τους προκειμένου να ανακουφιστεί το σύστημα. Ο συγκεκριμένος έλεγχος μπορεί να πάρει διάφορες μορφές:

- *Απενεργοποίηση του μηχανισμού (tap blocking)*: Πρόκειται για την απλούστερη μορφή έκτακτου ελέγχου και στηρίζεται στην απενεργοποίηση του ελεγκτικού μηχανισμού που υπό φυσιολογικές συνθήκες αποκαθιστά την τάση στο δευτερεύον (MT) του μετασχηματιστή διανομής. Με αυτήν την κίνηση η αποκατάσταση του φορτίου είτε ακυρώνεται είτε, στη χειρότερη περίπτωση, επιβραδύνεται.
- *Μείωση τάσης αναφοράς (voltage setpoint reduction)*: Στην συγκεκριμένη περίπτωση η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ μειώνεται, ενώ ο μηχανισμός του αφήνεται να λειτουργεί κανονικά.

- *Κλείδωμα θέσης ΣΑΤΥΦ (tap locking)*: Πρόκειται για έκτακτο έλεγχο που στηρίζεται στον καθορισμό μιας συγκεκριμένης θέσης του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ (tap), προς την οποία αυτό θα κινηθεί και μετά θα κλειδώσει.
- *Αντιστροφή λειτουργίας (tap reversing)*: Συνίσταται στην αλλαγή της λογικής ελέγχου του ΣΑΤΥΦ, το οποίο πλέον ελέγχει την πλευρά πρωτεύοντος (ΥΤ) αντί για την πλευρά της διανομής.

Καθένας από τους ανωτέρω ελέγχους μπορεί να σταματήσει την περαιτέρω επιδείνωση του συστήματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση που η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ είναι ο μόνος μηχανισμός αποκατάστασης των φορτίων. Παρόλα αυτά τα ΣΑΤΥΦ είναι διατάξεις με πολύ αργή απόκριση, με αποτέλεσμα να μην έχουν τη δυνατότητα να διορθώσουν μια κατάσταση που από τη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα θα αρχίσει να εξελίσσεται στην βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (βλ. και Παρ. 1.2.3.3). Συνεπώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαταραχές με μέτρια επίδραση στο σύστημα ή συνδυαστικά με άλλα μέτρα.

Η απενεργοποίηση του μηχανισμού των ΣΑΤΥΦ πρακτικά “παγώνει” το σύστημα στην τρέχουσα κατάσταση του. Μέχρι την εφαρμογή του συγκεκριμένου ελέγχου, το σύστημα μπορεί να έχει ήδη υποστεί σημαντική πτώση των τάσεων, με αποτέλεσμα να αφήνεται με χαμηλές τάσεις. Αυτό το μέτρο μπορεί να εφαρμοστεί για την καθυστέρηση της επίδρασης της ημερήσιας αύξησης φορτίου, αφήνοντας τις ελεγχόμενες τάσεις χωρίς ρύθμιση, όταν για παράδειγμα τα περιθώρια φόρτισης είναι μικρότερα από την αναμενόμενη αύξηση του φορτίου.

Η μείωση της τάσης αναφοράς είναι σχετικά πιο αποδοτική, καθώς έχει σαν αποτέλεσμα μια έμμεση αποκοπή φορτίου, που επιδρά θετικά στις τάσεις της μεταφοράς. Βέβαια η αποτελεσματικότητα εξαρτάται από την ευαισθησία του φορτίου από την τάση.

Το κλείδωμα θέσης αναγκάζει ακόμα περισσότερο τα ΣΑΤΥΦ να λειτουργούν προς όφελος της μεταφοράς, αλλά απαιτεί την προεπιλογή των συγκεκριμένων θέσεων που θα κλειδώσουν, κάτι που μπορεί να αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας.

Από όλους τους έκτακτους ελέγχους ΣΑΤΥΦ, η αναστροφή της λειτουργίας τους είναι ο πιο αποδοτικός για την αποκατάσταση των τάσεων μεταφοράς.

Σε κάθε περίπτωση, όταν άλλοι παράγοντες συμμετέχουν στην αποκατάσταση του φορτίου (π.χ. θερμοστατικά φορτία) οι έκτακτος έλεγχος των ΣΑΤΥΦ, οποιαδήποτε μορφή και αν πάρει, προσφέρει προσωρινή μόνο ανακούφιση στο σύστημα. Προφανώς σε αυτήν την περίπτωση κανένας έκτακτος έλεγχος δεν μπορεί να αποκαταστήσει ευσταθή λειτουργία μετά από μια διαταραχή και απαιτείται η εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου, η οποία εξετάζεται στη συνέχεια.

1.4.4 Αποκοπή φορτίου

Η (άμεση) αποκοπή φορτίου αποτελεί το έσχατο μέσο για την προστασία του συστήματος από αστάθεια τάσης, αλλά ταυτόχρονα είναι και το πιο αποδοτικό, ειδικά για την περίπτωση που το σύστημα υπόκειται σε αρχικές μειώσεις τάσεων που είναι πολύ μεγάλες για να διορθωθούν με άλλους τρόπους, όπως ρύθμιση τάσεων γεννητριών, οι οποίες μπορεί να έχουν φτάσει στα όρια λειτουργίας τους, ή από έκτακτο έλεγχο ΣΑΤΥΦ λόγω της αργής απόκρισης τους και των περιορισμένων ορίων τους στους λόγο μετασχηματισμού.

Η εφαρμογή της αποκοπής φορτίου μπορεί να γίνει αποκεντρωμένα, στηριζόμενη σε μετρήσεις ηλεκτρικών μεγεθών (π.χ. τάσης) και σύγκρισης τους με συγκεκριμένα κατώφλια. Σε αυτήν την περίπτωση, στους ζυγούς που παραβιάζεται το εκάστοτε κατώφλι ενεργοποιείται η αποκοπή φορτίου. Συνήθως η εφαρμογή της αποκοπής γίνεται επαναληπτικά, με διαβαθμισμένη χρονική καθυστέρηση. Από την άλλη πλευρά, αποκοπή φορτίου μπορεί να γίνει και σε μια ευρύτερη περιοχή, η οποία συνήθως ενεργοποιείται σε προαποφασισμένους ζυγούς με βάση συμβάντα που ακολουθούν συγκεκριμένο συνδυασμό γεγονότων.

Σε κάθε περίπτωση ο χρόνος, ο τόπος και η ποσότητα της αποκοπής είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία οποιουδήποτε σχήματος προστασίας τη χρησιμοποιεί. Όσον αφορά το χρόνο, έχει αποδειχθεί ότι υπάρχει μια μέγιστη καθυστέρηση που μπορεί να εφαρμοστεί πριν την αποκοπή, πέρα από την οποία απαιτείται μονότονα περισσότερη αποκοπή φορτίου [VV08a]. Η τοποθεσία της αποκοπής παίζει ασήμαντο ρόλο για φαινόμενα αστάθειας συχνότητας, ωστόσο σε περιπτώσεις αστάθειας τάσης παίζει ουσιαστικό ρόλο, καθώς η αποκοπή φορτίου σε λιγότερο αποδοτικά μέρη απαιτεί μεγαλύτερο ποσοστό αποκοπής για την επαναφορά της ευστάθειας. Στην πράξη βέβαια η περιοχή με σημαντικά προβλήματα ευστάθειας τάσης είναι γνωστή εκ των προτέρων, αλλά και πάλι, εντός της περιοχής η τοποθεσία βέλτιστης αποκοπής φορτίου μπορεί να αλλάζει ανάλογα με την διαταραχή που προκάλεσε την αστάθεια. Ο τρίτος παράγοντας είναι και ο πιο δύσκολος να καθοριστεί. Αν και υπάρχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τον υπολογισμό της ελάχιστης δυνατής αποκοπής (π.χ. μελέτη ευαισθησιών, ορίων φόρτισης κλπ.^{xi}) είναι δύσκολο να εφαρμοστεί σε συνθήκες πραγματικού χρόνου καθώς απαιτεί μεγάλο όγκο πληροφοριών για τον προσδιορισμό της κατάστασης του συστήματος (παρατηρησιμότητα).

1.5 Ασφάλεια ΣΗΕ

Πριν γίνει αναφορά στα συστήματα προστασίας των ΣΗΕ, θα πρέπει να αναλυθεί η έννοια της ασφάλειας ΣΗΕ και το πλαίσιο, στο οποίο αυτή ορίζεται.

1.5.1 Γενικά

Γενικά, ένα ΣΗΕ θεωρείται ασφαλές, όταν έχει την ικανότητα να ανταπεξέρχεται σε σοβαρές διαταραχές χωρίς κίνδυνο για τη λειτουργία του. Καθώς δεν μπορούν να εξεταστούν όλες οι πιθανές διαταραχές συνήθως επιλέγεται ένα προκαθορισμένο σύνολο διαταραχών που ονομάζονται *ενδεχόμενα* (*contingencies*) και η ασφάλεια εξετάζεται ως προς αυτό το σύνολο.

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι συνθήκες ασφαλείας ενός ΣΗΕ πρέπει να οριστούν πρώτα οι λειτουργικές του καταστάσεις και οι περιορισμοί στους οποίους υπόκειται, όπως ορίζονται στα [Lia78, FC78].

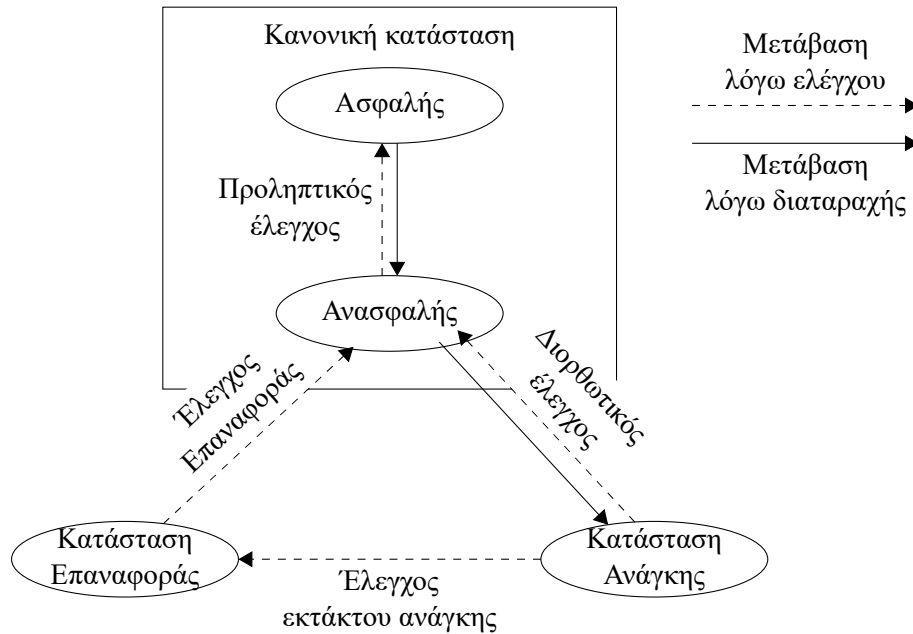
Καταρχήν υπάρχουν δύο τύποι περιορισμών:

- Περιορισμοί λειτουργίας: Πρόκειται για περιορισμούς που επιβάλλονται από τα ελάχιστα και μέγιστα όρια λειτουργίας των συνιστωσών του συστήματος (π.χ. ρεύματα γραμμής, τάσεις ζυγών κλπ.) και έχουν την μορφή ανισοτικών σχέσεων.
- Περιορισμοί φορτίου: Πρόκειται για περιορισμούς που εκφράζουν την απαίτηση του ισοζυγίου ισχύος (η παραγωγή να καλύπτει την ζήτηση) και ορίζονται από τις εξισώσεις των ροών φορτίου ως ισοτικοί περιορισμοί.

Με βάση αυτούς του περιορισμούς οι λειτουργικές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ένα ΣΗΕ φαίνονται στο Σχ. 1.8 και είναι:

1. *Κανονική κατάσταση* (Normal State), στην οποία ικανοποιούνται και οι δύο τύποι περιορισμών. Η κατάσταση αυτή μπορεί να διαχωριστεί περαιτέρω:
 - (α) *Ασφαλής κανονική κατάσταση*: δεν υπάρχει ενδεχόμενη διαταραχή που να απομακρύνει το σύστημα από την κανονική κατάσταση.
 - (β) *Ανασφαλής κανονική κατάσταση*: υπάρχει ενδεχόμενη διαταραχή που μπορεί να εξαναγκάσει το σύστημα να φύγει από την κανονική κατάσταση.

^{xi}Βλ. Εν. 2.4.



Σχήμα 1.8: Διαχωρισμός λειτουργικών καταστάσεων ΣΗΕ. Πηγή: [ΚΧ01]

2. Κατάσταση έκτακτης ανάγκης (Emergency State): Σε αυτήν την κατάσταση ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί φορτίου, αλλά παραβιάζονται ένας ή περισσότεροι περιορισμοί λειτουργίας.
3. Κατάσταση επαναφοράς (Restorative State): Στην οποία ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί λειτουργίας, αλλά παραβιάζεται ένας τουλάχιστον περιορισμός φορτίου (π.χ. υπάρχει αποκοπή φορτίου).

Με στόχο την διατήρηση του συστήματος όσο το δυνατόν περισσότερο σε κανονική κατάσταση, ελαχιστοποιώντας τις μεταβάσεις προς τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και επαναφοράς, εφαρμόζεται έλεγχος ασφαλείας ο οποίος μπορεί να πάρει τις ακόλουθες μορφές [Νικ07]:

- Προληπτικός έλεγχος που εφαρμόζεται σε περίπτωση που το σύστημα είναι σε ανασφαλή κανονική κατάσταση για να μεταβεί σε ασφαλή λειτουργική κατάσταση.
- Διορθωτικός έλεγχος για τη μετάβαση ενός συστήματος από την κατάσταση έκτακτης ανάγκης (που έχει μεταβεί μετά από μια διαταραχή) στην κανονική κατάσταση.
- Έλεγχος εκτάκτου ανάγκης, για μετάβαση του συστήματος από την κατάσταση έκτακτης ανάγκης σε κατάσταση επαναφοράς.
- Έλεγχος επαναφοράς, για σταδιακή μετάβαση του συστήματος από κατάσταση επαναφοράς σε κανονική κατάσταση.

Πέρα από αυτές τις μορφές ο έλεγχος ασφαλείας μπορεί να διαχωριστεί σε τρία επίπεδα που λαμβάνουν χώρα είτε σε πραγματικό χρόνο είτε στο στάδιο προγραμματισμού της λειτουργίας και είναι [VV08a, Καρ05]: η εποπτεία ασφάλειας, η ανάλυση ασφάλειας και ο προσδιορισμός περιθωρίων ασφάλειας. Τα επίπεδα αυτά, μαζί με την εκτίμηση ασφάλειας τάσης, αναλύονται στη συνέχεια.

1.5.2 Εποπτεία ασφάλειας (security monitoring)

Αποτελεί το πρώτο επίπεδο αξιολόγησης της ασφάλειας και συνεπάγεται την επεξεργασία εισερχόμενων πληροφοριών και τη σύγκριση με υπάρχοντα στοιχεία ώστε να καθοριστεί με ένα βαθμό βεβαιότητας το λειτουργικό σημείο του συστήματος τόσο στο παρόν, όσο και στο μέλλον, ελέγχοντας αν ικανοποιούνται οι περιορισμοί λειτουργίας.

1.5.3 Ανάλυση ασφάλειας (security analysis)

Είναι το δεύτερο στάδιο αξιολόγησης του ελέγχου ασφαλείας, στο οποίο εκτιμάται η ικανότητα του συστήματος να ανταπεξέλθει διάφορες διαταραχές παραμένοντας σε ασφαλή κανονική κατάσταση.

Προφανώς αν λάβει κανείς υπόψη το σύνολο των πιθανών διαταραχών, δεν υπάρχει ΣΗΕ που να λειτουργεί σε ασφαλή κανονική κατάσταση. Στην πράξη η ασφάλεια του συστήματος ελέγχεται σε σχέση με ένα σύνολο πιθανών διαταραχών.

Ένα ευρέως γνωστό κριτήριο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση διαταραχών είναι το $N - 1$, σύμφωνα με το οποίο ένα σύστημα πρέπει να είναι ικανό να ανταπεξέλθει οποιαδήποτε απλή απώλεια στοιχείου γραμμής μεταφοράς ή παραγωγής χωρίς να εισέλθει σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης.

1.5.4 Προσδιορισμός περιθωρίων ασφαλείας (security margin determination)

Είναι το τρίτο και τελευταίο επίπεδο αξιολόγησης του ελέγχου ασφαλείας, όπου πλέον εξετάζεται η απόσταση της δεδομένης λειτουργικής κατάστασης του συστήματος από συγκεκριμένα όρια. Υπό αυτή την έννοια ο στόχος του προληπτικού ελέγχου δεν είναι μόνο να φέρει το σύστημα από μια ανασφαλή σε μια ασφαλή κανονική κατάσταση, αλλά επιπλέον να διατηρήσει επαρκή περιθώρια ασφαλείας.

Τα περιθώρια ασφαλείας έχουν σχέση με την καταπόνηση του συστήματος (system stress) η οποία αντιστοιχεί σε μεγάλες αλλαγές των παραμέτρων του τις οποίες οι χειριστές του συστήματος είτε μπορούν να παρατηρήσουν (π.χ. αύξηση φορτίου) ή να ελέγξουν (π.χ. ανακατανομή μονάδων). Αυτή η καταπόνηση επίσης χαρακτηρίζεται από μια “κατεύθυνση” στο χώρο των παραμέτρων, η οποία παίρνει τη μορφή συντελεστών συμμετοχής των ζυγών στην αύξηση του φορτίου ή στον επαναπρογραμματισμό της παραγωγής. Αυτά τα περιθώρια είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στις απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς ο διαχειριστής του συστήματος πρέπει να γνωρίζει πόσο μπορεί να αυξηθεί το φορτίο ή η ικανότητα μεταφοράς χωρίς το σύστημα να γίνει ανασφαλές.

Ένα περιθώριο ασφαλείας είναι είτε η απόσταση ενός σημείου λειτουργίας μετά από διαταραχή από το όριο φόρτισης του συστήματος, οπότε αναφέρεται σαν περιθώριο φόρτισης, είτε ένα όριο ασφαλούς λειτουργίας, οπότε αναφέρεται σαν περιθώριο ασφαλούς λειτουργίας. Γενικά ο υπολογισμός του ορίου φόρτισης μετά από διαταραχή γίνεται εφαρμόζοντας τη διαταραχή πρώτα και στην συνέχεια μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του συστήματος προς συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ τα όρια ασφαλούς λειτουργίας υπολογίζονται πρώτα φορτίζοντας το σύστημα και στην συνέχεια εφαρμόζοντας την συγκεκριμένη διαταραχή, βρίσκοντας την φόρτιση για την οποία καταρρέει.

1.5.5 Εκτίμηση ασφάλειας τάσεως (Voltage Security Assessment)

Εκτός από την ανωτέρω κατηγοριοποίηση η εκτίμηση ασφαλείας μπορεί να χωριστεί και σε άλλες δύο κατηγορίες. Την *στατική* και τη *δυναμική* εκτίμηση ασφαλείας. Στην στατική εκτίμηση ασφαλείας λαμβάνονται υπόψη μόνο οι αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου (εξισώσεις ροών ισχύος) πριν και μετά την εφαρμογή ενός κρίσιμου ενδεχομένου, ενώ αντίθετα η δυναμική εκτίμηση ασφαλείας περιλαμβάνει δυναμικά μοντέλα για την εκτίμηση ασφαλείας μετά τη διαταραχή. Ένα βασικό στοιχείο της δυναμικής ασφαλείας αποτελεί η *εκτίμηση ασφαλείας τάσεως* (Voltage Security Assessment - VSA) που εστιάζει στην ευστάθεια τάσης μετά από μια διαταραχή.

Παραδοσιακά η εκτίμηση ασφάλειας τάσεως γινόταν μέσω καθορισμού των περιθωρίων ασφαλείας σε συνθήκες προγραμματισμού (off-line). Όμως μια τέτοια διαδικασία απαιτεί ιδιαίτερο υπολογιστικό φόρτο καθώς συνεπάγεται εκτεταμένους υπολογισμούς για όλες τις πιθανές λειτουργικές καταστάσεις του συστήματος [MWK04]. Ως εκ τούτου, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί διάφορες εφαρμογές εκτίμησης ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο (on-line), δηλαδή κατά τη λειτουργία του συστήματος στα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας του εκάστοτε διαχειριστή του συστήματος [CIG07, VKC05, Sav09].

Με την εκτίμηση ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) τα περιθώρια ασφαλείας υπολογίζονται συνεχώς βασιζόμενα σε πληροφορίες της κατάστασης του συστήματος, κυρίως από μετρήσεις συστημάτων SCADA. Παρόλα αυτά, λόγω της εντατικής χρήσης των ΣΗΕ, τα περιθώρια ασφαλείας εξαντλούνται πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα ακόμα και με τέτοιες εφαρμογές οι διαχειριστές να έχουν ελάχιστο χρόνο αντίδρασης. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται η ενεργοποίηση των *σχημάτων προστασίας συστήματος* που αναπτύσσονται στη συνέχεια.

1.6 Σχήματα προστασίας συστήματος

Παραδοσιακά η προστασία ΣΗΕ αναφέρεται ήδη από την αρχή του εξηλεκτρισμού στην προστασία του εξοπλισμού κυρίως από σφάλματα (B/K) με την απομόνωση του B/K στοιχείου από τον υγιή εξοπλισμό. Συνεπώς, αναφερόταν στην προστασία των συνιστωσών του συστήματος από σφάλματα. Σήμερα, όπου το κόστος μιας διακοπής είναι τεράστιο και υπάρχει η τάση για όσο το δυνατόν πληρέστερη εκμετάλλευση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, ο όρος “προστασία συστήματος” αναφέρεται στη διάσωση του συστήματος από μια ολική ή μερική σβέση, μέσω χρήσης ενός ειδικού συστήματος προστασίας. Έτσι γίνεται προσπάθεια διατήρησης της λειτουργίας του συστήματος ακόμα και σε οριακές καταστάσεις που δεν σχετίζονται με προβληματικό εξοπλισμό.

Γίνεται διάκριση συνεπώς μεταξύ της *προστασίας εξοπλισμού* και της *προστασίας του συστήματος*. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούνται τα *Σχήματα Συστήματα Προστασίας (ΣΠΣ)*^{xii}, τα οποία αποτελούν πλήρως αυτοματοποιημένα συστήματα ελέγχου και προστασίας, που βρίσκονται συνεχώς σε ετοιμότητα, παρακολουθώντας τη λειτουργία του συστήματος και επεμβαίνοντας τη στιγμή που χρειάζεται για να αποκαταστήσουν την ευσταθή λειτουργία, όταν το ΣΗΕ κινδυνεύει από επερχόμενη κατάρρευση.

1.6.1 Ορισμός και απαιτήσεις προστασίας

Διάφοροι ορισμοί έχουν δοθεί για τα σχήματα προστασίας συστήματος, με πιο χαρακτηριστικό αυτόν που έχει διατυπωθεί από την ομάδα εργασίας 38.02.19 της Cigré [CIG01]:

Ένα σχήμα προστασίας σχεδιάζεται για να ανιχνεύει μη φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας και να λαμβάνει προαποφασισμένες, διορθωτικές κινήσεις (διαφορετικές από την απομόνωση στοιχείων με σφάλμα) για να διατηρήσει τη συνοχή του συστήματος ώστε να προσφέρει ικανοποιητική απόδοση.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός σχήματος προστασίας είναι:

- Προστασία απέναντι σε επιλεγμένες, σπάνιες διαταραχές, συνήθως εκτός των ορίων σχεδίασης των ΣΗΕ. Η συγκεκριμένη προστασία συνήθως επιτρέπει διορθωτικό έλεγχο που δεν χρησιμοποιείται όταν το σύστημα βρίσκεται σε ασφαλή λειτουργική κατάσταση. Τέτοιο παράδειγμα διορθωτικού ελέγχου είναι η αποκοπή φορτίου ή παραγωγής.

^{xii}Στα αγγλικά υπάρχουν διάφορες ονομασίες για τα εν λόγω συστήματα με πιο χαρακτηριστικές τις ακόλουθες: System Protection Schemes (SPS), Remedial Action Scheme (RAS) και System Integrity Protection Schemes (SIPS).

- Η ύπαρξη του σχήματος προστασίας επιτρέπει να λειτουργεί το σύστημα πιο κοντά στα όρια ευστάθειας, με τις ενδεχόμενες συνέπειες τις αστάθειας να αντιμετωπίζονται μετά την εμφάνιση της.
- Προστασία σε όλο το εύρος του συστήματος, δρώντας σε πολλαπλές θέσεις, με συντονισμό πολλών και διαφορετικών σημάτων.

Παρά τις διαφορές που υφίστανται μεταξύ της προστασίας εξοπλισμού και της προστασίας συστήματος, και τα δύο είδη έχουν κοινές απαιτήσεις σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, κάθε σχήμα προστασίας πρέπει να έχει [VV07]:

1. *Εξαρτησιμότητα (dependability)*: Να δρα κάθε φορά που χρειάζεται.
2. *Ασφάλεια (security)*: Να μην δρα όταν δεν απαιτείται.
3. *Αξιοπιστία (reliability)*: Να καλύπτει ταυτόχρονα τις απαιτήσεις εξαρτησιμότητας και ασφάλειας.
4. *Επιλεκτικότητα (selectivity)*: Η δράση του να αντιστοιχεί στη σοβαρότητα της διαταραχής.
5. *Ευρωστία (robustness)*: Να μπορεί να αντιμετωπίσει πληθώρα σεναρίων που μπορούν να εμφανιστούν.

1.6.2 Κατηγοριοποίηση σχημάτων προστασίας συστήματος

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για τον διαχωρισμό και την κατηγοριοποίηση των σχημάτων προστασίας καθένas από τους οποίους σχετίζεται είτε με τα σήματα εισόδου, είτε με βάση την κρισιμότητα των διαταραχών που μπορούν να αντιμετωπίσουν είτε τέλος, με βάση τον χρόνο δράσης τους. Αναλυτικά οι συγκεκριμένες κατηγορίες περιγράφονται στο [CIG01]. Στην παρούσα διατριβή θα γίνει κατηγοριοποίηση με βάση τα ακόλουθα 4 κριτήρια [VV07]:

- *Σχήματα προστασίας αποκεντρωμένα ή ευρείας περιοχής*: Ένα αποκεντρωμένο σχήμα προστασίας χρησιμοποιεί τοπικές μετρήσεις (όπως αυτές π.χ. που συλλέγονται σε κάποιον υποσταθμό και δρουν επίσης τοπικά (π.χ. στον ίδιο υποσταθμό). Από την άλλη πλευρά, ένα σχήμα προστασίας ευρείας περιοχής συλλέγει δεδομένα από διάφορες περιοχές του συστήματος και δρα σε συσκευές που επίσης βρίσκονται διεσπαρμένες σε όλο το σύστημα.
- *Σχήματα προστασίας που βασίζονται σε μετρήσεις ή συμβάντα*: Ένα σχήμα προστασίας που στηρίζεται σε μετρήσεις παρακολουθεί την εξέλιξη ηλεκτρικών μεγεθών (π.χ. τάσεων, συχνότητας, κλπ.) μέσω των οποίων εμφανίζονται οι συνέπειες μιας δυσλειτουργίας του ΣΗΕ. Αντίθετα τα σχήματα προστασίας που στηρίζονται σε αναγνώριση συμβάντων ενεργοποιούνται μετά από συγκεκριμένο συνδυασμό γεγονότων (π.χ. συγκεκριμένες απώλειες μονάδων ή και γραμμών μεταφοράς, κλπ.).
- *Σχήματα προστασίας βασισμένα σε απλούς κανόνες ή αλγοριθμικές αποφάσεις*: Ένα σχήμα προστασίας που στηρίζεται σε λογικούς κανόνες λειτουργεί στην βάση της μορφής “αν Α τότε Β” (π.χ. σύγκριση μετρήσεων με κατώφλια) ενώ ένα αλγοριθμικό σχήμα προστασίας περιλαμβάνει αναλύσεις ενός πιο σύνθετου μοντέλου του ΣΗΕ.
- *Σχήματα προστασίας ανοιχτού ή κλειστού βρόχου*: Ένα σχήμα προστασίας χαρακτηρίζεται σαν κλειστού βρόχου όταν μπορεί να ενεργοποιηθεί και να δράσει πολλές φορές, με κάθε δράση να στηρίζεται στα αποτελέσματα και της προηγούμενης δράσης. Αντίθετα τα σχήματα προστασίας ανοιχτού βρόχου δρουν μόνο μια φορά.

Ένα σχήμα προστασίας προφανώς μπορεί να ανήκει σε περισσότερες της μίας κατηγορίες, ενώ κάθε τύπος από τους ανωτέρω προσφέρει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως θα περιγραφεί συνοπτικά στη συνέχεια.

Τα αποκεντρωμένα σχήματα προστασίας είναι πιο αξιόπιστα καθώς δεν χρειάζονται σύνθετα συστήματα τηλεπικοινωνιών. Από την άλλη πλευρά δεν έχουν την πλήρη εικόνα του συστήματος που θα χρειαζόταν για να συντονίσουν διάφορες αντικρουόμενες ενέργειες.

Τα σχήματα προστασίας που στηρίζονται σε συμβάντα είναι πιο γρήγορα από αυτά που στηρίζονται σε μετρήσεις, τα οποία πρέπει να περιμένουν την απόκριση του ΣΗΕ σε ένα συγκεκριμένο συμβάν πριν αρχίσουν να δρουν. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλα όπου οι επικίνδυνες διαταραχές μπορούν να καθοριστούν πλήρως. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα προστασίας που στηρίζονται σε μετρήσεις είναι πιο εύρωστα, καθώς ενεργοποιούνται παρατηρώντας τις συνέπειες μιας διαταραχής χωρίς να προσπαθούν να την ταυτοποιήσουν.

Ένα παρόμοιο συμπέρασμα ισχύει και για τα αλγοριθμικά σχήματα προστασίας. Καθώς στηρίζονται σε μοντέλα του συστήματος, είναι θεωρητικά καλύτερα προετοιμασμένα να αντιμετωπίσουν καταστάσεις που δεν έχουν προβλεφθεί ώστε να προσαρμόσουν τη δράση τους στη σφοδρότητα της διαταραχής. Ωστόσο, όσο πιο αναλυτικό είναι το μοντέλο που χρησιμοποιούν, τόσο πιο χαμηλή η ευρωστία τους ως προς τη σχέση μεταξύ της μοντελοποίησης και των ανακριβειών που προκύπτουν από τις μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη πλευρά, τα σχήματα προστασίας που βασίζονται στη λογική κανόνων είναι συγκριτικά απλούστερα, αν και οι κανόνες αυτοί πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα.

Τα σχήματα προστασίας κλειστού βρόχου συνδυάζουν επιλεκτικότητα και εξαρτησιμότητα. Καθώς τους επιτρέπεται να λειτουργήσουν όσες φορές χρειάζεται μέχρι να εξαλείψουν το πρόβλημα, αυτόματα προσαρμόζουν την απόκριση τους στη δριμύτητα της διαταραχής. Επιπλέον αυτό το χαρακτηριστικό τους ενισχύει την ευρωστία τους απέναντι στις αναπόφευκτες αβεβαιότητες της συμπεριφοράς του συστήματος.

1.7 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

Στη συνέχεια γίνεται συνοπτική επισκόπηση της βιβλιογραφίας που αφορά τις ακόλουθες δύο περιοχές, τις οποίες πραγματεύεται η παρούσα διατριβή:

1. Μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης
2. Σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης

1.7.1 Ανίχνευση αστάθειας τάσης

Τα τελευταία χρόνια η ανάλυση ευστάθειας τάσης έχει αποκτήσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς όλο και συχνότερα, για τους λόγους που ήδη έχουν αναφερθεί, τα συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιούνται υπερεντατικά, πολλές φορές κοντά στα όρια τους, με αποτέλεσμα διαταραχές που έχουν μεγάλη πιθανότητα εμφάνισης (π.χ. απώλεια γραμμών μεταφοράς ή μονάδων παραγωγής) να οδηγούν στην εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης [Int91, Tay94].

Στην Εν. 1.2 περιγράφηκε το φαινόμενο της αστάθειας τάσης και εξηγήθηκε πως πηγάζει από την προσπάθεια των φορτίων να αποκαταστήσουν τη ζήτηση τους πέρα από τη δυνατότητα των συστημάτων μεταφοράς. Τα βασικά εργαλεία για την πληρέστερη κατανόηση και μελέτη των φαινομένων αστάθειας παρουσιάζονται στις ακόλουθες αναφορές [VV96, Van00, VV08a].

Επειδή η αστάθεια τάσης δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το επίπεδο των τάσεων, καθώς η εμφάνιση της αστάθειας μπορεί να συμβεί σε κανονικά επίπεδα τάσης, ειδικά όταν υπάρχει άεργος αντιστάθμιση,

αντικείμενο της ερευνητικής προσπάθειας αποτελεί η ανίχνευση της εμφάνισης της αστάθειας πριν εκδηλωθούν τα αποτελέσματα της, ώστε η εκτίμηση της ασφάλειας τάσεως να μπορεί να γίνει σε συνθήκες πραγματικού χρόνου από τα κέντρα ελέγχου ενέργειας [CIG07, VKC05, Sav09], με την καλύτερη δυνατή διάκριση μεταξύ πραγματικά ασταθών περιπτώσεων και χαμηλών, αλλά ευσταθών τάσεων.

Δεδομένου ότι η αστάθεια τάσης σχετίζεται με την αδυναμία των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς να ικανοποιήσουν τη ζήτηση φορτίου, οι πρώτες ερευνητικές προσπάθειες που έγιναν για την έγκαιρη ανίχνευση της αστάθειας, σχετίζονται με τον προσδιορισμό της συνθήκης μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε πραγματικό χρόνο. Για αυτό το λόγο μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων ανίχνευσης στηρίζονται στην συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων που αναφέρθηκε στην Υποεν. 1.3.1. Η βασική υπόθεση, στην οποία στηρίζονται αυτές οι μέθοδοι είναι ότι το υπόλοιπο σύστημα όπως φαίνεται από την πλευρά του φορτίου, μπορεί να αντικατασταθεί από ένα ισοδύναμο Thévenin και ως εκ τούτου, το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και έναρξης της αστάθειας δίνεται από την ισότητα των μέτρων των δύο σύνθετων αντιστάσεων (φορτίου και ισοδύναμου Thévenin). Ένα βασικό πρόβλημα που παρουσιάζουν αυτές οι μέθοδοι ανίχνευσης είναι ο προσδιορισμός του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου.

Στην εργασία [VBN99] οι παράμετροι του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin υπολογίζονται χρησιμοποιώντας μία αναδρομική μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, όταν ένα σύνολο δύο ή περισσότερων μετρήσεων είναι διαθέσιμο. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή και στην εργασία [JSV00] όπου η προσέγγιση στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος εκφράζεται με όρους φορτίου. Στην εργασία [SVG06], χρησιμοποιώντας το θεώρημα του Tellegen και συζυγή κυκλώματα (adjoint networks), προτείνεται ένας τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin σε ένα βήμα.

Επειδή η ισοδύναμη αντίσταση Thévenin πρέπει να εκτιμηθεί από ένα χρονικό παράθυρο το οποίο πρέπει να είναι ταυτόχρονα αρκετά ευρύ ώστε να προλάβουν να αλλάξουν οι συνθήκες λειτουργίας του δικτύου, αλλά και αρκετά στενό, ώστε να ισχύει η υπόθεση σταθερής σύνθετης αντίστασης Thévenin, στην εργασία [CT08] χρησιμοποιούνται μετρήσεις προερχόμενες από γρήγορη δειγματοληψία συστημάτων μέτρησης φασιθετών (PMU) και προτείνεται ένας αλγόριθμος πέντε βημάτων για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin. Ο αλγόριθμος στηρίζεται στην παρατήρηση ότι η ΗΕΔ του ισοδύναμου κυκλώματος θα πρέπει να μειώνεται όταν οι αποκλίσεις της αντίστασης του φορτίου και του ισοδύναμου Thévenin είναι στην ίδια κατεύθυνση και να αυξάνεται διαφορετικά.

Στην αναφορά [BBN13] επισημαίνονται πολλά από τα ζητήματα που αφορούν την εκτίμηση του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin και προτείνεται μια εναλλακτική προσέγγιση για τον υπολογισμό ενός δείκτη αστάθειας για δίκτυα με ιδιαίτερη τοπολογία, όπου υπάρχει σαφής ροή ισχύος κατά μήκος ενός διαδρόμου. Σε αυτήν την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη όλη η ροή που εισέρχεται στο εξεταζόμενο σύστημα μέσω ενός ζυγού στο πέρας ενός διαδρόμου αντί για τη χρήση μόνο των τοπικών φορτίων. Με αυτόν τον τρόπο το ισοδύναμο κύκλωμα υπολογίζεται στα ανάντη του εξεταζόμενου ζυγού και η απόσταση μεταξύ της αντίστασης του συνολικού φορτίου που βλέπει ο ζυγός και της ισοδύναμης αντίστασης Thévenin χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ορίων μεταφοράς ισχύος του συγκεκριμένου διαδρόμου. Με αυτόν τον τρόπο οι διάφοροι διάδρομοι του συστήματος ιεραρχούνται με βάση τα περιθώρια φόρτισης για την εφαρμογή διορθωτικών κινήσεων (π.χ. καταναμημένη αντιστάθμιση σειράς κατά μήκος του διαδρόμου, τοπική αντιστάθμιση, κτλ.) σε περίπτωση μείωσης αυτών των περιθωρίων λόγω συγκεκριμένων διαταραχών, όπως π.χ. απώλεια γραμμών.

Πέρα από τα προβλήματα προσδιορισμού του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin, οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης που στηρίζονται στη συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων εμφανίζουν και ένα άλλο πρόβλημα όταν εφαρμόζονται σε συστήματα με πολλά φορτία. Συγκεκριμένα, καθώς πολλά από τα μεταβαλλόμενα φορτία συμπεριλαμβάνονται στο ισοδύναμο κύκλωμα Thévenin, όπως αποδεικνύεται στην εργασία [VS07], η συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων ικανοποιείται μετά την εμφάνιση της αστάθειας τάσης.

Εκτός από τη συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων, η αστάθεια μπορεί να σημανθεί από την παρατήρηση των ικανών συνθηκών ευστάθειας σε ΣΗΕ των οποίων η κύρια δυναμική είναι αυτή των ΣΑΤΥΦ. Από τις κυριότερες εργασίες που αφορούν τη μελέτη ευστάθειας των ΣΑΤΥΦ είναι η [MIC87], σε συμπεράσματα της οποίας στηρίζεται η τοπική μέθοδος ανίχνευσης LIVES, που παρουσιάστηκε στην εργασία [VV08b]. Η LIVES βασίζεται στην επιτήρηση της ευστάθειας μέσω της παρακολούθησης της ρυθμιζόμενης δευτερεύουσας τάσης των ΣΑΤΥΦ που βρίσκονται εγκατεστημένα στους μετασχηματιστές υποβιβασμού των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ. Στην εργασία [VS08] γίνεται περαιτέρω διερεύνηση των χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς της συγκεκριμένη μεθόδου σε ένα απλό σύστημα τριών (3) ζυγών.

Το κύριο χαρακτηριστικό των μεθόδων ανίχνευσης που αναφέρθηκαν μέχρι τώρα είναι ότι εφαρμόζονται τοπικά, στους ζυγούς που ενδιαφέρουν. Έχουν προταθεί όμως και μέθοδοι που στηρίζονται σε συλλογή δεδομένων από δύο ή περισσότερα σημεία. Μια κατηγορία τέτοιων μεθόδων είναι αυτή που κάνει χρήση δέντρων αποφάσεων. Στην εργασία [VWP93] τα δέντρα αποφάσεων χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης από την πλευρά της πρόληψης αλλά και της έκτακτης ανάγκης. Τα δέντρα αποφάσεων δημιουργούνται σε συνθήκες προγραμματισμού (off-line), από ένα σύνολο καταστάσεων το οποίο ιεραρχείται. Στη συνέχεια το δέντρο αυτό μπορεί να εκτιμήσει κάθε γνωστή ή καινούργια κατάσταση σε πραγματικό χρόνο. Αν και δεν απαιτούνται συγχρονισμένες μετρήσεις, διάφορες εργασίες κάνουν χρήση δεδομένων από συστήματα μέτρησης φασιθετών, όπως στις αναφορές [DSV09, Kar09]. Η μέθοδος αυτή είναι πολύ γρήγορη, καθώς όμως στηρίζεται σε προηγούμενα off-line αποτελέσματα, δεν έχει εγγυημένη αξιοπιστία.

Άλλες μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης αφορούν την επιτήρηση των αποθεμάτων άεργης ισχύος σε καίριες γεννήτριες και σημεία στατικής αντιστάθμισης του συστήματος, όπως αναφέρεται στην εργασία [BHX03], όπου αναπτύσσεται μια πρακτική και συστηματική μέθοδος για εκτίμηση ασφάλειας τάσης, μέσω του υπολογισμού των ισοδύναμων άεργων αποθεμάτων όλου του συστήματος, καθώς, όπως αποδεικνύεται, μεμονωμένα αποθεματικά δεν συσχετίζονται με το περιθώριο φόρτισης.

Στην εργασία [LRB03] ο υπολογισμός της ισοδύναμης αντίδρασης Thévenin (για τον υπολογισμό του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος) ξεφεύγει από το τοπικό επίπεδο και γίνεται χρήση δεδομένων και από τα δύο άκρα ενός διαδρόμου μεταφοράς ισχύος μέσω μετρήσεων φασιθετών, γεγονός που προσφέρει μια ευρύτερη εικόνα του συστήματος. Αντίστοιχα, στην εργασία [WH02] γίνεται χρήση δεδομένων από μετρήσεις φασιθετών γειτονικών ζυγών για τη βελτίωση του υπολογισμού του ισοδύναμου Thévenin, όπως φαίνεται από το ζυγό ενδιαφέροντος. Στην ίδια αναφορά εισάγεται και ένας νέος δείκτης ο οποίος στηρίζεται στην πρόβλεψη της τροχιάς του συστήματος προς την αστάθεια, μέσω εκτίμησης των αλλαγών των φορτίων στους ζυγούς που υπάρχουν μετρήσεις φασιθετών.

Μία άλλη μέθοδος ανίχνευσης περιλαμβάνει τη χρήση πολύθυρων ισοδύναμων Thévenin ούτως ώστε να μην ομαδοποιούνται όλες οι γεννήτριες και τα φορτία σε ένα ισοδύναμο κύκλωμα, το οποίο απαλείφει τα δυναμικά στοιχεία αυτών των μονάδων. Στην εργασία [MB03] χρησιμοποιείται η ιδέα για λήψη δεδομένων από γεννήτριες και φορτία, τουλάχιστον στην περιοχή ενδιαφέροντος, μέσω μετρήσεων φασιθετών, για την δημιουργία του πολύθυρου Thévenin και τον έλεγχο της συνθήκης μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Ουσιαστικά πρόκειται για εναλλακτική εφαρμογή του δείκτη L (L -index) που προτάθηκε στο [KG86] και με την ανάπτυξη των μετρήσεων φασιθετών ήρθε ξανά στο προσκήνιο για ανίχνευση αστάθειας τάσης, όπως για παράδειγμα στην αναφορά [GSG06], όπου προτείνεται η χρήση των φασιθετών για τον υπολογισμό αυτού του δείκτη L .

Στην εργασία [RB02] προτείνεται μια μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μετρήσεις από ένα σύστημα επιτήρησης ευρείας περιοχής (WAMS), το οποίο βασίζεται σε μετρήσεις φασιθετών για την ανασύσταση της δυναμικής εικόνας του ΣΗΕ. Μετά από κάποια διαταραχή ένα κινούμενο παράθυρο δεδομένων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και την ενημέρωση των δυναμικών μοντέλων που περιγράφουν το σύστημα, το οποίο και προσομοιώνουν με χρήση της οιονεί στατικής προσέγγισης, η οποία αποτελεί μια

ιδανική ισορροπία ανάμεσα στην ακρίβεια και την υπολογιστική προσπάθεια. Εφαρμογή του ανωτέρω συστήματος για πραγματικό σύστημα παρουσιάζεται στην εργασία [VHM04].

Στην εργασία [HSD16] γίνεται ανάπτυξη μιας καινούργιας μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο που στηρίζεται σε μετρήσεις φασιθετών για μια περιοχή φορτίου που συνδέεται με N διασυνδεδετικές γραμμές. Η συγκεκριμένη μέθοδος υιοθετεί ένα ισοδύναμο δίκτυο $N + 1$ ζυγών για να μοντελοποιήσει και να παρακολουθεί τις διασυνδεδετικές γραμμές. Για κάθε γραμμή η μέθοδος υπολογίζει το όριο φόρτισης ως προς όλες τις παραμέτρους του ισοδύναμου δικτύου, οι οποίες διαμορφώνονται σε πραγματικό χρόνο από μετρήσεις φασιθετών στους οριακούς ζυγούς της περιοχής φορτίου.

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων βασίζεται σε κεντρική και όχι αποκεντρωμένη ανίχνευση αστάθειας. Οι μέθοδοι αυτές υποθέτουν ότι υπάρχει επάρκεια συγχρονισμένων μετρήσεων για το σύστημα. Οι μέθοδοι κεντρικής ανίχνευσης στηρίζονται στην εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος μέσω των συγχρονισμένων μετρήσεων.

Στην εργασία [GV09a] χρησιμοποιείται ένα εκτεταμένο σύνολο εξισώσεων ισορροπίας που προσαρμόζεται στην κατάσταση του συστήματος, όπως προκύπτει από μετρήσεις φασιθετών. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας η οποία λαμβάνει υπόψη της την επίδραση των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης και των ΣΑΤΥΦ. Οι ευαισθησίες που υπολογίζονται είναι αυτές της συνολικής άεργου παραγωγής προς την άεργο ισχύ του κάθε φορτίου και χρησιμοποιούνται για να προσδιορίσουν πότε ένας συνδυασμός φορτίων περνάει από ένα μέγιστο. Σε αυτό το σημείο οι ευαισθησίες αλλάζουν πρόσημο από μια μεγάλη θετική τιμή σε μία μεγάλη αρνητική. Στην εργασία [GV09b] γίνεται πρακτική εφαρμογή της ανωτέρω μεθόδου ανίχνευσης.

Το γεγονός ότι μέχρι σήμερα η χρήση μετρήσεων φασιθετών είναι περιορισμένη, με μετρήσεις σε επιλεγμένα σημεία, απαιτεί καλή επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων. Στην αναφορά [GV11] προτείνεται μια μέθοδος ανακατασκευής του συστήματος από αραιά (χωρικά) δεδομένα μετρήσεων φασιθετών, μέσω της μοντελοποίησης τους σαν πρόβλημα βελτιστοποίησης. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι να μειωθεί, στο χώρο των φορτίων, η απόσταση μεταξύ της ανακατασκευασμένης κατάστασης και της τελευταίας που υπάρχει από έναν κλασσικό εκτιμητή κατάστασης, με τα δεδομένα από μετρήσεις φασιθετών να αποτελούν τους ισοτικούς περιορισμούς.

Με την εκτίμηση των τάσεων όλων των ζυγών μπορεί να υπολογιστεί ένας δείκτης αστάθειας τάσης. Στην εργασία [GM07] η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση Thévenin υπολογίζεται με άθροιση των απολύτων τιμών των σύνθετων πτώσεων τάσεων των κλάδων που αποτελούν το κοντινότερο μονοπάτι από το ζυγό ενδιαφέροντος μέχρι μία γεννήτρια που λειτουργεί με ενεργοποιημένη την προστασία υπερδιέγερσης. Στη συνέχεια το κριτήριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος από ισότητα των αντιστάσεων μετατρέπεται σε κριτήριο ισότητας των πτώσεων τάσης.

1.7.2 Σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης

Τα Σχήματα Προστασίας Συστήματος (ΣΠΣ) ή System Protection Schemes (SPS), που παρουσιάστηκαν στην Εν. 1.6, αναφέρονται στη βιβλιογραφία με πολλά ονόματα, όπως για παράδειγμα Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος ή System Integrity Protection Schemes (SIPS), Σχήματα Ανακούφισης Συστήματος ή Remedial Action Scheme (RAS).

Μια από τις πρώτες συστηματικές προσπάθειες ορισμού, κατηγοριοποίησης, παρουσίασης των βασικών χαρακτηριστικών τους, καθώς και του τύπου έκτακτου ελέγχου που μπορούν να εφαρμόσουν τα συστήματα προστασίας, περιλαμβάνεται στις αναφορές [CIG01, Beg03], ενώ μια συνοπτική ανασκόπηση των κυριότερων χαρακτηριστικών τέτοιων σχημάτων μπορεί να βρεθεί στις εργασίες [BNK05, BCK05, VV07]. Ειδικά για την προστασία από αστάθεια τάσης, αναλυτική παρουσίαση των αντίστοιχων σχημάτων υπάρχει στην αναφορά [Beg10].

Η αναφορά [MB09] περιλαμβάνει παραδείγματα και αξιολόγηση εφαρμογών σχημάτων προστασίας από αστάθεια σε πραγματικά ΣΗΕ σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ στην αναφορά [McC10], πέρα από εκτενή

βιβλιογραφική επισκόπηση πάνω στο θέμα και τα σχετικά πρότυπα που υπάρχουν για τον εξοπλισμό, γίνεται ανάπτυξη ενός θεωρητικού πλαισίου για την αξιολόγηση των διαφόρων σχημάτων προστασίας.

Τα περισσότερα σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης χρησιμοποιούν είτε άμεση αποκοπή φορτίου είτε έλεγχο έκτακτης ανάγκης των ΣΑΤΥΦ ή συνδυασμό αυτών, όπως παρουσιάζεται στην εργασία [VMK04]. Στην πρώτη περίπτωση το σχήμα που έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως αφορά την αποκοπή φορτίου λόγω υπότασης (Undervoltage Load-Shedding - UVLS), η οποία δεν ανιχνεύει άμεσα την αστάθεια τάσης, αλλά τις συνέπειες της. Η μέθοδος αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης έχει εφαρμοστεί σε αρκετά πραγματικά συστήματα ανά τον κόσμο και αρκετοί μηχανικοί από την ακαδημαϊκή κοινότητα αλλά και τη βιομηχανία έχουν ασχοληθεί με το συγκεκριμένο ζήτημα.

Μία εφαρμογή ενός συστήματος αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης βασισμένου σε μετρήσεις αναφέρεται στην εργασία [Tay92], όπου περιγράφονται οι βασικές αρχές λειτουργίας του. Συγκεκριμένα προτείνεται αποκοπή φορτίου 5% από προεπιλεγμένους ζυγούς, όταν η τάση σε αυτούς παραμένει κάτω από μία τάση κατωφλίου (0.9 αμ στην συγκεκριμένη εφαρμογή) για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (1.5 s), με δυνατότητα εφαρμογής μικρότερου χρονικού διαστήματος με βάση την απόκλιση από την ονομαστική τάση και για την αποφυγή υπερτάσεων λόγω απόρριψης φορτίου. Στην ίδια αναφορά αναφέρονται και βασικές παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από ένα τέτοιο σχήμα προστασίας.

Στην εργασία [OV07] παρουσιάζεται ένα άλλο αποκεντρωμένο και αυτόνομο σύστημα αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης με χρήση διασπαρμένων ελεγκτών. Σε αυτήν την περίπτωση κάθε ελεγκτής δρα σε λειτουργία κλειστού βρόχου, αποκόπτοντας φορτία ανάλογα με τη διαταραχή. Η επιτήρηση γίνεται στη μεταφορά, ενώ η αποκοπή σε ένα σύνολο φορτίων της διανομής, μεταξύ των οποίων (μεταφορά και διανομή) μπορεί να υφίσταται σύστημα υπομεταφοράς. Όπως και στο προηγούμενο σύστημα προστασίας, έτσι και σε αυτό ορίζεται τάση κατωφλίου, ωστόσο ο χρόνος αποκοπής και το ποσοστό αποκοπής ρυθμίζονται δυναμικά με βάση τη διαταραχή. Το συγκεκριμένο σύστημα δοκιμάστηκε σε προσομοίωση του γαλλικού συστήματος της RTE, για ένα σύνολο διαταραχών, με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Αν και αφορά αποκεντρωμένο σύστημα προστασίας, το οποίο δεν απαιτεί επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ελεγκτών, προτείνεται και μια παραλλαγή, με κεντρικό έλεγχο, η σύγκριση των οποίων λαμβάνει γίνεται στην εργασία [OV09], υπό την επίδραση φορτίων κινητήρων. Ο κεντρικός έλεγχος αφορά την αποστολή δεδομένων υπερδιέγερσης γεννητριών στους αποκεντρωμένους ελεγκτές για την πιο γρήγορη αποκοπή φορτίων. Το κόστος σε αυτήν την περίπτωση είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος προστασίας.

Στην εργασία [GV10] προτείνεται ένα σχήμα προστασίας ευρείας περιοχής, κλειστού βρόχου, το οποίο στηρίζεται στην ανίχνευση της αστάθειας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που αναφέρεται στις εργασίες [GV09a, GV09b] που αναφέρθηκαν στην Υποεν. 1.7.1. Μόλις ανιχνευτεί αστάθεια τάσης μέσω της αλλαγής προσήμου των ευαισθησιών, αρχίζει μια σειρά από αποκοπές φορτίου σε προεπιλεγμένους ζυγούς, μέχρι η αντίστοιχη τάση μεταφοράς να ξεπεράσει το κατώφλι της, το οποίο τίθεται δυναμικά ίσο με την τιμή της τάσης τη στιγμή της αλλαγής προσήμου των ευαισθησιών. Οι ζυγοί στους οποίους εφαρμόζεται αποκοπή φορτίου, ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση την επίδραση (ευαισθησία) του φορτίου τους στην τάση. Το φορτίο αποκόπτεται σε ένα ή περισσότερα βήματα από το ζυγό με τη μεγαλύτερη επίδραση και μέχρι εξάντλησης του διαθέσιμου για αποκοπή φορτίου, στη συνέχεια στον επόμενο ζυγό κ.ο.κ., μέχρι όλες οι τάσεις να βρεθούν πάνω από τις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου.

Ο συνδυασμός των δύο προαναφερθέντων σχημάτων προστασίας γίνεται στην αναφορά [OGV13], όπου υλοποιείται ένα ενιαίο σχήμα με δύο επίπεδα προστασίας. Το πρώτο επίπεδο είναι ευρείας περιοχής και χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της αστάθειας όπως στην εργασία [GV10], ενώ το δεύτερο είναι αυτόνομο, τοπικό σύστημα στο οποίο μεταβιβάζεται το σήμα αστάθειας ώστε να διαμορφωθούν τα κατώφλια των τάσεων για την αποκοπή φορτίου και το οποίο δρα από εκεί και πέρα όπως περιγράφεται στην αναφορά [OV07].

Μια εφαρμογή αποκοπής φορτίου για προστασία από αστάθεια τάσης στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα παρουσιάζεται στο [NVF07]. Πρόκειται για σύστημα προστασίας βασισμένο σε συμβάντα (event based), το οποίο έχει υλοποιηθεί από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) για την προστασία του συστήματος από δύο συγκεκριμένες διαταραχές. Η πρώτη αφορά στην απώλεια της διπλής γραμμής 400 kV Λαύριου - Παλλήνης και η δεύτερη την απώλεια των μονάδων Μεγαλόπολη III και IV. Στην πρώτη περίπτωση ενεργοποιούνται εντολές για απόρριψη φορτίου, ενώ στη δεύτερη βγαίνουν εκτός οι δύο γραμμές 150 kV που ξεκινούν από τη Μεγαλόπολη. Για την ενεργοποίηση του συστήματος και στις δύο περιπτώσεις απαιτείται οπλισμός από το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΑΔΜΗΕ στον Αγ. Στέφανο, ο οποίος γίνεται π.χ. μετά από σήμανση του συστήματος εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) [CKV05, CKV06].

Εκτός από το προαναφερθέν σχήμα προστασίας, έχουν προταθεί για το Ελληνικό Σύστημα και σχήματα προστασίας με αποκοπή φορτίου λόγω υπότασης στα [Νικ07, NV08]. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν τοπική αποκοπή 5% με εφαρμογή απευθείας κατωφλίου τάσης 0.79 αμ στους ζυγούς ΥΤ και κεντρική αποκοπή ευρείας περιοχής. Η τελευταία χρησιμοποιεί κατώφλια τάσης σε επιλεγμένους ζυγούς ΥΥΤ και εφαρμόζονται διάφορες εναλλακτικές, συμπεριλαμβανομένου και της ελάχιστης αποκοπής που προκύπτει από ανάλυση ευαισθησιών.

1.8 Αντικείμενο και δομή της διατριβής

1.8.1 Αντικείμενο της διατριβής

Το βασικό αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η σχεδίαση συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και η εφαρμογή τους είτε αυτόνομα για λόγους επιτήρησης, είτε σε συνδυασμό με ολοκληρωμένα σχήματα προστασίας συστήματος, τα οποία πέρα από την ανίχνευση εφαρμόζουν και διορθωτικές κινήσεις με στόχο την αποκατάσταση της ευστάθειας τάσης και την αποτροπή της κατάρρευσης.

Τα φαινόμενα αστάθειας τάσης που μελετώνται αναφέρονται σε μηχανισμούς στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οι οποίοι μπορούν να οδηγήσουν καθώς εξελίσσονται σε αστάθεια και στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα και κατάρρευση τάσεως. Στόχος είναι η χρησιμοποίηση αξιόπιστων μεθόδων ανίχνευσης, όσο πιο κοντά γίνεται στο πραγματικό σημείο εμφάνισης αστάθειας, ώστε το μέγεθος των διορθωτικών μέτρων που απαιτούνται σε κάθε περίπτωση να είναι το ελάχιστο πρακτικά δυνατό.

Για την αξιολόγηση των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που αναπτύσσονται στη διατριβή θα γίνουν προσομοιώσεις τόσο με πλήρη δυναμικά μοντέλα, όσο και με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης. Ο στόχος είναι στην πρώτη περίπτωση να αποδειχθεί η αξιοπιστία και ανεξαρτησία των διαφόρων σχημάτων ανίχνευσης και προστασίας σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου θορύβου μέτρησης και βραχυπρόθεσμων μεταβατικών, ενώ η σύγκριση με την οιονεί στατική προσέγγιση θα δώσει τη δυνατότητα εφαρμογής των σχημάτων προστασίας σε μεγάλα συστήματα, όπως το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Ως εκ τούτου, γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου υλοποίησης των μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας, τόσο για πραγματική εφαρμογή, όσο και για χρήση από το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB. Στα πλαίσια αυτά αναπτύσσονται υπορουτίνες που υλοποιούν τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση και ενσωματώνονται στο πρόγραμμα WPSTAB, συνοδευόμενες από εκτεταμένη αναβάθμιση του υφιστάμενου πηγαίου κώδικα.

Τα ΣΗΕ που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή των διαφόρων συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση, είναι αφενός μικρά συστήματα δοκιμών μερικών δεκάδων ζυγών (τυποποιημένα ή μη) και αφετέρου το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα. Καθένα από τα συστήματα δοκιμών δίνει τη δυνατότητα ελέγχου και ρύθμισης διαφορετικών παραμέτρων της ανίχνευσης και προστασίας, επιτρέποντας παράλληλα τη συγκριτική μελέτη των διαφόρων σχημάτων προστασίας και

ανίχνευσης, τόσο μεταξύ τους όσο και με το πραγματικό σημείο εμφάνισης αστάθειας και την εφαρμογή της ελάχιστης δυνατής αποκοπής. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα δείχνει την πρακτική εφαρμογή των εν λόγω σχημάτων σε πραγματικά ΣΗΕ.

Τέλος, στα πλαίσια της διατριβής γίνεται μελέτη της επίδρασης της αντιστάθμισης αέργου ισχύος στην αύξηση των ορίων φόρτισης της περιοχής της Πελοποννήσου στο ΕΔΣ, μέσα από δύο διαφορετικές προσεγγίσεις, τόσο με κεντρική αντιστάθμιση στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης όσο και με διεσπαρμένη αντιστάθμιση, χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πυκνωτές στα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου.

1.8.2 Δομή της διατριβής

Η παρούσα διατριβή αποτελείται από επτά κεφάλαια. Μετά το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάστηκαν οι βασικές θεωρητικές έννοιες και το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο, η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο **Κεφ. 2** περιγράφεται το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και ανάλυσης ευστάθειας τάσης WPSTAB, του εργαστηρίου ΣΗΕ του ΕΜΠ [Βου99]. Συγκεκριμένα συνοψίζεται ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες των δυναμικών φαινομένων σε ΣΗΕ, από τον οποίο προκύπτει το προσεγγιστικό μοντέλο της οιονεί στατικής ανάλυσης, για να ακολουθήσει η περιγραφή των μοντέλων των στοιχείων ΣΗΕ, όπως αναπαρίστανται στο πρόγραμμα WPSTAB καθώς και οι μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία τους. Στη συνέχεια γίνεται μια ποιοτική περιγραφή του αλγορίθμου χρονικής προσομοίωσης που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα, ενώ το συγκεκριμένο κεφάλαιο κλείνει με την ανάλυση ευστάθειας τάσης που μπορεί να κάνει το WPSTAB για τον προσδιορισμό του σημείου μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης κατά την προσομοίωση μιας κρίσιμης διαταραχής.

Στο **Κεφ. 3** γίνεται ανάπτυξη των μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή από τα αντίστοιχα συστήματα ανίχνευσης. Συγκεκριμένα σε πρώτη φάση διατυπώνονται οι ικανές συνθήκες ευστάθειας για συστήματα που η κύρια δυναμική στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι εκείνη των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών υποβιβασμού τάσης που είναι εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς διανομής (ΥΤ/ΜΤ). Πάνω σε αυτήν την ικανή συνθήκη ευστάθειας αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της τοπικής μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας πραγματικού χρόνου, γνωστή με το ακρωνύμιο LIVES (Local Identification of Voltage Emergency Situations). Η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται στην επιτήρηση της ικανής συνθήκης ευστάθειας μέσω της επιτήρησης της ελεγχόμενης από τα ΣΑΤΥΦ τάσης, μετά από αντίστοιχη κίνηση του μηχανισμού τους. Σε δεύτερη φάση οι μέθοδος LIVES επεκτείνεται για εφαρμογή σε ζυγούς όπου δεν υπάρχουν ΣΑΤΥΦ (όπως για παράδειγμα σε ζυγούς μεταφοράς ΥΥΤ τάσης) με χρήση μόνο μετρήσεων φασιθετών τάσεων και ρευμάτων. Η συγκεκριμένη μέθοδος οδηγεί στην εισαγωγή του νέου δείκτη NLI για ανίχνευση της αστάθειας, μόλις η τιμή του πέσει κάτω από το μηδέν.

Στο **Κεφ. 4** αναπτύσσονται τα διάφορα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας που στηρίζονται στις ανωτέρω μεθόδους. Το συγκεκριμένο κεφάλαιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται αναφορά στη γενική μορφή των διαφόρων συστημάτων, όπως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικές εφαρμογές και βέβαια όπως υλοποιούνται για τα προγράμματα πλήρους χρονικής προσομοίωσης, ενώ στο δεύτερο μέρος γίνεται περιγραφή του ακριβή τρόπου υλοποίησης τους εντός του λογισμικού πακέτου WPSTAB.

Ανάλογα με τη μέθοδο ανίχνευσης την οποία χρησιμοποιούν τα διάφορα συστήματα που αναπτύσσονται χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Αυτά που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES και αυτά που στηρίζονται στο δείκτη NLI. Τα συστήματα που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία αφορούν είτε απλή επιτήρηση είτε εφαρμογή ολοκληρωμένης προστασίας από αστάθεια τάσης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αναπτύσσεται μόνο σύστημα επιτήρησης ευστάθειας τάσης, του οποίου όμως τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από υπάρχοντα συστήματα προστασίας.

Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται το σύστημα επιτήρησης ευστάθειας τάσης ΣΑ1 (LIVES-alarm - LA),

που αποτελεί απευθείας εφαρμογή της μεθόδου LIVES, με χρήση κατάλληλου φίλτρου και μικρορυθμίσεων για απαλοιφή των μεταβατικών φαινομένων και του θορύβου και ως εκ τούτου αποφυγή σήμανσης εσφαλμένων συναγερμών. Εκτός από απλή επιτήρηση το εν λόγω σύστημα εντάσσεται και σε συστήματα προστασίας.

Το πρώτο σύστημα προστασίας που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES ονομάζεται ΣΠ1.1 και χρησιμοποιεί το σύστημα LIVES-alarm, μαζί με άλλα δύο επιπλέον υποσυστήματα, εκ των οποίων το ένα είναι υπεύθυνο για την αποκατάσταση της ευστάθειας μόλις σημανθεί συναγερμός αστάθειας και ονομάζεται LIVES-restore (LR), ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την αποκατάσταση της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ όταν αυτά εξαντλήσουν τις μεταβλητές τους λήψεις και ονομάζεται LTC-range restoration (LTC-rr).

Η βασική λειτουργία του υποσυστήματος LR είναι η αντιστροφή της κίνησης του ΣΑΤΥΦ προς όφελος του πρωτεύοντος, μέχρι την αποκατάσταση της ευστάθειας, οπότε και θέτει την αναφορά της νεκρής ζώνης του δευτερεύοντος ίση με την τρέχουσα τιμή της τάσης, εφαρμόζοντας κατ'αυτόν τον τρόπο μία έμμεση αποκοπή φορτίου, το ποσό της οποίας εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από την ευαισθησία του φορτίου από την τάση. Σε περίπτωση που υπάρχουν και αυτοεπαναφερόμενα φορτία χρησιμοποιείται η παραλλαγή του συστήματος προστασίας που ονομάζεται ΣΠ1.2 και περιλαμβάνει επιπλέον την δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου σε συνδυασμό με κατώφλια τάσης.

Το τελευταίο σύστημα προστασίας που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES ονομάζεται ΣΠ1.3 και χρησιμοποιεί το υποσύστημα LA για την ανίχνευση αστάθειας και την απευθείας εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου στον αντίστοιχο ζυγό που σημαίνεται συναγερμός αστάθειας.

Το δεύτερο σύστημα ανίχνευσης που αναπτύσσεται, στηρίζεται στον δείκτη NLI και ονομάζεται ΣΑ2. Πρόκειται για ένα σύστημα ανίχνευσης που μπορεί να εφαρμοστεί σε ΣΗΕ των οποίων μια ευάλωτη περιοχή συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς. Η απλή επιτήρηση τάσης και ρεύματος σε μερικούς ζυγούς του διαδρόμου μεταφοράς με χρήση φασιθετών είναι ικανή να ανιχνεύσει την αστάθεια επιτηρώντας ουσιαστικά τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ από το διάδρομο και την ωμική αγωγιμότητα που “βλέπει” ο αντίστοιχος ζυγός στον οποίο γίνεται η μέτρηση.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση του τρόπου υλοποίησης των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση εντός του λογισμικού πακέτου WPSTAB. Συγκεκριμένα περιγράφονται οι ρουτίνες που υλοποιούν τα συστήματα ανίχνευσης ΣΑ1 και ΣΑ2 καθώς και τα συστήματα προστασίας ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3, ενώ γίνεται και περιγραφή του τρόπου που χρησιμοποιούνται οι ρουτίνες αυτές κατά την χρονική προσομοίωση, από το κυρίως πρόγραμμα. Επίσης γίνεται αναφορά στα νέα δεδομένα που μπορεί να διαβάσει το WPSTAB σχετικά με τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις νέες δυνατότητες που προστέθηκαν στο πρόγραμμα περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Α.

Στο **Κεφ. 5** γίνεται εφαρμογή των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES. Χρησιμοποιούνται τόσο συστήματα δοκιμών, όσο και το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.

Το πρώτο σύστημα δοκιμών είναι ουσιαστικά ένα σύστημα μεταφοράς ΥΥΤ και ΥΤ τάσης, με δυναμικά αυτοεπαναφερόμενα φορτία πίσω από ΣΑΤΥΦ. Επιπλέον διερευνάται η ύπαρξη δυνατότητας εφαρμογής της ανίχνευσης ή/και της προστασίας στην περίπτωση που υπάρχουν και αυτομετασχηματιστές με σύστημα μεταβλητής λήψης.

Το δεύτερο σύστημα δοκιμών που χρησιμοποιείται είναι το ονομαζόμενο Nordic Test System, το οποίο έχει τυποποιηθεί από την IEEE Task Force. Σε αυτό το σύστημα δοκιμών γίνονται τόσο πλήρεις χρονικές προσομοιώσεις με προσθήκη θορύβου μέτρησης, όσο και προσομοιώσεις με χρήση της οιονεί στατικής προσέγγισης. Με στόχο την καλύτερη ρύθμιση των παραμέτρων των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας μελετάται η επίδραση των παραμέτρων αυτών στην απόκριση τους. Επιπλέον, γίνεται μελέτη της ευαισθησίας της μεθόδου ανίχνευσης στην εξάρτηση των φορτίων από την τάση, ενώ τέλος, τα διάφορα συστήματα προστασίας συγκρίνονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τη θεωρητικά υπολογι-

ζόμενη ελάχιστη αποκοπή φορτίου που χρειάζεται για την αποφυγή της αστάθειας. Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση της ανάλυσης ευστάθειας τάσης που προσφέρει το πρόγραμμα WPSTAB, όπως τροποποιήθηκε και αναβαθμίστηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Η εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα γίνεται στο τέλος του 5^{ου} κεφαλαίου, μαζί με ανάλυση ευστάθειας τάσης για ένα κρίσιμο ενδεχόμενο του καλοκαιριού του 2010, που εμφάνιζε πολύ μικρά περιθώρια φόρτισης. Αν και το συγκεκριμένο σενάριο αφορά μια περίπτωση αστάθειας τάσης που οφείλεται σε διαδοχικές απώλειες μονάδων λόγω υπότασης και χαμηλά προφίλ τάσεων, γίνεται εφαρμογή του ΣΠ1.1, με ικανοποιητικά αποτελέσματα ως προς την ανίχνευση της αστάθειας. Επιπλέον μελετάται η επίδραση της στατής αντιστάθμισης στην αύξηση της ικανότητας φόρτισης του συστήματος σε δύο εκδοχές. Η πρώτη αφορά διασπαρμένη αντιστάθμιση στους υποσταθμούς σύνδεσης των αιολικών πάρκων της Πελοποννήσου και η δεύτερη μια συγκεντρωμένη στον ΑΗΣ της Μεγαλόπολης.

Στο **Κεφ. 6** γίνεται εφαρμογή του ΣΑ2 που χρησιμοποιεί τον δείκτη NLI στο τυποποιημένο σύστημα δοκιμών του Nordic Test System, και στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.

Για την εφαρμογή στο Nordic Test System, χρησιμοποιείται τόσο η πλήρης χρονική προσομοίωση, με προσθήκη θορύβου, όσο και η οιονεί στατική προσέγγιση. Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιείται και η ανάλυση ευαισθησιών για τον προσδιορισμό του μακροπρόθεσμου σημείου αστάθειας και σύγκρισης του με το σημείο ανίχνευσης του ΣΑ2. Επιπλέον, γίνεται μελέτη επίδρασης των παραμέτρων ανίχνευσης του ΣΑ2 στο χρόνο έκδοσης του αντίστοιχου συναγερμού αστάθειας, ενώ διερευνάται και η απόδοση του σε διάφορα μοντέλα φορτίου.

Η εφαρμογή του ΣΑ2 στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα γίνεται τόσο σε ευσταθή όσο και ασταθή σενάρια που παρήχθησαν από τα ιστορικά αρχεία της ολικής διακοπής του Νοτίου τμήματος του συστήματος, την 12^{ης} Ιουλίου 2004.

Τέλος, στο **Κεφ. 7** παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και η συμβολή της διατριβής και αναφέρονται οι προοπτικές για συνέχιση της έρευνας στο αντικείμενο της.

Κεφάλαιο 2

Πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB

Το WPSTAB είναι ένα ενιαίο πακέτο λογισμικού χρονικής προσομοίωση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και ανάλυσης ευστάθειας τάσεως, που έχει αναπτυχθεί στο ΕΜΠ [Βου99]. Χρησιμοποιώντας την οιονεί στατική προσέγγιση και ενσωματώνοντας τεχνικές αραιών πινάκων για βελτίωση της αποδοτικότητας και μείωσης του υπολογιστικού φορτίου, αποτελεί ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσεως σε πραγματικό χρόνο, με το εύρος χρήσης του προγράμματος να εκτείνεται από μικρά δοκιμαστικά ΣΗΕ μερικών δεκάδων ζυγών, έως πραγματικά συστήματα χιλιάδων ζυγών, όπως το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.

Καθώς για την προσομοίωση των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή και για την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιείται κυρίως το πρόγραμμα WPSTABⁱ, στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική περιγραφή βασικών στοιχείων λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, στην Εν. 2.1 συνοψίζεται ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες των δυναμικών φαινομένων σε ΣΗΕ, από τον οποίο προκύπτει το προσεγγιστικό μοντέλο της οιονεί στατικής ανάλυσης. Στην Εν. 2.2 περιγράφονται τα μοντέλα των στοιχείων ΣΗΕ, όπως αναπαρίστανται στο πρόγραμμα καθώς και οι αντίστοιχες μαθηματικές εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία τους. Η Εν. 2.3 περιλαμβάνει την ποιοτική περιγραφή του αλγορίθμου χρονικής προσομοίωσης που χρησιμοποιεί το WPSTAB, ενώ τέλος, στην Εν. 2.4 περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού ευαισθησιών και κρίσιμων ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων για τον ακριβή προσδιορισμό από το πρόγραμμα του σημείου ορίου φόρτισης και αστάθειας τάσης, κατά την προσομοίωση μιας κρίσιμης διαταραχής.

Αναλυτική περιγραφή του προγράμματος μπορεί να βρεθεί στο εγχειρίδιο λειτουργίας [Βου99], ενώ περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη μοντελοποίηση των συνιστωσών ΣΗΕ, την οιονεί στατική προσέγγιση και την ανάλυση ευστάθειας τάσης υπάρχουν στα [Μαν98, Νικ07, VV08a]. Η αναβάθμιση και οι προσθήκες που έγιναν στο πρόγραμμα WPSTAB στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται λεπτομερώς στην Εν. 4.5 του Κεφ. 4 και στο Παράρτημα Α.

2.1 Χωρισμός μοντέλου ΣΗΕ σε χρονικές κλίμακες

Η δυναμική συμπεριφορά των ΣΗΕ περιγράφεται από ένα σύνολο μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων οι οποίες υπόκεινται σε αλγεβρικούς περιορισμούς (βλ. Υποεν. 1.1.6), ενώ τα διάφορα φαινόμενα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ακαριαία, βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα (βλ. Υποεν. 1.1.7).

ⁱΕξαιρέση αποτελούν μερικές περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικά προγράμματα τα οποία και περιγράφονται στις οικείες ενότητες.

Ως εκ τούτου, το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφει ένα ΣΗΕ μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.1\alpha)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.1\beta)$$

$$\frac{d\mathbf{z}_c}{dt} = \epsilon \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.1\gamma)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{p}) \quad (2.1\delta)$$

όπου:

\mathbf{x} : διάνυσμα των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης (διάστασης n_x)

\mathbf{y} : διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών (διάστασης n_y)

\mathbf{z}_c : διάνυσμα των συνεχών μακροπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης (διάστασης n_c)

\mathbf{z}_d : διάνυσμα των διακριτών μακροπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης (διάστασης n_d)

\mathbf{p} : διάνυσμα μεταβλητών εισόδου και παραμέτρων του συστήματος (διάστασης n_p).

Οι n_x διαφορικές εξισώσεις (2.1α) περιγράφουν τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα, στα οποία ανήκουν οι αποκρίσεις των σύγχρονων γεννητριών και των ρυθμιστικών διατάξεων τους (όπως οι ρυθμιστές στροφών και οι αυτόματοι ρυθμιστές τάσης), οι κινητήρες επαγωγής, διατάξεις ρυθμιστών ηλεκτρονικών ισχύος (πχ. SVC, STATCOM) και διασυνδετικών γραμμών συνεχούς ρεύματος (HVDC links)

Οι n_y αλγεβρικές εξισώσεις (2.1β) περιγράφουν την απόκριση του δικτύου, η οποία και θεωρείται ακαριαία. Σε αυτήν την ακαριαία απόκριση περιλαμβάνονται και τα ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα στα τυλίγματα του στάτη των σύγχρονων γεννητριών και των κινητήρων επαγωγής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μην λαμβάνονται υπόψη οι τάσεις μετασχηματιστή, δημιουργώντας μια οιονεί ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, όπου οι στιγμιαίες τιμές των ρευμάτων και των τάσεων δίνονται από χρονικά μεταβαλλόμενους παραστατικούς μιγάδες (φασιθέτες ή phasors).

Οι n_c διαφορικές εξισώσεις (2.1γ) περιγράφουν τα φαινόμενα και τις διατάξεις που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και έχουν συνεχή δυναμική συμπεριφορά. Ο όρος ϵ είναι ένας μικρός αριθμός, ο οποίος εισάγεται, επειδή οι μεταβλητές κατάστασης \mathbf{z}_c είναι αργές σε σχέση με τις βραχυπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης \mathbf{x} . Στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα ανήκουν τα συστήματα προστασίας ρεύματος στάτη και υπερδιέγερσης, τα αυτορρυθμιζόμενα φορτία και ορισμένες διατάξεις προστασίας.

Οι n_d εξισώσεις διαφορών (2.1δ) περιγράφουν τη διακριτή δυναμική συμπεριφορά διατάξεων που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, όπως τα ΣΑΤΥΦ, τα διάφορα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης, αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης και απόζευξης διατάξεων στατής αντιστάθμισης καθώς και ορισμένες διατάξεις προστασίας. Ο δείκτης k εκφράζει τη χρονική στιγμή $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT είναι η περίοδος λειτουργίας του εκάστοτε διακριτού συστήματος. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι πολλές από τις συγκεκριμένες διατάξεις, μπορούν να παρασταθούν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είτε με διακριτά είτε με συνεχή μοντέλα. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται διακριτά μοντέλα των ανωτέρω διατάξεων, όπως θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Το σύνολο των εξισώσεων (2.1) περιγράφει πλήρως την κατάσταση ενός ΣΗΕ και ως εκ τούτου, η επίλυση του μας δίνει την κατάσταση του συστήματος σε μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Αν και η σημερινή υπολογιστική ικανότητα που μπορεί να προσφέρει η τεχνολογία παρέχει τη δυνατότητα της ενιαίας επίλυσης του συστήματος των διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων, εντούτοις, πολλές φορές

επιλέγεται η απλοποίηση της επίλυσης, με εκμετάλλευση του διαχωρισμού των δυναμικών φαινομένων στις δύο χρονικές κλίμακες, ήτοι τη βραχυπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη, εφαρμόζοντας την τεχνική των *οιονεί στατικών μεταβολών* που αναφέρθηκε στην Υποεν. 1.1.7. Οι λόγοι αυτής της επιλογής είναι:

1. Το πλήρες μοντέλο εμπλέκει ταυτόχρονα όλους τους μηχανισμούς αστάθειας τάσης, επομένως ο διαχωρισμός των χρονικών κλιμάκων διευκολύνει την σαφέστερη κατανόηση και ειδικότερα τον εντοπισμό του σημείου μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης.
2. Δεν είναι εύκολο να βρεθούν πλήρη δεδομένα που να παριστάνουν λεπτομερώς όλες τις διατάξεις ενός ΣΗΕ και τα οποία είναι απαραίτητα για την πλήρη προσομοίωση.
3. Η μείωση του υπολογιστικού χρόνου (ακόμα και για τα σημερινά δεδομένα) για την προσομοίωση μεγάλων ΣΗΕ, το οποίο είναι απαραίτητο για πολλές εφαρμογές ευστάθειας τάσης (ιδιαίτερα σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου).

Θεωρώντας ότι η χρονική παράμετρος t στις διαφορικές εξισώσεις (2.1α) και (2.1γ) είναι κατάλληλα βαθμονομημένη για τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα, μπορεί να εισαχθεί μια νέα χρονική παράμετρος $\tau = \epsilon t$ (όπου το ϵ είναι ένας μικρός αριθμός) για τα αργά δυναμικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, αν η παράμετρος t εκφράζεται σε δευτερόλεπτα, τότε η παράμετρος τ εκφράζεται σε λεπτά αν $\epsilon = 1/60$. Διαφορίζοντας τις (2.1α) και (2.1γ) ως προς τη νέα μακροπρόθεσμη χρονική παράμετρο τ , οι προαναφερθείσες εξισώσεις του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα παίρνουν την εξής μορφή:

$$\epsilon \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.2\alpha)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.2\beta)$$

όπου $\dot{\mathbf{x}} = d\mathbf{x}/d\tau$ και $\dot{\mathbf{z}}_c = d\mathbf{z}_c/d\tau$.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Όπως παρουσιάστηκε στην Υποεν. 1.1.7, το σύστημα αυτό βασίζεται στην παραδοχή ότι κατά τη διάρκεια μεταβολής των ταχέων βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, τα μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα εξελίσσονται με πολύ αργό ρυθμό και ως εκ τούτου, οι αντίστοιχες μεταβλητές κατάστασης \mathbf{z}_c και \mathbf{z}_d μπορούν να θεωρηθούν πρακτικά σταθερές. Αυτό επιτυγχάνεται αν θεωρήσουμε $\epsilon = 0$ και επομένως μηδενική μεταβολή της αργής χρονικής παραμέτρου τ ($\Delta\tau = 0$). Στη συγκεκριμένη πλέον χρονική κλίμακα το σύστημα περιγράφεται από το εξής, απλοποιημένο μοντέλο:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.3\alpha)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.3\beta)$$

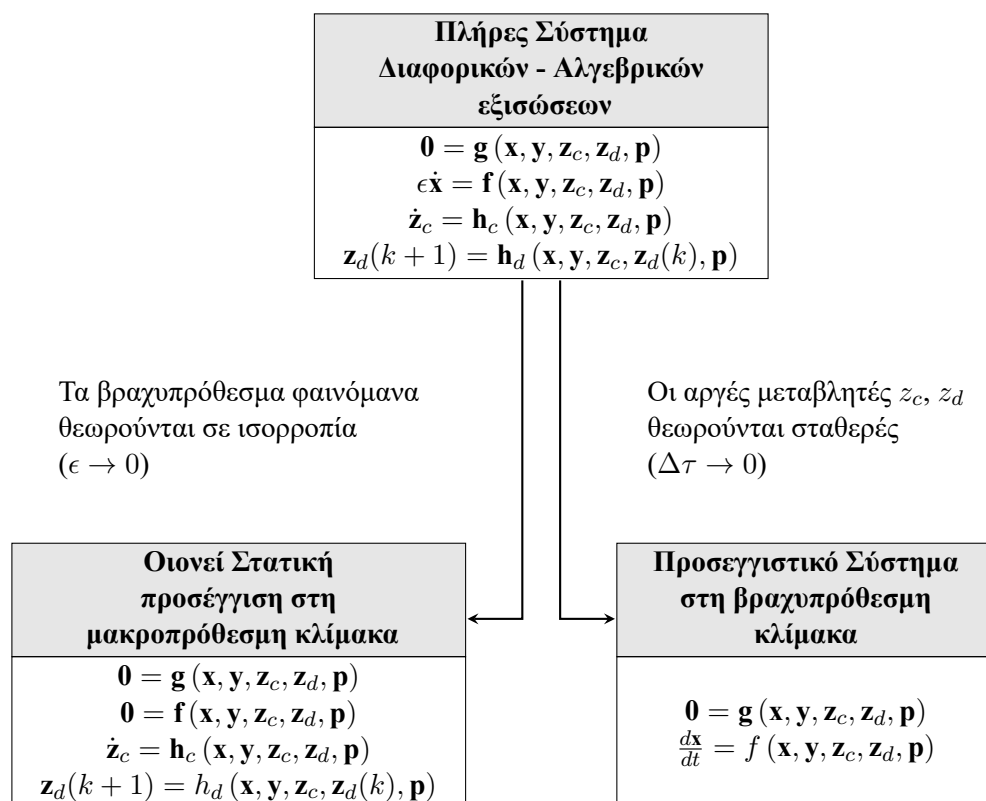
Αντίθετα, στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται η *οιονεί στατική προσέγγιση*, σύμφωνα με την οποία θεωρείται πλέον ότι τα ταχέα (βραχυπρόθεσμα) δυναμικά φαινόμενα έχουν φτάσει σε ισορροπία και επομένως μπορούν να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας. Επομένως, στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οι εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα είναι:

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.4\alpha)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.4\beta)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{p}) \quad (2.4\gamma)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{p}) \quad (2.4\delta)$$



Σχήμα 2.1: Χωρισμός σε χρονικές κλίμακες και προσεγγιστικά μοντέλα ΣΗΕ

Τα παραπάνω οδηγούν στα προσεγγιστικά μοντέλα του Σχ. 2.1. Σε σχέση με το πλήρες σύστημα, καθένα από τα προσεγγιστικά υποσυστήματα ανήκει σε μια και μόνο χρονική κλίμακα, με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολο να αναλυθούν. Φυσικά για να ισχύει αυτός ο διαχωρισμός σε χρονικές κλίμακες πρέπει να πληρούνται οι προϋποθέσεις της Εν. 1.1.7.

2.2 Μοντελοποίηση διατάξεων ΣΗΕ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα

Λόγω χρήσης της οιονεί στατικής προσέγγισης, οι διατάξεις που λειτουργούν κατά την βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα μοντελοποιούνται με τις εξισώσεις ισορροπίας (2.4α), ενώ αυτές που λειτουργούν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις (2.4γ) ή εξισώσεις διαφορών (2.4δ). Οι διατάξεις που ανήκουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι:

- Σύγχρονες γεννήτριες.
- Ρυθμιστές στροφών.
- Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης (APT).
- Κινητήρες επαγωγήςⁱⁱ.

Αντίθετα, στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα ανήκουν οι ακόλουθες διατάξεις:

ⁱⁱ Δεν μελετώνται στην παρούσα διατριβή.

- Συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ).
- Συστήματα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου (ΠΡΤ) γεννητριών.
- Συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης.
- Συστήματα Προστασία υπότασης γεννητριών θερμικών σταθμών.
- Αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζεύξης στατών διατάξεων αντιστάθμισης.

Τέλος, οι εξισώσεις ροής ισχύος του συστήματος αποτελούν τις αλγεβρικές εξισώσεις (2.4β) του ενιαίου αλγεβρικού-διαφορικού συστήματος.

2.2.1 Σύγχρονες γεννήτριες

Στις μελέτες μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσεις οι σύγχρονες μηχανές παριστάνονται συνήθως με το μοντέλο τρίτης τάξης, το οποίο περιλαμβάνει τις ακόλουθες παραδοχές [Kun94]:

1. Τα τυλίγματα του στάτη έχουν ημιτονοειδή κατανομή ΜΕΔ κατά μήκος του διακένου.
2. Οι αύλακες του στάτη δεν προκαλούν σημαντική μεταβολή των αυτεπαγωγών και αλληλεπαγωγών λόγω της θέσης του δρομέα.
3. Το φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης αμελείται.

Αυτές οι παραδοχές οδηγούν σε αμελητέο σφάλμα ως προς τη λειτουργία της πραγματικής μηχανής, όπως έχει αποδειχθεί από μετρήσεις. Αν και είναι σύνηθες να αγνοείται και ο μαγνητικός κορεσμός, στη παρούσα ανάλυση λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός συντελεστή κορεσμού, όπως θα περιγραφεί στην συνέχεια.

Με βάση τα ανωτέρω και θεωρώντας μόνο ένα τύλιγμα στον δρομέα της μηχανής, αυτό του τυλίγματος διεγέρσεως, οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη κίνηση της μηχανής είναι οι εξισώσεις ταλάντωσης:

$$\dot{\delta} = (\omega - \omega_{sys}) \omega_0 \quad (2.5)$$

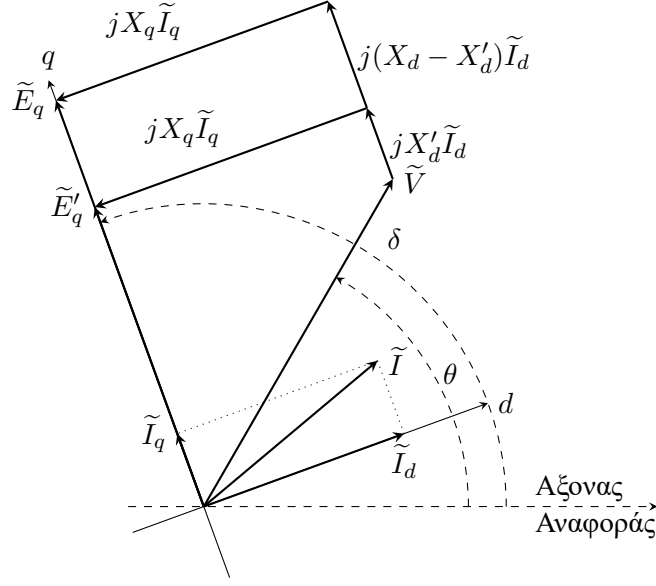
$$2H\dot{\omega} = P_m - P_g - D(\omega - 1) \quad (2.6)$$

όπου δ η ηλεκτρική γωνία του δρομέα που ισούται με την γωνία ανάμεσα στον εγκάρσιο άξονα q και στον άξονα αναφοράς σε rad, ω και ω_{sys} η ταχύτητα του δρομέα και του άξονα αναφοράς αντίστοιχα σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας ω_0 (που μετράται σε rad/s), H η ανηγμένη σταθερά αδρανείας της μηχανής σε s, D ο συντελεστής απόσβεσης σε αμ, P_m και P_g η μηχανική ισχύς του στροβίλου και η παραγόμενη ισχύς της γεννήτριας.

Στις εξισώσεις ταλάντωσης προστίθεται και η δυναμική συμπεριφορά του τυλίγματος διεγέρσεως, η οποία περιγράφεται από την διαφορική εξίσωση:

$$T'_{do} \dot{E}'_q = E_f - E_q \quad (2.7)$$

όπου T'_{do} η μεταβατική χρονική σταθερά ανοιχτοκυκλώματος ευθέως άξονα, E_f η ΗΕΔ διεγέρσεως, ανάλογη της DC τάσης που εφαρμόζεται στο πεδίο διεγέρσεως v_{fd} , E_q η ΗΕΔ ανοιχτού κυκλώματος (ή κενού φορτίου) και \dot{E}'_q μεταβατική ΗΕΔ κατά τον εγκάρσιο άξονα, πίσω από τη μεταβατική αντίδραση.



Σχήμα 2.2: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής

Το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα της σύγχρονης μηχανής φαίνεται στο Σχ. 2.2. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτουν οι εξισώσεις που δίνουν την ενεργό και άεργο ισχύ της μηχανής, οι οποίες αμελώντας τις ωμικές απώλειες του στάτη είναι:

$$P_g = \frac{E_q V}{X_d} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2(\delta - \theta) \quad (2.8\alpha)$$

$$Q_g = \frac{E_q V}{X_d} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left(\frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \quad (2.8\beta)$$

Η γωνία $(\delta - \theta)$ μεταξύ της τερματικής τάσης \tilde{V} και του εγκάρσιου άξονα q της μηχανής ονομάζεται *εσωτερική γωνία* ή *γωνία ροπής*.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι στις σχέσεις (2.8α) και (2.8β), ο μαγνητικός κορεσμός έχει αμεληθεί. Για να ληφθεί υπόψη πρέπει οι τιμές των αντιδράσεων X_d , X_q καθώς και της τάσης κενού φορτίου E_q να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες κορεσμένες τιμές X_d^s , X_q^s και E_q^s , δίνοντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_g = \frac{E_q^s V}{X_d^s} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q^s} - \frac{1}{X_d^s} \right) \sin 2(\delta - \theta) \quad (2.9\alpha)$$

$$Q_g = \frac{E_q^s V}{X_d^s} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left(\frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q^s} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d^s} \right) \quad (2.9\beta)$$

Η συσχέτιση των κορεσμένων με τις ακόρεστες τιμές επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του συντελεστή κορεσμού K [VV08a]:

$$K = \frac{E_q^s}{E_q} = \frac{1}{1 + mV_\ell^n} \quad (2.10)$$

όπου m & n είναι θετικοί αριθμοί και για $m = 0$ ο μαγνητικός κορεσμός αμελείται, ενώ V_ℓ είναι η τάση πίσω από την αντίδραση σκεδάσεως της μηχανής που δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{V}_\ell = \tilde{V} + jX_\ell \tilde{I} \quad (2.11)$$

Οι κορεσμένες τιμές των αντιδράσεων X_d^s και X_q^s είναι:

$$X_d^s = X_\ell + K_d(X_d - X_\ell) \quad (2.12\alpha)$$

$$X_q^s = X_\ell + K_q(X_q - X_\ell) \quad (2.12\beta)$$

όπου X_ℓ είναι η αντίδραση σκεδάσεως και K_d, K_q οι συντελεστές κορεσμού κατά τους άξονες d και q αντίστοιχα.

Δεδομένου ότι στις μηχανές με έκτυπους πόλους ο κορεσμός κατά τον εγκάρσιο άξονα μπορεί να αμεληθεί λόγω του μεγάλου διακένου, ο αντίστοιχος συντελεστής λαμβάνεται ίσος με τη μονάδα ($K_q = 1$). Αντίθετα στις μηχανές με κυλινδρικό δρομέα ο κορεσμός εμφανίζεται και στους δύο άξονες, αλλά μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι είναι ίδιος ($K_d = K_q = K$).

Απαλείφοντας το ρεύμα του στάτη από τη σχέση (2.11) το μέτρο της τάσης \tilde{V}_ℓ είναι [Μαν98]:

$$V_\ell = \sqrt{\left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_d^s}\right) V \cos(\delta - \theta) + \frac{X_\ell}{X_d^s} E_q^s \right]^2 + \left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_q^s}\right) V \sin(\delta - \theta) \right]^2} \quad (2.13)$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.10) το μέτρο της τάσης V_ℓ από την (2.13), προκύπτει η ακόλουθη μη γραμμική σχέση για τον υπολογισμό του συντελεστή κορεσμού K :

$$\begin{aligned} f_{sat} = & \left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_d^s}\right) V \cos(\delta - \theta) + \frac{X_\ell}{X_d^s} E_q^s \right]^2 \\ & + \left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_q^s}\right) V \sin(\delta - \theta) \right]^2 - \left(\frac{1}{Km} - \frac{1}{m} \right)^{\frac{2}{n}} = 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Στην οιονεί στατική προσέγγιση, οι σύγχρονες μηχανές θεωρούνται πως βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση, ως εκ τούτου η συμπεριφορά τους προσδιορίζεται από τις εξισώσεις ισορροπίας των διαφορικών εξισώσεων (2.5), (2.6) και (2.7). Από τις εξισώσεις ταλάντωσης της μηχανής προκύπτει ότι στην μόνιμη κατάσταση ο δρομέας περιστρέφεται με την σύγχρονη ταχύτητα ($\omega = \omega_{sys}$) ενώ η παραγόμενη ισχύς είναι ίση με:

$$P_g = P_m - D(\omega_{sys} - 1) \quad (2.15)$$

Από την εξίσωση ισορροπίας του πεδίου διεγέρσεως προκύπτει ότι $E_f = E_q$, ενώ χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.10) προκύπτει ότι:

$$E_q^s = K E_f \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας την κορεσμένη τιμή της ΗΕΔ ανοιχτοκύκλωσης E_q^s στις σχέσεις (2.9α), (2.9β) και (2.14) από την (2.16) προκύπτουν οι άλλες τρεις σχέσεις για την σύγχρονη μηχανή σε ισορροπία:

$$P_g = \frac{K E_f V}{X_d^s} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q^s} - \frac{1}{X_d^s} \right) \sin 2(\delta - \theta) \quad (2.17)$$

$$Q_g = \frac{K E_f}{X_d^s} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left(\frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q^s} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d^s} \right) \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} f_{sat} = & \left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_d^s}\right) V \cos(\delta - \theta) + \frac{X_\ell}{X_d^s} K E_f \right]^2 \\ & + \left[\left(1 - \frac{X_\ell}{X_q^s}\right) V \sin(\delta - \theta) \right]^2 - \left(\frac{1}{Km} - \frac{1}{m} \right)^{\frac{2}{n}} = 0 \end{aligned} \quad (2.19)$$

Οι σχέσεις (2.15), (2.17), (2.18) και (2.19) περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.4α).

2.2.2 Ρυθμιστές στροφών

Η παράσταση των ρυθμιστών στροφών των γεννητριών στις μελέτες ευστάθειας τάσης γίνεται θεωρώντας ένα απλουστευμένο μοντέλο, στο οποίο δεν περιλαμβάνεται η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος του στροβίλου παρά μόνο το στατισμό [Μαν98]. Κάθε μονάδα που συμμετέχει στην πρωτεύουσα ρύθμιση φορτίου μεταβάλλει τη παραγωγή της βάσει της διαφορικής εξίσωσης πρώτης τάξης:

$$T_g \Delta \dot{P}_m = -\Delta P_m - \frac{1}{R_g} \Delta \omega, \quad P_m^{\min} \leq P_m \leq P_m^{\max} \quad (2.20)$$

όπου $\Delta P_m = P_m - P_{mo}$, η μεταβολή της μηχανικής ισχύος από την τιμή αναφοράς (setpoint) P_{mo} , T_g η σταθερά χρόνου του συστήματος ρύθμισης φορτίου-συχνότητας, $\Delta \omega = \omega - 1$ η απόκλιση της συχνότητας της γεννήτριας από την σύγχρονη και R_g ο στατισμός της γεννήτριας. Το σήμα από την δευτερεύουσα ρύθμιση φορτίου-συχνότητας θεωρείται ότι μεταβάλλει την ισχύ P_{mo} .

Καθώς οι ρυθμιστές στροφών λειτουργούν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, κατά την οιονεί στατική προσέγγιση, η λειτουργία τους περιγράφεται από την εξίσωση ισορροπίας:

$$P_m = P_{mo} - (\omega_{sys} - 1)/R_g, \quad P_m^{\min} \leq P_m \leq P_m^{\max} \quad (2.21)$$

όπου P_m^{\min} & P_m^{\max} η ελάχιστη και η μέγιστη αντίστοιχα ισχύς εξόδου του στροβίλου και $P_m = P_{mo}$ όταν $\omega_{sys} = 1$. Η σχέση (2.21) περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.4α).

2.2.3 Αυτόματοι ρυθμιστές τάσης

Η παράσταση των APT των σύγχρονων γεννητριών γίνεται με χρήση του απλοποιημένου αναλογικού μοντέλου στατικής ή στρεφόμενης διέγερσης. Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη λειτουργία του APT είναι η ακόλουθη [SP98]:

$$T_E \dot{E}_f = K_A (V_{ref} - V) - E_f \quad (2.22)$$

όπου K_A το αναλογικό κέρδος του APT, V_{ref} η τάση αναφοράς, V η τερματική τάση της γεννήτριας και T_E η χρονική σταθερά του συστήματος διέγερσης, η οποία είναι πολύ μικρή.

Δεδομένου ότι οι APT δρουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα η διαφορική εξίσωση (2.22) αντικαθίσταται στο σύστημα εξισώσεων (2.4α) από την ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας:

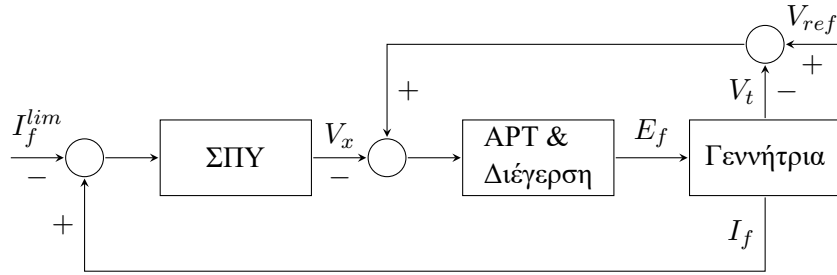
$$E_f = K_A (V_{ref} - V), \quad E_f^{\min} \leq E_f \leq E_f^{\max} \quad (2.23)$$

όπου E_f^{\min} & E_f^{\max} η ελάχιστη και μέγιστη αντίστοιχα επιτρεπόμενη τιμή της ΗΕΔ διεγέρσεως, για συνεχή λειτουργία.

Όταν η ΗΕΔ διεγέρσεως ξεπεράσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, όπως περιγράφεται στην ακόλουθη υποενότητα.

2.2.4 Σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης

Τα (ΣΠΥ) είναι διατάξεις που δρουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, και προστατεύουν το κύκλωμα του πεδίου διεγέρσεως από υπερθέρμανση. Αποτελούνται από μια μετρητική διάταξη, μια χρονική καθυστέρηση T_{oel} και έναν ρυθμιστή που δρα πάνω στον APT. Η χρονική καθυστέρηση T_{oel} , που μπορεί να είναι σταθερή ή αντιστρόφου χρόνου, εισάγεται για να επιτρέψει τη βραχυπρόθεσμη υπερδιέγερση της εκάστοτε γεννήτριας για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα ώστε να ενισχυθούν τα



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα βαθμίδων αθροιστικού τύπου ΣΠΥ

προφίλ των τάσεων του συστήματος κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται μόνο ΣΠΥ σταθερού χρόνου.

Εφόσον το ρεύμα διέγερσης I_f παραμένει πάνω από την επιτρεπόμενη μέγιστη τιμή συνεχούς λειτουργίας I_f^{\lim} για χρονικό διάστημα T_{oel} , η γεννήτρια μεταβαίνει από αυτόματη ρύθμιση τάσης σε λειτουργία προστασίας υπερδιέγερσης. Ο τρόπος που γίνεται αυτή η μετάβαση περιγράφεται από τη συνεχή διαφορική εξίσωση:

$$\dot{x}_t = h_c \left(I_f - I_f^{\lim} \right) = \begin{cases} 1/T_{oel}, & I_f > I_f^{\lim} \\ 0, & I_f \leq I_f^{\lim} \end{cases} \quad (2.24)$$

όπου x_t συνεχής μεταβλητή κατάστασης, η οποία συμπεριφέρεται στην ουσία σαν μετρητής του χρόνου για τη μετάβαση, η οποία λαμβάνει χώρα όταν η μεταβλητή αυτή λάβει μια κατάλληλη τιμή.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι αν επιλεγεί σαν βασική τιμή του ανά μονάδα συστήματος της διέγερσης, εκείνο το ρεύμα I_f που παράγει πάνω στην ευθεία διακένου του στάτη τάση 1 αμ, τότε στη μόνιμη κατάσταση η ΗΕΔ διέγερσης E_f είναι ίση με το ρεύμα στο τύλιγμα του πεδίου (σε α.μ. τιμές), ήτοι $E_f = I_f$.

Η διαφορική εξίσωση (2.24) ανήκει στο σύνολο εξισώσεων (2.4γ) και όταν η εκάστοτε γεννήτρια μεταβαίνει από αυτόματη ρύθμιση τάσης σε προστασία υπερδιέγερσης, αντικαθιστά την εξίσωση ισορροπίας του APT με αυτήν του ΣΠΥ στο σύστημα των εξισώσεων (2.4α).

Ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης των ΣΠΥ και APT στους βρόγχους ελέγχου των γεννητριών, τα πρώτα διακρίνονται σε δύο τύπους [VMS99]:

- Αθροιστικού τύπου ΣΠΥ (Summed-type OEL).
- Διακοπτικού τύπου ΣΠΥ (Take-over OEL).

2.2.4.1 Αθροιστικού τύπου ΣΠΥ

Σε αυτού του τύπου ΣΠΥ, το σήμα εξόδου τους (V_x) δρα πάνω στον αθροιστή του APT, ο οποίος APT παραμένει συνεχώς σε λειτουργία. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το ρεύμα πεδίου σε συνθήκες υπερφόρτισης. Το διάγραμμα βαθμίδων του αθροιστικού τύπου ΣΠΥ φαίνεται στο Σχ. 2.3.

Όταν ενεργοποιηθεί αυτού του τύπου ΣΠΥ, η διαφορική εξίσωση (2.22) γίνεται

$$T_E \dot{E}_f = K_A (V_{ref} - V_t - V_x) - E_f \quad (2.25)$$

όπου V_x το σήμα εξόδου του ΣΠΥ που φαίνεται και στο Σχ. 2.3.

Σε περίπτωση που η μονάδα ελέγχου του ΣΠΥ είναι αναλογική, η συνάρτηση μεταφοράς της αντίστοιχης βαθμίδας στο Σχ. 2.3 είναι η ακόλουθη:

$$V_x = K_x (I_f - I_f^{\lim}) \quad (2.26)$$

όπου K_x το αναλογικό κέρδος.

Με βάση τα ανωτέρω, η εξίσωση ισορροπίας στην οιονεί στατική προσέγγιση που αντικαθιστά την (2.23) είναι η ακόλουθη:

$$E_f = I_f = \frac{K_A}{1 + K_A K_x} \left(K_x I_f^{\text{lim}} + V_{ref} - V_t \right) \quad (2.27)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτού του τύπου ΣΠΥ αφήνουν ένα ρεύμα διέγερσης ελαφρά μεγαλύτερο από το I_f^{lim} λόγω του σφάλματος στην τάση ($V_{ref} - V_t$), το οποίο αυξάνεται καθώς η διέγερση περιορίζεται.

Αν το αθροιστικού τύπου ΣΠΥ έχει ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$sV_x = \frac{1}{T_x} \left(I_f - I_f^{\text{lim}} \right) \quad (2.28)$$

όπου $1/T_x$ το ολοκληρωτικό κέρδος. Η αντίστοιχη διαφορική εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\dot{V}_x = \frac{1}{T_x} \left(I_f - I_f^{\text{lim}} \right) \quad (2.29)$$

Δεδομένου ότι το ολοκληρωτικό κέρδος πρέπει να παραμείνει αρκούντως μικρό για λόγους ευστάθειας, η αντίστοιχη σταθερά χρόνου T_x παίρνει μεγάλη τιμή, με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου του ΣΠΥ να αποτελεί τμήμα του μακροπρόθεσμου συστήματος. Ως εκ τούτου, η διαφορική εξίσωση (2.29) προστίθεται στο σύνολο εξισώσεων (2.4γ).

Σε αυτήν την περίπτωση, η εξίσωση που αντικαθιστά την εξίσωση ισορροπίας του APT (2.23), είναι η ακόλουθη:

$$E_f = I_f = K_A(V_{ref} - V_t) - V_x \quad (2.30)$$

Στην τελική μόνιμη κατάσταση ισορροπίας, από τη σχέση (2.28) για $s \rightarrow 0$, προκύπτει ότι:

$$E_f = I_f = I_f^{\text{lim}} \quad (2.31)$$

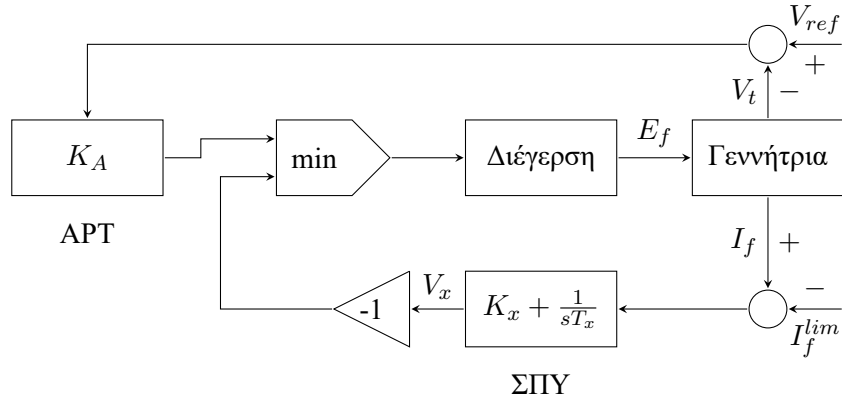
το οποίο είναι και αναμενόμενο καθώς ο ολοκληρωτικός ελεγκτής απαλείφει το σφάλμα μόνιμου καταστάσεως.

2.2.4.2 Διακοπτικού τύπου ΣΠΥ:

Σε αυτήν την περίπτωση το ΣΠΥ ακυρώνει την λειτουργία του APT και επενεργεί απευθείας στο πεδίο διέγερσης, καθορίζοντας το αντίστοιχο ρεύμα. Λόγω αυτής της λειτουργίας τους, τα διακοπτικά ΣΠΥ, πρέπει να έχουν μεγάλο κέρδος μόνιμου καταστάσεως (παραπλήσιο με το κέρδος K_A του APT). Το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων απεικονίζεται στο Σχ. 2.4, όπου η επιλογή του σήματος προς το σύστημα διέγερσης γίνεται από έναν διακόπτη ελαχίστου. Αυτού του τύπου διακοπτικό ΣΠΥ ονομάζεται *ΣΠΥ με υποκατάσταση σήματος ελέγχου (control signal substitution)*.

Η μονάδα ελέγχου σε αυτά τα ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος ελέγχου μπορεί να είναι είτε αναλογική, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται απλά η (2.26), είτε αναλογική-ολοκληρωτική (PI), οπότε η συνάρτηση μεταφοράς είναι αυτή που φαίνεται στο Σχ. 2.4, στη βαθμίδα του ΣΠΥ.

Καθώς στα διακοπτικά ΣΠΥ χρησιμοποιείται το σήμα από την προστασία υπερδιέγερσης απαιτείται μεγάλο αναλογικό κέρδος K_x για να εξαναγκάσει το πεδίο της μηχανής σε ταχεία απόκριση. Επίσης, επειδή για λόγους ευστάθειας το κέρδος του ολοκληρωτικού όρου πρέπει να διατηρηθεί σχετικά μικρό και άρα η σταθερά χρόνου T_x να έχει σχετικά μεγάλη τιμή, γίνεται αντιληπτό ότι σε περίπτωση ύπαρξης



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα βαθμίδων διακοπτικού τύπου ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος ελέγχου

PI ελεγκτή, όπως και στα αθροιστικού τύπου ΣΠΥ, εισάγεται μια ακόμα αργή μεταβλητή, έστω x , της οποίας η συμπεριφορά δίνεται από την εξής διαφορική εξίσωση:

$$T_x \dot{x} = I_f - I_f^{\text{lim}} \quad (2.32)$$

Η αργή αυτή μεταβλητή κατάστασης (δεν είναι ίδια με το σήμα εξόδου V_x του ΣΠΥ καθώς υπάρχει και αναλογικό κέρδος ταυτόχρονα) ανήκει και αλληλεπιδρά με τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές και στην οιονεί στατική προσέγγιση εντάσσεται στις εξισώσεις (2.4γ). Η αντίστοιχη εξίσωση ισορροπίας που δίνει την εσωτερική ΗΕΔ (και το ρεύμα του πεδίου διεγέρσεως σε αμ τιμές) στην οιονεί στατική προσέγγιση είναι:

$$E_f = I_f = \frac{E_{f0} + K_x I_f^{\text{lim}} - x}{K_x + 1} \quad (2.33)$$

όπου E_{f0} η αρχική τιμή της εσωτερικής ΗΕΔ E_f κατά τη στιγμή t_0 της μεταγωγής από ΑΡΤ σε ΣΠΥ. Είναι προφανές και εδώ, όπως και στο αθροιστικό ΣΠΥ με ολοκληρωτικό ελεγκτή, ότι σε μόνιμη κατάσταση $E_f = I_f = I_f^{\text{lim}}$.

Σε περίπτωση απλής αναλογικής μονάδας (αντί για PI ελεγκτή), δεν υπάρχει νέα μεταβλητή κατάστασης στο σύστημα μακροχρόνιων μεταβλητών και άρα η εξίσωση ισορροπίας προκύπτει από την (2.33) απαλείφοντας την μεταβλητή x :

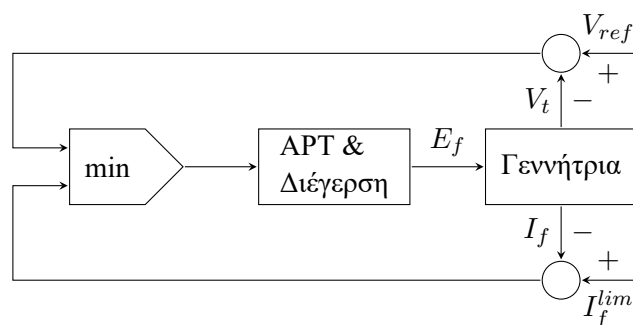
$$E_f = I_f = \frac{E_{f0} + K_x I_f^{\text{lim}}}{K_x + 1} \quad (2.34)$$

Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση που δίνεται από τη σχέση:

$$I_f - I_f^{\text{lim}} = \frac{E_{f0} - I_f^{\text{lim}}}{K_x - 1} \quad (2.35)$$

που σημαίνει ότι το αρχικό σφάλμα $E_{f0} - I_f^{\text{lim}}$, κατά την ενεργοποίηση του ΣΠΥ, μειώνεται κατά $K_x - 1$ φορές. Δεδομένου ότι το αρχικό σφάλμα είναι θετικό, στην περίπτωση υποκατάστασης σήματος ελέγχου η διέγερση παραμένει οριακά πάνω από την τιμή I_f^{lim} .

Εάν το διακοπτικό τύπου ΣΠΥ με υποκατάσταση σήματος ελέγχου έχει αναλογικό-ολοκληρωτικό ελεγκτή η (2.33) αντικαθιστά την (2.23) στο σύστημα εξισώσεων (2.4β). Αντίθετα, αν έχει μόνο αναλογικό ελεγκτή την (2.23) αντικαθιστά η (2.34). Ωστόσο, στην πρώτη περίπτωση υπάρχει μια επιπλέον μεταβλητή κατάστασης που θα πρέπει να ενταχθεί στο σύστημα εξισώσεων (2.4γ).



Σχήμα 2.5: Διάγραμμα βαθμίδων διακοπτικού τύπου ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος σφάλματος

Εκτός από το διακοπτικό ΣΠΥ με υποκατάσταση σήματος ελέγχου, υπάρχει και δεύτερος τύπος διακοπτικού ΣΠΥ που ονομάζεται *ΣΠΥ υποκατάστασης σήματος σφάλματος (error signal substitution)*. Σε αυτήν την περίπτωση αντικαθίσταται απλά το σήμα εισόδου στον APT, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.5, που περιλαμβάνει το αντίστοιχο διάγραμμα βαθμίδων. Το μόνο κέρδος που υφίσταται είναι το κέρδος K_A του APT, το οποίο όμως με την ενεργοποίηση του ΣΠΥ ενισχύει πλέον το σφάλμα $I_f^{\text{lim}} - I_f$ αντί για το $V_{\text{ref}} - V_t$.

Ως εκ τούτου, η εξίσωση ισορροπίας που αντικαθιστά την (2.23) κατά τη λειτουργία του διακοπτικού ΣΠΥ με υποκατάσταση σήματος σφάλματος είναι η $E_f = K_A(I_f^{\text{lim}} - I_f)$. Με δεδομένο ότι $E_f = I_f$, τελικά, η εξίσωση ισορροπίας για αυτού του τύπου ΣΠΥ παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$E_f = K_A \left(\frac{I_f^{\text{lim}}}{K_A + 1} \right) \quad (2.36)$$

Όπως φαίνεται από την σχέση (2.36), σε αυτού του τύπου ΣΠΥ στη μόνιμη κατάσταση το ρεύμα διέγερσης παραμένει ελαφρά κάτω από το όριο υπερδιεγέρσεως.

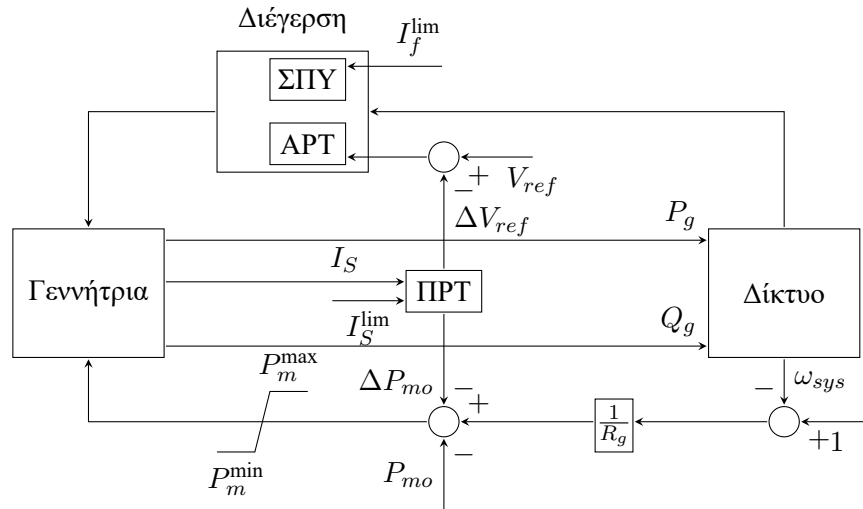
2.2.5 Σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου

Το σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου (ΠΡΤ) είναι και αυτή μια διάταξη που δρα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και στόχο έχει την προστασία των κυκλωμάτων του στάτη (τυμπάνου)ⁱⁱⁱ από υπερφόρτιση. Σε φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας η σχεδίαση των σύγχρονων γεννητριών γίνεται έτσι ώστε το τύμπανο να έχει υψηλότερη θερμική αντοχή από τα αντίστοιχα κυκλώματα του πεδίου. Ως εκ τούτου η χρήση αυτόματων περιοριστών ρεύματος στάτη δεν είναι τόσο συχνή όσο αυτή των ΣΠΥ και ο περιορισμός του ρεύματος στάτη γίνεται χειροκίνητα, από τον χειριστή της μονάδας.

Όταν η τερματική τάση της γεννήτριας είναι κοντά στην ονομαστική της τιμή, η σύγχρονη μηχανή μπορεί να παράξει την ονομαστική ενεργό και άεργο ισχύ της, με το ρεύμα του στάτη στην ονομαστική του τιμή. Ωστόσο, αν η τερματική τάση δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερή, π.χ. λόγω υπερδιέγερσης, το ρεύμα τυμπάνου ενδέχεται να υπερβεί την ονομαστική του τιμή. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη η προστασία του στάτη, με επαναφορά του ρεύματος κοντά στην ονομαστική τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους:

1. *Με μείωση της ενεργού παραγωγής:* Η ενέργεια αυτή έχει κόστος δεδομένου ότι διαταράσσεται η οικονομική κατανομή των μονάδων που έχει προκύψει από την αγορά. Επίσης η ισχύς που μειώνεται πρέπει να εισαχθεί στην ήδη επιβαρυσμένη περιοχή, που ενδεχομένως οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση των τάσεων.

ⁱⁱⁱ Οι δύο όροι τύμπανο και στάτης θα χρησιμοποιούνται εξίσου στην συνέχεια.



Σχήμα 2.6: Μοντέλο συστήματος προστασίας ρεύματος στάτη

2. *Με μείωση της αέργου παραγωγής:* Η επίδραση αυτής της ενέργειας είναι περισσότερο επιβλαβής για το σύστημα, για αυτό και εφαρμόζεται μόνο όταν έχει εξαντληθεί το περιθώριο μείωσης ενεργού ισχύος (λόγω π.χ. τεχνικού ελαχίστου). Η μείωση της αέργου παραγωγής θα ελαττώσει κι άλλο τα προφίλ των τάσεων, οδηγώντας σε αύξηση του ρεύματος για την ίδια ενεργό ισχύ. Όμως, η αρνητική επίδραση αυτής της ενέργειας, όπως και της προηγούμενης, είναι προτιμότερη από την ξαφνική και ολική απώλεια της γεννήτριας, αν δεν προφυλαχθεί.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι αυτό που φαίνεται στο Σχ. 2.6 και η ακριβής υλοποίηση του αναφέρεται στα [Νικ07, VNT06].

Η λειτουργία του περιοριστή ρεύματος τυμπάνου στα πλαίσια του WPSTAB αναφέρεται συνοπτικά στη συνέχεια. Όταν το ρεύμα τυμπάνου I_S παραμένει πάνω από την μέγιστη επιτρεπτή τιμή του I_S^{lim} , για χρονικό διάστημα d , τότε ο περιοριστής ρεύματος τυμπάνου δρα είτε πάνω στον ρυθμιστή στροφών (για μείωση της ενεργού ισχύος) είτε πάνω στον ΑΡΤ (για μείωση της αέργου ισχύος). Η χρονική καθυστέρηση d υφίσταται για να μην ενεργοποιείται το σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου σε παραδικές υπερβάσεις του ορίου.

Η μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας γίνεται με μείωση της μηχανικής ισχύος P_{mo} του τροβίλου ως εξής:

$$P_{mo}(t + \Delta t) = P_{mo}(t) - r_{mo}\Delta t \quad P_{mo} \geq P_m^{\text{min}} \quad (2.37)$$

όπου P_{mo} η ισχύς αναφοράς του ρυθμιστή στροφών, Δt το χρονικό βήμα, r_{mo} ο ρυθμός μείωσης της παραγωγής για το αντίστοιχο χρονικό βήμα (που προκύπτει από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας) και τέλος P_m^{min} το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας.

Η μείωση της ενεργού παραγωγής γίνεται είτε μέχρι να αρθεί η παραβίαση του ορίου του στάτη είτε μέχρι να φτάσει στο τεχνικό ελάχιστο της μονάδας. Στην δεύτερη περίπτωση και εφόσον εξακολουθεί να υπάρχει παραβίαση του ορίου ρεύματος στάτη, ο περιοριστής τυμπάνου μειώνει την άεργο ισχύ, μέσω του μείωσης της τάσης αναφοράς κατά ΔV_{ref} του ΑΡΤ, ως εξής:

$$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V_{ref} \quad (2.38)$$

Εάν η γεννήτρια λειτουργεί σε ΑΡΤ, τότε η μείωση της τάσης αναφοράς είναι σταθερή. Αντίθετα αν η γεννήτρια βρίσκεται σε προστασία υπερδιέγερσης, ένα κατάλληλο βήμα μείωσης υπολογίζεται,

ώστε η γεννήτρια να γυρίσει πρώτα σε λειτουργία APT. Από αυτό το σημείο η μείωση συνεχίζεται όσο η υπέρβαση ορίου ρεύματος στάτη διατηρείται. Η αντίστοιχη μείωση της τάσης αναφοράς δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta V_{ref} = \begin{cases} \alpha \Delta t, & \text{Γεννήτρια σε APT} \\ V_{ref} - \left(V + \frac{E_f^{lim}}{K_A} \right) + \beta \Delta t, & \text{Γεννήτρια σε ΣΠΥ} \end{cases} \quad (2.39)$$

όπου α , β σταθεροί ρυθμοί μείωσης της τάσης αναφοράς και K_A το αναλογικό κέρδος του APT της σχέσης (2.23).

2.2.6 Προστασία υπότασης γεννητριών

Οι γεννήτριες των θερμικών σταθμών, λόγω ύπαρξης βοηθητικών, είναι εξοπλισμένες με προστασία υπότασης, προκειμένου να προστατευτεί ο εν λόγω εξοπλισμός από υπερθέρμανση εξαιτίας των υψηλών ρευμάτων που συνεπάγεται η παρουσία χαμηλής τάσης [PSB04]^{iv}.

Το μοντέλο που περιγράφει την προστασία έναντι υπότασης των γεννητριών στο WPSTAB έχει αναπτυχθεί στη διατριβή [Νικ07, Υποεν. 3.2.3] και περιγράφεται από τον Αλγ. 2.1 [Νικ07] που φαίνεται στη συνέχεια. Η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος βασίζεται στην αποσύνδεση της αντίστοιχης γεννήτριας όταν η τερματική της τάση V_t παραμένει κάτω από ένα κατώφλι προστασίας υπότασης V_{lim} για ένα χρονικό διάστημα T_{del} .

Αλγόριθμος 2.1 Προστασία υπότασης γεννητριών

- 1: **for** κάθε γεννήτρια θερμικού σταθμού **do**
 - 2: **if** ($V_t < V_{lim}$) AND ($Timer > T_{del}$) **then**
 - 3: αποσύνδεση γεννήτριας και βοηθητικών
 - 4: **end if**
 - 5: **end for**
-

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κατώφλι προστασίας υπότασης V_{lim} δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχεί σε πραγματική ρύθμιση της προστασίας υπότασης (relay) των γεννητριών (που μπορεί και να μην είναι ενεργή), αλλά στην τιμή στην οποία θα υπάρξει απώλεια των βοηθητικών των θερμικών σταθμών και κατά συνέπεια αποσύνδεση της γεννήτριας.

2.2.7 Φορτία

Στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα τα φορτία που δεν είναι κινητήρες αναπαριστούνται με το εκθετικό μοντέλο και μπορεί να είναι είτε στατικά είτε δυναμικά. Στην πρώτη περίπτωση δεν υπάρχει κάποιος εγγενής μηχανισμός αποκατάστασης της ισχύος, παρά μόνο μέσα από τη δράση των ΣΑΤΥΦ, ενώ στη δεύτερη περίπτωση τα ίδια τα φορτία έχουν δικό τους μηχανισμό αυτορύθμισης της ισχύος. Στη συνέχεια αναλύονται και οι δύο περιπτώσεις.

^{iv} Δεν λαμβάνεται υπόψη προστασία υπότασης γεννητριών υδροηλεκτρικών μονάδων

2.2.7.1 Στατικά φορτία

Τα στατικά εκθετικά φορτία περιγράφονται από τις ακόλουθες αλγεβρικές εξισώσεις [Kun94, VV08a]:

$$P = z_P P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\alpha \quad (2.40\alpha)$$

$$Q = z_Q Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^\beta \quad (2.40\beta)$$

όπου z_P & z_Q αδιάστατες μεταβλητές ζήτησης (παράμετροι) που σχετίζονται με το πλήθος του συνδεδεμένου εξοπλισμού, V_o η ονομαστική τάση και P_o & Q_o η ενεργός και άεργος κατανάλωση ισχύος αντίστοιχα για ονομαστική τάση και ζήτηση.

Ως εκ τούτου, $z_P P_o$ και $z_Q Q_o$ είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνονται στην ονομαστική τάση, ενώ οι εκθέτες α και β σχετίζονται με τον τύπο του φορτίου και καθορίζουν την εξάρτηση του από την τάση.

Αξίζει να αναφερθούν τρεις ξεχωριστοί τύποι εκθετικού φορτίου:

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

Σε περίπτωση που θεωρηθεί ότι η συνολική ζήτηση του συστήματος αυξάνεται με ρυθμό r (π.χ. σε εφαρμογή αύξησης της φόρτισης), η τρέχουσα ζήτηση ισχύος, καθορίζεται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$z_P = (1 + r \cdot r_P \cdot (t - t_o)) \quad (2.41\alpha)$$

$$z_Q = (1 + r \cdot r_Q \cdot (t - t_o)) \quad (2.41\beta)$$

όπου r_P & r_Q οι συντελεστές συμμετοχής της ενεργού και άεργου συνιστώσας αντίστοιχα στην αύξηση της ζήτησης, t_o ο χρόνος κατά τον οποίο αρχίζει η εφαρμογή της ράμπας, t η τρέχουσα χρονική στιγμή, ενώ οι αρχικές τιμές ζήτησης θεωρούνται ίσες με 1. Δηλαδή όταν $t = t_o$ $P = P_o$, $Q = Q_o$ και $V = V_o$.

Αν δεν υπάρχει αύξηση της ζήτησης, ο ρυθμός r λαμβάνεται ίσος με μηδέν και οι επιμέρους συντελεστές συμμετοχής δεν παίζουν κανέναν ρόλο στην προσομοίωση. Από την άλλη πλευρά, αν οι συντελεστές συμμετοχής είναι μηδενικοί, όπως π.χ. στα βοηθητικά των θερμικών σταθμών, το συγκεκριμένο φορτίο δεν συμμετέχει στην αύξηση της ζήτησης.

Οι εξισώσεις (2.40) εντάσσονται στο σύνολο των αλγεβρικών εξισώσεων (2.1β).

2.2.7.2 Δυναμικά φορτία

Το μοντέλο που περιγράφει τα δυναμικά φορτία έχει αναπτυχθεί στη διατριβή [Νικ07]. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο, η αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος στην ονομαστική της τιμή γίνεται με ρύθμιση των μεταβλητών z_P και z_Q οι οποίες είναι πλέον μεταβλητές κατάστασης και σχετίζονται με την ωμική και επαγωγική αγωγιμότητα του φορτίου αντίστοιχα. Η συμπεριφορά των μεταβλητών αυτών διέπεται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$T_P \frac{P_o}{V_o^\alpha} \dot{z}_P = P_s - \left(z_P \frac{P_o}{V_o^\alpha} \right) V^\alpha \quad (2.42\alpha)$$

$$T_Q \frac{Q_o}{V_o^\beta} \dot{z}_Q = Q_s - \left(z_Q \frac{Q_o}{V_o^\beta} \right) V^\beta \quad (2.42\beta)$$

όπου P_s & Q_s η μακροπρόθεσμη ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, που ορίζονται στη συνέχεια, T_P & T_Q , οι χρονικές σταθερές επαναφοράς της ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, ενώ οι μεταβλητές z_P & z_Q , έχουν τέτοιες τιμές ώστε για $V = V_o$ να ισχύει $z_P P_o = P_s$ & $z_Q Q_o = Q_s$.

Καθώς οι z_P και z_Q είναι πλέον μεταβλητές κατάστασης, στην περίπτωση αύξησης της συνολικής ζήτησης του συστήματος με ρυθμό r , η μακροπρόθεσμη ζήτηση ισχύος, καθορίζεται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_s = P_o (1 + r \cdot r_P \cdot (t - t_o)) \quad (2.43\alpha)$$

$$Q_s = Q_o (1 + r \cdot r_Q \cdot (t - t_o)) \quad (2.43\beta)$$

όπου P_o & Q_o η αρχική ζήτηση ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι όροι είναι ίδιοι με αυτούς που ορίστηκαν στις εξισώσεις (2.41).

Οι εξισώσεις (2.42) ανήκουν στο σύνολο των διαφορικών εξισώσεων (2.1γ), ενώ η καταναλισκόμενη ισχύς εξακολουθεί να υπολογίζεται βάση των σχέσεων (2.40).

2.2.8 Συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Τα ΣΑΤΥΦ είναι διατάξεις που ενεργοποιούνται στην μακροχρόνια χρονική κλίμακα με τον μηχανισμό αλλαγής τάσης να δρα στο τύλιγμα με τις περισσότερες σπείρες και άρα με την υψηλότερη τάση για δύο λόγους. Πρώτον το ρεύμα σε αυτήν την πλευρά είναι μικρότερο με συνέπεια ο μηχανισμός να καταπονείται λιγότερο, με μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης ηλεκτρικού σπινθήρα και δεύτερον, λόγω της ύπαρξης περισσότερων σπειρών υπάρχει μεγαλύτερη και ακριβέστερη ρύθμιση. Ως εκ τούτου, στους μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης (που είναι και η πλειοψηφία) το ΣΑΤΥΦ δρα την πλευρά του πρωτεύοντος^ν.

Σε κάθε περίπτωση η δυναμική συμπεριφορά του ΣΑΤΥΦ μοντελοποιείται με την ακόλουθη εξίσωση διαφορών:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r & \text{αν } V_2 > V_{ref} + d \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_k - \Delta r & \text{αν } V_2 < V_{ref} - d \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_k & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.44)$$

όπου V_2 η ελεγχόμενη τάση δευτερεύοντος, V_{ref} η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης του μετασχηματιστή, d το μισό εύρος της νεκρής ζώνης (γύρω από την τάση αναφοράς), r_k ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού και τέλος, Δr το βήμα αλλαγής της λήψης.

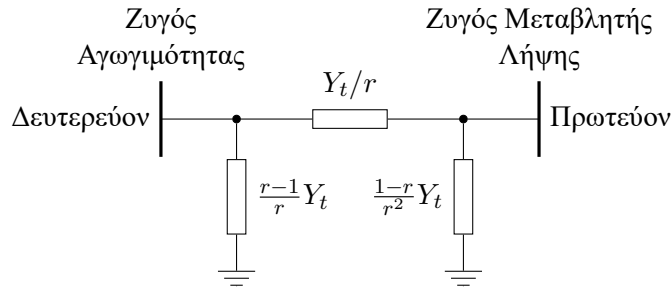
Η ενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ γίνεται σε διακριτές χρονικές στιγμές t_k , $k = 0, 1, \dots$, με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_d \quad (2.45)$$

όπου το χρονικό διάστημα ΔT_d παίρνει δύο τιμές, ΔT_{d1} και ΔT_{d2} . Η πρώτη τιμή αντιστοιχεί στην αρχική χρονική καθυστέρηση, για την πρώτη φορά που η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός νεκρής ζώνης και η δεύτερη είναι η διαδοχική χρονική καθυστέρηση η οποία εφαρμόζεται στις επόμενες διαδοχικές κινήσεις του ΣΑΤΥΦ.

Τόσο η χρονική καθυστέρηση ΔT_{d1} όσο και η ΔT_{d2} περιλαμβάνουν από τη μία πλευρά ένα κοινό ελάχιστο χρονικό διάστημα T_m , που καλείται μηχανική καθυστέρηση και χρειάζεται για την κίνηση του ΣΑΤΥΦ και από την άλλη πλευρά, μια επιπλέον χρονική καθυστέρηση, η οποία είναι και αυτή που διαφοροποιεί εντέλει τις δύο καθυστερήσεις, με την ΔT_{d1} να είναι πάντα μεγαλύτερη από την ΔT_{d2} για να αποφεύγονται άσκοπες κινήσεις σε μεταβατικά φαινόμενα. Επίσης, για να αποφεύγονται ταλαντωτικές

^νΣτη συνέχεια, αν δεν δηλώνεται διαφορετικά η χρήση των όρων πρωτεύον και δευτερεύον για τα τυλίγματα του μετασχηματιστή αναφέρεται αντίστοιχα στην πλευρά υψηλής και χαμηλής τάσης.



Σχήμα 2.7: Ισοδύναμο κύκλωμα π μετασχηματιστή.

κινήσεις σε ακτινικά δίκτυα με πολλαπλά επίπεδα ΣΑΤΥΦ, αυτά που βρίσκονται σε υψηλότερο επίπεδο έχουν μικρότερες χρονικές καθυστερήσεις.

Εκτός από τη δυναμική συμπεριφορά, τα ΣΑΤΥΦ διέπονται και από αλγεβρικούς περιορισμούς οι οποίοι εντάσσονται στις εξισώσεις δικτύου που περιγράφονται στην Υποεν. 2.2.10 μέσα από την αναπαράσταση των ΣΑΤΥΦ από το ισοδύναμο κύκλωμα π , το οποίο φαίνεται στο Σχ. 2.7 [Kun94].

Η σύνθετη αγωγιμότητα Y_t , που φαίνεται στο Σχ. 2.7 είναι το αντίστροφο της σύνθετης αντίστασης του μετασχηματιστή Z_t η οποία περιλαμβάνει την ωμική αντίσταση R_t και την αντίδραση σκεδάσεως X_t ^{vi}. Δηλαδή ισχύει:

$$Z_t = R_t + jX_t = 1/Y \quad (2.46)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο οι μετασχηματιστές σταθερής λήψης όσο και οι μετασχηματιστές εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ παριστάνονται με το ισοδύναμο κύκλωμα π , με τη διαφορά ότι στην δεύτερη περίπτωση όταν αλλάζει η λήψη και άρα ο λόγος του ΣΑΤΥΦ r , αλλάζουν και τα στοιχεία του ισοδυνάμου κυκλώματος.

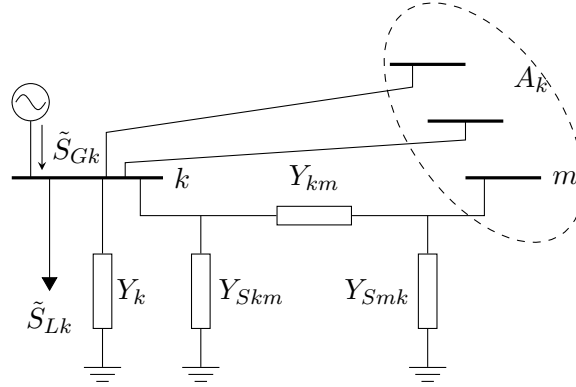
2.2.9 Αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης - απόζευξης στατών διατάξεων αντιστάθμισης

Στην τρέχουσα έκδοση του WPSTAB έχουν μοντελοποιηθεί δύο στατές διατάξεις αντιστάθμισης, που είναι οι πυκνωτές και τα πηνία. Η αρχή λειτουργίας τους είναι απλή και στηρίζεται στην ύπαρξη μιας νεκρής ζώνης, πλάτους 2ϵ , γύρω από μια τιμή τάσης αναφοράς, V_{des} , σε έναν ελεγχόμενο ζυγό. Όταν η τάση V του ελεγχόμενου ζυγού βρεθεί κάτω από τη νεκρή ζώνη ($V < V_{des} - \epsilon$), ο ελεγκτής δίνει εντολή ζεύξης συστοιχίας πυκνωτών ή απόζευξης συστοιχίας πηνίων, ώστε να ενισχυθεί τοπικά με άεργο παραγωγή ο ζυγός. Ακριβώς η αντίθετη διαδικασία (αποσύνδεση πυκνωτών ή σύνδεση πηνίων) λαμβάνει χώρα όταν η τάση του ζυγού ξεπεράσει το άνω όριο της νεκρής ζώνης ($V > V_{des} + \epsilon$). Κάθε συστοιχία είναι δυνατόν να περιλαμβάνει περισσότερα του ενός βήματα τα οποία ενεργοποιούνται σταδιακά μέχρι η τάση στον ελεγχόμενο ζυγό επιστρέψει εντός της νεκρής ζώνης, ή να εξαντληθούν οι διαθέσιμες βαθμίδες.

Προκειμένου να αποφευχθούν άσκοπες συνδέσεις και αποσυνδέσεις συστοιχιών αντιστάθμισης χρησιμοποιείται μια σταθερή χρονική καθυστέρηση ΔT , της τάξης των δεκάδων δευτερολέπτων, με αποτέλεσμα η ενεργοποίηση των αυτόματων μηχανισμών να λαμβάνει χώρα τις χρονικές στιγμές $t_k = k\Delta T$. Η λειτουργία των μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση διαφορών [Nik07]:

$$B_{k+1} = \begin{cases} B_k - \Delta B & \text{αν } V > V_{des} + \epsilon \text{ και } B_k < B_{\max} \\ B_k + \Delta B & \text{αν } V < V_{des} - \epsilon \text{ και } B_k > B_{\min} \\ B_k & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (2.47)$$

^{vi}η αντίδραση μαγνήτισης αμελείται.



Σχήμα 2.8: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ

όπου ΔB είναι η μεταβολή (βήμα) της αγωγιμότητας, που είναι πάντα θετική, B είναι η συνολική αγωγιμότητα που είναι συνδεδεμένη στον ζυγό και θεωρείται θετική για πυκνωτές και αρνητική για πηνία.

Η εξίσωση (2.47) περιλαμβάνεται στο σύνολο εξισώσεων (2.1δ).

2.2.10 Εξισώσεις δικτύου

Οι εξισώσεις δικτύου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τους αλγεβρικούς περιορισμούς του συνολικού αλγεβρικού-διαφορικού συστήματος και περιλαμβάνονται στις σχέσεις (2.1β). Οι εξισώσεις αυτές μπορούν να διατυπωθούν με τη βοήθεια του Σχ. 2.8, που απεικονίζει έναν τυπικό ζυγό k ενός ΣΗΕ, ο οποίος συνδέεται με ένα άλλον ζυγό m , $m \in A_k$, όπου A_k το σύνολο των ζυγών με τους οποίους συνδέεται ο ζυγός k .

Οι \tilde{S}_{Gk} & \tilde{S}_{Lk} είναι η μιγαδική παραγωγή και το μιγαδικό φορτίο αντίστοιχα του ζυγού. Η γραμμή που ενώνει τον ζυγό k και m ($m \in A_k$) παριστάνεται με το ονομαστικό κύκλωμα π , που αποτελείται από τις αγωγιμότητες Y_{km} , Y_{skm} και Y_{smk} . Y_{km} είναι η αγωγιμότητα σειράς του κυκλώματος ενώ Y_{skm} και Y_{smk} οι αντίστοιχες εγκάρσιες αγωγιμότητες. Το κύκλωμα μπορεί να ανήκει είτε σε γραμμής μεταφοράς είτε σε μετασχηματιστή, όπως περιγράφεται στην Υποεν. 2.2.8. Τα στοιχεία του ονομαστικού κυκλώματος π μπορούν να γραφούν συναρτήσει του ωμικού και επαγωγικού μέρους των σύνθετων αγωγιμοτήτων ως εξής:

$$Y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.48\alpha)$$

$$Y_{skm} = g_{skm} + jb_{skm} \quad (2.48\beta)$$

$$Y_{smk} = g_{smk} + jb_{smk} \quad (2.48\gamma)$$

Στην γενική περίπτωση μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μια γραμμές που να συνδέουν τους ζυγούς k και m . Σε αυτήν την περίπτωση η συνολική σύνθετη αγωγιμότητα προκύπτει από τον παράλληλο συνδυασμό των επιμέρους αγωγιμοτήτων των γραμμών μεταφοράς ή των μετασχηματιστών.

Στον ζυγό k είναι επίσης συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα $Y_k = g_k + jb_k$, η οποία παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής αγωγιμότητας πάνω στο ζυγό. Η τάση πάνω στον ζυγό k είναι $\tilde{V}_k = V_k \angle \theta_k$, ενώ η τάση στον ζυγό m είναι $\tilde{V}_m = V_m \angle \theta_m$.

Η συνολική ροή ενεργού και αέργου ισχύος από τον ζυγό k δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = V_k^2 \sum_{m \in A_k} (g_{km} + g_{skm}) + V_k^2 g_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \alpha_{km} \quad (2.49\alpha)$$

$$Q_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = V_k^2 \sum_{m \in A_k} (b_{km} + b_{skm}) + V_k^2 b_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \beta_{km} \quad (2.49\beta)$$

όπου:

$$\alpha_{km} = g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (2.50\alpha)$$

$$\beta_{km} = g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (2.50\beta)$$

ενώ, \mathbf{V} & $\boldsymbol{\theta}$ είναι τα διανύσματα των τάσεων και των γωνιών των ζυγών του δικτύου αντίστοιχα. Για ένα σύστημα N ζυγών υπάρχουν N σχέσεις της μορφής (2.49α) και N της μορφής (2.49β), οι οποίες περιλαμβάνονται στο σύνολο των εξισώσεων (2.4β).

2.3 Μέθοδος προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το WPSTAB εκτελεί τη χρονική προσομοίωση των ΣΗΕ εφαρμόζοντας την οιονεί στατική προσέγγιση, όπως παρουσιάστηκε στην Εν. 2.1 και χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που περιγράφηκαν στην Εν. 2.2. Επίσης, γίνεται μια σύντομη αναφορά στις υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα για την αποθήκευση αραιών πινάκων.

2.3.1 Χρονική προσομοίωση

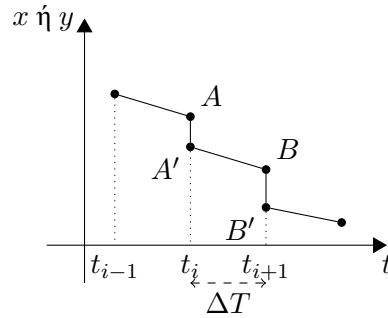
Το συνολικό χρονικό διάστημα της προσομοίωσης χωρίζεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα ΔT . Για κάθε χρονική στιγμή $t_i = i\Delta T$ εκτελούνται με την ακόλουθη σειρά τα εξής βήματα:

1. Αριθμητική ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων (2.4γ) από τον προηγούμενο χρόνο t_{i-1} .
2. Επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων φαινομένων (2.4α) και των αλγεβρικών εξισώσεων (2.4β).
3. Ενημέρωση των δεδομένων του συστήματος που αλλάζουν λόγω των εξισώσεων διαφορών (2.4δ) ή από αλλαγή των παραμέτρων (π.χ. άνοιγμα γραμμής, απώλεια γεννήτριας κτλ.).
4. Εκ νέου επίλυση των εξισώσεων (2.4α) και (2.4β).
5. Προσδιορισμός παραγώγων για την ολοκλήρωση στην επόμενη χρονική στιγμή t_{i+1} .

Η αλληλουχία αυτής της διαδικασίας επίλυσης περιγράφεται στο Σχ. 2.9, όπου φαίνεται η χρονική εξέλιξη μιας αλγεβρικής μεταβλητής y ή μιας μεταβλητής κατάστασης x των βραχυπρόθεσμων φαινομένων, κατά τη μετάβαση του προγράμματος προσομοίωσης από μία χρονική στιγμή t_{i-1} στην επόμενη χρονική στιγμή t_i . Οι απότομες, κατακόρυφες μεταβολές (π.χ. $A \rightarrow A'$ και $B \rightarrow B'$) οφείλονται είτε σε κάποια αλλαγή των διακριτών μεταβλητών \mathbf{z}_d (2.4δ) είτε σε διαταραχές που επιβάλλονται στο σύστημα. Αντίθετα, η συνεχής μετάβαση (π.χ. από το $A' \rightarrow B$) οφείλεται στην ολοκλήρωση των διαφορικών εξισώσεων των μακροπρόθεσμων φαινομένων (2.4γ) ή σε συνεχή μεταβολή παραμέτρων (π.χ. συνεχή αύξηση του φορτίου ή παραγωγών των γεννητριών).

Στα σημεία A, A', B, B' κλπ. επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική ισορροπία, δηλαδή οι εξισώσεις (2.4α) και (2.4β), με τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές (συνεχείς και διακριτές) σταθερές. Στην ουσία πρόκειται για ένα μη γραμμικό σύστημα που επιλύεται με την αριθμητική μέθοδο Newton - Raphson και περιλαμβάνει τις βραχυπρόθεσμες μεταβλητές \mathbf{x} και τις αλγεβρικές μεταβλητές \mathbf{y} , που ορίστηκαν στην Εν. (2.2).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια διευκρίνηση. Στην οιονεί στατική προσέγγιση οι εξισώσεις ισορροπίας (2.4α) των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων είναι πλέον αλγεβρικές εξισώσεις



Σχήμα 2.9: Χρονική εξέλιξη προσομοίωσης, λόγω μεταβολής των μεταβλητών και παραμέτρων της μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας

οπότε μπορούν να ελαττωθούν ώστε να αρκεί η επίλυση λιγότερων μη γραμμικών εξισώσεων. Συγκεκριμένα, οι n_x συνολικά βραχυπρόθεσμες εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να πάρουν την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \Leftrightarrow \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \mathbf{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ \mathbf{f}_2(\mathbf{x}_2) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2.51)$$

όπου \mathbf{x}_1 και \mathbf{f}_1 είναι διάστασης $n_1 \times 1$, ενώ \mathbf{x}_2 και \mathbf{f}_2 είναι διάστασης $n_2 \times 1$, με $n_1 + n_2 = n_x$.

Επομένως, στο WPSTAB το σύνολο των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης \mathbf{x} και των αντίστοιχων εξισώσεων ισορροπίας \mathbf{f} χωρίζονται στα δύο υποσύνολα $\mathbf{x}^T = [\mathbf{x}_1^T \quad \mathbf{x}_2^T]$ και $\mathbf{f}^T = [\mathbf{f}_1^T \quad \mathbf{f}_2^T]$, από τα οποία οι μεταβλητές κατάστασης \mathbf{x}_1 μπορούν να υπολογιστούν έμμεσα με τη βοήθεια των \mathbf{x}_2 . Οι μεταβλητές κατάστασης \mathbf{x}_1 που μπορούν να απαλειφθούν είναι:

- Το διάνυσμα ω των γωνιακών ταχυτήτων των γεννητριών.
- Το διάνυσμα \mathbf{E}'_q των μεταβατικών ΗΕΔ κατά των εγκάρσιο άξονα των γεννητριών.
- Το διάνυσμα \mathbf{E}_f των τάσεων διεγέρσεως των γεννητριών.
- Το διάνυσμα \mathbf{X}_E των μεταβλητών κατάστασης των συστημάτων διεγέρσεως των γεννητριών (εκτός των τάσεων διεγέρσεως).
- Το διάνυσμα $\Delta \mathbf{P}_m$ των μεταβολών της μηχανικής ισχύος των γεννητριών.

Ο τρόπος απαλοιφής αυτών των μεταβλητών και μείωσης της διάστασης του συστήματος περιγράφεται αναλυτικά στο διδακτορικό [Μαν98, Υποεν. 4.3.1, σελ. 116–120] και δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά εδώ. Για λόγους απλοποίησης των συμβολισμών και ευκρίνειας των αποτελεσμάτων στη συνέχεια δεν θα γίνεται διάκριση των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών και των αντίστοιχων εξισώσεων ισορροπίας και θα χρησιμοποιούνται οι αρχικοί συμβολισμοί χωρίς τους δείκτες, ήτοι \mathbf{x} για τις βραχυπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης και \mathbf{f} για τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας.

Από την άλλη πλευρά, οι αλγεβρικές μεταβλητές \mathbf{y} περιλαμβάνουν τις εξισώσεις δικτύου (2.49) επαυξημένες κατά μία ακόμα μεταβλητή που αντιστοιχεί στην ενιαία συχνότητα του συστήματος ω_{sys} .

Με βάση όλα τα ανωτέρω οι άγνωστες μεταβλητές των εξισώσεων ισορροπίας που επιλύονται από το WPSTAB στα σημεία A, A', B, B' κλπ. του Σχ. 2.9 είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{x} = \delta, \quad \mathbf{y}^T = [\boldsymbol{\theta}^T \quad \mathbf{V}^T \quad \omega_{sys}] \quad (2.52)$$

όπου δ οι γωνίες των δρομέων των γεννητριών, $\boldsymbol{\theta}$ οι γωνίες των τάσεων των ζυγών, και \mathbf{V} το διάνυσμα με τα μέτρα των τάσεων ζυγών, στο οποίο δεν περιλαμβάνονται οι ζυγοί σταθερής τάσης.

Συνεπώς τα σημεία ισορροπίας βρίσκονται επιλύοντας αριθμητικά το ακόλουθο σύστημα:

$$\mathbf{J}_s \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{(\ell+1)}^i - \mathbf{x}_{(\ell)}^i \\ \mathbf{y}_{(\ell+1)}^i - \mathbf{y}_{(\ell)}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{f}(\mathbf{x}_{(\ell)}^i, \mathbf{y}_{(\ell)}^i) \\ -\mathbf{g}(\mathbf{x}_{(\ell)}^i, \mathbf{y}_{(\ell)}^i) \end{bmatrix}, \quad \ell = 0, 1, 2, \dots, \quad \mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

όπου ο δείκτης ℓ αντιστοιχεί στο πλήθος των ανακυκλώσεων της αριθμητικής μεθόδου ενώ ο εκθέτης i αναφέρεται στο i – οστό βήμα της προσομοίωσης. Ο πίνακας \mathbf{J}_s είναι ο Ιακωβιανός πίνακας των εξισώσεων ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και των αλγεβρικών εξισώσεων, με τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης θεωρούμενες σταθερές.

Το μη γραμμικό σύστημα (2.53) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικατάστασης, που απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του πίνακα \mathbf{J}_s και η οποία υλοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss χρησιμοποιώντας παράλληλα τεχνικές αραιών πινάκων.

Επιστρέφοντας στο Σχ. 2.9, μεταξύ των σημείων $A' \rightarrow B$ γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων (2.4γ). Το χρονικό διάστημα ΔT αποτελεί το βήμα της ολοκλήρωσης και της προσομοίωσης, δηλαδή ισχύει $t_{i+1} = t_i + \Delta T$. Συνήθεις τιμές του ΔT είναι μεταξύ 1 και 10 s, το οποίο επιλέγεται έτσι ώστε:

- Όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται από τις εξισώσεις διαφορών (2.4δ), να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του ΔT .
- Να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης χρονικής σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (2.4γ), ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Μεταξύ των σημείων ισορροπίας που αντιστοιχούν στην ίδια χρονική στιγμή, π.χ. τη χρονική στιγμή t_i από $A \rightarrow A'$ και τη χρονική στιγμή t_{i+1} από $B \rightarrow B'$, γίνεται επίλυση των εξισώσεων διαφορών (2.4δ), των διακριτών μεταβλητών της μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας.

Συνοπτικά, το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB λειτουργεί όπως περιγράφει ο Αλγ.2.2, που φαίνεται στη συνέχεια.

Αλγόριθμος 2.2 Πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB

- 1: Αρχικοποίηση
 - 2: **while** $t \leq t_{max}$ **do**
 - 3: Ολοκλήρωση διαφορικών εξισώσεων (2.4γ)
 - 4: $t = t + \Delta T$
 - 5: Ανανέωση συνεχών παραμέτρων συστήματος (π.χ. συνεχή αύξηση παραγωγής)
 - 6: Επίλυση εξισώσεων ισορροπίας βραχυπρόθεσμων φαινομένων (2.53)
 - 7: **if** Μη σύγκλιση **then**
 - 8: Τερματισμός
 - 9: **end if**
 - 10: Μεταβολή διακριτών μεταβλητών (2.4δ)
 - 11: Επιβολή διακριτών διαταραχών
 - 12: **if** Υπήρξαν μεταβολές; **then**
 - 13: Επίλυση εξισώσεων ισορροπίας βραχυπρόθεσμων φαινομένων (2.53)
 - 14: **if** Μη σύγκλιση **then**
 - 15: Τερματισμός
 - 16: **end if**
 - 17: **end if**
 - 18: **end while**
-

Δεδομένου ότι η δυσκολότερη υπολογιστικά διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_s , που λαμβάνει χώρα κατά την επίλυση των βραχυπρόθεσμων εξισώσεων ισορροπίας, η ανανέωση του πραγματοποιείται μόνο όταν συντρέχουν οι ακόλουθοι λόγοι:

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

2.3.2 Αραιότητα πινάκων και υπολογιστικές τεχνικές

Ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_s της (2.53) κατασκευάζεται σε μεγάλο βαθμό επεκτείνοντας έναν κλασικό Ιακωβιανό πίνακα ροής ισχύος \mathbf{J}_{LF} , με αποτέλεσμα να διατηρεί την αραιή δομή του τελευταίου. Η δομή του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_{LF} οφείλεται με τη σειρά της στην αραιή δομή της μήτρας αγωγιμοτήτων του συστήματος, η οποία προκύπτει από το γεγονός πως κάθε ζυγός συνδέεται με περιορισμένο αριθμό γειτονικών ζυγών.

Εξαιτίας της αραιής δομής του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_s και προκειμένου να εξοικονομηθεί αποθηκευτικός χώρος αλλά και για ταχύτερη προσπέλαση των στοιχείων του, το WPSTAB χρησιμοποιεί τεχνική αραιών πινάκων για την επίλυση του συστήματος (2.53). Με βάση αυτήν την τεχνική [Μαν98]:

1. Το πρόγραμμα αποθηκεύει μόνο τα μη μηδενικά στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_s .
2. Κατά τις λογικές ή αριθμητικές πράξεις που επιτελούνται κατά την προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη μόνο τα μη μηδενικά στοιχεία του πίνακα.

Τα μη μηδενικά στοιχεία του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_s χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, δηλαδή σε διαγώνια και μη διαγώνια στοιχεία, και αποθηκεύονται με τη βοήθεια τεσσάρων πινάκων, των ΙΤΚΤ, ΙΤΚΜ, \mathbf{J}_{DIAG} και \mathbf{J}_{OFFD} , οι οποίοι περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Έστω ότι ο συνολικός αριθμός μη μηδενικών μη διαγώνιων στοιχείων του πίνακα αγωγιμοτήτων του δικτύου είναι R . Τα στοιχεία αυτά (και ως εκ τούτου και η τοπολογία του δικτύου) αποθηκεύονται με τη σειρά που εμφανίζονται δηλαδή κατά αύξουσα σειρά και αύξουσα στήλη, με τη χρήση των δύο μονοδιάστατων πινάκων ΙΤΚΤ και ΙΤΚΜ.

Ο ΙΤΚΤ έχει διάσταση $N + 1$ (όπου N ο αριθμός ζυγών του δικτύου) και περιέχει τους αύξοντες αριθμούς του πρώτου μη μηδενικού μη διαγώνιου στοιχείου δικτύου κάθε σειράς, ενώ πάντοτε ισχύει:

$$\begin{aligned} \text{ITKT}(1) &= 1 \\ \text{ITKT}(N + 1) &= R + 1 \end{aligned}$$

Από την άλλη πλευρά, ο ΙΤΚΜ έχει διάσταση R και περιέχει τη στήλη του κάθε μη μηδενικού μη διαγώνιου στοιχείου του πίνακα αγωγιμοτήτων.

Οι τιμές των διαγώνιων στοιχείων του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_s περιλαμβάνονται στον πίνακα \mathbf{J}_{DIAG} , ο οποίος είναι διάστασης $3N \times 3$ και αποτελείται από υποπίνακες $\mathbf{J}_{\text{DIAG}}(i)$, διάστασης 3×3 για κάθε διαγώνιο στοιχείο. Δεν είναι απαραίτητο και τα 9 στοιχεία κάθε υποπίνακα 3×3 να είναι μη μηδενικά, καθώς ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων εξαρτάται από τον αριθμό των μεταβλητών που αντιστοιχούν στον ζυγό i .

Οι τιμές των μη διαγώνιων, μη μηδενικών στοιχείων του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_R περιλαμβάνονται στον πίνακα \mathbf{J}_{OFFD} , ο οποίος είναι διάστασης $3(R + N) \times 3$ και αποτελείται από R υποπίνακες $\mathbf{J}_{\text{OFFD}}^{(V,\theta)}$,

διάστασης 3×3 που έχουν πάντα τέσσερα μη μηδενικά στοιχεία και N υποπίνακες $\mathbf{J}_{\text{OFFD}}^{(\omega)}$, διάστασης επίσης 3×3 οι οποίοι έχουν το πολύ δύο μη μηδενικά στοιχεία. Οι υποπίνακες $\mathbf{J}_{\text{OFFD}}^{(V,\theta)}$ περιλαμβάνουν τις ευαισθησίες ενός ζυγού i ως προς τα μεγέθη (τάση και γωνία) ενός γειτονικού ζυγού j με τον οποίο συνδέεται ενώ οι υποπίνακες $\mathbf{J}_{\text{OFFD}}^{(\omega)}$ περιλαμβάνουν τις παραγώγους των εξισώσεων ενός ζυγού i ως προς τη συχνότητα του συστήματος ω_{sys} .

Αναλυτική περιγραφή της μορφής των διαφόρων υποπινάκων και της σύνθεσης τους μπορεί να βρεθεί στο διδακτορικό [Μαν98, Υποεν. 5.3.2, σελ. 149–153].

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, είναι εμφανές πως αν ένα στοιχείο (π.χ. μονάδα παραγωγής, φορτίο, γραμμή μεταφοράς κλπ.) αποσυνδεθεί, ενημερώνονται οι πίνακες ΙΤΚΤ, ΙΤΚΜ, \mathbf{J}_{DIAG} και \mathbf{J}_{OFFD} και το εν λόγω στοιχείο παύει πλέον να συμμετέχει στους διάφορους υπολογισμούς.

2.4 Ανάλυση ευστάθειας τάσεως

Εκτός από τη προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, το WPSTAB μπορεί και να υπολογίζει ιδιοτιμές και ιδιοδιανύσματα καθώς και διάφορες ευαισθησίες ως προς παραμέτρους του συστήματος^{vii}, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα επιπλέον εργαλείο ανάλυσης. Όσον αφορά την ευστάθεια τάσης η ανάλυση ευαισθησιών χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα προσομοίωσης για τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου αστάθειας (εφόσον υπάρχει) ώστε να γίνει σύγκριση με το σημείο ανίχνευσης αστάθειας που γίνεται από τα διάφορα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση, που αναπτύσσονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Για αυτόν το λόγο, στην συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση του τρόπου υπολογισμού ευαισθησιών, ορίων φόρτισης και της κρίσιμης ιδιοτιμής καθώς και της μεταξύ τους συσχέτισης. Καθώς όμως για την συγκεκριμένη ανάλυση απαιτούνται Ιακωβιανοί πίνακες, αρχικά γίνεται μια αναφορά σε αυτούς. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι για απλοποίηση της ανάλυσης όλες οι οι συναρτήσεις που αναφέρονται στη συνέχεια θεωρούνται ομαλές, εκτός αν δηλωθεί διαφορετικά.

2.4.1 Ιακωβιανοί πίνακες συστήματος

Ανάλογα με την χρονική κλίμακα με την οποία προσεγγίζεται ένα ΣΗΕ, υπάρχουν αντίστοιχοι Ιακωβιανοί πίνακες των γραμμικοποιημένων μοντέλων. Ήδη στην Εν. 2.3 έγινε αναφορά στον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_s των εξισώσεων ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και των αλγεβρικών εξισώσεων, με τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης θεωρούμενες σταθερές. Με βάση τις σχέσεις (2.3) ο συγκεκριμένος πίνακας γράφεται ως εξής:

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Από την άλλη πλευρά, στην οιονεί στατική προσέγγιση ο αντίστοιχος επαυξημένος μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ προκύπτει από τις εξισώσεις ισορροπίας όλων των σχέσεων (2.4). Θεωρώντας ενιαίο διάνυσμα μακροπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης $\mathbf{z}^T = [\mathbf{z}_c^T \quad \mathbf{z}_c^T]$ και τις αντίστοιχες εξισώσεις $\mathbf{h}^T = [\mathbf{h}_c^T \quad \mathbf{h}_c^T]$, ο μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ μπορεί να γραφεί στην παρακάτω συνεκτική μορφή:

$$\mathbf{J}_\ell = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_z & \mathbf{h}_x & \mathbf{h}_y \\ \mathbf{f}_z & \begin{pmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \end{pmatrix} \\ \mathbf{g}_z & \begin{pmatrix} \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

^{vii}Για τις διάφορες τροποποιήσεις που ενσωματώθηκαν στη λειτουργία του WPSTAB όσον αφορά την ανάλυση ευαισθησιών και τις δυνατότητες που δίνονται πλέον στον χρήστη βλ. Εν. Α.4 στο Παράρτημα.

όπου ο υποπίνακας εντός των αγκυλών είναι ο βραχυπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_s της σχέσης (2.54).

Αν κατά την προσομοίωση του προγράμματος WPSTAB γίνει επιλογή ανάλυσης ευαισθησιών, τότε σε κάθε βήμα της προσομοίωσης εκτός από τον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_s , ο οποίος χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, υπολογίζεται και ο μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ , με την βοήθεια του οποίου υπολογίζεται η κρίσιμη ιδιοτιμή των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και οι αντίστοιχες ευαισθησίες, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Ο πίνακας \mathbf{J}_ℓ αναεώνεται μαζί με τον \mathbf{J}_s , και για τον υπολογισμό του τα μακροπρόθεσμα φαινόμενα, θεωρούνται σε ισορροπία^{viii}.

Οι εξισώσεις μακροπρόθεσμης ισορροπίας αναφέρονται κυρίως στα ΣΑΤΥΦ, τα οποία ανεξάρτητα αν έχουν φτάσει τα όρια τους r_{\min} ή r_{\max} , θεωρείται ότι βρίσκονται σε ισορροπία, με την τρέχουσα τιμή της ελεγχόμενης τάσης ίση με την αντίστοιχη τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης (βλ. Υποεν. 2.2.8).

Προφανώς αν κάποιο στοιχείο αποσυνδεθεί (π.χ. μια γεννήτρια θερμικού σταθμού λόγω ενεργοποίησης της προστασίας υπότασης), αυτομάτως αφαιρείται το αντίστοιχο σύνολο εξισώσεων από τον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_ℓ . Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας \mathbf{J}_ℓ δεν λαμβάνει υπόψη τις εξισώσεις ισορροπίας του μηχανισμού μείωσης της ενεργού και άεργου ισχύος των γεννητριών όταν ενεργοποιείται το αυτόματο σύστημα προστασίας ρεύματος τυμπάνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όταν επιβάλλεται μείωση της παραγωγής μέσω μείωσης της τάσης αναφοράς του APT, ο υπολογισμός του \mathbf{J}_ℓ να θεωρεί την εν λόγω γεννήτρια σαν να βρίσκεται σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης. Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει, καθώς η αντίστοιχη τάση του APT, $V_{ref}(t)$ βρίσκεται σε διαδικασία μείωσης, όπως φαίνεται και από την σχέση (2.38).

Γενικά, υπάρχουν δύο περιπτώσεις λειτουργίας του περιοριστή ρεύματος τυμπάνου:

1. Χειροκίνητη λειτουργία, όπου ο χειριστής μειώνει την τάση αναφοράς και την ενεργό ισχύ της γεννήτριας χρησιμοποιώντας τα μεγέθη αναφοράς (setpoint).
2. Αυτόματη λειτουργία, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Υποεν. 2.2.5.

Για την ανάλυση ευστάθειας στη χειροκίνητη λειτουργία, σε κάθε βήμα γίνεται υπόθεση πως ισχύουν οι συνθήκες ισορροπίας $V = V_{ref}$ και $P = P_m$, αφού δεν υπάρχει κάποιος τρόπος να μοντελοποιηθεί η δράση των χειριστών και σε κάθε σημείο ισχύουν οι εξισώσεις ισορροπίας των σύγχρονων μηχανών.

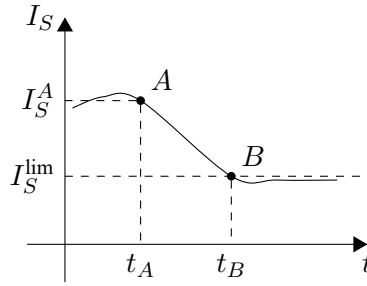
Αντίθετα, κατά την ενεργοποίηση της αυτόματης λειτουργίας του περιοριστή ρεύματος τυμπάνου θα έπρεπε να εισαχθεί στις εξισώσεις ισορροπίας και η συνθήκη του ρεύματος στάτη:

$$I_S = I_S^{\lim} \quad (2.56)$$

Ως εκ τούτου, ενώ κατά τη χρονική προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη η αυτόματη λειτουργία του περιοριστή τυμπάνου (για να μοντελοποιηθεί σε ένα βαθμό και η απόκριση των χειριστών με ενιαίο τρόπο), αυτό δεν περιλαμβάνεται στον υπολογισμό ευαισθησιών και ιδιοτιμών για την ανάλυση ευστάθειας τάσεως στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Η διαφορά αυτή φαίνεται με τη βοήθεια του Σχ. 2.10, όπου απεικονίζεται η χρονική απόκριση του ρεύματος στάτη μιας γεννήτριας με αυτόματο περιοριστή ρεύματος τυμπάνου. Έστω ότι κατά τη χρονική στιγμή t_A το ρεύμα στάτη I_S βρίσκεται πάνω από το αντίστοιχο όριο I_S^{\lim} , συμπληρώνοντας τη χρονική καθυστέρηση που απαιτείται για την ενεργοποίηση του περιοριστή ρεύματος τυμπάνου. Προφανώς από το σημείο αυτό και πέρα για την ανάλυση ευστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα οι εξισώσεις ισορροπίας θα έπρεπε να περιλαμβάνουν και την (2.56), δηλαδή το ρεύμα στο οποίο τείνει ο στάτης μακροπρόθεσμα (μετά το σημείο B).

^{viii}Όπως αναφέρεται και στο Παράρτημα Α, η επιλογή ανάλυσης ευαισθησιών αυξάνει το υπολογιστικό κόστος, καθώς χρειάζεται να υπολογιστεί πλέον σε κάθε βήμα της χρονικής προσομοίωσης ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ εκτός από τον \mathbf{J}_s .



Σχήμα 2.10: Απόκριση ρεύματος στάτη και μακροπρόθεσμη τιμή ισορροπίας για ανάλυση ευστάθειας

Εντούτοις, όπως αναφέρθηκε, στο πρόγραμμα WPSTAB δεν περιλαμβάνεται στην ανάλυση μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης ο αυτόματος περιοριστής ρεύματος τυμπάνου, με αποτέλεσμα, για παράδειγμα, στο σημείο A να μην λαμβάνεται υπόψη ότι μακροπρόθεσμα το ρεύμα θα περιοριστεί και στους σχετικούς υπολογισμούς να χρησιμοποιεί στην ουσία την τιμή I_S^A , που προκύπτει από τις εξισώσεις ισορροπίας των σύγχρονων μηχανών, αντί για την τιμή I_S^{lim} . Η αναντιστοιχία αυτή είναι τόσο πιο μικρή όσο μικρότερη είναι η διαφορά I_S^A και I_S^{lim} .

Το γεγονός αυτό, ειδικά σε κρίσιμες καταστάσεις, που επιβάλλονται διαδοχικές ενεργοποιήσεις του αυτόματου συστήματος προστασίας τυμπάνου, μπορεί να δημιουργήσει μια μικρή αναντιστοιχία στους σχετικούς υπολογισμούς για το σημείο εμφάνισης αστάθειας της μακροπρόθεσμης προσομοίωσης.

2.4.2 Υπολογισμός κρίσιμης ιδιοτιμής

Έστω για λόγους απλότητας πως οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης είναι όλες συνεχείς μεταβλητές. Καθώς στην οιονεί στατική προσέγγιση τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα θεωρούνται πλέον αλγεβρικές μεταβλητές, με βάση αυτά που έχουν αναφερθεί στην Υποεν. 1.1.6, αν τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα είναι ευσταθή και ο αντίστοιχος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_s είναι αντιστρέψιμος, τότε με χρήση του θεωρήματος πεπλεγμένης συνάρτησης μπορεί να οριστούν οι ελαττωμένες μακροπρόθεσμες εξισώσεις κατάστασης, οι οποίες παίρνουν την παρακάτω μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{p}) \quad (2.57)$$

από τις οποίες έχουν απαλειφθεί οι αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών και οι αρχικές αλγεβρικές εξισώσεις του συστήματος.

Σε αυτήν την περίπτωση οι εξισώσεις ισορροπίας των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων είναι οι εξής:

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.58)$$

που είναι ισοδύναμες με:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.59)$$

Ο πίνακας κατάστασης των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων μπορεί να υπολογιστεί από τα στοιχεία του επαυξημένου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ της (2.55) με βάση τη σχέση (1.28), η οποία παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\mathbf{H}_z = \mathbf{h}_z - [\mathbf{h}_x \quad \mathbf{h}_y] \mathbf{J}_s^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_z \\ \mathbf{g}_z \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Όσο ο πίνακας \mathbf{J}_s είναι αντιστρέψιμος, η ορίζουσα του επαυξημένου μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ μπορεί να υπολογιστεί βάση τη σχέση (1.30), η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνει:

$$\det \mathbf{J}_\ell = \det \mathbf{J}_s \det \left\{ [\mathbf{h}_x \quad \mathbf{h}_y] \mathbf{J}_s^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_z \\ \mathbf{g}_z \end{bmatrix} \right\} = \det \mathbf{J}_s \det \mathbf{H}_z \quad (2.61)$$

Δεδομένου ότι αναγκαία συνθήκη εμφάνισης διακλάδωσης σαγματικού κόμβου^{ix} είναι η μη αντιστρεψιμότητα του πίνακα κατάστασης \mathbf{H}_z , συνεπάγεται ότι σε εκείνα τα σημεία ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης \mathbf{H}_z πρέπει να έχει μια μηδενική ιδιοτιμή. Επομένως, μπορεί να υπολογιστεί το σημείο αστάθειας προσδιορίζοντας το σημείο που μια κρίσιμη (πιο κοντά στο μηδέν) ιδιοτιμή μηδενίζεται.

Από τη σχέση (2.61) προκύπτει ότι στα σημεία που ο μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης \mathbf{H}_z είναι μη αντιστρέψιμος και ο μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ είναι μη αντιστρέψιμος, αφού ισχύει:

$$\det \mathbf{H}_z = 0 \Leftrightarrow \det \mathbf{J}_\ell = 0 \quad (2.62)$$

δηλαδή:

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

Επειδή ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_ℓ στηρίζεται στον \mathbf{J}_s , είναι πολύ πιο αραιός^x από τον σχεδόν πλήρη Ιακωβιανό πίνακα κατάστασης \mathbf{H}_z και ως εκ τούτου, είναι πολύ πιο εύκολο υπολογιστικά να προσδιοριστεί σε αυτόν (τον \mathbf{J}_ℓ) η κρίσιμη ιδιοτιμή και τα αντίστοιχα αριστερά και δεξιά ιδιοδιανύσματα. Επομένως αρκεί η επιτήρηση της χρονικής εξέλιξης της κρίσιμης ιδιοτιμής του \mathbf{J}_ℓ για τον προσδιορισμό του σημείου στο οποίο και ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης \mathbf{H}_z έχει μηδενική ιδιοτιμή.

Το πρόγραμμα WPSTAB προσφέρει τη δυνατότητα υπολογισμού της κρίσιμης ιδιοτιμής του πίνακα \mathbf{J}_ℓ και των αντίστοιχων αριστερών και δεξιών ιδιοδιανυσμάτων, σε κάθε βήμα της προσομοίωσης. Ο τρόπος που επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της συγκεκριμένης ιδιοτιμής (και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων) είναι μέσω της μεθόδου των *Ανάστροφων Επαναλήψεων (Inverse Iterations)* που περιγράφεται στο [VV08a, Παρ. 9.5.2]. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τροποποίηση της *μεθόδου των δυνάμεων (power method)* και το πλεονέκτημα της είναι ότι δεν χρειάζεται υπολογισμό όλων των ιδιοτιμών του πίνακα. Αντίθετα υπολογίζει την μικρότερη (κατά απόλυτη τιμή) ιδιοτιμή και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα με επαληθευτικό τρόπο. Η σύγκλιση της είναι αξιόπιστη και γρήγορη.

Η υλοποίηση της μεθόδου των Ανάστροφων Επαναλήψεων για το πρόγραμμα WPSTAB περιγράφεται στη διδακτορική διατριβή [Μαν98, Παράρτημα Γ], ενώ η συσχέτιση των αριστερών και δεξιών ιδιοδιανυσμάτων που αντιστοιχούν στην κρίσιμη ιδιοτιμή του επαυξημένου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ με αυτά του ελαττωμένου μακροπρόθεσμου πίνακα κατάστασης \mathbf{H}_z γίνεται στη διατριβή [Καρ05, Εν. 7.4].

2.4.3 Προσδιορισμός ορίων φόρτισης

Στην παρούσα υιοενότητα δίνεται ο σαφής ορισμός των ορίων φόρτισης, των οποίων η έννοια αναφέρθηκε στην Υποεν. 1.3.4. Επίσης γίνεται συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων τους και του τρόπου γεωμετρικής τους απεικόνισης.

Όπως αναφέρθηκε στην Εν. 2.1, η συμπεριφορά ενός ΣΗΕ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα περιγράφεται από n διαφορικές και αλγεβρικές εξισώσεις της μορφής (2.4). Σε μόνιμη κατάσταση (σημείο μακροπρόθεσμης ισορροπίας) αυτές οι εξισώσεις αντικαθίστανται από αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να γραφούν στη μορφή [VV08a, CC05]^{xi}:

$$\phi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.63)$$

^{ix}Βλ. Υποεν. 1.1.5.

^xΒλ. Υποεν. 2.3.2.

^{xi}Αν και η ανάλυση που θα γίνει αφορά τη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, θα πρέπει να σημειωθεί πως η σχέση (2.63) είναι γενική και μπορεί να προσεγγίσει και το βραχυπρόθεσμο σύστημα αν ληφθούν υπόψη μόνο οι εξισώσεις ισορροπίας στην βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (2.4α) και (2.4β), με τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης θεωρούμενες σταθερές παραμέτρους.

όπου $\phi^T = [\mathbf{h}^T \quad \mathbf{f}^T \quad \mathbf{g}^T]$ το διάνυσμα με τις n εξισώσεις ισορροπίας, $\mathbf{u}^T = [\mathbf{z}^T \quad \mathbf{x}^T \quad \mathbf{y}^T]$ το $n \times 1$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης και των αλγεβρικών μεταβλητών και τέλος, \mathbf{p} το διάνυσμα που περιλαμβάνει τις n_p παραμέτρους του συστήματος.

Είναι σύνηθες στα ΣΗΕ παράμετροι \mathbf{p} να θεωρούνται οι αλγεβρικές μεταβλητές ζήτησης των φορτίων (βλ. Υποεν. 2.2.7). Με αυτήν την παραδοχή, τα όρια φόρτισης ενός ΣΗΕ ορίζονται σαν τα σημεία πέρα από το οποία η αύξηση της ζήτησης έχει σαν συνέπεια να μην υπάρχουν λύσεις του συστήματος (2.63). Συνεπώς, ο μαθηματικός του ορισμός έγκειται στον προσδιορισμό του μεγίστου μιας βαθμωτής συνάρτησης $\zeta(\mathbf{p})$ των παραμέτρων, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι αλγεβρικές μεταβλητές ζήτησης των φορτίων του συστήματος, υπό τους περιορισμούς των εξισώσεων ισορροπίας (2.63), με μόνη απαίτηση η συνάρτηση ζ να μην έχει μέγιστο χωρίς περιορισμούς [MV00]. Πρόκειται δηλαδή για πρόβλημα βελτιστοποίησης, του οποίου ο μαθηματικός ορισμός είναι:

$$\max \{ \zeta(\mathbf{p}) : \phi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \} \quad (2.64)$$

Θεωρώντας τη Λαγκρανζιανή του προβλήματος:

$$\mathcal{L} = \zeta(\mathbf{p}) + \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad (2.65)$$

όπου \mathbf{w} είναι το διάνυσμα των n πολλαπλασιαστών Λαγκράνζ, οι αναγκαίες συνθήκες Kuhn-Tucker για το πρόβλημα βελτιστοποίησης (2.64) είναι:

$$\nabla_{\mathbf{w}} \mathcal{L} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \phi(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.66\alpha)$$

$$\nabla_{\mathbf{p}} \mathcal{L} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \nabla_{\mathbf{p}} \zeta + \phi_{\mathbf{p}}^T \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad (2.66\beta)$$

$$\nabla_{\mathbf{u}} \mathcal{L} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \phi_{\mathbf{u}}^T \mathbf{w} = \mathbf{0} \quad (2.66\gamma)$$

όπου $\phi_{\mathbf{u}}^{\text{xii}}$, $\phi_{\mathbf{p}}$ οι Ιακωβιανοί πίνακες των εξισώσεων ισορροπίας ϕ ως προς τις μεταβλητές \mathbf{u} και τις παραμέτρους \mathbf{p} αντίστοιχα και $\nabla_{\mathbf{p}} \zeta$ η κλίση της συνάρτησης ζ ως προς τις παραμέτρους \mathbf{p} .

Η πρώτη συνθήκη προφανώς αντιστοιχεί στις συνθήκες ισορροπίας (2.63). Καθώς υπάρχει η απαίτηση η ζ να μην έχει μέγιστο χωρίς περιορισμούς, συνεπάγεται ότι $\nabla_{\mathbf{p}} \zeta \neq \mathbf{0}$. Επομένως από την (2.66β) προκύπτει ότι δεν μπορεί να είναι μηδέν όλοι οι πολλαπλασιαστές Λαγκράνζ, δηλαδή $\mathbf{w} \neq \mathbf{0}$. Αυτό όμως οδηγεί στο συμπέρασμα από την (2.66γ) ότι ο Ιακωβιανός πίνακας $\phi_{\mathbf{u}}$ σε αυτό το σημείο δεν μπορεί να αντιστραφεί και επομένως έχει μηδενική ορίζουσα:

$$\det \phi_{\mathbf{u}} = 0 \quad (2.67)$$

Ως εκ τούτου, η συνθήκη (2.66γ) σημαίνει ότι ο πίνακας $\phi_{\mathbf{u}}$ έχει μηδενική ιδιοτιμή στο όριο φόρτισης και το \mathbf{w} είναι το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή. Η ανωτέρω αναγκαία συνθήκη (2.67) ταυτίζεται με την αναγκαία συνθήκη διακλάδωσης σαγματικού κόμβου των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων που αναφέρθηκε στην Υποεν. 2.4.2, επομένως γενικά [VV08a]:

τα μακροπρόθεσμα όρια φόρτισης αντιστοιχούν σε σημεία διακλάδωσης σαγματικού κόμβου των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Όπως τονίστηκε στην αρχή της ενότητας, όλα όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής αφορούν την περίπτωση που οι συναρτήσεις ϕ είναι ομαλές, οπότε και το αντίστοιχο μοντέλο ονομάζεται *ομαλό*, δηλαδή χωρίς ασυνέχειες. Ωστόσο, καθώς σε ένα ΣΗΕ οι συγκεκριμένες συναρτήσεις παρουσιάζουν ασυνέχειες

^{xii} Δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα ο $\phi_{\mathbf{u}}$ αντιστοιχεί στο μακροπρόθεσμο Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{J}_ℓ της σχέσης (2.55). Ως εκ τούτου, στη συνέχεια της διατριβής οι όροι $\phi_{\mathbf{u}}$ και \mathbf{J}_ℓ θα χρησιμοποιούνται εξίσου για να δηλώσουν το μακροπρόθεσμο Ιακωβιανό πίνακα, εκτός αν δηλωθεί διαφορετικά.

που οφείλονται σε διακριτές μεταβολές (π.χ. μεταγωγή μιας γεννήτριας από APT σε ΣΠΥ) και τα όρια φόρτισης να οφείλονται σε ανισωτικούς περιορισμούς [VV08a]. Σε αυτά τα όρια φόρτισης, το σύνολο των εξισώσεων (2.63) προσαυξάνεται τοπικά κατά τον αριθμό των εξισώσεων μεταγωγής και το αντίστοιχο μοντέλο ονομάζεται *μοντέλο μεταγωγής* [Καρ05]. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο πίνακας $\phi_{\mathbf{u}}$ μπορεί να είναι αντιστρέψιμος και επομένως δεν υπάρχει διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Ακόμα και έτσι όμως, σε αυτά τα όρια φόρτισης η ευστάθεια του συστήματος αλλάζει δραματικά. Στη συνέχεια της διατριβής και για ευκολία στην παρουσίαση των ποιοτικών αποτελεσμάτων θα γίνεται αναφορά μόνο στο ομαλό μοντέλο, εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά.

Καθώς ένα σύστημα μπορεί να φτάσει σε κάποιο όριο φόρτισης με πολλούς τρόπους, καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί και σε διαφορετική βαθμωτή συνάρτηση ζ , δηλαδή σε διαφορετικό συνδυασμό των παραμέτρων, το σύνολο όλων των σημείων ορίων φόρτισης, αποτελεί την *επιφάνεια ορίων φόρτισης* στον χώρο των παραμέτρων (που ταυτίζεται για το ομαλό μοντέλο με την επιφάνεια διακλάδωσης σαγματικού κόμβου).

Ο κατάλληλος χώρος για την παράσταση αυτών των επιφανειών είναι ο χώρος των ανεξάρτητων αλγεβρικών παραμέτρων ζήτησης \mathbf{p} . Ωστόσο, στην ανάλυση ΣΗΕ είναι συνήθης πρακτική ένα σημείο λειτουργίας να χαρακτηρίζεται με όρους φορτίου σε MW ή MVA, επομένως ο χώρος που χρησιμοποιείται συνήθως είναι αυτός της ενεργού και άεργου ισχύος των φορτίων που καλείται και χώρος φορτίων. Αν θεωρηθεί ότι τα φορτία αποκαθιστούν την ονομαστική τους ζήτηση (είτε λόγω εγγενών μηχανισμών, είτε λόγω λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ) που είναι κάτι σύννηθες στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, τότε οι ισχύεις των φορτίων είναι ανεξάρτητες παράμετροι ο αντίστοιχος χώρος των φορτίων ταυτίζεται με τον χώρο των παραμέτρων. Δηλαδή ισχύει;

$$\mathbf{p}^T = [\mathbf{P}^T \quad \mathbf{Q}^T] \quad (2.68)$$

Στην πράξη πολλές φορές δεν ενδιαφέρει μόνο το όριο φόρτισης αλλά δεδομένου ενός σημείου λειτουργίας η απόσταση του σημείου αυτού από την καμπύλη ορίων φόρτισης και ειδικότερα η μικρότερη (ευκλείδεια) απόσταση, η οποία αποτελεί και το *περιθώριο φόρτισης* του συστήματος, το οποίο θα οριστεί στη συνέχεια.

Έστω μια επιφάνειας ορίων φόρτισης Σ στο επίπεδο δύο ανεξάρτητων παραμέτρων (φορτίων) p_1 και p_2 , όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11. Θεωρώντας ότι το σύστημα βρίσκεται αρχικά στο σημείο λειτουργίας O , τότε τα διανύσματα \mathbf{d}_1 , \mathbf{d}_2 και \mathbf{d}_3 , απεικονίζουν τρεις διαφορετικές κατευθύνσεις μεταβολής των παραμέτρων, καθένα από τα οποία θα δώσει και διαφορετικό περιθώριο φόρτισης, το οποίο συμβολίζεται μ^* . Ουσιαστικά πρόκειται για την απόσταση του σημείου λειτουργίας O , από την επιφάνεια ορίων φόρτισης που προκύπτει από συγκεκριμένη κατεύθυνση μεταβολής \mathbf{d}_i ($i = 1, 2, 3$) των παραμέτρων στον αντίστοιχο χώρο.

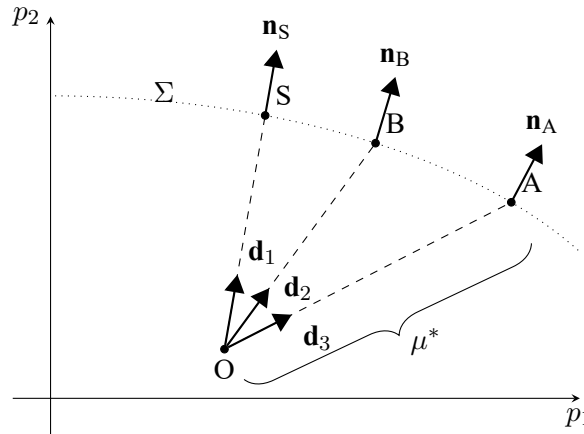
Για τον υπολογισμό αυτής της απόστασης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [DL93, ADH94, Καρ05] διάφορες νόρμες, όπως οι νόρμες L_1 , L_2 και L_∞ . Ειδικά για την περίπτωση φορτίων σταθερής ισχύος το περιθώριο φόρτισης μ^* αντιστοιχεί σε ισχύ (MW) και ονομάζεται περιθώριο ισχύος.

Με μαθηματικούς όρους, θεωρώντας ως κατεύθυνση μεταβολής των ανεξάρτητων παραμέτρων μια κατεύθυνση \mathbf{d} , το περιθώριο φόρτισης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p}_o + \mu^* \mathbf{d} \quad (2.69)$$

όπου \mathbf{p}_o το διάνυσμα των αρχικών τιμών των παραμέτρων, \mathbf{p}^* το διάνυσμα των παραμέτρων στο όριο φόρτισης, \mathbf{d} η δεδομένη κατεύθυνση μεταβολής των παραμέτρων και μ^* το περιθώριο φόρτισης για τη δεδομένη κατεύθυνση \mathbf{d} .

Στο Σχ. 2.11 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



Σχήμα 2.11: Επιφάνεια ορίων φόρτισης και κάθετο διάνυσμα

εκείνο το οποίο είναι κάθετο στο εφαπτόμενο υπερεπίπεδο που διέρχεται από το σημείο αυτό της επιφάνειας ορίων φόρτισης. Αποδεικνύεται ότι στην περίπτωση του ομαλού μοντέλου, το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια ορίων φόρτισης δίνεται από την παρακάτω σχέση [VV08a]:

$$\mathbf{n} = \phi_{\mathbf{p}}^T \mathbf{w} \quad (2.70)$$

όπου ϕ ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος ως προς τις παραμέτρους και \mathbf{w} το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στη μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα $\phi_{\mathbf{u}}$.

Το κάθετο διάνυσμα παρέχει έναν τρόπο για να προσδιοριστεί η “πλησιέστερη απόσταση” ενός σημείου στο χώρο των παραμέτρων από την επιφάνεια ορίων φόρτισης. Θεωρώντας για παράδειγμα το σημείο S, στο Σχ. 2.11, η κατεύθυνση φόρτισης \mathbf{d}_1 , που εφαρμόζεται για να φτάσει το σύστημα σε αυτό το σημείο, είναι συγγραμμική με το κάθετο διάνυσμα \mathbf{n}_S της επιφάνειας ορίων φόρτισης σε αυτό το σημείο. Επομένως, το σημείο S, της επιφάνειας Σ είναι το πιο κοντινό σημείο στο O, υπό την έννοια της ευκλείδειας απόστασης:

$$\|\mathbf{p} - \mathbf{p}_o\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} (p_i - p_{o,i})^2} \quad (2.71)$$

Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (π.χ. όταν η ζήτηση βρεθεί εκτός ορίων φόρτισης) η απόσταση αυτή αντιστοιχεί στο ελάχιστο μέγεθος διορθωτικών κινήσεων που απαιτούνται ώστε να αποκατασταθεί η ευσταθής λειτουργία του συστήματος.

Όπως αναφέρθηκε και στην Υποεν. 2.4.2 το WPSTAB παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της κρίσιμης ιδιοτιμής και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων. Συνεπώς στο σημείο που μηδενίζεται η κρίσιμη ιδιοτιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί το αριστερό ιδιοδιάνυσμα για τον υπολογισμό του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια ορίων φόρτισης. Ο τρόπος που χρησιμοποιείται το διάνυσμα αυτό για τον προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής φορτίου θα περιγραφεί στην Παρ. 5.2.4.2.

2.4.4 Υπολογισμός ευαισθησιών

Έστω ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ικανοποιώντας τις εξισώσεις (2.63) και μια ποσότητα $\eta(\mathbf{u}, \mathbf{p})$ που είναι συνάρτηση των μεταβλητών \mathbf{u} και των παραμέτρων \mathbf{p} . Αν συμβεί μια μικρή αλλαγή στις παραμέτρους \mathbf{p} το σύστημα θα ισορροπήσει σε ένα άλλο σημείο το οποίο θα ικανοποιεί και πάλι την (2.63), ενώ και η ποσότητα η θα μεταβληθεί και

αυτή. Για μια μικρή μεταβολή στο \mathbf{p} ορίζεται η ευαισθησία $S_{\eta p_i}$ της ποσότητας η ως προς κάθε μεταβλητή p_i του \mathbf{p} ως εξής:

$$S_{\eta p_i} = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\Delta \eta}{\Delta p_i} \quad i = 1, \dots, n_p \quad (2.72)$$

Αποδεικνύεται ότι η ευαισθησία (2.72) είναι το i -στό στοιχείο του διανύσματος ευαισθησιών $\mathbf{S}_{\eta \mathbf{p}}$, το οποίο ορίζεται από την ακόλουθη σχέση [VV08a]:

$$\mathbf{S}_{\eta \mathbf{p}} = \nabla_{\mathbf{p}} \eta - \phi_{\mathbf{p}}^T (\phi_{\mathbf{u}}^T)^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} \eta \quad (2.73)$$

Χρησιμοποιώντας τον Ιακωβιανό πίνακα $\phi_{\mathbf{u}}$, η σχέση 2.73 μπορεί να αναλυθεί με τη βοήθεια των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων του $\phi_{\mathbf{u}}$, με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{S}_{\eta \mathbf{p}} = \nabla_{\mathbf{p}} \eta - \phi_{\mathbf{p}}^T \left[\sum_{i=1}^n \frac{\mathbf{w}_i \mathbf{v}_i^T}{\lambda_i} \right] \nabla_{\mathbf{u}} \eta \quad (2.74)$$

όπου λ_i η ιδιοτιμή i του Ιακωβιανού πίνακα $\phi_{\mathbf{u}}$ και $\mathbf{v}_i, \mathbf{w}_i$ το δεξί και αριστερό διάνυσμα αντίστοιχα που αντιστοιχούν στην ιδιοτιμή λ_i ^{xiii}.

Όπως αναφέρθηκε και στην Υποεν. 2.4.3, όταν ένα όριο φόρτισης είναι ταυτόχρονα και διακλάδωση σαγματικού κόμβου, το μοντέλο που περιγράφει το σύστημα μέσω των εξισώσεων (2.63) ονομάζεται ομαλό και ο αντίστοιχος Ιακωβιανός πίνακας $\phi_{\mathbf{u}}$ είναι μη αντιστρέψιμος, έχει δηλαδή μια μηδενική ιδιοτιμή. Σε αυτά τα σημεία οι ευαισθησίες της σχέσης (2.74) αλλάζουν πρόσημο μέσω του απείρου. Στην περίπτωση του μοντέλου μεταγωγής ωστόσο, οι ευαισθησίες δεν απειρίζονται, αντίθετα αλλάζουν πρόσημο αφού πρώτα έχουν λάβει μια πολύ μεγάλη τιμή [VV08a, Καρ05].

Επομένως, κατά τη χρονική προσομοίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησιών για τον προσδιορισμό του ορίου φόρτισης. Όπως έχει αποδειχθεί στο [CC05] μια ευαισθησία κατάλληλη για τον προσδιορισμό της αστάθειας, η οποία αλλάζει πρόσημο είτε μέσω απείρου είτε μέσω μιας μεγάλης θετικής τιμής όταν το σύστημα πέφτει σε αστάθεια, είναι αυτή που προκύπτει αν το η επιλεγεί να αντιπροσωπεύει τη συνολική άεργο παραγωγή Q_g των γεννητριών και παράμετροι \mathbf{p} τα άεργα φορτία του συστήματος. Η συγκεκριμένη ευαισθησία ορίζεται από την ακόλουθη σχέση [GV09a]:

$$\mathbf{S}_{Q_g \mathbf{Q}} = \frac{\theta Q_g}{\theta \mathbf{Q}} = -\phi_{\mathbf{Q}}^T (\phi_{\mathbf{u}}^T)^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} Q_g \quad (2.75)$$

όπου $\mathbf{Q} = [Q_1 \dots Q_{N_\ell}]^T$ το $N_\ell \times 1$ διάνυσμα των άεργων φορτίων που αντιστοιχεί στους N_ℓ ζυγούς φορτίου του συστήματος.

Παρατηρώντας τη χρονική εξέλιξη των ευαισθησιών $\mathbf{S}_{Q_g \mathbf{Q}}$, το πρόγραμμα WPSTAB μπορεί να προσδιορίσει το σημείο αστάθειας παρατηρώντας τη χρονική εξέλιξη τους και σημαίνοντας σχετικό συναγερό όταν αλλάξουν πρόσημο^{xiv}.

^{xiii} Η σχέση (2.74) ισχύει εφόσον ο πίνακας $\phi_{\mathbf{u}}$ είναι αντιστρέψιμος και έχει διακριτές ιδιοτιμές $\lambda_i, i = 1, \dots, n$ με $\lambda_i \neq \lambda_j, i \neq j$.

^{xiv} Βλ. Εν. Α.4 στο Παράρτημα Α.

Κεφάλαιο 3

Ανίχνευση αστάθειας τάσης

Στόχος ενός συστήματος προστασίας είναι γενικά η εφαρμογή εκείνων των μέτρων που σε μη φυσιολογικές καταστάσεις είναι απαραίτητα για την διατήρηση της συνοχής και ικανοποιητικής λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Όπως αναφέρεται και στην Εν. 1.6, τα συστήματα προστασίας μπορούν να ενταχθούν, με βάση τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά σε διάφορες κατηγορίες. Ως εκ τούτου, μπορούν να χωριστούν σε συστήματα προστασίας λογικών κανόνων και σε αλγοριθμικά συστήματα προστασίας.

Όπως υπονοεί και το όνομα τους, στην πρώτη κατηγορία ανήκουν συστήματα προστασίας που εφαρμόζουν διορθωτικά μέτρα με χρήση λογικών κανόνων, π.χ. σύγκριση τάσεων με ένα κατώφλι για την εφαρμογή αποκοπής φορτίου, τα οποία είναι απλά στην υλοποίηση και ευρέως χρησιμοποιούμενα. Αντίθετα, στην περίπτωση των αλγοριθμικών συστημάτων προστασίας γίνονται πιο σύνθετες αναλύσεις που σχετίζονται με την κατάσταση του συστήματος, για τον προσδιορισμό του σωστού σημείου εφαρμογής διορθωτικών μέτρων.

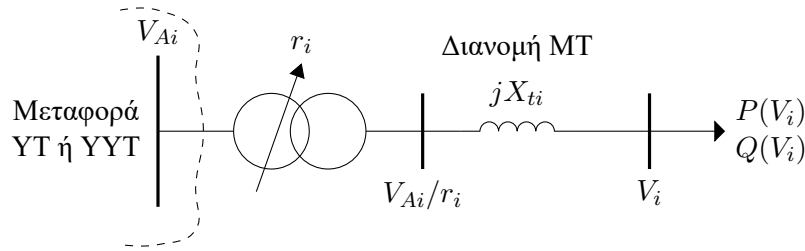
Συνεπώς, στα πλαίσια της σχεδίασης ενός νέου συστήματος προστασίας από μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης που θα υπολογίζει σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του συστήματος, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μεθόδων έγκαιρης και έγκυρης ανίχνευσης της εν λόγω αστάθειας.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται ανάλυση και παρουσίαση των δύο μεθόδων ανίχνευσης στάθειας τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο υπόλοιπο της διατριβής. Συγκεκριμένα, στην Εν. 3.1 περιγράφεται η τοπική μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας τάσης πραγματικού χρόνου με το ακρωνύμιο LIVES (Local Identification of Voltage Emergency Situations), που στηρίζεται σε τοπικές μετρήσεις στους μετασχηματιστές με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο ΣΑΤΥΦ, ενώ στην Εν. 3.2 γίνεται η ανάπτυξη μιας εναλλακτικής μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας που στηρίζεται σε απλές μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος από ένα ζυγό μεταφοράς. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανίχνευσης αποτελεί μέρος της δημοσίευσης [VLM16], που έγινε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

3.1 Ανίχνευση αστάθειας τάσης με επιτήρηση ΣΑΤΥΦ

Η μέθοδος LIVES παρουσιάστηκε αρχικά στο [VS07] και βασίζεται στην παρακολούθηση της ρυθμιζόμενης δευτερεύουσας τάσης των ΣΑΤΥΦ που βρίσκονται εγκατεστημένα στους μετασχηματιστές υποβιβασμού των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ. Όπως έχει εξηγηθεί στα [VS07, VV08b, VSC08, VS08, Σακ10], όταν η τάση αυτή παραμένει κάτω από την νεκρή ζώνη του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ, ενώ το τελευταίο προσπαθεί να την ελέγξει, αποτελεί ένδειξη αστάθειας τάσης και επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σήμανση σχετικού συναγερμού.

Στη συνέχεια της παρούσας ενότητας γίνεται περιγραφή της μεθόδου LIVES με βάση την ακόλουθη διάρθρωση: Στην υποενότητα 3.1.1 γίνεται μια αναφορά στις βασικές υποθέσεις μοντελοποίησης των



Σχήμα 3.1: Μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ που τροφοδοτεί φορτίο ευαίσθητο ως προς την τάση

ΣΗΕ στα οποίο ο βασικός δυναμικός μηχανισμός στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι αυτός των ΣΑΤΥΦ, ούτως ώστε να εξαχθεί η ικανή συνθήκη ευστάθειας αυτών των συστημάτων, ενώ στην υποενότητα 3.1.2 παρουσιάζεται η μέθοδος LIVES η οποία περιλαμβάνει απευθείας εφαρμογή της θεωρίας και εφαρμογή φιλτραρίσματος για την εξάλειψη θορύβου μέτρησης και μεταβατικών φαινομένων.

3.1.1 Παραδοχές και ικανή συνθήκη ευστάθειας

Για την ανάλυση των κριτηρίων ευστάθειας θεωρείται ένα ΣΗΕ, του οποίου οι δυναμικοί μηχανισμοί στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι μόνο αυτοί των ΣΑΤΥΦ. Η δομή των φορτίων που θεωρούνται εξαρτημένα από την τάση και είναι συνδεδεμένα στον i -οστό ζυγό ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στο Σχ. 3.1. Εφόσον για την ανάλυση της ευστάθειας χρησιμοποιείται η οιονεί στατική προσέγγιση, όλα τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα θεωρούνται ότι βρίσκονται σε ισορροπία.

Έστω ότι υπάρχουν m μετασχηματιστές εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ, που ελέγχουν αντίστοιχους ζυγούς με φορτία. Οι μηχανισμοί των ΣΑΤΥΦ είναι διακριτοί με μια νεκρή ζώνη γύρω από μια τάση αναφοράς. Ως εκ τούτου, σε κάθε περίοδο λειτουργίας T_i , ο i -οστός λόγος μετασχηματισμού αλλάζει σύμφωνα με τις εξισώσεις διαφορών (2.44) που έχουν περιγραφεί στην Υποεν. 2.2.8 και στην συγκεκριμένη περίπτωση παίρνουν την εξής ισοδύναμη μορφή:

$$r_i(kT_i) = r_i[(k-1)T_i] + \Delta r \quad (3.1)$$

$$\Delta r = \begin{cases} \Delta s_i & \text{αν } V_i > V_i^{\max} \text{ \& } r_i < r_i^{\max} \\ -\Delta s_i & \text{αν } V_i < V_i^{\min} \text{ \& } r_i > r_i^{\min} \\ 0 & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.2)$$

όπου V_i^{\min} & V_i^{\max} το κάτω και άνω όριο της νεκρής ζώνης του i -οστού ΣΑΤΥΦ, Δs_i η μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού και r_i^{\min} & r_i^{\max} το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα των μεταβλητών λήψεων του ΣΑΤΥΦ.

Για λόγους απλοποίησης, μπορεί να υποθεθεί ότι όλα τα ΣΑΤΥΦ έχουν το ίδιο βήμα και περίοδο λειτουργίας, δηλαδή ισχύει [VV08b]:

$$\Delta s_i = \Delta s, T_i = T \quad \text{για κάθε } i = 1, \dots, m \quad (3.3)$$

ενώ, η γενική περίπτωση με διαφορετικά βήματα και περιόδους λειτουργίας για κάθε ΣΑΤΥΦ μπορεί να αντιμετωπιστεί όπως στο [VS06].

Η ευστάθεια του διακριτού συστήματος συνδέεται με τον Ιακωβιανό πίνακα \mathbf{A} των ελεγχόμενων τάσεων ως προς τις αλλαγές των ΣΑΤΥΦ, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \theta V_i \\ \theta r_j \end{bmatrix}, i, j = 1, \dots, m \quad (3.4)$$

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα \mathbf{A} , η μεταβολή των ελεγχόμενων τάσεων μετά από κάθε αλλαγή του εκάστοτε ΣΑΤΥΦ, στην k – οστή περίοδο λειτουργίας δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta \mathbf{V}^k = \mathbf{A} \Delta \mathbf{r}^k \quad (3.5)$$

όπου $\Delta \mathbf{V}^k$ το διάνυσμα μεταβολών των μέτρων των τάσεων και $\Delta \mathbf{r}^k$ το διάνυσμα των λόγων μεταβολής των ΣΑΤΥΦ, το οποίο καθορίζεται από την (3.1).

Η ευστάθεια του γραμμικοποιημένου διακριτού συστήματος που περιγράφεται από την (3.5) είναι εγγυημένη όταν όλα τα σφάλματα (αποστάσεις από τις αντίστοιχες νεκρές ζώνες) βγαίνουν μειούμενα σε απόλυτες τιμές, σε κάθε περίοδο λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ [MIC87]. Μια *αναγκαία συνθήκη*, για να συμβεί κάτι τέτοιο, είναι όλα τα διαγώνια στοιχεία α_{ii} του πίνακα \mathbf{A} να είναι αρνητικά, ούτως ώστε σε κάθε αλλαγή των αντίστοιχων ΣΑΤΥΦ και τη μείωση του λόγου μετασχηματισμού, οι δευτερεύουσες τάσεις να αυξάνουν. Η συνθήκη αυτή όμως δεν είναι και ικανή, δεδομένου ότι η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ στους άλλους ζυγούς μπορεί να οδηγήσει σε αντίστροφα αποτελέσματα. Αν ωστόσο ο πίνακας \mathbf{A} έχει *αυστηρή διαγώνια κυριαρχία*, με τα διαγώνια στοιχεία αρνητικά, τότε η διόρθωση του σφάλματος που επιτυγχάνεται από το ΣΑΤΥΦ που είναι συνδεδεμένο στον ίδιο ζυγό i δεν μπορεί να αντισταθμιστεί από τις κινήσεις των υπόλοιπων. Ως εκ τούτου, προκύπτει η *ικανή συνθήκη ευστάθειας* [MIC87]:

$$\alpha_{ii} + \sum_{j \neq i} |\alpha_{ij}| < 0 \quad (3.6)$$

Η ικανή συνθήκη ευστάθειας (3.6), εκτός από το γραμμικοποιημένο διακριτό σύστημα, είναι επίσης ικανή συνθήκη και για το συνεχές σύστημα $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, με πίνακα κατάστασης \mathbf{A} , αφού σύμφωνα με το θεώρημα του Gershgorin [Jen77], *οι ιδιοτιμές του συνεχούς συστήματος βρίσκονται μέσα σε δίσκους με κέντρο τα διαγώνια στοιχεία και ακτίνα ίση με το άθροισμα των απολύτων τιμών των στοιχείων της γραμμής*. Συνεπώς, όταν η (3.6) ισχύει, όλες οι ιδιοτιμές και του οιονεί συστήματος (3.5) δεν μπορούν να είναι μηδενικές ή θετικές.

Ποιοτικά αυτό που συμβαίνει σε ένα σύστημα εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, είναι ότι ενώ το κάθε ΣΑΤΥΦ βελτιώνει το προφίλ της αντίστοιχης ελεγχόμενης από αυτό τάσης, ταυτόχρονα επιδρά αρνητικά στους κοντινούς ζυγούς, καθώς αποκαθιστώντας την τάση, ουσιαστικά επαναφέρει και την κατανάλωση ισχύος. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της ροής ισχύος προς τον ελεγχόμενο ζυγό, που οδηγεί σε μείωση της τάσης στο επίπεδο της μεταφοράς, συμπαρασύροντας με αυτόν τον τρόπο και τις τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς της διανομής, των οποίων τα αντίστοιχα ΣΑΤΥΦ, λόγω ετεροχρονισμού, δεν ενεργοποιήθηκαν.

Ως εκ τούτου, αν θεωρηθούν μη χωρητικά φορτία, που είναι ο κανόνας στα πραγματικά ΣΗΕ, υπάρχει αρνητική επίδραση των άλλων ΣΑΤΥΦ στην τάση του εξεταζόμενου ζυγού και τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα ευαισθησιών \mathbf{A} θα είναι θετικά. Ισχύει δηλαδή σε αυτήν περίπτωση:

$$\alpha_{ij} = \left(\frac{\Delta V_i}{\Delta r_j} \right) > 0 \quad (3.7)$$

και συνεπώς στην (3.6) μπορούν να παραλειφθούν οι απόλυτες τιμές.

Υποθέτοντας ότι αρχικά, μετά από μια σοβαρή διαταραχή, όλες οι τάσεις διανομής (τουλάχιστον στην περιοχή ενδιαφέροντος) είναι κάτω από τις νεκρές ζώνες, όλα τα ΣΑΤΥΦ της περιοχής αυτής θα αντιδράσουν, μειώνοντας τον λόγο μετασχηματισμού τους κατά Δs στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές kT . Η αλλαγή αυτή των ΣΑΤΥΦ θα προκαλέσει μεταβολή στις ελεγχόμενες δευτερεύουσες τάσεις, η οποία μεταβολή μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\Delta V_i^k = -\Delta s \sum_j a_{ij} = -\Delta s \left[a_{ii} + \sum_{j \neq i} a_{ij} \right] \quad (3.8)$$

Η ομοιότητα στο δεύτερο σκέλος της (3.8) με την ικανή συνθήκη ευστάθειας (3.6), μετά την απαλοιφή των απόλυτων τιμών, υποδεικνύει ότι η μεταβολή της τάσης του ελεγχόμενου από ΣΑΤΥΦ ζυγού θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παρακολουθήσει κανείς την ευστάθεια του συστήματος ή τουλάχιστον την ικανή συνθήκη. Συνεπώς, η ικανή συνθήκη ευστάθειας μπορεί να πάρει την εξής ισοδύναμη μορφή:

$$\alpha_{ii} + \sum_{j \neq i} \alpha_{ij} = -\frac{\Delta V_i^k}{\Delta s} < 0 \quad (3.9)$$

Επειδή από τον ορισμό της μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού ισχύει ότι $\Delta s > 0$, ενώ σε κάθε χρονική στιγμή T_k η μεταβολή της τάσης ΔV_i^k του i – οστού ζυγού διανομής δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V_i^k = V_i(kT_i) - V_i[(k-1)T_i] \quad (3.10)$$

συνεπάγεται πως η ικανή συνθήκη ευστάθειας μπορεί να πάρει την ακόλουθη τελική μορφή [VV08b]:

$$\Delta V_i^k = V_i(kT_i) - V_i[(k-1)T_i] > 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3.11)$$

Παραβίαση της σχέσης (3.11) είναι μια ένδειξη για επερχόμενη αστάθεια τάσης. Ο έλεγχος για την ικανοποίηση της σχέσης αυτής μπορεί να γίνει τοπικά σε κάθε ζυγό εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, ενώ η παραβίαση της αφορά όλο το σύστημα (τοπική ανίχνευση, γενικευμένη αστάθεια).

3.1.2 Μέθοδος LIVES

Η μέθοδος *LIVES* βασίζεται ακριβώς στην παραβίαση της ικανής συνθήκης ευστάθειας τάσης, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα, μέσω της παρακολούθησης της δευτερεύουσας (ελεγχόμενης) τάσης των ΣΑΤΥΦ, σημαίνοντας συναγερμό όταν οι τάσεις αυτές περάσουν μια μέγιστη τιμή ενώ εξακολουθούν να βρίσκονται κάτω από τη νεκρή ζώνη. Έχουν προταθεί δύο διαδικασίες ανίχνευσης [VV08b]. Η πρώτη βασίζεται στην απευθείας εφαρμογή της ικανής συνθήκης ευστάθειας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα προβλήματα υλοποίησης σε πραγματικά συστήματα και κυρίως αυτά που έχουν να κάνουν με την ύπαρξη θορύβου μέτρησης και επίδρασης άλλων μεταβατικών φαινομένων, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Ο δεύτερος τρόπος αντίθετα, περιλαμβάνει φιλτράρισμα μέσω της κίνησης κινητών μέσων όρων των τάσεων, ο οποίος όπως θα αποδειχθεί ισοδυναμεί με την ικανή συνθήκη ευστάθειας.

Τόσο στην πρώτη όσο και στην δεύτερη εφαρμογή, η λογική της μεθόδου *LIVES* είναι πολύ απλή και τα μόνα που απαιτούνται είναι το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ να είναι ενεργό, δηλαδή να μην έχει φτάσει τα όρια μεταβλητών του λήψεων και η ελεγχόμενη τάση να είναι κάτω από τη νεκρή ζώνη. Σε περίπτωση που μετά την αλλαγή του λόγου του ΣΑΤΥΦ η δευτερεύουσα τάση αποκατασταθεί, η *LIVES* επαναφέρεται (reset), ενώ αν το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ εξαντλήσει όλες τις μεταβλητές του λήψει η ανίχνευση καθίσταται ανενεργή.

3.1.2.1 Άμεση σύγκριση τάσεων

Ο πρώτος αλγόριθμος της μεθόδου *LIVES* στηρίζεται στην υπόθεση της άμεσης και ακριβούς μέτρησης των μεταβολών των τάσεων ΔV_i^k , όπως ορίστηκαν στη σχέση (3.5). Σε αυτήν την περίπτωση η δευτερεύουσα τάση των ΣΑΤΥΦ μετράται μετά από κάθε αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού και συγκρίνεται με την τιμή μετά την προηγούμενη αλλαγή βάσει της σχέσης:

$$\Delta V_i^k = V_i(kT_i) - V_i[(k-1)T_i] \quad (3.12)$$

Αν όλα τα ΣΑΤΥΦ έχουν περίπου την ίδια χρονική καθυστέρηση και κανένα άλλο γεγονός που να έχει επίδραση στα προφίλ των τάσεων δεν συνέβη στο ενδιάμεσο χρονικό διάστημα, μια πτώση τάσης

ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αλλαγές του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ σημαίνει ότι το άθροισμα των στοιχείων της σειράς του αντίστοιχου πίνακα Λ πέρασε από το μηδέν (έγινε δηλαδή θετικό) και ως εκ τούτου, η ικανή συνθήκη ευστάθειας (3.11) έπαψε να ισχύει.

Παρόλα αυτά σε ένα πραγματικό σύστημα άλλα γεγονότα (όπως για παράδειγμα η ενεργοποίηση ενός συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης σε κάποια γεννήτρια) μπορούν στο μεσοδιάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών αλλαγών των ΣΑΤΥΦ να οδηγήσουν σε πτώση τάσης που δεν είναι αποτέλεσμα της ίδιας τους της κίνησης. Ως εκ τούτου, πριν τη σήμανση συναγερού, με αυτήν την άμεση μέθοδο κατά την οποία δεν εφαρμόζεται κάποιο φίλτρο, απαιτείται για λόγους ασφαλείας για τη σήμανση συναγερού η τάση να ελαττώνεται δύο φορές, δηλαδή μετά από δυο διαδοχικές αλλαγές του ΣΑΤΥΦ.

Για την εξάλειψη της επίδρασης των μεταβατικών φαινομένων και της ανακρίβειας των μετρήσεων (λόγω θορύβου) αντί για την χρήση της άμεσης σύγκρισης των τάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο που εξαλείφει αυτά τα προβλήματα, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη παράγραφο.

3.1.2.2 Φίλτρο κινητού μέσου όρου

Λόγω των προβλημάτων που αναφέρθηκαν σε σχέση με την άμεση σύγκριση τάσεων έχει προταθεί και ένας δεύτερος τρόπος ανίχνευσης της πιθανής αστάθειας τάσης με χρήση του κινητού μέσου όρου των τάσεων, όπως έχει παρουσιαστεί στο [VV08b]. Ο κινητός μέσος όρος¹ βοηθάει στην εξάλειψη των γρήγορων μεταβατικών και του θορύβου μέτρησης, ενώ χρησιμοποιείται επίσης και σαν έμμεση καταγραφή του ιστορικού της τάσης πριν την αλλαγή του ΣΑΤΥΦ.

Ο κινητός μέσος όρος μιας τάσης V_i τη χρονική στιγμή t_j δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{V}_i(t_j) = \frac{1}{n_i} \sum_{k=0}^{n_i-1} V_i(t_j - k\Delta t) \quad (3.13)$$

όπου Δt η περίοδος δειγματοληψίας του μετρούμενου μεγέθους και n_i ο αριθμός των δειγμάτων πάνω στα οποία ο κινητός μέσος όρος υπολογίζεται. Ο κινητός μέσος ανανεώνεται σε κάθε χρονική στιγμή δειγματοληψίας $t_j = j\Delta t$.

Το χρονικό διάστημα για το οποίο υπολογίζεται ο κινητός μέσος όρος λαμβάνεται ίσο με την χρονική καθυστέρηση T_i του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ, ώστε να διασφαλίζεται ότι μία και μόνο μία μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού λαμβάνεται υπόψη, όταν το ΣΑΤΥΦ είναι ενεργό. Σε αυτήν την περίπτωση ο κινητός μέσος προσεγγίζει τη γενική τάση της V_i . Αν το χρονικό διάστημα υπολογισμού ήταν μικρότερο από τον αντίστοιχο χρόνο T_i , τότε θα υπήρχαν διαστήματα στα οποία δεν θα υπολογιζόταν καμία μεταβολή του ΣΑΤΥΦ, ενώ αν λαμβανόταν μεγαλύτερο, τότε θα υπήρχαν διαστήματα με δύο αλλαγές και άλλα με μία. Ως εκ τούτου, η χρήση του κινητού μέσου όρου δεν θα προσέγγιζε καλά τη γενική τάση της V_i .

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι με βάση τον ορισμό του κινητού μέσου όρου, το διάστημα υπολογισμού καθώς και τα αντίστοιχα δείγματα, δεν είναι τα ίδια για όλα τα ΣΑΤΥΦ, αφού οι αντίστοιχες περίοδοι λειτουργίας δεν είναι ίδιες, ενώ η περίοδος δειγματοληψίας είναι κοινή. Όσα περισσότερα δείγματα υπάρχουν μέσα στο διάστημα υπολογισμού T_i , τόσο πιο αποτελεσματικό είναι το φιλτράρισμα των μεταβατικών και του θορύβου που επιτυγχάνεται στις αντίστοιχες μετρήσεις. Ο αριθμός των δειγμάτων σε κάθε ΣΑΤΥΦ μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$n_i = \frac{T_i}{\Delta t} \quad (3.14)$$

¹Οι όροι κινητός μέσος όρος και κινητός μέσος θα χρησιμοποιούνται εξίσου στη συνέχεια.

Με όλες αυτές τις υποθέσεις, ο κινητός μέσος όρος της τάσης αμέσως μετά από μια αλλαγή του ΣΑΤΥΦ, κατά τη χρονική στιγμή $t_k = kT_i$, θα μεταβληθεί ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \bar{V}_i(kT_i) - \bar{V}_i(kT_i - \Delta t) &= \\ &= \frac{1}{n_i} [V_i(kT_i) - V_i(kT_i - T_i)] = \frac{1}{n_i} \Delta V_i^k \end{aligned} \quad (3.15)$$

όπου η μεταβολή ΔV_i^k έχει οριστεί στη σχέση (3.12). Κατά συνέπεια η ικανή συνθήκη ευστάθειας (3.11) είναι ισοδύναμη με έναν αυξανόμενο κινητό μέσο όρο της τάσης, μετά από κάθε αλλαγή του ΣΑΤΥΦ. Δηλαδή μπορεί να πάρει την ακόλουθη μορφή:

$$\bar{V}_i(kT_i) - \bar{V}_i(kT_i - \Delta t) > 0 \quad (3.16)$$

Ως εκ τούτου, μια αύξηση στον κινητό μέσο όρο της τάσης, μετά από μια αλλαγή του ΣΑΤΥΦ, είναι ένδειξη ευστάθειας. Από την άλλη πλευρά, αν ο κινητός μέσος δεν αυξάνεται μετά από την αντίστοιχη μείωση της λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ, αυτό αποτελεί ένδειξη πιθανής επερχόμενης αστάθειας. Για λόγους όμως ασφάλειας, ο συναγερμός δεν ενεργοποιείται αμέσως, αλλά αντίθετα χρησιμοποιείται ένα χρονικό διάστημα περίπου ίσο με την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ κατά το οποίο ο κινητός μέσος παρακολουθείται.

Για το σκοπό, ο κινητός μέσος όρος της τάσης κατά τη χρονική στιγμή t_k της k -οστής αλλαγής του ΣΑΤΥΦ λαμβάνεται σαν αναφορά για την επακόλουθη παρακολούθηση της εξέλιξης του κινητού μέσου ως εξής:

$$V_{ri}(t_j) = \bar{V}_i(t_k), \quad t_j \in [t_k, t_k + T_i + \epsilon_t] \quad (3.17)$$

όπου V_{ri} η τιμή αναφοράς και ϵ_t μια μικρή χρονική σταθερά, ο οποίος μπορεί να είναι ελαφρά θετικός ή αρνητικός, ανάλογα με την εφαρμογή και τα διορθωτικά μέσα που θα χρησιμοποιηθούν μετά την σήμανση του συναγερμού, όπως θα εξηγηθεί στο Κεφ. 4.

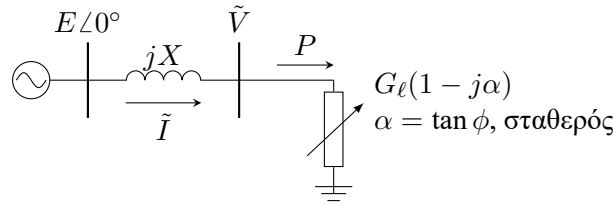
Εάν ο κινητός μέσος $\bar{V}(t_j)$ παραμένει κάτω από την τιμή $V_{ri}(t_j)$ για όλο το εξεταζόμενο διάστημα $t_j \in (t_k, t_k + T_i + \epsilon_t]$, τότε σημαίνεται συναγερμός. Αντίθετα, αν αυξηθεί πάνω από τη $V_{ri}(t_j)$ ή εισέλθει στη νεκρή ζώνη, τότε γίνεται ανατολή της ανίχνευσης (reset).

3.2 Ανίχνευση αστάθειας τάσης με μέτρηση φασιθετών

Στην ενότητα αυτή αναπτύσσεται ένας καινούργιος τρόπος αναγνώρισης πιθανής αστάθειας τάσης, με χρήση μετρήσεων από τους φασιθέτες ενός ζυγού μεταφοράς [VLM16]. Ο ζυγός αυτός μπορεί να είναι αρκετά μακριά από το φορτίο, ακόμα και σε υψηλότερο επίπεδο τάσης και ερευνάται κάτω από ποιες συνθήκες οι μετρήσεις ρεύματος και τάσης μόνο σε αυτόν τον ζυγό μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικές ενδείξεις σχετικά με την ευστάθεια ή αστάθεια τάσης του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Για το σκοπό αυτόν αναπτύσσεται ένας καινούργιος δείκτης, ο οποίος στηρίζεται στην μεταφερόμενη ενεργό ισχύ από τον επιτηρούμενο ζυγό, σε σχέση με την φαινόμενη αγωγιμότητα του φορτίου (όπως την βλέπει ο συγκεκριμένος ζυγός). Αν μια αύξηση της αγωγιμότητας συνοδεύεται από αύξηση της ροής ενεργού ισχύος μέσω του συγκεκριμένου ζυγού, η περιοχή θεωρείται ευσταθής ως προς την τάση. Αντίθετα μια μείωση στην ροή ενεργού ισχύος σε συνδυασμό με την αύξηση της αγωγιμότητας του φαινόμενου φορτίου θεωρείται ένδειξη πιθανής επερχόμενης αστάθειας τάσης και σημαίνεται σχετικό σήμα συναγερμού.

Ο δείκτης αυτός ουσιαστικά αποτελεί γενίκευση της μεθόδου LIVES και θα αποκαλείται στο εξής *Νέος Δείκτης LIVES (New LIVES Index - NLI)*.



Σχήμα 3.2: Ακτινικό δίκτυο χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$

3.2.1 Γενίκευση συνθηκών ευστάθειας τάσης σε ακτινικά δίκτυα χωρίς απώλειες

Στην παρούσα υποενότητα ορίζεται ο νέος δείκτης και αποδεικνύεται ότι είναι ισοδύναμος με την συνθήκη προσαρμογής των σύνθετων αντιστάσεων (impedance matching) όπως επίσης και με τη μέθοδο LIVES που αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.1, όταν ο δείκτης αυτός εφαρμόζεται σε ένα ζυγό φορτίου ενός ακτινικού συστήματος. Επιπλέον, αν το ακτινικό δίκτυο είναι χωρίς απώλειες αποδεικνύεται ότι ο δείκτης αυτός μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν οποιονδήποτε ενδιάμεσο ζυγό μεταφοράς, δίνοντας ακριβείς πληροφορίες για την ευστάθεια τάσης.

3.2.1.1 Συνθήκες προσαρμογής αντιστάσεων σε ακτινικό σύστημα χωρίς απώλειες

Όπως έχει αναφερθεί και στην Υποεν. 1.3.1 η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς, σε ένα ακτινικό δίκτυο χωρίς ωμικές απώλειες και με σταθερό συντελεστή ισχύος, εμφανίζεται όταν τα μέτρα των σύνθετων αντιστάσεων της γραμμής μεταφοράς και του φορτίου γίνουν ίσα, που αναφέρεται σαν συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων [VV08a].

Ένα τέτοιο ακτινικό σύστημα χωρίς απώλειες και με φορτίο μεταβλητής σύνθετης αγωγιμότητας G_ℓ , αλλά σταθερού συντελεστή ισχύος ($\cos \phi$), φαίνεται στο Σχ. 3.2. Αν και η ανάλυση στην Υποεν. 1.3.1 έγινε με όρους αντίστασης φορτίου, στη συνέχεια θα γίνεται αναφορά σε αγωγιμότητες. Επομένως, αν η αντίσταση του φορτίου με σταθερό συντελεστή ισχύος είναι η ακόλουθη:

$$Z_\ell = R_\ell + jX_\ell = R_\ell(1 + j\alpha) \quad (3.18)$$

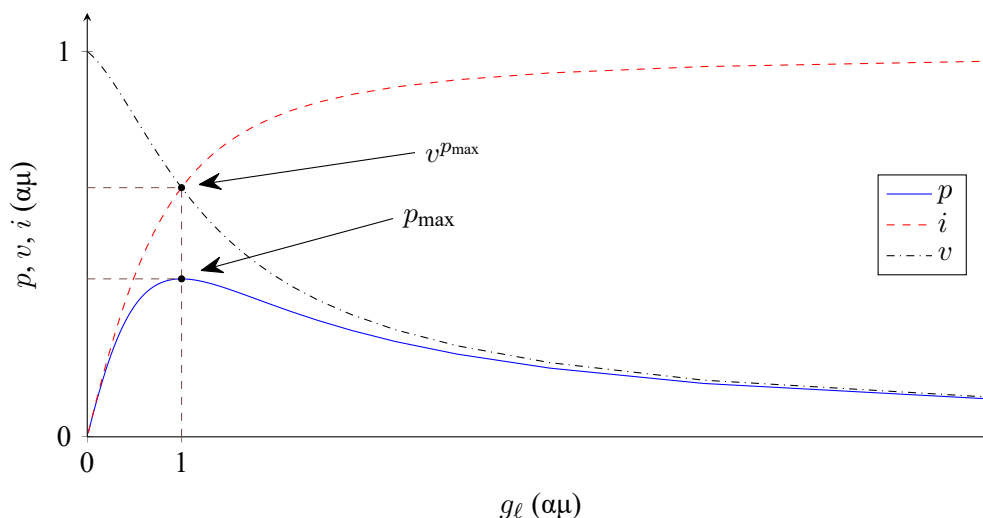
όπου $\alpha = \tan \phi$ και θεωρείται θετικό, $\alpha > 0$, για επαγωγικό φορτίο (lagging power factor), όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.2, τότε η αγωγιμότητα του δίνεται από την σχέση:

$$Y_\ell = \frac{1}{Z_\ell} = G_\ell(1 - j\alpha), \quad G_\ell = \frac{1}{R_\ell(1 + \alpha^2)} \quad (3.19)$$

Προφανώς η ενεργός ισχύς που καταναλώνει το φορτίο εξακολουθεί να δίνεται από την (1.44) της Υποεν. 1.3.1, η οποία με χρήση της αγωγιμότητας (3.19) και του γεγονότος πως η γραμμή μεταφοράς είναι χωρίς απώλειες ($R = 0 \Omega$) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$P = \frac{E^2 G_\ell (1 + \alpha^2)}{1 + [X G_\ell (1 + \alpha^2) + \alpha]^2} \quad (3.20)$$

Η γενική μορφή της αποδιδόμενης στο φορτίο ισχύος P , της τάσης V στον ζυγό του και του ρεύματος γραμμής I συναρτήσει τιμών της αντίστασης φορτίου για δεδομένο συντελεστή ισχύος $\cos \phi = 0.98$, φαίνονται στο Σχ. 1.3, το οποίο με αντίστοιχη χρήση της αγωγιμότητας G_ℓ , επαναλαμβάνεται εδώ στο Σχ. 3.3. Οι κανονικοποιημένες τιμές ισχύος, τάσης και ρεύματος δίνονται από τις σχέσεις $p = P/(X/E^2)$, $v = V/E$ και $i = I/(E/X)$ αντίστοιχα, ενώ η κανονικοποιημένη αγωγιμότητα από



Σχήμα 3.3: Ενεργός ισχύς $p = P/(X/E^2)$, τάση φορτίου $v = V/E$ και ρεύμα $i = I/(E/X)$, συναρτήσει της αγωγιμότητας φορτίου $g_\ell = (G_\ell/\cos\phi)/(1/X)$, για σταθερό συντελεστή ισχύος $\cos\phi = 0.98$

τη σχέση $g_\ell = (G_\ell/\cos\phi)/(1/X)$ ⁱⁱ. Μηδενική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε συνθήκες κενού φορτίου, ενώ αύξηση της αγωγιμότητας αντιστοιχεί σε αύξηση της ζήτησης του φορτίου.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση η συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων (1.47) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$G_\ell\sqrt{1+\alpha^2} = 1/X \quad (3.21)$$

Όπως φαίνεται από το Σχ. 3.3 καθώς η αγωγιμότητα του φορτίου αυξάνει, για τιμές μικρότερες από αυτές που αντιστοιχούν στη συνθήκη προσαρμογής (3.21), που αντιστοιχεί σε κανονικοποιημένη αγωγιμότητα $g_\ell = 1$, η αύξηση στο ρεύμα του δικτύου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πτώση τάσης πάνω στη γραμμή μεταφοράς, με αποτέλεσμα η καταναλισκόμενη ισχύς να αυξάνει. Από την άλλη πλευρά, όταν η αγωγιμότητα ξεπεράσει την τιμή που αντιστοιχεί στη συνθήκη προσαρμογής, πλέον η πτώση τάσης υπερσχύει, με αποτέλεσμα η καταναλισκόμενη ισχύς να πέφτει.

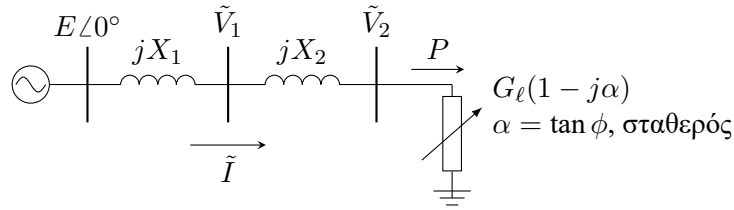
Δεδομένου ότι το σύστημα είναι ευσταθές όταν η αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου συνοδεύεται και από αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, με βάση την ανωτέρω ανάλυση, αυτό συμβαίνει όταν η αγωγιμότητα του φορτίου είναι μικρότερη από την αγωγιμότητα προσαρμογής, ισχύει δηλαδή η ακόλουθη ανισότητα:

$$G_\ell\sqrt{1+\alpha^2} < 1/X \quad (3.22)$$

Επομένως, σε συνθήκες έντονης φόρτισης ενός ΣΗΕ, στις οποίες η ζήτηση του φορτίου (αγωγιμότητα) αυξάνει μονότονα προς μια κατεύθυνση, με την υπόθεση σταθερού συντελεστή ισχύος και ακτινικού δικτύου χωρίς απώλειες, η σχέση (3.22) αποτελεί αναγκαία και ικανή συνθήκη ευστάθειας. Αντίθετα, παραβίαση της (3.22) σημαίνει ότι το σύστημα είναι πλέον ασταθές.

Η σχέση (3.22) μπορεί θεωρητικά να εφαρμοστεί απευθείας χρησιμοποιώντας μετρήσεις φασιθικών τάσης και ρεύματος για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης του φορτίου $Z_\ell = \tilde{V}/\tilde{I}$ και εκτιμώντας την ισοδύναμη αντίσταση Thévenin του υπόλοιπου δικτύου μέσω εφαρμογής της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων ή άλλων υπολογιστικών αλγορίθμων. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι υπάρχουν δύο προϋποθέσεις ώστε η ανισότητα (3.22) να ισχύει ακριβώς. Αυτές είναι:

ⁱⁱ Η σχέση αυτή προκύπτει από τριγωνομετρικές ταυτότητες δεδομένου ότι $\sqrt{1+\tan^2\phi} = 1/\cos\phi$.



Σχήμα 3.4: Ακτινικό δίκτυο με ενδιάμεσο ζυγό, χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$

1. Σταθερές παράμετροι E και X του ισοδύναμου Thévenin.
2. Σταθερός συντελεστής ισχύος $\cos \phi$ του φορτίου.

Προφανώς, η δεύτερη από αυτές τις υποθέσεις δεν ισχύει όταν οι μετρήσεις γίνονται σε κάποιο άλλο ενδιάμεσο σημείο του ακτινικού δικτύου, π.χ. όταν η μετρούμενη τάση είναι η \tilde{V}_1 του Σχ. 3.4, οπότε και η σύνθετη αγωγιμότητα του φορτίου, όπως φαίνεται από τον ζυγό μέτρησης είναι:

$$Z_1 = jX_2 + \frac{1}{G_\ell(1 - j\alpha)} \quad (3.23)$$

ενώ, η επαγωγική αντίδραση του ισοδύναμου Thévenin θα ισούται με X_1 .

Σε αυτήν την περίπτωση η συνθήκη προσαρμογής δίνει:

$$|Z_1| = X_1 \quad (3.24)$$

ή σε όρους αγωγιμότητας:

$$|Y_1| = 1/X_1 \quad (3.25)$$

Προφανώς πλέον η σχέση:

$$|Y_1| < 1/X_1 \quad (3.26)$$

δίνει λάθος ένδειξη ευστάθειας, καθώς η πραγματική συνθήκη ευστάθειας εξακολουθεί να είναι η σχέση (3.22) με:

$$X = X_1 + X_2 \quad (3.27)$$

Συγκεκριμένα, καθώς ισχύουν οι ακόλουθες ανισότητες που προκύπτουν από τις σχέσεις (3.23) και (3.27):

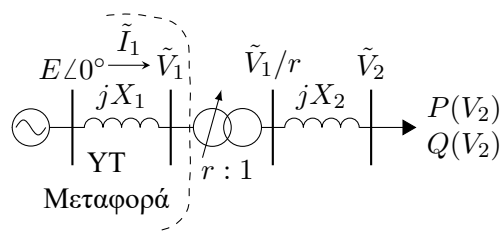
$$|Z_1| > \frac{1}{G_\ell\sqrt{1 + \alpha^2}} \Rightarrow |Y_1| < G_\ell\sqrt{1 + \alpha^2} \quad (3.28\alpha)$$

$$X > X_1 \Rightarrow 1/X < 1/X_1 \quad (3.28\beta)$$

ο συνδυασμός τους με την συνθήκη ευστάθειας (3.22) παράγει την εξής ανισότητα:

$$|Y_1| < G_\ell\sqrt{1 + \alpha^2} \leq 1/X < 1/X_1 \quad (3.29)$$

το οποίο σημαίνει ότι όταν η πραγματική συνθήκη ευστάθειας (3.22) παραβιαστεί, η συνθήκη (3.26) θα εξακολουθεί να ισχύει, δίνοντας λανθασμένη ένδειξη ευστάθειας για $X_2 > 0$. Με άλλα λόγια, καθώς η αγωγιμότητα του φορτίου αυξάνει θα φτάσει το όριο ευστάθειας και θα το ξεπεράσει, ενώ ακόμα η αγωγιμότητα που φαίνεται στον ενδιάμεσο ζυγό θα βρίσκεται κάτω από την αντίστοιχη αγωγιμότητα προσαρμογής (3.25).



Σχήμα 3.5: Ακτινικό δίκτυο με μετασχηματιστή εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ

Για αυτό το λόγο, ακόμα και αν οι δυσκολίες του υπολογισμού του ισοδύναμου Thévenin του δικτύου ξεπεραστούν, με χρήση π.χ. της μεθοδολογίας που προτείνεται στο [AM15], αν το μετρούμενο σημείο δεν είναι ακριβώς πάνω σε ζυγό φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος, η συνθήκη προσαρμογής αδυνατεί να δώσει έγκαιρο σήμα αστάθειας. Προφανώς, το σφάλμα στην πρόβλεψη της αστάθειας είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο πιο μακριά βρισκόμαστε από τον ζυγό φορτίου, δηλαδή όσο αυξάνει η επαγωγική αντίδραση X_2 .

3.2.1.2 Γενίκευση μεθόδου LIVES

Η μέθοδος τοπικής ανίχνευσης LIVES αναπτύχθηκε στην ενότητα 3.1 και όπως έχει επισημανθεί πολλές φορές μέχρι τώρα, στηρίζεται στην επιτήρηση της ελεγχόμενης από ΣΑΤΥΦ τάσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.5ⁱⁱⁱ.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, ο συντελεστής ισχύος παραμένει αμετάβλητος κάθε φορά που η μεταβλητή λήψη r αλλάζει, ακόμα και αν ληφθεί υπόψη η αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή X_2 (που περιλαμβάνει και την επαγωγική αντίδραση της γραμμής διανομής). Την ίδια στιγμή, το μέτρο της φαινόμενης σύνθετης αγωγιμότητας, όπως φαίνεται από την πλευρά της μεταφοράς (V_1) αυξάνεται όταν ο λόγος μετασχηματισμού r μειώνεται. Ως εκ τούτου αν θεωρηθεί ότι κατά τη διάρκεια που μεταβάλλεται η λήψη του ΣΑΤΥΦ η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thévenin του υπόλοιπου συστήματος παραμένει αμετάβλητη, η συνθήκη ευστάθειας (3.22) εξακολουθεί να ισχύει.

Η μέθοδος LIVES ωστόσο δεν στηρίζεται στη συνθήκη προσαρμογής των σύνθετων αντιστάσεων, αλλά επιτηρεί την αύξηση της τάσης V_2 μετά από κάθε μείωση του ΣΑΤΥΦ ($\Delta r < 0$). Όπως έχει αναλυθεί στην Εν. 3.1 η ικανή συνθήκη ευστάθειας έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta r} < 0 \quad (3.30)$$

Η σχέση (3.30) είναι ισοδύναμη της συνθήκης μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, καθώς μια αύξηση της σύνθετης αγωγιμότητας όπως φαίνεται από το πρωτεύον του μετασχηματιστή όταν $\Delta r < 0$ αντιστοιχεί σε μία αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, καθώς η ισχύς P θεωρείται αύξουσα με την τάση V_2 .

Για να επεκταθεί αυτή η ιδιότητα της μεθόδου LIVES σε κάποιο ενδιάμεσο ζυγό, το πρώτο βήμα είναι η επιτήρηση της ικανής συνθήκης ευστάθειας (3.30) αποκλειστικά και μόνο από τον ζυγό του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, υποθέτοντας ότι υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις των φασητετών τάσης \tilde{V}_1 και ρεύματος \tilde{I}_1 . Σε αυτήν την περίπτωση ένας μειούμενος λόγος μετασχηματισμού r μπορεί να εντοπιστεί σαν μια αύξηση στην σύνθετη αγωγιμότητα (και συγκεκριμένα στο ωμικό της κομμάτι G_1), όπως αυτή φαίνεται από τον ζυγό του πρωτεύοντος, ενώ η αύξηση της τάσης του ελεγχόμενου ζυγού

ⁱⁱⁱΕίναι ουσιαστικά το Σχ. 3.1 ενταγμένο στη λογική του Σχ. 3.4 προκειμένου να εξαχθεί η συσχέτιση μεταξύ της μεθόδου LIVES και της συνθήκης προσαρμογής.

V_2 μπορεί να επιτηρείται σαν αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος P . Ως εκ τούτου η ικανή συνθήκη ευστάθειας της LIVES, γραμμένη σαν νέος δείκτης LIVES (NLI) γίνεται:

$$\text{NLI} = \frac{\Delta P}{\Delta G_1} > 0 \quad (3.31)$$

όπου G_1 είναι το πραγματικό (ωμικό) μέρος της μετρούμενης σύνθετης αγωγιμότητας, όπως φαίνεται από την πλευρά του πρωτεύοντος, για το οποίο ισχύει:

$$G_1 = \text{Re}\{\tilde{I}_1/\tilde{V}_1\} \quad (3.32)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση (3.31) δεν χρειάζεται επιτήρηση του ΣΑΤΥΦ και συνεπώς μπορεί εύκολα να γενικευθεί και σε ζυγούς χωρίς μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ.

3.2.1.3 Συνθήκες αστάθειας σε ενδιάμεσο ζυγό

Στην παρούσα παράγραφο εξετάζονται οι συνθήκες αστάθειας σε έναν ενδιάμεσο ζυγό ενός ακτινικού συστήματος, όπως αυτός με τάση \tilde{V}_1 του Σχ. 3.4. Καθώς το εξεταζόμενο σύστημα έχει θεωρηθεί χωρίς ωμικές απώλειες, η ισχύς P είναι η ίδια παντού σε όλο το ακτινικό κομμάτι. Ως εκ τούτου, μπορεί να υπολογιστεί τόσο στον ζυγό 2 όσο και στον ζυγό 1 ως εξής:

$$P = V_1^2 G_1 = V_2^2 G_\ell \quad (3.33)$$

όπου G_ℓ η ωμική αγωγιμότητα του φορτίου που φαίνεται από τον ζυγό 2 και G_1 η ωμική αγωγιμότητα στα κατάντη του ζυγού 1.

Επιπλέον, η σχέση που συνδέει της τάσεις \tilde{V}_1 και \tilde{V}_2 των ζυγών 1 και 2 αντίστοιχα είναι αυτή του διαιρέτη τάσης, που με τη χρήση της (3.19), παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\tilde{V}_2 = \tilde{V}_1 \frac{\frac{1}{G_\ell(1-j\alpha)}}{\frac{1}{G_\ell(1-j\alpha)} + jX_2} = \tilde{V}_1 \frac{1}{1 + jX_2 G_\ell(1-j\alpha)} = \tilde{V}_1 \frac{1}{(1 + \alpha G_\ell X_2) + j(G_\ell X_2)} \quad (3.34)$$

η οποία για τα αντίστοιχα μέτρα των μιγαδικών αριθμών δίνει:

$$V_2 = V_1 \frac{1}{\sqrt{(1 + \alpha G_\ell X_2)^2 + (G_\ell X_2)^2}} \quad (3.35)$$

Αντικαθιστώντας την (3.35) στην (3.33) προκύπτει ότι:

$$V_1^2 G_1 = V_1^2 \frac{G_\ell}{(1 + \alpha G_\ell X_2)^2 + (G_\ell X_2)^2} \quad (3.36)$$

από την οποία απαλείφοντας την τάση V_1 και από τα δύο μέλη προκύπτει ότι η μετρούμενη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G_1 στον ζυγό 1, συναρτήσει της ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου G_ℓ , δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G_1 = \frac{G_\ell}{(1 + \alpha G_\ell X_2)^2 + (G_\ell X_2)^2} \quad (3.37)$$

Η παράγωγος της (3.37) ως προς G_ℓ είναι:

$$\frac{dG_1}{dG_\ell} = \frac{1 - (\alpha G_\ell X_2)^2 - (G_\ell X_2)^2}{\left[(1 + \alpha G_\ell X_2)^2 + (G_\ell X_2)^2 \right]^2} \quad (3.38)$$

Ως γνωστόν, η αναγκαία συνθήκη ακροτάτου της (3.37) είναι η ακόλουθη:

$$\frac{dG_1}{dG_\ell} = 0 \quad (3.39)$$

επομένως, προκύπτει ότι στο σημείο τοπικού ακροτάτου της (3.37) ισχύει:

$$\begin{aligned} 1 - (\alpha G_\ell X_2)^2 - (G_\ell X_2)^2 &= 0 \Rightarrow \\ G_\ell^2 (1 + \alpha^2) &= 1/X_2^2 \\ G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} &= 1/X_2 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Η δεύτερη παράγωγος της (3.37) ως προς G είναι:

$$\frac{d^2 G_1}{dG_\ell^2} = \frac{-6G_\ell X_2^2 - 2\alpha^2 G_\ell X_2 - 4\alpha X_2 - 4\alpha^2 G_\ell X_2}{\left[(1 + \alpha G_\ell X_2)^2 + (G_\ell X_2)^2 \right]^4} \quad (3.41)$$

η οποία για $G_\ell > 0$ είναι πάντα μικρότερη του μηδενός και ως εκ τούτου το ακρότατο της (3.40) είναι μέγιστο.

Αυτό σημαίνει πως αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου μέχρι και την τιμή μεγίστου (3.40) συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της αγωγιμότητας G_1 που μετράται στον ζυγό 1. Αντίθετα από την τιμή μεγίστου και μετά η αγωγιμότητα G_1 πέφτει για αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου. Ισχύει δηλαδή το εξής:

$$\Delta G_\ell > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta G_1 > 0 & \text{αν } 0 < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_2} \\ \Delta G_1 < 0 & \text{αν } \frac{1}{X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} \end{cases} \quad (3.42)$$

Από την άλλη πλευρά, όπως εξηγήθηκε στην Παρ. 3.2.1.1, το σύστημα είναι ευσταθές όσο η θετική μεταβολή της αγωγιμότητας του φορτίου ($\Delta G_\ell > 0$) συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της αποδιδόμενης ενεργού ισχύος ($\Delta P > 0$), το οποίο ισχύει όσο η αγωγιμότητα του φορτίου είναι μικρότερη από την αγωγιμότητα προσαρμογής (3.21). Δηλαδή ισχύει:

$$\Delta G_\ell > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta P > 0 & \text{αν } 0 < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_1 + X_2} \\ \Delta P < 0 & \text{αν } \frac{1}{X_1 + X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} \end{cases} \quad (3.43)$$

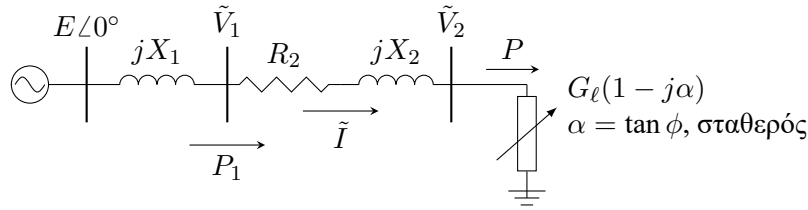
Από τις (3.42) και (3.43) και δεδομένου ότι $1/(X_1 + X_2) < 1/X_2$ προκύπτουν οι ακόλουθες τρεις περιπτώσεις για μια συνεχή αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου:

$$\Delta G_\ell > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta G_1 > 0 \ \& \ \Delta P > 0 & \text{αν } 0 < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_1 + X_2} \\ \Delta G_1 > 0 \ \& \ \Delta P < 0 & \text{αν } \frac{1}{X_1 + X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_2} \\ \Delta G_1 < 0 \ \& \ \Delta P < 0 & \text{αν } \frac{1}{X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} \end{cases} \quad (3.44)$$

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του δείκτη NLI της σχέσης (3.31) η (3.44) δίνει τελικά:

$$\Delta G_\ell > 0 \Rightarrow \begin{cases} \text{NLI} > 0 & \text{αν } 0 < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_1 + X_2} \\ \text{NLI} < 0 & \text{αν } \frac{1}{X_1 + X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X_2} \\ \text{NLI} > 0 & \text{αν } \frac{1}{X_2} < G_\ell \sqrt{1 + \alpha^2} \end{cases} \quad (3.45)$$

Συνεπώς για μια συνεχή αύξηση στην ωμική αγωγιμότητα G_ℓ , ο δείκτης NLI είναι θετικός μέχρι το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (3.21), που είναι και το όριο ευστάθειας, ενώ γίνεται αρνητικός



Σχήμα 3.6: Ακτινικό δίκτυο με ενδιάμεσο ζυγό, ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού επαγωγικού συντελεστή ισχύος $\cos \phi$

σε αυτό το σημείο και αλλάζει πάλι πρόσημο όταν η ωμική αγωγιμότητα του φορτίου ξεπεράσει την τιμή $1/X_2$. Με άλλα λόγια η σχέση (3.31) είναι μια ικανή και αναγκαία συνθήκη ευστάθειας τάσης σε οποιοδήποτε σημείο ενός ακτινικού δικτύου χωρίς απώλειες. Πρόκειται για γενίκευση τόσο της μεθόδου LIVES όσο και της συνθήκης προσαρμογής, με την διαφορά ότι δεν χρειάζεται κανένας υπολογισμός ισοδύναμων παραμέτρων Thévenin ή επιτήρηση της ελεγχόμενης τάσης και του λόγου μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ. Απλές μετρήσεις φασιθετών σε οποιοδήποτε σημείο του ακτινικού δικτύου είναι αρκετές για να εντοπίσουν πιθανή αστάθεια τάσης.

3.2.2 Συνθήκες ευστάθειας σε γενικευμένα βροχοειδή δίκτυα

Καθώς στην προηγούμενη υποενότητα ο δείκτης NLI αποδείχτηκε ότι αποτελεί τόσο μια γενίκευση της μεθόδου LIVES και της συνθήκης προσαρμογής για ένα ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες, στην παρούσα υποενότητα ο δείκτης NLI επεκτείνεται σε γενικευμένα δίκτυα με απώλειες.

3.2.2.1 Επίδραση απωλειών γραμμών μεταφοράς

Η παρουσία ωμικών απωλειών των γραμμών μεταφοράς, επηρεάζει τη μετρούμενη ισχύ σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο, η οποία πλέον παύει να είναι ίση με την καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Έστω για παράδειγμα το Σχ. 3.6 όπου πλέον η γραμμή μεταφοράς μεταξύ των ζυγών 1 και 2 περιλαμβάνει και ωμικό κομμάτι R_2 . Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση $P_1 = P$ η οποία είχε προηγουμένως υποθεθεί παύει να ισχύει ισχύει. Συγκεκριμένα, η σχέση που συνδέει την μεταφερόμενη ισχύ P_1 με την αποδιδόμενη ισχύ στο φορτίο P είναι η εξής:

$$P_1 = I^2 R_2 + P \quad (3.46)$$

όπου I είναι το μέτρο του ρεύματος που ρέει στον κλάδο.

Υποθέτοντας μια συνεχή αύξηση της αγωγιμότητας G_ℓ του φορτίου, το ρεύμα I , όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.3, αυξάνει και αυτό μονότονα. Δηλαδή ισχύει:

$$\Delta G_\ell > 0 \Rightarrow \Delta I > 0 \quad (3.47)$$

και επομένως η (3.46) δίνει:

$$\Delta P_1 = \Delta I^2 R_2 + \Delta P \Rightarrow \Delta P_1 > \Delta P \text{ όσο } \Delta G_\ell > 0 \quad (3.48)$$

Σε αντιστοιχία με τον δείκτη NLI, όπως ορίστηκε στην (3.31), ορίζεται και ο δείκτης NLI_1 , σαν το λόγο της μεταβολής της μεταφερόμενης ισχύος ΔP_1 στον ζυγό 1 ως προς την μεταβολή της φαινόμενης αγωγιμότητας ΔG_1 από τον ίδιο ζυγό:

$$NLI_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta G_1} \quad (3.49)$$

Καθώς η ζήτηση του φορτίου αυξάνει ($\Delta G_\ell > 0$), οδηγώντας και σε αντίστοιχη αύξηση της φαινόμενης αγωγιμότητας από τον ζυγό 1 ($\Delta G_1 > 0$), στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, που αποτελεί όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Υποεν. 3.2.1 και το όριο ευστάθειας του συστήματος, η μεταβολή της καταναλισκόμενης ισχύος που αποδίδεται στο φορτίο θα είναι $\Delta P = 0$ και επομένως ο δείκτης NLI της (3.31) μηδενίζεται. Από την άλλη πλευρά, η μεταβολή της μεταφερόμενης ισχύος όπως φαίνεται από το ζυγό 1 ΔP_1 εξακολουθεί να είναι θετική, όπως φαίνεται από την (3.48). Ως εκ τούτου, στο σημείο εμφάνισης αστάθειας ισχύει $NLI_1 > 0$. Μετά από αυτό το σημείο, δεδομένου ότι το ΔP γίνεται πλέον αρνητικό καθώς αυξάνεται η αγωγιμότητα του φορτίου G_ℓ , ο δείκτης NLI_1 ελαττώνεται και θα μηδενιστεί σε κάποιο σημείο μετά την εμφάνιση της αστάθειας. Με άλλα λόγια, όταν θα ισχύει $NLI_1 = 0$ όταν ήδη $NLI < 0$.

Στην πράξη όμως οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ μικρές ($R_2 \ll X_2$), επομένως το σημείο που μηδενίζεται ο δείκτης NLI_1 είναι πολύ κοντά στο σημείο που μηδενίζεται και ο πραγματικός δείκτης αστάθειας NLI και μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει η ακόλουθη προσέγγιση:

$$NLI_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta G_1} \approx NLI = \frac{\Delta P}{\Delta G_1} \quad (3.50)$$

και επομένως η συνθήκη ευστάθειας (3.31) μπορεί να επιτηρηθεί μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$NLI_1 = \frac{\Delta P_1}{\Delta G_1} > 0 \text{ όταν } R_2 \ll X_2 \quad (3.51)$$

Προφανώς καθώς η μετρούμενη ισχύς P_1 περιλαμβάνει απώλειες, η συνθήκη ένδειξης αστάθειας $NLI_1 = 0$, όπως υπολογίζεται από την (3.49), θα εμφανίζεται λίγο *αργότερα* από το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (καθυστέρηση ανίχνευσης). Αυτό ωστόσο το πιθανό μειονέκτημα αντισταθμίζεται από μία ιδιότητα των γενικευμένων βροχοειδών δικτύων όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Για λόγους απλοποίησης των εκφράσεων στη συνέχεια της διατριβής, όπου αναφέρεται ο δείκτης NLI σε έναν ζυγό, εννοείται ο δείκτης NLI_1 της (3.49), που υπολογίζεται από την μεταβολή της μεταφερόμενης ισχύος και της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας από τον εν λόγω ζυγό.

3.2.2.2 Καταναλισκόμενη ισχύς και ζήτηση σε μια ευάλωτη περιοχή του συστήματος

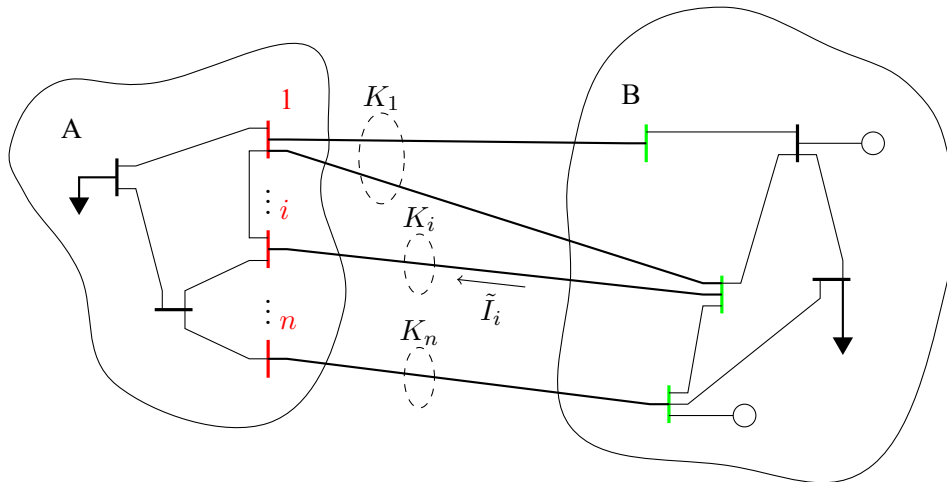
Είναι πολύ σύνηθες σε πραγματικά ΣΗΕ μια ευάλωτη περιοχή^{iv} που είναι επιρρεπής σε αστάθεια τάσης να τροφοδοτείται από ένα πολύ μεγαλύτερο σύστημα μέσω ενός *διαδρόμου μεταφοράς*. Με τον όρο διάδρομο μεταφοράς εννοείται ένα σύνολο γραμμών μεταφοράς που ενώνει τις δύο διακριτές περιοχές. Επιπλέον, αν η απομάκρυνση των γραμμών μεταφοράς του διαδρόμου οδηγεί στη δημιουργία δύο ανεξάρτητων συστημάτων τότε αυτές οι γραμμές ορίζουν ένα *σύνολο διαχωρισμού (cut-set)* [DP10].

Ένα σχηματικό διάγραμμα μιας ευάλωτης περιοχής που συνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς που αποτελεί ταυτόχρονα και σύνολο διαχωρισμού, φαίνεται στο Σχ. 3.7. Η ευάλωτη περιοχή Α θεωρείται ότι έχει έλλειμμα παραγωγής το οποίο καλύπτεται με μεταφορά ισχύος από την περιοχή Β μέσω του διαδρόμου μεταφοράς που αποτελείται από τις γραμμές που απεικονίζονται με έντονη μαύρη γραμμή.

Οι ζυγοί κάθε περιοχής στους οποίους καταλήγουν οι γραμμές μεταφοράς ενός διαδρόμου που αποτελεί σύνολο διαχωρισμού ονομάζονται *συνοριακοί ζυγοί (boundary buses)* [DP10]. Οι συνοριακοί ζυγοί της περιοχής Α ονομάζονται συνοριακοί ζυγοί άφιξης και στο Σχ. 3.7 φαίνονται με κόκκινο χρώμα, ενώ οι συνοριακοί ζυγοί της περιοχής Β συνοριακοί ζυγοί αναχώρησης, οι οποίοι στο ίδιο σχήμα φαίνονται με πράσινο χρώμα.

Όπως έχει αναφερθεί και στην Υποεν. 1.5.4, αυτό που συνήθως ενδιαφέρει τις μελέτες ευστάθειας τάσεως είναι τα περιθώρια φόρτισης που έχει το σύστημα μετά από μια διαταραχή. Για το σκοπό αυτό,

^{iv} Ο όρος ευάλωτη έχει την έννοια της ασθενώς συνδεδεμένης περιοχής με το υπόλοιπο σύστημα.



Σχήμα 3.7: Διάδρομος μεταφοράς που σε αυτήν την περίπτωση αποτελεί σύνολο διαχωρισμού (cut-set) μεταξύ δύο περιοχών A και B ενός ΣΗΕ, με τη ροή ισχύος να είναι από την περιοχή B προς την περιοχή A, η οποία περιοχή A είναι πιο ευάλωτη και επιρρεπής σε αστάθεια τάσης. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι συνοριακοί ζυγοί άφιξης και με πράσινο χρώμα οι συνοριακοί ζυγοί αναχώρησης, ενώ φαίνονται και τα σύνολα εξωτερικών συνδέσεων των συνοριακών ζυγών άφιξης με τη βοήθεια των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς

δεδομένου του αρχικού σημείου λειτουργίας ενός συστήματος, προσομοιώνεται η εξεταζόμενη διαταραχή και στη συνέχεια υπολογίζονται τα περιθώρια φόρτισης, αυξάνοντας προς μια κατεύθυνση την συνολική φόρτιση του συστήματος. Η φόρτιση ενός ΣΗΕ χαρακτηρίζεται από την συμμετοχή των επιμέρους φορτίων στη συνολική αύξηση ισχύος και από τη συμμετοχή των μονάδων παραγωγής για την κάλυψη της ζήτησης, βάσει διαφόρων συντελεστών συμμετοχής.

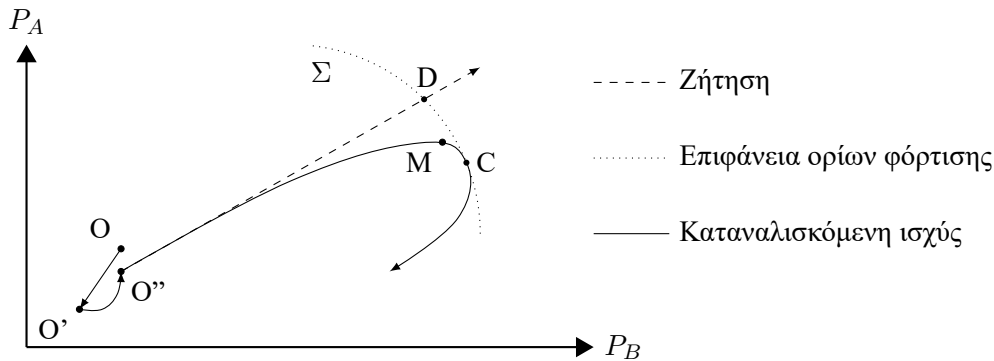
Παραστατικά, όλη αυτή η διαδικασία μπορεί να φανεί στο χώρο κατάστασης των φορτίων, τα οποία αν θεωρηθούν πως αποκαθιστούν την ονομαστική τους ζήτηση (που είναι σύνηθες σε πραγματικά ΣΗΕ), είναι ανεξάρτητες παράμετροι. Συνεπώς, αθροίζοντας για παράδειγμα το ενεργό φορτίο κάθε περιοχής, η ανωτέρω διαδικασία απεικονίζεται όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8, όπου στον οριζόντιο άξονα φαίνεται το συνολικό ενεργό φορτίο της περιοχής B και στον κατακόρυφο το συνολικό ενεργό φορτίο της περιοχής A.

Σε αυτόν το χώρο των φορτίων (παραμέτρων) ορίζεται η επιφάνεια ορίων φόρτισης του συγκεκριμένου συστήματος, που στο Σχ. 3.8 αποτελείται από την εστιγμένη καμπύλη Σ , η οποία φράσσει την περιοχή στο χώρο κατάστασης των φορτίων στην οποία υπάρχουν λύσεις των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος^v. Αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή που περιβάλλει η Σ η καταναλισκόμενη ισχύς μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση του συστήματος. Όταν συμβαίνει αυτό, δηλαδή η καταναλισκόμενη ισχύς είναι ίση με την ζήτηση, το σύστημα βρίσκεται σε μακροπρόθεσμη ισορροπία.

Υποθέτοντας πως ο κύριος μηχανισμός αποκατάστασης των φορτίων στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι εκείνος των ΣΑΤΥΦ (κάτι που ισχύει στην πράξη) και ότι το σύστημα αρχικά βρίσκεται σε ισορροπία στο σημείο O του Σχ. 3.8, τότε, αν συμβεί μια διαταραχή θα μεταβεί στο σημείο O'. Από το σημείο αυτό ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου θα φέρει το σύστημα στο σημείο O'', το οποίο βρίσκεται πολύ κοντά στο σημείο O, αλλά όχι ακριβώς πάνω του λόγω της ύπαρξης νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ.

Από το σημείο O'' εφαρμόζεται μια ομοιόμορφη αύξηση της ζήτησης των φορτίων, όπως φαίνεται από την διακεκομμένη γραμμή του Σχ. 3.8, η οποία τέμνει την επιφάνεια ορίων φόρτισης στο σημείο D,

^vΒλ. Υποεν. 2.4.3.



Σχήμα 3.8: Επιφάνεια ορίων φόρτισης και κρίσιμων σημείων στο χώρο των φορτίων. Σ: καμπύλη ορίων φόρτισης, C: σημείο που η καταναλισκόμενη ισχύς φτάνει στο όριο φόρτισης, M: σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, D: σημείο που ζήτηση φτάνει στο όριο φόρτισης

πέρα από το οποίο δεν υπάρχει σημείο ισορροπίας. Αρχικά τα ΣΑΤΥΦ θα καταφέρουν να ικανοποιήσουν την αύξηση της ζήτησης με αντίστοιχη αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος, όπως φαίνεται από την απόκριση της συνεχούς γραμμής του Σχ. 3.8. Ωστόσο λόγω της ύπαρξης νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ αλλά και του γεγονότος πως στην ευάλωτη περιοχή A αυτά (τα ΣΑΤΥΦ) θα αρχίσουν να φτάνουν στα όρια μεταβλητών τους λήψεων (r_{\min}), η τροχιά της καταναλισκόμενης ισχύος θα αρχίσει να αποκλίνει σημαντικά από την αντίστοιχη τροχιά της ζήτησης.

Συγκεκριμένα, καθώς η ζήτηση υπερβαίνει το σημείο D και δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί, η τροχιά της καταναλισκόμενης ισχύος αποκλίνει όλο και περισσότερο από τη ζήτηση του φορτίου, ακουμπά εφαιπτομενικά την επιφάνεια ορίων φόρτισης στο σημείο C, γυρίζοντας πίσω, καθώς δεν υπάρχουν λύσεις έξω από την καμπύλη ορίων φόρτισης Σ.

Είναι εμφανές ότι σε αυτήν την περίπτωση η κατανάλωση στην ευάλωτη περιοχή A φτάνει σε ένα μέγιστο σημείο M, πριν το όριο φόρτισης που αντιστοιχεί στο σημείο C. Μετά το σημείο M η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς στην ευάλωτη περιοχή A θα αρχίσει να μειώνεται, καθώς, όπως ήδη αναφέρθηκε, η ζήτηση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί.

Με άλλα λόγια, όπως έχει αποδειχθεί και στα [VV08a, VV10], σε ένα ασταθές σενάριο το οποίο περιλαμβάνει την αύξηση της ζήτησης ισχύος, η συνολική κατανάλωση σε μία ευάλωτη περιοχή θα φτάσει σε ένα μέγιστο σημείο και στη συνέχεια θα μειωθεί πριν το πραγματικό σημείο αστάθειας (σημείο C).

Αν και η ιδιότητα αυτή είναι γενική, στην ειδική περίπτωση που οι συνοριακοί ζυγοί της ευάλωτης περιοχής A ενώνονται ένας προς έναν με τους συνοριακούς ζυγούς της περιοχής B^{vi}, τότε η παρατήρηση ότι η συνολική κατανάλωση στην ευάλωτη περιοχή θα φτάσει σε ένα μέγιστο και θα αρχίσει να μειώνεται πριν το όριο φόρτισης, συμπίπτει με ένα αποτελέσματα της μελέτης που παρουσιάζεται στο [Gri12]. Συγκεκριμένα, στην εν λόγω αναφορά διατυπώνεται και αποδεικνύεται, τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά, ότι μεταξύ μιας “πηγής” και μιας “καταβόθρας” ισχύος (βλ. αντιστοιχία μεταξύ περιοχής B και ευάλωτης περιοχής A του Σχ. 3.7) που ενώνονται με γραμμές, για μια συνεχή αύξηση της ζήτησης μεταφοράς ισχύος από την πηγή στην καταβόθρα και πριν την εμφάνιση διακλάδωσης σαγματικού κόμβου (που όπως έχει εξηγηθεί στην Υποεν. 2.4.3 αντιστοιχεί σε όρια φόρτισης) υπάρχει πάντοτε τουλάχιστον μια γραμμή στην οποία η μεταφερόμενη ισχύς θα φτάσει σε ένα μέγιστο σημείο και θα αρχίσει να μειώνεται.

^{vi} Δηλαδή, κάθε συνοριακός ζυγός άφιξης ενώνεται με έναν και μόνο έναν, διαφορετικό κάθε φορά, συνοριακό ζυγό αναχώρησης.

Επιστρέφοντας και πάλι το σύστημα που εικονίζεται στο Σχ. 3.7, το συνολικό ρεύμα άφιξης στον i – οστό συνοριακό ζυγό της ευάλωτης περιοχής Α από την περιοχή Β υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{I}_i = - \sum_{k \in K_i} \tilde{I}_{ik}, \quad i = 1, \dots, n \quad (3.52)$$

όπου K_i το σύνολο εξωτερικών συνδέσεων του συνοριακού ζυγού άφιξης i της ευάλωτης περιοχής, το οποίο περιλαμβάνει τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης της περιοχής Β με τους οποίους ενώνεται μέσω του διαδρόμου μεταφοράς (βλ. και Σχ. 3.7).

Δεδομένου ότι όλοι οι φασιθέτες ρεύματος \tilde{I}_i και τάσεων \tilde{V}_i στους συνοριακούς ζυγούς μπορούν να μετρηθούν τοπικά με μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU), τότε, με βάση τη σχέση (3.52), η μεταφερόμενη ενεργός ισχύ P_i στην ευάλωτη περιοχή του δικτύου μέσω του συνοριακού ζυγού i και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G_i από τον ίδιο ζυγό υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_i = \text{Re} \left\{ \tilde{V}_i \tilde{I}_i^* \right\} \quad (3.53\alpha)$$

$$G_i = \text{Re} \left\{ \tilde{I}_i / \tilde{V}_i \right\} \quad (3.53\beta)$$

όπου \tilde{V}_i η τάση του συνοριακού ζυγού i .

Σύμφωνα με το Σχ. 3.8 και με τα αποτελέσματα του [Gri12] που αναφέρθηκαν προηγουμένως, καθώς το φορτίο αυξάνει μετά το σημείο M και πριν το σημείο C , τουλάχιστον σε έναν συνοριακό ζυγό θα αρχίσει να παρατηρείται μείωση της ροής της ενεργού ισχύος, όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta P_i = P_i(t) - P_i(t - \Delta t) < 0, \quad t > t_M \quad (3.54)$$

όπου t_M η χρονική στιγμή κατά την οποία μεγιστοποιείται η κατανάλωση στην ευάλωτη περιοχή Α και Δt το βήμα της δειγματοληψίας της ισχύος.

Από την άλλη πλευρά, καθώς η ζήτηση στην συγκεκριμένη περιοχή δεν μπορεί να ικανοποιηθεί, η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα, που βλέπουν οι συνοριακοί ζυγοί, συνεχίζει να αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η δράση των ΣΑΤΥΦ για αποκατάσταση των τάσεων στην ευάλωτη περιοχή αυξάνει τη φαινόμενη αγωγιμότητα. Δηλαδή ισχύει:

$$\Delta G_i = G_i(t) - G_i(t - \Delta t) > 0, \quad t > 0 \quad (3.55)$$

Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι πως ο δείκτης NLI όπως ορίζεται από τη σχέση (3.49) θα πρέπει να περνάει το μηδέν και να γίνεται αρνητικός για τουλάχιστον ένα συνοριακό ζυγό πριν την εμφάνιση αστάθειας τάσης. Δηλαδή η σχέση:

$$\text{NLI}_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta G_i} > 0 \quad \text{για κάθε συνοριακό ζυγό } i = 1 \dots n \quad (3.56)$$

είναι μια ικανή συνθήκη ευστάθειας τάσης για την ευάλωτη περιοχή του συστήματος που τροφοδοτείται μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς ισχύος. Με άλλα λόγια η παραβίαση της (3.56), ακόμα και για έναν ζυγό, είναι αναγκαία συνθήκη για επερχόμενη αστάθεια.

Λαμβάνοντας υπόψη το συνδυασμένο αποτέλεσμα των ωμικών απωλειών, που οδηγούν σε καθυστερημένη ένδειξη αστάθειας, όσο και των βροχοειδών δικτύων, που παρέχουν πρώιμη ένδειξη αστάθειας, παρότι ο δείκτης NLI δεν προσδιορίζει ακριβώς το σημείο της αστάθειας, προσφέρει ωστόσο μια έγκαιρη προειδοποίηση προσέγγισης των ορίων φόρτισης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένδειξη κατάστασης έκτακτης ανάγκης και σήμανσης σχετικού συναγερμού.

Κεφάλαιο 4

Συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα διάφορα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και στηρίζονται στη μέθοδο LIVES και στο δείκτη NLI, που παρουσιάστηκαν στο Κεφ. 3.

Τα συστήματα που βασίζονται στη μέθοδο LIVES αφορούν είτε την απλή ανίχνευση αστάθειας τάσης μέσω επιτήρησης, είτε την απευθείας εφαρμογή ολοκληρωμένων συστημάτων προστασίας στους ζυγούς που εντοπίζεται αστάθεια. Τα συγκεκριμένα συστήματα προστασίας χρησιμοποιούν διάφορους τρόπους έμμεσης και άμεσης αποκοπής φορτίου με στόχο την αποκατάσταση της ευστάθειας και την αποφυγή της κατάρρευσης.

Από την άλλη πλευρά, το σύστημα που στηρίζεται στο δείκτη NLI αφορά μόνο την ανίχνευση αστάθειας τάσης και μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ευρύτερη, ευπαθή περιοχή του συστήματος. Ως εκ τούτου, το σήμα συναγερμού μπορεί να σταλεί στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) με τηλειδιοποίηση και να χρησιμοποιηθεί κεντρικά, για εποπτικούς λόγους και έγκαιρη διάγνωση της αστάθειας. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με αυτόματα αποτρεπτικά μέσα, όπως π.χ., ένα κεντρικό σχήμα αποκοπής φορτίου σε προαποφασισμένους ζυγούς, ωστόσο, στην συγκεκριμένη εργασία, δεν εξετάζονται εφαρμογές προστασίας που να στηρίζονται στον δείκτη NLI.

Στις ακόλουθες ενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι βασικές αρχές και λειτουργίες των διαφόρων συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Συγκεκριμένα, στην Εν. 4.1 περιγράφεται το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης που βασίζεται στη μέθοδο LIVES, στην Εν. 4.2 περιγράφεται το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης, που πέραν της ανίχνευσης περιλαμβάνει μηχανισμό αποκατάστασης της ευστάθειας μέσω αντίστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ. Περιλαμβάνονται δύο παραλλαγές, μία για στατικά φορτία και μία για δυναμικά αυτοεπαναφερόμενα φορτία. Στην Εν. 4.3 περιγράφεται το σύστημα προστασίας που στηρίζεται στην ανίχνευση αστάθειας μέσω της μεθόδου LIVES και στην εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου. Στην Εν. 4.4 γίνεται περιγραφή του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης μέσω του δείκτη NLI. Τέλος, στην Εν. 4.5 αναπτύσσονται τα διάφορα μοντέλα των ανωτέρων συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας που ενσωματώθηκαν στον κώδικα του προγράμματος WPSTAB, που αποτελεί μια από τις κύριες συμβολές της διατριβής.

Συνοπτικά, τα ανωτέρω συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και συστήματα προστασίας από κατάρρευση, με την αντίστοιχη ονομασία και την συνοπτική περιγραφή τους, περιλαμβάνονται στον Πίν. Β.1 του Παραρτήματος Β.

4.1 Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας βασισμένο στη μέθοδο LIVES (ΣΑ1)

Το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 (LIVES-alarm ή LA¹) είναι ένα σύστημα επιτήρησης τάσης που στηρίζεται στην εφαρμογή της μεθόδου LIVES στους μετασχηματιστές διανομής ΥΤ/ΜΤ καθώς και σε αυτομετασχηματιστές ΥΥΤ/ΥΤ εξοπλισμένους με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του κινητού μέσου όρου των τάσεων, όπως αναπτύχθηκε στην Παρ. 3.1.2.2. Πρόκειται για ένα σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για επιτήρηση, είτε, σαν βάση για κάποιο σύστημα προστασίας που περιλαμβάνει και διορθωτικά μέτρα (όπως γίνεται στις επόμενες ενότητες).

Το σύστημα ΣΑ1 μπορεί να υλοποιηθεί ξεχωριστά σε κάθε ελεγκτή ΣΑΤΥΦ χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Β.1 του Παραρτήματος Β, ο οποίος θεωρείται ότι εφαρμόζεται συνεχώς και περιγράφεται στη συνέχεια. .

Αν υποθεθεί μια περίοδος δειγματοληψίας Δt , τότε τις χρονικές στιγμές που ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$t(k) = k\Delta t \quad (4.1)$$

γίνεται δειγματοληψία της τάσης V και ουσιαστικά η μεταβλητή k ορίζει τον αύξοντα αριθμό του δείγματος. Τις ίδιες χρονικές στιγμές γίνεται υπολογισμός του αντίστοιχου κινητού μέσου όρου της τάσης \bar{V} , με αριθμό δειγμάτων n που καθορίζονται από την καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ, με βάση τη σχέση (3.14), που επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$n = \frac{T}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Εφόσον μια χρονική στιγμή $t(k)$ διαπιστωθεί ότι έγινε αλλαγή της λήψης r του ΣΑΤΥΦ ο αντίστοιχος κινητός μέσος της τάσης λαμβάνεται σαν αναφορά, δηλαδή $V_r = \bar{V}(k)$, η οποία συγκρίνεται με την τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου για χρονικό διάστημα που καθορίζεται από από την διαδοχική χρονική καθυστέρηση T και την παράμετρο ϵ_t ως εξής:

$$T_{LA} = T + \epsilon_t \quad (4.3)$$

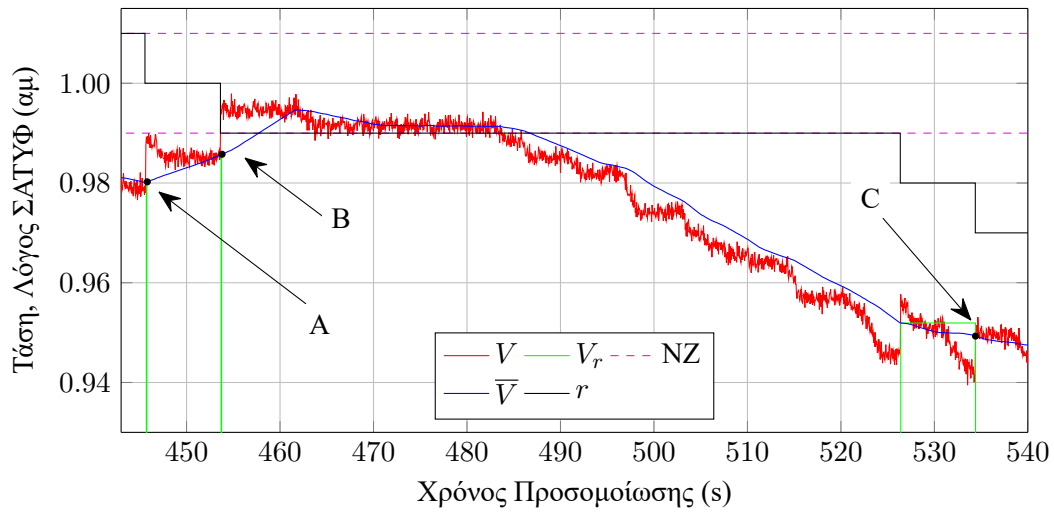
όπου T_{LA} το χρονικό διάστημα παρακολούθησης του κινητού μέσου της τάσης μετά την αλλαγή του λόγου του ΣΑΤΥΦ και ϵ_t ο όρος που καθυστερεί ή επιταχύνει την έκδοση σήματος συναγερμού, ανάλογα με τη διαχείριση που γίνεται από εκεί και πέρα, όπως θα φανεί και στις επόμενες ενότητες.

Αν για το χρονικό διάστημα T_{LA} ο κινητός μέσος της τάσης \bar{V} παραμένει συνεχώς κάτω από την τάση αναφοράς V_r της μεθόδου LIVES σημαίνεται συναγερμός αστάθειας, διαφορετικά, αν υπερβεί την τάση αναφοράς, η μέθοδος επαναφέρεται και περιμένει την επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ για να συνεχίσει την διαδικασία ανίχνευσης. Προφανώς, το ίδιο ισχύει και όταν η ελεγχόμενη τάση εισέλθει εντός της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ.

Όμως, επειδή πολλές φορές ενώ το σύστημα είναι ευσταθές εξωγενείς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η ενεργοποίηση υπερδύεγερσης σε μια απομακρυσμένη γεννήτρια ή ακόμα και θόρυβος μέτρησης, μπορεί να αφήσουν οριακά τον κινητό μέσο όρο της τάσης κάτω από την αντίστοιχη τάση αναφοράς, δίνοντας στην ουσία ψευδή ένδειξη αστάθειας, εισάγεται η ανοχή ϵ_r για την σύγκριση τους. Ως εκ τούτου, συναγερμός αστάθειας σημαίνεται στο τέλος του διαστήματος παρατήρησης T_{LA} όταν καθόλη τη διάρκεια του ο κινητός μέσος όρος \bar{V} παραμένει κάτω από την αντίστοιχη αναφορά V_r και επιπλέον στο τέλος ισχύει:

$$\bar{V}(t_k + T_{LA}) < V_r - \epsilon_r \quad (4.4)$$

¹Στη συνέχεια θα χρησιμοποιείται ο αγγλικός όρος με εξαίρεση όταν γίνεται χρήση του εν λόγω συστήματος αυτόνομα, μόνο για ανίχνευση και χωρίς εφαρμογή προστασίας, οπότε θα χρησιμοποιείται κυρίως ο ελληνικός όρος ΣΑ1. Σε κάθε περίπτωση, ο αγγλικός όρος υποδηλώνει επιπλέον και την αντίστοιχη σήμανση συναγερμού όπως π.χ. σε σχήματα και πίνακες συμβάντων. Το ίδιο ισχύει και για τα υπόλοιπα συστήματα που θα αναφερθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου.



Σχήμα 4.1: Σήμανση συναγεμού αστάθειας από το σύστημα επιτήρησης τάσης ΣΑ1 σε ζυγό ελεγχόμενο από ΣΑΤΥΦ. A & B: σημεία επαναφοράς ΣΑ1, C: συναγεμός αστάθειας, V : (μετρούμενη) τάση δευτερεύοντος, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, V_r : τάση αναφοράς, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη. Πηγή: [VLG10]

Να σημειωθεί εδώ ότι ο αλγόριθμος B.1 έχει υλοποιηθεί με την παραδοχή ότι ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ είναι στην πλευρά του πρωτεύοντος (YT) και η ελεγχόμενη τάση είναι αυτή του δευτερεύοντος (MT), κάτι που συμβαίνει στην πλειοψηφία των μετασχηματιστών υποβιβασμού με ΣΑΤΥΦ, ενώ αποτελεσματικό φιλτράρισμα μεταβατικών και θορύβου επιτυγχάνεται με βήμα δειγματοληψίας της τάξης των 50 ms.

Η λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας γίνεται αντιληπτή από το Σχ. 4.1, όπου φαίνεται η απόκριση της τάσης ενός ελεγχόμενου από ΣΑΤΥΦ ζυγούⁱⁱ. Το συγκεκριμένο ΣΑΤΥΦ έχει συνολική αρχική χρονική καθυστέρηση 39 s (για την πρώτη φορά που η ελεγχόμενη τάση βγει εκτός νεκρής ζώνης) και διαδοχική χρονική καθυστέρηση 8 s (για διαδοχικές κινήσεις όταν η τάση είναι ήδη εκτός NZ), ενώ στην μετρούμενη τάση V έχει προστεθεί και θόρυβος μέτρησης με κανονική κατανομή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το βήμα δειγματοληψίας είναι $\Delta t = 50$ ms, ενώ οι παράμετροι του συστήματος ανίχνευσης ΣΑ1 είναι οι ακόλουθοι:

1. $\epsilon_t = 0$
2. $\epsilon_r = 0$

Στην εξεταζόμενη απόκριση, ήδη από τη χρονική στιγμή περίπου $t = 406$ s η ελεγχόμενη τάση του ΣΑΤΥΦ βρίσκεται εκτός της αντίστοιχης νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα τη χρονική στιγμή $t = 445.65$ s να ενεργοποιείται για πρώτη φορά ο μηχανισμός τουⁱⁱⁱ. Την ίδια χρονική στιγμή η τιμή του κινητού μέσου της τάσης λαμβάνεται σαν αναφορά από το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1. Ωστόσο, επειδή ο κινητός μέσος αρχίζει να αυξάνει αμέσως μετά την αλλαγή του ΣΑΤΥΦ, η μέθοδος ανίχνευσης επαναφέρεται στην επόμενη δειγματοληψία, τη χρονική στιγμή $t = 445.70$ s (σημείο A στο Σχ. 4.1), μέχρι την επόμενη αλλαγή του ΣΑΤΥΦ. Καθώς η ελεγχόμενη τάση εξακολουθεί να είναι εκτός νεκρής ζώνης, αυτή λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 453.65$ s. Η τιμή του κινητού μέσου της τάσης λαμβάνεται

ⁱⁱ Η συγκεκριμένη απόκριση είναι από την εφαρμογή σε σύστημα δοκιμών για οριακή περίπτωση αστάθειας χωρίς προστασία και έχει παρουσιαστεί στο [VLG10].

ⁱⁱⁱ Με τον όρο ενεργοποιείται ουσιαστικά ορίζεται το τέλος της μετάβασης από την προηγούμενη στην καινούργια λήψη, η οποία μετάβαση προφανώς άρχισε προηγούμενη χρονική στιγμή.

και πάλι σαν αναφορά, αλλά επειδή με αυτήν την κίνηση το ΣΑΤΥΦ καταφέρει να επαναφέρει την τάση εντός νεκρής ζώνης έχουμε και πάλι επαναφορά τη χρονική στιγμή $t = 453.70$ s (σημείο Β στο Σχ. 4.1).

Η ρυθμιζόμενη τάση βγαίνει ξανά εκτός νεκρής ζώνης τη χρονική στιγμή $t = 487.40$ s, με αποτέλεσμα το ΣΑΤΥΦ να ενεργοποιηθεί 39 s αργότερα, δηλαδή τη χρονική στιγμή $t = 526.40$ s, οπότε και πάλι ο αντίστοιχος κινητός μέσος της τάσης λαμβάνεται σαν αναφορά και ξεκινά η επιτήρηση του για χρονικό διάστημα ίσο με 8 s. Καθώς όλη αυτή την περίοδο ο κινητός μέσος παραμένει κάτω από την τιμή αναφοράς, τελικά τη χρονική στιγμή $t = 534.40$ s σημαίνεται ο σχετικός συναγερμός LIVES (σημείο C στο Σχ. 4.1). Την ίδια χρονική στιγμή γίνεται και μια ακόμα κίνηση του ΣΑΤΥΦ, η οποία, όπως φαίνεται και από το Σχ. 4.1, δεν επιτυγχάνει να βελτιώσει το προφίλ της τάσης, κάτι που αποδεικνύει ότι η αστάθεια τάσης έχει ήδη αρχίσει να εκδηλώνεται. Να σημειωθεί, για λόγους πληρότητας, ότι το συγκεκριμένο σύστημα κατέρρευσε τη χρονική στιγμή $t = 566.60$ s, δηλαδή 32 s μετά το συναγερμό [VLG10].

4.2 Αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας (ΣΠ1.1)

Το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης ΣΠ1.1 περιλαμβάνει τρία διαφορετικά υποσυστήματα που μπορούν να ενσωματωθούν στον ελεγκτή των ΣΑΤΥΦ και τα οποία είναι:

1. Υποσύστημα επιτήρησης ευστάθειας τάσης LIVES-alarm (LA).
2. Υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LIVES-restore (LR).
3. Υποσύστημα αποκατάστασης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ LTC-range restoration (LTC-rr).

Το πρώτο υποσύστημα είναι το ΣΑ1, που όπως εξηγήθηκε ονομάζεται έτσι όταν εντάσσεται σε συστήματα προστασίας και περιγράφηκε στην Εν. 4.1. Μοναδική απαίτηση για ένταξη του εν λόγω συστήματος ανίχνευσης στο αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας είναι η παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού ϵ_t της (4.3) να είναι ελαφρά αρνητική (π.χ. $\epsilon_t = -0.1$ s), για λόγους συνεργασίας με το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας, όπως θα εξηγηθεί στη παρακάτω. Στη συνέχεια, ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή καθενός από τα υπόλοιπα δύο υποσυστήματα καθώς και μια παραλλαγή του εν λόγω συστήματος προστασίας για εφαρμογή σε δυναμικά επαναφερόμενα φορτία που αποκαθιστούν την ζήτηση.

4.2.1 Υποσύστημα αποκατάσταση ευστάθειας

Το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR είναι υπεύθυνο για την αποκατάσταση της ευστάθειας τάσης, μόλις ανιχνευθεί αστάθεια τάσης και σημαίνει κάποιος συναγερμός από το υποσύστημα επιτήρησης τάσης LA. Μετά το συναγερμό, οποιαδήποτε αλλαγή του ΣΑΤΥΦ με στόχο την αποκατάσταση της τάσης διανομής, θα προκαλέσει περαιτέρω μείωση όλων των τάσεων της περιοχής, συμπεριλαμβανομένης και αυτής του ελεγχόμενου ζυγού, δεδομένου ότι η σήμανση συναγερμού σημαίνει την παραβίαση της ικανής συνθήκης ευστάθειας, βάσει της οποίας μετά από κάθε αλλαγή του ΣΑΤΥΦ η αντίστοιχη τάση θα πρέπει να αυξάνει. Ως εκ τούτου, για την αποκατάσταση της ευστάθειας αντιστρέφεται η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, αναγκάζοντας το να δράσει προς όφελος της τάσης μεταφοράς. Αυτή η αλλαγή θα προκαλέσει μια αύξηση της τάσης και στην πλευρά της διανομής, λόγω του ότι το σύστημα έχει μεταβεί στην ασταθή περιοχή λειτουργίας, ενώ θα αρχίσει στην πορεία να αυξάνεται και η τάση στην πλευρά της μεταφοράς.

Μέχρι να αυξηθεί η τάση μεταφοράς, το ΣΑΤΥΦ θα πρέπει να συνεχίσει να λειτουργεί αντίστροφα. Για αυτόν τον λόγο, όταν ένα ΣΑΤΥΦ έχει αντιστρέψει τη λειτουργία του μετά από έναν συναγερμό LIVES, η ένδειξη της αποκατάστασης της ευστάθειας γίνεται όταν αρχίσει να αυξάνεται η τάση στην πλευρά του πρωτεύοντος (τάση μεταφοράς).

Αν το ΣΑΤΥΦ του οποίου έχει αντιστραφεί η λειτουργία του έχει χρονική καθυστέρηση T , τότε στην k -οστή (αντίστροφη) κίνηση του η αντίστοιχη σχέση που πρέπει να ικανοποιείται για να δοθεί σήμα αποκατάστασης από το υποσύστημα LR είναι:

$$\Delta V_A^k = V_A(kT) - V_A[(k-1)T] > 0 \quad (4.5)$$

όπου V_A^k η τάση του πρωτεύοντος του ΣΑΤΥΦ που έχει αντιστρέψει τη λειτουργία του μετά από ένα συναγερμό LIVES.

Για όσο χρονικό διάστημα η διαφορά ΔV_A^k είναι μικρότερη του μηδενός, το σύστημα εξακολουθεί να βρίσκεται σε κατάσταση ανάγκης, συνεπώς, η αντίστροφη λειτουργία θα πρέπει να συνεχιστεί. Από την άλλη πλευρά, όταν η τάση του πρωτεύοντος V_A αρχίζει να αυξάνει από την συνδυασμένη λειτουργία όλων των ΣΑΤΥΦ, είναι μια ένδειξη ότι δεν παραβιάζονται πλέον οι συνθήκες ευστάθειας και η λειτουργία αποκατάστασης τερματίζεται με επαναφορά της κανονικής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και παράλληλη μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής του ζώνης, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Μετά την αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, το υποσύστημα LA παραμένει ενεργό και εξακολουθεί να επιτηρεί την ευστάθεια τάσης, ούτως ώστε, αν χρειαστεί, να ενεργοποιήσει εκ νέου το υποσύστημα LR.

Η λειτουργία του LR απαιτεί την ενσωμάτωση στον ελεγκτή των ΣΑΤΥΦ του αλγορίθμου B.2, που βρίσκεται στο Παράρτημα B, ο οποίος είναι στην πράξη παρόμοιος με τον αλγόριθμο B.1 του LA, με την διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση ελέγχεται η τάση του πρωτεύοντος. Για το λόγο αυτό υπολογίζεται ο κινητός μέσος όρος της τάσης μεταφοράς, με το ίδιο παράθυρο παρακολούθησης T (την επακόλουθη χρονική καθυστέρηση του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ) και τον ίδιο χρόνο δειγματοληψίας Δt . Σε κάθε αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ, η τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου λαμβάνεται σαν αναφορά για την μετέπειτα παρακολούθηση της εξέλιξης του. Η πιθανή αποκατάσταση της ευστάθειας μέσω της σχέσης (4.5) επιβεβαιώνεται όταν ο κινητός μέσος της τάσης του πρωτεύοντος παραμένει πάνω από την αντίστοιχη τιμή αναφοράς για χρονικό διάστημα T_{LR} ίσο με:

$$T_{LR} = T + \epsilon_{lr} \quad (4.6)$$

όπου ϵ_{lr} είναι ένας μικρός θετικός αριθμός. Ο θετικός αυτός αριθμός εισέρχεται για περισσότερη ασφάλεια στην εκτίμηση της αποκατάστασης της ευστάθειας και στην πράξη σημαίνει ότι αφήνει ακόμα μια αντίστροφη κίνηση να λάβει χώρα πριν την έκδοση σήματος αποκατάστασης.

Εφόσον ο κινητός μέσος της τάσης του πρωτεύοντος παραμένει για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα T_{LR} πάνω από την τιμή αναφοράς, εκδίδεται ένα σήμα αποκατάστασης ευστάθειας τάσης (τέλος συναγερμού) και η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ σταματά. Την ίδια χρονική στιγμή η επιθυμητή τιμή της ελεγχόμενης δευτερεύουσας τάσης V_{ref} (δηλαδή το κέντρο της νεκρής ζώνης) του ΣΑΤΥΦ τίθεται ίση με την τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου όρου \bar{V} της τάσης διανομής, ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία σε αυτό το επίπεδο. Δηλαδή, αν τη χρονική στιγμή $t(k)$ εκδόθηκε σήμα αποκατάστασης ευστάθειας, τότε ισχύει:

$$V_{ref} = \bar{V}(k) \quad (4.7)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η έναρξη της παρακολούθησης του πρωτεύοντος μέσω του αντίστοιχου κινητού μέσου όρου, γίνεται μετά την πρώτη αντίστροφη κίνηση που ακολουθεί έναν συναγερμό LIVES. Επιπλέον, προκειμένου να αποτραπούν ιδιαίτερα χαμηλές τάσεις στην πλευρά της διανομής, λόγω της αντίστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ ή και πιθανού εσφαλμένου συναγερμού LIVES, υιοθετείται ένας μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων n_{rev}^{max} που μπορεί να επιβάλει το υποσύστημα LR σε

κάθε ενεργοποίηση του, ενώ, για τον ίδιο λόγο, επιβάλλεται και ένας μέγιστος αριθμός n_{LR}^{\max} που μπορεί να ενεργοποιηθεί το εν λόγω υποσύστημα.

Η μείωση τάσης αναφοράς V_{ref} της νεκρής ζώνης αντιστοιχεί σε μια *έμμεση αποκοπή φορτίου*, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται από την ευαισθησία του φορτίου από την τάση. Θεωρώντας, για παράδειγμα, ότι τα φορτία πίσω από κάθε ΣΑΤΥΦ είναι εκθετικά, η ενεργός και άεργος ισχύς τους δίνεται συναρτήσει της τάσης βάσει των σχέσεων (2.40) της Υποεν. 2.2.7, οι οποίες και επαναλαμβάνονται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$P = P_o (V/V_o)^\alpha \quad (4.8\alpha)$$

$$Q = Q_o (V/V_o)^\beta \quad (4.8\beta)$$

όπου V_o η ονομαστική τάση του φορτίου, που υποτίθεται ότι είναι ίση με την αρχική τάση αναφοράς του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ ($V_o = V_{ref}^o$) και P_o & Q_o η ενεργός και άεργος αντίστοιχα κατανάλωση ισχύος σε ονομαστική τάση.

Με την μείωση της τάσης αναφοράς V_{ref} του ΣΑΤΥΦ, η αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης του φορτίου μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Delta P = P_o [1 - (V_{ref}/V_{ref}^o)^\alpha] \quad (4.9\alpha)$$

$$\Delta Q = Q_o [1 - (V_{ref}/V_{ref}^o)^\beta] \quad (4.9\beta)$$

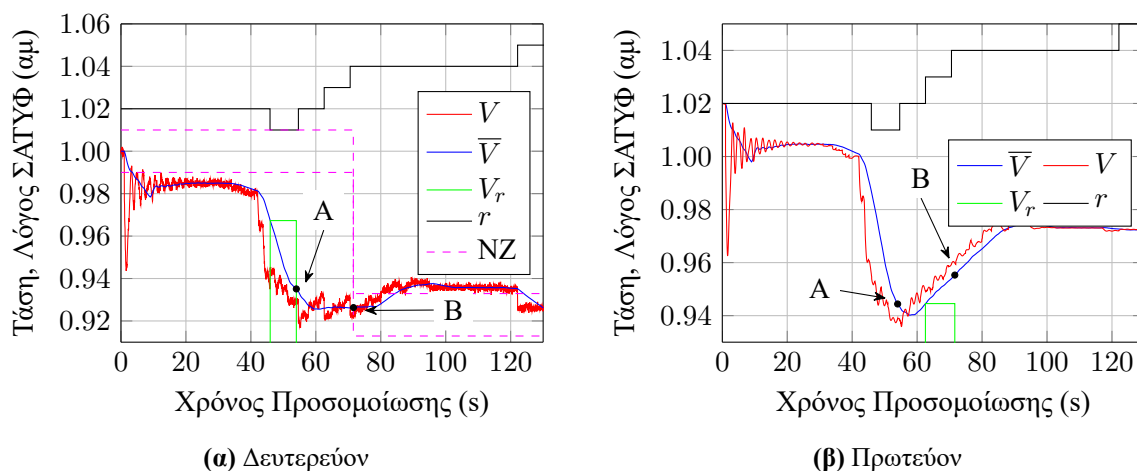
όπου V_{ref}^o , V_{ref} η αρχική και τελική τιμή της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ.

Ο τρόπος που λειτουργεί το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας γίνεται κατανοητός από το Σχ. 4.2, όπου φαίνονται οι αποκρίσεις της τάσης και του λόγου μετασχηματισμού στο πρωτεύον (πλευρά μεταφοράς) και στο δευτερεύον (πλευρά διανομής) ενός ΣΑΤΥΦ^{iv}. Η αρχική χρονική καθυστέρηση του συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ είναι 39 s, η διαδοχική 8 s, το βήμα δειγματοληψίας $\Delta t = 50$ ms και τέλος, οι παράμετροι των υποσυστημάτων LA και LR είναι:

- $\epsilon_t = -0.1$ s
- $\epsilon_r = 0$ αμ
- $n_{rev}^{\max} = 7$
- $n_{LR}^{\max} = 2$

Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο, ακολουθώντας μια διαταραχή που λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 1$ s, η τάση του δευτερεύοντος αρχίζει μια ταλάντωση που την οδηγεί εκτός νεκρής ζώνης τη χρονική στιγμή $t = 6.90$ s. Με την πάροδο της αρχικής χρονικής καθυστέρησης, τη χρονική στιγμή $t = 45.90$ s ενεργοποιείται το ΣΑΤΥΦ και την ίδια χρονική στιγμή ο κινητός μέσος της τάσης δευτερεύοντος λαμβάνεται σαν αναφορά για το υποσύστημα LA (V_r στο Σχ. 4.2α). Καθώς ο αντίστοιχος κινητός μέσος παραμένει συνεχώς κάτω από την τιμή αναφοράς για όλο το διάστημα παρατήρησης $T_i + \epsilon_t = 7.9$ s, τη χρονική στιγμή $t = 53.80$ s σημαίνεται ο αντίστοιχος συναγερμός LIVES (Σημείο A, στα Σχ. 4.2). Όπως έχει επισημανθεί, το χρονικό διάστημα παρακολούθησης του κινητού μέσου είναι ελαφρώς μικρότερο από την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ, ούτως ώστε να αποφευχθεί μια επιπλέον κίνηση του, δεδομένου ότι αμέσως μετά τη σήμανση του συναγερμού, θα αναλάβει τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR, προς όφελος της πλευράς του πρωτεύοντος.

^{iv}Η συγκεκριμένη απόκριση είναι από την εφαρμογή σε σύστημα δοκιμών για σφοδρή περίπτωση αστάθειας και έχει παρουσιαστεί στο [VLG10].



Σχήμα 4.2: Λειτουργία αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας από αστάθεια τάσης ΣΠΙ.1 σε ζυγό ελεγχόμενο από ΣΑΤΥΦ. A: συναγερμός αστάθειας από LA, B: σήμα αποκατάστασης από LR, V : μετρούμενη τάση, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, V_r : τάση αναφοράς κάθε υποσυστήματος, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη. Πηγή: [VLG10]

Όντως, όπως φαίνεται και από τις αποκρίσεις στα Σχ. 4.2, 0.1 s μετά την σήμανση του συναγερμού ενεργοποιείται το υποσύστημα LR, αντιστρέφοντας τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ προς όφελος της μεταφοράς. Η πρώτη αντίστροφη κίνηση δεν μπορεί να αποκαταστήσει την ευστάθεια, οπότε ο κινητός μέσος όρος του πρωτεύοντος αρχίζει να επιτηρείται μετά τη δεύτερη αντίστροφη κίνηση, τη χρονική στιγμή $t = 61.90$ s. Ο κινητός μέσος όρος της τάσης μεταφοράς παρακολουθείται για χρονικό διάστημα ίσο με την χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ συν ϵ_{lr} . Καθώς ο κινητός μέσος της τάσης πρωτεύοντος παραμένει πάνω από την αντίστοιχη τιμή αναφοράς για το απαραίτητο χρονικό διάστημα, τη χρονική στιγμή $t = 71.90$ s εκδίδεται σήμα αποκατάστασης ευστάθειας από το σύστημα LR και την ίδια χρονική στιγμή η τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου όρου του δευτερεύοντος τίθεται σαν αναφορά για τη μείωση της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ (σημείο B στα Σχ. 4.2), εφαρμόζοντας έμμεση αποκοπή φορτίου.

Με αυτήν την κίνηση, το σύστημα εισέρχεται τελικά σε ισορροπία. Μάλιστα, λόγω και της δράσης του αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας σε γειτονικούς ζυγούς, η τάση ανεβαίνει πάνω από την αντίστοιχη νεκρή ζώνη και απαιτείται η ρύθμιση της από το ΣΑΤΥΦ, το οποίο με μία κίνηση τη επαναφέρει εντός, επιβεβαιώνοντας έτσι την αποκατάσταση της ευστάθειας.

4.2.2 Υποσύστημα αποκατάσταση λειτουργίας ΣΑΤΥΦ

Καθώς η μέθοδος LIVES στηρίζεται σε μετρήσεις και σύγκριση της δευτερεύουσας τάσης μετά από κάθε αλλαγή των ΣΑΤΥΦ, είναι ουσιώδους σημασίας για το LA να αποκαθίσταται η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ, όταν αυτά φτάνουν στα όρια των διαθέσιμων λήψεων.

Για τον σκοπό αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί το υποσύστημα αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC-rr. Αυτό το υποσύστημα στηρίζεται στην παρατήρηση ότι ο ελεγχόμενος από το αντίστοιχο εξαντλημένο ΣΑΤΥΦ ζυγός, ούτως ή άλλως, υποφέρει από χαμηλή τάση (καθώς η εν λόγω τάση δεν μπορεί πλέον να ρυθμιστεί) [VS08]. Ως εκ τούτου, το υποσύστημα LTC-rr ελέγχει αν το εκάστοτε ΣΑΤΥΦ έχει εξαντλήσει τις διαθέσιμες λήψεις και, σε περίπτωση που κάτι τέτοιο ισχύει, μειώνει την τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ στην πλευρά της διανομής (V_{ref}) κατά ένα σταθερό ποσοστό (π.χ. 5%). Μια τέτοια κίνηση φέρνει, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, την ελεγχόμενη τάση πάνω από την αντίστοιχη νέα νεκρή ζώνη, με αποτέλεσμα να ξεμπλοκαριστεί το ΣΑΤΥΦ καθώς θα αυξήσει το λόγο μετασχηματισμού για να επαναφέρει την τάση εντός νεκρής ζώνης.

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης λειτουργίας θα πρέπει στον ελεγκτή των ΣΑΤΥΦ να ενσωματωθεί ο αλγόριθμος B.3 του Παραρτήματος Β. Όπως και τα άλλα δύο υποσυστήματα, LA και LR, έτσι και αυτός στηρίζεται στον κινητό μέσο όρο της τάσης του δευτερεύοντος, που ούτως ή άλλως έχει υπολογιστεί για το LA, και η λειτουργία του είναι η ακόλουθη:

1. Αν τη χρονική στιγμή $t(k)$ το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ είναι εξαντλημένο, δηλαδή ενώ ο κινητός μέσος όρος της δευτερεύουσας τάσης είναι κάτω από την αντίστοιχη νεκρή ζώνη^v και έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση ενώ η λήψη του ΣΑΤΥΦ βρίσκεται στο κάτω όριο (r_{\min}), τότε η τιμή του κινητού μέσου της τάσης $\bar{V}(k)$, την ίδια χρονική στιγμή λαμβάνεται σαν αναφορά V_r από το υποσύστημα LTC-rr. Δηλαδή: $V_r = \bar{V}(k)$
2. Αν ο κινητός μέσος όρος \bar{V} παραμένει κάτω από την τιμή αναφοράς V_r για χρονικό διάστημα ακριβώς ίσο με τη χρονική καθυστέρηση T του ΣΑΤΥΦ, τότε η τάση αναφοράς αναφοράς της νεκρής ζώνης μειώνεται κατά 5%, διαφορετικά (αν ο κινητός μέσος ανέβει πάνω από την τιμή αναφοράς) η τιμή αναφοράς V_r του LTC-rr ενημερώνεται με την τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου \bar{V} και αυτό το βήμα επαναλαμβάνεται.
3. Η λειτουργία του υποσυστήματος LTC-rr αναστέλλεται στις ακόλουθες περιπτώσεις:
 - είτε με την επαναφορά του κινητού μέσου όρου της τάσης εντός της νεκρής ζώνης,
 - είτε με την εντολή μείωσης της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης (ενεργοποίηση του υποσυστήματος),
 - είτε, τέλος, με μεταβολή της λήψης του ίδιου του ΣΑΤΥΦ (ώστε $r > r_{\min}$), π.χ. λόγω διορθωτικών κινήσεων σε γειτονικούς ζυγούς.

Το βήμα 2 είναι απαραίτητο ούτως ώστε να αποφευχθεί μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ όταν η ελεγχόμενη τάση αρχίζει να αυξάνεται λόγω διορθωτικών μέτρων του συστήματος προστασίας. Επιπλέον, για την αποφυγή μείωσης της τάσης του δευτερεύοντος σε πολύ χαμηλά επίπεδα, η ενεργοποίηση του συστήματος αποκατάστασης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ μπορεί να γίνει μέχρι και δύο φορές ($n_{\text{LTC-rr}}^{\max} = 2$) και για τάσεις δευτερεύοντος μεγαλύτερες από 90% της ονομαστικής τιμής ($V > V_{\text{LTC-rr}}^{\text{thres}} = 0.90 \text{ αμ}$).

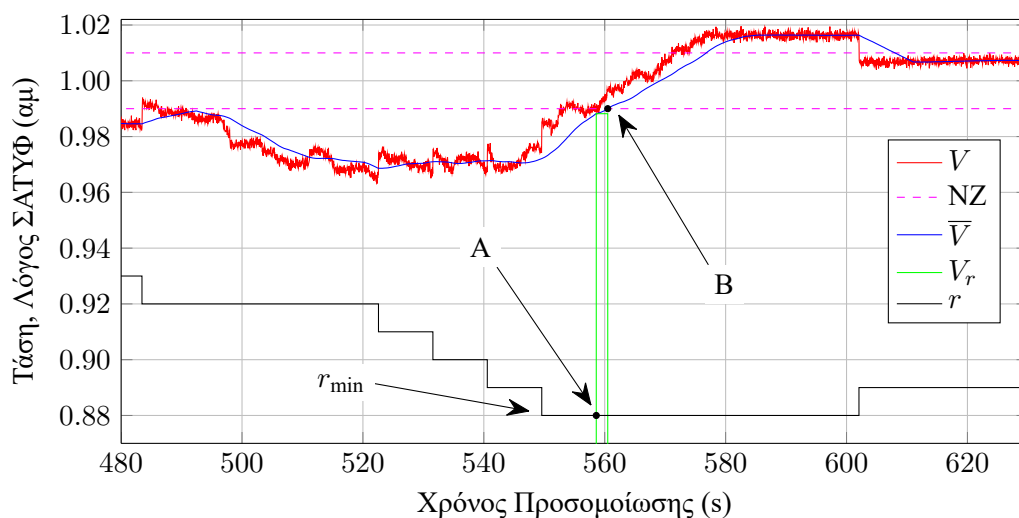
Η αναστολή της λειτουργίας του LTC-rr μπορεί να γίνει αντιληπτή από το Σχ. 4.3, όπου απεικονίζονται η απόκριση της ελεγχόμενης τάσης V , ο αντίστοιχος κινητός μέσος \bar{V} και ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ r σε έναν ελεγχόμενο ζυγό, στον οποίο έχει ενσωματωθεί το υποσύστημα LTC-rr^{vi}. Το συγκεκριμένο ΣΑΤΥΦ έχει διαδοχική χρονική καθυστέρηση $T = 9 \text{ s}$, το κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού του είναι $r_{\min} = 0.88 \text{ αμ}$ και η περίοδος δειγματοληψίας είναι $\Delta t = 50 \text{ ms}$.

Στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο, τη χρονική στιγμή $t = 549.6 \text{ s}$ το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ εξαντλεί τον λόγο μετασχηματισμού του, φτάνοντας στο κάτω όριο r_{\min} . Ως εκ τούτου, με τη συμπλήρωση της χρονικής καθυστέρησης των 9 s, καθώς ο κινητός μέσος της τάσης \bar{V} είναι κάτω από την αντίστοιχη νεκρή ζώνη, το ΣΑΤΥΦ θεωρείται πλέον εξαντλημένο (σημείο Α στο Σχ. 4.3). Την ίδια χρονική στιγμή, ο κινητός μέσος όρος λαμβάνεται ως αναφορά V_r , αλλά καθώς ο κινητός μέσος \bar{V} συνεχίζει να αυξάνει και εν τέλει, εισέρχεται εντός της νεκρής ζώνης, το σύστημα LTC-rr αναστέλλει τη λειτουργία του τη χρονική στιγμή $t = 560.5 \text{ s}$ (σημείο Β)^{vii}.

^vΧρησιμοποιείται ο κινητός μέσος και όχι η μετρούμενη τιμή της τάσης για να φιλτραριστεί ο θόρυβος μέτρησης και κάποια μεταβατικά που μπορεί να υπάρχουν, ώστε να μην υπάρχει αμφιβολία για οριακές περιπτώσεις σε σχέση με το αν η τάση βρίσκεται εντός ή εκτός της αντίστοιχης νεκρής ζώνης.

^{vi}Η συγκεκριμένη απόκριση είναι από την εφαρμογή σε σύστημα δοκιμών για οριακή περίπτωση αστάθειας με εφαρμογή προστασίας και έχει παρουσιαστεί στο [VLG10].

^{vii}Καθώς σε κάθε δειγματοληψία ο κινητός μέσος όρος της τάσης βρίσκεται πάνω από την αντίστοιχη τιμή αναφοράς V_r , η τάση αυτή ενημερώνεται συνεχώς με τη νέα τιμή, αλλά αυτό δεν φαίνεται στο Σχ. 4.3 για λόγους ευκρίνειας.



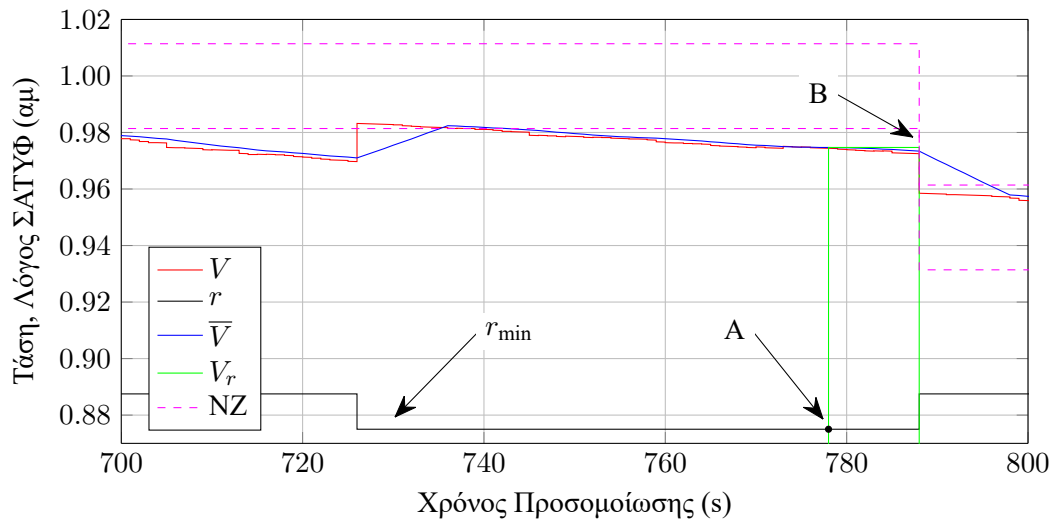
Σχήμα 4.3: Αναστολή λειτουργίας υποσυστήματος αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ. Α: εξάντληση του ΣΑΤΥΦ, Β: ο κινητός μέσος εισέρχεται στη νεκρή ζώνη, V : τάση δευτερεύοντος, V_r : τάση αναφοράς υποσυστήματος, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη. Πηγή: [VLG10]

Μια άλλη χαρακτηριστική περίπτωση, με ενεργοποίηση LTC-rr, φαίνεται στο Σχ. 4.4, όπου απεικονίζεται και πάλι η απόκριση της ελεγχόμενης τάσης, ο αντίστοιχος κινητός μέσος και ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ σε έναν ελεγχόμενο ζυγό με το εν λόγω υποσύστημα εγκατεστημένο^{viii}.

Σε αυτήν την περίπτωση η αρχική χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ είναι $T_1 = 40$ s και η διαδοχική χρονική καθυστέρηση $T_2 = 10$ s, ενώ το βήμα δειγματοληψίας είναι $\Delta t = 1$ s. Όπως φαίνεται από τις αποκρίσεις του ελεγχόμενου ζυγού, τη χρονική στιγμή $t = 726$ s το ΣΑΤΥΦ κάνει μια τελευταία κίνηση πριν φτάσει το όριο των διαθέσιμων λήψεων ($r_{\min} = 0.875$ αμ), η οποία ωστόσο είναι αρκετή για να φέρει παροδικά την ελεγχόμενη τάση εντός της νεκρής ζώνης. Τελικά την χρονική στιγμή $t = 738$ s η ελεγχόμενη τάση βγαίνει και πάλι εκτός νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα 40 s αργότερα, καθώς δεν υπάρχουν πλέον διαθέσιμες λήψεις, το ΣΑΤΥΦ να θεωρείται εξαντλημένο (σημείο Α στο Σχ. 4.4) και η αντίστοιχη τιμή του κινητού μέσου της τάσης \bar{V} λαμβάνεται σαν αναφορά V_r . Καθώς για τα επόμενα 10 s η ελεγχόμενη τάση παραμένει κάτω από τη νεκρή ζώνη και ο αντίστοιχος κινητός μέσος μειώνεται συνεχώς, την χρονική στιγμή $t = 778$ s ενεργοποιείται το υποσύστημα LTC-rr και η τιμή αναφοράς της νεκρής ζώνης μειώνεται κατά 5% (σημείο Β στο Σχ. 4.4). Η μείωση αυτή της τάσης αναφοράς ήταν αρκετή ώστε να φέρει τη νεκρή ζώνη κάτω από την τρέχουσα τιμή της τάσης με αποτέλεσμα την ίδια χρονική στιγμή το ΣΑΤΥΦ, που ήταν αναμενόμενο να δράσει καθώς είχε ήδη συμπληρωθεί η απαραίτητη χρονική καθυστέρηση, να αυξήσει τον λόγο μετασχηματισμού του πάνω από το όριο διαθέσιμων λήψεων, όπως φαίνεται από την αντίστοιχη απόκριση r του Σχ. 4.4.

Σκοπός του υποσυστήματος LTC-rr είναι να αποκαθιστά την ελεγχσιμότητα της τάσης διανομής και ως εκ τούτου, να επιτρέπει στον αλγόριθμο LIVES να παραμένει ενεργός ώστε να μπορεί να εντοπίσει μια πιθανή αστάθεια και να την διορθώσει, μέσω των συστημάτων LA και LR αντίστοιχα. Όπως και στην περίπτωση που ενεργοποιηθεί το σύστημα LR, έτσι και εδώ, η μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης αντιστοιχεί σε μια έμμεση αποκοπή φορτίου, που μπορεί να υπολογιστεί και πάλι με τη σχέση (4.9). Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πως ούτως ή άλλως με το ΣΑΤΥΦ εξαντλημένο, χωρίς δυνατότητα ρύθμισης, η τάση της διανομής θα μειωθεί και μάλιστα χωρίς έλεγχο,

^{viii} Η συγκεκριμένη απόκριση είναι από την εφαρμογή στο σύστημα της Πελοποννήσου που παρουσιάζεται στην Παρ. 5.3.3.2 ενώ μέρος των αποτελεσμάτων έχει παρουσιαστεί και στα [You12, LVC13].



Σχήμα 4.4: Ενεργοποίηση υποσυστήματος αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ. Α: εξάντληση του ΣΑΤΥΦ, Β: ενεργοποίηση υποσυστήματος με μείωση της νεκρής ζώνης κατά 5%, V : τάση δευτερεύοντος, V_r : τάση αναφοράς υποσυστήματος, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη. Πηγή: [LVC13]

μειώνοντας τις αντίστοιχες καταναλώσεις των φορτίων.

4.2.3 Παραλλαγή με άμεση αποκοπή φορτίου (ΣΠ1.2)

Σε περιπτώσεις που υπάρχουν δυναμικά αυτοεπαναφερόμενα φορτία η έμμεση αποκοπή φορτίου που επιτυγχάνεται από το ΣΠ1.1 δεν είναι επαρκής για αποκατάσταση της ευστάθειας και απαιτείται άμεση αποκοπή φορτίου, όπως αναφέρεται και στα [MLV11, LMV11]. Με άλλα λόγια, αν υπάρχει αποκατάσταση της ζήτησης στα κατάντη των ΣΑΤΥΦ, η ανακούφιση του συστήματος με έμμεση αποκοπή θα είναι μόνο προσωρινή και η επιδείνωση των τάσεων θα συνεχιστεί λόγω της δυναμικής των φορτίων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1 είτε θα οδηγήσει σε πολύ χαμηλά προφίλ τάσεων, είτε αν έχει επιλεγεί συγκεκριμένος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών n_{LR}^{max} , θα καταστεί εντέλει ανενεργό.

Για αυτό το λόγο, μπορούν να υιοθετηθούν κατώφλια για την τάση πρωτεύοντος V_1^{thres} και δευτερεύοντος V_2^{thres} , κάτω από τα οποία, όταν και αν σημειωθεί συναγερμός LIVES, δεν ενεργοποιείται το σύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR αλλά εφαρμόζεται άμεση αποκοπή φορτίου. Για τον ίδιο λόγο αν υπάρχει ήδη ενεργός συναγερμός αστάθειας και είναι σε εξέλιξη η προσπάθεια αποκατάστασης από το υποσύστημα LR αλλά είτε η τάση πρωτεύοντος είτε η τάση δευτερεύοντος πέσουν κάτω από τα προαναφερθέντα κατώφλια, τότε εφαρμόζεται και πάλι άμεση αποκοπή φορτίου, σταματώντας ταυτόχρονα και την λειτουργία του υποσυστήματος LR. Να σημειωθεί εδώ ότι το κατώφλι για το δευτερεύον χρησιμοποιείται και από το υποσύστημα αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC-rr. Δηλαδή, αν η δευτερεύουσα τάση είναι κάτω από το εν λόγω κατώφλι, αντί για μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης εφαρμόζεται επίσης αποκοπή φορτίου (κατά το ίδιο ποσοστό όπως και στην περίπτωση του συναγερμού αστάθειας), με στόχο την αποκατάσταση της λειτουργικότητας των ΣΑΤΥΦ.

Τα κατώφλια μπορούν να επιλεγούν της τάξεως του 80% για το πρωτεύον και 90% για το δευτερεύον ενώ το ποσοστό αποκοπής ίσο περίπου με 5%, με δυνατότητα επαναλαμβανόμενης λειτουργίας (προστασία κλειστού βρόχου). Στην πράξη, το διαθέσιμο φορτίο για αποκοπή εξαρτάται από τον αριθμό και τον τύπο των αναχωρήσεων που συνδέονται στη πλευρά της διανομής και η επιλογή τους απαιτεί λεπτομερή μελέτη κατά τη φάση ανάπτυξης του συστήματος. Παρόλα αυτά, εφόσον επιλεγούν, τα φορτία

για αποκοπή, θα αποσυνδέονται αυτόματα, χωρίς τη χρήση κεντρικού ελέγχου.

Η παραλλαγή του ΣΠ1.1 με ενσωματωμένα τα ανωτέρω χαρακτηριστικά της άμεσης αποκοπής φορτίου θα αναφέρεται στη συνέχεια σαν ΣΠ1.2 και οι παράμετροι του πέραν αυτών του ΣΠ1.1 είναι επιπλέον οι εξής:

- Κατώφλια τάσης.
- Ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή.
- Αριθμός εφαρμογών άμεσης αποκοπής φορτίου.

4.3 Άμεση αποκοπή φορτίου βασισμένη στη μέθοδο LIVES (ΣΠ1.3)

Η άμεση αποκοπή φορτίου είναι το έσχατο μέτρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση της ευστάθειας. Χρησιμοποιείται τόσο σε τοπικά (αποκεντρωμένα) όσο και σε ευρείας περιοχής συστήματα προστασίας, κυρίως μέσω της εφαρμογής *αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης* (Undervoltage Load-Shedding - UVLS) [Tay94].

Η εν λόγω εφαρμογή είναι αρκετά διαδεδομένη, εξαιτίας της φθηνής και εύκολης υλοποίησης η οποία απαιτεί μόνο μια ρύθμιση σε υπάρχοντες ηλεκτρονόμους προστασίας, ενώ η βασική αρχή λειτουργίας της είναι ότι εφαρμόζει αποκοπή φορτίου όταν η τάση που επιτηρείται παραμένει κάτω από ένα κατώφλι (της τάξης του 0.85 αμ έως 0.95 αμ) για ένα χρονικό διάστημα ορισμένων δευτερολέπτων. Στις περιπτώσεις τοπικών συστημάτων προστασίας οι αποκοπές γίνονται στον υποσταθμό που παρατηρείται η παραβίαση του κατωφλίου τάσης, ενώ σε συστήματα ευρείας περιοχής οι αποκοπές μπορούν να γίνουν χειροκίνητα ή αυτόματα σε προαποφασισμένους ζυγούς με βάση διεσπαρμένες μετρήσεις τάσεων σε διάφορα σημεία.

Καθώς τα συγκεκριμένα συστήματα δεν αναγνωρίζουν απευθείας την αστάθεια αλλά τα αποτελέσματα της, μπορεί να οδηγηθούν και σε εσφαλμένες αποκοπές, ιδιαίτερα σε περίπτωση που τα προφίλ των τάσεων είναι χαμηλά για άλλους λόγους. Ως εκ τούτου, η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας LIVES θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να διαμορφώσει δυναμικά τις τάσεις κατωφλίου για την ενεργοποίηση της αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης. Δεδομένου ότι η μέθοδος LIVES ανιχνεύει τοπικά την αστάθεια στους ζυγούς MT των μετασχηματιστών διανομής που ελέγχονται από ΣΑΤΥΦ, είναι απαραίτητο για την συγκεκριμένη εφαρμογή να υπάρξει και ένα σύστημα τηλεμέτρησης.

Συγκεκριμένα, όταν σημαίνεται συναγερμός LIVES σε μια περιοχή στην οποία θα εφαρμοστεί η UVLS, το σήμα αυτό (LIVES) θα πρέπει να τηλεμεταφερθεί στον ηλεκτρονόμο που θα υλοποιήσει την συγκεκριμένη προστασία, ούτως ώστε να μπορέσει δυναμικά να διαμορφωθεί η τάση κατωφλίου για την ενεργοποίηση της άμεσης αποκοπής φορτίου, ως εξής:

$$V_{LS} = V(t_{alarm}) - \epsilon_{ls} \quad (4.10)$$

όπου V_{LS} είναι η τάση κατωφλίου του ζυγού που επιτηρείται από το σύστημα UVLS, $V(t_{alarm})$ η τιμή της τάσης του συγκεκριμένου ζυγού τη στιγμή του συναγερμού LIVES και ϵ_{ls} ένα προκαθορισμένο ποσοστό για επιπλέον ασφάλεια.

Μια εναλλακτική προσέγγιση αφορά την αποκοπή φορτίου σε όλη την περιοχή, εφόσον εκδοθούν στην συγκεκριμένη περιοχή δύο συναγερμοί LIVES, με μικρή χρονική διαφορά μεταξύ τους. Σε αυτήν την περίπτωση δεν απαιτείται η ύπαρξη κατωφλίου τάσης, το μόνο που χρειάζεται είναι μόνο η μετάδοση των σημάτων συναγερμού στους ηλεκτρονόμους που θα υλοποιήσουν την αποκοπή φορτίου.

Τέλος, μπορεί να αποκοπεί απευθείας φορτίο από τον αντίστοιχο υποσταθμό του ΣΑΤΥΦ που σημάνθηκε ένας συναγερμός LIVES. Αυτή είναι και η παραλλαγή που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής με το όνομα ΣΠ1.3.

Το σύστημα προστασίας ΣΠ1.3 αποτελείται από το υποσύστημα LA, το οποίο μόλις ανιχνεύσει μια πιθανή κατάσταση αστάθειας εκδίδει συναγερμό και ένα προκαθορισμένο ποσοστό από το φορτίο του συγκεκριμένου υποσταθμού αποσυνδέεται. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι από 2% έως 15%, με δυνατότητα επαναληπτικής εφαρμογής, αν απαιτείται, ενώ μπορεί να δράσει και μέχρι έναν προκαθορισμένο αριθμό εφαρμογών.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ποσοστό αποκοπής και ο μέγιστος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών στην πράξη δεν είναι σταθεροί αλλά εξαρτώνται από τη συνδεσμολογία της MT των υποσταθμών και συγκεκριμένα από τον αριθμό των μη κρίσιμων αναχωρήσεων (feeders) που είναι διαθέσιμοι για αποκοπή. Καθώς η συγκεκριμένη πληροφορία δεν είναι διαθέσιμη κατά την προσομοίωση των εν λόγω συστημάτων, οι παράμετροι αυτοί παραμένουν σταθεροί και ίδιοι για όλους τους μετασχηματιστές που έχουν το ΣΠ1.3.

Σε αντιδιαστολή με το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, ο χρόνος επιτήρησης T_{LA} του κινητού μέσου όρου της ελεγχόμενης δευτερεύουσας τάσης για την έκδοση συναγερμού από το υποσύστημα LA μπορεί να είναι και ίσος ή μεγαλύτερος από την αντίστοιχη καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ για αυξημένη ασφάλεια πριν την εφαρμογή της αποκοπής φορτίου. Συγκεκριμένα, η παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού ϵ_t της σχέσης (4.3) λαμβάνεται μεταξύ -10^{-5} και 1 s.

Συγκεντρωτικά οι παράμετροι εφαρμογής του εν λόγω συστήματος προστασίας είναι:

- Παράμετροι ΣΑ1
- Ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή.
- Αριθμός εφαρμογών.

4.4 Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας βασισμένο σε μετρήσεις φασιθετών (ΣΑ2)

Στην Εν. 3.2 αποδείχτηκε ότι για ένα ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες, ο δείκτης NLI μπορεί να παρέχει ακριβή ένδειξη για το σημείο αστάθειας, ενώ για βροχοειδή δίκτυα με απώλειες μπορεί να δώσει μια πολύ καλή προσέγγιση για την επερχόμενη αστάθεια σε μια ευάλωτη περιοχή που τροφοδοτείται μέσω ενός συγκεκριμένου διαδρόμου μεταφοράς. Στην παρούσα ενότητα αναφέρονται τα πρακτικά βήματα για τον υπολογισμό του δείκτη NLI, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ένα σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης που στηρίζεται σε συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος σε έναν συνοριακό ζυγό μεταφοράς.

Μια πρακτική δυσκολία για τον υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο του δείκτη NLI (παρόμοια με αυτή για την εκτίμηση των παραμέτρων του ισοδύναμου Thévenin) είναι ότι στηρίζεται σε υπολογισμούς των μεταβολών ΔG και ΔP , οι οποίες πρέπει σωστά να ορισθούν και να φιλτραριστούν ώστε να αποφευχθεί ο λανθασμένος υπολογισμός του δείκτη, που οφείλεται σε θόρυβο μέτρησης ή σε τυχαίες μεταβολές των βραχυπρόθεσμων δυναμικών στοιχείων του συστήματος, όπως είναι οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που εμφανίζονται μετά από μια διαταραχή.

Θεωρώντας μια ευάλωτη περιοχή ενός ΣΗΕ που τροφοδοτείται από το υπόλοιπο σύστημα μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς, τότε, αν σε κάθε συνοριακό ζυγό άφιξης της ευάλωτης περιοχής υπάρχουν μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU) τάσης και ρεύματος, η μεταφερόμενη από το διάδρομο ενεργός ισχύς P μέσω κάθε συνοριακού ζυγού και η αντίστοιχη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G , μπορούν να υπολογιστούν με βάση τις σχέσεις (3.53), οι οποίες επαναλαμβάνονται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$P = \text{Re} \left\{ \tilde{V} \tilde{I}^* \right\} \quad (4.11\alpha)$$

$$G = \text{Re} \left\{ \tilde{I} / \tilde{V} \right\} \quad (4.11\beta)$$

όπου \tilde{V} ο φασιθέτης τάσης του συνοριακού ζυγού και \tilde{I} ο φασιθέτης του μεταφερόμενου από τον διάδρομο ρεύματος, στον ίδιο συνοριακό ζυγό^{ix}.

Υποθέτοντας ότι οι μονάδες μέτρησης φασιθετών μπορούν να προσφέρουν μετρήσεις σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα (της τάξης π.χ. των 20 ms), αφού υπολογιστούν η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G και η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς P , βάσει των (4.11), ένα πρώτο βήμα για τον υπολογισμό των δεικτών είναι η εξαγωγή χρονοσειρών κινητών μέσων όρων \bar{G} και \bar{P} , υπολογιζόμενων σε κάθε συνοριακό ζυγό που επιτηρείται ως εξής:

$$\bar{G}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} G(t - i\Delta t_s) \quad (4.12\alpha)$$

$$\bar{P}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P(t - i\Delta t_s) \quad (4.12\beta)$$

όπου N ο αριθμός των δειγμάτων και Δt_s η περίοδος δειγματοληψίας.

Χρησιμοποιώντας $N = 50$ και $\Delta t_s = 20$ ms, οι κινητοί μέσοι όροι υπολογίζονται σε ένα χρονικό παράθυρο 1 s. Επιπλέον, καθώς δεν υπάρχει ανάγκη για πολύ γρήγορες ενημερώσεις του δείκτη, οι κινητοί μέσοι (4.12) υφίστανται και αυτοί με τη σειρά τους δειγματοληψία με βήμα Δt (π.χ. $\Delta t = 1$ s), τις χρονικές στιγμές t_k , για τις οποίες ισχύει:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta t, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.13)$$

Με στόχο να υπολογιστεί η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των μεταβολών της ενεργού ισχύος και της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας, εξαλείφοντας τα γρήγορα μεταβατικά, οι διαφορές ΔP και ΔG υπολογίζονται σε ακόμα μεγαλύτερο διάστημα ΔT (π.χ. $\Delta T = 3 \dots 10$ s, ανάλογα την εφαρμογή), με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Delta G(t_k) = \begin{cases} \bar{G}(t_k) - \bar{G}(t_k - t_1), & \text{αν } 1 < k/\Delta t \leq \Delta T/\Delta t \\ \bar{G}(t_k) - \bar{G}(t_k - \Delta T), & \text{αν } k/\Delta t > \Delta T/\Delta t \end{cases} \quad (4.14\alpha)$$

$$\Delta P(t_k) = \begin{cases} \bar{P}(t_k) - \bar{P}(t_k - t_1), & \text{αν } 1 < k/\Delta t \leq \Delta T/\Delta t \\ \bar{P}(t_k) - \bar{P}(t_k - \Delta T), & \text{αν } k/\Delta t > \Delta T/\Delta t \end{cases} \quad (4.14\beta)$$

Καθώς τα σήματα $\Delta G(t_k)$ και $\Delta P(t_k)$ εμπεριέχουν θόρυβο που οφείλεται σε μεταβατικά φαινόμενα (π.χ. υπερδιεγέρσεις γεννητριών, κινήσεις ΣΑΤΥΦ) αλλά και σε μετρήσεις, είναι απαραίτητο το περαιτέρω φιλτράρισμα αυτών των σημάτων.

Το πρώτο βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η απόρριψη μετρήσεων με αμελητέα μεταβολή στην φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G , όταν στην ανωτέρω περίοδο παρατήρησης μεταβολών ΔT δεν υπάρχουν σημαντικές αλλαγές στο φορτίο. Επιπλέον, καθώς ο στόχος είναι η επιτήρηση της ευστάθειας τάσης σε περίπτωση αύξησης της ζήτησης του φορτίου, αρνητικές τιμές του ΔG επίσης απορρίπτονται.

Από την άλλη πλευρά, οι μεταβολές στην καταναλισκόμενη ισχύ, όπως αντικατοπτρίζεται στις μεταβολές της μεταφερόμενης από το διάδρομο ενεργό ισχύ, πρέπει να μπορούν να πάρουν και αρνητικές τιμές (εξάλλου από αυτές θα διαπιστωθεί πως η κατανάλωση στην ευάλωτη περιοχή έχει φτάσει σε ένα μέγιστο). Επομένως η απόρριψη μετρήσεων με αμελητέα μεταβολή στην κατανάλωση πρέπει να γίνεται και για θετικές και για αρνητικές τιμές.

^{ix}Για τον ορισμό του διαδρόμου μεταφοράς, των συνοριακών ζυγών και του μεταφερόμενου ρεύματος βλ. Παρ. 3.2.2.2, σελ. 88.

Με βάση τις ανωτέρω προϋποθέσεις, οι τιμές των $\Delta G(t_k)$ και $\Delta P(t_k)$ των (4.14) αποθηκεύονται και κρατούνται ως εξής:

$$m = m + 1 \Rightarrow \begin{cases} \Delta G_m &= \Delta G(t_k) \\ \Delta P_m &= \Delta P(t_k) \end{cases} \quad (4.15)$$

εάν και μόνο εάν, την στιγμή t_k ισχύουν ταυτόχρονα οι ακόλουθες συνθήκες:

$$\Delta G(t_k)/G(t_k - \Delta T) \geq \epsilon_G \quad (4.16\alpha)$$

$$|\Delta P(t_k)/P(t_k - \Delta T)| \geq \epsilon_P \quad (4.16\beta)$$

όπου ϵ_G & ϵ_P το κατώφλι απόρριψης μεταβολών φαινόμενης αγωγιμότητας και μεταφερόμενης ενεργού ισχύος αντίστοιχα, ενώ κάθε φορά που οι σχέσεις (4.16) δεν ισχύουν, οι μετρήσεις απορρίπτονται και δεν αποθηκεύονται.

Ένα επιπλέον φιλτράρισμα γίνεται λαμβάνοντας κινητούς μέσους όρους για τα ΔG_m και ΔP_m με N δείγματα, ως εξής:

$$\overline{\Delta G}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta G_{m-i} \quad (4.17\alpha)$$

$$\overline{\Delta P}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta P_{m-i} \quad (4.17\beta)$$

όπου για τα πρώτα $m = 1, \dots, N - 1$ δείγματα ΔG_m και ΔP_m , μετά από επανεκκίνηση της μεθόδου, το N στη σχέσεις (4.17) αντικαθίσταται από την τρέχουσα τιμή του m .

Από τις συγκεκριμένες τιμές ο δείκτης NLI υπολογίζεται σε δύο βήματα. Σε πρώτη φάση υπολογίζεται απευθείας μια προσωρινή τιμή του δείκτη, ως το πηλίκο της σχέσης (4.17β) προς την (4.17α). Το δεύτερο και τελικό βήμα αφορά την εφαρμογή ενός φιλτραρίσματος για λόγους εξομάλυνσης σε αυτήν την προσωρινή τιμή του δείκτη μέσω της χρήσης κινητού μέσου όρου 10 δειγμάτων.

Συγκεκριμένα, η προσωρινή τιμή του NLI υπολογίζεται στο βήμα m με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$NLI_m^{temp} = \frac{\overline{\Delta P}_m}{\overline{\Delta G}_m} \quad (4.18)$$

ενώ η τελική τιμή του δείκτη εξομαλύνεται ως εξής:

$$NLI_m = \frac{1}{10} \sum_{i=0}^9 NLI_{m-i}^{temp} \quad (4.19)$$

Όταν ο NLI_m αλλάζει πρόσημο σημαίνεται συναγερμός από τον ελεγκτή του αντίστοιχου οριακού ζυγού και το σύστημα μπαίνει σε κατάσταση επιτήρησης. Το σήμα αυτό μπορεί να μεταδοθεί με σύστημα τηλεειδοποίησης στο ΚΕΕ ώστε είτε να χρησιμοποιηθεί από κάποιο αυτόματο κεντρικό σύστημα προστασίας (που περιλαμβάνει π.χ. συγκεκριμένες αποκοπές φορτίου), είτε για ενημέρωση των διαχειριστών του δικτύου. Επιπλέον, όταν παραβιάζεται η σχέση (4.16β), ενώ ισχύει η σχέση (4.16α), μπορεί να εκδοθεί σχετική προειδοποίηση (warning): *Αύξηση φαινόμενης αγωγιμότητας ενώ η μεταβολή της μεταφερόμενης ισχύος είναι κοντά στο μηδέν*. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να ειδοποιηθεί το ΚΕΕ, επιστώντας αυξημένη προσοχή στους διαχειριστές, ότι ενώ η φαινόμενη από τον αντίστοιχο συνοριακό ζυγό ωμική αγωγιμότητα (ζήτηση) αυξάνεται η αντίστοιχη μεταφερόμενη ισχύς από τον εν λόγω ζυγό δεν μεταβάλλεται σημαντικά.

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι ο ίδιος ο δείκτης NLI δεν χρειάζεται αρχικοποίηση. Αρχίζει και υπολογίζεται την πρώτη φορά που ικανοποιούνται οι σχέσεις (4.16) και διατηρεί την τρέχουσα τιμή μέχρις ότου μεταβληθεί ξανά, ενώ σε περίπτωση εφαρμογής διορθωτικών μέτρων, μετά την ανίχνευση αστάθειας, θα μπορούσε να γίνει ταυτόχρονα και επαναφορά (reset) του δείκτη.

4.5 Υλοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η υλοποίηση των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση, που παρουσιάστηκαν τις προηγούμενες ενότητες, στο πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροχρόνια χρονική κλίμακα WPSTAB, η οποία αποτελεί μια από τις συμβολές της παρούσας διατριβής.

Όπως έχει αναλυθεί στο Κεφ. 2, το πρόγραμμα WPSTAB στηρίζεται στην οιονεί στατική προσομοίωση. Ως εκ τούτου, σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή, ανάλογα και με το αν υπάρχουν ή όχι διακριτές μεταβολές, υπολογίζεται μία ή δύο φορές το σημείο ισορροπίας. Για παράδειγμα, αν τη χρονική στιγμή t πρέπει να γίνει μια μεταβολή στο λόγο μετασχηματισμού r ενός ΣΑΤΥΦ, το πρόγραμμα υπολογίζει τα σημεία ισορροπίας δύο φορές. Μία τη χρονική στιγμή t^- ακριβώς πριν την αλλαγή του r και μία τη χρονική στιγμή t^+ , αμέσως μετά την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού (βλ. Εν. 2.3). Για το λόγο αυτό κατά την υλοποίηση στο πρόγραμμα WPSTAB ακολουθούνται οι εξής δύο συμβάσεις:

1. Το βήμα προσομοίωσης ταυτίζεται με την αντίστοιχη περίοδο δειγματοληψίας.
2. Η δειγματοληψία λαμβάνει χώρα τις χρονικές στιγμές t^- .

Απόρροια αυτών είναι ότι όλοι οι υπολογισμοί κινητών μέσων όρων και κατά συνέπεια των τιμών αναφοράς, γίνονται στις χρονικές στιγμές t^- .

Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αναπτύσσεται η υλοποίηση των σχημάτων προστασίας που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES και στη μέθοδο ανίχνευσης NLI, ενώ στο Παράρτημα Α αναφέρονται συνοπτικά όλες οι αλλαγές που έχουν ενσωματωθεί στο WPSTAB.

4.5.1 Υλοποίηση συστημάτων με βάση LIVES

Η υλοποίηση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας, που είναι βασισμένα στη μέθοδο LIVES, στο περιβάλλον του WPSTAB έγινε με την ανάπτυξη επτά (7) αλγορίθμων και κατάλληλης τροποποίησης του αρχείου εισόδου του προγράμματος.

Μέσω της ανάγνωσης των δεδομένων του αρχείου εισόδου καθορίζονται οι μετασχηματιστές που έχουν κάποιο σύστημα ανίχνευσης ή και προστασίας, ενώ οι ρουτίνες που αναπτύχθηκαν είναι οι εξής:

1. `initialize_lives`: Ρουτίνα που αρχικοποιεί τα δεδομένα των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας.
2. `calculate_average`: Ρουτίνα που υπολογίζει τους κινητούς μέσους όρων των διαφόρων μεταβλητών.
3. `ltc_monitoring`: Ρουτίνα για επιτήρηση των ΣΑΤΥΦ.
4. `lives_alarm`: Ρουτίνα που υλοποιεί την ανίχνευση αστάθειας μέσω μεθόδου LIVES, προσομοιώνοντας το σύστημα ανίχνευσης LA^x.
5. `lives_restore`: Ρουτίνα για την αποκατάσταση ευστάθειας, που προσομοιώνει το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR.
6. `ltc_range_restoration`: Ρουτίνα για την αποκατάσταση λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, που προσομοιώνει το υποσύστημα LTC-rr.

^xΣτη παρούσα υποενότητα οι όροι LA, LR και LTC-rr αναφέρονται εξίσου και στις ρουτίνες που υλοποιούν τα εν λόγω υποσυστήματα

7. `lives_shedding`: Ρουτίνα για την αποκοπή φορτίου.

Εκτός από τις ανωτέρω ρουτίνες, δημιουργήθηκε μια νέα σύνθετη μεταβλητή, που φέρει το όνομα `lives_variables`, στην οποία για κάθε μετασχηματιστή με κάποιο σύστημα ανίχνευσης ή προστασίας, αποθηκεύονται δεδομένα τόσο από την προσομοίωση του συστήματος (π.χ. τάσεις, λόγοι μετασχηματισμού κλπ.), όσο και από τα συστήματα προστασίας (π.χ. σήματα συναγερμού LIVES, αποκοπής φορτίου κλπ.).

Τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας με βάση τη μέθοδο LIVES που υλοποιήθηκαν και προσομοιώνονται στο WPSTAB είναι:

1. Επιτήρηση τάσης ΣΑ1
2. Αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1
3. Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας και εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου ΣΠ1.3

Λόγω της ενιαίας δομής του προγράμματος και του τρόπου υπολογισμού των διαφόρων κινητών μέσων όρων, τις χρονικές στιγμές t^- , στο WPSTAB ο συναγερμός LIVES εμφανίζεται πάντα οριακά πριν την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού. Με αυτόν τον τρόπο αφενός ικανοποιείται η ομοιογένεια του προγράμματος (ανεξάρτητα του συστήματος προστασίας ο συναγερμός LIVES σημαίνεται την ίδια στιγμή), αφετέρου στην περίπτωση του αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας ΣΠ1.1 δεν γίνεται μια άσκοπη κίνηση προς την λάθος κατεύθυνση. Στην περίπτωση της άμεσης αποκοπής φορτίου επιλέχθηκε αντί της απευθείας εφαρμογής της η αποκοπή να γίνει στο επόμενο βήμα προσομοίωσης, ώστε να εξομοιωθεί η χρονική καθυστέρηση από την στιγμή που δίνεται η εντολή μέχρι την εκτέλεση της από τους αντίστοιχους ηλεκτρονόμους.

Στις ακόλουθες παραγράφους αναπτύσσονται όλα αυτά ξεχωριστά, καθώς και ο τρόπος κλήσης και λειτουργίας τους κατά τη μακροπρόθεσμη χρονική προσομοίωση από το WPSTAB.

4.5.1.1 Ανάγνωση δεδομένων

Τα δεδομένα εισόδου του WPSTAB βρίσκονται σε ένα αρχείο με κατάληξη “.dat” και περιλαμβάνουν όλα εκείνα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Πρόκειται για δεδομένα αρχικής κατάστασης, τοπολογίας δικτύου και δυναμικών στοιχείων (ΣΑΤΥΦ, γεννήτριες, διατάξεις αντιστάθμισης, κλπ.) τα οποία περιλαμβάνονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο λειτουργίας του προγράμματος [Βου99].

Για τον προσδιορισμό των μετασχηματιστών που φέρουν κάποιο σύστημα ανίχνευσης ή/και προστασίας που βασίζεται στη μέθοδο LIVES, έγινε χρήση της μεταβλητής λειτουργίας IOLT, της υποομάδας δεδεδμένων μετασχηματιστών, η οποία μπορούσε να λάβει τις τιμές “0” για ανενεργό και “1” για ενεργό ΣΑΤΥΦ αντίστοιχα [Βου99]. Πλέον η συγκεκριμένη μεταβλητή μπορεί να πάρει τις ακόλουθες τιμές:

- IOLT = 0: Ανενεργό ΣΑΤΥΦ.
- IOLT = 1: Ενεργό ΣΑΤΥΦ.
- IOLT = 2: Ενεργό ΣΑΤΥΦ με εγκατεστημένο το σύστημα επιτήρησης τάσης ΣΑ1.
- IOLT = 3: Ενεργό ΣΑΤΥΦ με εγκατεστημένο το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, με τα 3 υποσυστήματα LA, LR και LTC-rr.
- IOLT = 4: Ενεργό ΣΑΤΥΦ με εγκατεστημένο το σύστημα προστασίας ΣΠ1.3, που αποτελείται από το LA σε συνδυασμό με άμεση αποκοπή φορτίου στον αντίστοιχο ζυγό του δευτερεύοντος.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι από τον τρόπο ορισμού τόσο των συστημάτων προστασίας, όσο και τις δυνατές τιμές της μεταβλητής IOLT, ότι οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη ή ίση του δύο (2) υπονοεί πάντα την ύπαρξη του συστήματος επιτήρησης ευστάθειας LA. Αυτό είναι μια ιδιότητα που χρησιμοποιείται από όλες τις ρουτίνες για τον καθορισμό των μετασχηματιστών που έχουν δυνατότητα ανίχνευσης αστάθειας.

4.5.1.2 Σύνθετες μεταβλητές `lives_variables`

Ήδη από την ανάγνωση των δεδομένων είναι γνωστός ο συνολικός αριθμός των μετασχηματιστών που έχουν κάποιο σύστημα ανίχνευσης και προστασίας. Για αυτό το λόγο δημιουργείται ένας πίνακας αντίστοιχης διάστασης, κάθε στοιχείο του οποίου είναι μια σύνθετη μεταβλητή `lives_variables` που αντιστοιχεί σε ένα ΣΑΤΥΦ.

Κάθε μία από τις σύνθετες μεταβλητές `lives_variables` περιλαμβάνει παραμέτρους, οι οποίες παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και μεταβλητές οι οποίες αλλάζουν είτε από τα συστήματα προστασίας είτε εξωτερικά. Συνεπώς, οι σύνθετες μεταβλητές χωρίζονται σε τρεις (3) βασικές κατηγορίες:

1. Παράμετροι προσομοίωσης: δείκτες αραιών πινάκων που χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα, ελεγχόμενος ζυγός και ζυγός μεταβλητής λήψης, αρχικές τιμές τάσης ελεγχόμενου ζυγού, νεκρής ζώνης και εκθετικού φορτίου, όνομα ελεγχόμενου ζυγού και τέλος, εκθέτες ενεργού και άεργου ισχύος του φορτίου.
2. Παράμετροι συστημάτων προστασίας: τύπος συστήματος ανίχνευσης ή/και προστασίας (ΣΑ1, ΣΠ1.1 ή ΣΠ1.3), αριθμός δειγμάτων για υπολογισμό κινητών μέσων όρων, ανοχή τάσης αναφοράς LA, ποσοστό άμεσης αποκοπής φορτίου ανά εφαρμογή, μέγιστος συνολικός αριθμός εφαρμογών και μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ λόγω ενεργοποίησης LR.
3. Μεταβλητές ανίχνευσης και προστασίας: σήματα συναγερμού από τα υποσυστήματα LA, LR, LTC-IT, τάσεις αναφοράς υποσυστημάτων, νεκρή ζώνη, φορτίο, κινητοί μέσοι όροι, χρονικά, μετρητής αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ, μετρητής ενεργοποίησης LR και LTC-IT και τέλος βοηθητικές μεταβλητές, όπως π.χ. μερικά αθροίσματα, εσωτερικοί δείκτες κλπ.

Ο λόγος που συγκεντρώνονται όλα αυτά τα στοιχεία σε μία ενιαία σύνθετη δομή είναι ότι σε αντίθετη περίπτωση το πρόγραμμα θα έπρεπε σε κάθε ανακύκλωση να αναζητά δεδομένα από διάφορους πίνακες με αποτέλεσμα να υπάρχει επίπτωση στον πραγματικό χρόνο εκτέλεσης της προσομοίωσης. Επιπλέον, με μια απλή ανάγνωση του συγκεκριμένου πίνακα σύνθετων μεταβλητών βρίσκονται άμεσα όλα τα δεδομένα που ενδιαφέρουν σχετικά με την κατάσταση των ΣΑΤΥΦ οποιαδήποτε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, ενώ γίνεται πιο εύκολη και η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διάφορων ρουτινών ανίχνευσης και προστασίας.

4.5.1.3 Ρουτίνα αρχικοποίησης `initialize_lives`

Η συγκεκριμένη ρουτίνα είναι πολύ απλή και καλείται μόνο μια φορά, στην αρχή της προσομοίωσης, για να αρχικοποιήσει τις μεταβλητές `lives_variables`.

Οι παράμετροι προσομοίωσης, που όπως ειπώθηκε αφορούν το ποιος ζυγός είναι μεταβλητής και ποιος ονομαστικής λήψης, ποιος είναι ο ελεγχόμενος ζυγός, κλπ. αναζητούνται από το αρχείο εισόδου και τις υπάρχουσες ρουτίνες και μεταβλητές του WPSTAB.

Οι παράμετροι προστασίας αρχικοποιούνται ως ακολούθως:

- Τύπος συστήματος ανίχνευσης ή προστασίας: από αρχείο εισόδου.

- Αριθμός δειγμάτων κινητών μέσων όρων: καθορίζεται από την χρονική καθυστέρηση κάθε ΣΑΤΥΦ και το βήμα προσομοίωσης που βρίσκονται στο αρχείο εισόδου και το αρχείο σεναρίου (ή την επιλογή του χρήστη) αντίστοιχα.
- Ποσοστό άμεσης αποκοπής φορτίου για το ΣΠ1.3 από τις επιλογές του χρήστη στην διεπαφή του προγράμματος.

Αντίστοιχα, οι τιμές των μεταβλητών προστασίας αρχικοποιούνται ως εξής:

- Σήματα συναγερμού και ενεργοποίησης συστημάτων αρχικοποιούνται σε ανενεργή κατάσταση.
- Τάσεις αναφοράς ρουτινών `lives_alarm` και `ltc_range_restoration` αρχικοποιούνται στο 0 αμ ενώ η τάση αναφοράς για τη ρουτίνα `lives_restore` αρχικοποιείται στο 2 αμ^{xi}.
- Οι αρχικές τιμές των νεκρών ζωνών και των φορτίων διαβάζονται από το αρχείο εισόδου.
- Οι κινητοί μέσοι όροι των τάσεων τίθενται ίση με τις αρχικές τιμές των τάσεων στις οποίες αντιστοιχούν και οι οποίες βρίσκονται αποθηκευμένες σε μεταβλητές του προγράμματος προσομοίωσης.
- Τα χρονικά και οι διάφοροι μετρητές αρχικοποιούνται σε μηδενικές τιμές.

4.5.1.4 Ρουτίνα επιτήρησης ΣΑΤΥΦ `ltc_monitoring`

Δεδομένου ότι τα συστήματα προστασίας που βασίζονται στη μέθοδο LIVES για ανίχνευση της αστάθειας χρειάζονται ενεργά ΣΑΤΥΦ, υλοποιήθηκε η ρουτίνα επιτήρησης `ltc_monitoring`. Η εν λόγω ρουτίνα εφαρμόζει τον αλγόριθμο 4.1 που φαίνεται στη συνέχεια και επιτελεί τα ακόλουθα:

- Ελέγχει αν κάποιο ΣΑΤΥΦ έχει φτάσει στα όρια του, έχει δηλαδή εξαντλήσει τις διαθέσιμες λήψεις.
- Ανάλογα με το σχήμα προστασίας καθορίζει τις τιμές των τάσεων αναφοράς για τα υποσυστήματα LA, LR και LTC-rr.
- Εφόσον το σύστημα προστασίας επιβάλει αντίστροφη κίνηση του ΣΑΤΥΦ, μετράει αυτές τις κινήσεις ώστε να μπορεί να επιβληθεί ένα όριο.

Η ρουτίνα καλείται μία φορά σε κάθε βήμα της προσομοίωσης για όλους τους μετασχηματιστές που έχουν τουλάχιστον το σύστημα LA (δεδομένου ότι είναι προαπαιτούμενο για οποιοδήποτε σύστημα προστασίας που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES) και ελέγχει αν έχουν εξαντληθεί οι διαθέσιμες λήψεις κάποιου από τα αντίστοιχα ΣΑΤΥΦ. Σε αναλογία με την Υποεν. 4.2.2, η ρουτίνα `ltc_monitoring` επιτυγχάνει τον έλεγχο εξάντλησης με την εξής λογική: Αν μια δεδομένη χρονική στιγμή t ένα ΣΑΤΥΦ πρέπει να αλλάξει το λόγο μετασχηματισμού, αλλά αυτό δεν κατέστη δυνατό καθώς ήδη $r = r_{\min}^{xii}$ τότε και μόνο τότε εκδίδεται σήμα εξάντλησης του συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ. Σε αυτήν την περίπτωση ενημερώνεται η αντίστοιχη μεταβλητή και η ρουτίνα προχωρά στο επόμενο ΣΑΤΥΦ.

Εφόσον το ΣΑΤΥΦ είναι ενεργό, η ρουτίνα προχωρά στον ορισμό των τάσεων αναφοράς των υποσυστημάτων LA, LR και LTC-rr. Πρώτα ελέγχεται αν πληρούνται οι προϋποθέσεις ανανέωσης της τάσης αναφοράς για τη ρουτίνα `lives_alarm`, που υλοποιεί το σύστημα ανίχνευσης LA. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι οι ακόλουθες:

^{xi}Ο λόγος αυτής της διαφοροποίησης θα εξηγηθεί κατά την περιγραφή των αντίστοιχων ρουτινών.

^{xii}Υποτίθεται ότι ο μηχανισμός είναι στο πρωτεύον, αλλά υπάρχει πρόνοια και για την περίπτωση που βρίσκεται στο δευτερεύον.

Αλγόριθμος 4.1 Ρουτίνα WPSTAB επιτήρησης των ΣΑΤΥΦ `ltc_monitoring`

```

1: for all Μετασηματιστές με LA do
2:   if ΣΑΤΥΦ είναι εξαντλημένο then
3:     Ενημέρωση κατάστασης του
4:   else
5:     if Πληρούνται οι προϋποθέσεις ανανέωσης της τάσης αναφοράς του LA then
6:       Ανανέωση  $V_r$  της lives_alarm
7:     end if
8:     if Ο μετασηματιστής έχει ΣΠ1.1 then
9:       if Πληρούνται οι προϋποθέσεις ανανέωσης της τάσης αναφοράς του LTC-rr then
10:        Ανανέωση  $V_r$  της ltc_range_restoration
11:       end if
12:       if Πραγματοποιήθηκε αντίστροφη κίνηση του ΣΑΤΥΦ λόγω υποσυστήματος LR then
13:        Ενημέρωση μετρητή αντίστροφων κινήσεων
14:       end if
15:       if Πληρούνται οι προϋποθέσεις ανανέωσης της τάσης αναφοράς του υποσυστήματος LR
16:         then
17:           Ανανέωση  $V_r$  του LR
18:         end if
19:       end if
20:     end if

```

1. Να μην υπάρχει ήδη ενεργός συναγερμός LIVES από το συγκεκριμένο ΣΑΤΥΦ,
2. το ΣΑΤΥΦ να μην έχει εξαντληθεί και,
3. στο ίδιο βήμα προσομοίωσης να έχει αλλάξει μόλις και ο λόγος μετασηματισμού r .

Στην περίπτωση της ταυτόχρονης εκπλήρωσης αυτών των απαιτήσεων, η τάση αναφοράς της ρουτίνας `lives_alarm` τίθεται ίση με την τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου της τάσης του ελεγχόμενου ζυγού που έχει υπολογιστεί από τη ρουτίνα `calculate_average` (η οποία περιγράφεται στην Παρ. 4.5.1.5).

Εάν το ΣΑΤΥΦ είναι εξοπλισμένο με το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1 τότε υπολογίζει τις τάσεις αναφοράς των ρουτινών `lives_restore` και `ltc_range_restoration`, εφόσον και πάλι πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις.

Πρώτα γίνεται έλεγχος για τις τάσεις αναφοράς της ρουτίνας του LTC-rr. Οι προϋποθέσεις ορισμού της τάσης αναφοράς του συγκεκριμένου υποσυστήματος είναι:

- Το ΣΑΤΥΦ να έχει εξαντλήσει τις διαθέσιμες λήψεις του.
- Η ελεγχόμενη τάση να είναι εκτός νεκρής ζώνης.
- Να μην υπάρχει ενεργός συναγερμός LIVES^{xiii}.

Σε περίπτωση που ισχύουν και οι τρεις (3) ανωτέρω απαιτήσεις ταυτόχρονα, ο κινητός μέσος όρος της τάσης του ελεγχόμενου ζυγού τίθεται σαν αναφορά για τη ρουτίνα `ltc_range_restoration`.

^{xiii}Ο λόγος που απαιτείται μη ενεργός συναγερμός LIVES είναι ότι στην αντίθετη περίπτωση έχει αρχίσει η διαδικασία αποκατάστασης, με αντιστροφή της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, που ούτως ή άλλως θα το ξεμπλοκάρει.

Στη συνέχεια, αφού στον συγκεκριμένο μετασχηματιστή είναι εγκατεστημένο το σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, γίνεται έλεγχος αν έχει ενεργοποιηθεί το υποσύστημα της LR, ώστε αφενός να επιτηρηθούν οι αντίστροφες κινήσεις του ΣΑΤΥΦ και αφετέρου να καθοριστούν οι τάσεις αναφοράς για τη ρουτίνα `lives_restore`. Ο προσδιορισμός της αντίστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ γίνεται μέσω ελέγχου της ύπαρξης συναγερμού LIVES στον αντίστοιχο μετασχηματιστή, που υποδηλώνει ενεργοποίηση της προσπάθειας αποκατάστασης ευστάθειας και την ταυτόχρονη αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού που αναγκαστικά είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση, οπότε και ενημερώνεται ο αντίστοιχος μετρητής αντίστροφων κινήσεων.

Ο καθορισμός των συνθηκών για ενημέρωση των τάσεων αναφοράς της ρουτίνας `lives_restore` είναι λίγο πιο σύνθετος. Εφόσον έχει ήδη προσδιοριστεί ο τύπος προστασίας που είναι εγκατεστημένος σε κάθε μετασχηματιστή, ο βασικός έλεγχος αφορά στον αν υπάρχει ενεργός συναγερμός αστάθειας LIVES αλλά όχι σήμα αποκατάστασης από την ρουτίνα της LR. Αν ισχύει αυτό, τότε η ρουτίνα `lives_restore` ελέγχει αν έγινε αλλαγή του ΣΑΤΥΦ, η οποία όπως εξηγήθηκε είναι αντίστροφη.

Επιπλέον, βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην Υποεν. 4.2.1, η τάση αναφοράς του υποσυστήματος LR ενημερώνεται μόνο μετά την πρώτη αντίστροφη κίνηση. Αυτό γίνεται γιατί στην πρώτη αντίστροφη κίνηση δεν επιτηρείται η τάση του πρωτεύοντος. Σε αντίθεση με τις τάσεις αναφοράς των άλλων δύο υποσυστημάτων, εδώ, εφόσον πληρούνται οι ανωτέρω προϋποθέσεις, ο κινητός μέσος όρος της τάσης του πρωτεύοντος λαμβάνεται σαν αναφορά για τη ρουτίνα `lives_restore`.

4.5.1.5 Ρουτίνα υπολογισμού κινητών μέσω `calculate_average`

Στο WPSTAB λόγω της δομής και λειτουργίας του, ο υπολογισμός των κινητών μέσω όρων γίνεται σε μία ενιαία ρουτίνα που ονομάζεται `calculate_average`, η οποία λειτουργεί με βάση τον Αλγ. 4.2, που φαίνεται παρακάτω.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πρόγραμμα WPSTAB εκτελεί προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, με σταθερό βήμα προσομοίωσης Δt . Επομένως το σύνολο των αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων ισορροπίας λύνεται τις χρονικές στιγμές $t = k\Delta t$, $k = [0, 1, \dots]$. Ως εκ τούτου τα δείγματα είναι ουσιαστικά οι τιμές των μεγεθών τις χρονικές στιγμές t^- και η αντίστοιχη περίοδος δειγματοληψίας είναι το βήμα προσομοίωσης Δt . Θεωρώντας επομένως χρονική καθυστέρηση T_i για το i -οστό ΣΑΤΥΦ, το πλήθος των δειγμάτων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των κινητών μέσω όρων, βάσει της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στην Υποεν. 3.1.2, δίνεται από την εξίσωση (3.14), που επαναλαμβάνεται εδώ:

$$n_i = \frac{T_i}{\Delta t} \quad (4.20)$$

ενώ ο αντίστοιχος κινητός μέσος όρος, π.χ. της τάσης δευτερεύοντος, δίνεται από το μέσο όρο των n_i τελευταίων δειγμάτων ως εξής:

$$\bar{V} = \frac{1}{n_i} \sum_{m=1}^{n_i} V(m) \quad (4.21)$$

Λόγω του τρόπου λειτουργίας του WPSTAB, δεν κρατούνται εσωτερικά στο πρόγραμμα οι τιμές των μεταβλητών για όλες τις χρονικές τιμές, παρά μόνο για την τρέχουσα και σε κάποιες περιπτώσεις και για την προηγούμενη χρονική στιγμή. Αυτό έχει γίνει ώστε το πρόγραμμα να είναι πιο αποδοτικό από την άποψη της χρήσης υπολογιστικών πόρων, δεδομένου ότι μια προσομοίωση μπορεί να εκτείνεται μέχρι και σε βάθος ωρών. Επειδή οι χρονικές τιμές των μεταβλητών περνάνε σε αρχεία εξόδου, τα οποία όμως είναι προσπελάσιμα μόνο μετά το πέρας της προσομοίωσης, ενώ για να υπολογιστούν οι διάφοροι κινητοί μέσοι όροι απαιτούνται οι τιμές των τελευταίων n_i χρονικών στιγμών, δημιουργήθηκε ένας ενταμιευτής (buffer) για κάθε μέγεθος που ενδιαφέρει, ο οποίος περιλαμβάνει αυτές τις τιμές.

Αρχικά οι ενταμιευτές αυτοί γεμίζουν, μέσω της ρουτίνας `initialize_lives`, με τις αρχικές τιμές των μεγεθών. Στη συνέχεια και σε κάθε βήμα προσομοίωσης, η ρουτίνα `calculate_average` αντικαθιστά, ανά ένα κάθε φορά τα στοιχεία του ενταμιευτή. Είναι προφανές από τη σχέση (4.21) ότι μετά την αντικατάσταση του κατάλληλου στοιχείου του εκάστοτε ενταμιευτή ο κινητός μέσος όρος είναι το πηλίκο του αθροίσματος των στοιχείων του ενταμιευτή δια του πλήθους των στοιχείων του.

Αλγόριθμος 4.2 Ρουτίνα WPSTAB υπολογισμού ΚΜΟ τάσεων `calculate_average`

- 1: **for all** Μετασηματιστές με προστασία **do**
 - 2: Βρες το στοιχείο του `buffer` τάσης δευτερεύοντος που πρέπει να ανανεωθεί
 - 3: Ενημέρωσε το στοιχείο, με τη νέα τιμή της τάσης δευτερεύοντος
 - 4: Υπολόγισε τον κινητό μέσο όρο της τάσης δευτερεύοντος
 - 5: Βρες το στοιχείο του `buffer` τάσης πρωτεύοντος που πρέπει να ανανεωθεί
 - 6: Ενημέρωσε το στοιχείο, με τη νέα τιμή της τάσης πρωτεύοντος
 - 7: Υπολόγισε τον κινητό μέσο όρο της τάσης πρωτεύοντος
 - 8: **end for**
-

4.5.1.6 Ρουτίνα ανίχνευσης αστάθειας τάσης `lives_alarm`

Η ρουτίνα `lives_alarm` υλοποιεί το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας LA, είτε αυτό αποτελεί αυτόνομο σύστημα είτε τμήμα των συστημάτων προστασίας ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3. Στην περίπτωση που ένας μετασηματιστής έχει εγκατεστημένο το ΣΠ1.1 η εν λόγω ρουτίνα μετά την σήμανση συναγερμού προετοιμάζει την ενεργοποίηση του υποσυστήματος LR αντιστρέφοντας τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ.

Ουσιαστικά η συγκεκριμένη ρουτίνα λειτουργεί βάσει του Αλγ. 4.3^{xiv} που φαίνεται παρακάτω και διατρέχει όλους τους μετασηματιστές με LA, χρησιμοποιώντας τις μεταβλητές `lives_variables`. Για κάθε έναν από αυτούς τους ανωτέρω μετασηματιστές ελέγχεται αν υπάρχει ήδη ενεργός συναγερμός LIVES. Σε αυτήν την περίπτωση η ρουτίνα μεταβαίνει στον επόμενο. Αν αυτό δεν ισχύει, περνάει στον ουσιαστικό έλεγχο των προϋποθέσεων που έχει η ίδια η μέθοδος LIVES, ήτοι εξετάζει αν η τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου της τάσης του δευτερεύοντος είναι μικρότερη από την τιμή αναφοράς της μεθόδου. Δεδομένου ότι η αρχική τιμή της μεθόδου είναι μηδέν, οποιαδήποτε άλλη τιμή που έχει τεθεί από τη ρουτίνα `lives_monitoring` σημαίνει ότι η τάση είναι ήδη εκτός νεκρής ζώνης και έχει γίνει κάποια κίνηση του ΣΑΤΥΦ.

Εφόσον η τιμή αναφοράς της μεθόδου είναι μεγαλύτερη από την τιμή του κινητού μέσου της τάσης γίνεται έλεγχος αν έχει συμπληρωθεί ο απαιτούμενος χρόνος από την έναρξη της παρακολούθησης. Αν δεν έχει γίνει αυτό αυξάνεται κατάλληλα ο μετρητής χρόνου για έλεγχο στην επόμενη κλήση της ρουτίνας κατά το επόμενο βήμα χρονικής προσομοίωσης, διαφορετικά (αν έχει συμπληρωθεί το απαιτούμενο χρονικό διάστημα παρακολούθησης) ελέγχει αν η διαφορά μεταξύ της τάσης αναφοράς και του κινητού μέσου όρου είναι μεγαλύτερη από την παράμετρο ανοχής. Αν ισχύει αυτό εκδίδει συναγερμό και επαναφέρει τον χρονικό μετρητή και την τάση αναφοράς στις αρχικές τους τιμές, για χρήση σε επόμενη φάση, εφόσον πληρούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις.

Αντίθετα, αν η διαφορά μεταξύ τάσης αναφοράς και κινητού μέσου όρου είναι μικρότερη από την αντίστοιχη ανοχή, τότε γίνεται επαναφορά της μεθόδου μέχρι την επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ. Το ίδιο γίνεται και αν οποιαδήποτε στιγμή εντός του χρονικού διαστήματος αναμονής ο κινητός μέσος της τάσης ξεπεράσει την τιμή αναφοράς που έχει τεθεί, καθώς και πάλι γίνεται επαναφορά μέχρι την επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ.

^{xiv}Πρόκειται για αλγόριθμο παρόμοιο με τον Αλγ. Β.1 του Παραρτήματος Β, με τη διαφορά ότι δεν χρειάζεται να υπολογίζει κινητούς μέσους όρους και τάσεις αναφοράς, που παρέχονται από τις ρουτίνες `calculate_average` και `lives_monitoring` αντίστοιχα.

Αλγόριθμος 4.3 Ρουτίνα WPSTAB lives_alarm

```
1: for all Μετασηματιστές με προστασία do
2:   if Δεν υπάρχει ενεργός συναγερμός στον συγκεκριμένο μετασηματιστή από προηγούμενο βήμα
   then
3:     if Ο κινητός μέσος όρος της τάσης δευτερεύοντος παραμένει κάτω από την τάση αναφοράς
   then
4:       if Δεν έχει συμπληρωθεί απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση then
5:         Αύξησε το χρονικό μετρητή κατάλληλα και ανέστειλε τη διαδικασία
6:       else
7:         if Ο κινητός μέσος όρος της τάσης δευτερεύοντος είναι κάτω από την τάση αναφοράς
   και την ανοχή then
8:           Σήμανε συναγερμό LIVES
9:           Επαναφορά τάσης αναφοράς και χρονικού μετρητή στην αρχική κατάσταση
10:        else
11:          Επαναφορά τάσης αναφοράς και χρονικού μετρητή στην αρχική κατάσταση μέ-
   χρι την επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ
12:        end if
13:      end if
14:    else if Ο κινητός μέσος όρος της τάσης ξεπεράσει την τάση αναφοράς then
15:      Επαναφορά τάσης αναφοράς και χρονικού μετρητή στην αρχική κατάσταση μέχρι την
   επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ
16:    end if
17:    if Ο μετασηματιστής έχει εγκατεστημένο ΣΠ1.1 και μπορεί να ενεργοποιηθεί then
18:      Αντιστροφή λειτουργίας ΣΑΤΥΦ
19:    end if
20:  end if
21: end for
```

Στις περιπτώσεις επαναφοράς, τόσο η τάση αναφοράς όσο και ο μετρητής χρόνου επαναφέρονται στις αρχικές τιμές τους. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία θα ξεκινήσει ξανά σε επόμενο βήμα της προσομοίωσης, όταν μέσω της `ltc_monitoring` καθοριστούν οι νέες τιμές αναφοράς.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια συζήτηση σε σχέση με το χρονικό διάστημα αναμονής και τον χρόνο σήμανσης συναγερμού. Όπως έχει εξηγηθεί στην Εν. 4.2, στην περίπτωση που υπάρχει το σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, θα πρέπει η έκδοση του συναγερμού να γίνει πριν από την κίνηση του ΣΑΤΥΦ, προκειμένου να αποφευχθεί περαιτέρω επιδείνωση της κατάστασης. Δεδομένου πως όλη η υλοποίηση στο WPSTAB έχει στηριχθεί στις χρονικές στιγμές t^- , ο όρος ϵ_t που έχει εισαχθεί στη φυσική υλοποίηση του αλγορίθμου B.1 δεν χρειάζεται καθώς ούτως ή άλλως ο συναγερμός θα βγει οριακά πριν την εκτέλεση της επόμενης κίνησης του ΣΑΤΥΦ, όπως θα φανεί και στην Παρ. 4.5.1.10.

Στο τελευταίο κομμάτι της ρουτίνας, γίνεται έλεγχος αν υπάρχει εγκατεστημένο το υποσύστημα LR και αν μπορεί να ενεργοποιηθεί. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός ενεργοποιήσεων του είναι μικρότερος από τον επιτρεπτό μέγιστο αριθμό αντίστροφων κινήσεων, όπως παρουσιάζονται στην Υποεν. 4.2.1. Αν συμβαίνει αυτό θα πρέπει μαζί με την έκδοση του συναγερμού (στο ίδιο βήμα) να γίνει και αντιστροφή της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ.

Προκειμένου να μην επηρεαστεί η αρχική ρουτίνα που υλοποιεί τον έλεγχο των ΣΑΤΥΦ η υλοποίηση γίνεται μέσω της (παροδικής) αλλαγής των δεδομένων της νεκρής ζώνης τους. Συγκεκριμένα, όσο είναι ενεργή η προσπάθεια αποκατάστασης της ευστάθειας, η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης τίθεται πολύ χαμηλά (0.5 αμ) με αποτέλεσμα η υπάρχουσα ρουτίνα ελέγχου των ΣΑΤΥΦ να αντιστρέφει μόνη της τη λειτουργία τους. Η επαναφορά της νεκρής ζώνης σε κανονικά επίπεδα γίνεται μέσω της ρουτίνας `lives_restore`, όπως εξηγείται στην Παρ. 4.5.1.8.

4.5.1.7 Ρουτίνα αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC_range_restoration

Η ρουτίνα `LTC_range_restoration` υλοποιεί το υποσύστημα LTC-rr, όπως περιγράφεται στην Υποεν. 4.2.2 και ενσωματώνεται στον ακόλουθο αλγόριθμο 4.4.

Η συγκεκριμένη ρουτίνα τρέχει μόνο για τους μετασχηματιστές με εγκατεστημένο το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1. Εφόσον αυτό υπάρχει, γίνεται έλεγχος για το αν στο συγκεκριμένο βήμα της προσομοίωσης πληρούνται οι προδιαγραφές ενεργοποίησης της. Αυτές οι προδιαγραφές περιλαμβάνουν:

1. Η τάση του δευτερεύοντος να είναι πάνω από το κατώφλι που έχει τεθεί για την ενεργοποίηση του συστήματος (90% της ονομαστικής τιμής).
2. Να μην έχει συμπληρωθεί ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός ενεργοποίησης της ρουτίνας

Εφόσον πληρούνται οι προδιαγραφές αυτές ελέγχεται αν ο κινητός μέσος όρος της τάσης δευτερεύοντος είναι κάτω από την τάση αναφοράς του LTC-rr και αν υπάρχει ενεργό σήμα εξάντλησης του συγκεκριμένου ΣΑΤΥΦ από τη ρουτίνα `ltc_monitoring` ούτως ώστε να προχωρήσει στον έλεγχο για το αν έχει συμπληρωθεί και η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση. Αν έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση, εκδίδει σήμα ενεργοποίησης του LTC-rr, μειώνει την τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης κατά 5%, επαναφέρει την τάση αναφοράς LTC-rr, τον χρονικό μετρητή και την ένδειξη εξάντλησης (για επόμενη χρήση) και προχωράει στον υπολογισμό της έμμεσης αποκοπής φορτίου βάσει των σχέσεων (4.9). Αν δεν έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση, ενημερώνει κατάλληλα το χρονικό μετρητή και περιμένει το επόμενο βήμα για να κάνει εκ νέου τους ελέγχους.

Αν παρόλο που ισχύουν οι βασικές προδιαγραφές λειτουργίας της μεθόδου LTC-rr το ΣΑΤΥΦ είναι εξαντλημένο, αλλά ο κινητός μέσος όρος της τάσης δευτερεύοντος υπερβεί την τάση αναφοράς πριν τη συμπλήρωση του απαιτούμενου χρόνου, τότε γίνεται επαναφορά της τάσης αναφοράς του LTC-rr και του χρονικού μετρητή, ενώ παραμένει η ένδειξη εξάντλησης. Με αυτόν τον τρόπο και σε συνδυασμό

Αλγόριθμος 4.4 Ρουτίνα WPSTAB αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ `ltc_range_restoration`

```
1: for all Μετασχηματιστές με προστασία do
2:   if Υπάρχει το υποσύστημα LTC-rr then
3:     if Πληρούνται οι προδιαγραφές ενεργοποίησης της then
4:       if Ο κινητός μέσος όρος τάσης δευτερεύοντος παραμένει κάτω από την τάση αναφοράς
       και το ΣΑΤΥΦ είναι εξαντλημένο then
5:         if Δεν έχει συμπληρωθεί απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση then
6:           Αύξησε το χρονικό μετρητή κατάλληλα και ανέστειλε τη διαδικασία
7:         else
8:           Εξέδωσε σήμα ενεργοποίησης αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ
9:           Μείωση τάσης αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ
10:          Επαναφορά τάσης αναφοράς, χρονικού μετρητή και ένδειξη εξάντλησης στην
          αρχική κατάσταση
11:          Υπολογισμός έμμεσης αποκοπής φορτίου λόγω μείωσης νεκρής ζώνης
12:        end if
13:      else if Το ΣΑΤΥΦ είναι εξαντλημένο αλλά ο κινητός μέσος όρος τάσης δευτερεύοντος
      υπερβεί την τάση αναφοράς then
14:        Επαναφορά τάσης αναφοράς, χρονικού μετρητή
15:      end if
16:    end if
17:  end if
18: end for
```

με τον τρόπο που λειτουργεί η ρουτίνα `ltc_monitoring`, στο επόμενο βήμα η τάση αναφοράς του LTC-rr θα έχει ήδη ανανεωθεί από τη ρουτίνα `ltc_monitoring` (εφόσον πληρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές) και θα αρχίσει να μετράει εκ νέου η χρονική καθυστέρηση, όπως ορίζει η λειτουργία του (βλ. Υποεν. 4.2.2).

4.5.1.8 Ρουτίνα αποκατάστασης ευστάθειας `lives_restore`

Η υλοποίηση του υποσυστήματος της LR γίνεται μέσω της ρουτίνας `lives_restore` που ενσωματώνει τον Αλγ. 4.5 που φαίνεται στη συνέχεια. Όπως σε όλες τις ρουτίνες των συστημάτων που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES, έτσι και εδώ ο αλγόριθμος τρέχει για κάθε μετασχηματιστή με αντίστοιχη προστασία. Ο βασικός έλεγχος που γίνεται στην συνέχεια είναι αν υπάρχει σε καθέναν από τους προαναφερθέντες μετασχηματιστές το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας τάσης LR. Εφόσον υπάρχει, η ρουτίνα προχωρά στον δεύτερο βήμα ελέγχου που αφορά τις προδιαγραφές ενεργοποίησης της, ήτοι αν υπάρχει ενεργός συναγεργμός LIVES και αν δεν έχει συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επιτρεπτών αντίστροφων κινήσεων του ΣΑΤΥΦ (βλ. Υποεν. 4.2.1).

Από εκεί και πέρα, η δομή της ρουτίνας είναι η ίδια όπως της `lives_alarm`, με τη διαφορά ότι πλέον ο κινητός μέσος όρος αφορά την τάση του πρωτεύοντος. Εφόσον ο κινητός μέσος παραμένει πάνω από την τάση αναφοράς γίνεται έλεγχος αν έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση. Αν δεν έχει, τότε αυξάνεται ο μετρητής χρόνου κατάλληλα, ο συναγεργμός LIVES παραμένει ενεργός στο συγκεκριμένο ΣΑΤΥΦ και όλη η διαδικασία αναστέλλεται μέχρι την επόμενη χρονική στιγμή (δηλαδή στο επόμενο βήμα προσομοίωσης), που θα κληθεί ξανά η ρουτίνα.

Αντίθετα, αν έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση (αντίστοιχη του ΣΑΤΥΦ) ή αν την προηγούμενη χρονική στιγμή συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων, εκδίδεται σήμα αποκατάστασης LR, παύει ο συναγεργμός LIVES, η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης του

Αλγόριθμος 4.5 Ρουτίνα WPSTAB αποκατάστασης ευστάθειας `lives_restore`

```

1: for all Μετασηματιστές με προστασία do
2:   if Υπάρχει το υποσύστημα LR then
3:     if Πληρούνται οι προδιαγραφές ενεργοποίησης του then
4:       if Αντίστροφες κινήσεις μικρότερες από τις μέγιστες επιτρεπτές then
5:         if Ο κινητός μέσος όρος τάσης πρωτεύοντος παραμένει πάνω από την τάση αναφοράς
           πρωτεύοντος then
6:           if Δεν έχει συμπληρωθεί απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση then
7:             Αύξησε το μετρητή χρόνου κατάλληλα και ανέστειλε τη διαδικασία
8:             Παραμένει ενεργός συναγερμός LIVES
9:           else
10:            Εξέδωσε σήμα αποκατάστασης LR
11:            Παύση συναγερμού LIVES
12:            Μείωση τάσης αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ στο τρέχον επίπεδο δευτε-
           ρεύοντος
13:            Αύξηση μετρητή ενεργοποίησης LR
14:            Επαναφορά τάσης αναφοράς, μετρητή χρόνου και μετρητή αντίστροφων κι-
           νήσεων ΣΑΤΥΦ
15:            Υπολογισμός έμμεσης αποκοπής φορτίου λόγω μείωσης νεκρής ζώνης
16:          end if
17:          else if Ο κινητός μέσος όρος τάσης πρωτεύοντος πέσει κάτω από την τάση αναφοράς
           then
18:            Αναστολή μεθόδου μέχρι την επόμενη αντίστροφη κίνηση ΣΑΤΥΦ
19:            Παραμένει ενεργός συναγερμός LIVES
20:            Επαναφορά τάσης αναφοράς, μετρητή
21:          end if
22:          else if Μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων then
23:            Εξέδωσε σήμα αποκατάστασης LR
24:            Παύση συναγερμού LIVES
25:            Μείωση τάσης αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ στο τρέχον επίπεδο δευτερεύοντος
26:            Αύξηση μετρητή ενεργοποίησης LR
27:            Επαναφορά τάσης αναφοράς, μετρητή χρόνου και μετρητή αντίστροφων κινήσεων
28:          end if
29:        end if
30:      end if
31:    end for

```

δευτερεύοντος τίθεται ίση με την τρέχουσα τιμή της τάσης δευτερεύοντος και ενημερώνεται ο μετρητής ενεργοποίησης της μεθόδου. Τέλος αρχικοποιούνται εκ νέου η τάση αναφοράς της μεθόδου, ο μετρητής χρόνου και ο μετρητής αντίστροφων κινήσεων (ο οποίος όμως ενημερώνεται από τη τη ρουτίνα `lrc_monitoring`).

Καθώς το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR απαιτεί χρόνο επιτήρησης ελάχιστα μεγαλύτερο από την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ, επιτρέποντας μια επιπλέον αντίστροφη κίνηση για λόγους ασφαλείας, η σήμανση της αποκατάστασης λαμβάνει χώρα το αμέσως επόμενο βήμα προσομοίωσης μετά την τελευταία αντίστροφη κίνηση του ΣΑΤΥΦ.

Αν οποιαδήποτε στιγμή εντός του διαστήματος παρακολούθησης ο κινητός μέσος όρος τάσης πρωτεύοντος πέσει κάτω από την τάση αναφοράς της μεθόδου (αντίθετα με τη LA) τότε σημαίνει ότι δεν έχει επιτευχθεί αποκατάσταση της ευστάθειας και η προσπάθεια θα συνεχιστεί μετά την επόμενη αντίστροφη κίνηση του ΣΑΤΥΦ. Σε αυτήν την περίπτωση, παραμένει η ένδειξη αστάθειας (ενεργός συναγερμός LIVES στον μετασχηματιστή και επαναφέρονται η τάση αναφοράς και ο μετρητής χρόνου της LR.

4.5.1.9 Ρουτίνα άμεσης αποκοπής φορτίου `lives_shedding`

Η συγκεκριμένη ρουτίνα σε συνδυασμό με τη `lives_alarm` υλοποιεί το σύστημα προστασίας ΣΠ1.3 που αναπτύχθηκε στην Εν. 4.3 και αφορά την εφαρμογή ανίχνευσης αστάθειας με άμεση αποκοπή φορτίου. Ο Αλγ. 4.6 της συγκεκριμένης ρουτίνας φαίνεται στη συνέχεια και είναι πολύ απλός.

Αλγόριθμος 4.6 Ρουτίνα WPSTAB άμεσης αποκοπής φορτίου `lives_shedding`

```
1: for all Μετασχηματιστές με προστασία do
2:   if Υπάρχει αποκοπή φορτίου βασισμένη στη LIVES then
3:     if Πληρούνται οι προδιαγραφές ενεργοποίησης then
4:       if Συμπληρώθηκε η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση then
5:         Αναστολή αποκοπής για το επόμενο βήμα προσομοίωσης
6:       else
7:         Εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου
8:         Παύση συναγερμού LIVES
9:         Ενημέρωση μετρητή εφαρμογής αποκοπής
10:      end if
11:    end if
12:  end if
13: end for
```

Εφαρμόζεται στους μετασχηματιστές στους οποίους η μεταβλητή εισόδου IOLT είναι ίση με τέσσερα (4), ενώ το ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή της μεθόδου ορίζεται δυναμικά από το χρήστη κατά την λειτουργία του προγράμματος.

Οι προϋποθέσεις ενεργοποίησης της ρουτίνας περιλαμβάνουν ενεργό συναγερμό LIVES στον αντίστοιχο ζυγό και την μη υπέρβαση του μέγιστου αριθμού αποκοπών φορτίου που μπορούν να εφαρμοστούν (ανά ζυγό). Εφόσον πληρούνται οι προϋποθέσεις αυτές, η ρουτίνα μεταβαίνει στο κυρίως μέρος του αλγορίθμου ο οποίος περιλαμβάνει ένα χρονικό για την εφαρμογή της αποκοπής ουσιαστικά στο επόμενο βήμα προσομοίωσης, μετά την έκδοση του αντίστοιχου συναγερμού LIVES.

4.5.1.10 Ενσωμάτωση στην μακροπρόθεσμη προσομοίωση

Η βασική δομή και ο τρόπος προσομοίωσης μεγάλων ηλεκτρικών δικτύων από το πρόγραμμα WPSTAB με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσομοίωσης παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφ. 2 και συγκεκριμένα στην Εν. 2.3 και στον Αλγ. 2.2, σελ. 65. Συνοπτικά, το πρόγραμμα βασίζεται σε διαδοχική επίλυση εξισώσεων ισορροπίας σε διακριτές χρονικές στιγμές, μεταξύ των οποίων γίνεται αριθμητική ολοκλήρωση των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων.

Το διάγραμμα ροής του κυρίως μέρους του προγράμματος προσομοίωσης του WPSTAB, με ενσωματωμένες πλέον τις ρουτίνες που υλοποιούν τα σχήματα προστασίας που βασίζονται στη μέθοδο LIVES, φαίνεται στο Σχ. 4.5. Ξεκινώντας από την χρονική στιγμή $t = 0$ s αρχικοποιούνται όλες οι παράμετροι και οι μεταβλητές προσομοίωσης και καλείται η ρουτίνα αρχικοποίησης `initialize_lives` των σύνθετων μεταβλητών `lives_variables`.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα μεταβαίνει στον κύριο βρόχο επαναλήψεων. Αυτός αποτελείται από διάφορες ρουτίνες (`WPSTAB routines 1`) οι οποίες διαμορφώνουν τον Ιακωβιανό πίνακα του συστήματος, επιλύουν τις εξισώσεις ισορροπίας, περνάνε στα αρχεία εξόδου τις τιμές των μεταβλητών (καθώς όπως έχει ήδη επισημανθεί, εσωτερικά το πρόγραμμα δεν κρατάει προηγούμενες τιμές, για λόγους ταχύτητας και εξοικονόμησης πόρων) και προετοιμάζουν το πρόγραμμα για την μεταβολή των διακριτών μεταβολών και των διαταραχών. Με την ολοκλήρωση αυτού του σταδίου το πρόγραμμα ελέγχει στη συνέχεια αν υπάρχει σύγκλιση της μεθόδου επίλυσης και ως εκ τούτου σημείο λειτουργίας. Σε περίπτωση μη ύπαρξης σύγκλισης το πρόγραμμα τερματίζεται, διαφορετικά περνάει στον επόμενο έλεγχο, ήτοι αν πρόκειται για την χρονική στιγμή t^- ή t^+ . Στην πρώτη περίπτωση ο αλγόριθμος συνεχίζει κανονικά ενώ στη δεύτερη μεταβαίνει στο σημείο όπου ο χρόνος προσομοίωσης αυξάνεται κατά το βήμα προσομοίωσης ($t = t + \Delta t$).

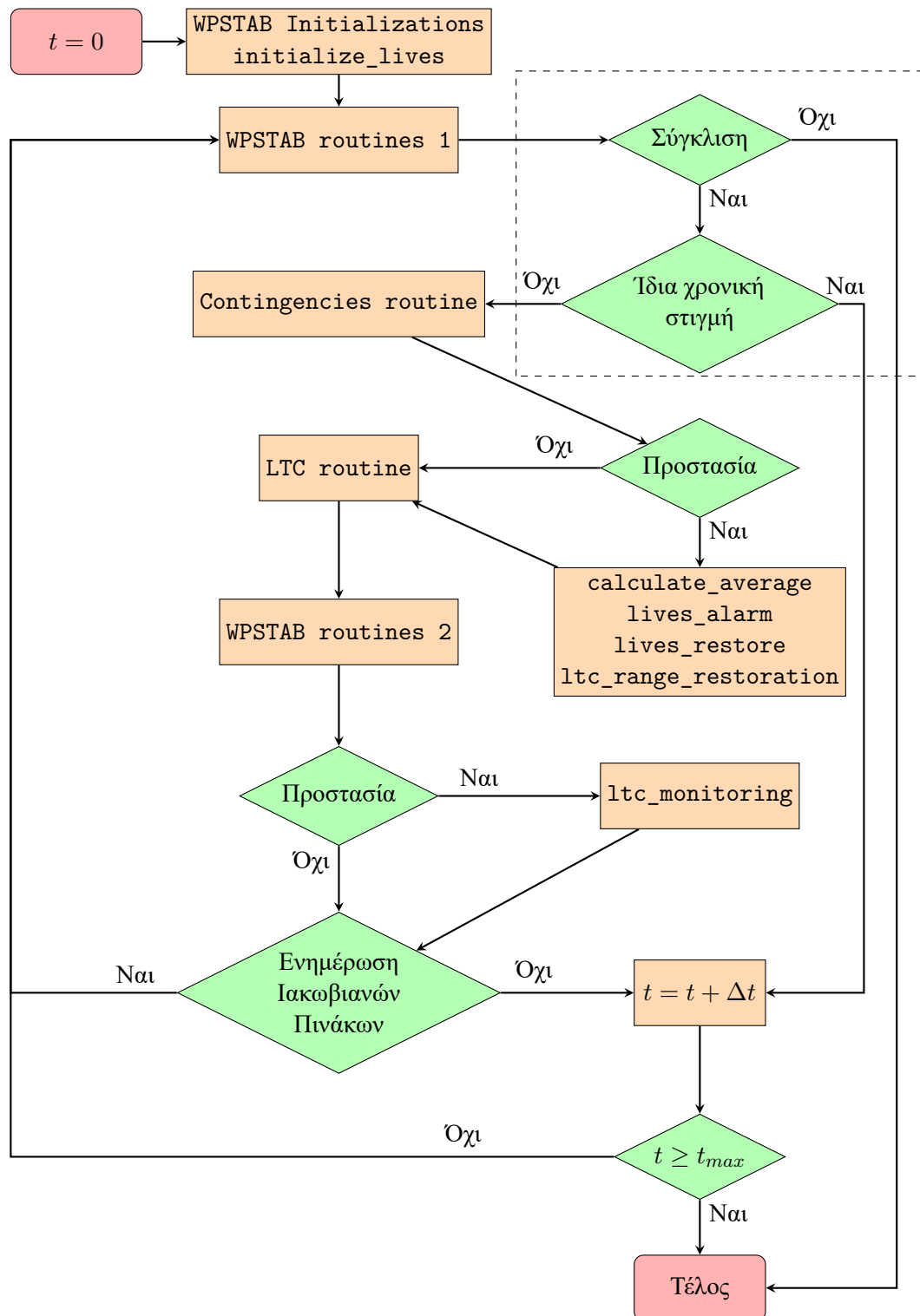
Αν η χρονική στιγμή είναι η t^- τότε εκτελείται η ρουτίνα `Contingencies routine`, για την επιβολή των διαταραχών, ακολουθούμενη από τον έλεγχο αν υπάρχει έστω και ένας μετασχηματιστής με κάποιο σύστημα προστασίας, γεγονός που θα οδηγήσει σε κλήση όλων των βασικών ρουτινών LIVES πριν την κλήση της ρουτίνας που ελέγχει τη δυναμική των ΣΑΤΥΦ (`LTC routine`). Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπόλοιπες ρουτίνες που ελέγχουν διάφορα διακριτά δυναμικά φαινόμενα της μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας, π.χ. APT, ΣΠΥ (`WPSTAB routines 2`).

Ακολουθεί ένας ακόμα έλεγχος αν υπάρχει προστασία, ώστε να κληθεί η ρουτίνα `ltc_monitoring` για την επιτήρηση των ΣΑΤΥΦ και των ορισμό των αντίστοιχων τάσεων αναφοράς των διαφόρων υποσυστημάτων (LA, LTC-rr και LR). Με την ολοκλήρωση και αυτού του βήματος εξετάζεται αν χρειάζεται ανανέωση ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος (είτε λόγω δυναμικών αλλαγών π.χ. ΣΑΤΥΦ ή APT ή επιβολής διαταραχών). Αν πληρούνται οι προϋποθέσεις ανανέωσης του πίνακα, τότε ο έλεγχος του προγράμματος περνάει στο κομμάτι των `WPSTAB routines 1`, όπου γίνεται εκ νέου επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας που αναφέρονται όμως στη χρονική στιγμή t^+ . Αν δεν χρειάζεται ανανέωση ο Ιακωβιανός πίνακας το πρόγραμμα αυξάνει το βήμα προσομοίωσης και πηγαίνει στην επόμενη χρονική στιγμή. Όλη η διαδικασία τερματίζεται είτε φυσιολογικά, με συμπλήρωση του συνολικού χρόνου προσομοίωσης, είτε λόγω μη σύγκλισης της μεθόδου επίλυσης, που οδηγεί σε απότομο τερματισμό με σχετική ένδειξη στην οθόνη μηνυμάτων.

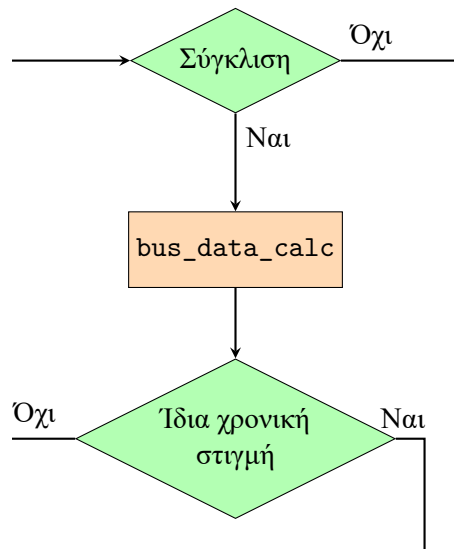
4.5.2 Υλοποίηση ανίχνευσης ΣΑ2

Η υλοποίηση του συστήματος ανίχνευσης εντός του κώδικα του WPSTAB είναι πολύ πιο απλή δεδομένου ότι τα περισσότερα από τα στοιχεία που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δεικτών NLI είναι ήδη διαθέσιμα ή μπορούν να αναζητηθούν από υφιστάμενες ρουτίνες.

Όπως εξηγήθηκε στις Εν. 3.2 και 4.4 η συγκεκριμένη μέθοδος στηρίζεται σε μετρήσεις φασισθετών από έναν ζυγό μεταφοράς για την ένδειξη πιθανής αστάθειας τάσης. Ο ζυγός στον οποίο θα εφαρμοστεί



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα ροής ρουτινών σχημάτων προστασίας που στηρίζονται στη LIVES εντός του WPSTAB. Εντός της οριοθετημένης περιοχής περιλαμβάνονται οι ρουτίνες για τους δείκτες NLI, όπως αναλύεται περαιτέρω στο Σχ. 4.6



Σχήμα 4.6: Λεπτομέρεια Σχ. 4.5 με ενσωματωμένο τον κώδικα υπολογισμού δεδομένων για το δείκτη NLI στο WPSTAB

η συγκεκριμένη μέθοδος ανίχνευσης, μεταβιβάζεται εσωτερικά στο WPSTAB και πάλι μέσω του αρχείου εισόδου “*.dat” και την υποομάδα δεδομένων ζυγών [Βου99, Κεφ. 5]. Συγκεκριμένα, από τα δεδομένα αυτά η μεταβλητή που χρησιμοποιείται για την ένδειξη του αντίστοιχου ζυγού με εγκατεστημένο εικονικό φασιθέτη είναι η I PLOT.

Η μεταβλητή I PLOT καθορίζει αν θα αποθηκευτούν σε αρχεία εξόδου (μετά την επίλυση κάθε φορά του συστήματος) οι μεταβλητές τάση, γωνία και φορτίο του αντίστοιχου ζυγού. Οι τιμές που μπορούσε να πάρει η συγκεκριμένη μεταβλητή ήταν I PLOT = 0, οπότε και δεν κρατούνται οι μεταβλητές του αντίστοιχου ζυγού και I PLOT = 1, οπότε και αποθηκεύονταν. Με την καινούργια υλοποίηση η μεταβλητή αυτή μπορεί να πάρει και μια τρίτη τιμή, I PLOT = 2, στην οποία περίπτωση αφενός κρατούνται τα δεδομένα των ζυγών αφετέρου, υποδηλώνει την ύπαρξη μονάδων συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών στον αντίστοιχο ζυγό ώστε να αποθηκευτούν και άλλα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη NLI. Τα δεδομένα αυτά είναι οι ροές ισχύος.

Το πρόγραμμα WPSTAB περιλαμβάνει ρουτίνες που υπολογίζουν τις ροές φορτίου. Χρησιμοποιώντας παρόμοιες ρουτίνες, οι οποίες πλέον καλούνται από την κυρίως ρουτίνα χρονικής προσομοίωσης σε κάθε βήμα, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι ροές ισχύος των ζυγών στους οποίους υπολογίζεται ο δείκτης NLI (δηλαδή με I PLOT = 2).

Η τροποποιημένη ρουτίνα που χειρίζεται τα εν λόγω ζητήματα, ονομάζεται bus_data_calc και βρίσκεται ενσωματωμένη στον κώδικα του WPSTAB μεταξύ του ελέγχου ύπαρξης σύγκλισης της μεθόδου επίλυσης και του ελέγχου αν πρόκειται για την ίδια χρονική στιγμή, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.6, που αποτελεί την λεπτομέρεια από το μεγαλύτερο διάγραμμα ροής που φαίνεται στο Σχ. 4.5. Είναι προφανές ότι κατά την προσομοίωση μπορεί να υπάρχει συνδυασμός τόσο των σχημάτων προστασίας που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES όσο και στο δείκτη NLI.

Εφόσον υπάρχει έστω και ένας ζυγός στον οποίο είναι εγκατεστημένη μονάδα συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών για τον υπολογισμό του NLI το WPSTAB εξάγει στο αρχείο “BUS_DATA.RES” όλα τα απαραίτητα στοιχεία^{xv}. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τον χρόνο προσομοίωσης, την τάση V_i και

^{xv}Να σημειωθεί πως στο αρχείο εξόδου BUS_DATA.RES σώζονται για λόγους πληρότητας τόσο οι τιμές για t^- όσο και για t^+ , ώστε αν χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντική εφαρμογή, ωστόσο, από το ΣΑ2 χρησιμοποιούνται μόνο αυτές που αντιστοιχούν σε t^- .

την αντίστοιχη γωνία του ζυγού δ_i , τα φορτία καθώς και τις ροές ισχύος P_{ij} , Q_{ij} , για κάθε έναν ζυγό i με $\text{IPL0T} = 2$, όπου j είναι οι ζυγοί με τους οποίους ενώνεται ο ζυγός i .

Με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο για τον υπολογισμό του δείκτη NLI, που αναπτύχθηκε στην Εν. 3.2 και ενσωματώθηκε στο σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης της Εν. 4.4, για κάθε ζυγό i ενός διαδρόμου μεταφοράς που τροφοδοτεί μια ευάλωτη περιοχή, απαιτείται η μεταφερόμενη από τον διάδρομο ενεργός ισχύς P_i καθώς και η φαινόμενη από τον ζυγό ωμική αγωγιμότητα G_i . Αυτά μπορούν να υπολογιστούν από το αρχείο `BUS_DATA.RES` ως εξής: Αρχικά υπολογίζεται η μεταφερόμενη (μυγαδική) ισχύς από τον διάδρομο προς τον εξεταζόμενο οριακό ζυγό, με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_i = - \sum_{j \in K_i} P_{ij} \quad (4.22\alpha)$$

$$Q_i = - \sum_{j \in K_i} Q_{ij} \quad (4.22\beta)$$

όπου K_i είναι το σύνολο εξωτερικών συνδέσεων, που περιλαμβάνει τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης του διαδρόμου μεταφοράς με τους οποίους ενώνεται ο συνοριακός ζυγός άφιξης i της ευάλωτης περιοχής^{xvi}. Ως εκ τούτου η σύνθετη φαινόμενη αγωγιμότητα Y_i υπολογίζεται ως εξής:

$$Y_i = \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^2} \right) \quad (4.23)$$

από την οποία το πραγματικό μέρος είναι η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα που μας ενδιαφέρει, δηλαδή:

$$G_i = \frac{P_i}{V_i^2} \quad (4.24)$$

Καθώς η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην Εν. 4.4 αφορά συστήματα που περιλαμβάνουν θόρυβο και μεταβατικά φαινόμενα που ανήκουν στην βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ το πρόγραμμα WPSTAB εκτελεί μακροπρόθεσμη χρονική προσομοίωση με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης οπότε και τα ανωτέρω φαινόμενα είτε έχουν εξαλειφθεί (τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα θεωρούνται σε ισορροπία) είτε δεν υφίστανται (θόρυβος), είναι προφανές ότι δεν χρειάζεται να εφαρμοσθεί αυτούσια. Συγκεκριμένα μπορεί να θεωρηθεί ότι οι δειγματοληπτημένοι κινητοί μέσοι όροι της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας $\bar{G}(t_k)$ και της μεταφερόμενης ισχύος $\bar{P}(t_k)$ των σχέσεων (4.12), με περίοδο δειγματοληψίας Δt όπως αυτή ορίζεται στην (4.13), έχουν πρακτικά εξαλείψει τον θόρυβο και τα ταχεία μεταβατικά που υπάρχουν στα αρχικά σήματα και ως εκ τούτου μπορούν να προσεγγιστούν από τις αντίστοιχες τιμές που υπολογίζονται από τα δεδομένα εξόδου του WPSTAB τις χρονικές στιγμές t^- , εφόσον το βήμα προσομοίωσης είναι και αυτό Δt . Με άλλα λόγια θεωρείται ότι ισχύει:

$$G_i(t^-) \simeq \bar{G}_i(t_k) \quad (4.25\alpha)$$

$$P_i(t^-) \simeq \bar{P}_i(t_k) \quad (4.25\beta)$$

όπου $P_i(t^-)$ και $G_i(t^-)$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (4.22α) και (4.24) αντίστοιχα από το αρχείο εξόδου `BUS_DATA.RES` του WPSTAB.

Από το σημείο αυτό και πέρα οι δείκτες NLI υπολογίζονται ακριβώς με τον τρόπο που περιγράφεται στην Εν. 4.4 και συγκεκριμένα τις σχέσεις (4.14)–(4.19).

^{xvi}Βλ. και Σχ. 3.7 σελ. 89.

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογές συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας (μέθοδος LIVES)

Στο παρόν κεφάλαιο, τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που αναπτύχθηκαν στο Κεφ. 4 και στηρίζονται στη μέθοδο LIVES εφαρμόζονται σε διάφορα συστήματα δοκιμών αλλά και στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα με αντικείμενο την ευστάθεια τάσης της Πελοποννήσου.

Χρησιμοποιούνται δύο συστήματα δοκιμών με διάφορες παραλλαγές. Το πρώτο σύστημα αφορά ένα απλό δίκτυο που περιλαμβάνει 9 ζυγούς μεταφοράς με δύο επίπεδα τάσης που συνδέονται μέσω αυτομετασχηματιστών ΥΥΤ/ΥΤ, 2 γεννήτριες και δυναμικά επαναφερόμενα φορτία. Η δυνατότητα ή όχι ρύθμισης της πλευράς ΥΤ των αυτομετασχηματιστών δίνει δύο παραλλαγές του συγκεκριμένου συστήματος. Στην πρώτη παραλλαγή οι λήψεις των αυτομετασχηματιστών είναι σταθερές ενώ στην δεύτερη έχουν δυνατότητα ρύθμισης της πλευράς ΥΤ με ΣΑΤΥΦ. Στη συνέχεια το εν λόγω σύστημα θα αναφέρεται και σαν *Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών*.

Το δεύτερο σύστημα δοκιμών είναι μια τυποποιημένη παραλλαγή του Nordic32 που έχει προταθεί από την IEEE Task Force [Van15]. Πρόκειται για ένα απλοποιημένο μοντέλο που στηρίζεται στο Σουηδικό και Νορβηγικό ΣΗΕ, αποτελούμενο από 54 ζυγούς μεταφοράς και διανομής, 19 γεννήτριες και έναν σύγχρονο πυκνωτή. Το συγκεκριμένο σύστημα δοκιμών θα αναφέρεται στη συνέχεια σαν *Nordic Test System*.

Για την προσομοίωση των συστημάτων δοκιμών και των αντίστοιχων συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης χρησιμοποιούνται τρία προγράμματα, εκ των οποίων δύο στηρίζονται στην οιονεί στατική προσέγγιση (QSS), όπου τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα θεωρούνται σε ισορροπία και ένα που κάνει πλήρη χρονική προσομοίωση, λαμβάνοντας υπόψη και τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα.

Στην κατηγορία της οιονεί στατικής προσέγγισης ανήκει το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB [Bou99], η λειτουργία του οποίου καθώς και τα βασικά του χαρακτηριστικά περιγράφηκαν αναλυτικά στο Κεφ. 2. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται στην προσομοίωση του Nordic Test System. Στην ίδια κατηγορία ανήκει το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab® και περιγράφεται αναλυτικά στη διπλωματική εργασία [Man10]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του Συστήματος Δοκιμών 9 ζυγών.

Στη κατηγορία της πλήρους χρονικής προσέγγισης ανήκει το πρόγραμμα προσομοίωσης Ramses που έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο της Λιέγης και η λειτουργία του περιγράφεται στο [AFV14]. Το εν λόγω πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του Nordic Test System.

Ο λόγος που χρησιμοποιείται τόσο η πλήρης όσο και η οιονεί στατική προσέγγιση είναι για να απο-

δειχθεί ότι, όσον αφορά την προσομοίωση της ανίχνευσης αστάθειας τάσης και την προστασία από αυτήν, οι δύο προσεγγίσεις προσφέρουν ταυτόσημα ποιοτικά αποτελέσματα, ώστε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα απευθείας η οιονεί στατική προσέγγιση για την προσομοίωση της εφαρμογής των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του προγράμματος της πλήρους χρονικής προσομοίωσης γίνεται για να αποδειχθεί η ανοσία των διαφόρων σχημάτων ανίχνευσης και προστασίας απέναντι σε βραχυπρόθεσμα μεταβατικά και σε μετρητικό θόρυβο, όπως και στην επιλογή περιβάλλοντος και μεθόδου ολοκλήρωσης.

Η εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα περιλαμβάνει ένα στιγμιότυπο από το σύστημα της 15^η Ιουνίου 2010 για το οποίο μια ενδεχόμενη διαταραχή (contingency) ελαχιστοποιούσε τα περιθώρια φόρτισης του συστήματος, ιδιαίτερα στην περιοχή της Πελοποννήσου. Με βάση αυτό το σενάριο γίνονται μελέτες αύξησης της ικανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ισχύος μέσω της χρήσης χωρητικής αντιστάθμισης στα αιολικά πάρκα, ενώ εφαρμόζονται και τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που στηρίζονται στη μέθοδο LIVESⁱ.

5.1 Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με δυναμικά επαναφερόμενα φορτία

Το πρώτο σύστημα δοκιμών στο οποίο εφαρμόζονται τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης με βάση τη μέθοδο LIVES περιλαμβάνει δυναμικά επαναφερόμενα φορτία και 9 ζυγούς μεταφοράς σε δύο επίπεδα τάσης, ΥΤ και ΥΥΤ, που συνδέονται μέσω αυτομετασηματιστών. Πάνω σε αυτό το μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) γίνονται ρυθμίσεις των συστημάτων προστασίας και εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης των μεταβλητών λήψεων των αυτομετασηματιστών για πιο αποτελεσματική παρακολούθηση και αποκατάσταση της ευστάθειας. Τα βασικά αποτελέσματα από αυτή την εφαρμογή παρουσιάζονται στις δημοσιεύσεις [MLV11, LMV11].

5.1.1 Περιγραφή συστήματος

Όπως έχει αναφερθεί, το συγκεκριμένο σύστημα δοκιμών αποτελείται από 9 ζυγούς ΥΥΤ και ΥΤ, από τους οποίους 4 είναι ζυγοί φορτίου, 2 ζυγοί παραγωγής και ένας άπειρος ζυγός. Η τοπολογία του δικτύου αυτού παρουσιάζεται στο Σχ. 5.1α. Στο συγκεκριμένο σχήμα οι ζυγοί φορτίου εμφανίζονται χωρίς τους μετασηματιστές διανομής, των οποίων το μοντέλο φαίνεται στο Σχ. 5.1β, ενώ το ίδιο ισχύει και για τους ζυγούς παραγωγής, των οποίων η λεπτομερής συνδεσμολογία τους, συμπεριλαμβανομένου και του μετασηματιστή ανύψωσης φαίνεται στο Σχ. 5.1γⁱⁱ.

Τα δυναμικά φορτία έχουν μοντελοποιηθεί ούτως ώστε στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα να συμπεριφέρονται σαν σταθερές αγωγιμότητες, ενώ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα τείνουν να αποκαταστήσουν την αρχική τους ενεργό και άεργο ζήτηση. Αυτή η αποκατάσταση των δυναμικών φορτίων περιγράφεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

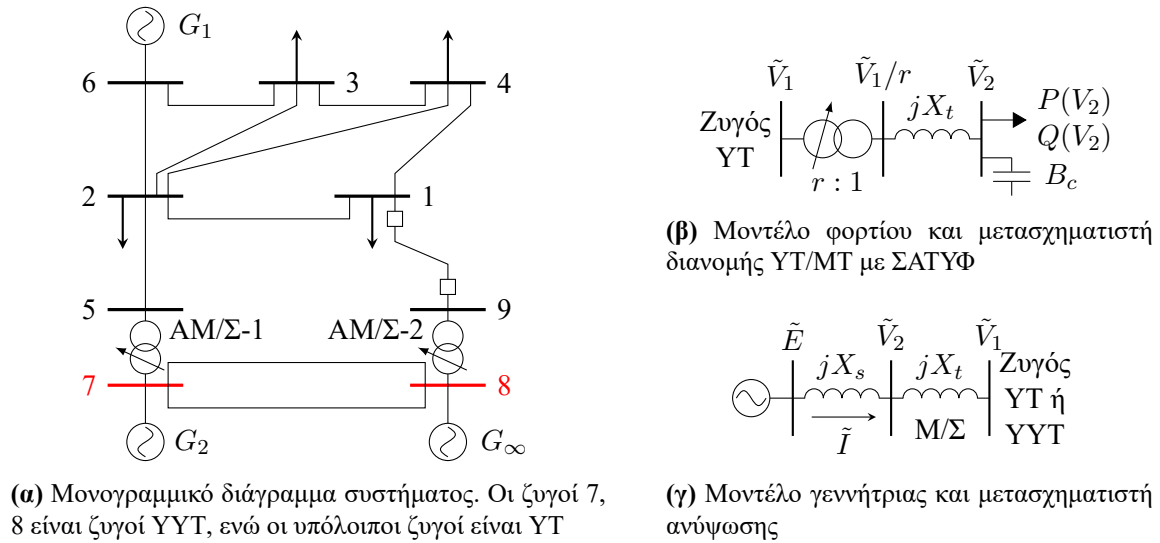
$$T_D \dot{G}_i = P_{Di} - G_i V_i^2 \quad (5.1\alpha)$$

$$T_D \dot{B}_i = -Q_{Di} - B_i V_i^2 \quad (5.1\beta)$$

όπου T_D η χρονική σταθερά ανάκτησης φορτίου, P_{Di} & Q_{Di} η ενεργός και άεργος αντίστοιχα ζήτηση, G_i & B_i το πραγματικό (ωμικό) και φανταστικό (επαγωγικό) μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας του φορτίου και τέλος, V_i η ελεγχόμενη από το ΣΑΤΥΦ τάση. Σημειώνεται ότι $Q_{Di} > 0$ για επαγωγική

ⁱΣυγκεντρωτικά, τα διάφορα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνονται στον Πίν. Β.1 του Παραρτήματος Β, σελ. 231.

ⁱⁱΗ σύμβαση που ακολουθείται σε σχέση με τις αποκρίσεις του συγκεκριμένου συστήματος είναι ότι οι δείκτες 1 και 2 στα σχήματα της παρούσας ενότητας αντιστοιχούν στην πλευρά ΥΤ και ΜΤ αντίστοιχα του εκάστοτε μετασηματιστή και όχι στον αριθμό του ζυγού.



Σχήμα 5.1: Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών

ζήτηση (κατανάλωση) ενώ $B_i > 0$ για χωρητικό φορτίο. Τα στοιχεία των φορτίων είναι συγκεντρωμένα στον Πίν. Γ.4, του Παραρτήματος Γ.

Οι αυτομετασχηματιστές συνδέονται μεταξύ των ζυγών 7–5 (ΑΜ/Σ-1) και 8–9 (ΑΜ/Σ-2) και η λειτουργία ή μη των ΣΑΤΥΦ τους είναι αυτή που δίνει τις δύο παραλλαγές του συγκεκριμένου συστήματος. Συγκεκριμένα, στην πρώτη παραλλαγή θεωρείται ότι οι αυτομετασχηματιστές έχουν σταθερό λόγο μετασχηματισμού. Αντίθετα, στη δεύτερη παραλλαγή, θεωρείται ότι οι αυτομετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με σύστημα μεταβλητών λήψεων (σύστημα δύο επίπεδων ΣΑΤΥΦ στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος LIVES).

Οι γεννήτριες έχουν μοντελοποιηθεί σαν πηγές τάσης E πίσω από μια αντίδραση X_s , όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1γ, όπου απεικονίζεται και ο μετασχηματιστής ανύψωσης για τη σύνδεση στον αντίστοιχο ζυγό ΥΤ ή ΥΥΤ του Σχ. 5.1α. Η συμπεριφορά των γεννητριών περιλαμβάνει τις ακόλουθες δύο περιπτώσεις λειτουργίας:

1. Λειτουργία ΑΡΤ: Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει $E \leq E_f^{\text{lim}}$ και θεωρείται ότι οι γεννήτριες μπορούν να ελέγξουν πλήρως την τερματική τους τάση με $V_2 = V_{ref}$ (ολοκληρωτικός έλεγχος ΑΡΤ).
2. Λειτουργία ΣΠΥ: Σε αυτήν την περίπτωση η εσωτερική ΗΕΔ των γεννητριών τίθεται ίση με το αντίστοιχο όριο, δηλαδή ισχύει $E = E_f^{\text{lim}}$ (ολοκληρωτικός έλεγχος ΣΠΥⁱⁱⁱ), ενώ η τερματική τους τάσης παραμένει κάτω από την αναφορά της ($V_2 < V_{ref}$).

Η χρονική καθυστέρηση για τη μετάβαση από ΑΡΤ σε ΣΠΥ μετά την υπερδιέγερση είναι T_G .

Αρχικά όλες οι γεννήτριες θεωρούνται σε λειτουργία ΑΡΤ. Ο έλεγχος της μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη, γίνεται μέσω του ελέγχου της τάσης E σε σχέση με το αντίστοιχο όριο. Όταν είναι ενεργός ο ΑΡΤ, η τάση E υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$E = |\tilde{V}_2 + jX_s\tilde{I}| \quad (5.2)$$

όπου \tilde{I} είναι το εγχεόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια και X_s η σύγχρονη αντίδραση (βλ. Σχ. 5.1γ).

Αντίθετα, αν η τάση E της γεννήτριας υπερβεί το αντίστοιχο όριο για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο ή ίσο από T_G , τότε η συγκεκριμένη γεννήτρια μεταβαίνει σε λειτουργία ΣΠΥ με $E = E_f^{\text{lim}}$. Σε αυτήν

ⁱⁱⁱΒλ. και Παρ. 2.2.4.1, σελ. 53.

την περίπτωση η τερματική τάσης της γεννήτριας δεν παραμένει σταθερή αλλά αντίθετα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_2 = |\tilde{E} - jX_s\tilde{I}|, E = E_f^{\text{lim}} \quad (5.3)$$

Εφόσον η γεννήτρια μεταβεί σε λειτουργία ΣΠΥ παραμένει σε αυτήν όσο η υπολογιζόμενη τερματική τάση παραμένει κάτω από την τιμή αναφοράς της, δηλαδή όσο ισχύει $V_2 < V_{ref}$. Σε αντίθετη περίπτωση, αν δηλαδή ξεπεραστεί η τιμή αναφοράς της τερματικής τάσης, η αντίστοιχη γεννήτρια γυρνά σε λειτουργία APT την επόμενη χρονική στιγμή.

Όλα τα δεδομένα του συγκεκριμένου συστήματος δοκιμών μπορούν να αναζητηθούν στο Παράρτημα Γ.1. Συγκεκριμένα τα δεδομένα των ΣΑΤΥΦ φαίνονται στον Πίν. Γ.1, των γεννητριών στον Πίν. Γ.2 και των γραμμών μεταφοράς χωρίς εγκάρσια στοιχεία στον Πίν. Γ.3.

Η εξεταζόμενη διαταραχή αφορά το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς YT που ενώνει τους ζυγούς 1 και 9 τη χρονική στιγμή $t = 50$ s, ενώ η αρχική φόρτιση είναι τέτοια που η συγκεκριμένη διαταραχή προκαλεί αστάθεια τάσης και τελικά κατάρρευση του συστήματος, αν δεν εφαρμοστούν κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης.

Στη συνέχεια εξετάζονται τα δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, που οδηγούν στις αντίστοιχες παραλλαγές του συγκεκριμένου συστήματος, ήτοι την περίπτωση με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και την περίπτωση που είναι εξοπλισμένοι με σύστημα μεταβλητών λήψεων.

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, για την προσομοίωση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας στο συγκεκριμένο σύστημα δοκιμών χρησιμοποιείται η οιονεί στατική προσέγγιση με το πρόγραμμα που περιγράφεται στη διπλωματική εργασία [Man10]. Το βήμα της προσομοίωσης, που ταυτίζεται με το βήμα δειγματοληψίας για τον υπολογισμό των διάφορων κινητών μέσων όρων, είναι $\Delta t = 0.5$ s.

5.1.2 Εφαρμογή προστασίας στο Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές

Σε αυτήν την περίπτωση οι λήψεις των αυτομετασχηματιστών θεωρούνται σταθερές, χωρίς δυνατότητα ρύθμισης της πλευράς YT, ενώ το σύστημα προστασίας που θα χρησιμοποιηθεί είναι το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας με δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου ΣΠ1.2.

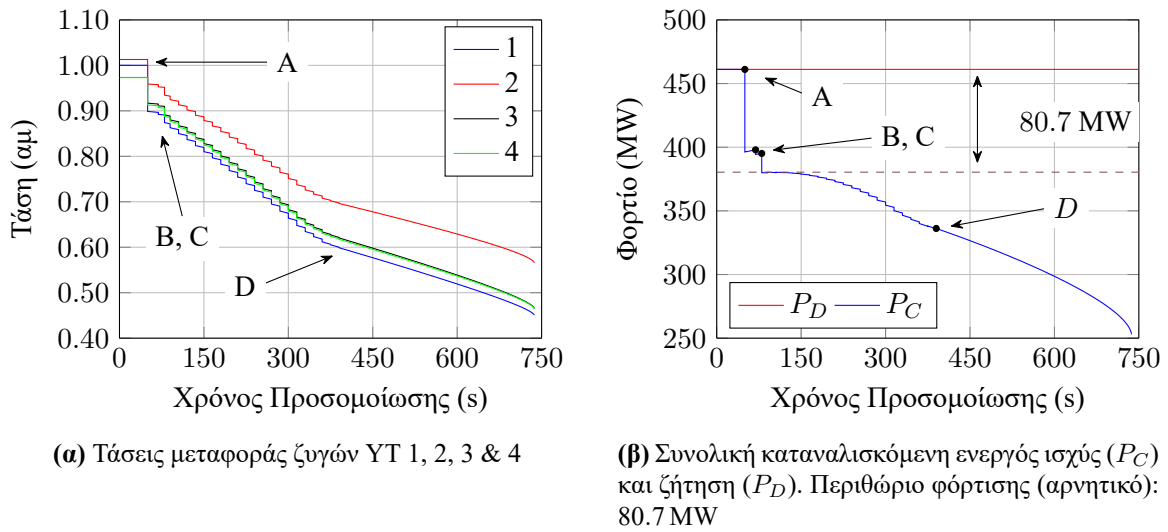
Το συγκεκριμένο σύστημα προστασίας περιλαμβάνει το υποσύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης LIVES-alarm (LA), το υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LIVES-restore (LR) και το υποσύστημα αποκατάστασης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ LTC-range restoration ((LTC-rr), ενώ η άμεση αποκοπή φορτίου ενεργοποιείται όταν υπάρχει ενεργός συναγερμός αστάθειας από LA ή σήμα αποκατάστασης LTC-rr και η τάση πρωτεύοντος ή δευτερεύοντος είναι κάτω από συγκεκριμένα κατώφλια, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Υποεν. 4.2.3.

Η χρήση της άμεσης αποκοπής φορτίου είναι επιβεβλημένη, λόγω της παρουσίας των δυναμικά επαναφερόμενων φορτίων, που αποκαθιστούν την ονομαστική τους ζήτηση και ως εκ τούτου σύστημα προστασίας χωρίς άμεση αποκοπή φορτίου μπορεί να προσφέρει μόνο παροδική ανακούφιση.

Καθώς το σύστημα προστασίας ΣΠ1.2 μπορεί να υλοποιηθεί σε μετασχηματιστές ή αυτομετασχηματιστές εξοπλισμένους με ΣΑΤΥΦ, στην παρούσα υποενότητα η εφαρμογή του περιορίζεται μόνο στους ζυγούς MT (φορτίων) των υποσταθμών διανομής. Οι παράμετροι προστασίας του ΣΠ1.2 στην παρούσα εφαρμογή είναι οι ακόλουθες^{iv}:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = -0.1$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 0$ αμ

^{iv}Βλ. Πίν. Β.1, σελ. 231



Σχήμα 5.2: Αποκρίσεις Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές, χωρίς προστασία. A: εφαρμογή διαταραχής, B & C: ενεργοποίηση ΣΠΥ, D: εξάντληση ΣΑΤΥΦ

- Επιτρεπόμενος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ από LR: $n_{rev}^{max} = 5$
- Επιτρεπόμενος αριθμός εφαρμογών μείωσης τάσης αναφοράς από LR: $n_{LR}^{max} = 5$
- Αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών άμεσης αποκοπής φορτίου: χωρίς όριο
- Ποσοστό αποκοπής φορτίου ανά εφαρμογή: 5% της αρχικής ζήτησης
- Κατώφλια τάσης για εφαρμογή αποκοπής φορτίου:

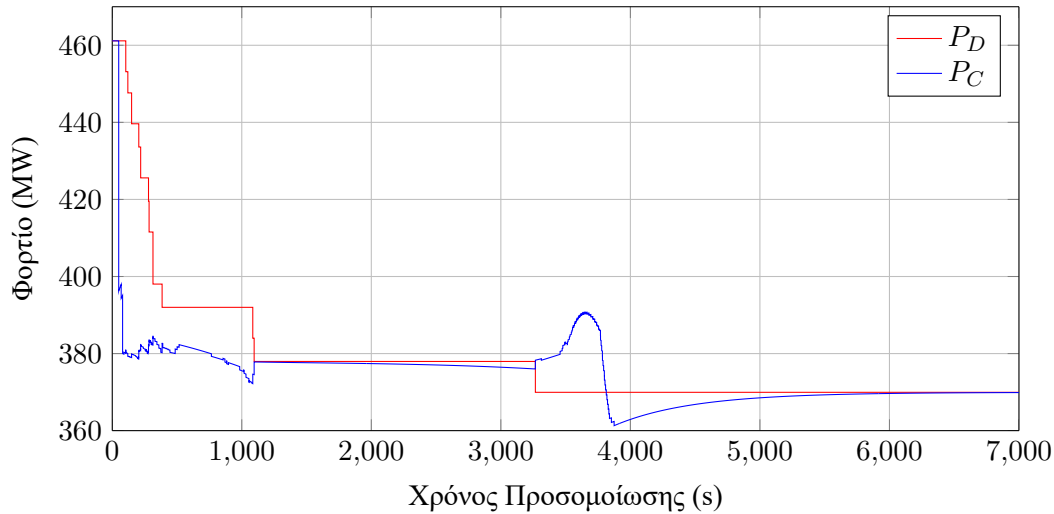
- $V_1^{thres} = 0.83$ αμ στην YT
- $V_2^{thres} = 0.90$ αμ στη MT

Αρχικά το σύστημα προσομοιώνεται χωρίς προστασία. Οι αποκρίσεις των τάσεων μεταφοράς των ζυγών YT των φορτίων φαίνονται στο Σχ. 5.2α, ενώ η συνολική ενεργός ζήτηση (P_D) και καταναλισκόμενη ισχύς (P_C) φαίνονται στο Σχ. 5.2β.

Αμέσως μετά το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς 1–9 τη χρονική στιγμή $t = 50$ s (σημείο A στα Σχ. 5.2) οι τάσεις του συστήματος βυθίζονται ακαριαία με αποτέλεσμα και οι δύο τοπικές γεννήτριες του συστήματος να ξεπεράσουν τα αντίστοιχα όρια E_f^{lim} προσπαθώντας να κρατήσουν τις τερματικές τους τάσεις σταθερές. Τις χρονικές στιγμές $t = 69$ s και $t = 80$ s (σημεία B & C στα Σχ. 5.2) οι γεννήτριες G_2 και G_1 αντίστοιχα συμπληρώνουν την απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση ($T_{G2} = 19$ s, $T_{G1} = 30$ s) και μεταβαίνουν από λειτουργία APT σε ΣΠΥ.

Ταυτόχρονα, τα ΣΑΤΥΦ προσπαθούν να αποκαταστήσουν τις τάσεις των ζυγών MT, αλλά εξαντλούν τις μεταβλητές τους λήψεις 340 s περίπου μετά την διαταραχή (σημείο D στα Σχ. 5.2). Στη συνέχεια η απόκριση του συστήματος οδηγείται μόνο από την αργή δυναμική αποκατάσταση των φορτίων, βάσει των (5.1). Καθώς υπάρχει ένα αρνητικό περιθώριο φόρτισης 80.7 MW (βλ. Σχ. 5.2β), τα φορτία δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τη ζήτηση τους, οδηγώντας εν τέλει το σύστημα σε κατάρρευση τη χρονική στιγμή $t = 736$ s.

Από την άλλη πλευρά, με την εφαρμογή του αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας ΣΠ1.2, το σύστημα είναι σε θέση να αντεπεξέλθει την επιβαλλόμενη διαταραχή, όπως φαίνεται από



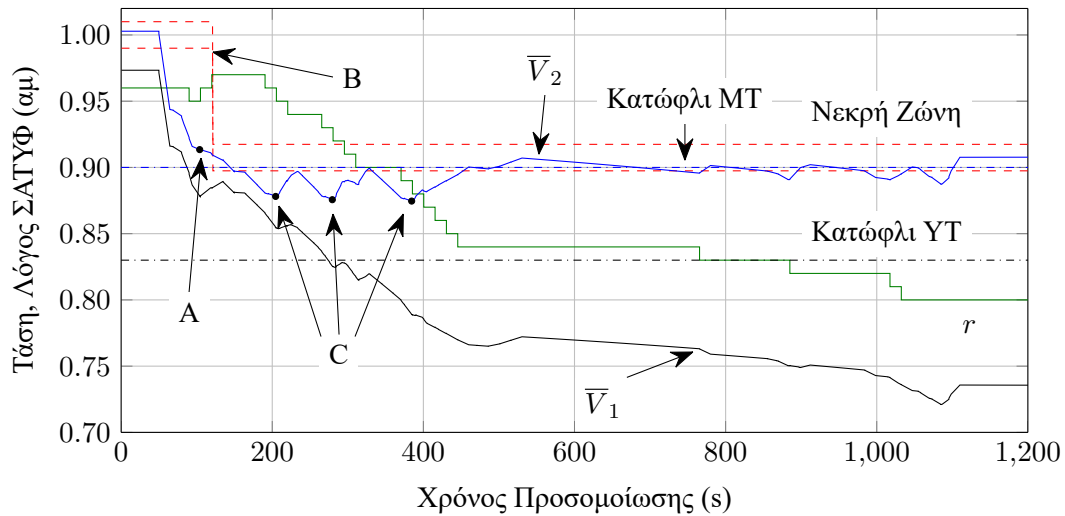
Σχήμα 5.3: Συνολική καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς (P_C) και ζήτηση (P_D) Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2

το Σχ. 5.3, που απεικονίζει τη συνολική καταναλισκόμενη ενεργό ισχύ και ζήτηση των φορτίων του συστήματος. Η αλληλουχία των γεγονότων σε αυτήν την περίπτωση παρουσιάζεται συνοπτικά στον Πίν. 5.1.

Η λειτουργία του συστήματος προστασίας στη συγκεκριμένη περίπτωση οδηγεί τη χρονική στιγμή $t = 104$ s σε σήμανση συναγερμών LIVES σε όλους τους ζυγούς φορτίου. Επειδή η τάση διανομής (MT) του ζυγού 1 είναι ήδη κάτω από αντίστοιχο κατώφλι, ενεργοποιείται στο συγκεκριμένο ζυγό η άμεση αποκοπή φορτίου. Αντίθετα στον ζυγό 4 το αντίστοιχο κατώφλι συναντάται 16 s μετά από τη σήμανση συναγερμού LIVES, οπότε και εφαρμόζεται τότε η αντίστοιχη άμεση αποκοπή φορτίου, αναστέλλοντας ταυτόχρονα και τη λειτουργία του υποσυστήματος LR. Στους ζυγούς 2 και 3, καθώς οι τάσεις παραμένουν πάνω από τα αντίστοιχα κατώφλια, το υποσύστημα LR λειτουργεί όπως αναμένεται, κατεβάζοντας την αντίστοιχη τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης στην τρέχουσα τιμή κινητού μέσου όρου της τάσης τη χρονική στιγμή $t = 121$ s.

Αυτό είναι εμφανές και από το Σχ. 5.4, το οποίο περιλαμβάνει την απόκριση των κινητών μέσω των τάσεων του ζυγού φορτίου 3, τόσο για την πλευρά της μεταφοράς (YT), όσο και για την διανομή (MT). Η χρονική στιγμή σήμανσης του πρώτου συναγερμού LIVES από το υποσύστημα LA αντιστοιχεί στο σημείο A. Αμέσως το ΣΑΤΥΦ αντιστρέφει τη λειτουργία του, προσπαθώντας να αποκαταστήσει την ευστάθεια, κάτι που το καταφέρνει με δύο κινήσεις, οπότε και μειώνεται η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης στο τρέχον επίπεδο του κινητού μέσου όρου της τάσης (σημείο B). Οι ακόλουθοι συναγερμοί LIVES στο συγκεκριμένο ζυγό, τις χρονικές στιγμές $t = 205$ s, 280 s και 385 s, βρίσκουν την MT κάτω από το κατώφλι του 90%, με αποτέλεσμα να συνοδεύονται από αποκοπές φορτίου (σημεία C).

Το ίδιο ισχύει και για τους ζυγούς 1 και 4, όπου διαδοχικοί συναγερμοί LIVES έχουν σαν αποτέλεσμα την άμεση αποκοπή φορτίου. Στους ίδιους ζυγούς, τις χρονικές στιγμές $t = 420$ s, 471 s και 868 s, ενεργοποιείται το υποσύστημα LTC-rr, ελαττώνοντας τις τάσεις αναφοράς των νεκρών ζωνών κατά 5%, προκειμένου να απεμπλακούν τα ήδη εξαντλημένα ΣΑΤΥΦ. Αυτό επιτυγχάνεται για το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4, λόγω όμως της δυναμικής φύσης των φορτίων το ΣΑΤΥΦ στον ζυγό 1 εξαντλείται ξανά μετά από περίπου 600 s, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί εκ νέου το υποσύστημα LTC-rr. Σε αυτήν την περίπτωση όμως, καθώς η MT είναι κάτω από το αντίστοιχο κατώφλι, το υποσύστημα LTC-rr δεν μειώνει την τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης αλλά προχωρά σε άμεση αποκοπή φορτίου τις χρονικές στιγμές $t = 1085$ s, 1096 s και 3267 s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.4: Αποκρίσεις ζυγού 3 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2. \bar{V}_1 : κινητός μέσος πρωτεύοντος, \bar{V}_2 : κινητός μέσος δευτερεύοντος, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, A: συναγερός από LA, B: σήμα αποκατάστασης LR, C: ενεργοποίηση LA με άμεση αποκοπή φορτίου 5%

Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι μετά την τελευταία αποκοπή φορτίου και οι δύο γεννήτριες μεταβαίνουν σε αυτόματη ρύθμιση τάσης από την λειτουργία προστασίας υπερδιέγερσης, κάτι που υποδηλώνει το τέλος της κατάστασης έκτακτης ανάγκης.

Είναι αναμενόμενο ότι με το τέλος αυτής της κατάστασης ανάγκης οι τάσεις αναφοράς των νεκρών ζωνών των ΣΑΤΥΦ, μπορούν να επαναφερθούν σταδιακά στις αρχικές τους τιμές, εφόσον υπάρξει επαρκής αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος. Αυτό μπορεί να γίνει είτε ενεργοποιώντας τοπική παραγωγή είτε επανασυνδέοντας την ανοιχτή γραμμή 1–9.

Όπως φαίνεται, από το Σχ. 5.3 και τον Πίν. 5.1, το σύστημα προστασίας ΣΠ1.2, είναι σε θέση να σώσει το σύστημα, με κόστος βέβαια την απώλεια φορτίου 93 MW, που αντιστοιχεί περίπου στο 20% της αρχικής ζήτησης. Σε κάθε περίπτωση το ποσό αυτό είναι πολύ κοντά στο αρνητικό περιθώριο φόρτισης των 80.7 MW που υφίσταται όταν δεν ληφθεί κανένα μέτρο προστασίας (βλ. Σχ. 5.2β). Η μικρή διαφορά οφείλεται αφενός στο γεγονός πως οι αποκοπές από το ΣΠ1.2 δεν επιβάλλονται ταυτόχρονα αλλά διαδοχικά, αφετέρου, στο σταθερό ποσοστό αποκοπής που έχει υιοθετηθεί ανά εφαρμογή.

5.1.3 Εφαρμογή προστασίας στο Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές

Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα εξεταστεί αν η ύπαρξη μεταβλητών λήψεων στους αυτομετασχηματιστές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση της αστάθειας και αν η εφαρμογή της προστασίας και σε αυτό το επίπεδο προσφέρει πλεονεκτήματα ή όχι.

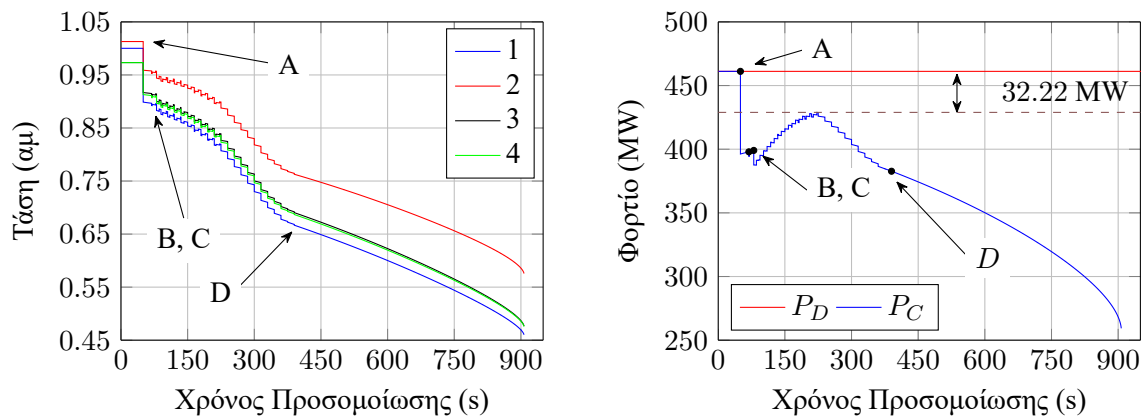
Με την υπόθεση ότι οι αυτομετασχηματιστές AM/Σ-1 και AM/Σ-2 του Σχ. 5.1α είναι εφοδιασμένοι με ΣΑΤΥΦ, η απόκριση του συστήματος χωρίς εφαρμογή προστασίας φαίνεται, σε αναλογία με το Σχ. 5.2, στο Σχ. 5.5. Είναι εμφανές ότι η ύπαρξη δυνατότητας ρύθμισης τάσης στο επίπεδο της YT, καταφέρνει να αυξήσει την καταναλισκόμενη ισχύ μετά την διαταραχή, πλησιάζοντας περισσότερο στη ζήτηση των δυναμικών φορτίων και καθυστερώντας την κατάρρευση, η οποία όμως και πάλι δεν είναι δυνατόν να αποφευχθεί χωρίς την εφαρμογή προστασίας. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τη σύγκριση των Σχ. 5.5β και 5.2β, στην συγκεκριμένη περίπτωση το αρνητικό περιθώριο φόρτισης είναι μικρότερο κατά

Πίνακας 5.1: Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με σταθερή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	Κατώφλι ^α	V_{ref} (αμ) ^β	Αποκοπή Φορτίου (MW)
69	G_2	ΣΠΥ			
80	G_1	ΣΠΥ			
104	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
104	2	LA			
104	3	LA			
104	4	LA			
120	4	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		5.5
121	2	LR		0.91	
121	3	LR		0.91	
150	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
205	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
209	1	LA			
220	1	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
280	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
285	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		8.0
315	1	LA με Αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		8.0
315	4	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		5.5
385	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
420	1	LTC-rf		0.95	
420	4	LTC-rf		0.95	
471	1	LTC-rf		0.90	
868	4	LTC-rf		0.90	
1085	1	LTC-rf με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$	-	8.0
1096	1	LTC-rf με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$	-	8.0
3267	1	LTC-rf με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$	-	8.0
3767	G_1	ΑΡΤ			
3769	G_2	ΑΡΤ			
Σύνολο					93.0

^α Η συγκεκριμένη στήλη δείχνει αν η τάση μεταφοράς V_1 ή η τάση διανομής V_2 είναι κάτω από το αντίστοιχο κατώφλι ενεργοποίησης της άμεσης αποκοπής φορτίου, το μέγεθος της οποίας φαίνεται στην τελευταία στήλη

^β Τάση αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ



(α) Τάσεις μεταφοράς ζυγών (YT) 1, 2, 3 και 4

(β) Συνολική καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς (P_C) και ζήτηση (P_D). Περιθώριο φόρτισης (αρνητικό): 32.22 MW

Σχήμα 5.5: Αποκρίσεις Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές, χωρίς προστασία. A: εφαρμογή διαταραχής, B & C: ενεργοποίηση ΣΠΥ, D: εξάντληση ΣΑΤΥΦ

περίπου 47 MW και ως εκ τούτου, η κατάρρευση λαμβάνει χώρα περίπου 200 s αργότερα σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, που υπάρχει ένα μόνο επίπεδο ΣΑΤΥΦ.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση της εφαρμογής του συστήματος προστασίας από αστάθεια τάσης σε περιπτώσεις πολλαπλών επιπέδων ΣΑΤΥΦ, εφαρμόζονται δύο διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο δεν εφαρμόζεται προστασία στους αυτομετασχηματιστές, ενώ στο δεύτερο χρησιμοποιείται προστασία.

Συγκεκριμένα στο πρώτο σενάριο οι αυτομετασχηματιστές θεωρούνται εφοδιασμένοι μόνο με το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1^ν για την σήμανση σχετικού συναγερμού. Οι παράμετροι εφαρμογής του ΣΑ1 σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = 0$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 0$ αμ

Στο δεύτερο σενάριο θεωρείται ότι οι αυτομετασχηματιστές είναι εξοπλισμένοι με το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, το οποίο είναι ίδιο με το ΣΠ1.2 χωρίς όμως τη δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου. Σε κάθε περίπτωση, στους μετασχηματιστές διανομής YT/MT θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένο το ΣΠ1.2 και παραμέτρους αυτές που αναφέρθηκαν στην Υποεν. 5.1.2. Οι παράμετροι του ΣΠ1.1 είναι ίδιες με του ΣΠ1.2, χωρίς βεβαίως τις παραμέτρους που αφορούν την εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου.

5.1.3.1 Χωρίς προστασία στους αυτομετασχηματιστές

Στο συγκεκριμένο σενάριο, η αλληλουχία των γεγονότων φαίνεται στον Πίν. 5.2. Ο πρώτος συναγερμός LIVES (χωρίς διορθωτική δράση), σημαίνεται στο ζυγό 5, που ελέγχεται από τον ΑΜ/Σ-1, αρκετά πιο νωρίς (περίπου 20 s) σε σχέση με την περίπτωση της Υποεν. 5.1.2. Οι επόμενοι συναγερμοί, στους ζυγούς διανομής, παρουσιάζουν μια καθυστέρηση της τάξης των 100 s στην σήμανση τους σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, καθώς πλέον οι αυτομετασχηματιστές είναι σε θέση να αποκαταστήσουν

^νΕίναι το υποσύστημα ανίχνευσης LA το οποίο αναφέρεται έτσι όταν χρησιμοποιείται αυτόνομα, χωρίς να είναι ενσωματωμένο σε σύστημα προστασίας. Βλ. Πίν. Β.1, σελ. 231.

Πίνακας 5.2: Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2 μόνο στο επίπεδο των μετασηματιστών διανομής

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	Κατώφλι ^α	V_{ref} (αμ) ^β	Αποκοπή Φορτίου (MW)
69	G_2	ΣΠΥ			
77	5	LA			
80	G_1	ΣΠΥ			
225	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
254	2	LA			
255	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		8.0
255	2	Εντός νεκρής ζώνης			
255	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		6.0
255	4	LA			
271	4	Αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		5.5
340	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		6.0
345	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		8.0
345	4	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		5.5
390	1	LTC-rf		0.95	
727	G_1	APT			
Σύνολο					47.0

^α Η συγκεκριμένη στήλη δείχνει αν η τάση μεταφοράς V_1 ή η τάση διανομής V_2 είναι κάτω από το αντίστοιχο κατώφλι ενεργοποίησης της άμεσης αποκοπής φορτίου, το μέγεθος της οποίας φαίνεται στην τελευταία στήλη

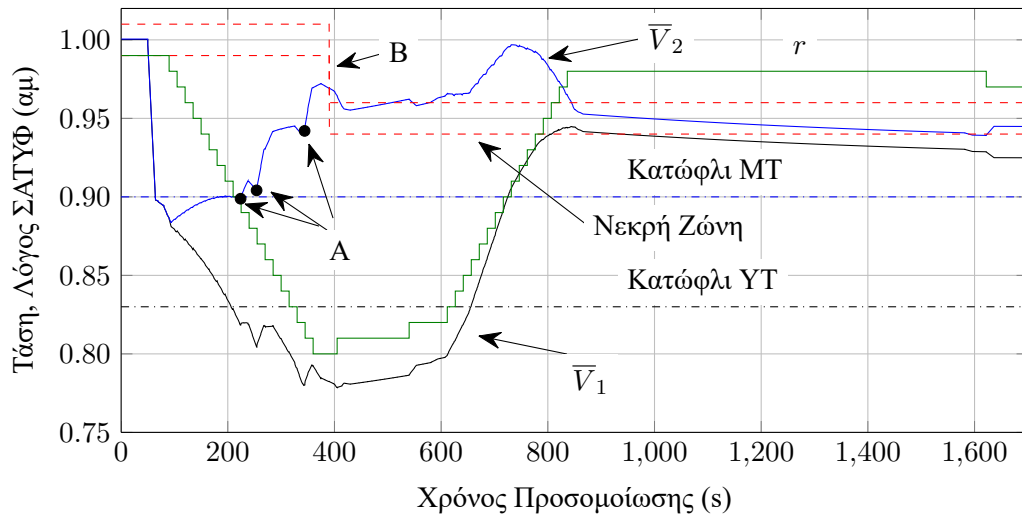
^β Τάση αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ

αρχικά τις ΥΤ τάσεις του συστήματος. Ωστόσο, όταν σημαίνεται ο πρώτος συναγερμός στη διανομή στο ζυγό 1, η αντίστοιχη τάση είναι ήδη κάτω από το κατώφλι αποκοπής φορτίου και ως εκ τούτου 5 MW αποκόπτονται άμεσα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.6, που περιλαμβάνει τις αποκρίσεις των κινητών μέσων όρων των τάσεων του ζυγού 1.

Τη χρονική στιγμή $t = 254$ s συναγερμός LIVES σημαίνεται για τον ζυγό 2, ωστόσο ένας δεύτερος συναγερμός συνοδευόμενος από άμεση αποκοπή φορτίου στον ζυγό 1, φέρνει την ελεγχόμενη τάση του ζυγού 2 εντός νεκρής ζώνης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ανασταλεί η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ που είχε ενεργοποιηθεί από το υποσύστημα LR με στόχο την αποκατάσταση της ευστάθειας. Ακολουθούν διαδοχικοί συναγερμοί στους ζυγούς 3 και 4, συνοδευόμενοι από άμεση αποκοπή φορτίου, λόγω του ότι οι τάσεις είναι κάτω από τα αντίστοιχα κατώφλια.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω εξάντλησης του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 1, ενεργοποιείται το υποσύστημα LTC-rf, το οποίο μειώνει την αντίστοιχη τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης κατά 5%, ώστε να αποκαταστήσει την λειτουργικότητα του (σημείο B στο Σχ. 5.6). Από το σημείο αυτό και για περίπου 300 s δεν συμβαίνει κάτι άλλο, ώσπου τη χρονική στιγμή $t = 727$ s η γεννήτρια G_1 μεταβαίνει και πάλι σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης, υποδηλώνοντας το πέρας της κρίσιμης κατάστασης.

Από την συγκεκριμένη εφαρμογή είναι προφανές, ότι η ύπαρξη συστήματος ανίχνευσης αστάθειας σε υψηλότερα επίπεδα τάσης (π.χ. στους αυτομετασηματιστές ΥΥΤ/ΥΤ) μπορεί να δώσει πολύ πιο έγκαιρη διάγνωση της πιθανής αστάθειας, εξασφαλίζοντας περισσότερο χρόνο για την αντιμετώπιση της.



Σχήμα 5.6: Αποκρίσεις ζυγού 3 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη στους αυτομετασχηματιστές και εφαρμογή ΣΠ1.2 μόνο στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής. \bar{V}_1 : κινητός μέσος πρωτεύοντος, \bar{V}_2 : κινητός μέσος δευτερεύοντος, r : λόγος ΣΑΓΥΦ, A: ενεργοποίηση LA με άμεση αποκοπή φορτίου 5%, B: σήμα αποκατάστασης LTC-rr

5.1.3.2 Με προστασία στους αυτομετασχηματιστές

Στο συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιείται στους αυτομετασχηματιστές το σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, που είναι παρόμοιο με το ΣΠ1.2 που χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές των υποσταθμών διανομής, χωρίς όμως τη δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου.

Η αλληλουχία των γεγονότων και η συνολική άμεση αποκοπή φορτίου για αυτήν την περίπτωση περιλαμβάνονται στον Πίν. 5.3. Όπως φαίνεται, η συνολική αποκοπή φορτίου είναι *αυξημένη* σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, όπου εφαρμόστηκε απλή αντίστροφη λειτουργία στο επίπεδο των αυτομετασχηματιστών. Συνεπώς, αν και οι συναγερμοί στη διανομή σημαίνουν πιο νωρίς, η εφαρμογή αντίστροφων κινήσεων στους αυτομετασχηματιστές και η μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής τους ζώνης, είναι λιγότερο αποτελεσματική.

Όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.3 και τις αποκρίσεις των κινητών μέσων όρων των τάσεων του AM/Σ-1 που απεικονίζονται στο Σχ. 5.7, πολύ σύντομα μετά την αλλαγή της λειτουργίας της γεννήτριας G_2 από αυτόματη ρύθμιση τάσης σε προστασία υπερδιέγερσης, σημαίνεται συναγερμός LIVES (σημείο A στο Σχ. 5.7) και αρχίζει μια σειρά αντίστροφων κινήσεων προς όφελος της πλευράς YYT (ζυγός 7). Η αντίστροφη λειτουργία σταματά με την έκδοση ενός σήματος αποκατάστασης της ευστάθειας τάσης μέσω του LR τη χρονική στιγμή $t = 103$ s (σημείο B στο Σχ. 5.7), γεγονός που οδηγεί σε μείωση της τάσης αναφοράς στο τρέχον επίπεδο του κινητού μέσου όρου της τάσης του ζυγού YT 5.

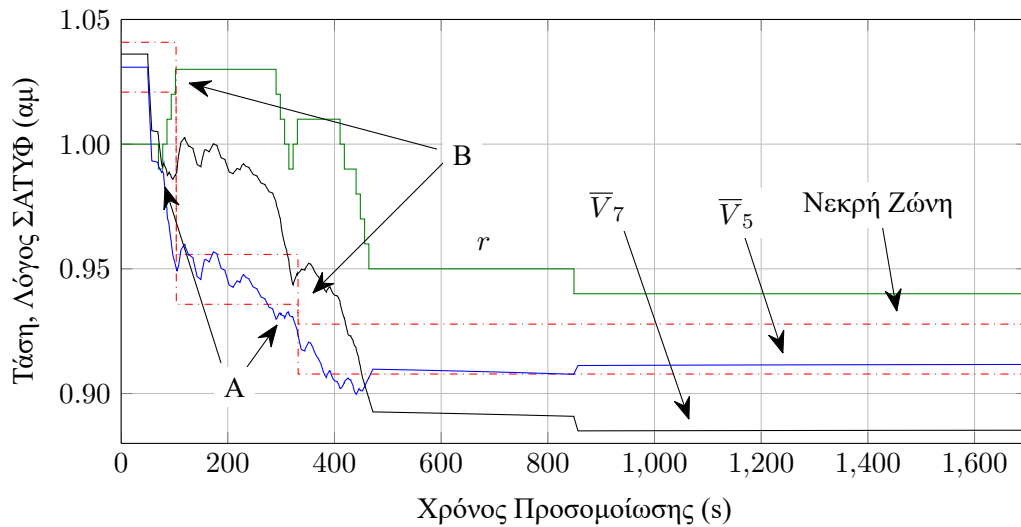
Ακολούθως, συναγερμοί LIVES σημαίνονται στους υποσταθμούς διανομής, οι οποίοι συνοδεύονται τόσο με άμεση αποκοπή φορτίου όσο και με μειώσεις των τάσεων αναφοράς από το υποσύστημα LR. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να οδηγηθεί το ΣΠ1.1 του AM/Σ-1 σε έναν ακόμα κύκλο λειτουργίας των υποσυστημάτων LA - LR, ενεργοποιώντας με τη σειρά του μερικές ακόμα αποκοπές φορτίου από το ΣΠ1.2 στους υποσταθμούς διανομής, πριν τελικά το σύστημα σταθεροποιηθεί. Στην περίπτωση αυτή η συνολική αποκοπή φορτίου είναι 60.5 MW.

Πίνακας 5.3: Αλληλουχία γεγονότων, Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη και εφαρμογή ΣΠ1.1 στους αυτομετασχηματιστές και ΣΠ1.2 στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	Κατώφλι ^α	V_{ref} (αμ) ^β	Αποκοπή Φορτίου (MW)
69	G_2	ΣΠΥ			
77	5	LA			
80	G_1	ΣΠΥ			
103	5	LR		0.95	
104	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
104	2	LA			
104	3	LA			
104	4	LA			
106	3	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
112	4	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		5.5
120	2	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		3.5
150	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		8.0
150	2	LA			
150	3	LA			
151	2	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		3.5
166	3	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
166	4	LR		0.91	
209	1	LA			
209	3	LA			
223	3	Αποκοπή φορτίου	$V_2 < 0.90$		6.0
226	1	LR		0.90	
322	5	LA			
332	5	LR		0.92	
344	2	LA			
344	3	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		6.0
361	2	LR		0.94	
385	1	LA με αποκοπή φορτίου	$V_1 < 0.83$		8.0
Σύνολο					60.5

^α Η συγκεκριμένη στήλη δείχνει αν η τάση μεταφοράς V_1 ή η τάση διανομής V_2 είναι κάτω από το αντίστοιχο κατώφλι ενεργοποίησης της άμεσης αποκοπής φορτίου, το μέγεθος της οποίας φαίνεται στην τελευταία στήλη

^β Τάση αναφοράς νεκρής ζώνης ΣΑΤΥΦ



Σχήμα 5.7: Αποκρίσεις AM/Σ-1 Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών με μεταβλητή λήψη και εφαρμογή ΣΠ1.1 στους αυτομετασχηματιστές και ΣΠ1.2 στο επίπεδο των μετασχηματιστών διανομής. \bar{V}_5 : κινητός μέσος τάσης ζυγού YT, \bar{V}_7 : κινητός μέσος τάσης ζυγού YYT, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, A: ενεργοποίηση LA, B: σήμα αποκατάστασης ευστάθειας LR

5.1.3.3 Σύγκριση εφαρμογών προστασίας στους αυτομετασχηματιστές

Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση που εφαρμόζεται το αυτόνομο και ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1 στο επίπεδο των αυτομετασχηματιστών YYT/YT, η απαιτούμενη αποκοπή φορτίου στο επίπεδο της MT, για αποκατάσταση της ευστάθειας, είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την περίπτωση που στους αυτομετασχηματιστές εφαρμόζεται μόνο επιτήρηση ευστάθειας. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης του αυτομετασχηματιστή από το υποσύστημα LR, που έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένες άεργες απώλειες στο επίπεδο της YT και ως εκ τούτου, μικρότερο περιθώριο φόρτισης του συστήματος.

Αυτή η σύγκριση των δύο μεθόδων δείχνει ότι είναι πολύ περισσότερο αποτελεσματική η προστασία να γίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στα φορτία, δηλαδή στο δεύτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ. Ωστόσο η παρακολούθηση της ευστάθειας τάσης στους αυτομετασχηματιστές, μπορεί να παρέχει μια πιο έγκαιρη ένδειξη για επερχόμενη αστάθεια τάσης. Αυτή η κατάσταση έκτακτης ανάγκης μπορεί να σταλεί είτε σαν σήμα στο χαμηλότερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ ή ακόμα και σε κάποιο κέντρο ελέγχου για την ενεργοποίηση ενός κεντρικού συστήματος προστασίας του αντίστοιχου ΣΗΕ.

Λόγω της φύσης των δυναμικών φορτίων το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης ΣΠ1.1, που προσφέρει μόνο έμμεση αποκοπή, δεν μπορεί να είναι αποτελεσματικό, καθώς τα φορτία αποκαθιστούν την ονομαστική τους ζήτηση και όποια ανακούφιση προσφέρεται, από αυτήν την έμμεση αποκοπή, αργά ή γρήγορα εξανεμίζεται. Για αυτό, σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμόζεται στα ΣΑΤΥΦ της διανομής το σύστημα προστασίας ΣΠ1.2, το οποίο περιλαμβάνει επιπλέον και τη δυνατότητα άμεσης αποκοπής φορτίου σε συνδυασμό με κατώφλια τάσης.

5.2 Nordic Test System

Σε αυτήν την ενότητα χρησιμοποιείται το τυποποιημένο σύστημα δοκιμών Nordic Test System, που αναπτύχθηκε από την IEEE Task Force on Test Systems for Voltage Stability and Security Assessment

[Van15], για την αξιολόγηση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης. Συγκεκριμένα, θα εξεταστεί η απόδοση των συστημάτων ΣΑ1, ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3, χρησιμοποιώντας τόσο την πλήρη χρονική προσομοίωση που προσφέρει το πρόγραμμα Ramses, όσο και την οιονεί στατική προσέγγιση του WPSTAB.

Αποτελέσματα από τις συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν παρουσιαστεί στη δημοσίευση [VLK16].

5.2.1 Περιγραφή και προσομοίωση συστήματος

5.2.1.1 Περιγραφή Nordic Test System

Το Nordic Test System αποτελείται από 74 ζυγούς, από τους οποίους 32 ανήκουν στο επίπεδο μεταφοράς (YYT και YT), 22 στο επίπεδο της διανομής (MT) και 20 είναι ζυγοί γεννητριών, εκ των οποίων μία είναι σύγχρονος πυκνωτής. Επιπλέον περιλαμβάνει 102 κλάδους, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται 22 μετασχηματιστές διανομής και 20 μετασχηματιστές ανυψώσεως.

Το αντίστοιχο μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στο Σχ. 5.8, στο οποίο διακρίνονται καθαρά οι τέσσερις διακριτές περιοχές που το αποτελούν και είναι [Van15]:

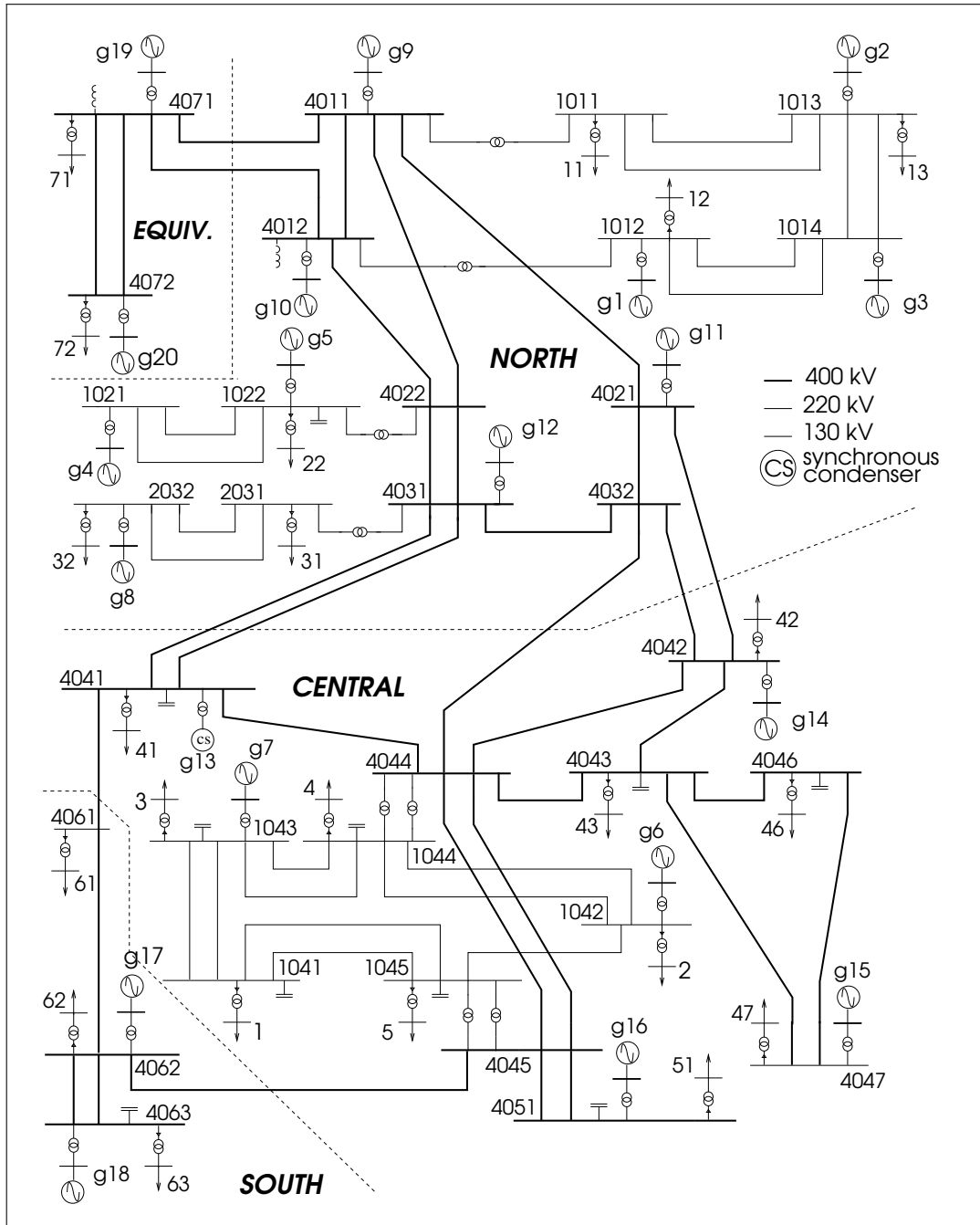
- Βόρεια (North) περιοχή: Περιλαμβάνει την πλειοψηφία των μονάδων παραγωγής που είναι κυρίως υδροηλεκτρικές και κάποιο ποσοστό του φορτίου.
- Κεντρική (Central) περιοχή: Έχει το μεγαλύτερο ποσοστό φορτίου και μερικές ατμοηλεκτρικές μονάδες.
- Νότια (South) περιοχή: Περιλαμβάνει κάποιες ατμοηλεκτρικές μονάδες.
- Ισοδύναμη (Equin) περιοχή: Συνδέεται με τη Βόρεια περιοχή και περιλαμβάνει ένα πολύ απλό ισοδύναμο Thévenin του εξωτερικού συστήματος.

Το σύστημα είναι φορτισμένο με μεγάλες ποσότητες μεταφερόμενης ισχύος από τη Βόρεια προς την Κεντρική περιοχή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζει φαινόμενα μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης όταν υφίσταται ενδεχόμενες διαταραχές, όπως για παράδειγμα την απώλεια γραμμών μεταφοράς μεταξύ των δύο προαναφερθέντων περιοχών.

Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί στην Κεντρική περιοχή εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις ικανότητες παραγωγής αέργων των γεννητριών τόσο της Κεντρικής όσο και της Βόρειας περιοχής, οι οποίες όμως περιορίζονται σημαντικά από τα αντίστοιχα ΣΠΥ. Από την άλλη πλευρά, τα ΣΑΤΥΦ τείνουν να αποκαταστήσουν τις τάσεις στο επίπεδο της διανομής και ως εκ τούτου να επαναφέρουν τα φορτία. Αν μετά από μια ενδεχόμενη διαταραχή, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από το συνδυσμένο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς είναι μικρότερη από αυτήν που αποκαθιστούν τα ΣΑΤΥΦ, εμφανίζεται αστάθεια τάσης που οδηγείται κυρίως από τη δυναμική των ΣΑΤΥΦ και των ΣΠΥ.

Όπως περιγράφεται στο [Van15] υπάρχουν δύο αρχικά σημεία λειτουργίας, που στη συνέχεια θα αναφέρονται σαν σημείο λειτουργίας A και B αντίστοιχα, με το πρώτο να οδηγεί σε αστάθεια και το δεύτερο σε οριακή ευστάθεια του συστήματος, όταν συμβεί μια ενδεχόμενη διαταραχή. Ανεξάρτητα από το αρχικό σημείο λειτουργίας, η εξεταζόμενη διαταραχή αφορά ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4032–4044 (θεωρητικά πολύ κοντά στο ζυγό 4032, οπότε θεωρείται ότι πρακτικά εφαρμόζεται πάνω σε αυτόν τον ζυγό), το οποίο εκκαθαρίζεται με το άνοιγμα της γραμμής, η οποία στη συνέχεια παραμένει ανοιχτή.

Τα δύο αρχικά σημεία είναι πρακτικά παρόμοια, με το σημείο λειτουργίας B να προκύπτει από το A, με τις ακόλουθες τροποποιήσεις:



Σχήμα 5.8: Μονογραμμικό διάγραμμα Nordic Test System. Πηγή: [Van15]

- Παράλληλα με τη γεννήτρια g16 και τον αντίστοιχο μετασχηματιστή ανύψωσης τοποθετείται μια ακριβώς ίδια γεννήτρια (g16b) με αντίστοιχο μετασχηματιστή ανύψωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η ροή ισχύος προς το κεντρικό σύστημα, ενώ η επιπλέον παραγωγή αντισταθμίζεται από τον άπειρο ζυγό.
- Κάθε μία από τις γεννήτριες g15 και g18 καθώς και οι αντίστοιχοι μετασχηματιστές ανύψωσης σπάνε σε δύο πανομοιότυπες γεννήτριες και μετασχηματιστές με τη μισή ονομαστική φαινόμενη ισχύ.

Όλοι οι μετασχηματιστές διανομής είναι εξοπλισμένοι με ΣΑΤΥΦ για να κρατάνε την ελεγχόμενη τάση του ζυγού MT εντός της νεκρής ζώνης, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις εκτείνεται από 0.99 αμ έως 1.01 αμ. Όλα τα ΣΑΤΥΦ είναι μοντελοποιημένα με το διακριτό μοντέλο^{vi}, έχουν βήμα μεταβλητής λήψης 0.01 αμ με εύρος διαθέσιμων λήψεων που βρίσκεται στην περιοχή 0.88 αμ έως 1.20 αμ, ενώ κάθε ΣΑΤΥΦ έχει τη δική του χρονική καθυστέρηση. Συγκεντρωτικά, η αρχική και διαδοχική χρονική καθυστέρηση κάθε ΣΑΤΥΦ περιλαμβάνεται στον Πίν. Γ.5 του Παραρτήματος Γ.

Τα φορτία θεωρούνται στατικά, που περιγράφονται με το εκθετικό μοντέλο^{vii}, με εκθέτη $\alpha = 1$ για την ενεργό ισχύ και $\beta = 2$ για την άεργο. Η κατανάλωση ισχύος όλων των φορτίων υπό ονομαστική τάση, φαίνεται στον Πίν. Γ.6 του Παραρτήματος Γ. Για την εκτίμηση ωστόσο της απόδοσης των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης γίνονται δοκιμές και με άλλες τιμές εκθετών στην περιοχή των 0.5–1.5 και 1.5–2.5 για την ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Παρ. 5.2.4.4.

Λεπτομερή δεδομένα σχετικά με το Nordic Test System και τα διάφορα σημεία (σενάρια) λειτουργίας του δίνονται στην τεχνική έκθεση [Van15], ενώ τα αρχεία δεδομένων μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα της Power System Dynamic Performance Committee^{viii}.

5.2.1.2 Παράμετροι και σύγκριση μεθόδων προσομοίωσης

Όπως τονίστηκε στην αρχή του κεφαλαίου, το μεγαλύτερο μέρος των προσομοιώσεων θα γίνει με χρήση της οιονεί στατικής προσέγγισης, μέσω του προγράμματος WPSTAB του ΕΜΠ [Βου99]. Ωστόσο για λόγους ρύθμισης των δυναμικών μοντέλων (ΣΑΤΥΦ, ΣΠΥ, κλπ.) αλλά και επιβεβαίωσης της ακρίβειας των μεθόδων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης, χρησιμοποιούνται και τα αποτελέσματα από την πλήρη προσομοίωση, μέσω του λογισμικού πακέτου Ramses, που έχει αναπτυχθεί από το πανεπιστήμιο της Λιέγης [AFV14]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι αυτό το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί επίσης για τα αποτελέσματα που περιλαμβάνονται στην τεχνική έκθεση [Van15].

Για να γίνει πιο ρεαλιστική η προσομοίωση και για να φανεί η ανοσία των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης στο θόρυβο, στα τελικά αποτελέσματα της πλήρους χρονικής προσομοίωσης προστίθεται θόρυβος μέτρησης κανονικής κατανομής με μέση τιμή $\mu = 0$ αμ και τυπική απόκλιση $\sigma = 10^{-3}$ αμ), ενώ η δειγματοληψία των τάσεων γίνεται με βήμα $\Delta t_{\text{Ramses}} = 20$ ms. Αντίθετα στην οιονεί στατική προσομοίωση χρησιμοποιείται βήμα $\Delta t_{\text{WPSTAB}} = 1$ s, χωρίς τη χρήση περαιτέρω δειγματοληψίας και χωρίς θόρυβο.

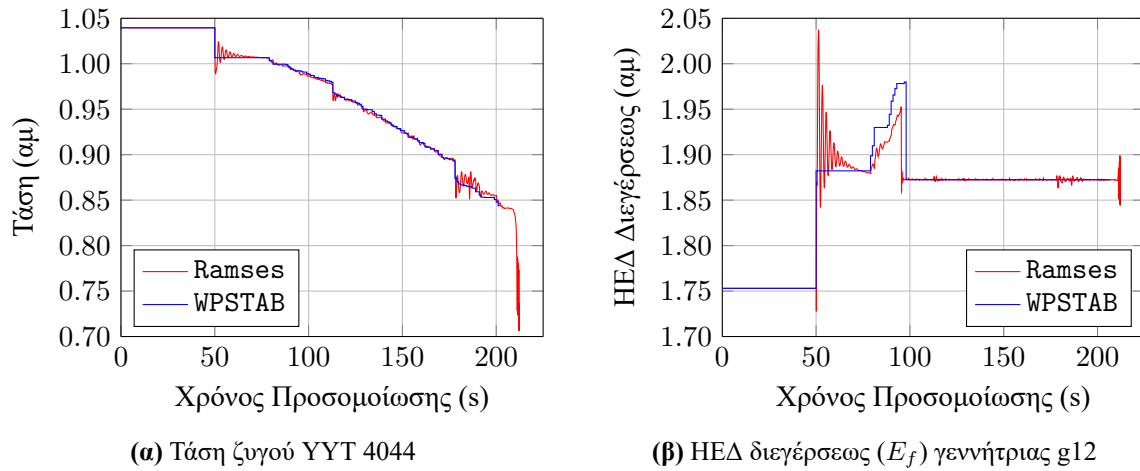
Η βασική διαφορά στη μοντελοποίηση των δύο προγραμμάτων έγκειται στο γεγονός πως στο Ramses χρησιμοποιούνται δυναμικά μοντέλα για βραχυπρόθεσμα φαινόμενα ενώ στο WPSTAB τα αντίστοιχα δυναμικά μοντέλα αντικαθίστανται με αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας. Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αφορά τη μοντελοποίηση των σύγχρονων μηχανών.

Συγκεκριμένα, στην πλήρη χρονική προσομοίωση του Nordic Test System οι γεννήτριες αναπαριστούνται με μοντέλα 5^{ns} (για σύγχρονες γεννήτριες εκτύπων πόλων υδροηλεκτρικών μονάδων) και 6^{ns}

^{vi}Βλ. Υποεν. 2.2.8, σελ. 60.

^{vii}Βλ. Παρ. 2.2.7.1.

^{viii}http://ewh.ieee.org/soc/pes/psdpc/PSDP_benchmark_systems.htm, τελευταίος έλεγχος Νοέμβριος 2016.



Σχήμα 5.9: Απόκριση τάσης ζυγού YYT 4044 και HEΔ διεγέρσεως γεννήτριας g12, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) χωρίς προστασία, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses

τάξης (για σύγχρονες γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα ατμοηλεκτρικών μονάδων), μαζί με μοντέλα για τους APT και τους ρυθμιστές στροφών. Επίσης λαμβάνεται υπόψη και ο κορεσμός, ενώ όλες οι γεννήτριες είναι εξοπλισμένες προστασία υπερδιέγερσης, η οποία μοντελοποιείται σαν διακοπτικού τύπου ΣΠΥ, αντιστρόφου χρόνου με υποκατάσταση σήματος σφάλματος.

Αντίθετα, όπως αναλύεται στην Εν. 2.2, το WPSTAB χρησιμοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας για τις σύγχρονες μηχανές (που προκύπτουν από μοντέλο 3^{ης} τάξης) και τις ρυθμιστικές τους διατάξεις που δρουν στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (APT και ρυθμιστές στροφών). Από την άλλη πλευρά, λαμβάνεται υπόψη ο κορεσμός, ενώ τα ΣΠΥ μοντελοποιούνται επίσης σαν διακοπτικού τύπου με υποκατάσταση σήματος σφάλματος, αλλά σταθερού χρόνου.

Με κατάλληλη ωστόσο ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων των επιμέρους μοντέλων, όπως θα φανεί στη συνέχεια, είναι εφικτό να προσεγγιστεί η πλήρης προσομοίωση με την οιονεί στατική προσομοίωση με καλή ακρίβεια.

Για την προσομοίωση των διαφόρων συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας και με τα δύο προγράμματα χρησιμοποιείται το αρχικό σημείο λειτουργίας A, που με την εφαρμοζόμενη διαταραχή οδηγεί σε αστάθεια τάσης και τελική κατάρρευση στην Κεντρική περιοχή. Όπως αναφέρθηκε στην Υποεν. 5.2.1, η διαταραχή που επιβάλλεται στο Nordic Test System αφορά ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα πολύ κοντά στο ζυγό 4032, που εκκαθαρίζεται με άνοιγμα της γραμμής 4032–4044. Στο Ramses η εν λόγω διαταραχή προσομοιώνεται πλήρως, συμπεριλαμβανομένου του βραχυκυκλώματος και των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που ακολουθούν την εκκαθάριση του. Από την άλλη πλευρά, στο WPSTAB η προσομοίωση της διαταραχής περιλαμβάνει μόνο το άνοιγμα της γραμμής μεταφοράς. Η διαταραχή επιβάλλεται τη χρονική στιγμή $t = 50$ s, γεγονός που προκαλεί μια καθυστέρηση 49 s σε σχέση με τις αποκρίσεις που παρουσιάζονται στο [Van15], αλλά πέρα από αυτό τα αποτελέσματα είναι πανομοιότυπα.

Η απόκριση της τάσης του ζυγού YYT 4044 και για τα δύο προγράμματα προσομοίωσης απεικονίζεται στο Σχ. 5.9α. Όπως φαίνεται από το συγκεκριμένο σχήμα, τα αποτελέσματα της οιονεί στατικής προσομοίωσης ταυτίζονται σχεδόν με αυτά της πλήρους χρονικής προσομοίωσης, μην λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Η διαφορά εντοπίζεται μόνο στο σημείο κατάρρευσης, το οποίο “προεξοφλείται” από το WPSTAB μερικά δευτερόλεπτα πιο νωρίς.

Συγκεκριμένα στο WPSTAB, η κατάρρευση τάσης λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 202$ s με την απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, ενώ στην πλήρη χρονική προσομοίωση η κατάρρευση έρχεται τη χρονική στιγμή $t = 212.2$ s με απώλεια συγχρονισμού.

Η καλή συμφωνία μεταξύ οιονεί στατικής και πλήρους χρονικής προσομοίωσης, όπως φαίνεται και από τις αποκρίσεις του Σχ. 5.9α, οφείλεται εν μέρη στην καλή ρύθμιση των παραμέτρων των ΣΠΥ ώστε να ταιριάζουν και στα δύο προγράμματα. Αυτό είναι εμφανές στο Σχ. 5.9β όπου απεικονίζεται η απόκριση της ΗΕΔ διεγέρσεως για τα δύο προγράμματα προγράμματα. Όπως αναφέρθηκε, καθώς στο WPSTAB τα ΣΠΥ είναι σχεδιασμένα με σταθερή χρονική καθυστέρηση, γίνεται τέτοια ρύθμιση των παραμέτρων τους ώστε να συμπίπτουν με τα λεπτομερή, αντιστρόφου χρόνου ΣΠΥ που μοντελοποιούνται στο Ramses [Van15], ενώ ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε ώστε να προσομοιωθεί ακριβώς η μόνιμη κατάσταση τους.

5.2.2 Εφαρμογή συστήματος ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1

Στην παρούσα υποενότητα θα γίνει προσομοίωση της εφαρμογής του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης ΣΑ1 στο Nordic Test System, για το αρχικό σημείο λειτουργίας Α και για την κρίσιμη διαταραχή που περιγράφηκε στην Υποεν. 5.2.1. Το αρχικό σημείο λειτουργίας Β, που για την ίδια διαταραχή οδηγεί σε ευσταθή απόκριση του Nordic Test System, χωρίς εσφαλμένη ενεργοποίηση του συστήματος ανίχνευσης, δεν εξετάζεται στην παρούσα ενότητα^{ix}.

Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων εφαρμογής του ΣΑ1 σε αυτήν την περίπτωση είναι οι εξής^x:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = -10^{-5}$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 0$ αμ

Η ελαφρά αρνητική ανοχή στο χρόνο επιτήρησης σημαίνει ότι οι αντίστοιχοι συναγερμοί αστάθειας, εκδίδονται πρακτικά τις χρονικές στιγμές t^- , πριν δηλαδή συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση και μεταβληθεί ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ, που λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή t^+ .

Έχοντας ήδη ρυθμίσει τα δύο προγράμματα προσομοίωσης ώστε οι αποκρίσεις τους να είναι ισοδύναμες, στην συνέχεια τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ΣΑ1 με την πλήρη χρονική προσομοίωση συγκρίνονται με αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή του ίδιου συστήματος χρησιμοποιώντας την οιονεί στατική προσομοίωση. Στόχος είναι να αποδειχθεί ότι η οιονεί στατική προσέγγιση μπορεί να παράγει τα ίδια ποιοτικά αποτελέσματα, για την αξιολόγηση του συγκεκριμένου συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης, χωρίς την ανάγκη να καταφύγει κανείς στην πλήρη προσομοίωση.

5.2.2.1 Προσομοίωση συστήματος ανίχνευσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης τόσο για το πλήρες μοντέλο όσο και για την οιονεί στατική προσέγγιση, δίνονται στον Πίν. 5.4, ενώ θα πρέπει να τονιστεί ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνονται διορθωτικές κινήσεις, παρά μόνο επιτήρηση της ευστάθειας τάσης. Στην πρώτη στήλη του συγκεκριμένου πίνακα φαίνονται οι γεννήτριες στις οποίες ενεργοποιείται το ΣΠΥ, ενώ στις επόμενες δύο στήλες οι χρονικές στιγμές στις οποίες λαμβάνει χώρα η ενεργοποίηση αυτή από τα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Ομοίως, στην τέταρτη στήλη φαίνονται οι ζυγοί στους οποίους σημαίνονται συναγερμοί αστάθειας και στις δύο τελευταίες στήλες, οι χρονικές στιγμές που σημαίνονται οι συναγερμοί από τα δύο προγράμματα. Να σημειωθεί ότι οι αντίστοιχοι συναγερμοί LIVES του ΣΑ1 εμφανίζονται μόνο κατά την πρώτη φορά που σημαίνονται για τον κάθε ζυγό, ενώ ο αριθμός ζυγού που φαίνεται στον Πίν. 5.4 είναι ο ζυγός MT στο δευτερεύον του μετασχηματιστή διανομής^{xi}.

^{ix} Προσομοίωση για το αρχικό σημείο Β στο Nordic Test System με εφαρμογή του ΣΑ1 μπορεί να βρεθεί στη διπλωματική εργασία [Kan14, Εν. 4.5].

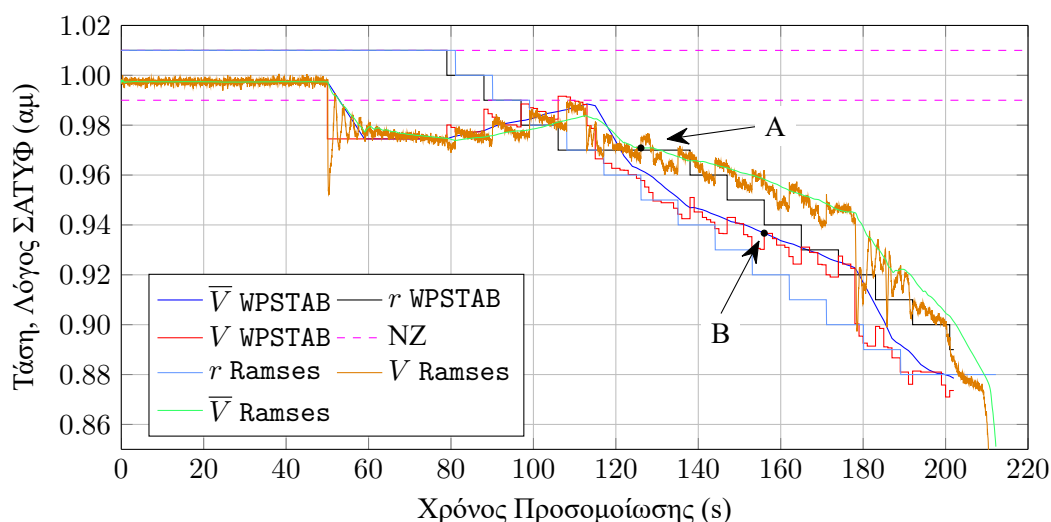
^x Βλ. Πίν. Β.1, σελ. 231.

^{xi} Βλ. Σχ. 5.8, σελ. 137.

Πίνακας 5.4: Αλληλουχία υπερδιεγέρσεων και σήμανσης συναγερμού LIVES, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), με εφαρμογή ΣΑ1, σε WPSTAB και Ramses

ΣΠΥ	WPSTAB (s)	Ramses (s)	Συναγερμός	WPSTAB (s)	Ramses (s)
g12	96	95.36			
g14	113	113.00			
g7	115	114.60			
			43	125	125.12
			1	127	129.08
g11	128	128.10			
			4	129	129.12
			46	129	131.06
			42	131	131.12
			5	134	145.12
			31	146	113.34
			41	153	-
g6	155	155.10			
			3	156	126.08
g5	178	178.60			
g15	178	178.10			
g8	179	178.70			
g16	185	185.30			
			2	192	164.08
			47	202	187.10
			51	-	200.30
Κατάρρευση Τάσης				202	212.20

Κόκκινο χρώμα: Ψευδής συναγερμός αστάθειας στη Βόρεια περιοχή, ο οποίος εξαλείφεται με επιλογή της ανοχής τάσης επιτήρησης $\epsilon_r = 10^{-3}$ αμ



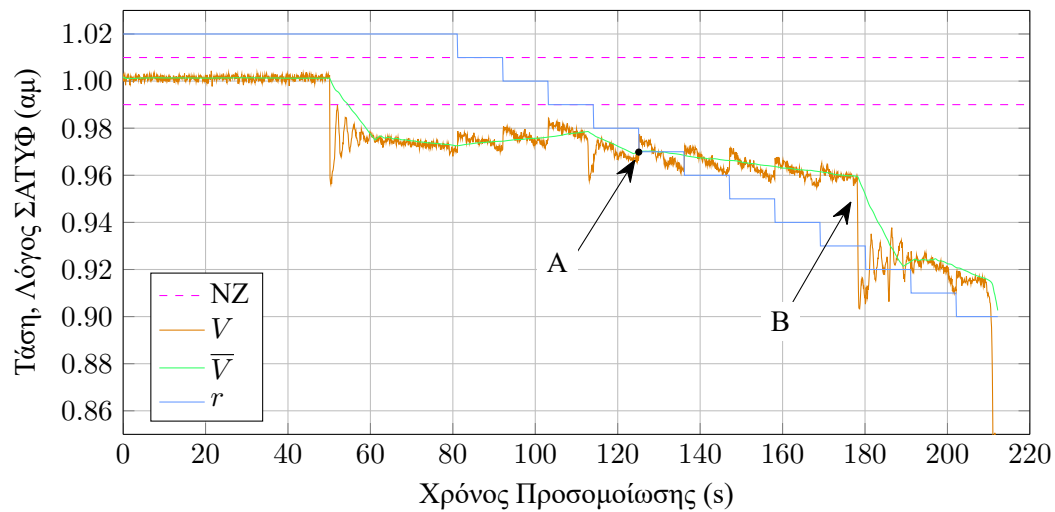
Σχήμα 5.10: Αποκρίσεις ζυγού MT 3 , Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses. V : τάση ζυγού, \bar{V} : κινητός μέσος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: συναγερμός LIVES από Ramses, B: συναγερμός LIVES από WPSTAB

Όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.4, για εννιά ζυγούς MT στην Κεντρική περιοχή (43, 1, 4, 46, 5, 3, 2, 47) οι συναγερμοί από το σύστημα ΣΑ1 σημαίνουν τόσο στην πλήρη όσο και στην οιονεί στατική προσομοίωση, αν και ο χρόνος σήμανσης τους διαφέρει στις τέσσερις τελευταίες περιπτώσεις από 10 s έως 30 s. Από την άλλη πλευρά ο χρονισμός των πέντε πρώτων συναγερμών, που είναι και οι πιο σημαντικοί για την σχεδίαση μέτρων αποτροπής, είναι σχεδόν ταυτόσημος και για τις δύο προσεγγίσεις.

Στους δύο εναπομείναντες υποσταθμούς της Κεντρικής περιοχής (ζυγοί MT 41 και 51) συναγερμοί LIVES σημαίνουν μόνο σε μία από τις δύο προσομοιώσεις και όχι στην άλλη. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, καθώς και η διαφορά στους χρόνους σήμανσης των υπόλοιπων συναγερμών μετά τα 135 s, είναι η στοχαστικότητα της απόκρισης διάφορων διακριτών συσκευών, που εξαρτώνται από μικρές λεπτομέρειες, όπως αν μια ελεγχόμενη τάση μπει ελάχιστα εντός της αντίστοιχης νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα την επαναφορά μετρητών χρόνου. Το ενθαρρυντικό αποτέλεσμα είναι ότι αυτή η αναντιστοιχία εμφανίζεται μετά την αρχική μεταβατική περίοδο που είναι κρίσιμη για την εφαρμογή μέτρων αποφυγής κατάρρευσης.

Επιστρέφοντας στη σύγκριση της χρονικής στιγμής σήμανσης των συναγερμών LIVES μεταξύ των δύο προσομοιώσεων, η επίδραση των μεταβατικών φαινομένων στην απόκριση των αντίστοιχων ΣΑΤΥΦ φαίνεται στο Σχ. 5.10, όπου απεικονίζεται ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ και η αντίστοιχη ελεγχόμενη τάση του ζυγού MT 3 και για τις δύο προσομοιώσεις. Όπως φαίνεται στο συγκεκριμένο σχήμα, ενώ αρχικά οι αλλαγές του ΣΑΤΥΦ είναι σχεδόν συγχρονισμένες και στις δύο προσομοιώσεις, λίγο μετά τη χρονική στιγμή $t = 100$ s, στην οιονεί στατική προσέγγιση η ελεγχόμενη τάση (V WPSTAB) εισέρχεται εντός της νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα μεγαλύτερη καθυστέρηση^{xiii} στην κίνηση του ΣΑΤΥΦ και σήμανση του αντίστοιχου συναγερμού LIVES. Αντίθετα, στην πλήρη προσομοίωση η αντίστοιχη τάση (V Ramses) παραμένει οριακά εκτός νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ να είναι πιο γρήγορη, καθώς εφαρμόζεται μόνο η διαδοχική χρονική καθυστέρηση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη διαφορά των περίπου 30 s στην σήμανση συναγερμού μεταξύ των δύο προγραμμάτων προσομοίωσης, που παρατηρείται στον Πίν. 5.4.

^{xiii}Καθώς ο μετρητής χρόνου επαναφέρεται πρέπει να περάσει χρονικό διάστημα ίσο με την αρχική συν την διαδοχική χρονική καθυστέρηση για να κινηθεί εκ νέου το ΣΑΤΥΦ.



Σχήμα 5.11: Αποκρίσεις ζυγού MT 43 , Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση Ramses. V : τάση ζυγού, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: συναγερμός LIVES, B: ενεργοποίηση ΣΠΥ γεννητριών g5, g15

Από την άλλη πλευρά, στο ζυγό MT 43, που είναι ο πρώτος στον οποίο σημαίνεται συναγερμός LIVES και ως εκ τούτου, ο πιο κρίσιμος για την εφαρμογή οποιαδήποτε είδους προστασίας, ο χρόνος σήμανσης είναι ο ίδιος και για τα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Η απόκριση της τάσης μαζί με τον αντίστοιχο κινητό μέσο όρο και το λόγο του ΣΑΤΥΦ στον εν λόγω ζυγό από το πρόγραμμα πλήρους χρονικής προσομοίωσης φαίνεται στο Σχ. 5.11. Η απότομη πτώση τάσης που παρατηρείται τη χρονική στιγμή $t = 178$ s οφείλεται στην ταυτόχρονη ενεργοποίηση των ΣΠΥ των γεννητριών g5 και g15 (βλ. Πίν. 5.4), η οποία και οδηγεί στο τελικό στάδιο πριν την κατάρρευση του συστήματος. Ο συναγερμός αστάθειας στο ζυγό MT 43 έχει σημειωθεί 53 s πριν από το γεγονός αυτό, κατά τη χρονική στιγμή $t = 125.2$ s.

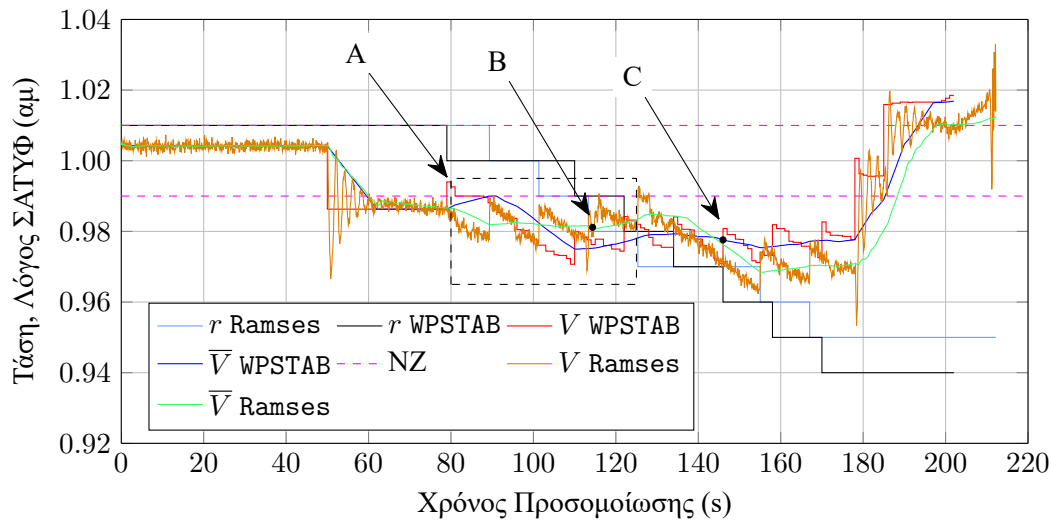
Η συγκέντρωση των συναγερμών LIVES στην Κεντρική περιοχή, είναι μια καθαρή ένδειξη της αξιοπιστίας και της επιλεκτικότητας του συστήματος ανίχνευσης ΣΑ1, καθώς πρακτικά όλοι οι υποσταθμοί στην ευπαθή περιοχή επισημαίνονται. Επιπλέον, οι πρώτοι συναγερμοί αρχίζουν και σημαίνονται περίπου 90 s πριν την κατάρρευση, ενώ συνεχίζουν και σημαίνονται συναγερμοί σχεδόν μέχρι και την τελευταία στιγμή.

Από τα αποτελέσματα είναι προφανές ότι μόνο ένας συναγερμός (και για τις δύο προσομοιώσεις) σημαίνεται εκτός Κεντρικής περιοχής. Πρόκειται για τον συναγερμό στον ζυγό MT 31 (που φαίνεται με κόκκινη γραμματοσειρά στον Πίν. 5.4). Πρόκειται για μια πολύ σπάνια περίπτωση ψευδούς συναγερμού που εξαλείφεται με αλλαγή της ανοχής τάσης αναφοράς του συστήματος ΣΑ1 (παράμετρος ϵ_r), όπως περιγράφεται στην Εν. 4.1 και θα εξηγηθεί και στη συνέχεια.

5.2.2.2 Ρύθμιση του συστήματος ανίχνευσης για αποφυγή ψευδών συναγερμών

Στην συγκεκριμένη παράγραφο εξετάζεται ο ψευδής συναγερμός που σημαίνεται από το ΣΑ1 και στις δύο προσομοιώσεις στο ζυγό MT 31, ο οποίος βρίσκεται εκτός της ευάλωτης Κεντρικής περιοχής. Οι αποκρίσεις της πλήρους και οιονεί στατικής προσομοίωσης για την τάση στο συγκεκριμένο ζυγό καθώς και ο αντίστοιχος λόγος του ΣΑΤΥΦ φαίνονται στο Σχ. 5.12.

Όπως φαίνεται από το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος που φαίνεται στο Σχ. 5.8, ο ζυγός MT 31 βρίσκεται στη Βόρεια περιοχή του συστήματος και το γεγονός πως κανονικά δεν θα έπρεπε να



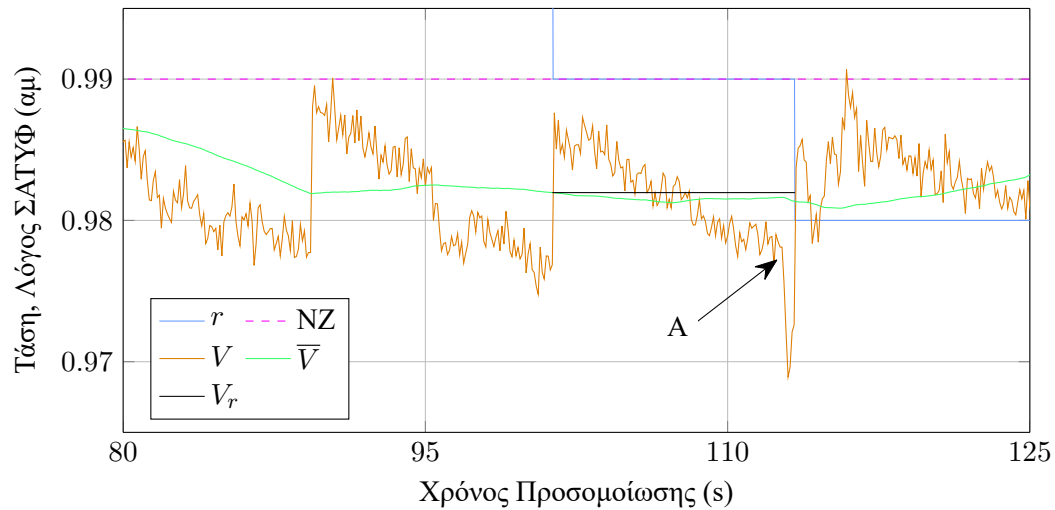
Σχήμα 5.12: Ψευδής συναγερμός LIVES και αποκρίσεις ζυγού MT 31 (Βόρεια περιοχή), Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΑ1, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses. V : τάση ζυγού, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: τάση από WPSTAB εντός νεκρής ζώνης, B: συναγερμός LIVES από Ramses, C: συναγερμός LIVES από WPSTAB

σημανθεί συναγερμός LIVES επιβεβαιώνεται από το Σχ. 5.12, όπου μετά από ένα μικρό “δισταγμό” ο κινητός μέσος όρος \bar{V} , της ελεγχόμενης δευτερεύουσας τάσης του εν λόγω ΣΑΤΥΦ, αρχίζει να αυξάνεται και στις δύο προσομοιώσεις. Η μεγάλη αύξηση που παρατηρείται προς το τέλος της προσομοίωσης οφείλεται στην μείωση του φορτίου της Κεντρικής περιοχής, λόγω της απότομης πτώσης της τάσης εκεί, ιδιαίτερα μετά την ενεργοποίηση των προστασιών υπερδιέγερσης των γεννητριών κατά το τελικό στάδιο πριν την κατάρρευση. Ως εκ τούτου, είναι προφανές ότι πρόκειται για περίπτωση ψευδούς συναγερμού.

Η διαφορά στο χρόνο σήμανσης του ψευδούς συναγερμού μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι λόγω των αρχικών έντονων μεταβατικών τα οποία μεταβάλουν την απόκριση των ΣΑΤΥΦ στα δύο προγράμματα. Συγκεκριμένα στο WPSTAB η αρχική κίνηση του ΣΑΤΥΦ είναι αρκετή για να επαναφέρει την ελεγχόμενη τάση εντός της νεκρής ζώνης (σημείο A στο Σχ. 5.12) καθυστερώντας την ακόλουθη σήμανση ψευδούς συναγερμού από το εν λόγω πρόγραμμα σε σχέση με το Ramses. Για αυτό το λόγο στην πλήρη προσομοίωση ο συναγερμός σημαίνεται τη χρονική στιγμή $t = 113.3$ s ενώ στην οιονεί στατική προσομοίωση τη χρονική στιγμή $t = 146$ s (σημεία B και C αντίστοιχα στο Σχ. 5.12).

Για το φιλτράρισμα αυτού του ψευδούς συναγερμού χρησιμοποιείται η ανοχή στην τάση αναφοράς του συστήματος ΣΑ1, όπως έχει περιγραφεί στην ενότητα 4.1 και θα επεξηγηθεί και εδώ. Στο Σχ. 5.13 εικονίζεται μια λεπτομέρεια του Σχ. 5.12, με αποτελέσματα μόνο από την πλήρη χρονική προσομοίωση του Ramses για την ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων. Όπως φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, ο κινητός μέσος όρος της (ελεγχόμενης) τάσης, αυξάνει στην πραγματικότητα για κάποιο χρονικό διάστημα μετά την αλλαγή του ΣΑΤΥΦ, που λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 101.3$ s, αλλά λόγω ενός εξωτερικού γεγονότος (ενεργοποίηση ΣΠΥ στη γεννήτρια g14, που αντιστοιχεί στο σημείο A του Σχ. 5.12), δεν καταφέρνει να φτάσει την τάση αναφοράς V_r πριν την επόμενη αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού, τη χρονική στιγμή $t = 113.3$ s.

Η αρχική θετική κλίση του κινητού μέσου όρου δεν μπορεί να τεθεί σαν κριτήριο φιλτραρίσματος, καθώς μπορεί να οφείλεται απλά σε κάποιο μεταβατικό φαινόμενο ή ακόμα και σε θόρυβο μέτρησης. Αντί αυτού εισάγεται μία ανοχή ϵ_r ως προς την τάση αναφοράς V_r . Συγκεκριμένα, ο συναγερμός σημαίνεται πλέον στο τέλος της περιόδου παρατήρησης αν για όλο το διάστημα ο κινητός μέσος όρος της



Σχήμα 5.13: Φιλτράρισμα ψευδούς συναγεμίου LIVES στον ζυγό MT 31 (Βόρεια περιοχή), Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΑ1. Λεπτομέρεια προσομοίωσης με Ramses του Σχ. 5.12. V : τάση ζυγού, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, V_r : τάση αναφοράς ΣΑ1, A: ενεργοποίηση ΣΠΥ g14

τάσης παραμένει κάτω από την αντίστοιχη τάση αναφοράς και στο τέλος επιπλέον ισχύει:

$$\bar{V} < V_r - \epsilon_r \quad (5.4)$$

Αν στο τέλος του συγκεκριμένου διαστήματος παρατήρησης παραβιαστεί η (5.4), δηλαδή η τιμή του κινητού μέσου έρθει κοντά στην τιμή αναφοράς V_r , η μέθοδος LIVES επαναφέρεται και η ανίχνευση αναστέλλεται μέχρι την επόμενη κίνηση του ΣΑΤΥΦ.

Χρησιμοποιώντας μια ανοχή τάσης αναφοράς $\epsilon_r = 10^{-3}$ αμ στο σύστημα ανίχνευσης ΣΑ1, ο ψευδής συναγεμμός και στις δύο προσομοιώσεις εξαλείφεται, ενώ όλοι οι άλλοι συναγεμμοί σημαίνουν τις χρονικές στιγμές που περιγράφονται στον Πίν. 5.4.

5.2.3 Εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.1

Στην παρούσα υποενότητα εφαρμόζεται το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης ΣΠ1.1, το οποίο περιλαμβάνει τα ακόλουθα υποσυστήματα:

1. Υποσύστημα ανίχνευσης αστάθειας LA^{xiii}
2. Υποσύστημα αποκατάστασης ευστάθειας LR
3. Υποσύστημα αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC-rr

Καθώς, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της προηγούμενης υποενότητας, η προσομοίωση των συστημάτων ανίχνευσης σε οιονεί στατική προσέγγιση είναι συγκρίσιμη με αυτά τις πλήρους χρονικής προσομοίωσης, για το υπόλοιπο της ενότητας θα χρησιμοποιηθεί μόνο το πρόγραμμα WPSTAB για την προσομοίωση της λειτουργίας των συστημάτων προστασίας^{xiv}

^{xiii}Όπως έχει αναφερθεί είναι το ΣΑ1 ενταγμένο στο σύστημα προστασίας.

^{xiv}Προσομοιώσεις των ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3, χρησιμοποιώντας πλήρη χρονική προσέγγιση, συμπεριλαμβανομένου και θορύβου μέτρησης, έχουν γίνει στη δημοσίευση [VLG10], χρησιμοποιώντας μια παλαιότερη εκδοχή του συστήματος δοκιμών, με την ονομασία Nordic32, που έχει παρουσιαστεί στο [CIG95a].

5.2.3.1 Προσομοίωση ΣΠ1.1

Οι επιλεγμένες παράμετροι λειτουργία του ΣΠ1.1 είναι οι εξής^{xv}:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = -10^{-5}$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 10^{-3}$ αμ
- Μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ανά εφαρμογή του ΣΠ1.1: $n_{rev}^{max} = 5$.
- Μέγιστος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών του ΣΠ1.1: $n_{LR}^{max} = 2$.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, στο αρχικό σημείο λειτουργίας A, για την ίδια πάντα διαταραχή και με εφαρμογή του ΣΠ1.1, φαίνονται στον Πίν. 5.5. Στις τρεις πρώτες στήλες φαίνεται η χρονική στιγμή, ο ζυγός και το αντίστοιχο συμβάν που έλαβε χώρα. Στην τέταρτη και πέμπτη στήλη οι τάσεις δευτερεύοντος (MT) και πρωτεύοντος (YT) τη στιγμή του συμβάντος. Στην έκτη και έβδομη στήλη φαίνεται ο αριθμός των αντίστροφων κινήσεων που έχει πραγματοποιήσει το ΣΑΤΥΦ και η τάση αναφοράς του αντίστοιχα, τη στιγμή έκδοσης σήματος αποκατάστασης ευστάθειας. Τέλος στις δύο τελευταίες στήλες περιλαμβάνονται οι έμμεσες αποκοπές φορτίου που οφείλονται στη μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ.

Όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.5, το υποσύστημα LR ενεργοποιείται σε τέσσερις ξεχωριστούς ζυγούς MT της Κεντρικής περιοχής (46, 4, 43 και 1), πριν το σύστημα φτάσει σε μόνιμη κατάσταση (steady state) τη χρονική στιγμή περίπου $t = 180$ s. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι:

- Οι συναγερμοί αστάθειας τάσης εκδίδονται σε τάσεις διανομής και μεταφοράς άνω του 0.95 αμ και 0.92 αμ αντίστοιχα.
- Τα σήματα αποκατάστασης ευστάθειας εκδίδονται σε αποδεκτά όρια άνω του 0.93 αμ τόσο για τη διανομή όσο και για τη μεταφορά.

Το γεγονός πως η γεννήτρια g15 μεταβαίνει σε προστασία υπερδιέγερσης τη χρονική στιγμή $t = 178$ s, μόλις δύο δευτερόλεπτα μετά τη σήμανση και του τελευταίου σήματος αποκατάστασης ευστάθειας, οφείλεται στο γεγονός πως η εσωτερική ΗΕΔ E_f της εν λόγω γεννήτριας δεν πρόλαβε να μειωθεί κάτω από το αντίστοιχο όριο, πριν τη συμπλήρωση της αντίστοιχης χρονικής καθυστέρησης. Αυτό είναι εμφανές και από το Σχ. 5.14, στο οποίο φαίνεται η σχετική απόκριση της E_f της γεννήτριας g15.

Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει όριο υπερδιέγερσης $E_f^{lim} = 3.0618$ αμ^{xvi} και χρονική καθυστέρηση $T_x = 65$ s^{xvii}. Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.14, τη χρονική στιγμή $t = 113$ s η E_f ξεπερνάει το αντίστοιχο όριο, οπότε και ενεργοποιείται το χρονόμετρο του ΣΠΥ, το οποίο 65 s αργότερα, περιορίζει την ΗΕΔ διεγέρσεως. Είναι εμφανές ωστόσο από την συγκεκριμένη απόκριση, ότι ήδη από περίπου τη χρονική στιγμή $t = 150$ s, λόγω της ενεργοποίησης των υποσυστημάτων LR και την αντιστροφή της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, η E_f αρχίζει και μειώνεται. Ωστόσο, οριακά, δεν προλαβαίνει να πέσει κάτω από την τιμή E_f^{lim} , με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί εντέλει το ΣΠΥ τη χρονική στιγμή $t = 168$ s. Με την ενεργοποίηση της προστασίας υπερδιέγερσης, η ΗΕΔ παραμένει οριακά κάτω από το αντίστοιχο όριο, που είναι χαρακτηριστικό του διακοπτικού τύπου ΣΠΥ^{xviii}, ενώ το σύστημα συνολικά φτάνει σε μόνιμη κατάσταση μερικά δευτερόλεπτα αργότερα.

^{xv} Βλ. Πίν. Β.1, σελ. 231.

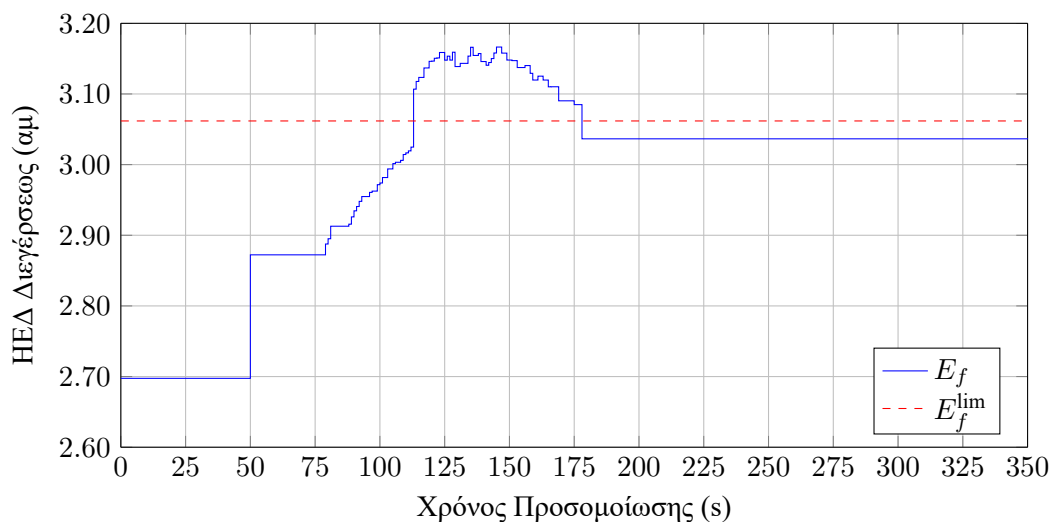
^{xvi} Βλ. [Van15, Πίν. 2.13, σελ. 25].

^{xvii} Η καθυστέρηση αυτή προέκυψε από τη ρύθμιση των δεδομένων των γεννητριών για το πρόγραμμα WPSTAB, όπου τα ΣΠΥ είναι σταθερού χρόνου και όχι αντιστρόφου όπως στο [Van15]. Βλ. Παρ. 5.2.1.2.

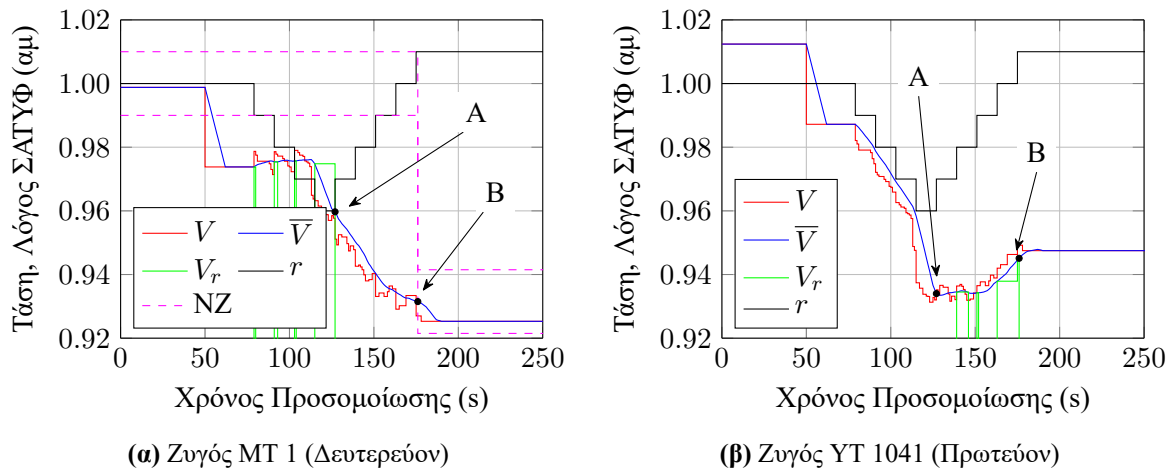
^{xviii} Βλ. Παρ. 2.2.4.2, σελ. 54.

Πίνακας 5.5: Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	V_{MT} (αμ)	V_{YT} (αμ)	n_{rev}	V_{ref} (αμ)	Έμμεση Αποκοπή		
							ΔP (MW)	ΔQ (MVar)	
96	g12	ΣΠΥ							
113	g14	ΣΠΥ							
115	g7	ΣΠΥ							
125	43	LA	0.9678	0.9631					
127	1	LA	0.9577	0.9320					
128	g11	ΣΠΥ							
129	4	LA	0.9714	0.9289					
129	46	LA	0.9765	0.9728					
166	46	LR	0.9529	0.9798	4	0.9513	34.15	20.18	
170	4	LR	0.9326	0.9393	5	0.9374	52.62	30.59	
170	43	LR	0.9270	0.9730	5	0.9350	58.45	31.96	
176	1	LR	0.9315	0.9492	5	0.9315	41.16	19.66	
178	g15	ΣΠΥ							
180	Μόνιμη κατάσταση								
Συνολική αποκοπή							186.38	102.39	



Σχήμα 5.14: Απόκριση HEΔ διεγέρσεως (E_f) γεννήτριας g15, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB



Σχήμα 5.15: Αποκρίσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή 1–1041, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 5$, σε προσομοίωση WPSTAB. V : τάση, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, V_r : τάση αναφοράς υποσυστήματος LA στο δευτερεύον και LR στο πρωτεύον, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: σήμανση συναγερμού LA, B: ενεργοποίηση σήματος αποκατάστασης ευστάθειας LR

Η συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου, λόγω μείωσης των τάσεων αναφοράς των νεκρών ζωνών των ΣΑΤΥΦ από το υποσύστημα LR ανέρχεται σε 186.38 MW και 102.39 MVA_g, ενώ η έμμεση αποκοπή ανά ζυγό και ανά ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας δίνεται στις δύο τελευταίες στήλες του Πίν. 5.5. Καθώς το φορτίο έχει θεωρηθεί εκθετικό, οι σχετικοί υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της έμμεσης αποκοπής μπορούν να γίνουν με βάση τις σχέσεις (4.9), που επαναλαμβάνονται εδώ:

$$\Delta P = P_o [1 - (V_{ref}/V_{ref}^o)^\alpha] \quad (5.5a)$$

$$\Delta Q = Q_o [1 - (V_{ref}/V_{ref}^o)^\beta] \quad (5.5b)$$

όπου V_{ref}^o & V_{ref} η τάση αναφοράς της νεκρής ζώνης πριν και μετά την ενεργοποίηση του υποσυστήματος LR, α & β οι εκθέτες της ενεργού και άεργου αντίστοιχα ισχύος του φορτίου και τέλος, P_o & Q_o η κατανάλωση ενεργού και άεργου ισχύος σε τάση V_{ref}^o .

Όπως αναφέρθηκε και την Υποεν. 5.2.1, η αρχική τιμή της τάσης αναφοράς για όλα τα ΣΑΤΥΦ είναι $V_{ref}^o = 1$ αμ, ενώ οι εκθέτες φορτίου είναι $\alpha = 1$ (σταθερού ρεύματος) για την ενεργό ισχύ και $\beta = 2$ (σταθερής αγωγιμότητας) για την άεργο ισχύ. Τα αρχικά φορτία των ζυγών για το σημείο λειτουργίας A, φαίνονται στον Πίν. 2.10, σελ. 21 του [Van15], τα οποία όμως αναφέρονται στις αρχικές τάσεις των ζυγών και όχι στις τάσεις αναφοράς της νεκρής ζώνης. Για λόγους εύκολης αναφοράς, τα φορτία στην ονομαστική τους τάση φαίνονται στον Πίν. Γ.6 του Παραρτήματος Γ.

Η λειτουργία του αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας από κατάρρευση τάσης ΣΠ1.1 μπορεί να εκτιμηθεί από την απόκριση των τάσεων του μετασχηματιστή διανομής που συνδέεται στον ζυγό YT 1041 που φαίνεται στο Σχ. 5.15. Συγκεκριμένα στο Σχ. 5.15α φαίνονται οι αποκρίσεις της τάσης και της μεταβλητή λήψης του ΣΑΤΥΦ από την πλευρά του δευτερεύοντος (MT 1), ενώ στο Σχ. 5.15β φαίνονται οι ίδιες αποκρίσεις από την πλευρά του πρωτεύοντος (1041). Το εν λόγω ΣΑΤΥΦ έχει αρχική χρονική καθυστέρηση $T_1 = 29$ s και διαδοχική χρονική καθυστέρηση $T_2 = 12$ s^{xix}.

Το σημείο σήμανσης σήματος συναγερμού LIVES, A, και σήματος αποκατάστασης, B, από τα αντίστοιχα υποσυστήματα LA και LR φαίνονται καθαρά στο Σχ. 5.15. Από την εφαρμογή της διαταραχής,

^{xix}Βλ. Πίν. Γ.5, σελ. 237.

τη χρονική στιγμή $t = 50$ s και μετά, η ελεγχόμενη τάση του ζυγού MT 1 βγαίνει εκτός νεκρής ζώνης και το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ αλλάζει τη λήψη του προκειμένου να την επαναφέρει. Σε κάθε αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού, ο εκάστοτε κινητός μέσος όρος της τάσης δευτερεύοντος \bar{V} λαμβάνεται σαν αναφορά V_r από το υποσύστημα ανίχνευσης LA, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.15α. Στις τρεις πρώτες κινήσεις του ΣΑΤΥΦ, ο κινητός μέσος ξεπερνάει την αντίστοιχη τιμή αναφοράς, με αποτέλεσμα να γίνεται επαναφορά της μεθόδου ανίχνευσης. Εντέλει, μετά την τέταρτη κίνηση του ΣΑΤΥΦ, τη χρονική στιγμή $t = 115$ s, ο κινητός μέσος όρος της τάσης μένει κάτω από την αντίστοιχη αναφορά για 12 s (όση και η χρονική καθυστέρηση του εν λόγω ΣΑΤΥΦ) και τη χρονική στιγμή $t = 127$ s, ακριβώς πριν την αναμενόμενη κίνηση κίνηση του ΣΑΤΥΦ, το LA σημαίνει συναγερμό αστάθειας (σημείο A στα Σχ. 5.15).

Με την σήμανση του συναγερμού αστάθειας τον έλεγχο του ΣΑΤΥΦ αναλαμβάνει το υποσύστημα LR, αντιστρέφοντας τη λειτουργία του προς όφελος της τάσης πρωτεύοντος, που αντιστοιχεί στο ζυγό YT 1041 (Σχ. 5.15β). Η επιτήρηση για αποκατάσταση της ευστάθειας αρχίζει τη χρονική στιγμή $t = 139$ s, μετά την δεύτερη αντίστροφη κίνηση του ΣΑΤΥΦ, καθώς η πρώτη αγνοείται. Καθώς ο κινητός μέσος όρος, έστω και οριακά, πέφτει κάτω από τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς του υποσυστήματος LR μετά τη δεύτερη και τρίτη αντίστροφη κίνηση, η διαδικασία ανίχνευσης της αποκατάστασης της ευστάθειας αναστέλλεται.

Όπως όμως φαίνεται από το Σχ. 5.15β, ήδη μεταξύ της τρίτης και τέταρτης αντίστροφης κίνησης ο κινητός μέσος όρος της τάσης πρωτεύοντος αρχίζει να αυξάνει, με αποτέλεσμα μετά την τέταρτη αντίστροφη κίνηση να παραμένει συνεχώς πάνω από τις τιμές αναφοράς του υποσυστήματος LR για το απαραίτητο χρονικό διάστημα επιτήρησης, το οποίο, όπως έχει αναφερθεί και στην Υποεν. 4.2.1, είναι ελάχιστα μεγαλύτερο από τη διαδοχική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτραπεί άλλη μια αντίστροφη κίνηση τη χρονική στιγμή $t = 175$ s, πριν την σήμανση αποκατάστασης ευστάθειας το επόμενο δευτερόλεπτο (σημείο B στα Σχ. 5.15).

Με το σήμα αποκατάστασης ευστάθειας LR, το ΣΑΤΥΦ επιστρέφει στην κανονική του λειτουργία και η τάση αναφοράς του τίθεται ίση με την τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου όρου της τάσης δευτερεύοντος, όπως φαίνεται από το Σχ. 5.15α. Η μείωση της τάσης αναφοράς αντιστοιχεί σε μια έμμεση αποκοπή φορτίου, που για το συγκεκριμένο ζυγό, ανέρχεται σε 41.16 MW και 19.66 MVar. Τελικά, σε συνδυασμό με τις έμμεσες αποκοπές φορτίου στους άλλους τρεις ζυγούς, το ΣΠ1.1 καταφέρνει να φέρει το σύστημα σε μόνιμη κατάσταση 130 s περίπου μετά τη διαταραχή.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια διευκρίνιση σε σχέση με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη δημοσίευση [VLK16], όσον αφορά την προσομοίωση του συγκεκριμένου συστήματος προστασίας στο Nordic Test System. Συγκεκριμένα, στην εν λόγω δημοσίευση ο μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ανά εφαρμογή του LR έχει ληφθεί ίσος με τέσσερα ($n_{rev}^{max} = 4$), ενώ και ο χρόνος επιτήρησης του κινητού μέσου όρου τάσης πρωτεύοντος έχει ληφθεί ίσος με το μισό της χρονικής καθυστέρησης του ΣΑΤΥΦ. Αντίθετα, στην παρούσα εφαρμογή ο μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων έχει ληφθεί $n_{rev}^{max} = 5$, ενώ συνολικά στη διατριβή, ο χρόνος επιτήρησης του κινητού μέσου όρου τάσης πρωτεύοντος από το υποσύστημα LR είναι ελαφρά μεγαλύτερος από την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην Υποεν. 4.2.1. Οι διαφορές σε αυτές τις παραμέτρους έχουν σαν αποτέλεσμα τα σήματα αποκατάστασης ευστάθειας να εκδίδονται εδώ λίγο αργότερα, οδηγώντας σε επιμέρους μεγαλύτερες έμμεσες αποκοπές φορτίου, αλλά λιγότερους κύκλους λειτουργίας του ΣΠ1.1. Ως εκ τούτου, σε αυτήν την περίπτωση, επιτυγχάνεται συνολικά μικρότερη έμμεση αποκοπή φορτίου, αλλά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς του συστήματος προστασίας παραμένουν ίδια με αυτά της δημοσίευσης [VLK16].

Στην συνέχεια γίνεται μια πιο ενδελεχής μελέτη του τρόπου επίδρασης του μέγιστου αριθμού αντίστροφων κινήσεων ανά εφαρμογή (και ως εκ τούτου του χρόνου σήμανσης αποκατάστασης ευστάθειας), στην απόκριση του συστήματος προστασίας.

5.2.3.2 Επίδραση μέγιστου αριθμού αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ

Στην παρούσα παράγραφο θα αναλυθεί η επίδραση της παραμέτρου των μέγιστων αντίστροφων κινήσεων n_{rev}^{max} ανά εφαρμογή του ΣΠ1.1 στην αποκατάσταση της ευστάθειας του συστήματος.

Όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.5, σε τρεις από τους 4 ζυγούς στους οποίους ενεργοποιείται το ΣΠ1.1, τα ΣΑΤΥΦ φτάνουν το μέγιστο επιτρεπτό όριο που είχε υιοθετηθεί και ήταν $n_{rev}^{max} = 5$. Ωστόσο όπως φαίνεται από την απόκριση της τάσης πρωτεύοντος του μετασχηματιστή 1–1041 στο Σχ. 5.15β, το υποσύστημα LR θα εξέδιδε ούτως ή άλλως σήμα αποκατάστασης ακόμα και αν το συγκεκριμένο όριο ήταν μεγαλύτερο, καθώς ο κινητός μέσος όρος είχε ανοδική πορεία για το απαραίτητο χρονικό διάστημα παρακολούθησης.

Το ίδιο ισχύει και για τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών 4–1044 και 43–4043, αφού αν το σήμα αποκατάστασης εκδιδόταν μόνο λόγω συμπλήρωσης του μέγιστου αριθμού αντίστροφων κινήσεων, καθώς το ΣΠ1.1 δρα αυτοματοποιημένα, το υποσύστημα LA θα ανίχνευε και πάλι την αστάθεια ενεργοποιώντας και άλλο κύκλο έμμεσων αποκοπών φορτίου από το υποσύστημα LR στους ίδιους ή σε άλλους ζυγούς.

Από την άλλη πλευρά, αν ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός αντίστροφων κινήσεων γίνει μικρότερος, είναι προφανές πως κατά τον πρώτο κύκλο εφαρμογής του ΣΠ1.1 δεν θα επέλθει μόνιμη κατάσταση και θα ενεργοποιηθεί και δεύτερος κύκλος εφαρμογής. Αυτό φαίνεται και από τον Πίν. 5.6, που περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση που $n_{rev}^{max} = 4$ (η άλλη παράμετρος του ΣΠ1.1, ο συνολικός αριθμός εφαρμογών ανά ζυγό παραμένει ίδιος με την προηγούμενη περίπτωση, δηλαδή $n_{LR}^{max} = 2$).

Η αρχική ανίχνευση της αστάθειας από το υποσύστημα LA γίνεται στους ίδιους χρόνους και στους ίδιους ζυγούς MT 43, 1, 4 και 46, όπως και στην προηγούμενη εφαρμογή. Από εκεί και πέρα όμως, καθώς ο μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων έχει μειωθεί, η απόκριση του συστήματος αλλάζει, οδηγώντας και σε δεύτερο κύκλο εφαρμογής του συστήματος προστασίας μετά την ενεργοποίηση και των ΣΠΥ των g15, g16 και g6.

Συγκεκριμένα, γίνεται δεύτερη ενεργοποίηση του ΣΠ1.1 στους ζυγούς MT 1, 46 και 43, ενώ ενεργοποιείται και το υποσύστημα LTC-rr στους ζυγούς MT 3 και 5, στους οποίους εξαντλούνται τα αντίστοιχα όρια μεταβλητών λήψεων των ΣΑΤΥΦ. Το σύστημα εντέλει οδηγείται σε μόνιμη κατάσταση μετά τη χρονική στιγμή $t = 481$ s, έχοντας υποστεί μια συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου 358.42 MW και 191.6 MVar.

Η συνολική αυτή έμμεση αποκοπή φορτίου περιλαμβάνει τόσο την μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης από το υποσύστημα LR όσο και από το υποσύστημα LTC-rr, η οποία έχει υπολογιστεί και στις δύο περιπτώσεις μέσω των σχέσεων (5.5).

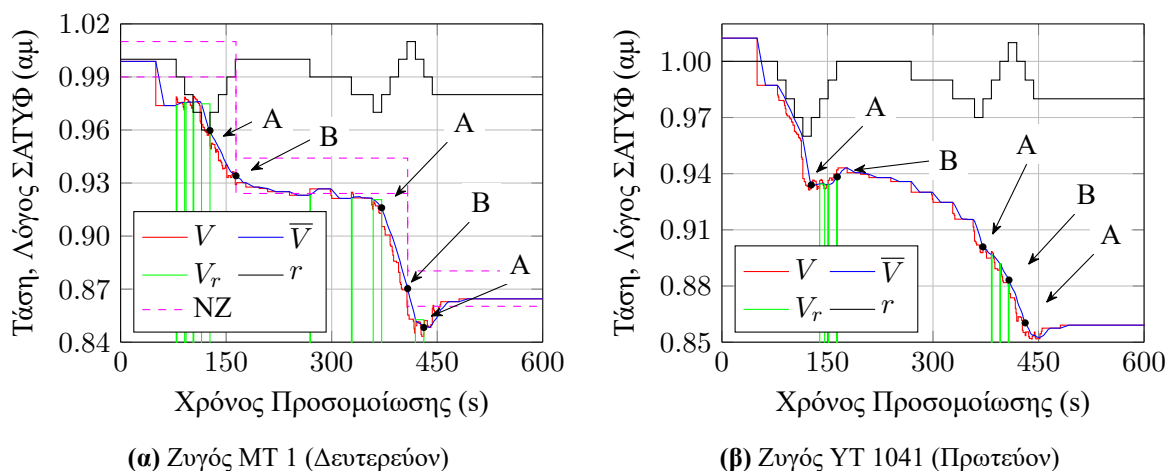
Από τη σύγκριση των Πίν. 5.5 και 5.6 προκύπτει πως σε αυτήν την περίπτωση τα πρώτα σήματα αποκατάστασης ευστάθειας εκδίδονται πιο νωρίς με αποτέλεσμα οι έμμεσες αποκοπές φορτίου να είναι μικρότερες κατά περίπου 10 MW συνολικά (186.35 MW όταν $n_{rev}^{max} = 5$ έναντι 175.31 MW όταν $n_{rev}^{max} = 4$). Αυτό το φορτίο δεν είναι εντούτοις αρκετό για να αποτρέψει την υπερδιέγερση των γεννητρών g15, g16 και g6, η οποία υπερδιέγερση μειώνει περαιτέρω τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος από τη Βόρεια προς την Κεντρική περιοχή.

Αποτέλεσμα αυτού είναι να ενεργοποιηθεί δεύτερος κύκλος λειτουργίας του συστήματος προστασίας, συμπεριλαμβανομένου και του υποσυστήματος αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC-rr, που συνδυαστικά οδηγούν σε επιπλέον αποκοπή 183.11 MW πριν την τελική αποκατάσταση της ευστάθειας.

Για λόγους σύγκρισης με την προηγούμενη περίπτωση (όπου $n_{rev}^{max} = 5$), στο Σχ. 5.16 φαίνονται οι αποκρίσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή 1–1041, όπως και στο Σχ. 5.15. Τα σημεία A, αντιστοιχούν σε σήμανση συναγερμού αστάθειας από το υποσύστημα LA και τα σημεία B, σε έκδοση σήματος αποκατάστασης ευστάθειας από LR, που συνοδεύεται από αντίστοιχη μείωση της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης (και βέβαια έμμεση αποκοπή φορτίου).

Πίνακας 5.6: Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	V_{MT} (αμ)	V_{YT} (αμ)	n_{rev}	V_{ref} (αμ)	Έμμεση Αποκοπή		
							ΔP (MW)	ΔQ (MVar)	
96	g12	ΣΠΥ							
113	g14	ΣΠΥ							
115	g7	ΣΠΥ							
125	43	LA	0.9678	0.9631					
127	1	LA	0.9577	0.9320					
128	g11	ΣΠΥ							
129	4	LA	0.9714	0.9289					
129	46	LA	0.9765	0.9728					
159	43	LR	0.9337	0.9672	4	0.9402	53.76	29.47	
160	4	LR	0.9374	0.9345	4	0.9431	47.83	27.89	
164	1	LR	0.9291	0.9420	4	0.9341	39.57	18.93	
166	46	LR	0.9449	0.9798	4	0.9513	34.15	20.18	
178	g15	ΣΠΥ							
197	g16	ΣΠΥ							
347	g6	ΣΠΥ							
371	1	LA	0.9129	0.8978					
408	1	LR	0.8599	0.8807	4	0.8703	38.32	17.10	
419	46	LA	0.9166	0.9032					
421	43	LA	0.9119	0.8984					
430	5	Εξάντληση ΣΑΤΥΦ	$V_{MT} = 0.9739$ αμ	$r_{min} = 0.88$ αμ					
431	1	LA	0.8433	0.8535					
435	3	Εξάντληση ΣΑΤΥΦ	$V_{MT} = 0.9712$ αμ	$r_{min} = 0.88$ αμ					
441	5	LTC-rr	0.9716	0.8680		0.9500	36.14	18.71	
444	3	LTC-rr	0.9610	0.8705		0.9500	13.03	8.21	
455	43	LR	0.8777	0.9004	4	0.8831	51.33	26.44	
456	46	LR	0.8845	0.9082	4	0.8880	44.29	24.67	
481	Μόνιμη κατάσταση								
	Συνολική αποκοπή							358.42	191.60



Σχήμα 5.16: Αποκρίσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος του μετασχηματιστή 1–1041, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB. V : τάση, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, V_r : τάση αναφοράς υποσυστήματος LA στο δευτερεύον και LR στο πρωτεύον, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: σήμανση συναγερμού LA, B: ενεργοποίηση σήματος αποκατάστασης ευστάθειας LR

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο ζυγό MT 1 σημαίνεται και τρίτος συναγερμός αστάθειας τάσης τη χρονική στιγμή $t = 431$ s, ο οποίος όμως δεν οδηγεί σε ενεργοποίηση του υποσυστήματος LR, καθώς έχουν ήδη συμπληρωθεί οι μέγιστες επιτρεπτές εφαρμογές του ($n_{LR}^{max} = 2$). Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι μέχρι και αυτή τη χρονική στιγμή δεν έχει επιτευχθεί πλήρης αποκατάσταση της ευστάθειας.

Ωστόσο, καθώς είναι ήδη ενεργή η προσπάθεια αποκατάστασης ευστάθειας από το δεύτερο κύκλο λειτουργίας του ΣΠ1.1 στους ζυγούς MT 43 και 46, τη χρονική στιγμή $t = 456$ s, οπότε και εκδίδεται και το τελευταίο σήμα LR, η ευστάθεια αποκαθίσταται, καθώς δεν σημαίνονται πλέον άλλοι συναγερμοί αστάθειας (το υποσύστημα LA παραμένει πάντα ενεργό).

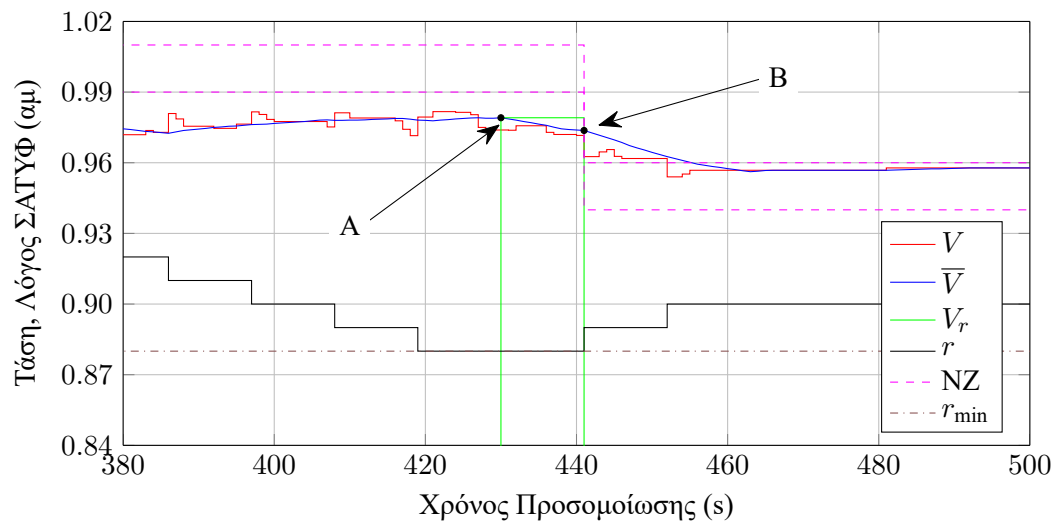
Καθώς στη συγκεκριμένη περίπτωση ενεργοποιείται και το υποσύστημα LTC-rr, είναι χρήσιμο να γίνει μια αναφορά στη λειτουργία του, η οποία μπορεί να εκτιμηθεί από τις αποκρίσεις του ζυγού MT 5 που φαίνονται στο Σχ. 5.17. Το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή 5–1045, που ελέγχει το συγκεκριμένο ζυγό, έχει αρχική χρονική καθυστέρηση $T_1 = 29$ s και διαδοχική καθυστέρηση $T_2 = 11$ s^{xx}.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.17, τη χρονική στιγμή $t = 419$ s, μετά από επανειλημμένες προσπάθειες να επαναφέρει την ελεγχόμενη τάση εντός νεκρής ζώνης, το ΣΑΤΥΦ εξαντλεί τις διαθέσιμες λήψεις του, φτάνοντας το αντίστοιχο όριο $r_{min} = 0.88$ αμ. Ως εκ τούτου, τη χρονική στιγμή $t = 430$ s, οπότε και υπό φυσιολογικές συνθήκες θα έπρεπε να δράσει (τάση εκτός νεκρής ζώνης), εκδίδεται σήμα εξάντλησης (σημείο A) και ο κινητός μέσος όρος της τάσης \bar{V} λαμβάνεται σαν αναφορά από το υποσύστημα LTC-rr. Καθώς ο κινητός μέσος \bar{V} παραμένει συνεχώς κάτω από την τιμή αναφοράς V_r για διάστημα ίσο με την χρονική καθυστέρηση T_2 του ΣΑΤΥΦ, τη χρονική στιγμή $t = 441$ s, εκδίδεται σήμα αποκατάστασης λειτουργίας LTC-rr (σημείο B) και η τάση αναφοράς V_{ref} της νεκρής ζώνης μειώνεται κατά 5%, στο 0.95 αμ.

Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε μια έμμεση αποκοπή ενεργού ισχύος της τάξης των 36.14 MW και άεργου ισχύος 18.71 MVA_r, ενώ απεμπλέκει το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ, επιτρέποντας τη συνέχιση της λειτουργίας του ΣΠ1.1, σε περίπτωση που αυτό απαιτηθεί. Τελικά, μετά την αποκατάσταση της ευστάθειας, στη μόνιμη κατάσταση η τάση του ζυγού MT 5 ισορροπεί κοντά στο 0.96 αμ.

Από την άλλη πλευρά, αν δεν υπήρχε το υποσύστημα LTC-rr, η τάση του ζυγού MT 5 θα έμενε

^{xx}Βλ. Πίν. Γ.5, σελ. 237.



Σχήμα 5.17: Αποκρίσεις ζυγού MT 5, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.1 και $n_{rev}^{max} = 4$, σε προσομοίωση WPSTAB. V : τάση, \bar{V} : κινητός μέσος όρος τάσης, V_r : τάση αναφοράς υποσυστήματος LTC-rr, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: εξάντληση ΣΑΤΥΦ, B: ενεργοποίηση LTC-rr

γύρω στο 0.97 αμ, όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.6 τη στιγμή της ενεργοποίησης του LTC-rr δεδομένου ότι λίγο αργότερα το σύστημα φτάσει σε μόνιμη κατάσταση. Η τιμή αυτή της τάσης είναι ελάχιστα υψηλότερη από αυτήν στην οποία σταθεροποιείται με το υποσύστημα LTC-rr, αλλά ο ζυγός θα παρέμεινε χωρίς δυνατότητα εφαρμογής προστασίας. Επιπλέον, θα έπρεπε να συνυπολογιστεί η έμμεση αποκοπή φορτίου, λόγω μη ικανοποίησης της ονομαστικής τάσης. Πανομοιότυπα συμπεράσματα ισχύουν και για τον ζυγό MT 3, στον οποίο ενεργοποιείται επίσης το υποσύστημα LTC-rr.

Συμπερασματικά, λόγω του αυτοματοποιημένου τρόπου λειτουργίας του συστήματος ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης ΣΠ1.1, μπορεί να γίνει επιλογή μικρότερου επιτρεπτού αριθμού αντίστροφων κινήσεων. Καθώς μάλιστα ο δεύτερος κύκλος ενεργοποίησης της προστασίας απέχει περίπου 250 s και ως εκ τούτου, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς μπορεί να αποκατασταθεί στα επίπεδα προ της διαταραχής, με κλείσιμο για παράδειγμα της γραμμής μεταφοράς 4032–4044, το συνολικό φορτίο που θα αποκοπεί (έμμεσα) θα είναι μικρότερο. Από την άλλη πλευρά, αν η αποκατάσταση των ορίων φόρτισης δεν είναι εφικτή, όπως στη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι καλύτερη η επιλογή μεγαλύτερου αριθμού αντίστροφων κινήσεων. Αν και αυτή η επιλογή ενδεχομένως οδηγήσει σε μεγαλύτερο αρχικό ποσοστό έμμεσης αποκοπής ανά ζυγό, εντούτοις το ποσό αυτό μπορεί να είναι αρκετό για να εξασφαλίσει την ευστάθεια του συστήματος χωρίς δεύτερο κύκλο ενεργοποίησης του ΣΠ1.1 και συνεπώς το τελικό ποσό έμμεσης αποκοπής να είναι μικρότερο.

Σε κάθε περίπτωση, το γεγονός πως το σύστημα είναι κλειστού βρόχου, με δυνατότητα επαναληπτικής εφαρμογής της προστασίας, καθιστά το ΣΠ1.1 αξιόπιστο και ευπροσάρμοστο στη σφοδρότητα της διαταραχής, καθώς σε περιπτώσεις ήπιας αστάθειας τάσης δεν χρειάζεται να εξαντλήσει το όριο αντίστροφων κινήσεων, αφού η επιτήρηση της ευστάθειας ενδεχομένως δώσει πιο νωρίς σχετική ένδειξη, ενώ ακόμα και με συντηρητική ρύθμιση, μέσω των πολλαπλών κύκλων ενεργοποίησης, μπορεί να σώσει το σύστημα.

5.2.4 Εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.3

Σε αυτήν την υποενότητα προσομοιώνεται το σύστημα προστασίας ΣΠ1.3, το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο ανίχνευσης LIVES, μέσω του υποσυστήματος LA σε συνδυασμό με εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου. Το υποσύστημα ανίχνευσης αστάθειας LA λειτουργεί όπως έχει περιγραφεί στην Υποεν. 5.2.2, ενώ η εφαρμογή της αποκοπής λαμβάνει χώρα στο επόμενο βήμα της προσομοίωσης, δηλαδή 1 s μετά τη σήμανση συναγεργμού.

Όπως έχει αναφερθεί και στην Εν. 4.3, το ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή αλλά και ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων εξαρτάται από το πλήθος των μη κρίσιμων αναχωρήσεων του υποσταθμού διανομής στον οποίο μπορεί να εγκατασταθεί το ΣΠ1.3. Ως εκ τούτου, σε πραγματικές συνθήκες οι ανωτέρω παράμετροι μπορεί να είναι και τελείως διαφορετικές ανά μετασχηματιστή διανομής. Επειδή όμως αυτό δεν είναι διαθέσιμο σε αυτό το επίπεδο της εφαρμογής επιλέγεται ένα ενιαίο ποσοστό αποκοπής και ένας μέγιστος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών για όλους τους υποσταθμούς στους οποίους θεωρείται εγκατεστημένο το σύστημα προστασίας ΣΠ1.3. Επιπλέον, για λόγους σύγκρισης και με το ΣΠ1.1, το ποσοστό άμεσης αποκοπής φορτίου και κατά συνέπεια το φορτίο που αποσυνδέεται ανά συναγεργμό LIVES και ανά ζυγό, είναι υπολογισμένο ως προς το αρχικό φορτίο στην ονομαστική τάση και ως εκ τούτου, αναφέρεται στις τιμές που φαίνονται στον Πίν. Γ.6 του Παραρτήματος Γ.

Αν και στο [VLK16] το ποσοστό αποκοπής που χρησιμοποιείται ανά συναγεργμό LIVES είναι 10%, στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται 8%, το οποίο οδηγεί σε ακριβώς τις ίδιες αποκρίσεις, αλλά με ελαφρά μειωμένη τη συνολική αποκοπή φορτίου που απαιτείται για την αποκατάσταση της ευστάθειας.

Στο υπόλοιπο της υποενότητας πραγματοποιείται προσομοίωση του ΣΠ1.3, γίνεται σύγκριση με την ελάχιστη απαιτούμενη αποκοπή που χρειάζεται για την αποκατάσταση της ευστάθειας στη δεδομένη διαταραχή και εξετάζεται η επίδραση του ποσοστού αποκοπής ανά συναγεργμό ως προς το συνολικό φορτίο που αποκόπτεται. Τέλος, μελετάται η επίδραση της ευαισθησίας του φορτίου στην αποδοτικότητα τόσο της ανίχνευσης όσο και της προστασίας.

5.2.4.1 Προσομοίωση ΣΠ1.3

Οι παράμετροι του ΣΠ1.3 που επιλέγονται για τη συγκεκριμένη προσομοίωση είναι:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγεργμού: $\epsilon_t = -10^{-5}$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 10^{-3}$ αμ
- Ποσοστό αποκοπής φορτίου ανά ενεργοποίηση του συστήματος: 8%.
- Μέγιστος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών ανά ζυγό: 3.

Ο Πίν. 5.7 περιλαμβάνει την ακολουθία γεγονότων της συγκεκριμένης εφαρμογής. Η τάση της μεταφοράς, στην πλευρά του πρωτεύοντος (ζυγός YT) τη στιγμή του συναγεργμού, φαίνεται σαν V_{YT} στην τέταρτη στήλη του Πίν. 5.7. Σημειώτεον ότι εδώ, μετά τη γεννήτρια g11 δεν υπερδιεγείρεται καμία άλλη, σε αντίθεση με το ΣΠ1.1, ενώ το σύστημα φτάνει σε μόνιμη κατάσταση (steady state) μετά τη χρονική στιγμή $t = 175$ s.

Η λειτουργία του ΣΠ1.3 στον υποσταθμό 43–4043, φαίνεται στο Σχ. 5.18, το οποίο περιλαμβάνει την απόκριση της τάσης μαζί με την μεταβλητή λήψη του ΣΑΤΥΦ. Όπως φαίνεται από το συγκεκριμένο σχήμα, καθώς το ΣΑΤΥΦ αδυνατεί να επαναφέρει την τάση εντός νεκρής ζώνης και ο κινητός μέσος όρος παραμένει συνεχώς κάτω από την αντίστοιχη τάση αναφοράς του υποσυστήματος LA, με την συμπλήρωση της απαραίτητης χρονικής καθυστέρησης σημαίνεται συναγεργμός αστάθειας τη χρονική στιγμή $t = 125$ s (σημείο A)^{xxi}. Την επόμενη χρονική στιγμή, $t = 126$ s ενεργοποιείται η άμεση

^{xxi}Πρόκειται για το ίδιο σημείο ανίχνευσης αστάθειας που φαίνεται και στο Σχ. 5.13.

Πίνακας 5.7: Αλληλουχία γεγονότων, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.3 και 8% αποκοπή φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB

t (s)	Ζυγός	Συμβάν	V_{YT} (αμ) ^a	Άμεση Αποκοπή Φορτίου	
				ΔP (MW)	ΔQ (MVA _r)
96	g12	ΣΠΥ			
113	g14	ΣΠΥ			
115	g7	ΣΠΥ			
125	43	LA	0.961		
126	43	Αποκοπή φορτίου		71.91	20.32
127	1	LA	0.937		
128	g11	ΣΠΥ			
128	1	Αποκοπή φορτίου		48.06	11.88
129	46	LA	0.982		
130	46	Αποκοπή φορτίου		56.05	16.98
175	Μόνιμη Κατάσταση				
	Συνολική αποκοπή			176.02	49.18

^a Τάση μεταφοράς, στον ζυγό YT του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ, τη στιγμή του συναγερμού

αποκοπή φορτίου στον ζυγό MT 43, που οδηγεί στην αποσύνδεση 71.91 MW και 20.32 MVA_r, προκαλώντας αύξηση της τάσης του ζυγού, οριακά κάτω από τη νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ. Καθώς εκδίδονται συναγερμοί αστάθειας και στους ζυγούς MT 1 και 46, τις χρονικές στιγμές $t = 128$ s (σημείο C) και $t = 130$ s (σημείο D) αντίστοιχα, εφαρμόζεται άμεση αποκοπή φορτίου 8% και σε αυτούς τους ζυγούς, που έχει σαν αποτέλεσμα να επαναφέρει την τάση του ζυγού MT 3 εντός νεκρής ζώνης. Εντέλει, το σύστημα έρχεται σε μόνιμη κατάσταση μετά τη χρονική στιγμή $t = 175$ s.

Η επίδραση του συστήματος προστασίας στο επίπεδο της μεταφοράς μπορεί να εκτιμηθεί από το Σχ. 5.19, που περιλαμβάνει τις αποκρίσεις των τάσεων στο πρωτεύον των μετασχηματιστών που ενεργοποιείται η προστασία, δηλαδή τους ζυγούς YT και YYT 4043, 1041 και 4046. Ενώ μετά τη διαταραχή και πριν την ενεργοποίηση του ΣΠ1.3 οι τάσεις έβαιναν συνεχώς μειούμενες, με την εφαρμογή της άμεσης αποκοπής φορτίου οι τάσεις μεταφοράς αποκαθίστανται, για να ισορροπήσουν τελικά σε τιμές άνω του 0.95 αμ.

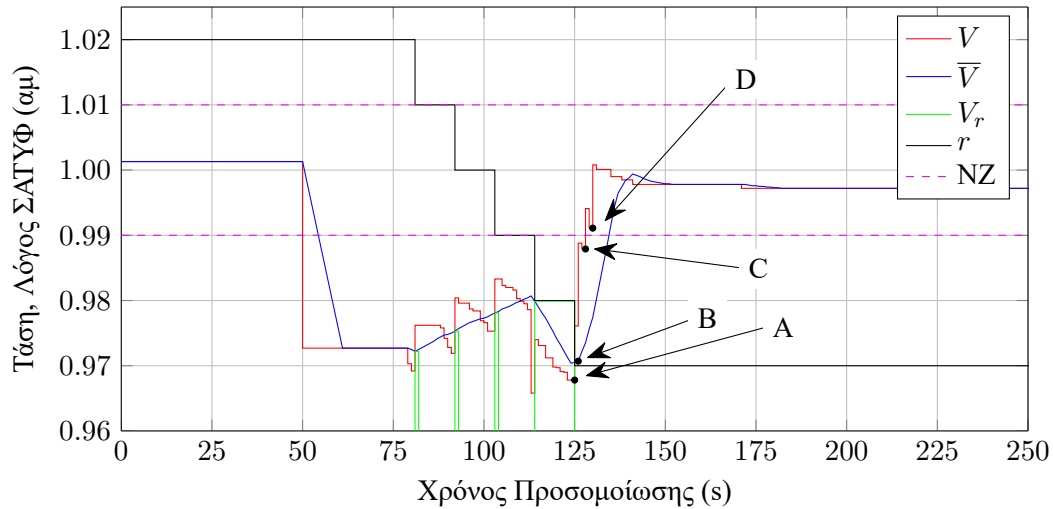
5.2.4.2 Σύγκριση με την ελάχιστη αποκοπή

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής του ΣΠ1.3 σε σχέση με την ελάχιστη αποκοπή φορτίου που απαιτείται για την διάσωση του συστήματος από την συγκεκριμένη διαταραχή. Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιείται η δυνατότητα ανάλυσης ευστάθειας τάσεως που προσφέρει το πρόγραμμα WPSTAB.

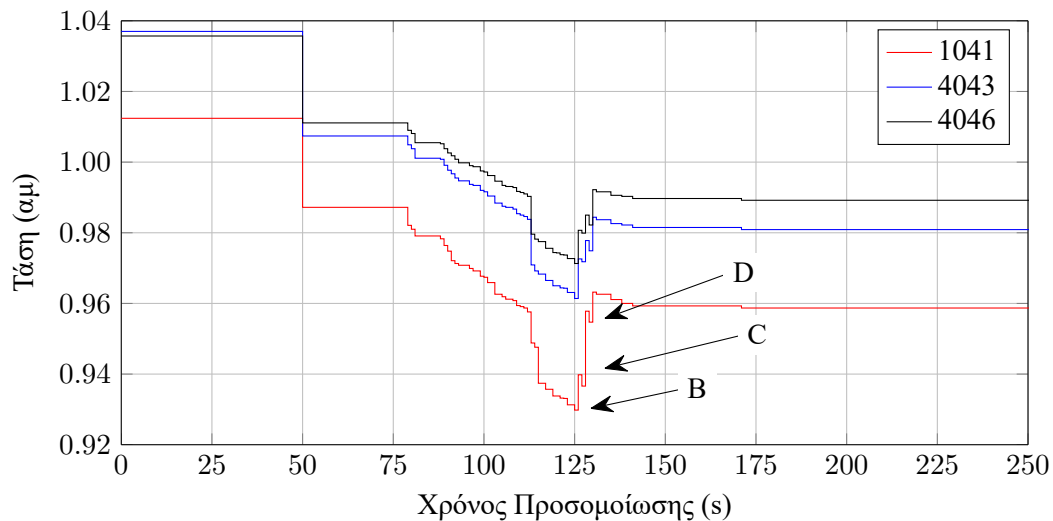
Συγκεκριμένα, ακολουθείται η διαδικασία υπολογισμού της κρίσιμης (πιο κοντά στο μηδέν) του Ιακωβιανού πίνακα ϕ_u ^{xxii} για το εν λόγω σενάριο. Από τη χρονική εξέλιξη της εντοπίζεται το σημείο στο οποίο το σύστημα φτάνει στο όριο φόρτισης του, δηλαδή εντοπίζεται η χρονική στιγμή που η ιδιοτιμή αυτή αλλάζει πρόσημο μέσω του μηδενός.

Για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και την αντίστοιχη ιδιοτιμή υπολογίζεται το αριστερό ιδιοδιά-

^{xxii} Πρόκειται για τον επαυξημένο μακροπρόθεσμο Ιακωβιανό πίνακα J_ℓ . Βλ. Υποεν. 2.4.1.



Σχήμα 5.18: Αποκρίσεις ζυγού MT 3 , Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB. V : τάση ζυγού, \bar{V} : κινητός μέσος τάσης, r : λόγος ΣΑΤΥΦ, NZ: νεκρή ζώνη, A: σήμανση συναγερμού LA, B: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 43, C: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 1, D: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 46



Σχήμα 5.19: Αποκρίσεις τάσεων ζυγών μεταφοράς, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, σε προσομοίωση WPSTAB. B: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 43, C: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 1, D: άμεση αποκοπή φορτίου 8% στο ζυγό MT 46

νυσμα \mathbf{w} του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα $\phi_{\mathbf{u}}$, το οποίο σχετίζεται με το κάθετο διάνυσμα \mathbf{n} της επιφάνειας ορίων φόρτισης, με βάση τη σχέση (2.70), που επαναλαμβάνεται εδώ για λόγους πληρότητας:

$$\mathbf{n} = \phi_{\mathbf{p}}^T \mathbf{w} \quad (5.6)$$

όπου, ϕ είναι οι αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας της οιονεί στατικής προσέγγισης^{xxiii} και \mathbf{p} το διάνυσμα των αντίστοιχων παραμέτρων, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το φορτίο των ζυγών. Δηλαδή ισχύει:

$$\mathbf{p}^T = [\mathbf{P}^T \quad \mathbf{Q}^T] \quad (5.7)$$

και επομένως το κάθετο διάνυσμα αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

$$\mathbf{n}^T = [\mathbf{n}_{\mathbf{P}}^T \quad \mathbf{n}_{\mathbf{Q}}^T] \quad (5.8)$$

Όπως αναφέρεται και στην διατριβή [Νικ07], στο όριο φόρτισης η ιεράρχιση των ζυγών μπορεί να γίνει με βάση τα στοιχεία n_i του κάθετου διανύσματος \mathbf{n} της συγκεκριμένης επιφάνειας. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν από τα στοιχεία του κάθετου διανύσματος ως προς το ενεργό και άεργο φορτίου κάθε ζυγού i ως εξής:

$$n_i = n_{P_i} + \frac{Q_{o,i}}{P_{o,i}} n_{Q_i} \quad (5.9)$$

όπου n_{P_i} , n_{Q_i} το στοιχείο του κάθετου διανύσματος που αντιστοιχεί στην ενεργό και άεργο αντίστοιχα ισχύ του φορτίου του i – οστού ζυγού και $P_{o,i}$, $Q_{o,i}$ οι αντίστοιχες τιμές των εν λόγω ισχύων υπό ονομαστική τάση.

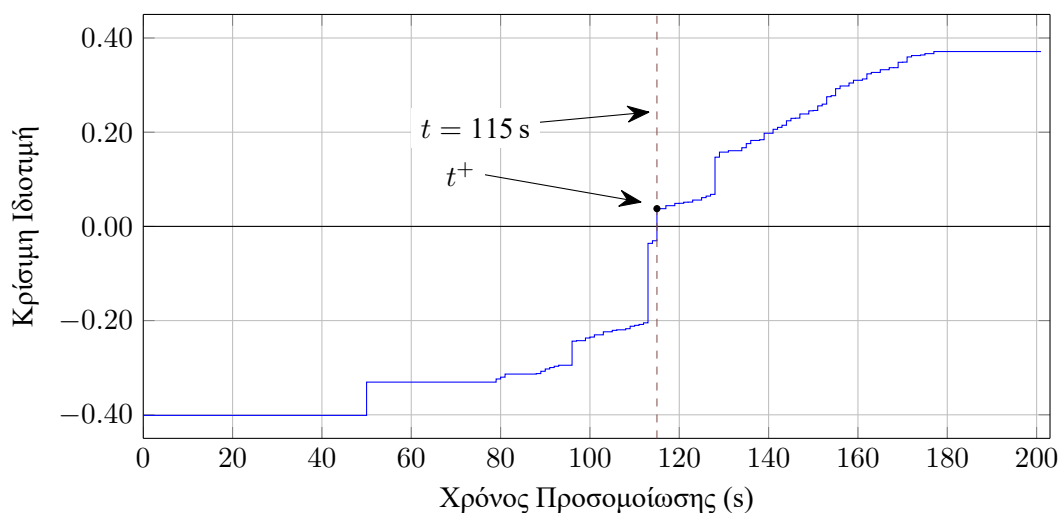
Στη συνέχεια αυτά τα στοιχεία n_i κανονικοποιούνται ως προς το μέγιστο στοιχείο $n_{i,\max}$, καθώς το μέτρο τους δεν έχει κανένα φυσικό νόημα. Η κανονικοποίηση γίνεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\tilde{n}_i = \frac{n_i}{n_{i,\max}} \quad (5.10)$$

Η ιεράρχιση των ζυγών φορτίου κατά φθίνον διάνυσμα \tilde{n}_i θα δώσει τους πιο αποδοτικούς ζυγούς για εφαρμογή της αποκοπής φορτίου (που με τη σειρά της θα δώσει και την ελάχιστη αποκοπή). Ο προσδιορισμός του ελάχιστου ποσού άμεσης αποκοπής που μπορεί να φέρει το σύστημα σε ισορροπία και να αποφύγει την κατάρρευση βρίσκεται με τον ακόλουθο αλγόριθμο:

1. Την αμέσως επόμενη χρονική στιγμή μετά την αστάθεια, εφαρμόζεται αποκοπή 8% στον πρώτο πιο αποδοτικό ζυγό και εξετάζεται η απόκριση του συστήματος.
 - Αν επιτευχθεί ευστάθεια, μειώνεται το ποσοστό αυτό κατά 0.5% και ξαναγίνεται προσομοίωση μέχρι να βρεθεί η τιμή που οδηγεί σε κατάρρευση. Η ελάχιστη αποκοπή αντιστοιχεί στην προηγούμενη ακριβώς τιμή.
 - Αν δεν επιτευχθεί ευστάθεια ακολουθεί το βήμα 2.
2. Στον αμέσως επόμενο πιο αποδοτικό ζυγό εφαρμόζεται αποκοπή 8%.
 - Αν επιτευχθεί ευστάθεια μειώνεται το ποσοστό αποκοπής μόνο του λιγότερο αποδοτικού ζυγού κατά 0.5% και ξαναγίνεται προσομοίωση μέχρι να βρεθεί η τιμή που οδηγεί σε κατάρρευση. Η ελάχιστη αποκοπή αντιστοιχεί στην προηγούμενη ακριβώς τιμή.
 - Αν δεν επιτευχθεί ευστάθεια, επαναλαμβάνεται το βήμα 2

^{xxiii} Βλ. Υποεν. 2.4.3.



Σχήμα 5.20: Απόκριση κρίσιμης ιδιοτιμής μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) χωρίς προστασία, σε προσομοίωση WPSTAB. t^+ : Σημείο υπολογισμού στοιχείων \tilde{n}_i κάθετου διανύσματος επιφάνειας ορίων φόρτισης για την ιεράρχηση των ζυγών ως προς την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής αποκοπής φορτίου

Προφανώς η τελευταία τιμή συνολικού φορτίου αποκοπής, για την οποία επιτυγχάνεται ευστάθεια, αντιστοιχεί στην ελάχιστη αποκοπή.

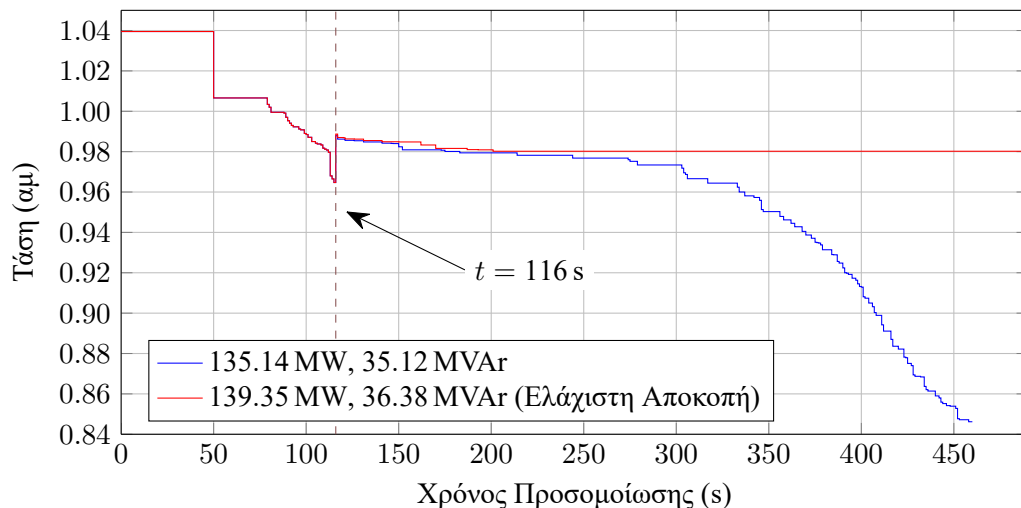
Για το εξεταζόμενο σενάριο, η εξέλιξη της κρίσιμης ιδιοτιμής του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα Φ_u , για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται προστασία στο σύστημα, φαίνεται στο Σχ. 5.20, όπου η κατακόρυφη γραμμή αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή $t = 115$ s που η μικρότερη κατά μέτρο ιδιοτιμή έγινε θετική. Πρακτικά η μετάβαση αυτή έγινε λόγω διακριτών μεταβολών στο ίδιο βήμα προσομοίωσης από $t^- \rightarrow t^+$. Ως εκ τούτου, την συγκεκριμένη χρονική στιγμή (που αντιστοιχεί στο σημείο t^+ του Σχ. 5.20) υπολογίζονται και τα στοιχεία \tilde{n}_i των ζυγών φορτίου της Κεντρικής περιοχής που αντιστοιχούν στο κάθετο διάνυσμα της επιφάνειας ορίων φόρτισης. Οι αντίστοιχοι ζυγοί, ιεραρχημένοι κατά φθίνον στοιχείο \tilde{n}_i , φαίνονται στον Πίν. 5.8.

Με βάση τη διαδικασία που ήδη έχει περιγραφεί, η ελάχιστη αποκοπή φορτίου βρίσκεται για ποσοστό αποκοπής 8% στους τρεις πρώτους ζυγούς MT 1, 3 & 5 και 1.5% στον τέταρτο ζυγό MT 4. Αυτό οδηγεί σε μία συνολική ελάχιστη αποκοπή της τάξης των 139.35 MW και 36.38 MVA_r, η οποία είναι ικανή να σώσει το σύστημα, όπως φαίνεται και από το Σχ. 5.21, όπου φαίνεται η εξέλιξη της τάσης του ζυγού YVT 4044 για την ελάχιστη και την αμέσως μικρότερη αποκοπή, που αντιστοιχεί σε αποκοπή 1% στον ζυγό MT 4 και συνολική αποκοπή 135.14 MW και 35.42 MVA_r, η οποία δεν μπορεί να αποτρέψει την κατάρρευση του συστήματος.

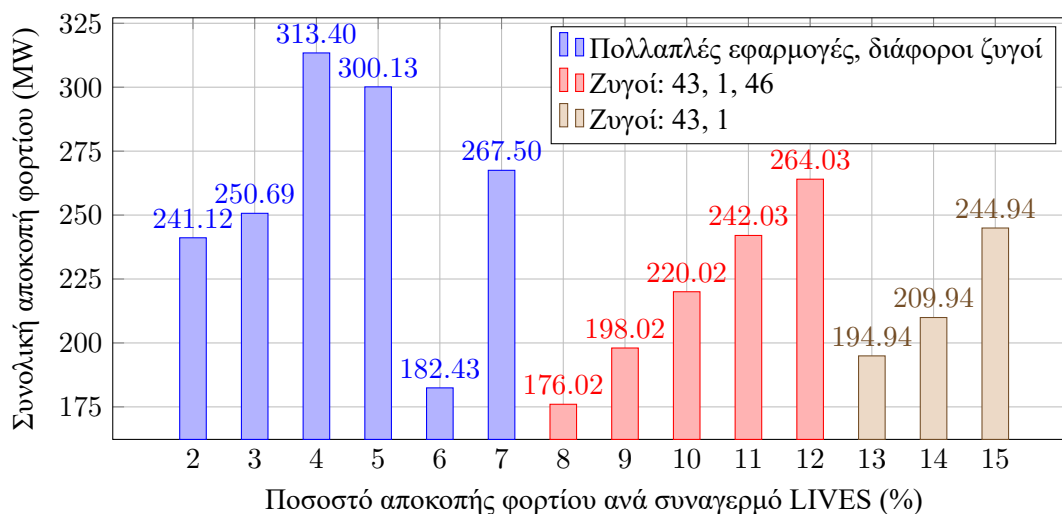
Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι το συνολικό αρχικό φορτίο της Κεντρικής περιοχής του συστήματος πριν τη διαταραχή, στο αρχικό σημείο λειτουργίας A, ήταν 6190.0 MW. Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα του Πίν. 5.7 ότι το ΣΠ1.3, με συνολική άμεση αποκοπή φορτίου 176.02 MW που αντιστοιχεί σε 2.8% του συνολικού αρχικού φορτίου της Κεντρικής περιοχής, βρίσκεται αρκετά κοντά στο ελάχιστο ποσοστό αποκοπής των 139.35 MW (2.3% του αρχικού φορτίου). Αυτή η απόκλιση δικαιολογείται από το γεγονός πως το ελάχιστο ποσοστό αποκοπής είναι πρακτικά πολύ δύσκολο να επιτευχθεί, αφενός γιατί το διαθέσιμο φορτίο για αποκοπή εξαρτάται από τον εκάστοτε υποσταθμό και αφετέρου, γιατί η εφαρμογή της αποκοπής στην πράξη θα καθυστερήσει (αφού χρειάζεται χρόνος για την ανίχνευση της αστάθειας με επαρκή ασφάλεια) και ως γνωστόν, η κάθε καθυστέρηση αυξάνει το ποσοστό φορτίου

Πίνακας 5.8: Ιεράρχηση ζυγών φορτίου Κεντρικής περιοχής Nordic Test System, ασθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), χωρίς εφαρμογή προστασίας, με βάση τα στοιχεία του κάθετου διανύσματος \tilde{n}_i αμέσως μετά την εμφάνιση αστάθειας, τη χρονική στιγμή $t = 115$ s, σε προσομοίωση WPSTAB. Η ελάχιστη αποκοπή φορτίου επιτυγχάνεται με εφαρμογή 8% στους ζυγούς 1, 3 και 5 και 1.5% στον ζυγό 4 τη χρονική στιγμή $t = 116$ s

Ζυγός	n_P	n_Q	P_o (MW)	Q_o (MVA _r)	\tilde{n}	ΔP (MW)	ΔQ (MVA _r)
1	0.444 40	0.166 25	600.72	148.56	1.000 000	48.06	11.88
3	0.403 94	0.164 37	260.68	84.24	0.941 444	20.85	5.67
5	0.351 27	0.119 49	722.82	191.89	0.788 835	57.83	15.35
4	0.334 39	0.136 68	840.34	252.20	0.773 221	12.61	3.78
51	0.337 14	0.062 47	801.76	259.34	0.736 018		
43	0.304 72	0.115 62	898.83	253.94	0.694 896		
46	0.303 24	0.098 31	700.70	212.22	0.685 892		
2	0.310 15	0.038 90	329.60	70.83	0.656 016		
42	0.264 61	0.145 26	401.93	128.63	0.640 758		
47	0.279 21	0.066 14	100.50	44.44	0.635 332		
41	0.225 53	0.112 89	541.79	132.27	0.521 295		
Ελάχιστη αποκοπή						139.35	36.38



Σχήμα 5.21: Απόκριση τάσης ζυγού YYT 4044, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ελάχιστης αποκοπής, σε προσομοίωση WPSTAB. Οι αποκοπές φορτίου εφαρμόζονται τη χρονική στιγμή $t = 116$ s



Σχήμα 5.22: Συνολική αποκοπή φορτίου συναρτήσει του εφαρμοζόμενου ποσοστού αποκοπής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) με εφαρμογή ΣΠ1.3, μέχρι τρεις ενεργοποιήσεις ανά ζυγό, σε προσομοίωση WPSTAB

που απαιτείται να αποσυνδεθεί για να ισορροπήσει το σύστημα. Θα πρέπει να σημειωθεί πάντως ότι η ανίχνευση μέσω της μεθόδου LIVES είναι πολύ ικανοποιητική, με τον πρώτο συναγερμό να σημαίνεται μόλις 10 s αργότερα από το πραγματικό σημείο αστάθειας (τη χρονική στιγμή $t = 125$ s που αντιστοιχεί σε περίπου έναν κύκλο λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ), που οφείλεται στον χρόνο επιτήρησης που έχει προστεθεί για αυξημένη ασφάλεια.

Εδώ θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στο γεγονός πως ο πρώτος συναγερμός που σημαίνεται από το υποσύστημα LA του ΣΠ1.3 (και στον οποίο εφαρμόζεται η πρώτη αποκοπή) είναι στον ζυγό 43 και όχι στον ζυγό 1, όπως προκύπτει από την ιεράρχηση των ζυγών για την ελάχιστη αποκοπή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις των ΣΑΤΥΦ που λαμβάνονται υπόψη για την σήμανση συναγερμού αστάθειας. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από τα δεδομένα των ΣΑΤΥΦ που περιλαμβάνονται στον Πίν. 2.15 της τεχνικής έκθεσης [Van15] αλλά και στον Πίν. Γ.5 του Παραρτήματος Γ, το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει τον ζυγό 43 έχει διαδοχική χρονική καθυστέρηση $T_2 = 9$ s, ενώ το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1 έχει διαδοχική χρονική καθυστέρηση $T_2 = 12$ s.

Επομένως, όπως φαίνεται και στον Πίν. 5.4, που περιλαμβάνει την αλληλουχία γεγονότων χωρίς εφαρμογή προστασίας, είναι απολύτως φυσιολογικό να ανιχνεύεται η αστάθεια πρώτα στον ζυγό 43 και τα επόμενα 2 s στον ζυγό 1. Το γεγονός της ανίχνευσης της αστάθειας πρώτα στον ζυγό 43 έχει σαν αποτέλεσμα να εφαρμοστεί η πρώτη αποκοπή σε αυτόν τον ζυγό αντί του ζυγού 1, που θα έπρεπε να γίνει βάσει της ιεράρχησης για ελάχιστη αποκοπή. Από εκεί και πέρα η αλληλουχία προφανώς και θα αλλάξει αφού σε αντίθεση με την ελάχιστη αποκοπή, όπου όλες οι αποκοπές φορτίου εφαρμόζονται ταυτόχρονα, στο ΣΠ1.3 οι σχετικές αποκοπές λαμβάνουν χώρα όταν σημειωθεί ο σχετικός συναγερμός αστάθειας.

5.2.4.3 Επίδραση ποσοστού αποκοπής

Η επίδραση του ποσοστού αποκοπής ανά εφαρμογή του συστήματος προστασίας ΣΠ1.3 στο συνολικό φορτίο αποκοπής φαίνεται στο Σχ. 5.22.

Με δεδομένο ότι έχει επιλεγεί άνω όριο 3 εφαρμογών αποκοπής ανά ζυγό, το ελάχιστο ποσοστό αποκοπής φορτίου για το οποίο αποκαθίσταται η ευστάθεια είναι 2%. Για αυτό το ποσοστό το σύστημα

Πίνακας 5.9: Ακολουθία ενεργοποίησης ΣΠ1.3 για διάφορα ποσοστά αποκοπής φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας Α), σε προσομοίωση WPSTAB

Ποσοστό αποκοπής (%)	Ακολουθία ενεργοποίησης ΣΠ1.3 σε ζυγούς MT
2	43,1,4,46,42,42,3,5,43,1,3,2,1,5,51,3,4,2,5,46,2
3	43,1,4,46,1,4,46,42,3,3,2,51,43,2
4	43,1,4,46,4,5,1,2,43,5,51
5	43,1,4,46,1,46,1,2,43
6	43,1,4,46,1
7	43,1,46,1,3,51
8–12	43,1,46
13–15	43,1

Στους ζυγούς με έντονη γραμματοσειρά οι συναγερμοί LIVES εκδίδονται τις χρονικές στιγμές που φαίνονται στον Πίν. 5.4. Οι αντίστοιχες αποκοπές εφαρμόζονται 1 s αργότερα

ΣΠ1.3 ενεργοποιείται τις περισσότερες φορές σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, ενώ υπάρχουν και αρκετές επαναληπτικές εφαρμογές σε ζυγούς που έχει γίνει ήδη αποκοπή, όπως φαίνεται από τον Πίν. 5.9. Ο συγκεκριμένος πίνακας περιλαμβάνει στην πρώτη στήλη το ποσοστό εφαρμοζόμενης άμεσης αποκοπής φορτίου ανά ενεργοποίηση του συστήματος ΣΠ1.3 και στη δεύτερη στήλη την αλληλουχία των ζυγών στους οποίους ενεργοποιείται.

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχ. 5.22 και τον Πίν. 5.9, για ποσοστά αποκοπής 2–7%, με εξαίρεση τις τέσσερις (4) πρώτες ενεργοποιήσεις του ΣΠ1.3, που γίνονται στον ίδιο χρόνο και στους ίδιους ζυγούς, οι υπόλοιπες ενεργοποιήσεις είναι ετεροχρονισμένες και σε διαφορετικούς ζυγούς ή/και με επαναληπτικές εφαρμογές, οδηγώντας σε συνολικά ποσά αποκοπής τα οποία δεν μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με το επιλεγμένο ποσοστό αποκοπής. Να σημειωθεί εδώ ότι για ποσοστό αποκοπής 7%, η εφαρμοζόμενη αποκοπή είναι αρκετή για να αποτρέψει τον συναγερμό (και ως εκ τούτου και την συνακόλουθη αποκοπή) στον ζυγό 4, η οποία στις προηγούμενες περιπτώσεις γινόταν την ίδια χρονική στιγμή με την αποκοπή στο ζυγό 46. Ωστόσο καθώς δεν έχει αποκατασταθεί η ευστάθεια απαιτούνται επιπλέον αποκοπές αργότερα.

Αντίθετα για αποκοπές φορτίου 8–12% το ΣΠ1.3 ενεργοποιείται ακριβώς τις ίδιες στιγμές και στους ίδιους ζυγούς (43,1 και 46), όπως φαίνεται και στον Πίν. 5.7. Για αυτό το λόγο το συνολικό φορτίο αποκοπής αυξάνει μονότονα με την αύξηση του ποσοστού αποκοπής που εφαρμόζεται. Για αποκοπές φορτίου 13% και πάνω δεν ενεργοποιείται πλέον το ΣΠ1.3 στον ζυγό 46, καθώς αρκεί η αποκοπή φορτίου στους ζυγούς 43 και 1 για την αποκατάσταση της ευστάθειας. Για αυτό το λόγο η συνολική αποκοπή φορτίου με 13% είναι μικρότερη σε σχέση με 12%. Από 13% και πάνω, καθώς πάλι παραμένουν σταθεροί οι συναγερμοί και οι ακόλουθες αποκοπές φορτίου, η σχέση του ποσοστού αποκοπής με το συνολικό φορτίο αποκοπής ξαναγίνεται γραμμική.

Το ελάχιστο συνολικό ποσό αποκοπής επιτυγχάνεται για ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή 8%, που είναι και το ποσοστό που επιλέχθηκε και στην Παρ. 5.2.4.1.

5.2.4.4 Επίδραση ευαισθησίας φορτίου

Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζεται η επίδραση της ευαισθησίας του φορτίου ως προς την τάση στην ικανότητα της μεθόδου LIVES να ανιχνεύσει την αστάθεια και, μέσω της εφαρμογής άμεσης αποκοπής

Πίνακας 5.10: Επίδραση εκθέτων φορτίου στην λειτουργία του ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), σε προσομοίωση WPSTAB

Εκθέτες		Κατάρρευση χωρίς προστασία (s)	1 ^{ος} Συναγερμός (s)	Αποκοπή Φορτίου	
α	β			ΔP (MW)	ΔQ (MVA _r)
0.5	1.0	144	103	271.45	72.63
0.5	2.0	149	115	225.86	64.44
1.0	1.5	197	125	176.02	49.17
1.0	2.0	202	125	176.02	49.18
1.0	2.5	209	125	243.24	69.36

Η έντονη γραμματοσειρά αντιστοιχεί στο αρχικό σενάριο φόρτισης

φορτίου του ΣΠ1.3, να προστατεύσει αποτελεσματικά το σύστημα.

Για το σκοπό αυτό, σε πρώτη φάση, όλοι οι εκθέτες των φορτίων μεταβάλλονται για ολόκληρο το σύστημα. Στον Πίν. 5.10 φαίνονται τα αποτελέσματα για διαφορετικούς εκθέτες για το ενεργό και άεργο φορτίο, σε όρους χρόνου κατάρρευσης (χωρίς εφαρμογή προστασίας), χρόνου πρώτης σήμανσης συναγερμού αστάθειας και συνολικής αποκοπής φορτίου, με εφαρμογή του ΣΠ1.3.

Η αποκοπή φορτίου πάντα υπολογίζεται επί του φορτίου στην ονομαστική τάση που φαίνεται στον Πίν. Γ.6 του Παραρτήματος Γ, ενώ οι παράμετροι του συστήματος προστασίας παραμένουν ίδιες με αυτές της Παρ. 5.2.4.1. Δηλαδή άμεση αποκοπή 8% ανά συναγερμό με χρόνο εφαρμογής 1 s μετά την έκδοση του και συνολικά μέχρι τρεις αποκοπές ανά ζυγό.

Καθώς ο εκθέτης του φορτίου μειώνεται και το φορτίο γίνεται πιο *ανελαστικό* (τείνοντας προς μοντέλο σταθερής ισχύος), η κατάρρευση του συστήματος επιταχύνεται, όπως φαίνεται από το χρόνο κατάρρευσης χωρίς εφαρμογή προστασίας στον Πίν. 5.10. Από τον ίδιο πίνακα είναι εμφανές πως η ανελαστικότητα του ενεργού μέρους του φορτίου έχει πιο σημαντική επίδραση από αυτήν του άεργου. Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις οι συναγερμοί LIVES σημαίνουν αρκετά νωρίτερα από την κατάρρευση και το σύστημα είναι εφικτό να σταθεροποιηθεί με την εφαρμογή ίδιας περίπου έκτασης αποκοπής φορτίου, όπως και με το αρχικό σενάριο φόρτισης, που φαίνεται στον Πίν. 5.10 με έντονη γραμματοσειρά.

Μια δεύτερη δοκιμή εξετάζει την επίδραση των ευαισθησιών του φορτίου στην Κεντρική περιοχή του συστήματος όταν αυτές μεταβάλλονται στατιστικά, με διαφορετικές τιμές εκθέτη για κάθε φορτίο της Κεντρικής περιοχής (τα υπόλοιπα φορτία παραμένουν με εκθέτη $\alpha = 1$ για το ενεργό κομμάτι και $\beta = 2$ για το άεργο). Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται δέκα (10) διαφορετικά σύνολα από ψευδοτυχαίους εκθέτες για τους 11 ζυγούς φορτίου της κεντρικής περιοχής του συστήματος (βλ. Σχ. 5.8). Τα σύνολα αυτά δημιουργήθηκαν βάσει μιας ομοιόμορφης κατανομής στην περιοχή 0.5–1.5 για την ενεργό ισχύ και 1.5–2.5 για την άεργο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίν. 5.11, ο οποίος περιλαμβάνει το χρόνο κατάρρευσης αν δεν εφαρμοστεί προστασία, το χρόνο και ζυγό εμφάνισης του πρώτου συναγερμού LIVES και το συνολικό φορτίο αποκοπής για 8% αποκοπή ανά συναγερμό. Οι εκθέτες που χρησιμοποιήθηκαν ανά περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίν. Γ.7 του Παραρτήματος Γ.

Όπως φαίνεται στον Πίν. 5.11, η ποικιλία των ευαισθησιών των φορτίων ως προς την τάση μεταβάλλει αρκετά τον χρόνο κατάρρευσης, αλλά οι συναγερμοί LIVES σημαίνονται πάντα έγκαιρα και είναι ικανοί να προστατεύσουν ικανοποιητικά το σύστημα με την υιοθέτηση του ΣΠ1.3. Αν και η ακολουθία των ζυγών στους οποίους σημαίνονται συναγερμοί αλλάζει, καθώς εξαρτάται από τον τύπο εκθέτη του κάθε φορτίου, ο χρόνος ανίχνευσης της αστάθειας είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιπτώσεις (σενάρια 1–10). Το συνολικό φορτίο αποκοπής αλλάζει προφανώς, καθώς εξαρτάται από την αλληλουχία των συναγερμών (κάθε ζυγός έχει διαφορετικό φορτίο που μπορεί να αποκοπεί) και επίσης από την ευαισθησία

Πίνακας 5.11: Επίδραση σεναρίων διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΠ1.3 με 8% αποκοπή φορτίου, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), σε προσομοίωση WPSTAB

Σενάριο	Κατάρρευση χωρίς προστασία (s)	1 ^{ος} Συναγερμός		Αποκοπή Φορτίου	
		(s)	Ζυγός	ΔP (MW)	ΔQ (MVar)
1	182.0	124	3	196.85	55.93
2	204.0	125	43	243.32	69.36
3	230.0	125	43	355.97	99.34
4	202.0	125	43	243.26	69.36
5	191.0	125	43	175.99	49.18
6	202.0	125	43	176.04	49.18
7	202.0	125	43	176.02	49.16
8	200.0	125	43	243.27	63.37
9	202.0	125	43	175.94	49.20
10	180.0	124	3	196.92	55.89
Μέση Τιμή:	199.5			218.36	60.00

Οι εκθέτες των σεναρίων βρίσκονται στον Πίν. Γ.7

του εναπομείναντος φορτίου ως προς την τάση.

Συνολικά, η διαφοροποίηση των εκθετών φορτίου (με τη μέση τιμή να παραμένει ίδια με αυτήν του βασικού σεναρίου) φαίνεται να φέρνει την κατάρρευση πιο νωρίς, με αντίστοιχο αυξημένο κόστος αποκοπής για να σωθεί το σύστημα.

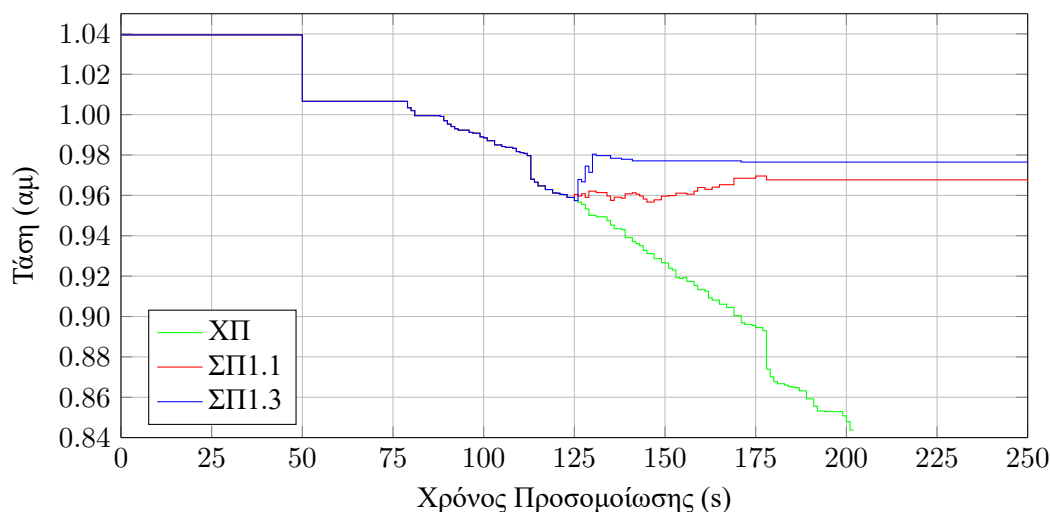
5.2.5 Σύγκριση συστημάτων προστασίας ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3

Στην παρούσα υποενότητα γίνεται σύγκριση των δύο συστημάτων προστασίας από αστάθεια τάσης που εφαρμόστηκαν στο Nordic Test System, δηλαδή του ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3, με τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν στις Παρ. 5.2.3.1 και 5.2.4.1 αντίστοιχα.

Συγκρίνοντας την συνολική άμεση αποκοπή φορτίου του ΣΠ1.3, που φαίνεται στον Πίν. 5.7, με την συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου του ΣΠ1.1, που φαίνεται στον Πίν. 5.5, προκύπτει ότι η αποκοπή που επιφέρει το ΣΠ1.3 είναι ελαφρώς μικρότερη από την αντίστοιχη που επιβάλλει το υποσύστημα LR του ΣΠ1.1, μέσω της μείωσης της τάσης αναφοράς της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ. Στην πράξη, με το σύστημα της άμεσης αποκοπής φορτίου, απαιτείται ενεργοποίηση του σε μόνο τρεις ζυγούς για να αποκατασταθεί η ευστάθεια του συστήματος, με μια συνολική αποκοπή της τάξης των 176 MW, ενώ αντίθετα το υποσύστημα LR πρέπει να ενεργοποιηθεί σε τέσσερις ζυγούς, επιβάλλοντας μια έμμεση αποκοπή της τάξης των 186 MW.

Στο Σχ. 5.23 φαίνεται η σύγκριση των δύο συστημάτων προστασίας στην απόκριση της τάσης του ζυγού YYT 4044, μαζί με την περίπτωση όπου δεν εφαρμόζεται καμία προστασία (ΧΠ). Τόσο στην περίπτωση του ΣΠ1.1 όσο και στην περίπτωση του ΣΠ1.3 το σύστημα σταθεροποιείται και έρχεται σε μόνιμη κατάσταση περίπου 125 s μετά τη διαταραχή, ενώ η τάση στους ζυγούς YYT δεν πέφτει κάτω από το 95% της ονομαστικής της τιμής. Προφανώς, με την άμεση αποκοπή φορτίου η τάση αποκαθίσταται πιο γρήγορα και σε πιο υψηλά επίπεδα, καθώς γυρνάει περίπου στο 98% της ονομαστικής της τιμής σε μόνιμη κατάσταση, ενώ στη έμμεση αποκοπή επιστρέφει γύρω στο 96%.

Μια άλλη σύγκριση των δύο συστημάτων προστασίας φαίνεται στο Σχ. 5.24, το οποίο δείχνει την συνολική ενεργό κατανάλωση του συστήματος (P , σε MW) για τις τρεις περιπτώσεις, ήτοι χωρίς προ-



Σχήμα 5.23: Σύγκριση απόκρισης τάσης ζυγού ΥΥΤ 4044, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) χωρίς εφαρμογή προστασίας (ΧΠ) και με εφαρμογή ΣΠ1.1 και ΣΠ1.3, σε προσομοίωση WPSTAB

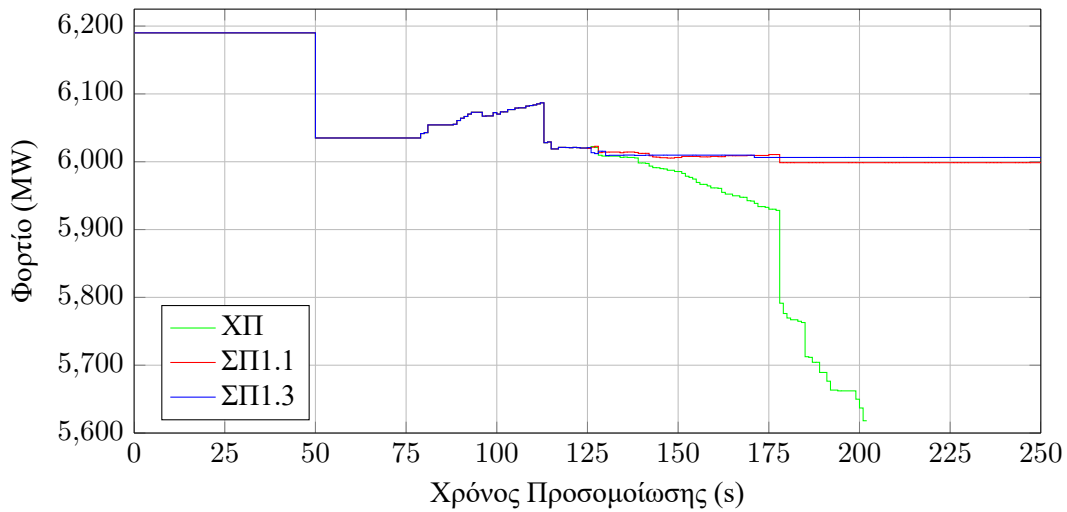
στασία (ΧΠ), εφαρμογή του ΣΠ1.1 και εφαρμογή του ΣΠ1.3. Η αρχική κατανάλωση ισχύος, πριν τη διαταραχή τη χρονική στιγμή $t = 50$ s, ανέρχεται σε 6190.0 MW. Με την αποκατάσταση της ευστάθειας, στην περίπτωση του ΣΠ1.1 η καταναλισκόμενη ισχύς ανέρχεται σε 5998.6 MW και στην περίπτωση του ΣΠ1.3 σε 6006.3 MW. Στην πράξη, η κατανάλωση και στις δύο περιπτώσεις αποκαθίσταται σχεδόν στο ίδιο επίπεδο, αλλά στην περίπτωση του ΣΠ1.3 υπάρχουν καταναλωτές που έχουν αποσυνδεθεί πλήρως ενώ στην περίπτωση του ΣΠ1.1, όλοι οι καταναλωτές υφίστανται μια πτώση τάσης.

Από τους Πίν. 5.7 και 5.5 καθώς και τα Σχ. 5.23 και 5.24, είναι εμφανές ότι ο συνδυασμός της LA με άμεση αποκοπή φορτίου είναι ελάχιστα πιο αποτελεσματικός για προστασία από μια επικείμενη κατάρρευση τάσης. Οι λόγοι για αυτό είναι οι ακόλουθοι:

1. Η εντολή για άμεση αποκοπή φορτίου από το ΣΠ1.3 εκτελείται αμέσως (μόλις 1 s μετά την ανίχνευση της αστάθειας από το υποσύστημα LA), ενώ στο αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ΣΠ1.1 η αποκατάσταση ευστάθειας μέσω του υποσυστήματος LR είναι πιο αργή, λόγω της χρονικής καθυστέρησης μεταξύ των διαδοχικών (αντίστροφων) κινήσεων του ΣΑΤΥΦ. Ως γνωστόν, η καθυστέρηση στην αντίδραση έχει σαν συνέπεια την περαιτέρω επιδείνωση του συστήματος και ως εκ τούτου χρειάζονται περισσότερα διορθωτικά μέτρα για την αποκατάσταση της ευστάθειας.
2. Η άμεση αποκοπή φορτίου μειώνει ταυτόχρονα και την αγωγιμότητα του φορτίου και την ζήτηση του, ενώ η έμμεση αποκοπή φορτίου, που επιτυγχάνεται με την μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΥΦ, μειώνει μόνο τη ζήτηση του φορτίου (ανάλογα με την εξάρτηση του από την τάση), ενώ η αγωγιμότητα του παραμένει αναλλοίωτη.

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της άμεσης αποκοπής φορτίου είναι ότι προσφέρει μόνιμα αποτελέσματα, ενώ η έμμεση αποκοπή φορτίου μέσω της μείωσης της τάσης μπορεί να αποκατασταθεί μακροπρόθεσμα, μέσω της δράσης άλλων ρυθμιστών στα κατάντη του μετασχηματιστή, π.χ. μέσω ρυθμιστών τάσης διανομής ή κάποιο άλλο μηχανισμό δυναμικής αποκατάστασης των φορτίων (βλ. Εν. 5.1).

Από την άλλη πλευρά, η άμεση αποκοπή φορτίου έχει τα δικά της μειονεκτήματα, με πιο σημαντικό ότι κάποιο ποσοστό των χρηστών του δικτύου θα αποσυνδεθούν εντελώς (πλήρης διακοπή), ενώ με την



Σχήμα 5.24: Σύγκριση κατανάλωσης ισχύος Κεντρικής περιοχής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας Α), χωρίς εφαρμογή προστασίας (ΧΠ) και με εφαρμογή ΣΠ1.1, ΣΠ1.3, σε προσομοίωση WPSTAB

έμμεση αποκοπή φορτίου λόγω χαμηλότερων τάσεων αναφοράς, όλοι οι χρήστες υφίστανται επιδείνωση όσον αφορά την ποιότητα ισχύος (βύθιση τάσης), με τις συσκευές τους συνδεδεμένες στο δίκτυο (αν και εν μέρει υπολειπόμενες).

Καθώς και οι δύο προσεγγίσεις έχουν υπέρ και κατά, η απόφαση για το ποια είναι η καλύτερη στρατηγική προστασίας επαφίεται στην επιλογή του διαχειριστή του συστήματος.

5.3 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα του 2010

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται μία κρίσιμη διαταραχή (contingency) από το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα του θέρους του 2010, χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από την εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσεως σε πραγματικό χρόνο “on-line VSA” [CKV05, CKV06], η οποία έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος OMASES [BCF03] και είναι εγκατεστημένη στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) του ΑΔΜΗΕ στον Άγιο Στέφανο, σε συνεχή εμπορική λειτουργία από το 2005 [VMK03, VKC05]. Η κρίσιμη διαταραχή που θα εξεταστεί έχει πολύ μικρά περιθώρια ασφαλείας και δυνητικά μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση αστάθειας τάσης, επηρεάζοντας ιδιαίτερα την περιοχή της Πελοποννήσου.

Μελετάται επίσης η επίδραση της αυτόματης ζεύξης συστοιχιών πυκνωτών στη μέγιστη δυνατότητα φόρτισης, τόσο συνολικά του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος, όσο και ειδικότερα στην Πελοπόννησο. Συγκεκριμένα, μελετάται η επίδραση που θα είχε σε περιπτώσεις χαμηλών τάσεων η αυτόματη ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών που έχουν εγκατασταθεί στα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου, καθώς επίσης και η αντίστοιχη χρήση αντιστάθμισης που θα μπορούσε να εγκατασταθεί στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Αποτελέσματα από αυτές τις εφαρμογές έχουν ανακοινωθεί σε διεθνή συνέδρια [LVC13, VLA15, VLN16], ενώ η έρευνα πάνω στη σωστή μοντελοποίηση των αιολικών πάρκων και τη συνεισφορά στατών διατάξεων από ηλεκτρονικά ισχύος συνεχίζεται [VS16].

5.3.1 Περιγραφή στιγμιοτύπου και διαταραχής

Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ΕΔΣ) περιλαμβάνει τα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς (400 kV και 150 kV) της ηπειρωτικής Ελλάδος και μερικών διασυνδεδεμένων νησιών. Τα βασικά κέντρα παραγωγής βρίσκονται εγκατεστημένα στα Βορειοδυτικά της χώρας, όπου εντοπίζονται και τα μεγαλύτερα κοιτάσματα λιγνίτη, ενώ το κέντρο κατανάλωσης εντοπίζεται στη μητροπολιτική περιοχή της Αθήνας. Αυτή η γεωγραφική αναντιστοιχία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες ισχύος να μεταφέρονται από βορρά προς νότο πάνω σε μεγάλες αποστάσεις.

Οι ενισχύσεις του συστήματος μεταφοράς, οι οποίες ολοκληρώθηκαν μετά τη διακοπή του 2004, έχουν αυξήσει σημαντικά το όριο φόρτισης του δικτύου [CKV05]. Επιπλέον η κατασκευή νέων μονάδων παραγωγής σε συνδυασμό με την πτώση της κατανάλωσης, λόγω οικονομικής κρίσης τα τελευταία έξι χρόνια, έχουν σαν αποτέλεσμα τη επαρκή αύξηση των περιθωρίων ασφαλείας του συστήματος συνολικά ως προς την ευστάθεια τάσης.

Παρόλα αυτά, η περιοχή της Πελοποννήσου παραμένει η πιο ανασφαλής περιοχή του ΕΔΣ, ως προς την ευστάθεια τάσης, κυρίως λόγω της σχετικά πιο αδύναμης σύνδεσης της με το υπόλοιπο σύστημα στα 150 kV. Πιο συγκεκριμένα, η Πελοπόννησος συνδέεται με την περιοχή της Αθήνας με πέντε (5) γραμμές ΥΤ 150 kV και με τη δυτική Ελλάδα μέσω ενός ζεύγους υποβρύχιων καλωδίων 150 kV. Προς το παρόν δεν υπάρχουν γραμμές μεταφοράς των 400 kV, αν και υπάρχει πρόβλεψη για την κατασκευή γραμμών διπλού κυκλώματος 400 kV [ΑΔΜ16], ιδιαίτερα μετά την κατασκευή της Μονάδας V, στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης.

Την 15^η Ιουνίου 2010, η εφαρμογή “on-line VSA”, έδειξε μια κρίσιμη διαταραχή με πολύ μικρά περιθώρια ασφαλείας, για το στιγμιότυπο των 13:30. Η συγκεκριμένη διαταραχή αφορούσε την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη III. Το αρχικό φορτίο του συστήματος ήταν περίπου 9400 MW και οι μόνες μονάδες που βρισκότουσαν εν λειτουργία στην Πελοπόννησο ήταν οι μονάδες I και III της Μεγαλόπολης.

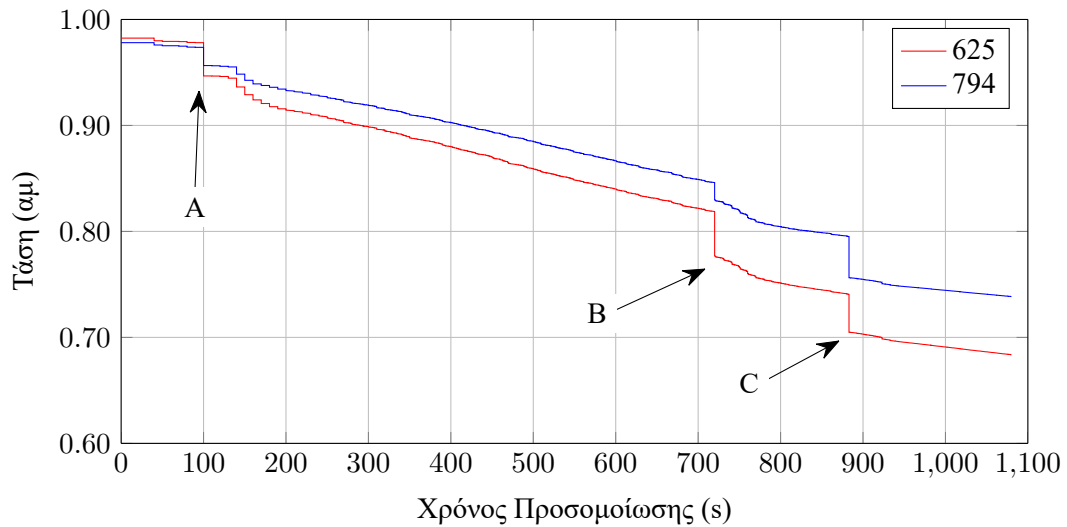
Η προσομοίωση της διαταραχής έγινε χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πακέτο WPSTAB, που έχει αναπτυχθεί στο ΕΜΠ [Βου99], και χρησιμοποιείται από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) σαν κομμάτι της εφαρμογής “on-line VSA” [VKC05].

Η προσομοίωση της συγκεκριμένης διαταραχής γίνεται για την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη III τη χρονική στιγμή $t = 100$ s, την οποία ακολουθεί μια ομοιόμορφη αύξηση των φορτίων του συστήματος με ρυθμό 0.0185% ανά δευτερόλεπτο. Στη συνέχεια περιγράφονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Μετά την απώλεια της μονάδας, όλα τα ΣΑΤΥΦ της περιοχής της Πελοποννήσου αρχίζουν να δρουν, σε μια προσπάθεια να επαναφέρουν τις ελεγχόμενες τάσεις εντός νεκρής ζώνης. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η μονάδα Μεγαλόπολη III έχει αναλάβει, στο συγκεκριμένο στιγμιότυπο, περισσότερο από το 50% της παραγωγής της Πελοποννήσου, η απώλεια της οδηγεί σε άμεση πτώση των τάσεων, όχι μόνο στην συγκεκριμένη περιοχή αλλά επίσης σε όλο το σύστημα και ειδικότερα στην περιοχή της Αθήνας.

Αυτό είναι εμφανές στο Σχ. 5.25, το οποίο απεικονίζει την εξέλιξη των τάσεων χωρίς διορθωτικά μέτρα σε δύο κρίσιμους ζυγούς 150 kV του νότιου τμήματος του ΕΔΣ, τον ζυγό 794 (GROUF_31) στον υποσταθμό του Ρουφ, στην Αθήνα και τον ζυγό 625 (GMETHA31) στα Μέθανα, στην Πελοπόννησο. Η ξαφνική πτώση των τάσεων τη χρονική στιγμή $t = 100$ s (σημείο Α, στο Σχ. 5.25) αντιστοιχεί στην απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη III.

Καθώς η ζήτηση του φορτίου αυξάνει, τα προφίλ των τάσεων αρχίζουν να πέφτουν ακόμα περισσότερο, οδηγώντας τις περισσότερες από τις μονάδες του Νότιου συστήματος να υπερδιεγερθούν και τελικά να μεταβούν σε λειτουργία προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ). Τη χρονική στιγμή $t = 720$ s (σημείο Β στο Σχ. 5.25), η μονάδα Μεγαλόπολη I τίθεται εκτός λειτουργίας λόγω υπότασης (UV trip), οδηγώντας σε μεγαλύτερη επιδείνωση των τάσεων και συνακόλουθη απώλεια της μίας μονάδας στον ΑΗΣ Αγίου Γεωργίου, στην Αθήνα, την χρονική στιγμή $t = 883$ s (σημείο C στο Σχ. 5.25), γεγονός



Σχήμα 5.25: Απόκριση τάσεων κρίσιμων ζυγών 794 (GROUF_31) στο Ρουφ και 625 (GMETHA31) στα Μέθανα, ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ, χωρίς προστασία. Α: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη ΙΙΙ (διαταραχή), Β: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη Ι, C: απώλεια μονάδας Αγ. Γεώργιος 9

το οποίο οδηγεί στην τελική κατάρρευση του συστήματος 200 s περίπου αργότερα, τη χρονική στιγμή $t = 1080$ s της προσομοίωσης.

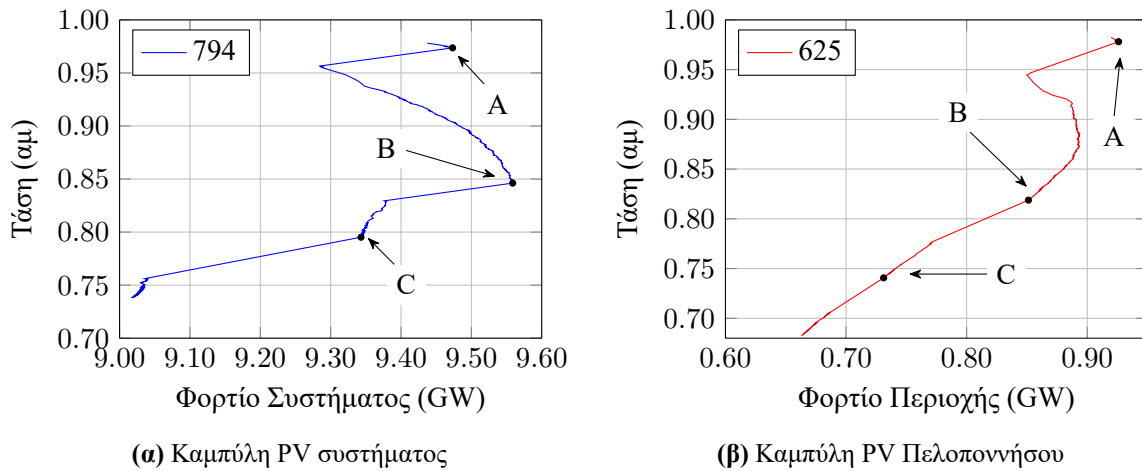
Τα Σχ. 5.26α και 5.26β περιλαμβάνουν τις καμπύλες PV όλου του συστήματος και της περιοχής της Πελοποννήσου αντίστοιχα για τη διαταραχή χωρίς μέτρα προστασίας. Αυτά τα σχήματα δείχνουν την απόκριση της τάσης ενός αντιπροσωπευτικού ζυγού του συστήματος σαν συνάρτηση του αντίστοιχου συνολικού φορτίου της περιοχής ή του συστήματος. Είναι εμφανές ότι το περιθώριο ασφαλείας είναι πολύ μικρό. Ειδικότερα, μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη ΙΙΙ και πριν την απώλεια της Μεγαλόπολης Ι (που ουσιαστικά οδηγεί στην κατάρρευση), το περιθώριο ασφαλείας για το συνολικό φορτίο είναι περίπου 280 MW.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι η αυτή η περίπτωση αστάθειας τάσης οφείλεται σε απώλειες γεννητριών λόγω υπότασης. Αυτό είναι εμφανές στο Σχ. 5.26α όπου μέχρι την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη Ι (σημείο Β) και με το φορτίο περίπου στα 9580 MW), το σύστημα λειτουργούσε στο άνω μέρος της καμπύλης PV, που αποτελεί το ευσταθές τμήμα της εν λόγω καμπύλης. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο για την περιοχή της Πελοποννήσου, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.26β.

Η κοινή βάση ισχύος για όλα τα μεγέθη που παρουσιάζονται σε ανά μονάδα τιμές είναι τα 100 MW.

5.3.2 Αύξηση ικανότητας μεταφοράς με χρήση άεργης αντιστάθμισης

Με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της στατής αντιστάθμισης στα περιθώρια φόρτισης του ΕΔΣ, αλλά και της περιοχής της Πελοποννήσου, το προαναφερθέν σενάριο προσομοιώνεται ξανά με δύο διαφορετικές στρατηγικές αέργου αντιστάθμισης. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται οι πυκνωτές που είναι ήδη εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς ζεύξης MT/YT των αιολικών πάρκων της Πελοποννήσου, οι οποίοι ενεργοποιούνται αυτόματα με την ανίχνευση υπότασης στην πλευρά YT των υποσταθμών ζεύξης, ενώ στη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται η επίδραση συγκεντρωμένης αντιστάθμισης στον υποσταθμό ανύψωσης του ΑΗΣ της Μεγαλόπολης.



Σχήμα 5.26: Καμπύλες PV, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III, χωρίς προστασία. A: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη III (διαταραχή), B: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη I, C: απώλεια μονάδας Αγ. Γεώργιος 9

Πίνακας 5.12: Αρχικά δεδομένα ζυγών YT αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15^{ης} Ιουνίου 2010

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός YT	V_1 (αμ)	P_1 (MW)	Q_1 (MVA _r)
Παναχαϊκό	599 (GPANAH91)	0.9881	-0.42	-1.46
Ελίκη	603 (GELIKI91)	0.9722	-2.08	-0.91
Δόριζα I	610 (GDORI191)	1.0181	-13.22	-0.38
Δόριζα I	611 (GDORI192)	1.0178	-5.67	-0.56
Δόριζα II	612 (GDORI291)	1.0176	-4.62	-0.12
Αγλαδόκαμπος	620 (GAHLAD91)	1.0017	-0.16	1.05
Δίδυμα	621 (GDIDYM91)	0.9808	-1.76	-1.44
Ζάρακας	665 (GZARAK91)	0.9972	-3.07	0.42

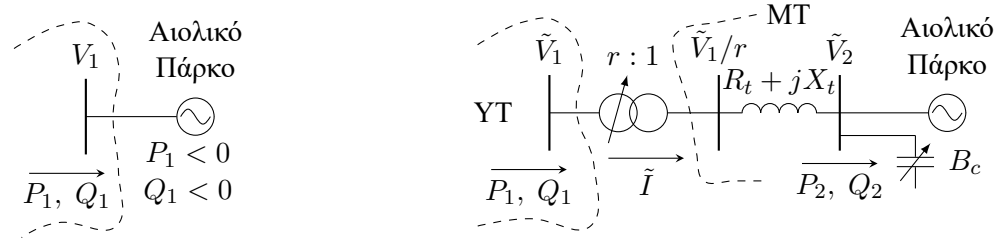
5.3.2.1 Διασπαρμένη αντιστάθμιση στα αιολικά πάρκα

Τα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου, που ήταν σε λειτουργία το θέρος του 2010, φαίνονται στον Πίν. 5.12 μαζί με τους αντίστοιχους ζυγούς των 150 kV στους οποίους συνδέονται, ενώ όλα είναι εξοπλισμένα με συστοιχίες πυκνωτών. Συγκεκριμένα κάθε υποσταθμός διαθέτει τρεις (3) συστοιχίες πυκνωτών των 4 MVA_r έκαστη, οι οποίες συνδέονται στην πλευρά της ΜΤ του υποσταθμού.

Δεδομένου ότι στο WPSTAB καθένα από τα αιολικά πάρκα παριστάνεται σαν ζυγός YT με αρνητικό φορτίο (βλ. Σχ. 5.27α), προκειμένου να εισαχθεί το μοντέλο των συστοιχιών πυκνωτών στους αντίστοιχους ζυγούς ΜΤ των Υ/Σ, έγιναν κάποιες υποθέσεις και παραδοχές.

Συγκεκριμένα θεωρήθηκε ότι καθένα από τα προαναφερθέντα αιολικά πάρκα συνδέεται μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης ΜΤ/YT, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.27β. Χρησιμοποιήθηκε ένα τυπικό μοντέλο μετασχηματιστή 50 MVA, 150/20 kV, εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ, το οποίο ελέγχει την πλευρά της ΜΤ, έχει χρονική καθυστέρηση $30 + 10 s^{xxiv}$ και ωμική και επαγωγική αντίσταση $R_t = 0.01420$ αμ και

^{xxiv} Στη μοντελοποίηση του WPSTAB αυτή η αναπαράσταση σημαίνει ότι το συγκεκριμένο ΣΑΤΥΦ έχει αρχική χρονική καθυστέρηση 40 s και διαδοχική χρονική καθυστέρηση 10 s



(α) Μοντέλο σύνδεσης αιολικών πάρκων στην YT (β) Μοντέλο σύνδεσης αιολικών πάρκων στην MT

Σχήμα 5.27: Μοντέλα παράστασης αιολικών πάρκων στο πρόγραμμα WPSTAB

Πίνακας 5.13: Δεδομένα πλευράς MT αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15^{ης} Ιουνίου 2010

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός MT	V_2 (αμ)	P_2 (MW)	Q_2 (MVar)
Παναχαϊκό	5599 (AIOL599)	0.9941	-0.42	-1.47
Ελίκη	5603 (AIOL603)	0.9763	-0.02	-0.93
Δόριζα I	5610 (AIOL610)	1.0229	-13.24	-1.06
Δόριζα I	5611 (AIOL611)	1.0166	-5.67	0.43
Δόριζα II	5612 (AIOL612)	1.0189	-0.05	-0.20
Αχλαδόκαμπος	5620 (AIOL620)	0.9975	-0.16	1.05
Δίδυμα	5621 (AIOL621)	0.9870	-1.76	-1.46
Ζάρακας	5665 (AIOL665)	0.9960	-3.07	0.38

$X_t = 0.40560$ αμ αντίστοιχα. Η μόνη διαφοροποίηση σε κάθε περίπτωση είναι η τάση αναφοράς της αντίστοιχης νεκρής ζώνης, η οποία έχει επιλεγεί ούτως ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι η ελεγχόμενη τάση είναι αρχικά εντός νεκρής ζώνης.

Προκειμένου να μείνουν τα αρχικά σημεία λειτουργίας ίδια με αυτά που υπήρχαν πριν την προσθήκη των μετασηματιστών, οι τάσεις και οι εγχύσεις ισχύος στους νέους ζυγούς (οι οποίες στο Σχ. 5.27β φαίνονται με το δείκτη 2) είναι τέτοιες ώστε τα αντίστοιχα μεγέθη στους ζυγούς YT (με δείκτη 1 στο Σχ. 5.27β) να είναι τα αρχικά, που φαίνονται στις τρεις τελευταίες στήλες του Πίν. 5.12, οι οποίες περιλαμβάνουν τις αρχικές τιμές τάσεων και παραγωγών κάθε αιολικού πάρκου στην YT.

Με αυτές τις παραδοχές, η τάση και η έγχυση ισχύος στους ζυγούς MT υπολογίζεται βάσει των ακόλουθων σχέσεων:

$$\tilde{I} = \frac{P_1 - jQ_1}{V_{1i}} \quad (5.11)$$

$$\tilde{V}_2 = \tilde{V}_1 - \tilde{I} \cdot (R_t + jX_t) \quad (5.12)$$

$$P_2 = \text{Re}\{\tilde{V}_2 \tilde{I}^*\} \quad (5.13)$$

$$Q_2 = \text{Im}\{\tilde{V}_2 \tilde{I}^*\} \quad (5.14)$$

όπου \tilde{V}_1 η τάση του ζυγού YT (θεωρείται $\tilde{V}_1 = V_1 \angle 0^\circ$), \tilde{V}_2 η τάση στο ζυγό MT και P_2 & Q_2 η ενεργός και άεργος αντίστοιχα ισχύς επίσης στο ζυγό MT, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.27β.

Οι προκύπτουσες, αρχικές τιμές των τάσεων στους ζυγούς MT (κατά μέτρο), όπως και η ενεργός και άεργος ισχύς φαίνονται στον Πίν. 5.13. Από αυτές προσδιορίζονται τα όρια της νεκρής ζώνης για το ΣΑΤΥΦ του κάθε μετασηματιστή, καθώς, όπως έχει αναφερθεί, θεωρείται ότι η ελεγχόμενη τάση

Πίνακας 5.14: Στοιχεία μετασχηματιστών ανύψωσης των αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, ΕΔΣ 15^{ης} Ιουνίου 2010

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός ΥΤ	r_{\max} (αμ)	r_{\min} (αμ)	V_{\max} (αμ)	V_{\min} (αμ)	Δr (αμ)
Παναχαϊκό	599	1.075	0.875	1.090	0.979	0.0125
Ελίκη	603	1.075	0.875	1.002	0.972	0.0125
Δόριζα I	610	1.075	0.875	0.991	0.961	0.0125
Δόριζα I	611	1.075	0.875	1.038	1.008	0.0125
Δόριζα II	612	1.075	0.875	1.032	1.002	0.0125
Αχλαδόκαμπος	620	1.075	0.875	1.034	1.004	0.0125
Δίδυμα	621	1.075	0.875	1.012	0.982	0.0125
Ζάρακας	665	1.075	0.875	1.050	0.975	0.0125

Πίνακας 5.15: Στοιχεία συστοιχιών πυκνωτών αιολικών πάρκων Πελοποννήσου, 15^{ης} Ιουνίου 2010

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός ΥΤ ^α	V_{\max} (αμ)	V_{\min} (αμ)	Βαθμίδες (n)	B_n (MVA _r) ^β	T (s) ^γ
Παναχαϊκό	599	1.0000	0.9850	3	4	60
Ελίκη	603	1.0000	0.9800	3	4	60
Δόριζα I	610	1.0000	0.9700	3	4	60
Δόριζα I	611	1.1000	1.0150	3	4	60
Δόριζα II	612	1.1000	1.0175	3	4	60
Αχλαδόκαμπος	620	1.1000	1.0170	3	4	60
Δίδυμα	621	1.1000	1.0000	3	4	60
Ζάρακας	665	1.1000	0.9950	3	4	60

^α Ελεγχόμενος ζυγός για ζεύξη/απόζευξη

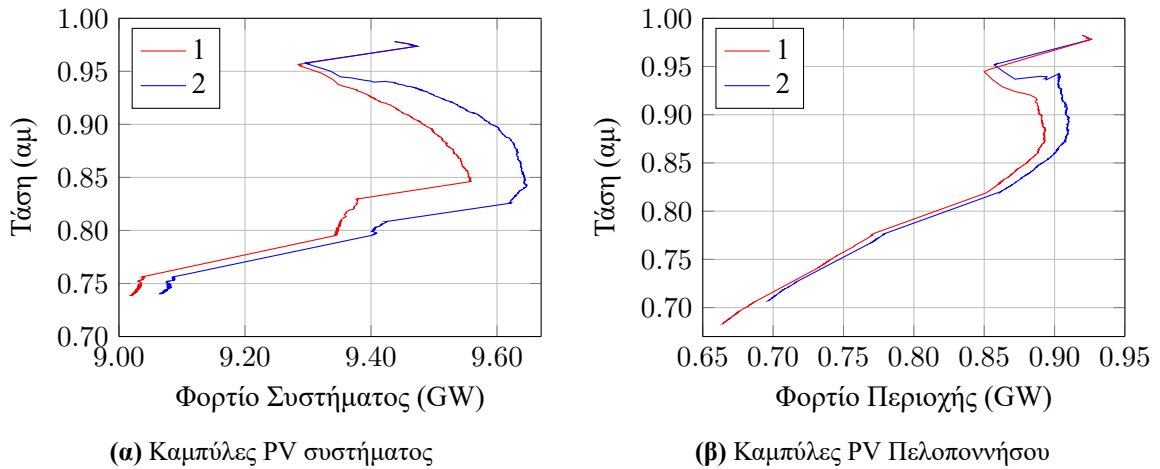
^β Άεργος ισχύς βαθμίδας

^γ Χρονική καθυστέρηση

βρίσκεται εντός αυτής, ενώ και για απλοποίηση των υπολογισμών και επειδή δεν αλλάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα, θεωρείται επίσης ότι ο αρχικός λόγος μετασχηματισμού, r , είναι 1 αμ. Τα στοιχεία των μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίν. 5.14.

Η αντιστάθμιση επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση μέσω τριών (3) συστοιχιών πυκνωτών των 4 MVA_r έκαστη (12 MVA_r συνολικά σε κάθε ζυγό), οι οποίες συνδέονται στην πλευρά της ΜΤ, ενώ η ζεύξη ή η απόζευξη εφαρμόζεται ανάλογα με την τιμή της τάσης του ζυγού ΥΤ του μετασχηματιστή. Συγκεκριμένα η αρχική τιμή της τάσης του ζυγού της ΥΤ λαμβάνεται σαν το κέντρο μιας νεκρής ζώνης για τις συστοιχίες των πυκνωτών, το εύρος της οποίας φαίνεται στην τρίτη και τέταρτη στήλη του Πίν. 5.15. Σημειώνεται ότι στον συγκεκριμένο πίνακα το άνω όριο της νεκρής ζώνης λαμβάνεται πάντα μικρότερο ή ίσο του 110% για την αποφυγή υπερτάσεων. Για κάθε ζεύξη ή απόζευξη συστοιχίας χρησιμοποιείται μια χρονική καθυστέρηση της τάξης των 60 s με στόχο να μην υπάρχει αλληλεπίδραση με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή. Όλα τα στοιχεία των συστοιχιών πυκνωτών στα αιολικά πάρκα Πελοποννήσου φαίνονται συγκεντρωμένα στον Πίν. 5.15.

Η επίδραση της χρήσης πυκνωτών αντιστάθμισης των αιολικών πάρκων στα περιθώρια φόρτισης φαίνεται στο Σχ. 5.28, όπου απεικονίζονται οι καμπύλες PV του συστήματος (Σχ. 5.28α) και της Πελοποννήσου (Σχ. 5.28β) με και χωρίς την αντιστάθμιση (απόκριση 2 και 1 αντίστοιχα). Για το συνολικό σύστημα τα περιθώρια ασφαλείας αυξήθηκαν περίπου 100 MW, ενώ για την περιοχή της Πελοποννήσου κατά 50 MW. Η συνολική διαθέσιμη άεργος ισχύς για αντιστάθμιση ανέρχεται σε αυτήν την περίπτωση



Σχήμα 5.28: Καμπύλες PV ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III και χρήση αντιστάθμισης στα αιολικά πάρκα Πελοποννήσου. 1: απόκριση χωρίς αντιστάθμιση, 2: απόκριση με αντιστάθμιση

σε $8 \times 12 = 96$ MVA_r, υπό ονομαστική τάση.

5.3.2.2 Συγκεντρωμένη αντιστάθμιση στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης

Σε αυτή την περίπτωση, στον ζυγό 633 (G1MEGA31), που αποτελεί τον ζυγό ΥΤ στον οποίο συνδέεται η μονάδα Μεγαλόπολη III μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης, θεωρείται ότι υπάρχουν δύο συστοιχίες πυκνωτών των 60 MVA_r. Ο αντίστοιχος ελεγκτής τους θεωρείται ότι λειτουργεί ως ακολούθως: Αν η τάση στον ζυγό 633 πέσει κάτω από το κατώφλι του 0.91 αμ, μία συστοιχία συνδέεται μετά από χρονική καθυστέρηση 10 s.

Στο Σχ. 5.29α φαίνεται η απόκριση της τάσης του ζυγού 633 (G1MEGA31). Τα σημεία Α υποδεικνύουν τις χρονικές στιγμές που συνδέονται οι δύο συστοιχίες αντιστάθμισης, $t = 440$ s και $t = 596$ s αντίστοιχα. Όπως έχει περιγραφεί στην Υποεν. 5.3.1, στο συγκεκριμένο σενάριο οι τάσεις στην περιοχή της Πελοποννήσου αρχίζουν να μειώνονται αμέσως μετά την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη III. Συνεπώς όταν η τάση του ζυγού 633 (G1MEGA31) πέσει κάτω από το 0.91 αμ, η πρώτη συστοιχία ενεργοποιείται 10 s αργότερα. Η ενέργεια αυτή προσωρινά αυξάνει την τάση στον ελεγχόμενο ζυγό στο 0.93 αμ πριν αρχίσει να μειώνεται και πάλι κάτω από το κατώφλι, λόγω της συνεχούς αύξησης του φορτίου. Ως εκ τούτου τη χρονική στιγμή $t = 596$ s η δεύτερη συστοιχία πυκνωτών συνδέεται.

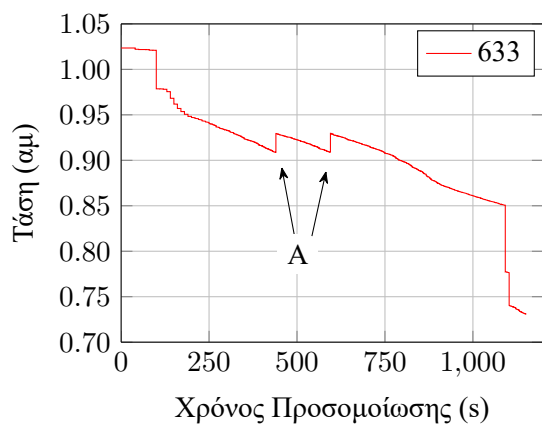
Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.29β, όπου εικονίζεται η καμπύλη PV του συστήματος, η κεντρική αντιστάθμιση των 120 MVA_r στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης αυξάνει το περιθώριο ασφαλείας κατά 80 MW περίπου. Το αντίστοιχο περιθώριο για την Πελοπόννησο αυξάνει κατά περίπου 25 MW.

Επομένως η χρήση διεσπαρμένης αντιστάθμισης προσφέρει μεγαλύτερη αύξηση στα περιθώρια ασφαλείας, παρά το γεγονός πως η συνολική διαθέσιμη άεργος αντιστάθμιση είναι μικρότερη σε σχέση με την συγκεντρωμένη.

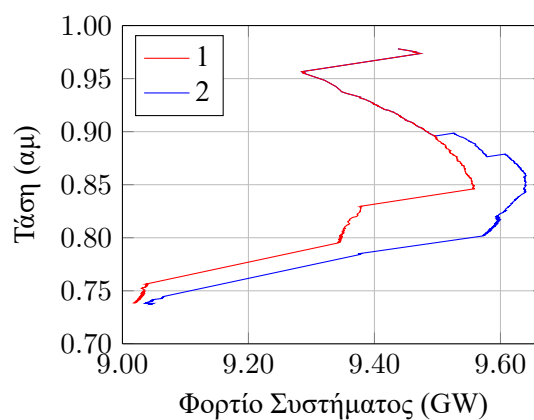
5.3.3 Εφαρμογή συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας

Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα από την εφαρμογή του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 και του αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας ΣΠ1.1 στο ΕΔΣ, για την κρίσιμη διαταραχή της 15^{ης} Ιουνίου 2010.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση θεωρείται ότι τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας έχουν εγκατασταθεί σε όλους τους μετασχηματιστές διανομής ΥΤ/ΜΤ, στις περιοχές της Αθήνας και της Πε-



(α) Τάση ζυγού ΥΤ 633 (G1MEGA31), μονάδα Μεγαλόπολη ΙΙΙ, συγκεντρωμένη αντιστάθμιση



(β) Καμπύλες PV συστήματος. Καμπύλη 1: χωρίς αντιστάθμιση, καμπύλη 2: με αντιστάθμιση

Σχήμα 5.29: Αποκρίσεις ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ και χρήση αντιστάθμισης στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης

Πίνακας 5.16: Αλληλουχία γεγονότων, ΕΔΣ 15^{ης} Ιουνίου 2010, με απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ και εφαρμογή μόνο επιτήρησης ευστάθειας τάσης ΣΑ1

t (s)	Ζυγός	Περιοχή	Συμβάν	Σημείο ^α
100	635	(G1MEGA91) Πελ/σος	Απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ	A
912	639	(G1MEGA93) Πελ/σος	Απώλεια Μεγαλόπολης Ι λόγω υπότασης	B
923	602	(GVZPAT52) Πελ/σος	Σήμα αστάθειας LIVES	C
926	769	(GASPRO52) Αθήνα	Σήμα αστάθειας LIVES	D
963	761	(GAISAG92) Αθήνα	Απώλεια Αγ. Γεώργιος 9 λόγω υπότασης	E
1130			Κατάρρευση τάσης	

^α Τα σημεία αναφέρονται στο Σχ. 5.30.

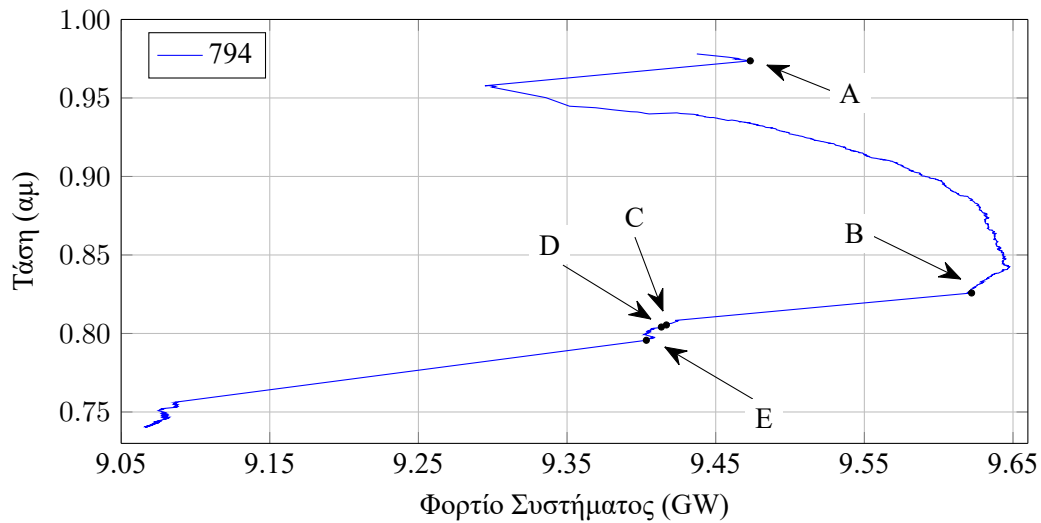
λοποννήσου. Όπως έχει αναφερθεί στην Υποεν. 5.3.1, η κρίσιμη διαταραχή με την απώλεια της μονάδας Μεγαλόπολη ΙΙΙ, ακολουθείται από μια ομοιόμορφη αύξηση όλων των φορτίων του συστήματος με ποσοστό 0.0185% αμ ανά δευτερόλεπτο. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί και πάλι ότι το σενάριο που εξετάζεται αφορά αστάθειας τάσης που προκαλείται από μια ακολουθία απωλειών γεννητριών λόγω υπότασης (UV trips). Ως εκ τούτου, στην παρούσα εφαρμογή εξετάζεται η απόδοση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας σε τέτοιες περιπτώσεις.

Σε κάθε περίπτωση, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, θεωρείται ότι το σύστημα διασπαρμένης αντιστάθμισης στα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου είναι ενεργό και λειτουργεί.

5.3.3.1 Εφαρμογή ΣΑ1

Σε πρώτη φάση εφαρμόζεται μόνο το σύστημα επιτήρησης της ευστάθειας τάσης ΣΑ1, του οποίου οι παράμετροι είναι^{xxv}:

^{xxv} Βλ. Πίν. Β.1, σελ. 231.



Σχήμα 5.30: Καμπύλη PV ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης III και εφαρμογή επιτήρησης ευστάθειας από ΣΑ1. Α: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη III (διαταραχή), Β: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη I, C, D: συναγερμοί αστάθειας, σημείο Ε: απώλεια μονάδας Αγ. Γεώργιος 9

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = -10^{-5}$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 0$ αμ

Η συγκεκριμένη επιλογή της ανοχής χρόνου επιτήρησης εξασφαλίζει ότι οι συναγερμοί αστάθειας θα σημαίνουν τις χρονικές στιγμές t^- .

Σχεδόν αμέσως μετά την απώλεια της Μεγαλόπολης III, όλα τα ΣΑΤΥΦ στην περιοχή της Πελοποννήσου εξαντλούν τις μεταβλητές λήψεις τους, κάτι το οποίο εμποδίζει τη λειτουργία του συστήματος επιτήρησης ΣΑ1. Όμως όπως φαίνεται στον Πίν. 5.16, που αποτελεί τον πίνακα αλληλουχίας γεγονότων για την συγκεκριμένη περίπτωση, κάποιοι συναγερμοί LIVES σημαίνονται πριν την κατάρρευση του συστήματος.

Ο πρώτος συναγερμός LIVES στην παθούσα περιοχή σημαίνεται 11 s μετά την απώλεια λόγω υπότασης της εναπομείνουσας μονάδας στην Πελοπόννησο (Μεγαλόπολη I στον ζυγό 639). Ο δεύτερος συναγερμός σημαίνεται στην περιοχή της Αθήνας, τη χρονική στιγμή $t = 926$ s, περίπου δηλαδή 40 s πριν την απώλεια της μονάδας Αγ. Γεωργίου 9 στην ίδια περιοχή. Στο Σχ. 5.30 απεικονίζεται η ακολουθία των γεγονότων πάνω στην αντίστοιχη PV καμπύλη του συστήματος.

Αν και η πρώτη απώλεια μονάδας λόγω υπότασης (UV trip), εμφανίζεται να είναι στο χαμηλότερο τμήμα της καμπύλης PV, δεν σημαίνεται νωρίτερα κανένας συναγερμός LIVES. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα περισσότερα ΣΑΤΥΦ της περιοχής έχουν ήδη εξαντλήσει το διαθέσιμο εύρος λειτουργίας τους. Ως εκ τούτου η χαμηλή κατανάλωση του φορτίου στη PV καμπύλη δεν οφείλεται απαραίτητα σε αστάθεια τάσης αλλά και σε μείωση του φορτίου λόγω μη δυνατότητας ρύθμισης της δευτερεύουσας τάσης των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς διανομής.

5.3.3.2 Εφαρμογή ΣΠ1.1

Σε δεύτερη φάση εφαρμόζεται το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης, ΣΠ1.1, όπως περιγράφεται στην Εν. 4.2. Το ΣΠ1.1 αποτελείται από τα υποσύστημα LA^{xxvi}για

^{xxvi}Όπως έχει αναφερθεί είναι το ΣΑ1 ενταγμένο στο σύστημα προστασίας.

Πίνακας 5.17: Αλληλουχία γεγονότων, ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, με απώλεια Μεγαλόπολης III και εφαρμογή συστήματος προστασίας ΣΠ1.1

t (s)	Ζυγός	Περιοχή	Συμβάν	Σημείο ^α	
100	635	(G1MEGA91)	Πελ/σος	Απώλεια Μεγαλόπολης III	A
160	636	(G1MEGA51)	Πελ/σος	Σήμα αποκατάστασης λειτουργίας LTC-r ^β	B
954	639	(G1MEGA93)	Πελ/σος	Απώλεια Μεγαλόπολης I λόγω υπότασης	C
965	627	(GMELIT12)	Πελ/σος	Σήμα αστάθειας από LA	D ^γ
967	765	(GMETHA52)	Αθήνα	Σήμα αστάθειας από LA	D
968	607	(GXILOK52)	Πελ/σος	Σήμα αστάθειας από LA	D
969	1032	(G1PATR52)	Πελ/σος	Σήμα αστάθειας από LA	D
970	660	(G1SPAR51)	Πελ/σος	Σήμα αστάθειας από LA	D
971	1044	(GAEGIO52)	Πελ/σος	Σήμα αστάθειας από LA	D
1005	761	(GAISAG92)	Αθήνα	Απώλεια Αγ. Γεώργιος 9 λόγω υπότασης	E
1146				Κατάρρευση τάσης	

^α Τα σημεία αναφέρονται στα Σχ. 5.31 και 5.32.

^β Το συγκεκριμένο σήμα είναι το πρώτο που εμφανίζεται. Σήματα αποκατάστασης λειτουργίας LTC-r^β βγαίνουν σε πάρα πολλά ΣΑΤΥΦ στην περιοχή της Αθήνας και της Πελοποννήσου, μέχρι και την πρώτη εμφάνιση συναγερμού LIVES. Δεν εμφανίζονται λόγω έκτασης.

^γ Δεν πρόκειται για σημείο, αλλά για περιοχή D, που φαίνεται στο Σχ. 5.32, καθώς δεν μπορούν να ξεχωρίσουν επί μέρους σημεία.

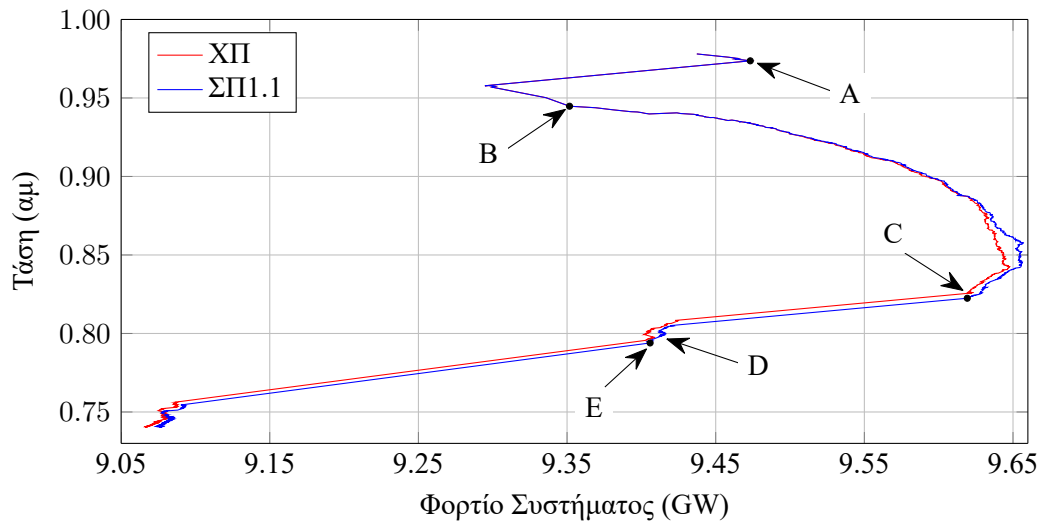
ανίχνευση της αστάθειας, LR για αποκατάσταση της ευστάθειας και LTC-r^β για αποκατάσταση της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ. Οι παράμετροι εφαρμογής του είναι: ^{xxvii}:

- Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού: $\epsilon_t = -10^{-5}$ s
- Ανοχή τάσης αναφοράς: $\epsilon_r = 0$ αμ
- Μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ανά εφαρμογή του ΣΠ1.1: $n_{rev}^{max} = 5$.
- Μέγιστος αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών του ΣΠ1.1: $n_{LR}^{max} = 2$.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή το υποσύστημα LTC-r^β ενεργοποιείται στην πλειοψηφία των ζυγών στην περιοχή της Πελοποννήσου, καθώς εκεί είναι που εξαντλούνται πρώτα τα ΣΑΤΥΦ. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια ελαφρώς τροποποιημένη απόκριση του συστήματος, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, όπου εφαρμόστηκε απλή επιτήρηση της ευστάθειας τάσης. Η συγκεκριμένη αλληλουχία των γεγονότων παρουσιάζεται στον Πίν. 5.17. Όπως φαίνεται από τον συγκεκριμένο πίνακα, η εφαρμογή της αποκατάστασης της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ καθυστερεί την απώλεια της πρώτης μονάδας λόγω υπότασης, κατά περίπου 45 s. Παρόλα αυτά, και παρά το γεγονός πως σημαίνονται περισσότεροι συναγερμοί LIVES, αυτοί σημαίνονται και πάλι μετά την απώλεια της πρώτης μονάδας λόγω υπότασης. Για τους έξι (6) συναγερμούς LIVES δεν μπόρεσε να καταστεί εφικτή η αποκατάσταση της ευστάθειας μέσω LR, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις η αντίστροφη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ σταμάτησε λόγω του ότι καλύφθηκε ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός αντίστροφων κινήσεων.

Είναι προφανές, πως για αυτού του τύπου τις διαταραχές (αστάθεια που προκαλείται λόγω απώλειας γεννητριών από υπόταση), υπάρχουν πολύ μικρά περιθώρια διορθωτικών κινήσεων. Αυτό φαίνεται και

^{xxvii} Βλέπε Πίν. Β.1 και Εν. 4.2



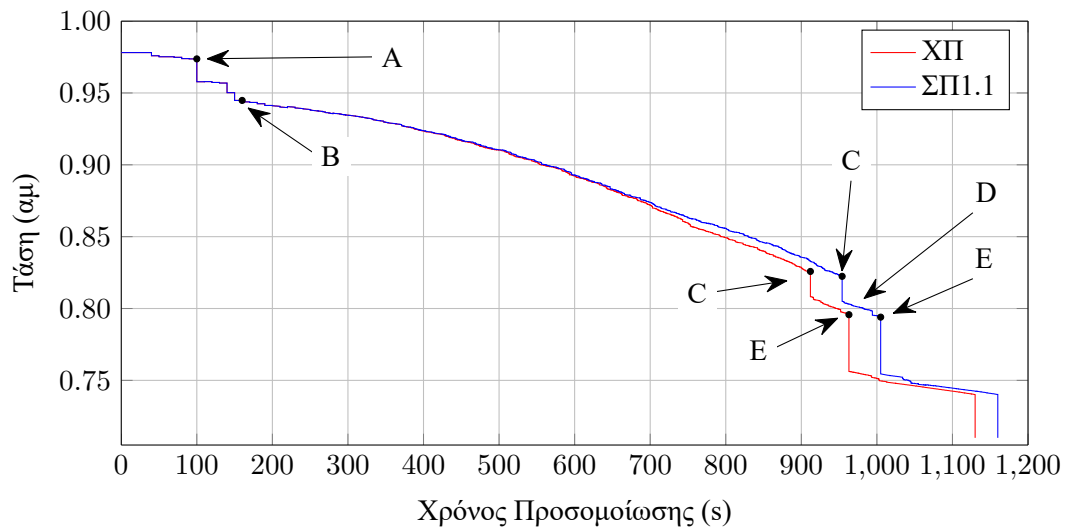
Σχήμα 5.31: Καμπύλες PV ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ, χωρίς προστασία (ΧΙΙ) και με εφαρμογή ΣΠ1.1. Α: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη ΙΙΙ (διαταραχή), Β: πρώτο σήμα αποκατάστασης από LTC-rt σημείο C: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη Ι, D: συναγερμοί αστάθειας από LA, σημείο E: Απώλεια μονάδας Αγ. Γεώργιος 9

στο Σχ. 5.31, όπου εικονίζεται η PV καμπύλη του συστήματος για την περίπτωση που έχει εφαρμοστεί το ΣΠ1.1 σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται καμία τύπου προστασία.

Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.31, η λειτουργία του συστήματος προστασίας αύξησε τα περιθώρια φόρτισης κατά 15 MW και η απώλεια των μονάδων λόγω υπότασης καθυστέρησε για περίπου 50 s. Αυτό είναι επίσης εμφανές και στο Σχ. 5.32, όπου φαίνεται η απόκριση της τάσης του ζυγού 794 (GROUF_31), στον Υ/Σ του Ρουφ, στην Αθήνα για την περίπτωση με (καμπύλη ΣΠ1.1) και χωρίς προστασία (καμπύλη ΧΙΙ).

Από όλα τα ανωτέρω, γίνεται εμφανές ότι για τη συγκεκριμένη διαταραχή, οι συναγερμοί LIVES εμφανίζονται μόνο 40 s πιο νωρίς από την δεύτερη απώλεια μονάδας λόγω υπότασης, το οποίο είναι προφανώς ανεπαρκές για οποιαδήποτε άλλη διορθωτική ενέργεια, πέρα από την εφαρμογή άμεσης και γρήγορης αποκοπής φορτίου. Παρόλα αυτά, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες εφαρμογές, το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ενεργοποιήσει την άμεση αποκοπή φορτίου, συμπληρωματικά στο οδηγούμενο από γεγονότα (event driven) σύστημα προστασίας που έχει εγκατασταθεί στην περιοχή της Πελοποννήσου και περιγράφεται στο [NV08].

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται από την παρούσα εφαρμογή, ακόμα και για την περίπτωση αστάθειας λόγω απώλειας γεννητριών από υπόταση, το σύστημα που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια του συστήματος και να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω διορθωτικές ενέργειες αποτροπής της κατάρρευσης τάσης.



Σχήμα 5.32: Απόκριση τάσης ζυγού ΥΤ 794 (GROUF_31), υποσταθμός Ρουφ, ΕΔΣ, 15^{ης} Ιουνίου 2010, απώλεια Μεγαλόπολης ΙΙΙ, χωρίς προστασία (ΧΠ) και με εφαρμογή ΣΠ1.1. Α: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη ΙΙΙ (διαταραχή), Β: πρώτο σήμα αποκατάστασης από LTC-rr, C: απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη Ι, D: συναγερμοί αστάθειας από ΣΑ1, Ε: απώλεια μονάδας Αγ. Γεώργιος 9

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογές ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μέτρηση φασιθετών

Στο παρόν κεφάλαιο το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μέτρηση φασιθετών, εφαρμόζεται στο τυποποιημένο σύστημα δοκιμών Nordic Test System της IEEE Task Force και το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα για την εκτίμηση της απόδοσης του σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ).

Επειδή στο τυποποιημένο σύστημα Nordic Test System, υπάρχουν διαθέσιμα λεπτομερή αποτελέσματα προσομοιώσεων πολλαπλών χρονικών κλιμάκων, το σύστημα ανίχνευσης εφαρμόζεται τόσο σε αυτά τα αποτελέσματα της πλήρους προσομοίωσης, που προέρχονται από το πρόγραμμα Ramses, όσο και στην οιονεί στατική προσέγγιση που προσφέρει το πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB. Στο Nordic Test System διερευνάται επίσης η επίδραση στη μέθοδο ανίχνευσης διαφόρων παραμέτρων.

Αντίθετα, στην περίπτωση της προσομοίωσης στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα χρησιμοποιείται μόνο η μακροπρόθεσμη χρονική προσομοίωση από το WPSTAB. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός πως η οιονεί στατική προσέγγιση είναι πολύ πιο γρήγορη από την πλήρη προσομοίωση, ειδικά όταν το μέγεθος του συστήματος είναι πολύ μεγάλο και αφετέρου, γιατί δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για την πλήρη χρονική προσομοίωση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος.

6.1 Εφαρμογή στο τυποποιημένο σύστημα Nordic Test System

Στην παρούσα ενότητα, το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις φασιθετών (ΣΑ2) εφαρμόζεται στο τυποποιημένο σύστημα δοκιμών Nordic Test System της IEEE Task Force. Όπως και στην περίπτωση του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES (ΣΑ1), έτσι κι εδώ το ΣΑ2 προσομοιώνεται τόσο με την οιονεί στατική προσέγγιση στο πρόγραμμα WPSTAB όσο και με το πρόγραμμα πλήρους χρονικής προσομοίωσης Ramses. Αυτό γίνεται για τους ακόλουθους λόγους:

1. Στα αποτελέσματα του Ramses εισέρχονται τα πλήρη μεταβατικά φαινόμενα και ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, με αποτέλεσμα να μπορεί να προσομοιωθεί σωστά και το βραχυκύκλωμα, που αποτελεί την αρχική διαταραχή. Επιπλέον τα αποτελέσματα από το συγκεκριμένο πρόγραμμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσομοιώσουν πλήρως την εφαρμογή συστήματος μέτρησης φασιθετών (PMU), με τα προβλήματα που αυτή μπορεί να παρουσιάσει, συμπεριλαμβανομένου και θορύβου μέτρησης. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας θα δοκιμαστεί σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες.

2. Στην οιονεί στατική προσέγγιση που προσφέρει το WPSTAB δεν μπορούν να εξεταστούν τα φαινόμενα που περιγράφηκαν προηγουμένως. Εντούτοις, μπορούν να εξαχθούν ποιοτικά αποτελέσματα σε σχέση με την ακρίβεια της μεθόδου, δηλαδή την ανίχνευση της αστάθειας ως προς το όριο φόρτισης του συστήματος. Επιπλέον, η αντιστοιχία με τα αποτελέσματα από την πλήρη προσομοίωση και την κατάλληλη ρύθμιση των διαφόρων παραμέτρων θα δώσει την δυνατότητα στην Εν. 6.2 να χρησιμοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος ανίχνευσης στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.

Στη συνέχεια δίνεται μια σύντομη περιγραφή του συστήματος δοκιμών και του συστήματος ανίχνευσης, πριν την παράθεση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις. Αποτελέσματα από τις συγκεκριμένες εφαρμογές έχουν παρουσιαστεί στη δημοσίευση [VLM16].

6.1.1 Συνοπτική περιγραφή συστήματος δοκιμών και διαταραχής

Το Nordic Test System, περιγράφηκε στην Υποεν. 5.2.1, ενώ το αντίστοιχο μονογραμμικό παρουσιάστηκε στο Σχ. 5.8, το οποίο επαναλαμβάνεται και εδώ για λόγους πληρότητας στο Σχ. 6.1. Στο συγκεκριμένο σχήμα έχουν προστεθεί πληροφορίες που θα εξηγηθούν στη συνέχεια και αφορούν το ΣΑ2.

Όπως εξηγείται και στην τεχνική έκθεση [Van15], που συνοδεύει το σύστημα δοκιμών, υπάρχουν δύο αρχικά σημεία λειτουργίας, που ονομάζονται Α και Β αντίστοιχα.

Σε κάθε περίπτωση η εφαρμοζόμενη διαταραχή είναι ένα τριφασικό βραχυκύκλωμα πολύ κοντά στον ζυγό 4032 της Βόρειας περιοχής, το οποίο εκκαθαρίζεται με άνοιγμα της γραμμής 4032–4044. Για τη συγκεκριμένη διαταραχή η απόκριση του αρχικού σημείου Α οδηγεί σε αστάθεια με τελική κατάρρευση τάσης στην Κεντρική περιοχή. Αντίθετα, το αρχικό σημείο Β είναι ευσταθές, λόγω διαφορετικής φόρτισης των μονάδων. Λεπτομέρειες σχετικά με τα αρχικά σημεία λειτουργίας μπορούν να βρεθούν στην τεχνική έκθεση [Van15] αλλά και στην Υποεν. 5.2.1 της παρούσας διατριβής.

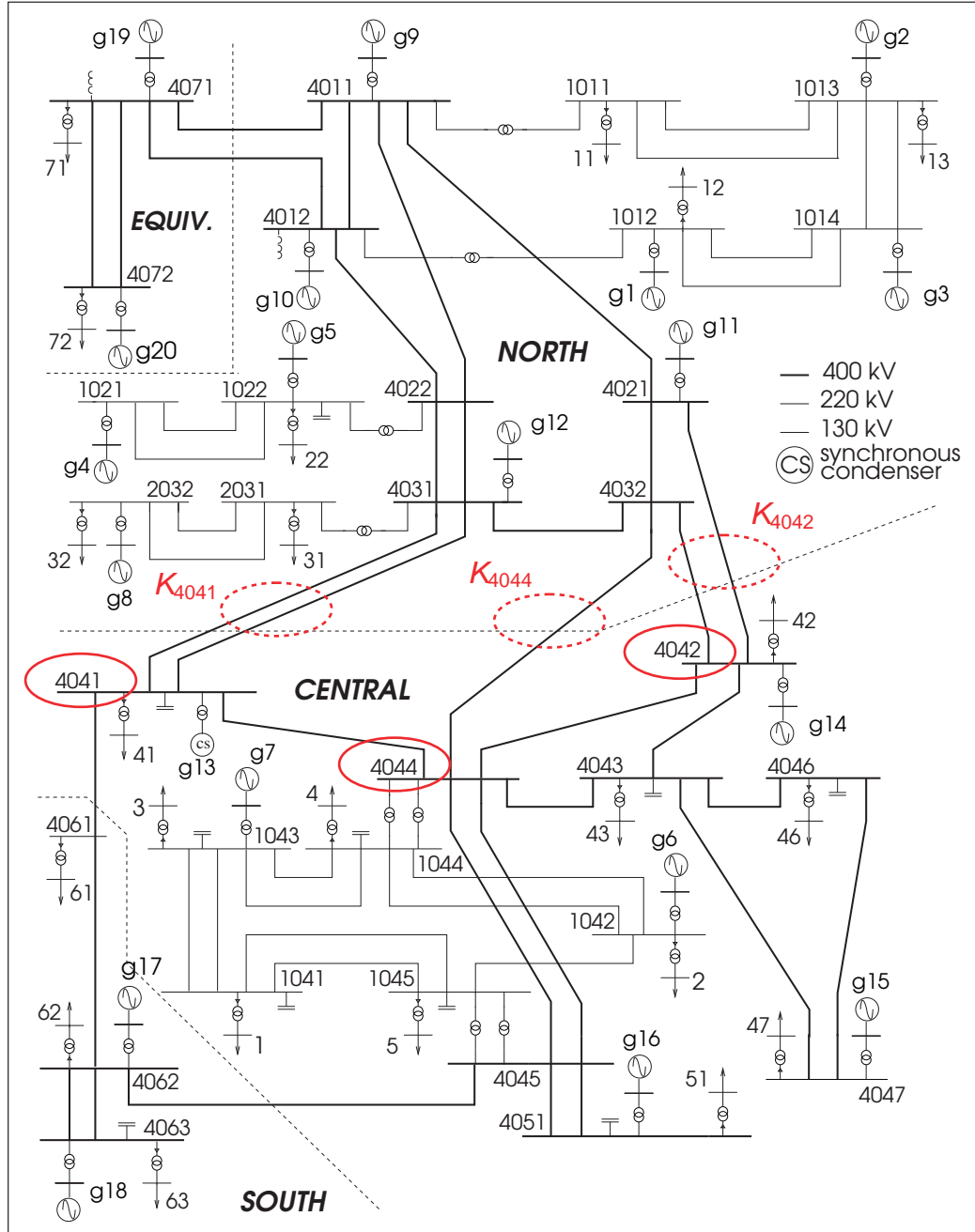
Η κοινή βάση ισχύος για όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε ανά μονάδα τιμές είναι τα 100 MW.

6.1.2 Περιγραφή συστήματος ανίχνευσης

Το θεωρητικό υπόβαθρο για το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις φασιθετών έχει περιγραφεί στην Εν. 3.2, ενώ οι διάφορες παράμετροι εφαρμογής για ένα πραγματικό σύστημα, με θόρυβο και μεταβατικά φαινόμενα, στην Εν. 4.4. Η απλοποιημένη υλοποίηση του για την προσομοίωση με την οιονεί στατική προσέγγιση έχει αναπτυχθεί στην Υποεν. 4.5.2.

Το συγκεκριμένο σύστημα ανίχνευσης υποθέτει την ύπαρξη συγχρονισμένων μονάδων μέτρησης φασιθετών τάσης και ρεύματος στους συνοριακούς ζυγούς ενός διαδρόμου μεταφοράς που συνδέει μια ευάλωτη περιοχή ενός ΣΗΕ με το υπόλοιπο σύστημα. Από την περιγραφή του τυποποιημένου συστήματος στην Υποεν. 5.2.1 και το αντίστοιχο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχ. 6.1 είναι εμφανές ότι υπάρχει ένας τέτοιος διάδρομος μεταφοράς, ο οποίος ενώνει τη Βόρεια περιοχή, που περιλαμβάνει την κύρια παραγωγή του συστήματος, με την “ευάλωτη” Κεντρική περιοχή φορτίου. Ο διάδρομος αυτός περιλαμβάνει τις γραμμές 4031–4041 (δύο παράλληλες γραμμές), 4032–4044, 4032–4042 και 4021–4042 αποτελώντας ταυτόχρονα και ένα *σύνολο διαχωρισμού* (cut-set). Ως εκ τούτου, οι συνοριακοί ζυγοί της Κεντρικής περιοχής είναι οι 4041, 4042 και 4044.

Σε καθέναν από αυτούς τους συνοριακούς ζυγούς θεωρείται ότι υπάρχουν εγκατεστημένες μονάδες μέτρησης φασιθετών για την τάση τους και το μεταφερόμενο από το διάδρομο ρεύμα. Για τον υπολογισμό του ρεύματος αυτού και σε αντιστοιχία με την Παρ. 3.2.2.2, ορίζονται τα ακόλουθα σύνολα



Σχήμα 6.1: Μονογραμμικό διάγραμμα Nordic Test System. Με κόκκινη συνεχή γραμμή φαίνονται οι συνοριακοί ζυγοί άφιξης της Κεντρικής περιοχής, στους οποίους θεωρείται εγκατεστημένο το ΣΑ2, ενώ με διακεκομμένη κόκκινη γραμμή φαίνονται οι γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς που καταλήγουν σε κάθε συνοριακό ζυγό άφιξης, με τη βοήθεια των οποίων ορίζονται τα αντίστοιχα σύνολα εξωτερικών συνδέσεων. Τα σύνολα αυτά περιλαμβάνουν τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης με τους οποίους συνδέεται ο κάθε συνοριακός ζυγός άφιξης

εξωτερικών συνδέσεων για κάθε συνοριακό ζυγό¹:

$$K_{4041} = \{4031\} \quad (6.1\alpha)$$

$$K_{4042} = \{4021, 4032\} \quad (6.1\beta)$$

$$K_{4044} = \{4032\} \quad (6.1\gamma)$$

Κάθε σύνολο αντιστοιχεί σε ένα συνοριακό ζυγό άφιξης της ευάλωτης Κεντρικής περιοχής και περιλαμβάνει τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης της Βόρειας περιοχής με τους οποίους συνδέεται μέσω του διαδρόμου μεταφοράς. Τα σύνολα αυτά φαίνονται σημειωμένα στο Σχ. 6.1 με τη βοήθεια των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς. Από αυτά τα σύνολα μπορεί σε κάθε συνοριακό ζυγό να υπολογιστεί το μεταφερόμενο από το διάδρομο ρεύμα με βάση την σχέση (3.52), η οποία επαναλαμβάνεται εδώ:

$$\tilde{I}_i = - \sum_{k \in K_i} \tilde{I}_{ik} \quad (6.2)$$

όπου K_i είναι το σύνολο των εξωτερικών συνδέσεων του συνοριακού ζυγού i .

Από τις τάσεις \tilde{V}_i των συνοριακών ζυγών και τα ρεύματα (6.2) μπορούν να υπολογιστούν απευθείας, για κάθε συνοριακό ζυγό, η μεταφερόμενη από το διάδρομο ενεργός ισχύς P_i και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G_i , βάσει των σχέσεων (3.53) οι οποίες επαναλαμβάνονται εδώ:

$$P_i = Re \left\{ \tilde{V}_i \tilde{I}_i^* \right\} \quad (6.3\alpha)$$

$$G_i = Re \left\{ \tilde{I}_i / \tilde{V}_i \right\} \quad (6.3\beta)$$

Από τις μεταβολές στη μεταφερόμενη ισχύ και στη φαινόμενη αγωγιμότητα προκύπτει άμεσα ο δείκτης NLI. Όσο οι δείκτες αυτοί είναι θετικοί, το σύστημα θεωρείται ευσταθές. Αντίθετα, όταν έστω και ένας δείκτης γίνει αρνητικός, σημαίνεται συναγερμός αστάθειας.

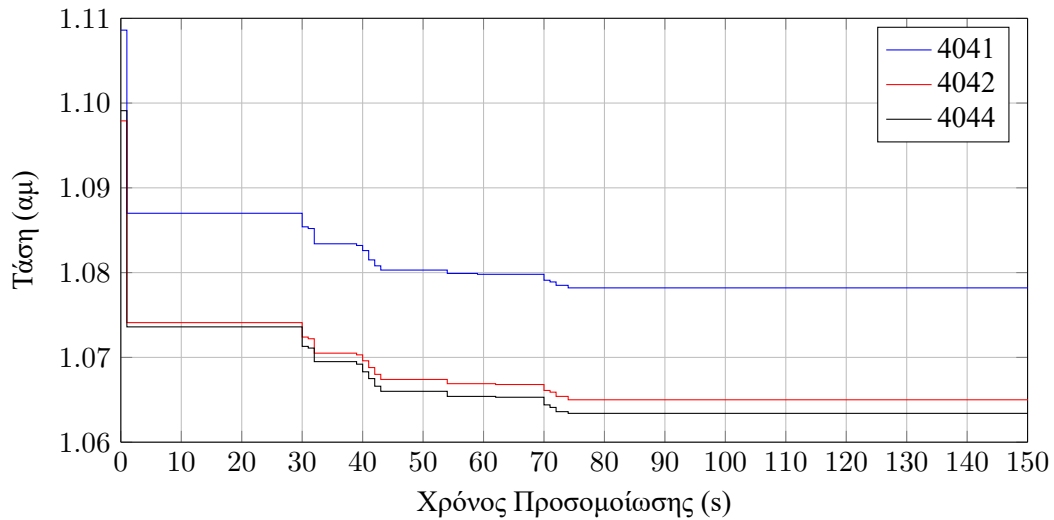
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά σε μία βασική προϋπόθεση λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος ανίχνευσης αστάθειας, η οποία είναι ότι ανά πάσα στιγμή πρέπει να γίνεται ενημέρωση για οποιαδήποτε αλλαγή της τοπολογίας του δικτύου που επηρεάζει τους συνοριακούς ζυγούς.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου με την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος ανοίγει η γραμμή 4032–4044, ο ζυγός 4044 παύει να είναι πλέον συνοριακός και δεν υπολογίζεται σε αυτόν ο αντίστοιχος δείκτης NLI.

Όπως αναφέρεται και στην Εν. 4.4, το ΣΑ2 περιλαμβάνει τρεις παραμέτρους ανίχνευσης. Πρόκειται για το χρονικό διάστημα παρατήρησης μεταβολών ΔT , που αποτελεί το χρονικό διάστημα στο οποίο ελέγχονται οι μεταβολές της φαινόμενης από τους συνοριακούς ζυγούς ωμικής αγωγιμότητας ΔG και της μεταφερόμενης από το διάδρομο ενεργού ισχύος ΔP καθώς και τα κατώφλια απόρριψης των αντίστοιχων μεταβολών ϵ_G και ϵ_P . Καθώς στην συγκεκριμένη ενότητα γίνεται άμεση σύγκριση των δύο μεθόδων προσομοίωσης (πλήρης προσομοίωση και οιονεί στατική προσέγγιση), οι συγκεκριμένες παράμετροι είναι κοινές και για τις δύο περιπτώσεις. Συγκεκριμένα:

- Χρονικό διάστημα παρατήρησης μεταβολών: $\Delta T = 7$ s
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών φαινόμενης αγωγιμότητας: $\epsilon_G = 0.001$
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών μεταφερόμενης ισχύος: $\epsilon_P = 0.001$

¹Βλ. Σχ. 3.7, σελ. 89.



Σχήμα 6.2: Απόκριση τάσεων στους συνοριακούς ζυγούς 4041, 4042 και 4044 ΥΥΤ, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας Β) και εφαρμογή του ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB

6.1.3 Ανίχνευση αστάθειας μέσω οιονεί στατικής προσομοίωσης

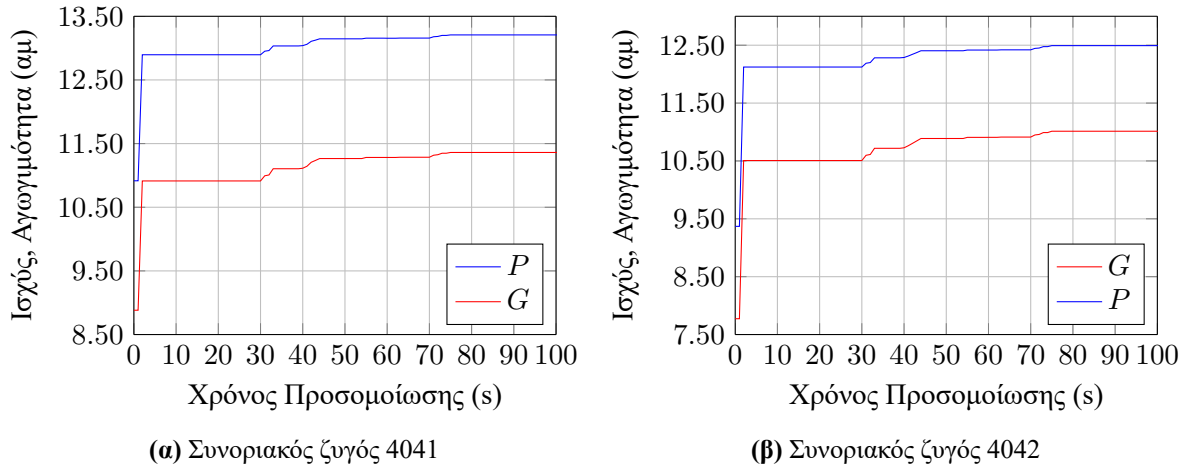
Ο τρόπος υπολογισμού του δείκτη NLI στο πρόγραμμα WPSTAB γίνεται όπως ακριβώς περιγράφεται στην Υποεν. 4.5.2. Όπως αναφέρεται και εκεί, βασική παραδοχή είναι ότι όλοι οι ανά δευτερόλεπτο δειγματοληπτημένοι κινητοί μέσοι όροι \bar{P} και \bar{G} της μεθόδου ανίχνευσης αντιστοιχούν στις οιονεί στατικές τιμές της προσομοίωσης που υπολογίζονται επίσης ανά δευτερόλεπτο, τις χρονικές στιγμές t^- . Συνεπώς δεν χρησιμοποιείται περαιτέρω δειγματοληψία, ενώ δεν υπάρχει θόρυβος μέτρησης σε αυτήν την περίπτωση. Να σημειωθεί τέλος, ότι όσον αφορά τη διαταραχή δεν προσομοιώνεται το βραχυκύκλωμα, παρά μόνο το άνοιγμα της γραμμής 4032–4044.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο WPSTAB για τα δύο σενάρια λειτουργίας, ήτοι αυτό με το αρχικό σημείο λειτουργίας Β, που οδηγεί σε οριακή περίπτωση ευστάθειας με το σύστημα να ισορροπεί σε ένα νέο σημείο λειτουργίας και, αυτό με το αρχικό σημείο λειτουργίας Α, που οδηγεί σε κατάρρευση τάσης.

6.1.3.1 Ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας Β)

Σε πρώτη φάση προσομοιώνεται το ευσταθές σενάριο για το αρχικό σημείο λειτουργίας Β. Οι αποκρίσεις των οριακών ζυγών ΥΥΤ τάσης 4041, 4042 και 4044 φαίνονται στο Σχ. 6.2. Είναι εμφανές σε αυτήν την περίπτωση, ότι το σύστημα δεν καταρρέει και ισορροπεί σε χαμηλότερα επίπεδα τάσεων, περίπου 70 s μετά από το άνοιγμα της γραμμής 4032–4044.

Καθώς ο καθορισμός των αντίστοιχων δεικτών NLI, απαιτεί τους υπολογισμούς αρχικά της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος από το διάδρομο καθώς και της αντίστοιχης φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας που βλέπουν οι συνοριακοί ζυγοί, στο Σχ. 6.3 φαίνονται οι αντίστοιχες αποκρίσεις των μεγεθών αυτών για τους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042, τις χρονικές στιγμές t^- , με βήμα προσομοίωσης (δειγματοληψίας) $\Delta t = 1$ s. Η αρχική αύξηση στη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ και στη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα και στους δύο συνοριακούς ζυγούς, οφείλεται στο γεγονός πως το άνοιγμα της γραμμής 4032–4044 άλλαξε τη ροή ισχύος προς την Κεντρική περιοχή του συστήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγαλύτερες ροές ενεργού ισχύος στους εναπομείναντες, μετά τη διαταραχή, συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042. Η αύξηση στο εισαγόμενο από το διάδρομο ρεύμα στην Κεντρική περιοχή είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση της τάσης, η οποία φαίνεται στο Σχ. 6.2 και ως εκ τούτου, τόσο η



Σχήμα 6.3: Απόκριση φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G και μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B) και εφαρμογή του ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB

μεταφορά ενεργού ισχύος P όσο και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G αυξάνονται και στους δύο συνοριακούς ζυγούς, όπως φαίνεται από τις αποκρίσεις του Σχ. 6.3. Από το ίδιο σχήμα είναι προφανές πως η μεταφορά ενεργού ισχύος και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα και στους δύο συνοριακούς ζυγούς ακολουθούν η μία της μεταβολές της άλλης χωρίς αλλαγές στην μεταξύ τους σχέση. Η μικρή διαφορά μεταξύ του G και P οφείλεται στην ύπαρξη της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ.

Τις ίδιες χρονικές στιγμές, t^- , υπολογίζονται οι μεταβολές της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας ΔG και της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος ΔP , σε διάστημα $\Delta T = 7$ s με βάση τις σχέσεις (4.14), που επαναλαμβάνονται εδώ λαμβάνοντας την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta G(t_k) = G(t_k) - G(t_k - 7) \quad (6.4\alpha)$$

$$\Delta P(t_k) = P(t_k) - P(t_k - 7) \quad (6.4\beta)$$

όπου για τα πρώτα 7 δείγματα το $(t_k - 7)$, αντικαθίσταται με το $t_1 = 0$, δηλαδή το πρώτο δείγμα.

Από τις μεταβολές αυτές υπολογίζονται οι αντίστοιχο δείκτες NLI, κρατώντας μόνο τις τιμές των σχέσεων (6.4) για τις οποίες οι μεταβολές ξεπερνούν τα αντίστοιχα κατώφλια, δηλαδή για τις χρονικές στιγμές t_k για τις οποίες ισχύουν οι σχέσεις (4.16), που στην συγκεκριμένη εφαρμογή γίνονται:

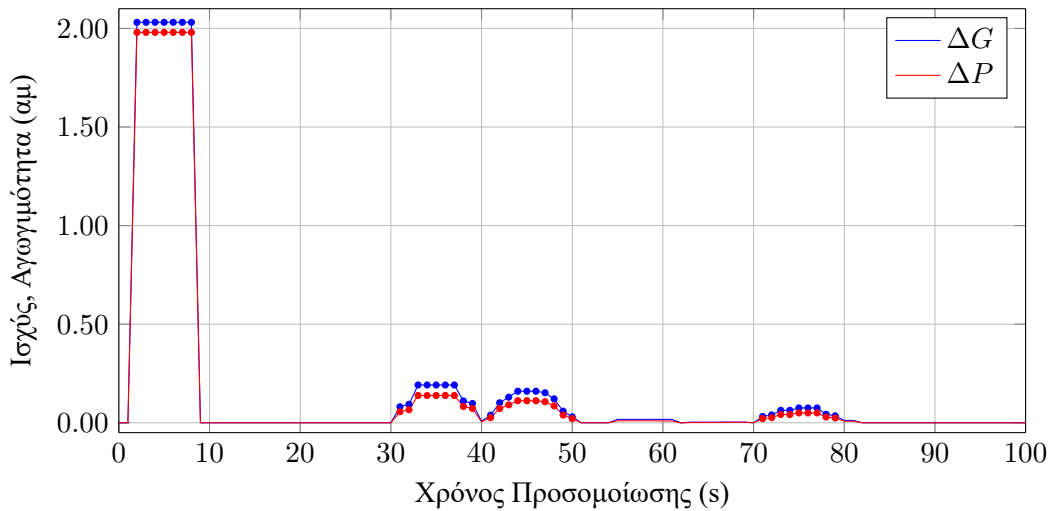
$$\Delta G(t_k)/G(t_k - 7) \geq 0.001 \quad (6.5\alpha)$$

$$|\Delta P(t_k)/P(t_k - 7)| \geq 0.001 \quad (6.5\beta)$$

όπου, όπως και στις σχέσεις (6.4), για τα πρώτα 7 δείγματα το $t_k - 7$, αντικαθίσταται με το $t_1 = 0$ s, δηλαδή το πρώτο δείγμα.

Στο Σχ. 6.4 φαίνονται οι μεταβολές των ΔP και ΔG για τον συνοριακό ζυγό 4041, ενώ είναι σημειωμένα και τα σημεία στα οποία ισχύουν οι συνθήκες (6.5). Σε αυτές τις χρονικές στιγμές υπολογίζεται και ο αντίστοιχος δείκτης NLI. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας αυτά τα δείγματα, υπολογίζονται οι αντίστοιχοι κινητοί μέσοι όροι των διαφορών, με παράθυρο υπολογισμού 10 δειγμάτων, ενώ τέλος, από το πηλίκο αυτών των κινητών μέσων υπολογίζεται ο ίδιος ο δείκτης NLI, στον οποίο για τελική εξομάλυνση εφαρμόζεται επιπλέον ένα φιλτράρισμα μέσω ενός κινητού μέσου 10 δειγμάτωνⁱⁱ.

ⁱⁱΒλ. και Εν. 4.4.



Σχήμα 6.4: Μεταβολή φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητα ΔG και μεταφερόμενης ενεργού ισχύος ΔP στον συνοριακό ζυγό 4041, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB. Τα σημεία που φαίνονται είναι οι τιμές στις οποίες ισχύει η σχέση (6.5)

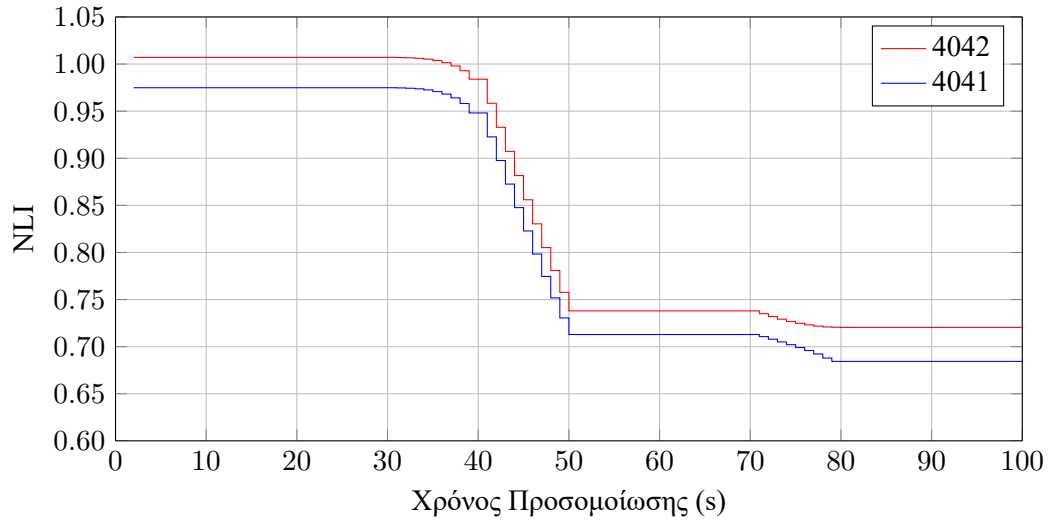
Συγκεντρωτικά οι αποκρίσεις των δεικτών NLI για το ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B) φαίνονται στο Σχ. 6.5. Οι δείκτες NLI για τους δύο συνοριακούς ζυγούς του συστήματος, 4041 και 4042, αρχίζουν να υπολογίζονται μόλις ικανοποιηθούν οι σχέσεις (6.5), που στην συγκεκριμένη περίπτωση συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 2$ s, με τις πρώτες τιμές και για τους δύο δείκτες να είναι κοντά στη μονάδα. Οι τιμές αυτές διατηρούνται σταθερές μέχρι περίπου τη χρονική στιγμή $t = 30$ s, οπότε και αρχίζουν να μειώνονται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως την ίδια περίπου χρονική στιγμή αρχίζουν να ενεργοποιούνται τα ΣΑΤΥΦ της Κεντρικής περιοχής, αυξάνοντας τόσο τη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα όσο και τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ, όπως φαίνεται και στα Σχ. 6.3. Επειδή η αύξηση στη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση στη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ, οι δείκτες αρχίζουν και φθίνουν για να καταλήξουν τη χρονική στιγμή $t = 50$ s σε τιμές λίγο μεγαλύτερες από 0.70. Τη χρονική στιγμή περίπου $t = 70$ s ενεργοποιούνται για τελευταία φορά τα ΣΑΤΥΦ που ελέγχουν τους ζυγούς MT 3, 4, 42, 46 και 47, με αποτέλεσμα μια ακόμα μικρή μείωση στους δείκτες, οι οποίοι φτάνουν στις τελικές τους τιμές, που είναι λίγο πάνω από το 0.65, περίπου 10 s αργότερα. Είναι εμφανές ότι οι δείκτες NLI παραμένουν αρκετά πάνω από το μηδέν, χωρίς να σημειωθεί ψευδής συναγερμός, παρά το γεγονός πως η ευστάθεια που εμφανίζει το συγκεκριμένο σενάριο είναι οριακή.

Σε σχέση με την απεικόνιση των δεικτών NLI πρέπει να επισημανθεί το εξής. Ο δείκτης ανανεώνεται μόνο τις στιγμές που υπάρχουν αντίστοιχα δείγματα με βάση τις σχέσεις (6.5). Στο ενδιάμεσο διάστημα ο δείκτης NLI θεωρείται σταθερός και ίσος με την προηγούμενη υπολογιστήσα τιμή. Αυτός είναι ο λόγος για την διακριτοποιημένη απόκριση των δεικτών NLI που φαίνεται στο Σχ. 6.5.

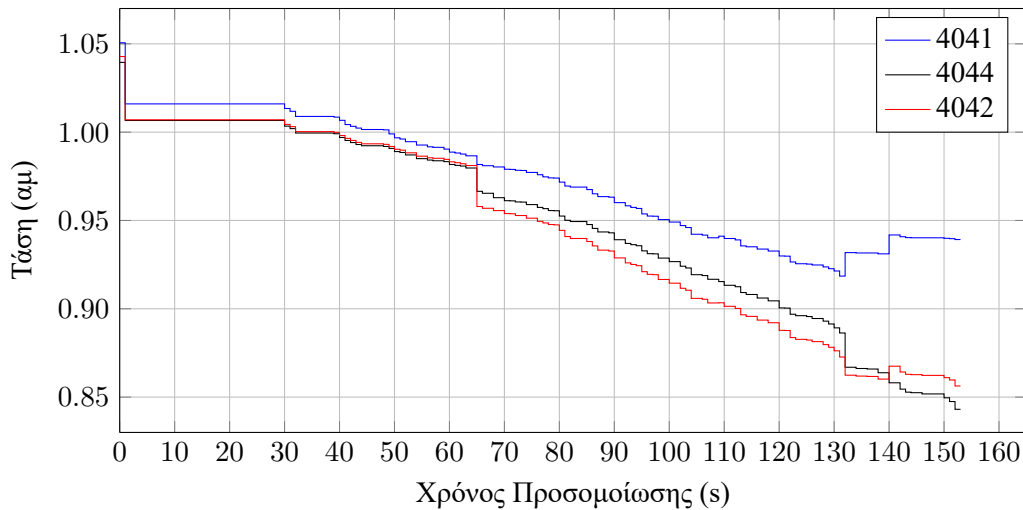
6.1.3.2 Ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A)

Οι αποκρίσεις των τάσεων των συνοριακών ζυγών ΥΥΤ, για το ασταθές σενάριο, που αντιστοιχεί στο αρχικό σημείο λειτουργίας A, φαίνονται στο Σχ. 6.6. Είναι εμφανές πως το σύστημα καταρρέει στην μακροχρόνια, οιονεί στατική προσομοίωση, τη χρονική στιγμή $t = 153$ s, λόγω απώλειας του βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.

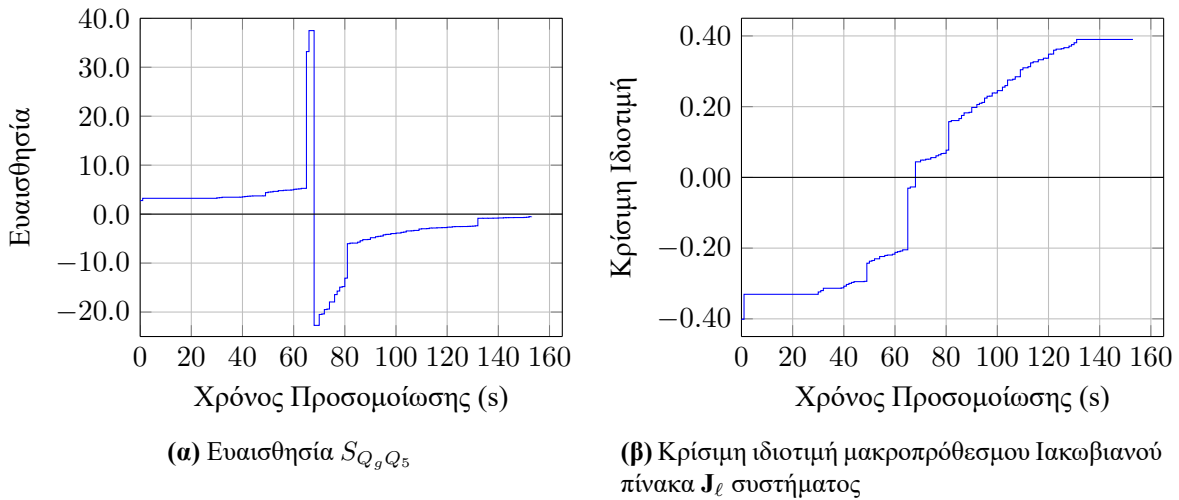
Με στόχο να προσδιοριστεί το ακριβές σημείο που το σύστημα γίνεται ασταθές (δηλαδή φτάνει στο όριο φόρτισης του), χρησιμοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας και οι ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα του μακροπρόθεσμου προσεγγιστικού συστήματος.



Σχήμα 6.5: Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB



Σχήμα 6.6: Απόκριση ΥΥΤ τάσεων στους συνοριακούς ζυγούς, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), εφαρμογή ΣΑ2, προσομοίωση WPSTAB



Σχήμα 6.7: Απόκριση ευαισθησίας και κρίσιμης ιδιοτιμής, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB

Όπως έχει αναφερθεί στην Εν. 2.4, όταν ένα σύστημα φτάσει στο αντίστοιχο όριο φόρτισης, οι ευαισθησίες αλλάζουν πρόσημο μέσω του απείρου ή μιας μεγάλης τιμής ενώ την ίδια στιγμή μια κρίσιμη ιδιοτιμή διέρχεται από το μηδέν. Στο Σχ. 6.7α φαίνεται η απόκριση της ευαισθησίας S_{Q_g, Q_5} ⁱⁱⁱ της συνολικής αέργου παραγωγής ως προς το άεργο φορτίου του ζυγού MT 5, ενώ στο Σχ. 6.7β φαίνεται η κρίσιμη (πιο κοντά στο μηδέν) ιδιοτιμή του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης \mathbf{J}_ℓ ^{iv}.

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, είναι εμφανές από τα Σχ. 6.7 ότι το σύστημα φτάνει το όριο ευστάθειας του μακροπρόθεσμου μοντέλου τη χρονική στιγμή $t = 68$ s.

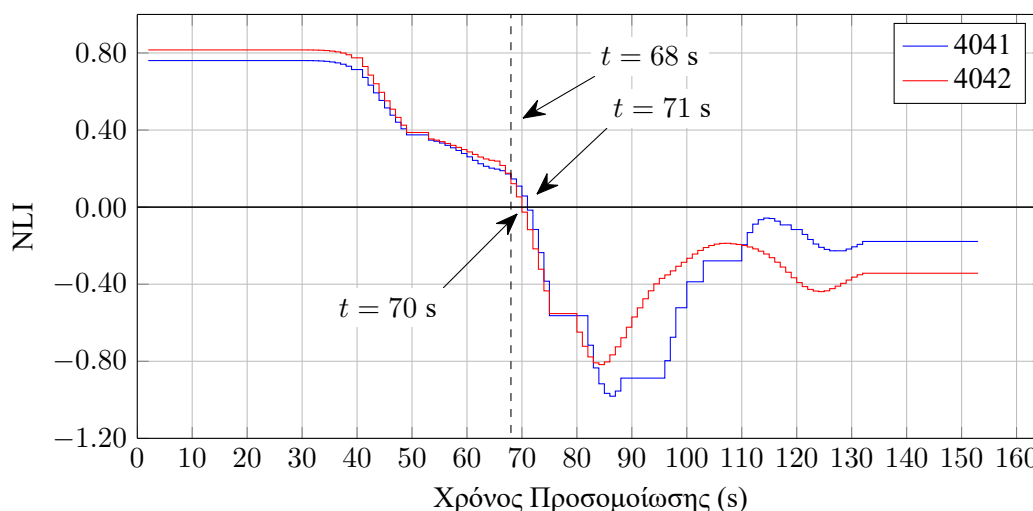
Η αλληλουχία των γεγονότων για το συγκεκριμένο σενάριο, αποτυπώνεται στον Πίν. 6.1, ενώ οι αντίστοιχες αποκρίσεις των δεικτών NLI για τους ζυγούς 4041 και 4042 φαίνονται στο Σχ. 6.8, όπου η κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή δείχνει το σημείο αστάθειας που προέκυψε από την ανάλυση ευαισθησιών.

Στο Σχ. 6.9 φαίνονται οι αποκρίσεις της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P από το διάδρομο προς την Κεντρική περιοχή, καθώς και η αντίστοιχη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G μέσω του ζυγού 4042 (Σχ. 6.9α), που είναι και ο πρώτος συνοριακός ζυγός του οποίου ο δείκτης NLI γίνεται αρνητικός, αλλά και του συνοριακού ζυγού 4041 (Σχ. 6.9β). Καθώς η επιβαλλόμενη διαταραχή είναι η ίδια, η αρχική απόκριση των P και G είναι παρόμοια με αυτή του Σχ. 6.3.

Μετά την απότομη αρχική αύξηση και για περίπου 30 s τόσο η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς P , όσο και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G , παραμένουν σχεδόν σταθερές, μέχρι το σημείο που λόγω της δράσης των ΣΑΤΥΦ στην Κεντρική περιοχή, το σύστημα προσπαθεί να αποκαταστήσει την κατανάλωση ισχύος στα προ της διαταραχής επίπεδα. Αυτό προκαλεί μια αύξηση στην ωμική αγωγιμότητα που βλέπουν και οι δύο συνοριακοί ζυγοί. Τη χρονική στιγμή $t = 65$ s (σημείο M στο Σχ. 6.9) η ενεργός ισχύς που περνά από τη Βόρεια προς την Κεντρική περιοχή του συστήματος μέσω των συνοριακών ζυγών 4041 και 4042 αρχίζει να μειώνεται, ενώ η ωμική αγωγιμότητα συνεχίζει να αυξάνει, γεγονός που οδηγεί σε ένα φθίνοντα δείκτη NLI, ο οποίος, λόγω της εξομάλυνσης που προσφέρει η χρήση των φίλτρων κινητών μέσων όρων, περνάει το 0 τη χρονική στιγμή $t = 70$ s για τον ζυγό 4042 και $t = 71$ s για τον 4041 (σημεία N στο Σχ. 6.9). Ως εκ τούτου, ο αντίστοιχος συναγερμός αστάθειας τάσης σημαίνεται μαζί με τον πρώτο συναγερμό NLI, δηλαδή την στιγμή $t = 70$ s.

ⁱⁱⁱΒλ. Υποεν. 2.4.4.

^{iv}Βλ. Υποεν. 2.4.1.



Σχήμα 6.8: Απόκριση δεικτών NLI συνιοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο σημείο υπολογισμού ορίου φόρτισης

Η συνθήκη υπολογισμού των δεικτών (6.5) ισχύει μέχρι τη χρονική στιγμή $t = 132$ s, καθώς από εκεί και πέρα, όπως φαίνεται από τις αποκρίσεις των Σχ. 6.9, η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα και στους δύο συνιοριακούς ζυγούς μειώνεται, με αποτέλεσμα οι αντίστοιχοι δείκτες NLI από τη στιγμή αυτή μέχρι την κατάρρευση του συστήματος τη χρονική στιγμή $t = 153$ s να παραμένουν σταθεροί (βλ. Σχ. 6.8).

Από τον Πίν. 6.1 αλλά και το Σχ. 6.8 είναι εμφανές ότι ο συναγερμός αστάθειας εκδίδεται λίγα δευτερόλεπτα αφού το σύστημα έχει φτάσει στα όρια φόρτισης του, λόγω της καθυστέρησης που εισάγει το φιλτράρισμα των κινητών μέσων όρων, ενώ από το Σχ. 6.9α η πρώτη μείωση της μεταφερόμενης ισχύος συμβαίνει 3 s πριν το σημείο αστάθειας^v.

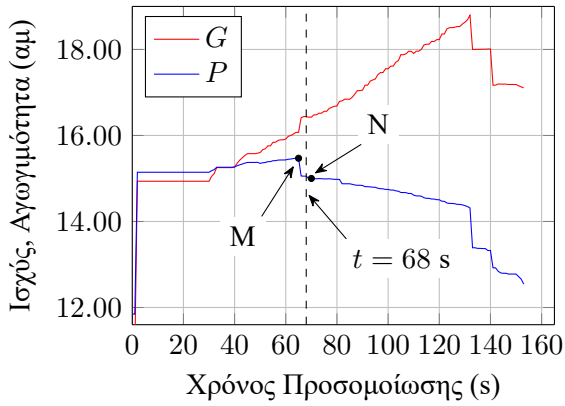
6.1.4 Ανίχνευση αστάθειας μέσω λεπτομερούς προσομοίωσης

Στην παρούσα υποενοότητα το σύστημα ανίχνευσης με μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος (ΣΑ2) εφαρμόζεται και στα αποτελέσματα της πλήρους χρονικής προσομοίωσης του συστήματος δοκιμών.

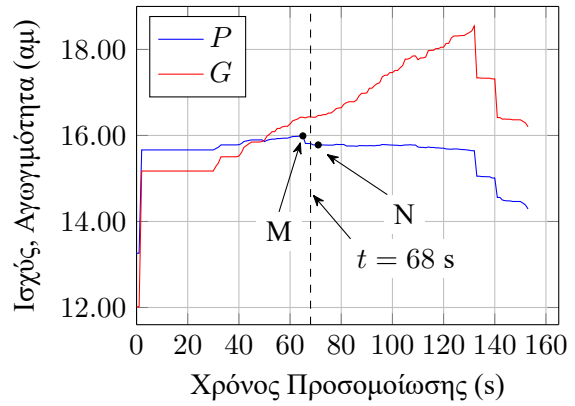
Για την πλήρη χρονική προσομοίωση του ΣΑ2 χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που αναπτύσσεται στην Εν. 4.4. Συγκεκριμένα υποτίθεται δειγματοληψία στις μετρήσεις φασιθετών ανά 20 ms, από τις οποίες προκύπτουν η εισαγόμενη ενεργός ισχύς P και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G από κάθε συνιοριακό ζυγό. Στη συνέχεια υπολογίζεται οι κινητοί μέσοι όροι αυτών των μεγεθών, \bar{P} και \bar{G} αντίστοιχα, με 50 δείγματα και καθώς δεν απαιτείται πολύ γρήγορη ενημέρωση, αυτοί οι κινητοί μέσοι δειγματοληπτούνται περαιτέρω ανά δευτερόλεπτο. Οι τελευταίες τιμές (κινητοί μέσοι όροι δευτερολέπτου, όπως θα αποκαλούνται) ουσιαστικά είναι οι τιμές που σχετίζονται με τα αντίστοιχα μεγέθη της οιονεί στατικής προσομοίωσης τις χρονικές στιγμές t^- , ενώ η διαδικασία ανίχνευσης από το σημείο αυτό και πέρα είναι ίδια.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στο θόρυβο που μπορεί να προκύψει στις μονάδες μέτρησης φασιθετών. Όπως έχει αναλυθεί και στο σχετικό πρότυπο [IEE11], κάθε μονάδα συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών πρέπει να έχει ένα συνολικό διάνυσμα σφάλματος (Total Vector Error-TVE)

^vΓια τη συγκεκριμένη σχέση μεταξύ ευάλωτης περιοχής και σημείου αστάθειας βλ. Παρ. 3.2.2.2.



(α) Συνοριακός ζυγός 4042

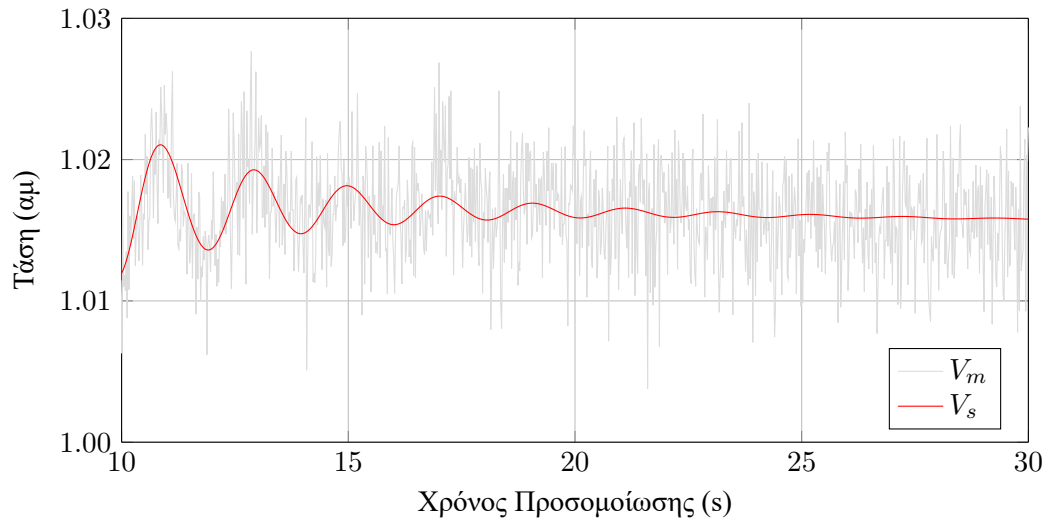


(β) Συνοριακός ζυγός 4041

Σχήμα 6.9: Απόκριση εγχυόμενης ενεργού ισχύος P και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο σημείο υπολογισμού ορίου φόρτισης, M: σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος από τη Βόρεια προς το Κεντρική περιοχή του συστήματος, N: ο αντίστοιχος NLI γίνεται αρνητικός

Πίνακας 6.1: Αλληλουχία γεγονότων στο Nordic Test System, ασταθές σενάριο (αρχικό σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση WPSTAB και Ramses

t (s)	Ζυγός	WPSTAB	Ramses
49.00	g12	ΣΠΥ	ΣΠΥ
65.00	g14	ΣΠΥ	ΣΠΥ
68.00	g7	ΣΠΥ	ΣΠΥ
68.00		Όριο φόρτισης	
70.00	4042	NLI<0 ($V = 0.956$) Συναγερμός Αστάθειας	
71.00	4041	NLI<0 ($V = 0.979$)	
72.00	4042		NLI<0 ($V = 0.953$) Συναγερμός Αστάθειας
85.00	4041		NLI<0 ($V = 0.964$)
81.00	g11	ΣΠΥ	ΣΠΥ
109.00	g6	ΣΠΥ	ΣΠΥ
140.00	g16	ΣΠΥ	ΣΠΥ
153.00		Κατάρρευση	
163.90			Κατάρρευση



Σχήμα 6.10: Μετρούμενη (με θόρυβο) V_m και πραγματική (προσομοίωσης) V_s τιμή μέτρου τάσης συνοριακού ζυγού 4041, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A), σε προσομοίωση Ramses

μικρότερο από 1%. Το συγκεκριμένο πρότυπο ορίζει το TVE, για π.χ. την τάση, ως ακολούθως:

$$\text{TVE} = \frac{|\tilde{V}_{measured} - \tilde{V}_{ideal}|}{|\tilde{V}_{ideal}|} \quad (6.6)$$

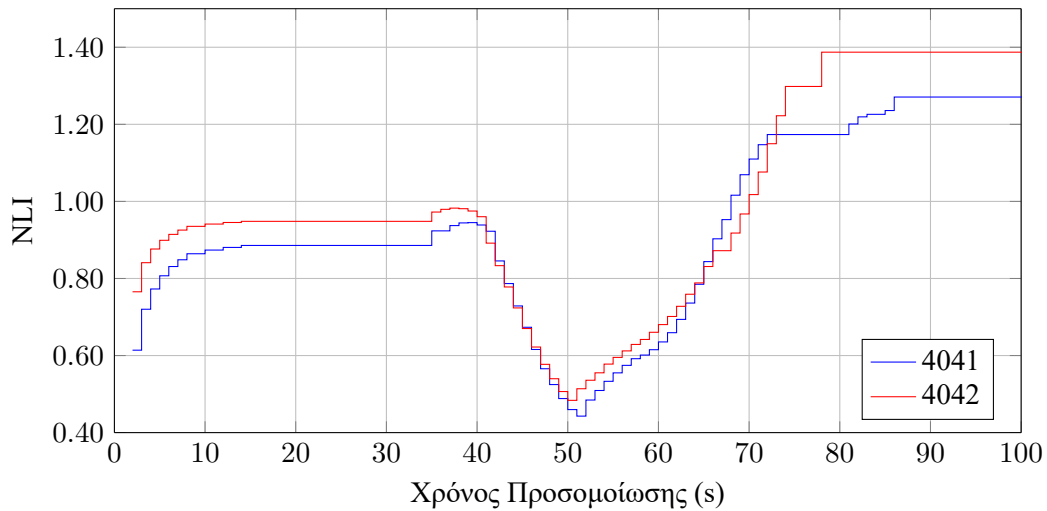
όπου $\tilde{V}_{measured}$ είναι ο μετρούμενος φασιθέτης της τάσης και \tilde{V}_{ideal} είναι ο πραγματικός φασιθέτης.

Με στόχο την αξιολόγηση του συστήματος σε συνθήκες παρουσίας θορύβου μέτρησης η προσέγγιση που χρησιμοποιείται είναι η προσθήκη θορύβου με κανονική κατανομή (Gaussian) στα αποτελέσματα τάσεων και ρευμάτων της πλήρους χρονικής προσομοίωσης. Χρησιμοποιήθηκε κανονική κατανομή με τυπική απόκλιση $\sigma = 0.01/3$ αμ και μέση τιμή $\mu = 0$ αμ. Αυτό φαίνεται και στο Σχ. 6.10, το οποίο απεικονίζει την τιμή του μέτρου μιας τάσης ζυγού YTY από την πλήρη προσομοίωση (V_s), μαζί με την υποτιθέμενη τιμή που θα προέκυπτε από μέτρηση (V_m), η οποία έχει θόρυβο με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν προηγουμένως.

6.1.4.1 Ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B)

Όπως και στην Υποεν. 6.1.3, το ΣΑ2 χρησιμοποιείται πρώτα στην οριακά ευσταθή περίπτωση, δηλαδή στο σενάριο με το αρχικό σημείο λειτουργίας B. Τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης παρουσιάζονται αναλυτικά στη σχετική έκθεση για το τυποποιημένο σύστημα δοκιμών, της επιτροπής της IEEE [Van15, σελ. 42–45]. Το βραχυκύκλωμα (που σε αυτήν την περίπτωση προσομοιώνεται) εκκαθαρίζεται με το άνοιγμα της γραμμής 4032–4044 και το σύστημα φτάνει σε νέα μόνιμη κατάσταση μετά από περίπου 100 s. Οι δείκτες NLI του ΣΑ2, όπως υπολογίζονται για αυτά τα αποτελέσματα, φαίνονται στο Σχ. 6.11. Οι αρχικές χαμηλές τιμές των δεικτών NLI (0.61 για τον 4041 και 0.77 για τον 4042) καθώς και οι επόμενες διακυμάνσεις, οφείλονται στα μεταβατικά του βραχυκυκλώματος και κυρίως στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Όπως φαίνεται, ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση, με θόρυβο και ταλαντώσεις, δεν σημαίνεται κανείς ψευδής συναγερμός από το σύστημα ανίχνευσης.

Μετά το αρχικό μεταβατικό φαινόμενο οι δείκτες NLI και των δύο συνοριακών ζυγών αρχίζουν να πέφτουν μετά τη χρονική στιγμή $t = 40$ s λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, που επαναφέρουν την ζήτηση στα προ της διαταραχής επίπεδα, αυξάνοντας την αγωγιμότητα των φορτίων. Παρόλα αυτά και οι



Σχήμα 6.11: Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ευσταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας B) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση Ramses

δύο δείκτες παραμένουν αρκετά πάνω από το σημείο σήμανσης συναγερμού ($NLI = 0$), μην πέφτοντας ποτέ κάτω από την τιμή 0.4.

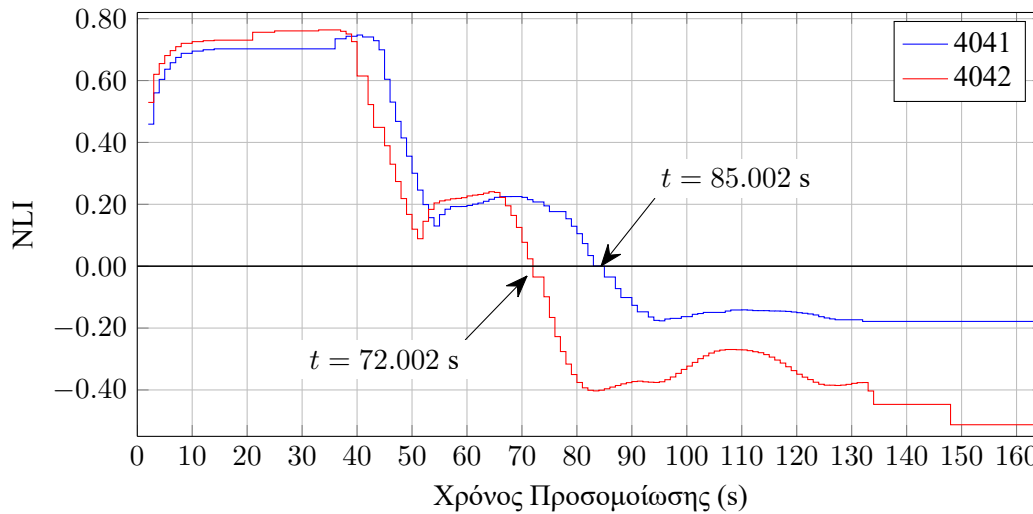
Εντέλει και οι δύο δείκτες σταθεροποιούνται μετά τη χρονική στιγμή $t = 86.002$ s σε τιμές αρκετά μεγαλύτερες της μονάδας (περίπου 1.27 για τον 4041 και 1.38 για τον 4042).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στη διαφορά της απόκρισης των δεικτών NLI μεταξύ της πλήρους, λεπτομερούς προσομοίωσης, που φαίνεται στο Σχ. 6.11, και της οιονεί στατικής προσέγγισης, που φαίνεται στο Σχ. 6.5. Από τη σύγκριση αυτών των σχημάτων, αν εξαιρεθεί η αρχική περίοδος, που στην πλήρη χρονική προσομοίωση περιλαμβάνει τα μεταβατικά του βραχυκυκλώματος, προκύπτει ότι η απόκριση των δεικτών μέχρι περίπου τη χρονική στιγμή $t = 50$ s είναι πανομοιότυπη. Όπως εξηγήθηκε στην Παρ. 6.1.3.1, στην οιονεί στατική προσέγγιση οι δείκτες από το σημείο αυτό και πέρα παραμένουν πρακτικά σταθεροί, καθώς με εξαίρεση μερικές κινήσεις των ΣΑΤΥΦ που λαμβάνουν χώρα περίπου τη χρονική στιγμή $t = 70$ s, δεν γίνεται κάποια άλλη αλλαγή στο σύστημα. Αντίθετα, στην πλήρη χρονική προσομοίωση, λόγω μεταβατικών και θορύβου ενεργοποιούνται περισσότερες μετρήσεις, οι οποίες οδηγούν σε αύξηση των τιμών των δεικτών NLI μετά τη χρονική στιγμή $t = 50$ s.

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να τονιστεί ότι, οι δείκτες είναι αδιάστατοι και δεν ενδιαφέρει η σχετική τους τιμή. Δηλαδή, δεν έχει νόημα ως προς τη σήμανση συναγερμού αστάθειας η απόσταση του δείκτη NLI από το μηδέν, αλλά το σημείο που ο συγκεκριμένος δείκτης γίνεται αρνητικός. Ως εκ τούτου, ακόμα και παρουσία θορύβου και βραχυπρόθεσμων μεταβατικών το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ2 μπορεί να αναγνωρίσει την οριακά ευσταθή περίπτωση, χωρίς να σημάνει συναγερμό.

6.1.4.2 Ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A)

Στην δεύτερη περίπτωση, που η προσομοίωση ξεκινά από το σημείο λειτουργίας A, οι αποκρίσεις στην ίδια διαταραχή (βραχυκύκλωμα κοντά στο ζυγό 4032 και εκκαθάριση με άνοιγμα της γραμμής 4032–4044) δίνονται και πάλι στην τεχνική έκθεση του συστήματος δοκιμών [Van15, σελ. 37–42]. Όπως φαίνεται στον Πίν. 6.1 η αλληλουχία ενεργοποίησης των ΣΠΥ των γεννητριών είναι ακριβώς ίδια με την αντίστοιχη που επιτυγχάνεται με την οιονεί στατική προσομοίωση. Η τελική ωστόσο κατάρρευση λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή $t = 163.90$ s, λόγω αποσυγχρονισμού, περίπου 10 s μετά την κατάρρευση στο WPSTAB, που όπως έχει αναφερθεί στην Παρ. 6.1.3.2 οφείλεται σε απώλεια του βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.



Σχήμα 6.12: Απόκριση δεικτών NLI συνοριακών ζυγών 4041 και 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση Ramses

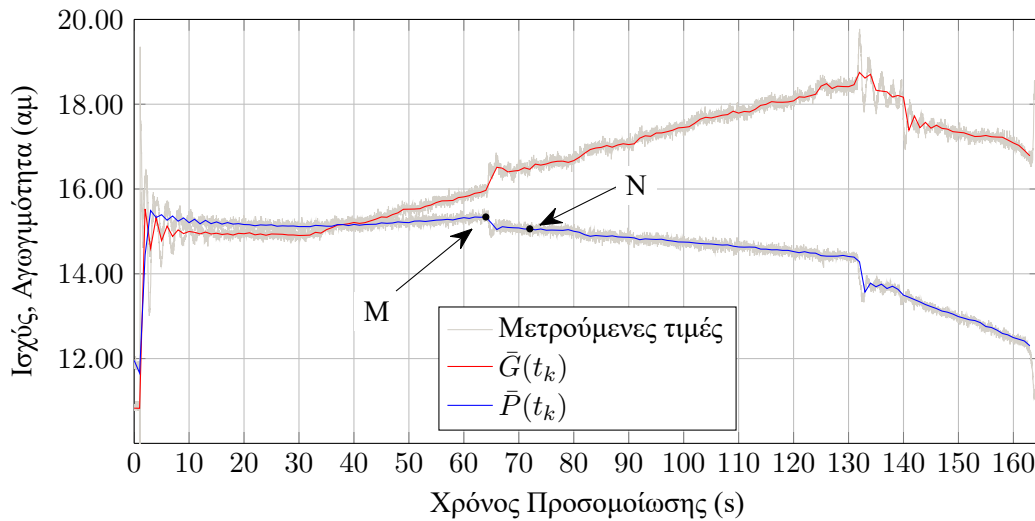
Οι δείκτες NLI των συνοριακών ζυγών 4041 και 4042 για αυτήν την περίπτωση φαίνονται στο Σχ. 6.12. Οι πρώτες τιμές των δεικτών υπολογίζονται περίπου 1 s μετά τη διαταραχή και είναι παρόμοιοι με τις αρχικές τιμές της ευσταθούς περίπτωσης που φαίνονται στο Σχ. 6.11, αν και ελαφρώς μειωμένοι, γεγονός που οφείλεται και στην αυξημένη φόρτιση του αρχικού σημείου λειτουργίας. Ο πρώτος δείκτης που περνάει το μηδέν και γίνεται αρνητικός, σημαίνοντας συναγερμό, είναι αυτός του ζυγού 4042, τη χρονική στιγμή $t = 72.002$ s, ακολουθούμενος από τον δείκτη του ζυγού 4041 τη χρονική στιγμή $t = 85.002$ s^{vi}.

Στο Σχ. 6.13 φαίνεται η απόκριση της ροής ενεργού ισχύος από τη Βόρεια περιοχή προς την Κεντρική περιοχή του συστήματος, μέσω του συνοριακού ζυγού 4042 καθώς και η αντίστοιχη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα G , από τον ίδιο ζυγό. Στο συγκεκριμένο σχήμα φαίνονται τόσο οι μετρούμενες τιμές (που περιέχουν θόρυβο) των αντίστοιχων μεγεθών, όσο και οι αντίστοιχοι κινητοί μέσοι όροι δευτερολέπτου ($\bar{P}(t_k)$ και $\bar{G}(t_k)$).

Ακριβώς όπως και στην οιονεί στατική προσομοίωση, πριν την έκδοση συναγερμού από τον αντίστοιχο ζυγό, η μεταφερόμενη ισχύς προς την Κεντρική περιοχή φτάνει ένα μέγιστο, πριν αρχίσει να μειώνεται, ενώ η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα συνεχίζει να αυξάνει, τη χρονική στιγμή $t = 64.002$ s, που αντιστοιχεί στο σημείο M στο Σχ. 6.13. Το σημείο αυτό προηγείται του αντίστοιχου σημείου αστάθειας του συστήματος, αλλά λόγω και πάλι της εξομάλυνσης που προσφέρουν οι κινητοί μέσοι όροι, ο αντίστοιχος συναγερμός αστάθειας σημαίνεται 8 s αργότερα.

Οι μικρές διαφορές στις χρονικές στιγμές (μεταξύ 2 και 14 περίπου δευτερολέπτων) που οι αντίστοιχοι δείκτες διασχίζουν το μηδέν (και σημαίνονται οι αντίστοιχοι συναγερμοί) ανάμεσα στην πλήρη χρονική προσομοίωση (Ramses) και στην οιονεί στατική προσέγγιση (WPSTAB) είναι αναμενόμενες και οφείλονται στο γεγονός πως η οιονεί στατική προσέγγιση προεικάζει την ισορροπία των βραχυπρόθεσμων φαινομένων σε κάθε βήμα προσομοίωσης ($\Delta t = 1$ s), ενώ αντίθετα στην πλήρη προσομοίωση το βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας θα επιτευχθεί λίγο αργότερα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η επί-

^{vi}Στη δημοσίευση [VLM16] οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι $t = 73.94$ s και $t = 83.94$ s. Η μικρή αυτή διαφορά οφείλεται στη χρήση του κατωφλίου απόρριψης μεταβολών μεταφερόμενης ισχύος ϵ_p το οποίο χρησιμοποιείται εδώ, δίνοντας ελάχιστα καλύτερα αποτελέσματα ως προς τον πρώτο συναγερμό. Οι αντίστοιχοι χρόνοι για την οιονεί στατική προσέγγιση παραμένουν ανεπηρέαστοι.



Σχήμα 6.13: Απόκριση εγχυόμενης ενεργού ισχύος P και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G (μετρούμενες και δειγματοληπτημένες τιμές κινητού μέσου όρου δευτερολέπτου) στο συνοριακό ζυγό 4042, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A) και εφαρμογή ΣΑ2, σε προσομοίωση Ramses. M: σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος από τη Βόρεια προς το Κεντρική περιοχή του συστήματος, N: ο αντίστοιχος NLI γίνεται αρνητικός

δραση της υπερδιέγερσης της γεννήτριας g7, τη χρονική στιγμή $t = 68$ s, θεωρείται ακαριαία για το WPSTAB, ενώ στο Ramses χρειάζεται χρόνο μερικών δευτερολέπτων μέχρι να εκδηλωθεί. Ένας άλλος λόγος για αυτήν την επιπλέον καθυστέρηση στην πλήρη προσομοίωση είναι η χρήση πολλαπλών βημάτων φιλτραρίσματος, μέσω κινητών μέσων όρων, για να εξαλειφθούν τα μεταβατικά φαινόμενα και ο θόρυβος.

Σε κάθε περίπτωση οι συναγερμοί σημαίνονται αρκετά νωρίτερα από την κατάρρευση (που στην πλήρη προσομοίωση επίσης καθυστερεί) και πολύ κοντά στο σημείο αστάθειας, με αποτέλεσμα την επάρκεια χρόνου για δράση διορθωτικών μέτρων, όπως την αποκοπή φορτίου από κάποιο σύστημα προστασίας συνδεδεμένο με την ανίχνευση αστάθειας.

6.1.5 Επίδραση ευαισθησίας φορτίου ως προς την τάση

Στην παρούσα υποενότητα γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της ευαισθησίας του φορτίου ως προς την τάση. Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται μόνο το πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB και το αρχικό σημείο λειτουργίας A. Όπως περιγράφεται στη σχετική τεχνική έκθεση [Van15], τα φορτία στο Nordic Test System θεωρούνται στατικά, που ακολουθούν το εκθετικό μοντέλο^{vii} με τον εκθέτη ενεργού ισχύος α ίσο με 1 (σταθερού ρεύματος) και τον εκθέτη της άεργου ισχύος β ίσο με 2 (σταθερής αγωγιμότητας). Στη συγκεκριμένη εφαρμογή οι εκθέτες αυτοί μεταβάλλονται από 0.5–1.5 για την ενεργό ισχύ και 1.5–2.5 για την άεργο ισχύ. Οι παράμετροι του ΣΑ2, παραμένουν ως έχουν, δηλαδή:

- Χρονικό διάστημα παρατήρησης μεταβολών: $\Delta T = 7$ s
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών φαινόμενης αγωγιμότητας: $\epsilon_G = 0.001$
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών εγχυόμενης ισχύος: $\epsilon_P = 0.001$

^{vii}Βλ. Υποεν. 2.2.7, σελ. 58.

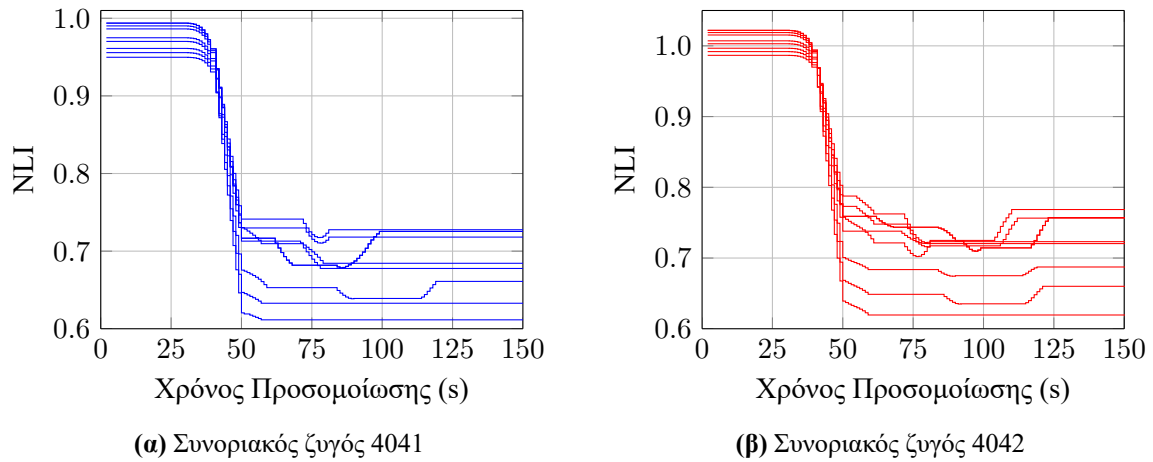
Πίνακας 6.2: Επίδραση κοινών εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΑ2, Nordic Test System, ασταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας Α), σε προσομοίωση WPSTAB

Εκθέτες		Κατάρρευση (s)	Σημείο αστάθειας (s)	Συναγερμός (NLI < 0)	
α	β			Ζυγός 4041 (s)	Ζυγός 4042 (s)
0.5	1.5	99	65	71	66
0.5	2.0	103	65	70	66
0.5	2.5	107	65	71	66
1.0	1.5	143	67	82	70
1.0	2.0	153	68	71	70
1.0	2.5	160	73	72	70
1.5	1.5	221	79	75	71
1.5	2.0	265	79	86	70
1.5	2.5	273	79	72	71

Σε πρώτη φάση μελετάται συνολικά η επίδραση της ευαισθησίας του φορτίου ως προς την τάση. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται κοινοί εκθέτες για ολόκληρο το σύστημα (Βόρεια, Κεντρική και Νότια Περιοχή), όπως φαίνονται στον σχετικό Πίν. 6.2. Ο συγκεκριμένος πίνακας περιλαμβάνει στις δύο πρώτες στήλες τους αντίστοιχους εκθέτες για την ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου, στην τρίτη στήλη τον χρόνο κατάρρευσης του συγκεκριμένου σεναρίου, στην τέταρτη στήλη ο χρόνος εμφάνισης της αστάθειας (σημείο που το σύστημα φτάνει στο όριο φόρτισης), που υπολογίζεται μέσω της ανάλυσης ευαισθησιών, όπως αναφέρθηκε και στην Παρ. 6.1.3.2. Οι δύο τελευταίες στήλες περιλαμβάνουν το χρόνο που οι αντίστοιχοι δείκτες διέρχονται από το μηδέν. Με έντονη γραμματοσειρά φαίνεται ο χρόνος που ο πρώτος δείκτης γίνεται αρνητικός και συνεπώς σημαίνεται συναγερμός αστάθειας από το ΣΑ2.

Από τον Πίν. 6.2 είναι εμφανής η ικανότητα του ΣΑ2 να ανιχνεύει την αστάθεια αρκετά νωρίς, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν κατάλληλα αποτρεπτικά μέτρα. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, όσο πιο “ανελαστικό” γίνεται το φορτίο, τόσο πιο νωρίς καταρρέει, αλλά επίσης και πιο νωρίς φτάνει στο όριο φόρτισης του και αντίστοιχα πιο νωρίς σημαίνεται και ο συναγερμός από το ΣΑ2. Μία άλλη παρατήρηση (που έχει γίνει επίσης και για τα συστήματα που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES, βλ. Παρ. 5.2.4.4) αφορά το γεγονός πως η επίδραση της ενεργού ισχύος του φορτίου είναι πιο έντονη σε σχέση με αυτήν της αέργου ισχύος.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων ο συναγερμός αστάθειας εκδίδεται λίγα δευτερόλεπτα μετά το όριο φόρτισης του συστήματος. Εξαιρεση αποτελούν οι τέσσερις τελευταίες περιπτώσεις, στις οποίες ο συναγερμός αστάθειας σημαίνεται μερικά δευτερόλεπτα πιο νωρίς. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς με βάση τη συμπεριφορά της καταναλισκόμενης ισχύος σε μια ευάλωτη περιοχή ενός συστήματος (βλ. Παρ. 3.2.2.2), πριν το όριο φόρτισης η κατανάλωση στην ευάλωτη περιοχή θα φτάσει σε ένα μέγιστο και θα αρχίσει να μειώνεται. Δεδομένου ότι όσο το φορτίο γίνεται πιο ελαστικό (μεγαλύτεροι εκθέτες) εμφανίζει τόσο μεγαλύτερη εξάρτηση από την τάση, καθώς η Κεντρική περιοχή του συστήματος φτάνει στο όριο φόρτισης και τα περισσότερα ΣΑΤΥΦ εξαντλούνται, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η τάση να μένει ανεξέλεγκτη και η καταναλισκόμενη ισχύς (και επομένως και η μεταφερόμενη από το διάδρομο ισχύς) να αρχίσει να πέφτει πιο νωρίς. Καθώς ο υπολογισμός της αστάθειας τάσης μέσω του δείκτη NLI βασίζεται σε ακριβώς αυτήν την ιδιότητα, είναι εμφανές πως σε φορτία που πλησιάζουν τα μοντέλα σταθερής αγωγιμότητας, το ΣΑ2 θα προεξοφλεί, έστω και για λίγα δευτερόλεπτα, την αστάθεια. Να σημειωθεί πως τα αντίστοιχα σενάρια, με αρχικό σημείο λειτουργίας Β, είναι όλα ευσταθή, ενώ οι αντίστοιχοι δείκτες NLI και στους δύο συνοριακούς ζυγούς παραμένουν πάνω από το μηδέν, χωρίς να σημαίνεται κανείς ψευδής συναγερμός, όπως φαίνεται από το Σχ. 6.14 που περιλαμβάνει συνολικά όλους τους δείκτες NLI



Σχήμα 6.14: Επίδραση κοινών εκθετών φορτίου στους δείκτες NLI, Nordic Test System, ευσταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας B), σε προσομοίωση WPSTAB

για τους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042 για όλα τα σενάρια.

Σε δεύτερη φάση εφαρμόστηκαν διαφορετικοί εκθέτες σε καθένα από τα φορτία της Κεντρικής περιοχής του συστήματος, χρησιμοποιώντας τα ίδια σύνολα ψευδοτυχαίων εκθετών που παρουσιάστηκαν στην Παρ. 5.2.4.4 και περιλαμβάνονται στον Πίν. Γ.7 του Παραρτήματος Γ. Πρόκειται για εκθέτες που έχουν προκύψει από γεννήτρια τυχαίων αριθμών με ομοιόμορφη κατανομή^{viii}, με τον εκθέτη της ενεργού ισχύος του φορτίου να βρίσκεται στην περιοχή 0.5–1.5 και της αέργου ισχύος στην περιοχή 1.5–2.5. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίν. 6.3, ο οποίος έχει την ίδια μορφή με τον Πίν. 6.2, απλά οι δύο πρώτες στήλες έχουν αντικατασταθεί με τον αριθμό σεναρίου του Πίν. Γ.7 του Παραρτήματος Γ.

Από τον Πίν. 6.3 είναι εμφανές, πως το συγκεκριμένο σύστημα ανίχνευσης είναι σε θέση να εντοπίσει την αστάθεια, πολύ κοντά στο αντίστοιχο όριο φόρτισης, ανεξάρτητα από την ευαισθησία των φορτίων ως προς την τάση. Όπως φαίνεται ο μέσος όρος που οι δείκτες γίνονται μηδέν είναι πολύ κοντά στους χρόνους που αντιστοιχούν σε εκθέτες $\alpha = 1$ και $\beta = 2$, οι οποίοι αποτελούν και τις μέσες τιμές των αντίστοιχων ομοιόμορφων κατανομών.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, όλα τα σενάρια με αρχικό σημείο λειτουργίας B είναι ευσταθή, με τους δείκτες NLI να παραμένουν πάνω από 0.61, όπως φαίνεται στο αντίστοιχο Σχ. 6.15, που περιλαμβάνει την απόκριση των δεικτών των δύο συνοριακών ζυγών για όλα τα σενάρια.

6.1.6 Επίδραση χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών στον δείκτη NLI

Στην παρούσα υποενότητα εξετάζεται η επίδραση του χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών ΔT , στο οποίο υπολογίζονται οι μεταβολές της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος ΔP και της φαινομένου ωμικής αγωγιμότητας ΔG , πάνω στο δείκτη NLI και ιδιαίτερα το σημείο που γίνεται αρνητικός, σημαίνοντας συναγερμό.

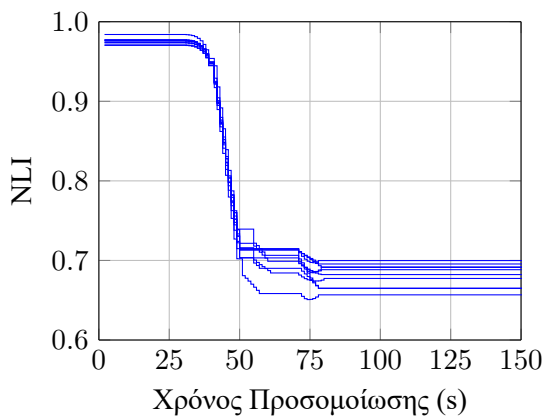
Όπως έχει τονιστεί στην Εν. 4.4 στόχος του δείκτη NLI (και κατά συνέπεια και του ΣΑ2) είναι να ανιχνεύσει την μακροπρόθεσμη τάση των μεταβολών ΔP και ΔG , ώστε να εντοπίσει το σημείο στο οποίο η εύαλωτη περιοχή φτάνει την μέγιστη κατανάλωση ενεργού ισχύος. Το σημείο αυτό προηγείται κατά κάποια δευτερόλεπτα του ορίου φόρτισης του συνολικού συστήματος, που αντιστοιχεί στο πραγματικό όριο ευστάθειας^{ix}. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να απομονωθεί η μακροπρόθεσμη τάση των

^{viii}Χρησιμοποιήθηκε η ρουτίνα “rand” του Matlab®.

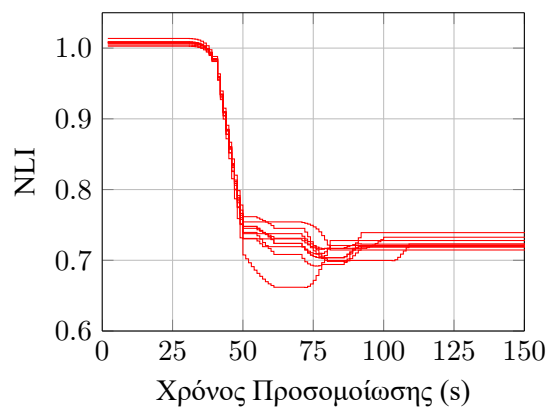
^{ix}Για τη σχέση μεταξύ μεταφερόμενης ισχύος προς μια εύαλωτη περιοχή και το όριο φόρτισης βλ. Παρ. 3.2.2.2, σελ. 88.

Πίνακας 6.3: Επίδραση διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στην λειτουργία του ΣΑ2, Nordic Test System, ασταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας A), σε προσομοίωση WPSTAB

Σενάριο	Κατάρρευση (s)	Σημείο αστάθειας (s)	Συναγερμός (NLI < 0)	
			Ζυγός 4041 (s)	Ζυγός 4042 (s)
1	140	67	71	70
2	159	73	72	70
3	175	75	72	71
4	153	74	72	71
5	143	68	71	70
6	154	68	72	70
7	152	68	71	70
8	151	73	72	71
9	153	69	71	70
10	136	66	72	70
Μέση Τιμή:	152	70	72	70

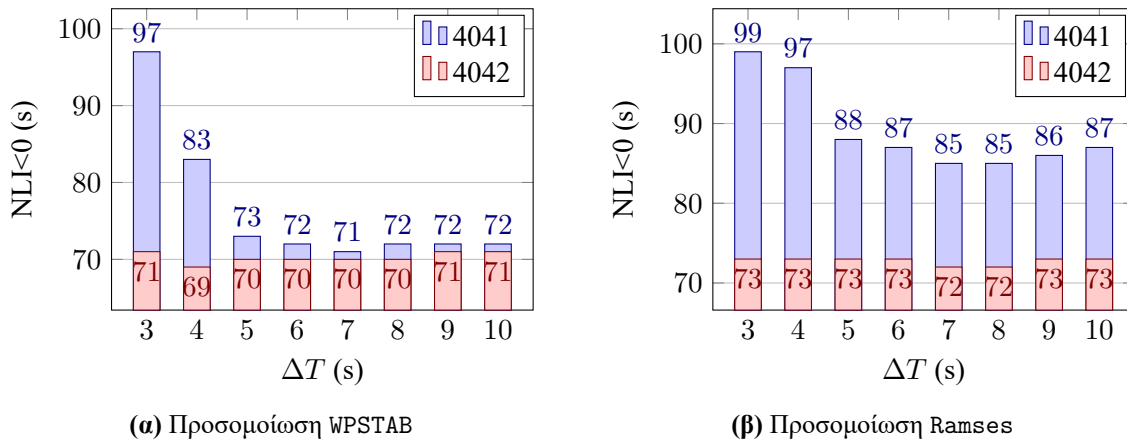


(α) Συνοριακός ζυγός 4041



(β) Συνοριακός ζυγός 4042

Σχήμα 6.15: Επίδραση διαφοροποιημένων εκθετών φορτίου στους δείκτες NLI, Nordic Test System, ευσταθή σενάρια (σημείο λειτουργίας B), σε προσομοίωση WPSTAB



Σχήμα 6.16: Επίδραση χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών ΔT του ΣΑ2 στο δείκτη NLI, Nordic Test System, ασταθές σενάριο (σημείο λειτουργίας A)

μεταβολών από θόρυβο και διακριτά συμβάντα, τα οποία προκαλούν παροδική μεταβολή σε αντίθετη κατεύθυνση από τη μακροπρόθεσμη τάση του συστήματος.

Ο σημαντικότερος παράγοντας σε αυτήν την προσπάθεια φιλτραρίσματος (πέρα από τη χρήση κινητών μέσων όρων) είναι το χρονικό διάστημα παρατήρησης των μεταβολών ΔT . Το συγκεκριμένο διάστημα πρέπει να έχει μια τέτοια τιμή ώστε αφενός να μην εμπλέκεται με βραχυπρόθεσμα φαινόμενα που διαρκούν 1 με 2 s, όπως π.χ. οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, αλλά και να μην ξεπερνά την εξομάλυνση που προσφέρουν οι κινητοί μέσοι όροι, που στη συγκεκριμένη περίπτωση λόγω του ότι χρησιμοποιούνται 10 δείγματα κινητών μέσων όρων δευτερολέπτου, δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από 10 s.

Αυξάνοντας το χρονικό διάστημα ΔT , σημαίνει ότι εξετάζεται η συμπεριφορά των μεταβολών ΔP και ΔG σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου, με αποτέλεσμα οι μεταβολές να γίνονται πιο γρήγορα αντιληπτές από τον δείκτη NLI και ο συναγερμός να σημειωθεί πιο νωρίς. Από την άλλη πλευρά όσο το ΔT πλησιάζει τα 10 s το φιλτράρισμα που χρησιμοποιείται για τους δείκτες NLI μέσω κινητών μέσων όρων 10 δειγμάτων, στην πράξη ακυρώνεται. Αυτό σε ορισμένες περιπτώσεις όπου υπάρχει απότομη αύξηση φορτίου η οποία οδηγεί σε απότομες ανακατανομές της μεταφερόμενης ισχύος στην ευάλωτη περιοχή διαμέσου των συνοριακών ζυγών, όπως θα αναλυθεί και στην Εν. 6.2, δυνητικά μπορεί να οδηγήσει σε σήμανση ψευδών συναγερμών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής του χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών ΔT του ΣΑ2 στο Nordic Test System με το ασταθές σενάριο, τόσο για οιονεί στατική προσέγγιση, όσο και για πλήρη χρονική προσομοίωση με βραχυπρόθεσμα μεταβατικά και θόρυβο. Οι άλλες δύο παράμετροι του συστήματος αντίχενωσης, δηλαδή τα κατώφλια απόρριψης μεταβολών, παραμένουν ως έχουν: $\epsilon_G = \epsilon_P = 0.001$.

Σε όλες τις περιπτώσεις που περιλαμβάνονται σε αυτήν την συγκριτική μελέτη, στο αντίστοιχο ευσταθές σενάριο δεν σημαίνεται κανένας (εσφαλμένος) συναγερμός.

Η μεταβολή στο χρόνο που οι δείκτες NLI, στους οριακούς ζυγούς 4041 και 4042, γίνονται αρνητικοί, για διάφορες τιμές της παραμέτρου ΔT , φαίνεται στο Σχ. 6.16 τόσο για την προσομοίωση στο WPSTAB όσο και στο Ramses.

Για την οιονεί στατική προσομοίωση, που είναι απαλλαγμένη από θόρυβο μέτρησης και ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις) ο νωρίτερος συναγερμός σημαίνεται τη χρονική στιγμή $t = 69$ s που αντιστοιχεί σε $\Delta T = 4$ s (Σχ. 6.16α). Αντίθετα, στην πλήρη χρονική προσομοίωση ο νωρίτερος συναγερμός εκδίδεται τη χρονική στιγμή $t = 72$ s που αντιστοιχεί σε $\Delta T = 7$ s (Σχ. 6.16β). Αυτός είναι ο λόγος που

επιλέχθηκε η συγκεκριμένη τιμή για την παράμετρο ΔT , στις Υποεν. 6.1.3 και 6.1.4. Σε κάθε περίπτωση πάντως η ανίχνευση της αστάθειας εντοπίζεται και στις δύο μεθόδους προσομοίωσης αρκετά νωρίς, με τον πρώτο συναγερμό να σημαίνεται μεταξύ 69 με 73 s, κοντά στο σημείο εμφάνισης της αστάθειας, εξασφαλίζοντας αρκετό χρόνο για τη χρήση διορθωτικών μέτρων.

Από την άλλη πλευρά, η επίδραση του χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών είναι εμφανής στο δεύτερο συνοριακό ζυγό του συστήματος, τον 4041. Όσο πιο μικρό είναι το ΔT τόσο πιο μικρές είναι οι προκύπτουσες μεταβολές των ΔP και ΔG και επομένως ο αντίστοιχος δείκτης NLI γίνεται αρνητικός με μεγαλύτερη καθυστέρηση.

6.2 Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Στην παρούσα ενότητα γίνεται εφαρμογή του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις φασιθετών στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ΕΔΣ). Καθώς τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει από τη μία πλευρά σημαντικές ενισχύσεις στο ηπειρωτικό σύστημα, με την ένταξη νέων μονάδων κοντά στην περιοχή της πρωτεύουσας (π.χ. Κόρινθος Power, Αλιβέρι 5 κλπ.) και την προβλεπόμενη κατασκευή νέων γραμμών ΥΥΤ 400 kV, ιδιαίτερα προς την ευπαθή περιοχή της Πελοποννήσου και από την άλλη πλευρά, λόγω οικονομικής κρίσης, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένη, το αποτέλεσμα είναι ότι κατά τα τελευταία χρόνια το ΕΔΣ είναι σε ικανοποιητική κατάσταση ασφαλείας ως προς την ευστάθεια τάσης.

Στόχος της παρούσας ενότητας είναι να φανεί κατά πόσον η εφαρμογή του ΣΑ2 μπορεί να ανιχνεύσει την αστάθεια σε ένα πραγματικό γεγονός, όπως η κατάρρευση τάσης και η διακοπή του Νοτίου συστήματος στις 12 Ιουλίου 2004. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται μία παραλλαγή του σεναρίου του περιστατικού της 12^{ης} Ιουλίου 2004, για να δημιουργηθούν δύο σενάρια, ένα οριακά ευσταθές και ένα οριακά ασταθές ώστε να φανεί η επιλεκτικότητα της μεθόδου, δηλαδή η ικανότητα της να διακρίνει τις ευσταθείς από τις ασταθείς περιπτώσεις.

Η διάρθρωση της υπόλοιπης ενότητας είναι η ακόλουθη. Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην τοπολογία του ΕΔΣ και στον τρόπο εφαρμογής του ΣΑ2 σε αυτήν την περίπτωση, για να ακολουθήσει μια μικρή αναφορά στο περιστατικό της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η παραλλαγή του ΕΔΣ καθώς και τα δύο σενάρια που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

6.2.1 Περιγραφή Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος και παραμέτρων ΣΑ2

Όπως είναι γνωστό, το ΕΔΣ περιλαμβάνει μεγάλη γεωγραφική ανισοκατανομή παραγωγής και κατανάλωσης, με το σημαντικότερο μέρος των σταθμών παραγωγής να βρίσκεται στο Βορρά και το μεγαλύτερο ποσοστό φορτίου να βρίσκεται στο νότιο σύστημα και ιδιαίτερα στην περιοχή της Πρωτεύουσας. Αυτή η ανισοκατανομή έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλες ροές ισχύος στον άξονα βορρά - νότου, κυρίως μέσω των γραμμών ΥΥΤ των 400 kV.

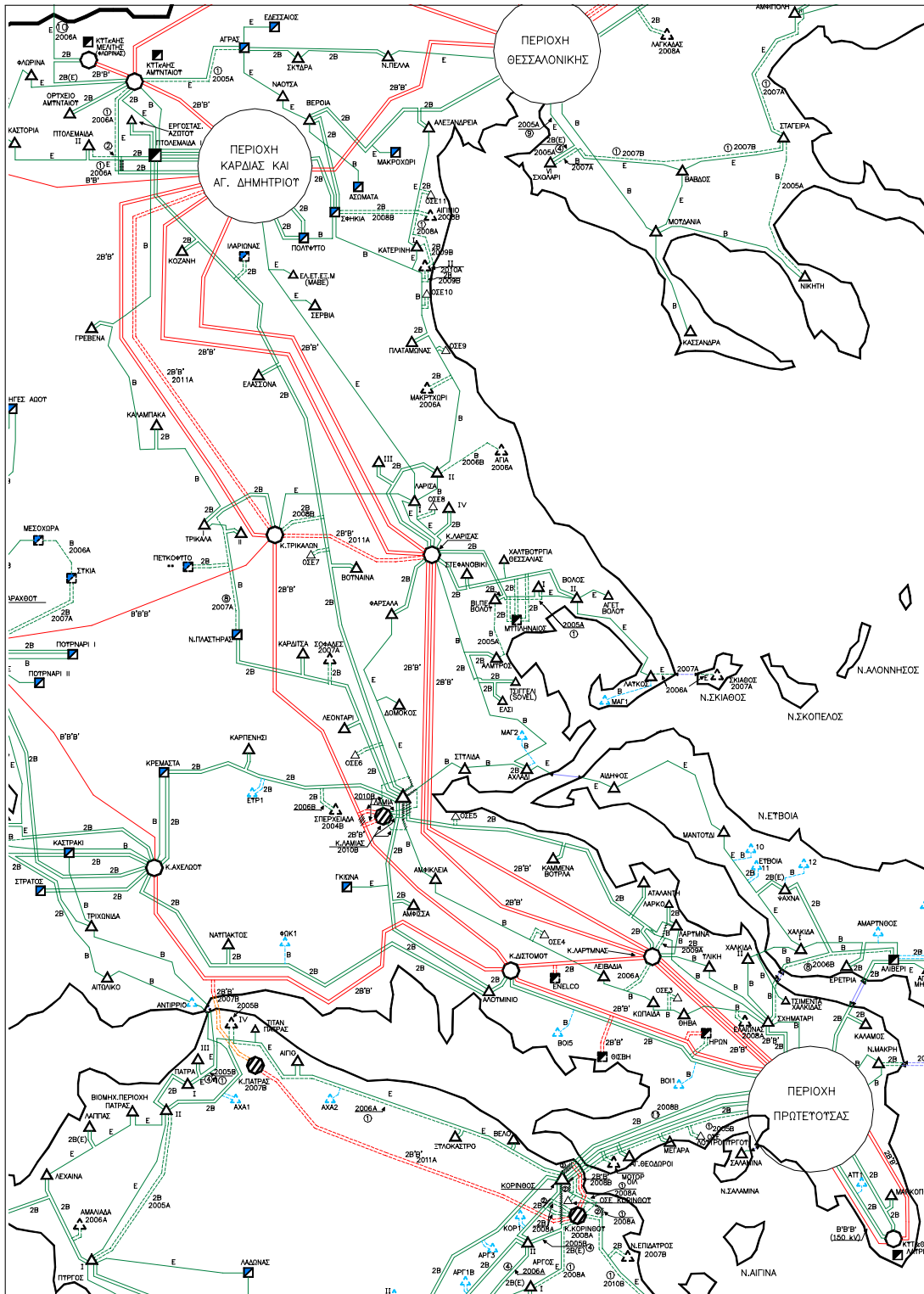
Οι γραμμές αυτές φαίνονται με κόκκινο συνεχές χρώμα στο Σχ. 6.17, που περιλαμβάνει ένα τμήμα του μονογραμμικού διαγράμματος του ΕΔΣ του 2004.

Υπάρχουν συνολικά τρεις (3) γραμμές διπλού κυκλώματος 400 kV, που ενώνουν τα ακόλουθα ΚΥΤ:

1. ΚΥΤ Διστόμου – ΚΥΤ Κουμουνδούρου
2. ΚΥΤ Λάρυμνας – ΚΥΤ Αχαρνών
3. ΚΥΤ Λάρυμνας – ΚΥΤ Αγ. Στεφάνου

Οι αντίστοιχοι ζυγοί περιλαμβάνονται στον Πίν. 6.4, όπου οι δύο αριστερές στήλες αφορούν τα ΚΥΤ της περιοχής των Αθηνών, τα οποία φαίνονται και στο Σχ. 6.18.

6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



Σχήμα 6.17: Διάδρομος μεταφοράς 400 kV από το Βόρειο σύστημα προς την περιοχή των Αθηνών. Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα 2004. Πηγή: [ΑΔΜ02]

Πίνακας 6.4: Συνοριακοί ζυγοί άφιξης περιοχής Αθηνών για εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης ΣΑ2 και αντίστοιχοι συνοριακοί ζυγοί αναχώρησης, μέσω διασύνδεσης γραμμών 400 kV

ΚΥΤ (400 kV)	Συνοριακός Ζυγός Άφιξης	ΚΥΤ (400 kV)	Συνοριακός Ζυγός Αναχώρησης
Κουμουνδούρου	620 ^α	Διστόμου	404
Κουμουνδούρου	939 ^α	Διστόμου	404
Αχαρνών	610	Λάρυμνας	395
Αχαρνών	1915 ^β	Λάρυμνας	395
Αγ. Στεφάνου	648 ^γ	Λάρυμνας	395

^α Οι ζυγοί 620 και 939 είναι συνδεδεμένοι με κλειστό διακόπτη διασύνδεσης (coupler).

^β Ο ζυγός 1915 είναι ανοικτός.

^γ Ο ζυγός 648 συνδέεται με γραμμή διπλού κυκλώματος με το ΚΥΤ Λάρυμνας.

Επειδή όπως αναφέρθηκε, η κύρια ροή της ισχύος από το Βόρειο προς το Νότιο σύστημα γίνεται μέσω των γραμμών μεταφοράς 400 kV, μπορεί να θεωρηθεί πως ο διάδρομος μεταφοράς αποτελείται μόνο από αυτές τις γραμμές οι οποίες πλέον ορίζουν ένα σύνολο διαχωρισμού στο επίπεδο ΥΥΤ. Χαρακτηριστικά να αναφερθεί, ότι στο στιγμιότυπο που θα αναλυθεί στη συνέχεια της παρούσας ενότητας η αρχική ροή ισχύος προς το Νότιο σύστημα μέσω των 400 kV είναι περίπου 1760 MW έναντι μόνο 320 MW στα 150 kV, που σημαίνει πως η ροή στην ΥΤ είναι μόνο περίπου 15% της συνολικής ροής ισχύος προς το Νότιο σύστημα. Δεδομένου μάλιστα ότι στη μεταφερόμενη ισχύ μέσω των γραμμών 150 kV περιλαμβάνεται και μέρος της παραγωγής των περίπου 280 MW του ΑΗΣ Αλιβερίου, που αποτελεί κομμάτι του Νοτίου συστήματος και όπως θα φανεί στη συνέχεια, παίζει βασικό ρόλο στο εξεταζόμενο σενάριο, φαίνεται πως το πραγματικό ποσοστό ροής από το Βόρειο σύστημα μέσω των γραμμών 150 kV είναι πραγματικά μικρό.

Από την ανωτέρω ανάλυση είναι εμφανές ότι η περιοχή της πρωτεύουσας αποτελεί δυνητικά μια ευάλωτη περιοχή του ΕΔΣ η οποία διασυνδέεται με το υπόλοιπο σύστημα κυρίως μέσω του διαδρόμου μεταφοράς που σχηματίζουν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV και επομένως, μπορεί να εφαρμοστεί το ΣΑ2 για ανίχνευση αστάθειας μέσω μετρήσεων φασιθετών τάσης και ρεύματος στους ζυγούς άφιξης αυτών των γραμμών.

Συγκεκριμένα, όπως και στην περίπτωση του τυποποιημένου συστήματος δοκιμών Nordic Test System και σε αναλογία με τους ορισμούς της Παρ. 3.2.2.2, μπορούν να οριστούν οι αντίστοιχοι συνοριακοί ζυγοί άφιξης στα 400 kV των ΚΥΤ της πρωτεύουσας, στους οποίους θα θεωρηθεί ότι είναι εγκατεστημένο το ΣΑ2. Οι ζυγοί αυτοί φαίνονται στη δεύτερη στήλη του Πίν. 6.4.

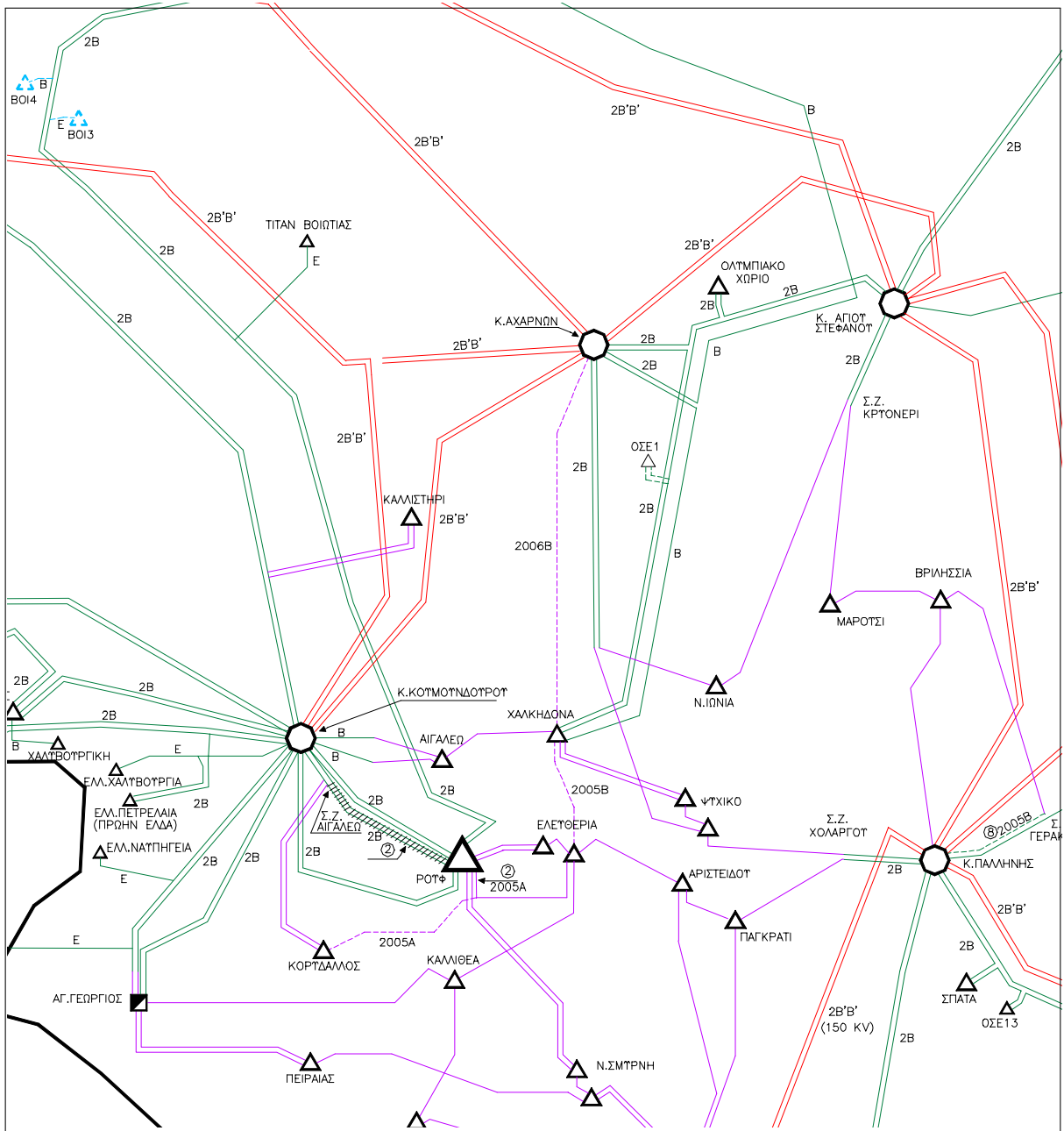
Καθώς στα στιγμιότυπα που θα εξετασθούν, οι ζυγοί 939 και 620 είναι συνδεδεμένοι με κλειστό διασυνδετικό διακόπτη (coupler) και συνδέονται με τον ίδιο ζυγό στο ΚΥΤ Διστόμου, στη συνέχεια θα θεωρείται ότι πρόκειται για έναν ζυγό, τον 620, ο οποίος συνδέεται με γραμμή διπλού κυκλώματος με τον ζυγό 404 στο ΚΥΤ Διστόμου.

Οι παράμετροι λειτουργίας του ΣΑ2 σε αυτήν την εφαρμογή είναι:

- Χρονικό διάστημα παρατήρησης μεταβολών: $\Delta T = 3 \text{ s}$
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών φαινόμενης αγωγιμότητας: $\epsilon_G = 0.001$
- Κατώφλι απόρριψης μεταβολών μεταφερόμενης ισχύος: $\epsilon_P = 0.001$

Για την προσομοίωση του ΣΑ2 θα χρησιμοποιηθεί το πρόγραμμα WPSTAB, με βήμα προσομοίωσης $\Delta t = 1 \text{ s}$, ως εκ τούτου η διαδικασία υπολογισμού των δεικτών είναι ακριβώς ίδια με αυτήν που αναφέρει στην Υποεν. 6.1.3, με μόνη διαφοροποίηση πλέον ότι οι μεταβολές της μεταφερόμενης ισχύος

6.2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ



Σχήμα 6.18: ΚΥΤ περιοχής Αθηνών. Πηγή: [ΑΔΜ02]

και της φαινόμενης αγωγιμότητας δεν υπολογίζονται σε διάστημα 7 s, αλλά 3 s. Όπως, φάνηκε στην Υποεν. 6.1.6, η συγκεκριμένη επιλογή του χρονικού διαστήματος μπορεί να οδηγήσει σε ενδεχόμενη καθυστέρηση σήμανσης συναγερμού αστάθειας αλλά δεν κινδυνεύει να δώσει λανθασμένη ένδειξη, λόγω καλύτερου φιλτραρίσματος που επιτυγχάνει. Τρεις είναι οι λόγοι πιθανού εσφαλμένου συναγερμού στην συγκεκριμένη περίπτωση, αν ληφθεί μεγαλύτερο διάστημα παρατήρησης των μεταβολών.

Ο πρώτος σχετίζεται με το μέγεθος του συστήματος, το οποίο αποτελείται από πολλές εκατοντάδες ζυγούς και άλλα στοιχεία των οποίων η απόκριση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα δημιουργεί φαινόμενα ταυτοχρονισμού, με αποτέλεσμα πολλά γεγονότα να συμβαίνουν στο ίδιο χρονικό βήμα. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν σημαντικές και απότομες αυξομειώσεις στα φορτία και στην παραγωγή, που επιδρούν παροδικά αντίθετα στην τάση των μεταβολών ΔP και ΔG και μπορεί να εκδοθεί λανθασμένος συναγερμός, χωρίς απαραίτητα να επέρχεται αστάθεια. Ο τρίτος και τελευταίος λόγος είναι ότι το δίκτυο εμφανίζει πολυπλοκότερη τοπολογία, με διασυνδέσεις και στα 150 kV που αν και μικρές (και για αυτό δεν έχουν ληφθεί υπόψη, όπως εξηγήθηκε) σε οριακές καταστάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε άλλες ροές ισχύος από το βορρά προς την περιοχή της πρωτεύουσας.

Με την επιλογή πάντως των προαναφερθέντων παραμέτρων, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 δεν εκδίδει λανθασμένο συναγερμό. Με βάση αυτά, οι σχέσεις (6.4), για τον υπολογισμό των μεταβολών της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος και της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας, παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta G_k = \Delta G(t_k) = \bar{G}(t_k) - \bar{G}(t_k - 3) = G(t_k) - G(t_k - 3) \quad (6.7\alpha)$$

$$\Delta P_k = \Delta P(t_k) = \bar{P}(t_k) - \bar{P}(t_k - 3) = P(t_k) - P(t_k - 3) \quad (6.7\beta)$$

οι οποίες υπολογίζονται αν και μόνο αν:

$$\Delta G(t_k)/G(t_k - 3) \geq 0.001 \quad (6.8\alpha)$$

$$|\Delta P(t_k)/P(t_k - 3)| \geq 0.001 \quad (6.8\beta)$$

Για τα πρώτα 3 δείγματα το $t_k - 3$ στις σχέσεις (6.7) και (6.8), αντικαθίσταται με το $t_1 = 0$, δηλαδή το πρώτο δείγμα.

Τα φίλτρα των κινητών μέσων όρων των 10 δειγμάτων, που έχουν εισαχθεί για την εξομάλυνση των δεικτών NLI αλλά και των ΔG και ΔP , εξακολουθούν να υφίστανται.

Καθώς για τον υπολογισμό των δεικτών απαιτούνται οι ροές ενεργού ισχύος οι οποίες και υπολογίζονται από τα αντίστοιχα ρεύματα, πρέπει να οριστούν τα *σύνολα εξωτερικών συνδέσεων* για κάθε συνοριακό ζυγό άφιξης. Το καθένα από αυτά τα σύνολα περιλαμβάνει τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης με τους οποίους συνδέεται ο κάθε συνοριακός ζυγός άφιξης μέσω του διαδρόμου μεταφοράς^x. Με βάση τον Πίν. 6.4, στην προκειμένη περίπτωση τα σύνολα αυτά είναι:

$$K_{610} = \{395\} \quad (6.9\alpha)$$

$$K_{1915} = \{395\} \quad (6.9\beta)$$

$$K_{620} = \{404\} \quad (6.9\gamma)$$

$$K_{648} = \{395\} \quad (6.9\delta)$$

Ως εκ τούτου, για τις ακόλουθες εφαρμογές θα θεωρηθεί ότι το ΣΑ2 είναι ενεργό και στα 3 ΚΥΤ της πρωτεύουσας που έχουν αναφερθεί, με εγκατάσταση συστήματος μέτρησης φασιθετών για την τάση σε όλους τους συνοριακούς ζυγούς άφιξης και ρεύματος για όλους τους κλάδους που προκύπτουν από τις

^xΒλ. και Παρ. 3.2.2.2 και Υποεν. 6.1.2.

σχέσεις (6.9). Η αντίστοιχη προσομοίωση από το WPSTAB γίνεται ακολουθώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην Υποεν. 4.5.2, χωρίς προσθήκη θορύβου μέτρησης ή βραχυπρόθεσμων μεταβατικών και τιμές των παραμέτρων του ΣΑ2 αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η κοινή βάση ισχύος για όλα τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε ανά μονάδα τιμές είναι τα 100 MW.

6.2.2 Διακοπή της 12^{ης} Ιουλίου 2004

Στην παρούσα υποενότητα γίνεται μια σύντομη αναφορά στο πραγματικό περιστατικό διακοπής που έλαβε χώρα στο ΕΔΣ την 12^η Ιουλίου 2004. Αναλυτικά η περιγραφή του εν λόγω περιστατικού γίνεται στη διδακτορική διατριβή [Νικ07, Κεφ. 6], στις δημοσιεύσεις [VNT05, VNT06] καθώς και στο πόρισμα της επιτροπής διερεύνησης του συγκεκριμένου συμβάντος [Επι04]. Συνεπώς, θα αναφερθούν μόνο τα βασικά σημεία του συγκεκριμένου περιστατικού, χωρίς περαιτέρω λεπτομέρειες σε σχέση με τον τρόπο προσομοίωσης και τις υπόλοιπες παραδοχές οι οποίες αναφέρονται στις ανωτέρω πηγές.

Το καλοκαίρι του 2004, ενόψει και της διεξαγωγής των Ολυμπιακών Αγώνων τον Αύγουστο του ίδιου έτους, αλλά και της συνεχιζόμενης, εκείνη την περίοδο, αύξησης του φορτίου τους καλοκαιρινούς μήνες, είχαν προγραμματιστεί διάφορα έργα ενίσχυσης του συστήματος στην περιοχή της πρωτεύουσας, τα οποία κατά την κρίσιμη ημέρα της διακοπής δεν είχαν ακόμα παραδοθεί. Επιπλέον στοιχεία του συστήματος μεταφοράς των 150 kV από τις μονάδες κοντά στα φορτία της Αττικής την ίδια μέρα, δεν ήταν διαθέσιμα για διάφορους λόγους [Επι04]:

- Ένα κύκλωμα της γραμμής των 150 kV από τον σταθμό παραγωγής του Λαυρίου προς το ΚΥΤ Παλλήνης.
- Δύο καλώδια 150 kV που συνδέουν το σταθμό του Αγ. Γεωργίου με την περιοχή του Πειραιά και της Καλλιθέας.
- Ένα από τα τέσσερα κυκλώματα που συνδέουν το ΚΥΤ Κουμουνδούρου με τον σταθμό του Αγ. Γεωργίου.

Επιπλέον, όπως προέκυψε από νεότερη ανάλυση των στοιχείων της εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας τάσεως σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) υπήρχε ένα ακόμα κύκλωμα εκτός. Πρόκειται για το ένα κύκλωμα της γραμμής 400 kV μεταξύ των ΚΥΤ Λάρυμνας και Αχαρνών (βλ. Πίν. 6.4).

Συνοπτικά η αλληλουχία γεγονότων που οδήγησαν στην σβέση (κατάρρευση) του νότιου τμήματος του ΕΔΣ είναι τα ακόλουθα [Νικ07, Επι04]: Στις 7:08 της 12^{ης} Ιουλίου 2004, η μονάδα Νο. II (ισχύος 300 MW) του σταθμού παραγωγής του Λαυρίου, βγαίνει εκτός λόγω βλάβης στο σύστημα αδιάλειπτης τροφοδοσίας (UPS). Η εν λόγω μονάδα συγχρονίστηκε πάλι κατά τις 12:01. Σε αυτό το σημείο το φορτίο είχε ήδη ανέλθει στα 9160 MW και οι τάσεις στην περιοχή της Αθήνας έπεφταν συνεχώς φτάνοντας το 90% της ονομαστικής τους τιμής. Η πτώση αυτή των τάσεων σταμάτησε μόλις η μονάδα Λαύριο II συγχρονίστηκε και ανέλαβε φορτίο.

Στις 12:12, η μονάδα Λαύριο II, ήδη σε φάση που έφτανε το τεχνικό της ελάχιστο και ως εκ τούτου σε χειροκίνητο έλεγχο, αποσυνδέθηκε και πάλι, λόγω αυξημένου ρεύματος τυμπάνου. Αυτή η απώλεια οδήγησε το σύστημα σε κατάσταση συναγερμού.

Στις 12:25, το ΚΕΕ του ΑΔΜΗΕ^{xi} δίνει εντολή για αποκοπή φορτίου 100 MW. Στις 12:30 αποκόπεται τελικά φορτίο της τάξης των 80 MW. Η αποκοπή όμως αυτή δεν ήταν αρκετή για να μειώσει

^{xi} Μέχρι το 2012 ο Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας είχε την επωνυμία ΔΕΣΜΗΕ και περιλάμβανε τα καθήκοντα τόσο του διαχειριστή του συστήματος όσο και του λειτουργού της αγοράς. Από το 2012 ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος έχει ξεχωριστή νομική οντότητα και ονομάζεται ΑΔΜΗΕ ενώ ο λειτουργός της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ΛΑΓΗΕ. Για λόγους συνέχειας και ομοιομορφίας, στην παρούσα διατριβή θα χρησιμοποιείται μόνο ο όρος ΑΔΜΗΕ ακόμα και για την προ του 2012 εταιρία, υποδηλώνοντας το τμήμα του ΔΕΣΜΗΕ που ήταν υπεύθυνο για τη διαχείριση του συστήματος μεταφοράς.

την πτώση των τάσεων και ζητείται εκ νέου αποκοπή επιπλέον 200 MW στις 12:35. Την ίδια στιγμή το συνολικό μετρούμενο φορτίο στο ΚΕΕ ανερχόταν σε 9320 MW.

Η δεύτερη αποκοπή φορτίου δεν πρόλαβε να ενεργοποιηθεί ποτέ. Στις 12:37 η μονάδα Αλιβέρι ΙΙΙ, η οποία βρίσκεται πολύ κοντά στην ευάλωτη περιοχή της πρωτεύουσας, αποσυνδέθηκε ξαφνικά. Δεν έχει γίνει ακόμα και σήμερα ξεκάθαρο τι προκάλεσε αυτήν την απώλεια, ωστόσο είναι σίγουρο ότι ήταν αυτή που επηρέασε καταλυτικά τις εξελίξεις, καθώς μέσα στο επόμενο λεπτό χάθηκε και η άλλη μονάδα στον ΑΗΣ Αλιβερίου (Αλιβέρι ΙV), που μέχρι τότε κρατούνταν χειροκίνητα εντός. Εν τέλει στις 12:39 ενεργοποιήθηκε η προστασία έναντι υπότασης των ηλεκτρονόμων αποστάσεων στις γραμμές ΥΥΤ, που οδήγησε σε διαχωρισμό του συστήματος και σε κατάρρευση της νότιας περιοχής.

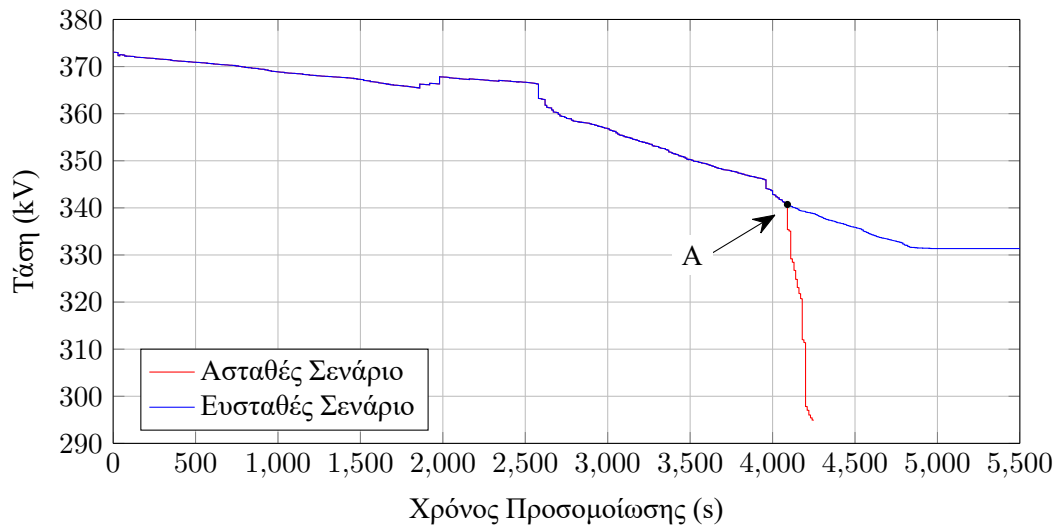
6.2.3 Παραλλαγή ενισχυμένου συστήματος και σενάρια διαταραχών

Για την επίδειξη της λειτουργίας του συστήματος ανίχνευσης χρησιμοποιούνται δύο σενάρια τα οποία μεταξύ τους διαφέρουν μόνο ως προς ένα στοιχείο, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Το πρώτο σενάριο είναι ασταθές (παρόμοιο με το πραγματικό περιστατικό) και οδηγεί σε κατάρρευση του νότιου συστήματος, ενώ το δεύτερο σενάριο είναι οριακά ευσταθές, με το σύστημα να έρχεται σε ισορροπία στη μόνιμη κατάσταση. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται αυτά τα δύο σενάρια είναι για να φανεί κατά πόσον το σύστημα ανίχνευσης ΣΑ2 είναι σε θέση να ξεχωρίσει τις δύο περιπτώσεις και το σημαντικότερο, να μην εκδώσει κάποιον εσφαλμένο συναγερμό. Οι τροποποιήσεις που έγιναν αφορούν τόσο στην τοπολογία του δικτύου όσο και στη λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Όσον αφορά την τοπολογία του δικτύου, χρησιμοποιείται μια πιο “ενισχυμένη” περίπτωση. Συγκεκριμένα, στο πραγματικό περιστατικό της 12^{ης} Ιουλίου 2004, μόνο ένα από τα δύο κυκλώματα των 400 kV από το ΚΥΤ Λάρυμνας προς το ΚΥΤ Αχαρνών ήταν σε λειτουργία και επομένως, όπως φαίνεται και στον Πίν. 6.4, ο ζυγός 1915 (GACHAR19) ήταν ανοικτός. Στη συγκεκριμένη παραλλαγή θεωρείται πως ο ζυγός αυτός είναι συνδεδεμένος με κλειστό διασυνδεδετικό διακόπτη (coupler) με τον ζυγό 610 (GACHAR11) και ως εκ τούτου και οι 3 γραμμές διπλού κυκλώματος των 400 kV από το βόρειο προς το νότιο σύστημα είναι εντός.

Όσον αφορά τώρα τη λειτουργία του συστήματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, υποτίθεται η ύπαρξη ενός αυτόματου συστήματος περιορισμού ρεύματος τυμπάνου. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια του πραγματικού περιστατικού (και της αντίστοιχης βέβαια προσομοίωσης) η επιβαλλόμενη μείωση της ενεργού παραγωγής έγινε από τους χειριστές των μονάδων, χειροκίνητα, χωρίς κάποιο κεντρικό σχεδιασμό, μόνο από προσωπική εκτίμηση, για μείωση του ρεύματος στάτη όταν οι αντίστοιχες μονάδες βρίσκονταν σε κατάσταση υπερφόρτισης. Στην παρούσα προσομοίωση, το αυτόματο σύστημα περιορισμού ρεύματος στάτη αντικαθιστά την ανάγκη εξωτερικής μείωσης της ενεργού παραγωγής, η οποία επιτυγχάνεται αυτόματα, με τον τρόπο που έχει περιγραφεί στην Υποεν. 2.2.5. Εξαίρεση σε αυτήν την παραλλαγή αποτελούν οι μονάδες Λαύριο ΙΙ, Λαύριο 3 (μικρός συνδυασμένος κύκλος) και Λαύριο 5, των οποίων η μεταβολή της ενεργού παραγωγής εξακολουθεί να γίνεται εξωτερικά (από το σενάριο διαταραχής). Όσον αφορά το Λαύριο ΙΙ αυτό γίνεται για να προσομοιωθεί η προσπάθεια ανάληψης φορτίου που περιγράφεται και στην Υποεν. 6.2.2, ενώ για τις μονάδες Λαύριο 3 και Λαύριο 5, όπως περιγράφεται αναλυτικά και στη διατριβή [Νικ07, σελ. 187–189], αυτό έγινε λόγω ατελούς παράστασης της σύνδεσης των δύο μονάδων στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαραγωγή του φαινομένου.

Όπως και στην προσομοίωση του πραγματικού περιστατικού [Νικ07, VNT06], έτσι και εδώ, χρησιμοποιήθηκε σαν αρχικό σημείο το στιγμιότυπο των 11:30 της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Στο σημείο αυτό το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται σε 9084 MW, από τα οποία τα 1374 MW αντιστοιχούν σε βιομηχανικά φορτία και βοηθητικά σταθμών παραγωγής και τα υπόλοιπα 7710 MW αποτελούν φορτία τελικών καταναλωτών και είναι αυτά στα οποία επιβάλλεται ομοιόμορφη αύξηση. Ο ρυθμός αυτός ανέρχεται σε $r = 0.0038\%/s$, αρχίζει τη χρονική στιγμή $t = 10\text{ s}$ και διατηρείται σταθερός μέχρι τη



Σχήμα 6.19: Απόκριση τάσης ζυγού ΥΤ 620 (GKOUO11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο (ξαφνική απώλεια μονάδας) και το ευσταθές σενάριο (χωρίς απώλεια μονάδας). Σημείο A: ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ

χρονική στιγμή $t = 4800$ s^{xii}).

Η διαφοροποίηση των δύο εναλλακτικών σεναρίων που χρησιμοποιούνται, έγκειται στην ξαφνική απώλεια της μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ. Στην πρώτη περίπτωση στις 12:38 (4090 s) η μονάδα Αλιβέρι ΙΙΙ αποσυνδέεται, με αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρεύσει (ασταθές σενάριο ή σενάριο 1), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η μονάδα δεν αποσυνδέεται (οι προστασίες παραμένουν ενεργές εντούτοις) και το σύστημα ισορροπεί σε ένα νέο σημείο, με χαμηλές τάσεις, αλλά χωρίς κατάρρευση (ευσταθές σενάριο ή σενάριο 2).

Αυτό είναι εμφανές από το Σχ. 6.19, το οποίο δείχνει την απόκριση της τάσης του ζυγού ΥΤ 620, στο ΚΥΤ Κουμουνδούρου, για τα δύο σενάρια. Στο σημείο A, στο σενάριο 1, αποσυνδέεται ξαφνικά η μονάδα Αλιβέρι ΙΙΙ, γεγονός που οδηγεί σε κατάρρευση το σύστημα μετά από περίπου 140 s^{xiii}. Αντίθετα στο σενάριο 2, χωρίς την απώλεια της συγκεκριμένης μονάδας, το σύστημα καταλήγει σε νέο σημείο ισορροπίας, περίπου την ώρα 12:50 ($t = 4850$ s). Το εν λόγω σημείο είναι αρκετά υψηλότερα από το αντίστοιχο κατώφλι ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων υπότασης των γραμμών ΥΤ.

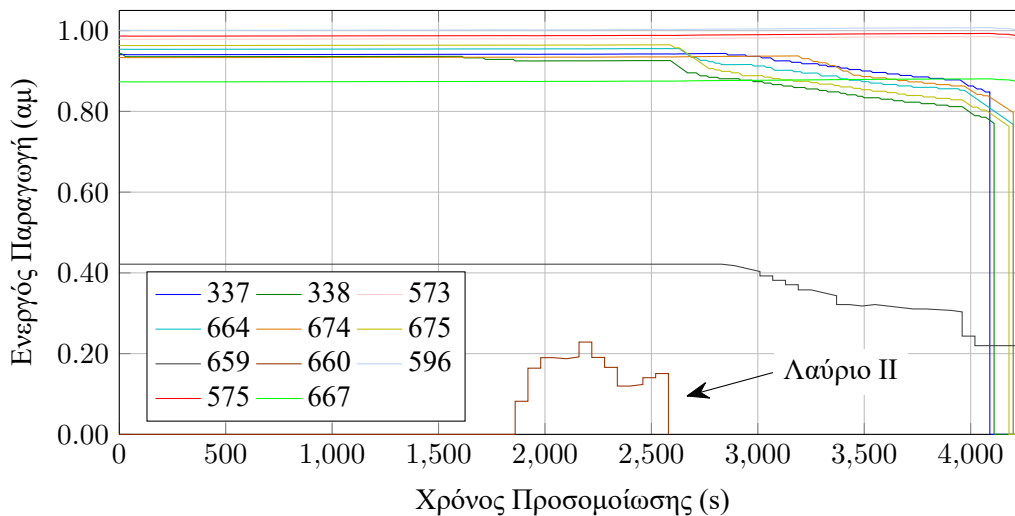
Συγκεντρωτικά οι επιβαλλόμενες διαταραχές στο σύστημα, μέσω του αρχείου σεναρίων του WPSTAB φαίνονται στον Πίν. Γ.8, στο Παράρτημα Γ.

Στην συνέχεια θεωρείται ότι στα ΚΥΤ Κουμουνδούρου, Αχαρνών και Αγ. Στεφάνου είναι εγκατεστημένο το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας μέσω μετρήσεων φασιθετών ΣΑ2, όπως περιγράφηκε στην Υποεν. 6.2.1. Συγκεκριμένα υπολογίζονται οι δείκτες NLI για τους ακόλουθους ζυγούς:

- 620 (GKOUO11), από το ΚΥΤ Κουμουνδούρου
- 610 (GACHAR11), από το ΚΥΤ Αχαρνών

^{xii} Στην παρούσα ενότητα ο χρόνος σε s αντιστοιχεί στον χρόνο προσομοίωσης t , με $t = 0$ s να αντιστοιχεί στις 11:30:00.

^{xiii} Η αντίστοιχη ώρα είναι 12:41. Είναι προφανές ότι παρά το γεγονός ότι το σύστημα είναι ελαφρά πιο ενισχυμένο σε σχέση με το πραγματικό περιστατικό, με όλες τις γραμμές των 400 kV εντός, ουσιαστικά η απώλεια της μονάδας οδηγεί στο ίδιο αποτέλεσμα, αφού και πάλι θα ενεργοποιούνταν η προστασία υποτάσεως των γραμμών ΥΤ, με τις τάσεις να πέφτουν κάτω από τα 300 kV (75% της ονομαστικής τάσης), που αποτελεί το κατώφλι ενεργοποίησης των αντίστοιχων ηλεκτρονόμων, οδηγώντας σε κατάρρευση το Νότιο σύστημα.



Σχήμα 6.20: Απόκριση ενεργού παραγωγής P_g θερμικών μονάδων νοτίου συστήματος, 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III). Τα στοιχεία των μονάδων περιλαμβάνονται στον Πίν. Γ.9 του παραρτήματος

- 648 (GSTEFA11), από το KYT Αγ. Στεφάνου

Όσο και οι τρεις δείκτες είναι μεγαλύτεροι του μηδενός το σύστημα είναι ευσταθές, ενώ ακόμα και εάν ένας δείκτης γίνει αρνητικός σημαίνεται συναγερμός αστάθειας τάσεως.

6.2.4 Εφαρμογή ΣΑ2 στο ασταθές σενάριο

Σε πρώτη φάση θα εξεταστεί η απόδοση του ΣΑ2 στην ασταθή περίπτωση του σεναρίου 1, με απώλεια της μονάδας Αλιβέρι III στις 12:38 ($t = 4090$ s). Στην συγκεκριμένη περίπτωση η αλληλουχία των σημαντικότερων γεγονότων της προσομοίωσης φαίνεται στον Πίν. 6.5. Τα μόνα γεγονότα που δεν αναφέρονται είναι αυτά της μεταβολής της παραγωγής ενεργού ισχύος των γεννητριών, που οφείλονται σε ενεργοποίηση των αυτόματων περιοριστών ρεύματος στάτη. Η συγκεκριμένη μεταβολή μπορεί να γίνει πιο εύκολα αντιληπτή στο Σχ. 6.20, το οποίο περιλαμβάνει τις αλλαγές στις ενεργές παραγωγές των θερμικών μονάδων του νοτίου συστήματος (αναφερόμενες με τον αριθμό του ζυγού στον οποίο συνδέονται) σε ανά μονάδα τιμές ως προς τα ονομαστικά τους στοιχεία, που φαίνονται στον Πίν. Γ.9, του Παραρτήματος Γ.

Από τον Πίν. 6.5 είναι εμφανές πως ήδη από την αρχή του συγκεκριμένου σεναρίου, με την συνεχή αύξηση του φορτίου, ενεργοποιούνται οι προστασίες υπερδιέγερσης σε σημαντικές μονάδες του νότιου συστήματος, που βρίσκονται κοντά στην Αθήνα (π.χ. Αλιβέρι III και IV, Λαύριο 4), με αποτέλεσμα πρακτικά η περιοχή της Στερεάς Ελλάδας να μένει από νωρίς χωρίς ρύθμιση τάσης. Από τις 12:00 περίπου και μετά, όλο και περισσότερες μονάδες σε όλο το σύστημα μπαίνουν σε λειτουργία προστασίας υπερδιέγερσης, ενώ αρχίζουν και ενεργοποιούνται συστηματικά και οι πρώτες διατάξεις προστασίας ρεύματος στάτη στις μονάδες Αλιβέρι IV (338), Λαύριο I (664).

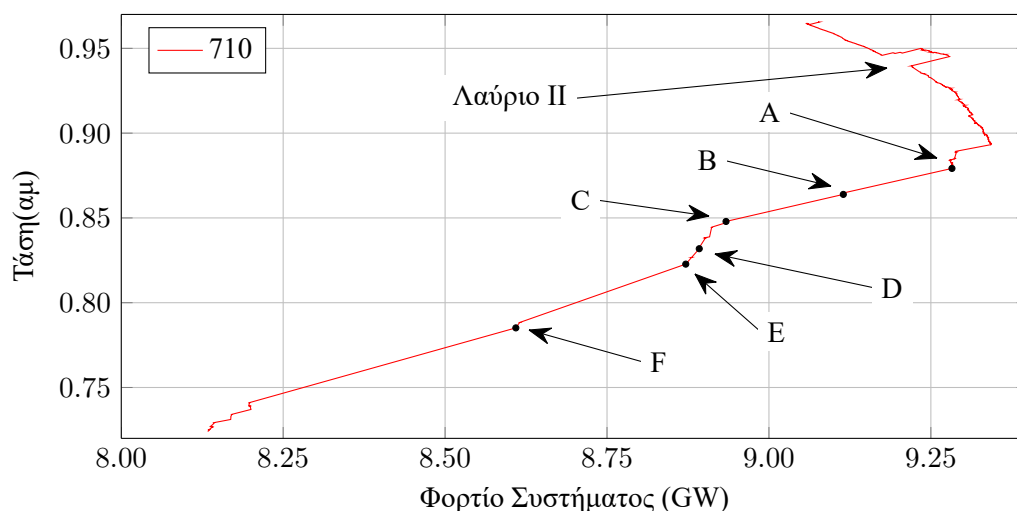
Στις 12:01 περίπου (1860 s), η μονάδα Λαύριο II (660) επανεντάσσεται στο σύστημα και αρχίζει να αναλαμβάνει χειροκίνητα φορτίο όπως φαίνεται από το Σχ. 6.20, κάτι το οποίο ανακουφίζει προσωρινά το σύστημα, αναστέλλοντας τις ενεργοποιήσεις συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης και ρεύματος στάτη. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην καμπύλη PV του συστήματος, που φαίνεται στο Σχ. 6.21 και δείχνει το συνολικό φορτίο του συστήματος (σε GW) ως προς την τάση του ζυγού 710 στον Υ/Σ των 150 kV

Πίνακας 6.5: Αλληλουχία σημαντικότερων γεγονότων νότιου συστήματος, προσομοίωση ασταθούς σεναρίου με απώλεια Αλιβερίου III και εφαρμογή ΣΑ2

Ωρα	t (s)	Στοιχείο	Ζυγός	Συμβάν ^α	Σημείο ^β
11:30:20	20	Αλιβέρι IV	338	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
11:30:30	30	Λαύριο 4	667	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
11:31:00	60	Αλιβέρι III	337	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
11:57:29	1649	Λαύριο I	664	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:11:38	2498	Λαύριο I	664	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:18:30	2610	Μεγαλόπολη III	569	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:18:50	2930	Αγ. Γεώργιος 9	675	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:27:48	3468	Αγ. Γεώργιος 8	674	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:38:10	4090	Αλιβέρι III	337	Ξαφνική απώλεια μονάδας	A
12:38:21	4101	Αλιβέρι IV	338	Απώλεια μονάδας λόγω υπότασης	B
12:38:22	4102		620	NLI<0	
			Συναγερμός αστάθειας τάσης		C
			610	NLI<0	
12:38:23	4103		648	NLI<0	
12:38:40	4120	Μεγαλόπολη IV	575	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
		Λάδωνας II	583	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:39:10	4150	Λάδωνας I	582	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
			Αστάθεια - Όριο φόρτισης		D
12:39:22	4162	Αγ. Γεώργιος 9	675	Απώλεια μονάδας λόγω υπότασης	E
12:39:33	4173	Λαύριο I	664	Απώλεια μονάδας λόγω υπότασης	F
		Αγ. Γεώργιος 8	674	Απώλεια μονάδας λόγω υπότασης	F
12:40:00	4200	Μεγαλόπολη II	573	Ενεργοποίηση ΣΠΥ	
12:40:33	4233	Μεγαλόπολη III	569	Απώλεια μονάδας λόγω υπότασης	
			Κατάρρευση συστήματος		

^α Εκτός από ενεργοποίηση των ΣΠΥ, σε όλες τις γεννήτριες θερμικών σταθμών του νότιου συστήματος και σε αρκετές του βόρειου ενεργοποιείται το σύστημα προστασίας ρεύματος στάτη που αλλάζει την ενεργό παραγωγή των μονάδων. Καθώς το σύστημα αυτό ενεργοποιείται πολλαπλές φορές, η επίδραση του φαίνεται καλύτερα στην απόκριση των ενεργών παραγωγών των μονάδων του νοτίου συστήματος, που φαίνεται στο Σχ. 6.20.

^β Τα σημεία αναφέρονται στα Σχ. 6.21, 6.22.



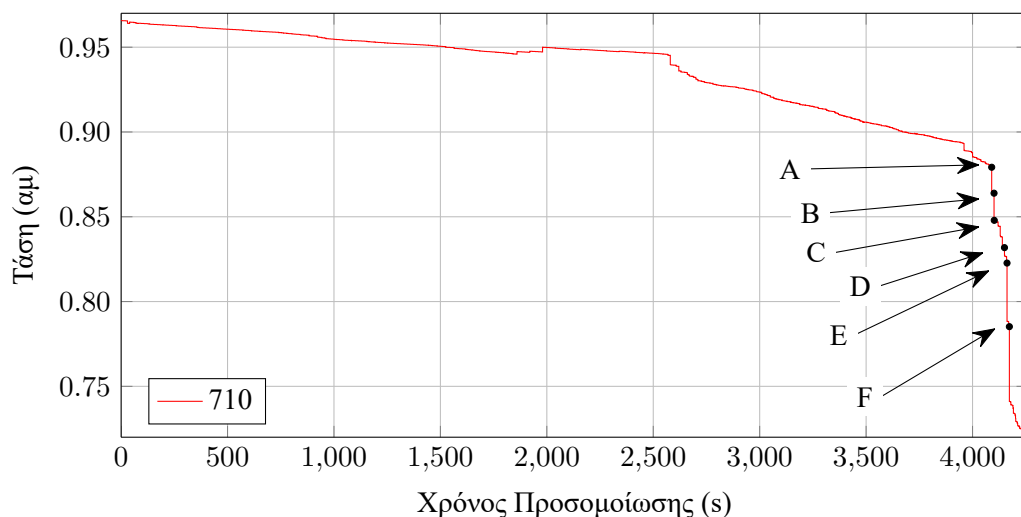
Σχήμα 6.21: Καμπύλη PV συστήματος, 12^ης Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III). A: απώλεια Αλιβέρι III, B: απώλεια Αλιβέρι IV, C: συναγερμός αστάθειας τάσης, D: όριο φόρτισης, E: απώλεια Αγ. Γεώργιος 9, F: απώλεια Λαύριο I και Αγ. Γεώργιος 8. Βλ. Πίν. 6.5

του Ρουφ. Η χρονική εξέλιξη της τάσης του συγκεκριμένου ζυγού φαίνεται στο Σχ. 6.22.

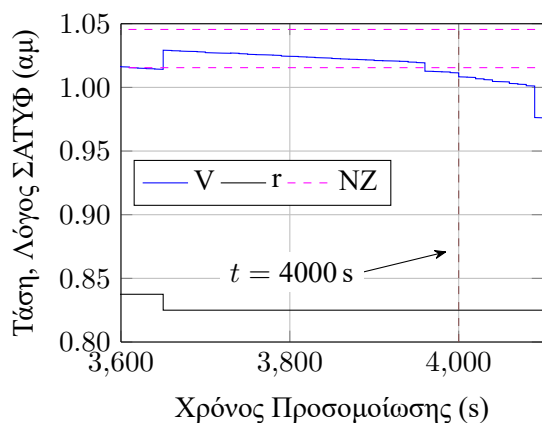
Στις 12:13 περίπου (2600 s), στο σύνολο των θερμικών μονάδων του νοτίου συστήματος, επιβάλλεται πλέον συνεχής μείωση της ενεργού παραγωγής από τα συστήματα περιορισμού ρεύματος στάτη, όπως φαίνεται και από το Σχ. 6.20. Πρακτικά αυτή η μείωση αρχίζει να επιβάλλεται αμέσως μετά την κράτηση της μονάδας Λαύριο II (660), την χρονική στιγμή $t = 2580$ s, που όπως έχει ήδη αναφερθεί, ήταν σε διαδικασία ανάληψης φορτίου. Αυτό επιτείνει ακόμα περισσότερο το πρόβλημα στην περιοχή της Στερεάς Ελλάδας, με τα περισσότερα ΣΑΤΥΦ ήδη να έχουν εξαντλήσει τα όρια τους από τις 12:36 περίπου (4000 s), όπως για παράδειγμα το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει τον ζυγό MT 615 (GACHAR51), το οποίο εξαντλείται ακριβώς αυτήν την χρονική στιγμή, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.23α που δείχνει την απόκριση του. Άλλα ΣΑΤΥΦ της περιοχής της πρωτεύουσας έχουν εξαντληθεί από πολύ πιο νωρίς, όπως το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει τον ζυγό 638 (GPALLI51), το οποίο έχει εξαντληθεί ήδη από την χρονική στιγμή $t = 3128$ s. Η σχετική απόκριση φαίνεται στο Σχ. 6.23β.

Εν τέλει στις 12:38 (4090 s) αποσυνδέεται ξαφνικά η μονάδα Αλιβέρι III (σημείο A στα Σχ. 6.21 και 6.22) για να ακολουθήσουν και οι υπόλοιπες απώλειες μονάδων λόγω υπότασης (B: απώλεια Αλιβέρι IV, E: απώλεια Αγ. Γεώργιος 9, F: απώλεια Λαύριο I και Αγ. Γεώργιος 8) και τελικά το σύστημα να καταρρεύσει στις 12:40:33 (4233 s).

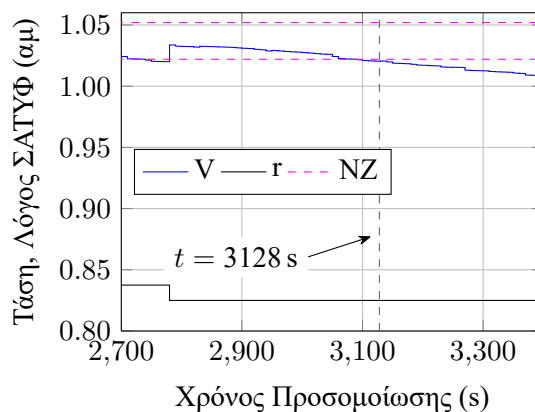
Όπως και στην περίπτωση του συστήματος δοκιμών Nordic Test System (Υποεν. 6.1.3), έτσι και εδώ χρησιμοποιείται η ανάλυση ευαισθησιών για τον προσδιορισμού του σημείου στο οποίο το σύστημα γίνεται ασταθές. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται και πάλι οι ευαισθησίες $S_{Q_g Q}$ της συνολικής άεργου παραγωγής του συστήματος ως προς το άεργο φορτίο ενός ζυγού. Στο Σχ. 6.24α φαίνεται η ευαισθησία $S_{Q_g Q_{737}}$ ως προς το άεργο φορτίο του ζυγού των 150 kV 737 (GPIREA31). Αρχικά η τιμή του είναι πολύ μικρή (κυμαίνεται μεταξύ 1 και 3 από την αρχή της προσομοίωσης), ωστόσο μετά τις απώλειες των μονάδων Αλιβέρι III και IV αυξάνεται απότομα ώστε την χρονική στιγμή $t = 4150$ s παίρνει μια πολύ μεγάλη θετική τιμή (67) πριν γίνει αρνητική (-510). Την ίδια χρονική στιγμή η υπολογιζόμενη κρίσιμη ιδιοτιμή του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα J_ℓ , που φαίνεται στο Σχ. 6.24β, διέρχεται από το μηδέν. Αυτό αντιστοιχεί στο σημείο D στην καμπύλη PV του Σχ. 6.21 αλλά και στην απόκριση της τάσης του ζυγού 710 (GROUF_31) στο Σχ. 6.22.



Σχήμα 6.22: Απόκριση τάσης ζυγού YT 710 (GROUF_31), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ). Α: απώλεια Αλιβέρι ΙΙΙ, Β: απώλεια Αλιβέρι ΙV, C: συναγερισμός αστάθειας τάσης, D: όριο φόρτισης, E: απώλεια Αγ. Γεώργιος 9, F: απώλεια Λαύριο Ι και Αγ. Γεώργιος 8. Βλ. Πίν. 6.5

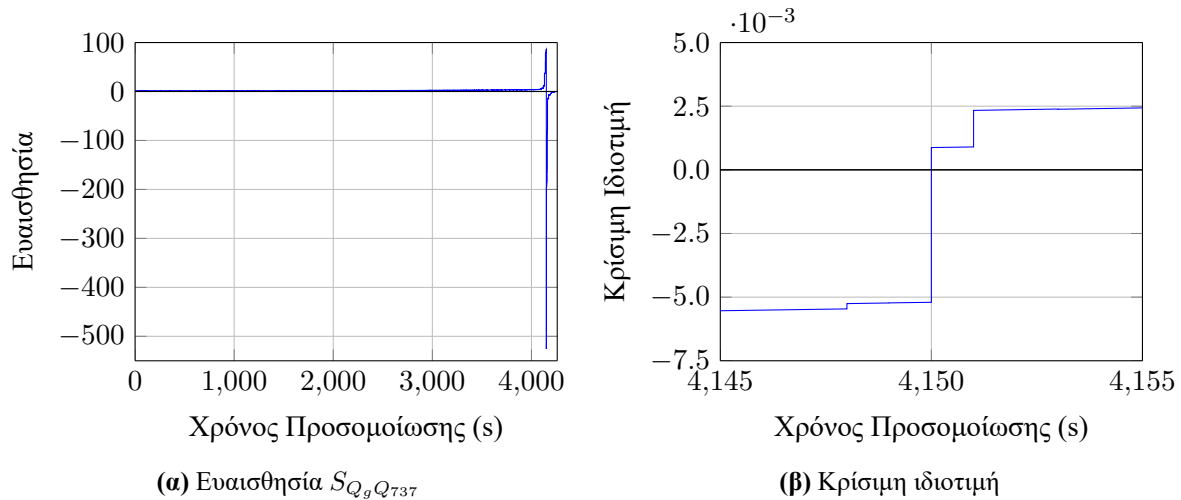


(α) ΣΑΤΥΦ ζυγού 615



(β) ΣΑΤΥΦ ζυγού 638

Σχήμα 6.23: Απόκριση ΣΑΤΥΦ που ελέγχουν τους ζυγούς MT 615 (GACHAR51) και 638 (GPALLI51) στην περιοχή της πρωτεύουσας, 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ). Οι διακεκομμένες κατακόρυφες γραμμές υποδεικνύουν το σημείο εξάντλησης του εκάστοτε ΣΑΤΥΦ



Σχήμα 6.24: Απόκριση ευαισθησίας $S_{Q_g Q_{737}}$ ζυγού 150 kV 737 (GPIREA31) και κρίσιμης ιδιοτιμής μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ στο σημείο υπολογισμού ορίου φόρτισης, 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III)

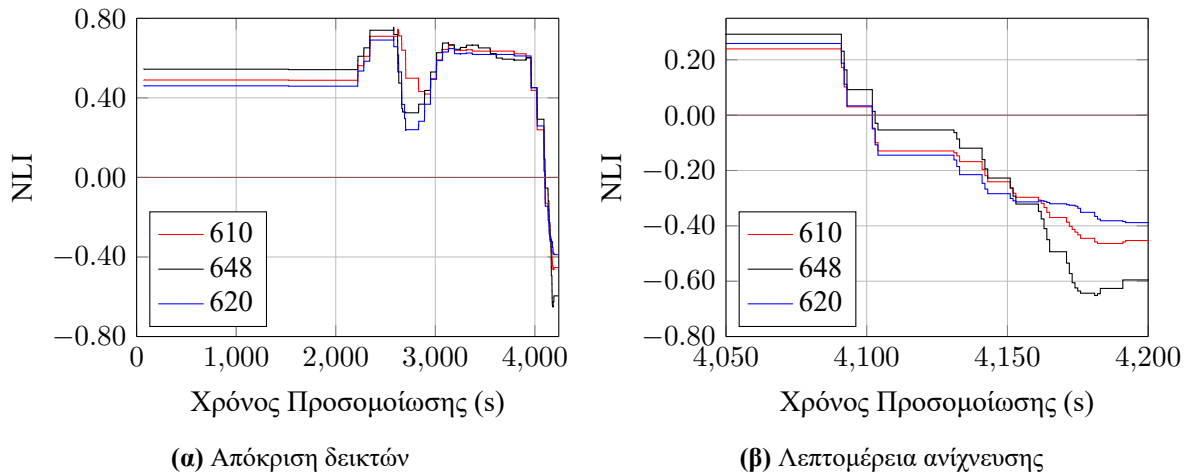
Η αντίστοιχη απόκριση των δεικτών NLI για το συγκεκριμένο σενάριο φαίνεται στα Σχ. 6.25. Συγκεκριμένα στο Σχ. 6.25α φαίνεται η συνολική απόκριση και των τριών δεικτών από την αρχή της προσομοίωσης, ενώ στο Σχ. 6.25β φαίνεται η λεπτομέρεια τη στιγμή που εκδίδεται συναγεργμός ανίχνευσης αστάθειας (σημείο C στα Σχ. 6.21 και 6.22), με την ταυτόχρονη αλλαγή προσήμου στους δείκτες των ζυγών 620 (GKOUMO11), 610 (GACHAR11) τη χρονική στιγμή $t = 4102$ s. Ο δείκτης του τρίτου οριακού ζυγού, 648 (GSTEFA11), αλλάζει και αυτός πρόσημο 1 s αργότερα.

Το γεγονός πως οι δείκτες NLI γίνονται αρνητικοί πριν από την αντίστοιχη ανίχνευση αστάθειας μέσω της ανάλυσης ευαισθησιών και των ιδιοτιμών του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ , είναι αναμενόμενο, βάσει της σχέσης μεταξύ μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προς μια ευάλωτη περιοχή (την οποία ουσιαστικά ανιχνεύει ο δείκτης NLI) και του αντίστοιχου ορίου φόρτισης, το οποίο έπεται σε πρακτικά συστήματα^{xiv}. Από την άλλη πλευρά, η σχετική καθυστέρηση ανίχνευσης της αστάθειας από το WPSTAB οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού του Ιακωβιανού πίνακα \mathbf{J}_ℓ από το πρόγραμμα. Όπως έχει αναφερθεί στην Υποεν. 2.4.1 το WPSTAB δεν λαμβάνει υπόψη για την ανάλυση ευστάθειας τάσης την αυτόματη λειτουργία των περιοριστών ρεύματος στάτη των μονάδων, το οποίο μπορεί να δημιουργήσει αναντιστοιχία μεταξύ του σημείου που εντοπίζει το πρόγραμμα την αστάθεια και του πραγματικού σημείου αστάθειας των μακροπρόθεσμων δυναμικών. Δεδομένου μάλιστα ότι στην πλειοψηφία των μονάδων του συστήματος, την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, επιβάλλεται ήδη μείωση ρεύματος τυμπάνου, η σχετική καθυστέρηση ανίχνευσης αστάθειας από το WPSTAB σε αυτήν την περίπτωση αιτιολογείται.

Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, η σήμανση συναγεργμού αστάθειας εκδίδεται περίπου 2 min πριν την κατάρρευση του συστήματος, αφήνοντας αρκετά περιθώρια διορθωτικών κινήσεων, ειδικά από ένα προσχεδιασμένο, αυτόματο σχήμα προστασίας συστήματος.

Οι ροές ενεργού ισχύος καθώς και οι αντίστοιχες φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες για την συγκεκριμένη περίπτωση φαίνονται στο Σχ. 6.26. Από το συγκεκριμένο σχήμα είναι εμφανές ότι η μέγιστη τιμή των μεταφερόμενων ενεργών ισχύων και για τους τρεις συνοριακούς ζυγούς συμπίπτει με την χρονική στιγμή της απώλειας της μονάδας Αλιβέρι III, $t = 4090$ s. Από εκεί και πέρα η πτώση της ενεργού ισχύος είναι μονότονη, ενώ οι αντίστοιχες φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες αυξάνουν. Αποτέλεσμα της δράσης των φίλτρων των κινητών μέσων 10 δειγμάτων είναι ότι περίπου 10 s αργότερα και οι τρεις

^{xiv} Βλ. Παρ. 3.2.2.2.



Σχήμα 6.25: Απόκριση δεικτών NLI ζυγών 400 kV 620 (GKOUMO11), 610 (GACHAR11) και 648 (GSTEFA11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ)

δείκτες NLI γίνονται αρνητικοί.

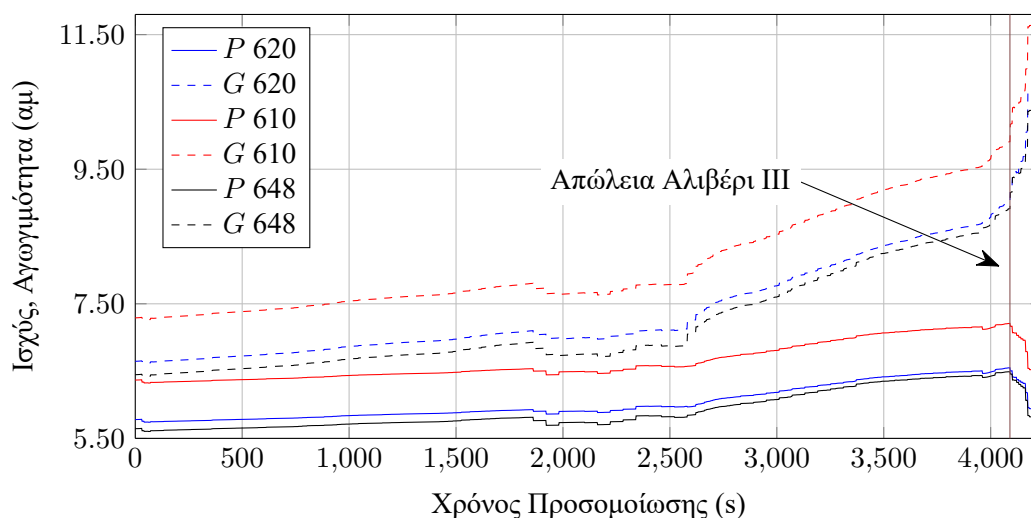
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει αναφορά στη μορφή της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος στο Σχ. 6.26, η οποία για μεγάλα διαστήματα παρατήρησης των μεταβολών ΔT μπορεί να οδηγήσει το ΣΑ2 σε εσφαλμένο συναγερό γύρω στη χρονική στιγμή $t = 2650$ s, παρά το γεγονός πως μέχρι την ξαφνική απώλεια της μονάδας του Αλιβερίου ΙΙΙ, η τάση της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος είναι αυξητική και για τους τρεις συνοριακούς ζυγούς. Όπως φαίνεται από το Σχ. 6.26, εκείνη την χρονική περίοδο, τόσο η μεταφερόμενη ισχύς, όσο και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα από τους συνοριακούς ζυγούς παρουσιάζουν μια μεταβατική μείωση, που οφείλεται στο γεγονός πως η μονάδα Λαύριο ΙΙ προσπαθεί να αναλάβει φορτίο (ζυγός 660 στο Σχ. 6.20), καλύπτοντας την συνολική αύξηση του φορτίου που φαίνεται σαν προεξοχή στο άνω τμήμα στην καμπύλη PV του συστήματος, στο Σχ. 6.21.

Καθώς η ανάληψη φορτίου από την μονάδα μειώνει τόσο το P όσο και το G των συνοριακών ζυγών, οι συνθήκες υπολογισμού (6.8) δεν ισχύουν και ως εκ τούτου δεν υπολογίζονται οι αντίστοιχοι δείκτες NLI. Από την άλλη πλευρά όμως η απώλεια της μονάδας Λαύριο ΙΙ δημιουργεί παροδικά κάποια προβλήματα. Η συγκεκριμένη μονάδα αποσυνδέεται τη χρονική στιγμή $t = 2580$ s όπως φαίνεται από το Σχ. 6.20, δημιουργώντας ένα έλλειμμα στην παραγωγή της περιοχής κατά περίπου 45 MW^{xv}, που πρέπει να ικανοποιηθεί με μεταφορά ισχύος από το βόρειο σύστημα. Η ισχύς όμως που απαιτείται δεν είναι τόση, αλλά λιγότερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η απώλεια της μονάδας στην περιοχή της πρωτεύουσας, θα μειώσει και τις αντίστοιχες τάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.22. Καθώς τα φορτία θεωρούνται σταθερού ενεργού ρεύματος μεταβατικά, η μείωση της παραγωγής και άρα της τάσης συνοδεύεται και από μείωση του φορτίου, η οποία θα καθορίσει και το τελικό ύψος των εισαγωγών ισχύος.

Σε βάθος χρόνου και οι τρεις συνοριακοί ζυγοί βλέπουν τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ να αυξάνει. Αυτό φαίνεται και στο Σχ. 6.27, που περιλαμβάνει λεπτομέρειες της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P μέσω των συνοριακών ζυγών 620 (GKOUMO11) και 648 (GSTEFA11), την περίοδο αποσύνδεσης της μονάδας Λαύριο ΙΙ.

Ωστόσο, τη στιγμή της συγκεκριμένης διαταραχής, μεταβατικά, παρατηρείται μια μείωση στην ροή

^{xv}Η ποσότητα αυτή είναι περίπου ίση με την αντίστοιχη μεταβολή της συνολικής φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας που βλέπουν και οι τρεις συνοριακοί ζυγοί, εκφρασμένη σε MW, όπως φαίνεται από το Σχ. 6.26, όπου οι ανά μονάδα τιμές είναι εκφρασμένες σε βάση 100 MW. Δεν είναι ακριβώς ίση ωστόσο γιατί δεν είναι ακριβώς ίδια η τάση και των τριών συνοριακών ζυγών.



Σχήμα 6.26: Απόκριση μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G στους συνοριακούς ζυγούς 400 kV 620 (GKOUMO11), 610 (GACHAR11) και 648 (GSTEFA11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III)

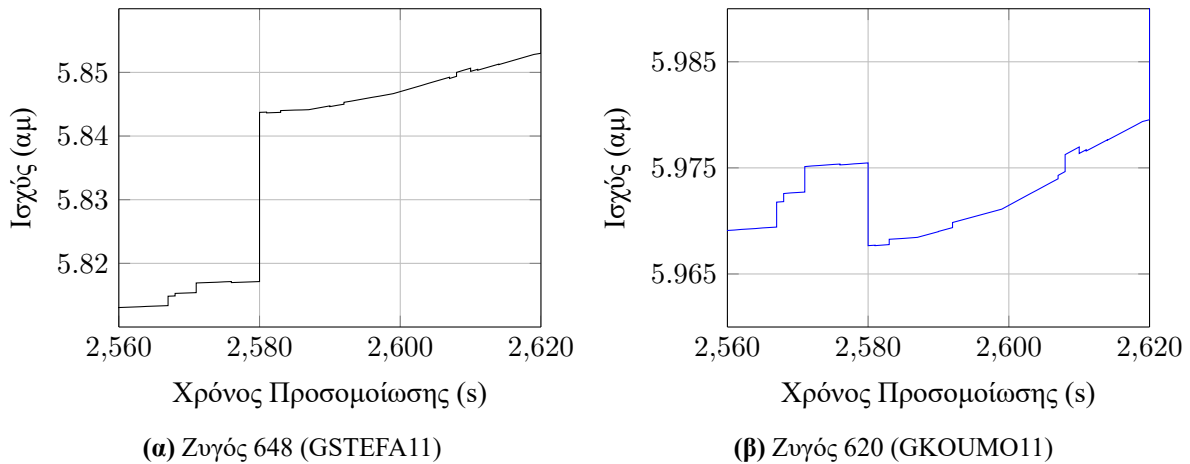
ενεργού ισχύος από τον συνοριακό ζυγό 620 (GKOUMO11). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός πως κάποιο ποσοστό των απαιτήσεων σε εισαγωγή ισχύος αφενός καλύπτεται από τους υπόλοιπους συνοριακούς ζυγούς (βλ. και Σχ. 6.27α) αφετέρου και από τρίτους ζυγούς, εκτός των συνοριακών, όπως π.χ. από τους ζυγούς των γραμμών των 150 kV.

Καθώς στην συγκεκριμένη υλοποίηση δεν υπάρχει άλλου τύπου επικοινωνία μεταξύ των συνοριακών ζυγών πέρα από την αντίστοιχη ένδειξη του δείκτη NLI, αυτή η απομονωμένη μείωση της μεταφερόμενης ισχύος, όπως την αντιλαμβάνεται ο συνοριακός ζυγός 620 (GKOUMO11), μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένο συναγερμό, αν δεν φιλτραριστεί σωστά. Παρατηρώντας το Σχ. 6.27β, είναι εμφανές πως αν η παράμετρος ΔT του διαστήματος μεταβολής των P και G δεν ήταν αρκούντως μικρή, τότε αρκετά δείγματα ΔP μετά τη χρονική στιγμή $t = 2580$ s θα ήταν αρνητικά (παρά το γεγονός πως από το σημείο αυτό και πέρα η μεταφερόμενη ισχύς αυξάνει συνεχώς), οδηγώντας τον αντίστοιχο δείκτη NLI σε αρνητικές τιμές.

Το ίδιο ισχύει και στην περίοδο λίγο πριν την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι III. Συγκεκριμένα τη χρονική στιγμή $t = 3960$ s όπου η μείωση της παραγωγής από τις μονάδες, Λαύριο 3 και Λαύριο 5 (οι οποίες όπως έχει περιγραφεί παριστάνονται σαν αρνητικό φορτίο στον ζυγό YT 659) οδηγεί σε παροδική μείωση στη μεταφερόμενη ισχύ διαμέσου και των τριών συνοριακών ζυγών, με ταυτόχρονη αύξηση της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας. Ωστόσο όπως θα φανεί και στο ευσταθές σενάριο, η μείωση αυτή είναι παροδική μόνο και δεν σχετίζεται με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του διαδρόμου προς την ευάλωτη περιοχή.

Το πρόβλημα αυτό, δηλαδή της μεταβατικής βύθισης της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος λόγω ξαφνικής απώλειας μονάδας ή απότομης αύξησης του φορτίου της ευάλωτης περιοχής, αντιμετωπίζεται ικανοποιητικά μέσω της κατάλληλης επιλογής της παραμέτρου ΔT .

Ένας άλλος τρόπος επίλυσης του εν λόγω προβλήματος είναι μέσω της χρήσης επικοινωνιών για τον υπολογισμό σε πραγματικό χρόνο ενός ισοδύναμου ζυγού που θα επιτηρεί το σύνολο της εισερχόμενης ισχύος στην ευάλωτη περιοχή. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί μία από τις προοπτικές για περαιτέρω έρευνα μετά την παρούσα διατριβή.



Σχήμα 6.27: Απόκριση μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P μέσω των συνοριακών ζυγών 400 kV 620 (GK-OUMO11) και 648 (GSTEFA11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ασταθές σενάριο 1 (ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III) στο σημείο αποσύνδεσης της μονάδας Λαύριο II τη χρονική στιγμή $t = 2580$ s. Η μεταβατική μείωση της εισαγωγής ισχύος από τον ζυγό 620 υπερκαλύπτεται από την αντίστοιχη αύξηση της εισαγωγής στον ζυγό 648

Πίνακας 6.6: Αλληλουχία σημαντικότερων γεγονότων νότιου συστήματος, προσομοίωση ευσταθούς σεναρίου χωρίς απώλεια Αλιβερίου III και εφαρμογή ΣΑ2

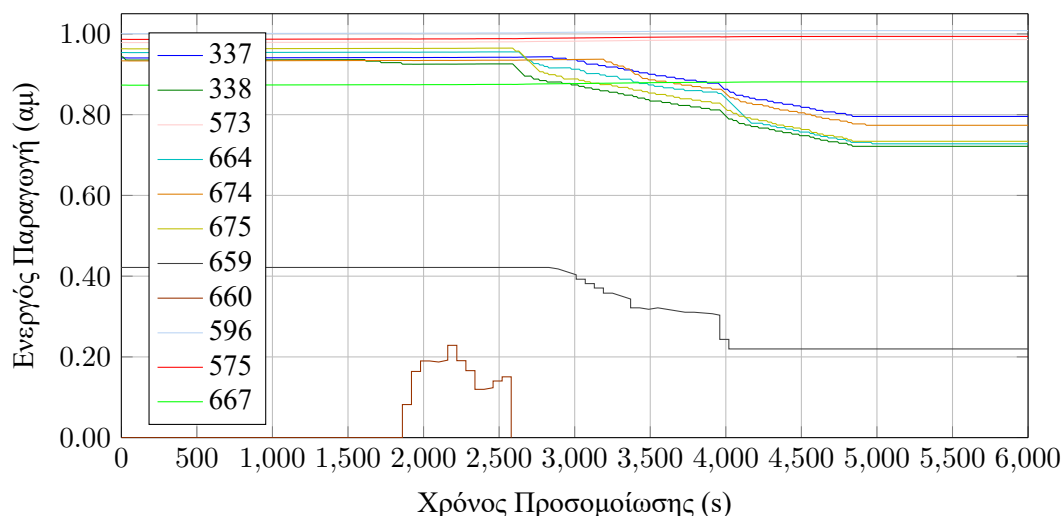
Ώρα	t (s)	Στοιχείο	Ζυγός	Συμβάν
12:39:26	4166	Λάδωνας II	583	Ενεργοποίηση ΣΠΥ
12:39:50	4190	Μεγαλόπολη IV	575	Ενεργοποίηση ΣΠΥ
12:44:09	4449	Λάδωνας I	582	Ενεργοποίηση ΣΠΥ
12:40:00	4800	Τερματισμός ράμπας φορτίου		
12:53:33	5013	Σταθεροποίηση συστήματος		

6.2.5 Εφαρμογή ΣΑ2 στο ευσταθές σενάριο

Στην συγκεκριμένη υποενότητα εφαρμόζεται ακριβώς το ίδιο σενάριο όπως προηγουμένως, με την διαφορά πως δεν αποσυνδέεται η μονάδα Αλιβέρι III. Πέρα από αυτό, οι υπόλοιπες διαταραχές που εφαρμόστηκαν στο ασταθές σενάριο, χρησιμοποιούνται και εδώ, όπως ακριβώς περιγράφονται στον Πίν. Γ.8 στο Παραρτήματος Γ. Ως εκ τούτου, η ακολουθία των γεγονότων στην συγκεκριμένη περίπτωση μέχρι και την απώλεια της μονάδας Αλιβέρι III είναι αυτή που περιγράφεται στον Πίν. 6.5. Από εκεί και πέρα η ακολουθία των γεγονότων φαίνεται στον Πίν. 6.6, η οποία περιλαμβάνει την επανενεργοποίηση κάποιων ΣΠΥ, καθώς το φορτίο ανεβαίνει μέχρι και τη χρονική στιγμή $t = 4800$ s.

Στο συγκεκριμένο ευσταθές σενάριο το σύστημα δεν καταρρέει και ισορροπεί σε ένα νέο σημείο, οριακά ευσταθές, περίπου στις 12:54 (5013 s), περίπου 84 min από την έναρξη της προσομοίωσης. Την ίδια χρονική στιγμή οι μονάδες του νότιου συστήματος σταθεροποιούν την παραγωγή τους, όπως φαίνεται από το Σχ. 6.28.

Η συνολική απόκριση του συστήματος φαίνεται στην καμπύλη PV (καμπύλη Νο. 2) του Σχ. 6.29α που δείχνει το συνολικό φορτίο του συστήματος (σε GW) ως προς την τάση του ζυγού των 150 kV 710 (GROUF_31) στον Υ/Σ του Ρουφ. Η χρονική εξέλιξη της τάσης του συγκεκριμένου ζυγού, μαζί με τις τάσεις στους συνοριακούς ζυγούς 620 (GKOUMO11), 610 (GACHAR11) και 648 (GSTEFA11),



Σχήμα 6.28: Απόκριση ενεργού παραγωγής P_g θερμικών μονάδων νοτίου συστήματος, 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ευσταθές σενάριο 2 (χωρίς ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι III). Τα στοιχεία των μονάδων περιλαμβάνονται στον Πίν. Γ.9 του παραρτήματος

φαίνεται στο Σχ. 6.29β.

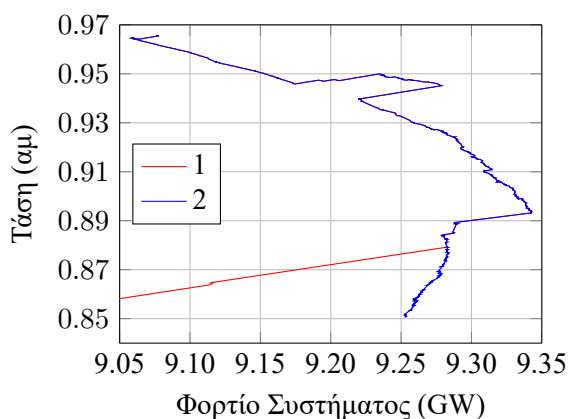
Για λόγους σύγκρισης, μαζί με την PV καμπύλη του συγκεκριμένου σεναρίου, φαίνεται και τμήμα της καμπύλης του ασταθούς σεναρίου (καμπύλη Νο. 1 στο Σχ. 6.29α), όπου είναι προφανής η επίδραση της απώλειας της μονάδας Αλιβέρι III που μειώνει απότομα το συνολικό φορτίο του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, στο συγκεκριμένο οριακά ευσταθές σενάριο το σύστημα καταφέρνει να ισορροπήσει τη χρονική στιγμή $t = 5013$ s, όπως φαίνεται από την απόκριση των τάσεων στο Σχ. 6.29β. Ιδιαίτερα στους ζυγούς των 400 kV, η τάση παραμένει πάνω από το όριο ενεργοποίησης των ηλεκτρονόμων υποτάσεων των αντίστοιχων γραμμών, το οποίο είναι ρυθμισμένο το 0.75 αμ των αντίστοιχων ονομαστικών τάσεων (οι τάσεις σταθεροποιούνται στο 0.83 αμ περίπου).

Οι αντίστοιχοι δείκτες NLI στους τρεις συνοριακούς ζυγούς σε αυτήν την περίπτωση φαίνονται στο Σχ. 6.30α, ενώ οι αντίστοιχες αποκρίσεις της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος και της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας στο Σχ. 6.30β. Είναι εμφανές από τις εν λόγω αποκρίσεις ότι το σύστημα ανίχνευσης δεν εκδίδει κάποιον ψευδή συναγερμό, ακόμα και στην περίπτωση της απότομης μείωσης της παραγωγής από τη μονάδα Λαύριο 3, τη χρονική στιγμή $t = 3960$ s, που εμφανίζεται σαν παροδική βύθιση στις αποκρίσεις της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος. Όπως εξηγήθηκε και στην Υποεν. 6.2.4, η μείωση αυτή είναι μόνο παροδική και όπως φαίνεται και από το Σχ. 6.30β, στη συνέχεια η τάση της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος είναι αυξητική.

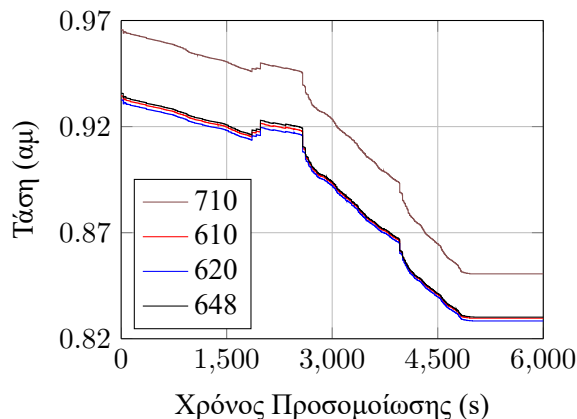
Ωστόσο καθώς τα ΣΑΤΥΦ ήδη αρχίζουν και εξαντλούνται δεν μπορεί πλέον να υπάρξει αποκατάσταση της ισχύος, όπως φαίνεται και από το γεγονός πως μετά τα 4100 s ενώ η ζήτηση αυξάνει (που αντιστοιχεί στην φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα των οριακών ζυγών του Σχ. 6.30β), η μεταφερόμενη ενεργός ισχύς παραμένει σχεδόν σταθερή. Το ίδιο φαίνεται και από την αντίστοιχη απόκριση των δεικτών NLI οι οποίοι σταθεροποιούνται σε τιμές οριακά κάτω από 0.3 (0.29 για τον ζυγό 648 (GSTEFA11), 0.25 για τον ζυγό 620 (GKOUMO11) και 0.24 για τον ζυγό 610 (GACHAR11)), μετά τη χρονική στιγμή $t = 4023$ s.

Όπως έχει αναφερθεί και στην Εν. 4.4, που περιλαμβάνει την αναλυτική περιγραφή του συστήματος ανίχνευσης, σε αυτήν την οριακή περίπτωση που η αγωγιμότητα αυξάνει, δηλαδή ικανοποιείται η σχέση (6.8α), αλλά όχι η σχέση (6.8β), εκδίδεται σχετική προειδοποίηση προς τους χειριστές του συστήματος.

Το γεγονός πως το σύστημα είναι όντως σε οριακό σημείο ως προς την ευστάθεια, φαίνεται από την

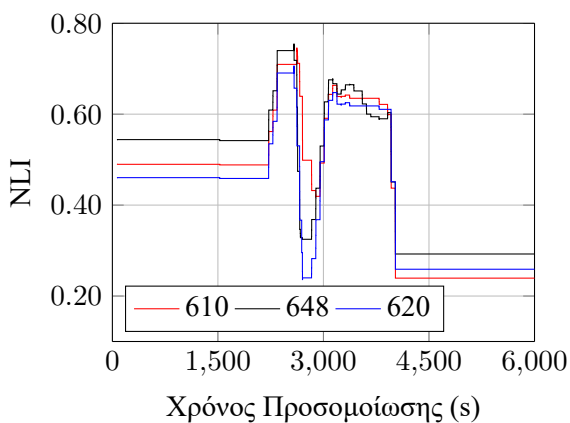


(α) Καμπύλη PV συστήματος ως προς την τάση του ζυγού 710. Απόκριση 1: ασταθές σενάριο, Απόκριση 2: Ευσταθές σενάριο

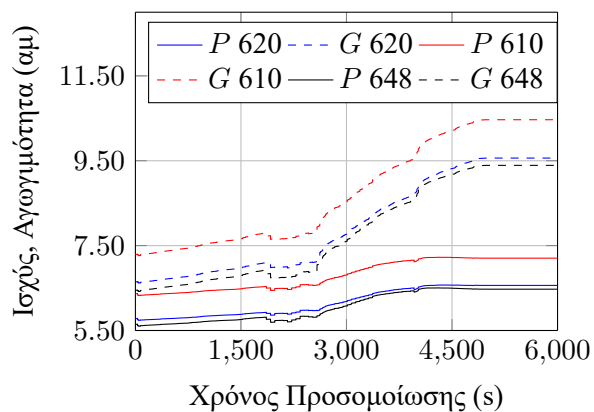


(β) Απόκριση τάσης ζυγών

Σχήμα 6.29: Καμπύλη PV συστήματος και απόκριση τάσης ζυγού 150 kV 710 (GROUF_31) και ζυγών 400 kV 620 (ΓΚΟΥΜΟ11), 610 (GACHAR11) και 648 (GSTEFA11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ευσταθές σενάριο 2 (χωρίς ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ)

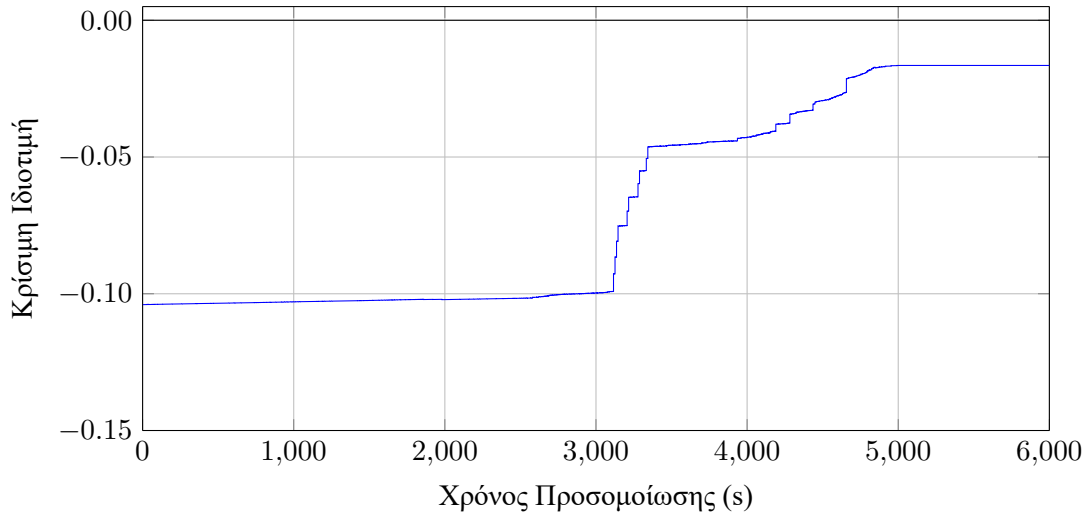


(α) Απόκριση δεικτών



(β) Απόκρισης P, G

Σχήμα 6.30: Απόκριση δεικτών NLI, μεταφερόμενης ενεργού ισχύος P και φαινόμενης ομικής αγωγιμότητας G ζυγών 400 kV 620 (ΓΚΟΥΜΟ11), 610 (GACHAR11) και 648 (GSTEFA11), 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ευσταθές σενάριο 2 (χωρίς ξαφνική απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ)



Σχήμα 6.31: Απόκριση κρίσιμης ιδιοτιμής μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα J_ℓ , 12^{ης} Ιουλίου 2004, για το ευσταθές σενάριο 2 (χωρίς απώλεια μονάδας Αλιβέρι ΙΙΙ)

απόκριση της κρίσιμης ιδιοτιμής του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα, η οποία σχεδιάζεται στο Σχ. 6.31. Όπως φαίνεται η κρίσιμη ιδιοτιμή είναι πολύ κοντά στο 0 και οποιαδήποτε εξασθένιση του συστήματος θα οδηγήσει σε αστάθεια. Ωστόσο, δεν υπάρχει άμεσα ανάγκη αποκοπής φορτίου, όπως στο προηγούμενο σενάριο για την αποτροπή γενικής διακοπής.

Ακόμα όμως και σε αυτήν την οριακά ευσταθή περίπτωση, το σύστημα ανίχνευσης δεν εξέδωσε κάποιον εσφαλμένο συναγερμό, αποδεικνύοντας την επιλογικότητα της συγκεκριμένης μεθόδου, η οποία μέσω της κατάλληλης ρύθμισης είναι σε θέση να διακρίνει την ασταθή από την οριακά ευσταθή περίπτωση. Επιπλέον το γεγονός πως ήδη το σύστημα είναι σε κατάσταση αυξημένης επιτήρησης, σημαίνει ότι οι διαχειριστές έχουν στη διάθεση τους χρόνο να προετοιμαστούν αν συμβεί κάποια επιπλέον διαταραχή που θα οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια, ενώ και το ίδιο το ΣΑ2 είναι ενεργό για να εντοπίσει αυτήν την περίπτωση.

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα, συμβολή και προοπτικές

7.1 Συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής ήταν η ανάπτυξη συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση. Τα φαινόμενα που αναλύθηκαν αφορούν τη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα ενώ οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν μπορούν εύκολα να εφαρμοστούν σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για την αξιολόγηση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης που αναπτύχθηκαν στη διατριβή χρησιμοποιήθηκε κατά βάση η οιονεί στατική προσέγγιση και το πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB, το οποίο τροποποιήθηκε κατάλληλα στα πλαίσια της διατριβής, ενώ για λόγους σύγκρισης και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων έγιναν και προσομοιώσεις με πλήρη χρονικά μοντέλα.

Καθώς τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης, είτε αυτόνομα είτε μέρος ενός ολοκληρωμένου σχήματος προστασίας, στηρίζονται σε κάποια σχετική μέθοδο ανίχνευσης, αρχικά έγινε ανάλυση των δύο μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Η πρώτη μέθοδος είναι η Τοπική Μέθοδος Ανίχνευσης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης που αναφέρεται με το ακρωνύμιο LIVES (Local Identification of Voltage Emergency Situations) και στηρίζεται στις κινήσεις των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών διανομής για την επιτήρηση της ικανής συνθήκης ευστάθειας συστημάτων που η κύρια δυναμική στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι αυτή των ίδιων των ΣΑΤΥΦ.

Η δεύτερη μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας τάσης αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και αποτελεί στην ουσία επέκταση της μεθόδου LIVES για εφαρμογή σε ενδιάμεσους ζυγούς χωρίς ΣΑΤΥΦ, όπως είναι οι ζυγοί ΥΥΤ των Κέντρων Υπερψηλής Τάσης (ΚΥΤ) του συστήματος μεταφοράς. Η μέθοδος εισήγαγε έναν νέο δείκτη επιτήρησης τάσης με την επωνυμία NLI, ο υπολογισμός του οποίου απαιτεί μόνο συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος στους προαναφερθέντες ζυγούς.

Με βάση τις δύο παραπάνω μεθόδους αναπτύχθηκαν διάφορα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης (μόνο για επιτήρηση) αλλά και ολοκληρωμένα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας τα οποία προσφέρουν προστασία από κατάρρευση, εφαρμόζοντας κατάλληλες δράσεις για την αποκατάσταση της ευστάθειας.

Το πρώτο σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης που αναπτύχθηκε και αναφέρεται ως ΣΑ1, είναι ένα σύστημα επιτήρησης που στηρίζεται στην απευθείας υλοποίηση της μεθόδου LIVES. Το εν λόγω σύστημα ανίχνευσης ενσωματώθηκε στη συνέχεια σε τρία συστήματα προστασίας από αστάθεια.

Το πρώτο σύστημα στο οποίο ενσωματώθηκε το ΣΑ1 είναι το σύστημα προστασίας που αναφέρεται ως ΣΠ1.1, το οποίο με την σήμανση συναγερού αστάθειας εφαρμόζει λειτουργίες έκτακτου ελέγχου ΣΑΤΥΦ, με αντιστροφή της λειτουργίας τους προς όφελος της μεταφοράς μέχρι να αποκαταστήσει την ευστάθεια. Η συγκεκριμένη δράση αποτελεί στην ουσία μια έμμεση αποκοπή φορτίου, το μέγεθος της

οποίας εξαρτάται από την ευαισθησία των φορτίων από την τάση. Για λόγους αντιμετώπισης δυναμικά αυτοεπαναφερόμενων φορτίων πίσω από τα ΣΑΤΥΦ, αναπτύχθηκε το σύστημα προστασίας που αναφέρεται ως ΣΠ1.2, το οποίο αποτελεί παραλλαγή του ΣΠ1.1 με επιπλέον τη δυνατότητα εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου, όταν υπάρξει ανίχνευση αστάθειας σε συνδυασμό με κατώφλια των τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος στον μετασχηματιστή στον οποίο εφαρμόζεται.

Καθώς στα συστήματα προστασίας ΣΠ1.1 και ΣΠ1.2 τόσο η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας όσο και η αποκατάσταση της ευστάθειας στηρίζονται σε ενεργά ΣΑΤΥΦ, ενσωματώθηκε και στα δύο συστήματα προστασίας το υποσύστημα αποκατάστασης της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ που αναφέρεται ως LTC-rr, το οποίο όταν διαπιστώσει ότι το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ έφτασε στα όρια των διαθέσιμων λήψεων, τότε μειώνει αυτόματα την τάση αναφοράς της νεκρής του ζώνης για να το ξεμπλοκάρει.

Το τρίτο σχήμα προστασίας, που αναφέρεται ως ΣΠ1.3, χρησιμοποιεί και αυτό τη μέθοδο ανίχνευσης LIVES για τον εντοπισμό της αστάθειας, εφαρμόζοντας άμεση αποκοπή φορτίου στον ζυγό στον οποίο σημαίνεται συναγερμός αστάθειας.

Και τα τρία συστήματα προστασίας από αστάθεια τάσης, που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, δρουν τοπικά, αυτοματοποιημένα, με λογική κλειστού βρόχου και δυνατότητα επαναληπτικών εφαρμογών της προστασίας. Επιπλέον, η υλοποίησή τους είναι απλή, ακόμα και σε υπάρχοντες ελεγκτές ΣΑΤΥΦ, ενώ δεν απαιτείται κάποιο είδος τηλεμετάδοσης σημάτων, αν και θα μπορούσε να μεταφερθεί το σήμα αστάθειας σε κάποιο κέντρο ελέγχου για ενημέρωση των χειριστών ή εφαρμογή επιπλέον μέτρων.

Το δεύτερο σύστημα ανίχνευσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής και αναφέρεται ως ΣΑ2, χρησιμοποιεί το δείκτη NLI για την ανίχνευση αστάθειας σε μια ευάλωτη περιοχή ενός ΣΗΕ η οποία ενώνεται με το υπόλοιπο σύστημα μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς. Το ΣΑ2 στηρίζεται στην επιτήρηση της μεταφερόμενης ισχύος στην ευάλωτη περιοχή σε συνδυασμό με τις μεταβολές της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας που βλέπει ένας συνοριακός ζυγός. Η επιτήρηση των συγκεκριμένων μεγεθών προκύπτει από απλές μετρήσεις φασιθετών ρεύματος και τάσης στον αντίστοιχο συνοριακό ζυγό. Αν και δεν απαιτείται κάποιο προηγμένο σύστημα τηλεπικοινωνιών, παρά μόνο κατάλληλο φιλτράρισμα μετρήσεων φασιθετών (PMU), η ανίχνευση της αστάθειας τάσης σε αυτήν την περίπτωση είναι πολύ γρήγορη και το αντίστοιχο σήμα συναγερμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί από αυτοματοποιημένα σχήματα προστασίας που μπορούν να εφαρμόσουν π.χ. άμεση αποκοπή φορτίου στην ευάλωτη περιοχή.

Σε σχέση με τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης, που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES και αναπτύχθηκαν στη διατριβή, τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Η ανίχνευση της αστάθειας από το σύστημα ΣΑ1 γίνεται πολύ κοντά στο σημείο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης του συστήματος, με τον πρώτο συναγερμό να καθυστερεί όσο και η διαδοχική χρονική καθυστέρηση του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ που σημαίνει τον συναγερμό. Αιτία αυτής της μικρής καθυστέρησης είναι η απαίτηση, για λόγους φιλτραρίσματος και αυξημένης βεβαιότητας, πριν την σήμανση του συναγερμού αστάθειας, η ελεγχόμενη τάση να έχει παραμείνει συνεχώς κάτω από μία τάση αναφοράς για χρόνο ίσο με την χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ.

Το σύστημα ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 είναι αξιόπιστο, καθώς είναι σε θέση να διακρίνει τις ευσταθείς από τις ασταθείς περιπτώσεις, ακόμα και σε περίπτωση με αυξημένο θόρυβο μέτρησης. Επιπλέον, όπως αποδείχθηκε, είναι ανεξάρτητο της σύνθεσης του φορτίου, του οποίου η εξάρτηση από την τάση δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου, με την ανίχνευση της αστάθειας να γίνεται πάντα αρκετά νωρίς ώστε η εφαρμογή προστασίας με το σύστημα ΣΠ1.3 να αποκαθιστά την ευστάθεια σε όλες τις περιπτώσεις.

Σε περίπτωση πολλαπλών επιπέδων μετασχηματιστών και αυτομετασχηματιστών εξοπλισμένων με ΣΑΤΥΦ η εφαρμογή του συστήματος ανίχνευσης ΣΑ1 στο υψηλότερο επίπεδο οδηγεί σε πιο έγκαιρη σήμανση συναγερμού αστάθειας. Αυτό το σήμα μπορεί να σταλεί είτε σε κάποιο κέντρο ελέγχου για

εφαρμογή ενός κεντρικού σχήματος προστασίας, είτε στο χαμηλότερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ σαν μια ακόμα δικλίδα ασφαλείας απέναντι σε εσφαλμένους συναγερμούς.

Σε περίπτωση στατικών φορτίων, τόσο το σύστημα προστασίας ΣΠ1.1 όσο και το ΣΠ1.3 είναι σε θέση να αποκαταστήσουν την ευστάθεια με ανεκτά επίπεδα τάσεων, με το δεύτερο να έχει ελαφρά καλύτερα αποτελέσματα ως προς τη συνολική αποκοπή φορτίου για τρεις λόγους. Ο πρώτος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πως στην περίπτωση του ΣΠ1.3, η εντολή για την ενεργοποίηση της αποκοπή φορτίου δίνεται άμεσα, ενώ από την άλλη πλευρά, η έμμεση αποκοπή φορτίου που επιτυγχάνει το ΣΠ1.1 είναι πιο αργή δεδομένου ότι στηρίζεται στις αντίστροφες κινήσεις των ΣΑΤΥΦ, που από τη φύση τους εισάγουν την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση. Η καθυστέρηση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτούνται περισσότερα διορθωτικά μέτρα. Ο δεύτερος λόγος είναι πως η άμεση αποκοπή μειώνει ταυτόχρονα τόσο την αγωγιμότητα όσο και την κατανάλωση ισχύος, ενώ η έμμεση αποκοπή φορτίου αφήνει άθικτη την αγωγιμότητα. Ο τελευταίος λόγος είναι πως το ποσό της έμμεσης αποκοπής εξαρτάται ευθέως από την ευαισθησία των φορτίων από την τάση, με αποτέλεσμα όσο πιο ανελαστικό είναι το φορτίο τόσο λιγότερο αποτελεσματική είναι η έμμεση αποκοπή και απαιτούνται περισσότερες διορθωτικές κινήσεις.

Από την άλλη πλευρά η χρήση του συστήματος προστασίας ΣΠ1.1 προσφέρει το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζεται κάποια ρύθμιση, όσον αφορά την έμμεση αποκοπή, σε αντιδιαστολή με το ΣΠ1.3 που πρέπει να καθοριστεί το ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή. Επιπλέον είναι και πιο δίκαιο ως προς τους καταναλωτές, με την έννοια ότι όλοι όσοι συνδέονται στον ίδιο μετασχηματιστή υφίστανται τις ίδιες συνέπειες ως προς την ποιότητα ισχύος. Αντίθετα στην εφαρμογή του ΣΠ1.3 κάποιοι χρήστες θα αποσυνδεθούν εντελώς.

Όσον αφορά την αποκατάσταση ευστάθειας από το σύστημα προστασίας ΣΠ1.1, αποδείχθηκε ότι είναι καλύτερο να επιτρέπονται περισσότερες αντίστροφες κινήσεις των ΣΑΤΥΦ για αποκατάσταση της ευστάθειας ανά κύκλο λειτουργίας, αφού με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να αποκατασταθεί η ευστάθεια πιο νωρίς, με μικρότερες συνολικές έμμεσες αποκοπές φορτίου. Αντίθετα, η υιοθέτηση μικρότερου επιτρεπτού αριθμού αντίστροφων κινήσεων μειώνει το ποσό έμμεσης αποκοπής φορτίου ανά κύκλο εφαρμογής, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε περισσότερους κύκλους ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας με αποτέλεσμα μεγαλύτερη συνολική έμμεση αποκοπή.

Η άμεση αποκοπή φορτίου που εφαρμόζει το ΣΠ1.3 είναι κοντά στην ελάχιστη αποκοπή φορτίου που απαιτείται για την αποκατάσταση της ευστάθειας και η οποία υπολογίζεται από την ανάλυση ευαισθησιών και τον προσδιορισμό των μακροπρόθεσμων ορίων φόρτισης του συστήματος. Δεδομένου και της αρχικής καθυστέρησης στην έκδοση συναγερμού που αναφέρθηκε προηγουμένως, αλλά και του γεγονότος πως η αποκοπή δεν εφαρμόζεται ταυτόχρονα σε όλους τους ζυγούς, το επιπλέον ποσό που απαιτείται δικαιολογείται απόλυτα.

Στην περίπτωση που υπάρχουν δυναμικά αυτοεπιανεφερόμενα φορτία πίσω από τα ΣΑΤΥΦ, η χρήση μόνο της έμμεσης αποκοπής δεν συνιστά λύση στο πρόβλημα, παρά μόνο καθυστερεί την αναπόφευκτη αστάθεια τάσης. Σε αυτήν την περίπτωση επιβάλλεται η χρήση άμεσης αποκοπής φορτίου που μπορεί να εφαρμοστεί μέσω των συστημάτων προστασίας ΣΠ1.3 και του ΣΠ1.2.

Σε περίπτωση ύπαρξης πολλαπλών επιπέδων ΣΑΤΥΦ η βέλτιστη λύση είναι η εφαρμογή μόνο ανίχνευσης, χωρίς προστασία στο υψηλότερο επίπεδο και η εγκατάσταση των συστημάτων προστασίας από αστάθεια στο χαμηλότερο επίπεδο, πιο κοντά στο φορτίο. Η χρήση εκτάκτου ελέγχου στα ΣΑΤΥΦ του υψηλότερου επιπέδου με αντιστροφή της λειτουργίας τους είναι εφικτή, αν και οδηγεί σε χαμηλές τάσεις σε όλο το δίκτυο στα κατάντη αυτού του ΣΑΤΥΦ, με αποτέλεσμα να παραβιάζονται πολλά από τα κατώφλια τάσης που μπορούν να ενεργοποιήσουν άμεση αποκοπή, οδηγώντας σε αυξημένα ποσοστά συνολικής αποκοπής φορτίου σε σχέση με την περίπτωση που εφαρμόζεται μόνο επιτήρηση τάσης στο υψηλότερο επίπεδο.

Τέλος, είναι εφικτή η χρήση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας, που αναπτύχθηκαν στη διατριβή και στηρίζονται στη μέθοδο LIVES, σε μεγάλα ΣΗΕ, όπως έδειξε και η εφαρμογή τους σε κρί-

σιμη διαταραχή του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος (ΕΔΣ) για το θέρος του 2010. Ωστόσο, η απόδοση των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας πέφτει όταν το σύστημα έχει ήδη χαμηλά προφίλ τάσεων, με αποτέλεσμα πολλά από τα ΣΑΤΥΦ της ευάλωτης περιοχής να είναι ήδη εξαντλημένα, καθιστώντας τη μέθοδο LIVES ανενεργή. Το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση του υποσυστήματος αποκατάστασης της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, αν και η αύξηση στα περιθώρια φόρτισης είναι μικρή. Σε αυτήν την περίπτωση είναι ιδιαίτερος ευεργετική και η χρήση αέργου αντιστάθμισης στην ευάλωτη περιοχή.

Η αντιστάθμιση μπορεί να είναι είτε κεντρική, π.χ. κοντά σε μονάδες παραγωγής ώστε να ενισχυθούν οι τάσεις τους και να αποφευχθεί η απώλεια λόγω υπότασης, είτε διεσπαρμένη στα αιολικά πάρκα της περιοχής, που ούτως ή άλλως διαθέτουν διατάξεις αντιστάθμισης. Όπως φάνηκε από τις σχετικές προσομοιώσεις τα αποτελέσματα στη δεύτερη περίπτωση ως προς τα περιθώρια φόρτισης του συστήματος είναι ελαφρώς μεγαλύτερα.

Σε σχέση με το σύστημα ανίχνευσης ΣΑ2 που στηρίζεται στο δείκτη NLI, τα κυριότερα συμπεράσματα είναι τα ακόλουθα:

Το σύστημα ανίχνευσης ΣΑ2 μπορεί να εγκατασταθεί σε συνοριακούς ζυγούς μιας ευάλωτης περιοχής του συστήματος, η οποία ενώνεται με το υπόλοιπο σύστημα δια μέσου ενός διαδρόμου μεταφοράς. Το ΣΑ2 είναι πρακτικά αναισθητό τόσο σε μετρητικό θόρυβο όσο και σε βραχυπρόθεσμα μεταβατικά, ενώ είναι σε θέση να διακρίνει τις ασταθείς από τις οριακά ευσταθείς περιπτώσεις.

Λόγω της υλοποίησής του, το ΣΑ2 σημαίνει συναγεμμό αστάθειας πολύ κοντά στο σημείο που το σύστημα φτάνει στο μακροπρόθεσμο όριο φόρτισης του, ενώ έχει και πρακτική ανοσία στην εξάρτηση του φορτίου από την τάση. Τέλος, η εφαρμογή του ΣΑ2 είναι εφικτή ακόμα και σε πραγματικά ΣΗΕ, όπως το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, που παρουσιάζει από τη φύση του μεγάλη γεωγραφική ανισοκατανομή μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης.

Ειδικότερα για το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η συγκεκριμένη υλοποίηση μπορεί να διακρίνει μεταξύ οριακά ευσταθών και ασταθών σεναρίων, σημαίνοντας συναγεμμό στη δεύτερη περίπτωση αρκετά νωρίς, πριν την απώλεια κρίσιμων μονάδων στην περιοχή της πρωτεύουσας, αφήνοντας χρόνο για διορθωτικά μέτρα, όπως για παράδειγμα τον οπλισμό αυτόματων σχημάτων προστασίας.

7.2 Συμβολή της διατριβής

Στην παρούσα διατριβή έγινε ανάπτυξη δύο συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και τριών συστημάτων προστασίας από κατάρρευση, με υλοποίηση και ενσωμάτωση τους σε ένα ενιαίο πακέτο λογισμικού, κατάλληλο για προσομοίωση μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρωτότυπη συμβολή της διατριβής έγκειται κυρίως στα παρακάτω σημεία:

1. Χρήση της μεθόδου ανίχνευσης LIVES σε ενιαία συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση, τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν αυτούσια σε πραγματικούς ελεγκτές ΣΑΤΥΦ, όπως περιγράφονται παρακάτω:
 - (α) Εξέλιξη και τελική ρύθμιση του συστήματος ανίχνευσης που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES (ΣΑ1).
 - (β) Ανάπτυξη ενός αυτόνομου ολοκληρωμένου συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που στηρίζεται στη μέθοδο LIVES (ΣΠ1.1). Συγκεκριμένα, το εν λόγω σύστημα έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης αστάθειας τάσης, αποκατάστασης της ευστάθειας μέσω αντίστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ και, εφόσον έχει επιλεγεί, άμεσης αποκοπής φορτίου (παραλλαγή ΣΠ1.2). Επιπλέον περιλαμβάνει και υποσύστημα παρακολούθησης της κατάστασης των ΣΑΤΥΦ, με δυνατότητα αποκατάστασης της λειτουργίας τους όταν τα ΣΑΤΥΦ εξαντλήσουν το εύρος των διαθέσιμων λήψεων.

- (γ) Ανάπτυξη σχήματος προστασίας που στηρίζεται στην ανίχνευση μέσω LIVES και δυνατότητα άμεσης αποκοπής φορτίου σε ένα τοπικό, αυτοματοποιημένο σύστημα κλειστού βρόχου (ΣΠ1.3).
2. Εφαρμογή των παραπάνω συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση σε συστήματα δοκιμών στα οποία έγινε:
- (α) Μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση στην απόδοσή τους, για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές ρύθμισης.
 - (β) Μελέτη της επίδρασης στην απόδοση των συστημάτων δυναμικά αυτοεπαναφερόμενων φορτίων στα κατάντη των ΣΑΤΥΦ.
 - (γ) Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση τάσης με διάφορες συνθέσεις φορτίου.
 - (δ) Διερεύνηση δυνατότητας χρήσης ανίχνευσης ή και προστασίας σε συστήματα με πολλαπλά επίπεδα μετασχηματιστών /αυτομετασχηματιστών εξοπλισμένων με ΣΑΤΥΦ.
3. Σύγκριση των αποτελεσμάτων εφαρμογής ανίχνευσης αστάθειας ΣΑ1 και ΣΑ2 της οιονεί στατικής προσομοίωσης με αυτά της πλήρους προσομοίωσης, ώστε να φανεί η ισοδυναμία των δύο μεθόδων και να εξασφαλιστεί η δυνατότητα χρήσης της πρώτης μεθόδου σε μεγάλης έκτασης ΣΗΕ. Η χρήση της δεύτερης μεθόδου προσομοίωσης απέδειξε επίσης την ανοσία των μεθόδων ανίχνευσης και προστασίας στην παρουσία θορύβου μέτρησης και βραχυπρόθεσμων μεταβατικών.
4. Σύγκριση των συστημάτων προστασίας από κατάρρευση που αναπτύχθηκαν στη διατριβή τόσο μεταξύ τους όσο και με τη θεωρητικά υπολογιζόμενη ελάχιστη αποκοπή, για την εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων και αξιολόγησής τους.
5. Εφαρμογή των συστημάτων ανίχνευσης και προστασίας αστάθειας τάσης που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, σε κρίσιμη διαταραχή του θέρους 2010.
6. Μελέτη της επίδρασης αντιστάθμισης αέργου ισχύος, μέσω στατών διατάξεων στην περιοχή της Πελοποννήσου, στην αύξηση των ορίων φόρτισης του συστήματος. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις, μια με συγκεντρωμένη αντιστάθμιση στον ΑΗΣ Μεγαλόπολης και μια με διεσπαρμένη αντιστάθμιση στα αιολικά πάρκα της Πελοποννήσου, με τη δεύτερη περίπτωση να εξασφαλίζει ελαφρώς μεγαλύτερα περιθώρια φόρτισης.
7. Συμβολή στην ανάπτυξη συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης από απλές μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος σε έναν ζυγό (ΣΑ2) και υλοποίηση σε προγράμματα ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το συγκεκριμένο σύστημα είναι πολύ απλό, ανιχνεύει την αστάθεια πολύ κοντά στο σημείο εκδήλωσης της, δεν εξαρτάται από πολύπλοκα συστήματα επικοινωνίας και η υλοποίηση του μπορεί να γίνει με βάση την υπάρχουσα τεχνολογία. Πρόκειται για ένα σύστημα που στηρίζεται σε μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος και η σήμανση συναγερμού μπορεί να ενεργοποιήσει ήδη υπάρχουσες προστασίες.
8. Μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων ανίχνευσης του ΣΑ2 στη σήμανση των σχετικών συναγερμών αστάθειας τάσης, καθώς και της ανοσίας του εν λόγω συστήματος σε εξωτερικούς παράγοντες όπως π.χ. θόρυβος μέτρησης και σύνθεσης του φορτίου, οδηγώντας σε διάφορες τελικές ρυθμίσεις στην εν λόγω μέθοδο ανάλογα με την εφαρμογή.

9. Εφαρμογή του ΣΑ2 στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα, σε παραλλαγές του τελευταίου μεγάλου περιστατικού κατάρρευσης, της 12^{ης} Ιουλίου 2004. Η παραλλαγές αυτές έδωσαν την δυνατότητα ελέγχου του συστήματος σε ασταθή και οριακά ευσταθή σενάρια, με τα αποτελέσματα, κατόπιν και των απαραίτητων ρυθμίσεων, να είναι εξαιρετικά.

Καθώς για την ανάλυση και αξιολόγηση των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση, χρησιμοποιήθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της διατριβής, το λογισμικό πακέτο προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB, έγινε εκτεταμένη αναβάθμιση και επέκταση των δυνατοτήτων του, μέσω της ενσωμάτωσης νέων κατάλληλων ρουτινών (υποπρογραμμάτων) αλλά και αλλαγών σε ήδη υπάρχουσες. Συγκεκριμένα:

- Έγινε αναβάθμιση του προγράμματος ώστε να μπορεί να τρέχει σε σύγχρονα λειτουργικά συστήματα (Windows Vista[®], 7[®], 8[®] ή 10[®]) και νέες αρχιτεκτονικές (64bit), διατηρώντας παράλληλα την προς τα πίσω συμβατότητα. Εκτός από το εκτελέσιμο πρόγραμμα εκτεταμένες αλλαγές έγιναν και στον ίδιο τον πηγαίο κώδικα ώστε να μπορεί να μεταγλωτιστεί σε σύγχρονους υπολογιστές, μέσω της αναβάθμισης της γλώσσας από Fortran 77 σε Fortran 95, ενσωματώνοντας πολλές από τις δυνατότητες που η τελευταία προσφέρει (κυρίως στο κομμάτι της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων υποπρογραμμάτων).
- Προστέθηκαν νέες δυνατότητες και επιλογές στην διεπαφή με το χρήστη.
- Προστέθηκαν νέα μηνύματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως π.χ. αλλαγής προσήμου ευαισθησιών, ανίχνευσης αστάθειας, εφαρμογή προστασίας, εξάντληση ΣΑΤΥΦ, κλπ.
- Αναβάθμιση του περιβάλλοντος εκτύπωσης αποκρίσεων, ώστε να υπάρχει συνεργασία με τις τελευταίες εκδόσεις του προγράμματος gnuplot αλλά και προσθήκη περισσότερων επιλογών εκτύπωσης. Συγκεκριμένα, μπορούν πλέον να εκτυπώνονται οι αποκρίσεις της κρίσιμης ιδιοτιμής και των ευαισθησιών $S_{Q,Q}$ αλλά και αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την προστασία (π.χ. ενοποιημένες αποκρίσεις πρωτεύοντος, δευτερεύοντος και λόγου ΣΑΤΥΦ μαζί με τις τάσεις αναφοράς για τη μέθοδο LIVES, αποκοπές φορτίου, κλπ.).
- Υλοποίηση όλων των ρουτινών που σχετίζονται με την προσομοίωση των συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.
- Δυνατότητα εξαγωγής ροών φορτίου σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, που χρησιμοποιείται από τη μέθοδο ανίχνευσης αστάθειας τάσης που βασίζεται στον δείκτη NLI και στις μετρήσεις φασιθετών (ΣΑ2).
- Ενημέρωση μοντέλου προστασίας υποτάσεως γεννητριών, ώστε να χρησιμοποιείται μόνο από τους θερμικούς σταθμούς (που έχουν βοηθητικά και για τους οποίους προορίζεται η συγκεκριμένη προστασία) και όχι τους υδροηλεκτρικούς.
- Ενημέρωση του μοντέλου προστασίας ρεύματος στάτη για να λαμβάνει πλέον υπόψη το βήμα προσομοίωσης.
- Ανάπτυξη μοντέλου αναπαράστασης αιολικών πάρκων στη MT, επεκτείνοντας την ακρίβεια του προγράμματος που μέχρι τώρα θεωρούσε τα αιολικά πάρκα αρνητικά φορτία συνδεδεμένα στην ΥΤ. Αυτό δίνει τη δυνατότητα χρήσης του προγράμματος για περαιτέρω μελέτη της συμβολής της διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση και ηλεκτρονικών ισχύος στην ευστάθεια τάσης του συστήματος.

- Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής (από το αντίστοιχο μενού και το αρχείο δεδομένων) τύπου προστασίας, μεταξύ:
 - Απλής προσομοίωσης ανίχνευσης βασισμένη στη μέθοδο LIVES (ΣΑ1).
 - Εφαρμογής αυτόνομου και ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας (ΣΠ1.1).
 - Εφαρμογής ανίχνευσης LIVES με άμεση αποκοπή φορτίου (ΣΠ1.3).
 - Εφαρμογής ανίχνευσης αστάθειας μέσω μετρήσεων φασιθετών τάσης και ρεύματος (ΣΑ2).
- Αναβάθμιση του τρόπου ανάγνωσης του αρχείου δεδομένων με προσθήκη περισσότερων ελέγχων και χρήση διαφορετικών υποπρογραμμάτων για την ανάγνωση διαφορετικού τύπου δυναμικών στοιχείων (π.χ. γεννήτριες, φορτία, μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, κλπ.). Το γεγονός αυτό κάνει πιο εύκολη την προσθήκη νέων τύπων στοιχείων (π.χ. ηλεκτρονικά ισχύος) ή και αλλαγές σε ήδη υπάρχοντα.
- Υπάρχει πλέον δυνατότητα επιλογής εκτύπωσης των κρίσιμων ιδιοτιμών και των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων σε κάθε βήμα της προσομοίωσης καθώς και των ευαισθησιών $S_{Q_g Q}$ για κάθε ζυγό ξεχωριστά.
- Δυνατότητα εντοπισμού σημείου ορίων φόρτισης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης με έκδοση αντίστοιχου μηνύματος. Στο όριο φόρτισης μπορούν να υπολογιστούν τα στοιχεία του κάθετου διανύσματος της επιφάνειας ορίων φόρτισης για προσδιορισμό της ελάχιστης αποκοπής.
- Ανάπτυξη και προσθήκη διακοπτικών μοντέλων συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης, με δυνατότητα κατάλληλης επιλογής μέσα από το αρχείο δεδομένων.

7.3 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας και εφαρμογές

Οι προοπτικές συνέχισης της έρευνας που αναφέρθηκε στην παρούσα διατριβή βρίσκονται πάνω σε δύο διακριτές κατευθύνσεις. Η μία κατεύθυνση αφορά τα συστήματα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση και η δεύτερη τα προγράμματα προσομοίωσης και ιδιαίτερα το λογισμικό πακέτο WPSTAB.

Όσον αφορά την πρώτη κατεύθυνση, που σχετίζεται με τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας, μια προοπτική αφορά την πρακτική υλοποίηση σε πραγματικό σύστημα (στο πεδίο). Τόσο τα συστήματα που στηρίζονται σε LIVES, όσο και αυτό που στηρίζεται στο δείκτη NLI και στις μετρήσεις φασιθετών, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε δοκιμαστικό επίπεδο, π.χ. στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, ώστε να αξιολογηθεί η χρήση τους σε πραγματικές συνθήκες. Δεδομένου μάλιστα ότι ακόμα και στην πλήρη προσομοίωση υπάρχουν παράμετροι που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη ή η μοντελοποίηση τους είναι ημιτελής, λόγω έλλειψης στοιχείων, η συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να αναδείξει ζητήματα που δεν έχουν ακόμα εμφανιστεί.

Όσον αφορά τώρα τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας που στηρίζονται στη μέθοδο LIVES, ένα ενδεχόμενο είναι η συνδυαστική τους χρήση από κεντρικά ελεγχόμενα σχήματα προστασίας. Αν και, όπως έχει γίνει προφανές, τα εν λόγω συστήματα είναι αυτόνομα και διεσπαρμένα, η χρήση τους θα μπορούσε να συνδυαστεί με σχήμα προστασίας ευρείας περιοχής, π.χ. μέσω κατάλληλων τηλεπικοινωνιών, ούτως ώστε αν κάποιος ΣΑΤΥΦ ανιχνεύσει αστάθεια, τότε να δοθεί άμεσα εντολή για αποκοπή φορτίου όχι απαραίτητα στον ίδιο ζυγό στον οποίο γίνεται η ανίχνευση, αλλά σε κάποιον ή κάποιους άλλους, βάσει ενός κεντρικού σχεδιασμού. Επίσης, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος για τη δυναμική ρύθμιση κατωφλίων τάσης για συστήματα αποκοπής φορτίου λόγω υπότασης.

Οι προοπτικές που αφορούν τη μέθοδο ανίχνευσης με χρήση μετρήσεων από φασιθέτες (ΣΑ2) είναι πιο πολλές. Ένα αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω έρευνα είναι αλγόριθμοι και διαδικασίες φιλτραρίσματος των μετρήσεων που θα εξαλείψουν από τα αντίστοιχα πραγματικά σήματα τον θόρυβο μέτρησης και τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά, κρατώντας μόνο την γενική τάση αυτών των σημάτων. Αν και η χρήση του φίλτρου των κινητών μέσων όρων προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις μέχρι τώρα εφαρμογές ακόμα και πλήρους προσομοίωσης, ο υπολογισμός του δείκτη NLI σε πραγματικά συστήματα απαιτεί τη χρήση εξελιγμένων μεθόδων επεξεργασίας σήματος.

Ένα άλλο αντικείμενο που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης είναι η δυνατότητα χρήσης δυναμικών παραμέτρων για το ΣΑ2. Συγκεκριμένα, ανάλογα με τις συνθήκες και αν πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις θα μπορούσε π.χ. το κατώφλι απόρριψης μετρήσεων ενεργού ισχύος να μειώνεται ή να αυξάνεται δυναμικά όπως και το χρονικό διάστημα επιτήρησης των μεταβολών.

Μια άλλη προοπτική που υπάρχει σε σχέση με το ΣΑ2, αφορά τη χρήση ισοδυνάμων δικτύων. Στην παρούσα υλοποίηση η μέθοδος με τους δείκτες NLI δεν απαιτεί ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των συνοριακών ζυγών στους οποίους εφαρμόζεται. Ωστόσο, το γεγονός αυτό μπορεί δυνητικά να δημιουργήσει κάποια προβλήματα αφού ο κάθε συνοριακός ζυγός επιτηρεί μόνο τη μεταφερόμενη ισχύ που ρέει προς την ευάλωτη περιοχή του δικτύου μέσω αυτού, χωρίς να γνωρίζει τι γίνεται στους υπόλοιπους. Αν και με τη μέχρι τώρα υλοποίηση και ρύθμιση του συστήματος, ακόμα και σε περιπτώσεις που υπάρχουν απότομες μεταβολές του φορτίου σε οριακές καταστάσεις, δεν σημαίνεται κάποιος ψευδής συναγερμός, η χρήση ενός ισοδύναμου ζυγού θα εξάλειφε τελείως αυτό το ενδεχόμενο.

Τέλος, όσον αφορά την πρώτη κατεύθυνση, μια επιπλέον προοπτική είναι η ενσωμάτωση της μεθόδου ανίχνευσης με μετρήσεις φασιθετών σε αυτοματοποιημένο σχήμα προστασίας.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας, η δεύτερη κατεύθυνση των προοπτικών εξέλιξης της έρευνας σχετίζεται με το πρόγραμμα WPSTAB. Προς αυτήν την κατεύθυνση θα πρέπει να ενσωματωθεί ο αλγόριθμος του συστήματος ΣΑ2 εντός του ίδιου του προγράμματος, ώστε η ανίχνευση να γίνεται κατά τη στιγμή της προσομοίωσης για να μπορεί να συνδυαστεί με κάποια μέθοδο προστασίας.

Μια δεύτερη αναβάθμιση που πρέπει να γίνει στο εν λόγω πρόγραμμα, αφορά την ανάπτυξη και προσθήκη μοντέλων των στοιχείων στατικής αντιστάθμισης από ηλεκτρονικά ισχύος, τα οποία δεδομένου και της αύξησης της διεσπαρμένης παραγωγής, μπορούν να παίξουν στο μέλλον πολύ μεγάλο ρόλο στην ευστάθεια τάσης των ΣΗΕ.

Τέλος, θα πρέπει να ενσωματωθεί στην ανάλυση ευστάθειας τάσης του προγράμματος η επίδραση της χρήσης αυτόματων διατάξεων περιορισμού ρεύματος τυμπάνου, για ακόμα πιο ακριβή υπολογισμό του μακροπρόθεσμου ορίου φόρτισης.

Παράρτημα Α

WPSTAB Ver. 5.004 2016

Εκτός από τα συστήματα ανίχνευσης και προστασίας από αστάθεια τάσης που έχουν ενσωματωθεί στο WPSTAB έγινε εκτεταμένη αναβάθμιση και σε άλλες πλευρές του προγράμματος οι οποίες παρουσιάζονται εδώ. Σε όλες τις περιπτώσεις οι αλλαγές που έχουν ενσωματωθεί, έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει συμβατότητα προς τα πίσω με παλαιότερες εκδοχές του προγράμματος.

Η τρέχουσα έκδοση του WPSTAB στην οποία γίνεται αναφορά εδώ είναι η 5.004 του 2016. Σε σχέση με παλαιότερες εκδοχές του προγράμματος [Βου99, Νικ07] περιλαμβάνει επιπλέον τα εξής:

1. Δυνατότητα επιλογής ανάλυσης ευαισθησιών (Sensitivity Analysis)
2. Επιλογή προστασίας βασισμένη σε LIVES (LIVES Protection)
3. Ροές ισχύος σε συννοριακούς ζυγούς, για χρήση από μέθοδο ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις φασιστετών (δείκτης NLI)
4. Επιλογή νέων τύπων ΣΠΥ
5. Δυνατότητα εκτύπωσης νέων αποκρίσεων (ΣΑΤΥΦ, LIVES, ευαισθησιών, ιδιοτιμών)
6. Συμβατότητα με παλαιότερες εκδόσεις (σχετικά με την ανάγνωση αρχείου εισόδου "*.dat")
7. Νέα μηνύματα εξόδου στην κονσόλα μηνυμάτων και στα αντίστοιχα αρχεία.

Στις ακόλουθες ενότητες κάθε μία από αυτές τις καινούργιες δυνατότητες αναλύεται περαιτέρω. Να τονιστεί εδώ ότι οι βασικές διαδικασίες ανάγνωσης των δεδομένων εισόδου, αρχικοποίησης και επιβολής διαταραχών, που γίνονται κατά την προσομοίωση στη μακροχρόνια χρονική κλίμακα, παραμένουν οι ίδιες όπως περιγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του προγράμματος [Βου99]. Ως εκ τούτου, δεν θα γίνει αναφορά σε αυτές τις διαδικασίες, όπως και στις άλλες λειτουργίες που παραμένουν ίδιες, αν και εσωτερικά στον κώδικα έχουν γίνει βελτιώσεις και προσθήκες δικλίδων ασφαλείας. Για λόγους πληρότητας όμως και αναφοράς, αρχικά περιγράφονται η δομή του φακέλου του προγράμματος, οι απαιτήσεις λειτουργίας καθώς και ο τρόπος επεξεργασίας του πηγαίου κώδικα του.

A.1 Δομή φακέλου WPSTAB

Ο φάκελος που περιέχει το πρόγραμμα WPSTAB ονομάζεται WinPstab και μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε επιθυμεί ο χρήστης, χωρίς την υποχρέωση εγκατάστασης κάποιου προγράμματος. Ο συγκεκριμένος φάκελος περιλαμβάνει τέσσερις (4) υποφακέλους:

1. dat: Περιλαμβάνει αρχεία εισόδου, δεδομένων και διαταραχών.

2. **MTSplot**: Περιλαμβάνει αρχεία εξόδου που χρησιμοποιούνται είτε για απευθείας γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων μέσα από το WPSTAB σε συνεργασία με το πρόγραμμα `gnuplot`, είτε για περαιτέρω επεξεργασία από άλλο πρόγραμμα π.χ. `Matlab`[®].
3. **reports**: Περιλαμβάνει τα αρχεία αναφορών σε σχέση με την προσομοίωση, π.χ. αποτελέσματα αρχικοποίησης, αντίγραφο μηνυμάτων της κονσόλας κλπ.
4. **WPSTAB** Περιλαμβάνει το εκτελέσιμο πρόγραμμα (`WPSTAB_05_004.exe` στην παρούσα έκδοση).

Αν και οι ανωτέρω φάκελοι είναι οι προκαθορισμένοι (default), ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει, μέσα από το ίδιο το πρόγραμμα και τις επιλογές του, διαφορετικούς φακέλους και ονομασία αρχείων εξόδου.

A.2 Απαιτήσεις για τη χρήση του Plot

Με το πέρας της εκτέλεσης της προσομοίωσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα γραφικής παράστασης διαφόρων μεγεθών που καθορίζονται από το σχετικό παράθυρο διαλόγου. Καθώς όμως το WPSTAB χρησιμοποιεί το πρόγραμμα `gnuplot` για να φέρει σε πέρας αυτή τη λειτουργία, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση του τελευταίου. Η παλαιότερη έκδοση `gnuplot` με την οποία υπάρχει συμβατότητα είναι η 4.6¹.

Καθώς το εκτελέσιμο αρχείο του `gnuplot` αναζητείται από το WPSTAB μέσω των μεταβλητών του συστήματος, είναι απαραίτητο να υπάρχει στις αντίστοιχες μεταβλητές η πλήρης διαδρομή μέχρι τον φάκελο `bin` του `gnuplot`. Στις τελευταίες εκδόσεις, κατά την εγκατάσταση του `gnuplot` το `path` εντάσσεται αυτόματα στις μεταβλητές του συστήματος. Αν δεν συμβεί αυτό θα πρέπει χειροκίνητα ο χρήστης να το προσθέσει, ανάλογα με την έκδοση του λειτουργικού που έχει.

A.3 Επεξεργασία πηγαίου κώδικα WPSTAB

Για την επεξεργασία και επιτυχή μεταγλώττιση του πηγαίου κώδικα του WPSTAB απαιτούνται τα ακόλουθα:

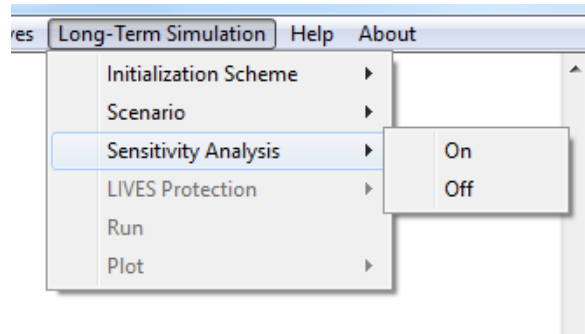
1. Windows Vista[®], 7[®], 8[®] ή 10[®] (32 ή 64 bit)
2. Visual Studio 2010 Premium
3. Intel Parallel Studio XE 2011 SP1 Update2
4. Visual Studio 2010 SP1

A.4 Ανάλυση ευαισθησιών

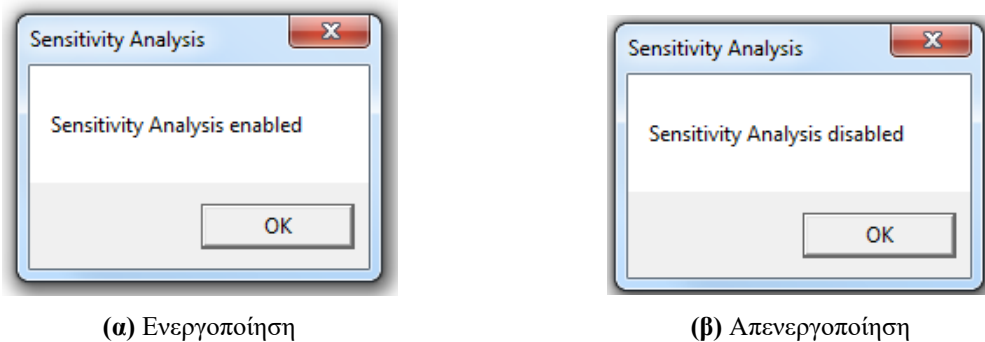
Στην συγκεκριμένη έκδοση του WPSTAB υπάρχει η δυνατότητα ανάλυσης ευαισθησιών κατά τη διάρκεια της μακροπρόθεσμης προσομοίωσης: Menu bar → Long-Term Simulation → Sensitivity Analysis.

Μετά την αρχικοποίηση του συστήματος (Initialization Scheme) και την επιβολή (ή ανάγνωση) διαταραχών και παραμέτρων της προσομοίωσης (Scenario) ενεργοποιείται η δυνατότητα επιλογής ανάλυσης ευαισθησιών. Είναι απαραίτητο ο χρήστης να κάνει μία επιλογή, On ή Off, προκειμένου να προχωρήσει στις υπόλοιπες επιλογές της προσομοίωσης, όπως φαίνεται από την Εικ. Α.1.

¹Έχει δοκιμαστεί επιτυχώς μέχρι και η έκδοση 5.01



Εικόνα A.1: Επιλογή ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004

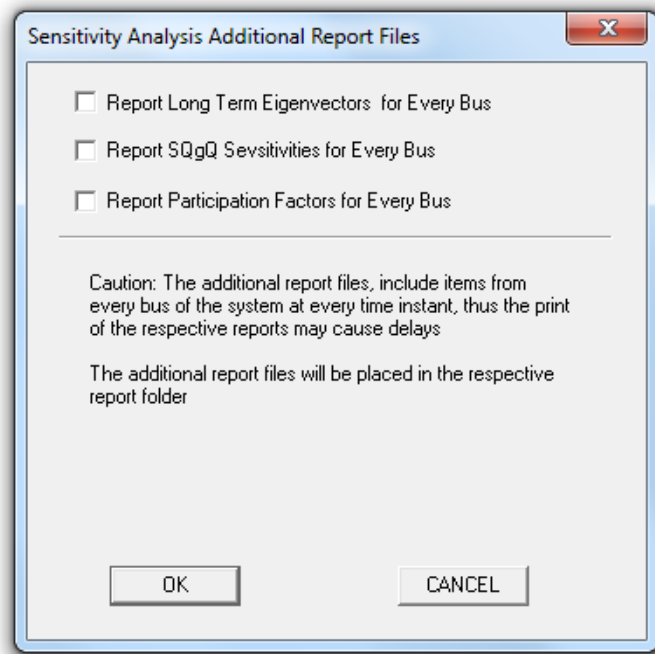


Εικόνα A.2: Επιτυχής καταχώρηση επιλογής ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004

Αν ο χρήστης επιλέξει την απενεργοποίηση της ανάλυσης ευαισθησιών (Off), δεν τρέχουν οι αντίστοιχες ρουτίνες, παρά μόνο σε περίπτωση κατάρρευσης (μη σύγκλισης της μεθόδου επίλυσης) οπότε υπολογίζεται σε εκείνο το σημείο μόνο η κρίσιμη ιδιοτιμή. Την επιλογή του χρήστη ακολουθεί μήνυμα επιτυχούς καταχώρησης, όπως φαίνεται στην Εικ. A.2β.

Αν αντίθετα ο χρήστης επιλέξει την ανάλυση ευαισθησιών (On), τότε ανοίγει ένα καινούργιο παράθυρο διαλόγου, όπως φαίνεται στην Εικ. A.3, όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα επιλογής για το αν και ποια αρχεία θα δημιουργηθούν στο φάκελο “reports”. Οι δυνατότητες επιλογής και τα αντίστοιχα αρχεία είναι τα εξής:

1. Η επιλογή “Report Long Term Eigenvectors for Every Bus” δημιουργεί το αρχείο εξόδου LT_LEFT_EIV_.REP. Πρόκειται για αναβάθμιση ενός αρχείου που δημιουργούνταν σε παλαιότερες εκδόσεις και ονομαζόταν SENSLEFT το οποίο περιελάμβανε μόνο τα αριστερά ιδιοδιανύσματα και μόνο όταν δεν υπήρχε σύγκλιση της υπολογιστικής μεθόδου (γεγονός που δηλώνει κατάρρευση). Το συγκεκριμένο αρχείο αποθηκεύονταν στον φάκελο dat. Το καινούργιο αρχείο σώζεται στο φάκελο report και περιλαμβάνει για όλες τις χρονικές στιγμές τα ακόλουθα: 1) Τα μακροπρόθεσμα (longterm) αριστερά ιδιοδιανύσματα, 2) εκθετικό μέρος του ενεργού και άεργου φορτίου και 3) το κάθετο ιδιοδιάνυσμα στην καμπύλη ορίων φόρτισης για τον υπολογισμό του πιο αποδοτικού ζυγού για εφαρμογή αποκοπής.
2. Η επιλογή “Report SQgQ Sensitivities for Every Bus” δημιουργεί το αρχείο εξόδου EVELINA.REP. Πρόκειται για αναβάθμιση του αρχείου που στις προηγούμενες εκδόσεις του προγράμματος ονομαζόταν EVELINA.RES και αποθηκευόταν εντός του φακέλου MTSplot. Το καινούργιο αρχείο περιλαμβάνει για κάθε χρονική στιγμή όλες τις ευαισθησίες $S_{Q_g, Q}$ συγκεντρώνοντας στο τέλος και την μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ευαισθησίας. Έχει πλέον γίνει αναβάθμιση



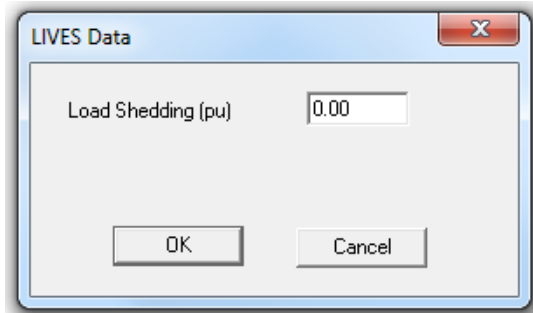
Εικόνα Α.3: Επιλογές αρχείων εξόδου σε περίπτωση ενεργοποίησης της ανάλυσης ευαισθησιών, WPSTAB 5.004

στον κώδικα που υπολογίζει και τυπώνει τις ευαισθησίες ώστε να αναγνωρίζεται η αλλαγή προσήμου μέσω του απείρου ή μιας μεγάλης θετικής τιμής και όχι της ύπαρξης απλά αρνητικής ευαισθησίας (όπως ήταν αρχικά ο κώδικας της ρουτίνας) που μπορεί να ανταποκρίνεται σε χωρητικό συντελεστή ισχύος.

3. Η επιλογή “Report Participation Factors for Every Bus” δημιουργεί το αρχείο εξόδου PFMleftlongterm.REP. Πρόκειται για αναβάθμιση του αρχείου με το ίδιο όνομα, χωρίς όμως την αντίστοιχη κατάληξη, που αποθηκεύονταν στον φάκελο dat. Πλέον περιλαμβάνει τους *participation factors*, οι οποίοι υπολογίζονται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης.

Αφού ο χρήστης επιλέξει ποια από τα προαναφερόμενα αρχεία θέλει να δημιουργηθούν, το πρόγραμμα εκδίδει μήνυμα επιτυχούς καταχώρησης, όπως φαίνεται στην Εικ. Α.2α. Ανεξάρτητα του ποια από τα προηγούμενα αρχεία θα επιλέξει ο χρήστης να εκτυπωθούν στον φάκελο reports (μπορεί να μην επιλεγεί και κανένα από αυτά), με την ενεργοποίηση της ανάλυσης ευαισθησιών σε κάθε βήμα της προσομοίωσης γίνεται υπολογισμός των ευαισθησιών $S_{Q_g Q}$ και τις αντίστοιχες κρίσιμης (πιο κοντά στο μηδέν) ιδιοτιμής του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα J_ℓ . Η συγκεκριμένη επιλογή αυξάνει τον χρόνο προσομοίωσης, καθώς δημιουργούνται τα ακόλουθα αρχεία μέσα στον φάκελο MTSP1ot:

1. MTS_LTcriteig.RES: Αρχείο που περιλαμβάνει την κρίσιμη ιδιοτιμή του μακροπρόθεσμου Ιακωβιανού πίνακα J_ℓ και τον αντίστοιχο χρόνο. Προσοχή χρειάζεται κατά την χρησιμοποίηση αυτού του αρχείου, καθώς κοντά στην κατάρρευση (αν εμφανιστεί) η κρίσιμη ιδιοτιμή θεωρητικά απειρίζεται (στην πράξη παίρνει μια πολύ μεγάλη θετική τιμή), ο αλγόριθμος ωστόσο υπολογίζει την ιδιοτιμή που είναι πιο κοντά στο μηδέν και μπορεί να έχει ακόμα αρνητικό πρόσημο.
2. MTS_SQgQ.RES: Αρχείο που περιλαμβάνει τη μέγιστη θετική και αργότερα αρνητική (εφόσον υπάρχει αλλαγή προσήμου) ευαισθησία, συναρτήσει του χρόνου.



Εικόνα A.4: Επιλογή ποσοστού αποκοπής προστασίας LIVES, WPSTAB 5.004

A.5 Επιλογή LIVES Protection

Τα επιπλέον δεδομένα για την προστασία που βασίζεται στη μέθοδο LIVES αποθηκεύονται στην υποομάδα δεδομένων των μετασχηματιστών (Transformer Data) του αρχείου εισόδου "*.dat". Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μεταβλητή IOLT ως εξής:

- 0: Παλιά δυνατότητα, ΣΑΤΥΦ ανενεργό.
- 1: Παλιά δυνατότητα, ΣΑΤΥΦ ενεργό.
- 2: Νέα δυνατότητα, το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ έχει το σύστημα επιτήρησης τάσης LIVES-alarm (ΣΑ1).
- 3: Νέα δυνατότητα, το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ έχει το αυτόνομο ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης (ΣΠ1.1) που αποτελείται από τα υποσυστήματα:
 1. LIVES-alarm (Ανίχνευση αστάθειας)
 2. LIVES-restore (Αποκατάσταση ευστάθειας)
 3. LTC-range restoration (Αποκατάσταση λειτουργίας ΣΑΤΥΦ)
- 4: Νέα δυνατότητα, το αντίστοιχο ΣΑΤΥΦ περιλαμβάνει το σύστημα LIVES-alarm με άμεση αποκοπή φορτίου (ΣΠ1.3).

Εφόσον υπάρχει κάποια από τις προαναφερθείσες προστασίες για τουλάχιστον ένα ΣΑΤΥΦ, μετά την επιλογή για την ανάλυση ευαισθησιών στο μενού της μακροχρόνιας προσομοίωσης, υπάρχει και η επιλογή LIVES Protection, στην οποία καθορίζεται το ποσοστό αποκοπής φορτίου ανά συναγερμό LIVES το οποίο χρησιμοποιείται στην περίπτωση που $IOLT = 4$. Το συγκεκριμένο ποσοστό δίνεται σε αμ τιμές.

Για να προχωρήσει ο χρήστης στην εκτέλεση της προσομοίωσης Run, θα πρέπει να επιλέξει ένα ποσοστό αποκοπής (προεπιλεγμένη τιμή 0.00 αμ), όπως φαίνεται στην Εικ. A.4.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει εγκατεστημένη καμία προστασία σε κανένα ΣΑΤΥΦ ($IOLT = 0$ ή 1) η επιλογή LIVES Protection στο μενού είναι απενεργοποιημένη.

A.6 New LILVES Index (NLI)

Ο καθορισμός των συννοριακών ζυγών που μας ενδιαφέρουν γίνεται από το αρχείο δεδομένων (.dat), μέσω της μεταβλητής IPL0T, η οποία χρησιμοποιούσε αρχικά μόνο τιμές 0 και 1 για μη εκτύπωση ή εκτύπωση αντίστοιχα των τάσεων των ζυγών σε αρχεία εξόδου τα οποία χρησιμοποιούνται από το

πρόγραμμα gpurplot και εξαγωγή γραφικών αποκρίσεων. Πλέον, με χρήση του αριθμού 2 ορίζονται οι συνοριακοί ζυγοί του διαδρόμου που επιτηρείται. Εφόσον υπάρχει τέτοιος ζυγός, δημιουργείται επιπλέον το αρχείο BUS_DATA.RES μέσα στο φάκελο MTSplot, το οποίο περιλαμβάνει για κάθε χρονική στιγμή τα ακόλουθα:

1. Μέτρο τάσης
2. Γωνία τάσης
3. Συνολική ενεργό και άεργο παραγωγή του ζυγού
4. Συνολικό ενεργό και άεργο φορτίο του ζυγού
5. Ροές ενεργού και άεργου ισχύος προς τους ζυγούς με τους οποίους συνδέεται

Από το συγκεκριμένο αρχείο, στην παρούσα έκδοση, μέσω κατάλληλης επεξεργασίας από άλλο πρόγραμμα εξωτερικά, π.χ. Matlab®, μπορούν να υπολογιστούν άμεσα οι δείκτες NLI.

A.7 Επιλογή τύπων Συστημάτων Προστασίας Υπερδιέγερσης

Παρέχεται η δυνατότητα επιλογής επιπλέον τύπων προστασίας υπερδιέγερσης ΣΠΥ των γεννητριών. Ο τύπος αυτός διαβάζεται από την υποομάδα δεδομένων των γεννητριών (Generator Data) του εκάστοτε αρχείου εισόδου *.dat. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η μεταβλητή GLIM ως εξής:

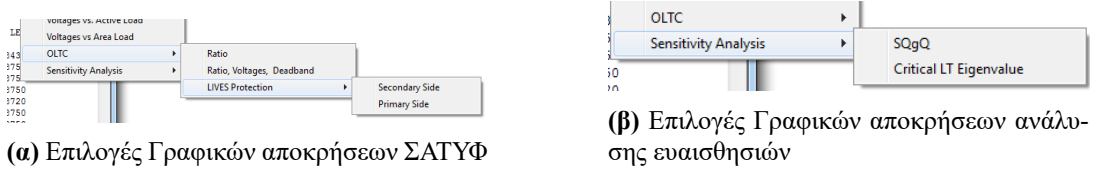
1. $GLIM = 0$: Ολοκληρωτικού τύπου (Integral Type) ΣΠΥ (*Παλιά δυνατότητα*)
2. $GLIM > 0$: Αναλογικό αθροιστικού τύπου (Proprtional, Summed Type) ΣΠΥ (*Παλιά δυνατότητα*)
3. $-1 < GLIM < 0$: Διακοπτικού τύπου με υποκατάσταση σήματος σφάλματος (Takeover, Error Signal Substitution) ΣΠΥ (*Νέα δυνατότητα*)
4. $GLIM \leq -1$: Διακοπτικού τύπου με υποκατάσταση σήματος ελέγχου (Takeover, Control Signal Substitution) ΣΠΥ (*Νέα δυνατότητα*)

A.8 Νέες αποκρίσεις - Plots

Μετά το πέρας της μακροπρόθεσμης προσομοίωσης ενεργοποιούνται στο μενού του Long-term Simulation οι επιλογές για εκτύπωση γραφικών παραστάσεων. Πέρα από τα παλιά δεδομένα, έχουν προστεθεί επιλογές για τα ΣΑΤΥΦ και, εφόσον υπάρχει έστω και ένας ζυγός με σύστημα ανίχνευσης ή προστασίας που βασίζεται στη μέθοδο LIVES, επιλογές που σχετίζονται με αυτά. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται ένα επιπλέον αρχείο στο φάκελο MTSplot με τίτλο MTS_LTC.RES. Αυτό το αρχείο περιλαμβάνει τα δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις χρονικές αποκρίσεις των ΣΑΤΥΦ, οι οποίες είναι (Εικ. Α.5α):

1. Απόκριση λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ (Ratio).
2. Αποκρίσεις λόγου μετασχηματισμού, ελεγχόμενης τάσης και νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ στο ίδιο γράφημα (Ratio, Voltage, Deadband).
3. Αποκρίσεις σχετικές με συστήματα που βασίζονται στη μέθοδο LIVES, δηλαδή τάση πρωτεύοντος, δευτερεύοντος, τάσεις αναφοράς, κλπ., εφόσον υπάρχει (LIVES data).

Επιπλέον εφόσον έχει γίνει επιλογή της ανάλυσης ευαισθησιών, δίνεται η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης της εξέλιξης των ευαισθησιών $S_{Q_q Q}$ και της κρίσιμης ιδιοτιμής (Εικ. Α.5β).



(α) Επιλογές Γραφικών αποκρίσεων ΣΑΤΥΦ

(β) Επιλογές Γραφικών αποκρίσεων ανάλυσης ευαισθησιών

Εικόνα A.5: Νέες επιλογές γραφικών αποκρίσεων, WPSTAB 5.004

A.9 Νέα μηνύματα εξόδου κεντρικής κονσόλας

Εφόσον υπάρχει κάποια προστασία LIVES, εμφανίζονται στην κεντρική κονσόλα μηνύματα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

1. Ενεργοποίησης LA
2. Ενεργοποίησης LR
3. Ενεργοποίησης LTC-rr
4. Εξάντλησης ΣΑΤΥΦ
5. Άμεσης αποκοπής φορτίου
6. Έμμεση αποκοπή φορτίου, λόγω μείωσης της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ

Στο τέλος της προσομοίωσης εμφανίζεται επιπλέον το συνολικό φορτίο έμμεσης και άμεσης αποκοπής.

Αν έχει επιλεγεί επιπλέον και η ανάλυση ευαισθησίας, βγαίνει μήνυμα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, στο σημείο αστάθειας (αλλαγής προσήμου των ευαισθησιών $S_{Q_g Q}$).

Παράρτημα Β

Συστήματα ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας

Πίνακας Β.1: Συνοπτική περιγραφή συστημάτων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας από κατάρρευση

Όνομα	Περιγραφή	Παράμετροι
ΣΑ1	Σύστημα επιτήρησης ευστάθειας τάσης LIVES-alarm (LA) βασισμένο στη μέθοδο LIVES	ϵ_t : παράμετρος χρόνου σήμανσης ϵ_r : ανοχή τάσης αναφοράς
ΣΠ1.1	Αυτόνομο και ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης με έμμεση μείωση φορτίου που αποτελείται από τα υποσυστήματα LA, αποκατάστασης ευστάθειας LIVES-restore (LR) και αποκατάστασης λειτουργίας ΣΑΤΥΦ LTC-range restoration (LTC-rr)	Παράμετροι ΣΑ1 n_{rev}^{max} : αριθμός αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ ανά εφαρμογή n_{LR}^{max} : αριθμός εφαρμογών
ΣΠ1.2	Παραλλαγή του ΣΠ1.1 για δυναμικά επαναφερόμενα φορτία με επιπλέον εφαρμογή άμεσης αποκοπής φορτίου όταν υπάρχει συναγερμός LIVES ή σήμα αποκατάστασης λειτουργίας LTC-rr σε συνδυασμό με κατώφλια τάσης στο πρωτεύον και στο δευτερεύον του μετασχηματιστή	Παράμετροι ΣΠ1.1 V_1^{thres} : κατώφλι τάσης πρωτεύοντος V_2^{thres} : κατώφλι τάσης δευτερεύοντος Αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών άμεσης αποκοπής φορτίου Ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή
ΣΠ1.3	Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης LIVES-alarm και εφαρμογής άμεσης αποκοπής φορτίου	Παράμετροι ΣΑ1 Αριθμός επαναληπτικών εφαρμογών αποκοπής Ποσοστό αποκοπής ανά εφαρμογή
ΣΑ2	Σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης βασισμένο σε μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος (δείκτης NLI)	ΔT : παράμετρος χρονικού διαστήματος παρατήρησης μεταβολών ϵ_G : κατώφλι απόρριψης μεταβολών φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας ϵ_P : κατώφλι απόρριψης μεταβολών μεταφερόμενης ενεργού ισχύος

Αλγόριθμος B.1 LIVES-alarm σε ελεγκτή ΣΑΤΥΦ

1: Parameter: ϵ_t	▷ Παράμετρος χρόνου σήμανσης συναγερμού
2: Parameter: ϵ_r	▷ Ανοχή τάσης αναφοράς
3: Constant: Δt	▷ Βήμα δειγματοληψίας
4: Constant: T	▷ Διαδοχική χρονική καθυστέρηση ΣΑΤΥΦ
5: $k \leftarrow 0$	▷ Αύξων αριθμός δείγματος
6: $t \leftarrow 0$	▷ Ρολόι
7: $V(k) \leftarrow V(t)$	▷ Δειγματοληψία τάσης
8: $\bar{V}(k) \leftarrow V(k)$	▷ Κινητός μέσος τάσης δευτερεύοντος
9: $V_r \leftarrow 0$	▷ Τάση αναφοράς LIVES
10: LIVES-alarm \leftarrow False	▷ Συναγερμός LIVES
11: $T_{LA} \leftarrow 0$	▷ Χρονόμετρο LIVES-alarm
12: loop	
13: $t \leftarrow t + \Delta t$	▷ Επόμενη χρονική στιγμή δειγματοληψίας
14: $k \leftarrow k + 1$	
15: $V(k) \leftarrow V(t)$	▷ Δειγματοληψία τάσης
16: if $k > T/\Delta t$ then	▷ Αν υπάρχουν αρκετά δείγματα
17: $\bar{V}(k) \leftarrow \bar{V}(k) + (\Delta t/T) \cdot [V(k) - V(k - 1 - T/\Delta t)]$	▷ Ενημέρωση ΚΜΟ
18: else	▷ Δεν έχει γεμίσει ακόμα το buffer
19: $\bar{V}(k) \leftarrow \bar{V}(k) + (\Delta t/T) \cdot [V(k) - V(0)]$	▷ Ενημέρωση ΚΜΟ
20: end if	
21: if $[(r(k) - r(k - 1)) < 0]$ AND $[V(k) < V^{min}]$ then	
22: $V_r \leftarrow \bar{V}(k)$	▷ Ενημέρωση τάσης αναφοράς LIVES
23: end if	
24: if [LIVES-alarm = False] then	▷ Δεν υπάρχει ενεργός συναγερμός
25: if $(V_r - \bar{V}(k)) \geq 0$ then	
26: if $(T + \epsilon_t) - T_{LA} > 0$ then	▷ Έλεγχος χρονομέτρου LIVES
27: alarm-timer $\leftarrow T_{LA} + \Delta t$	▷ Ενημέρωση χρονομέτρου
28: LIVES-alarm \leftarrow False	
29: else	▷ Έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση
30: if $(V_r - \bar{V}(k)) > \epsilon_r$ then	
31: $V_r \leftarrow 0, T_{LA} \leftarrow 0$	
32: LIVES-alarm \leftarrow True	
33: else	
34: $V_r \leftarrow 0, T_{LA} \leftarrow 0$	
35: LIVES-alarm \leftarrow False	
36: end if	
37: end if	
38: else	▷ ΚΜΟ πάνω από την τάση αναφοράς, επαναφορά
39: $V_r \leftarrow 0, T_{LA} \leftarrow 0$	
40: LIVES-alarm \leftarrow False	
41: end if	
42: end if	
43: end loop	

Αλγόριθμος B.2 LIVES-restore σε ελεγκτή ΣΑΤΥΦ

```
1: Parameter:  $n_{rev}^{max}$                                 ▷ Μέγιστος αριθμός αντίστροφων κινήσεων ΣΑΤΥΦ
2: Parameter:  $n_{LR}^{max}$                                 ▷ Μέγιστος αριθμός εφαρμογών LR
3: Constant:  $\epsilon_{lr}$                                 ▷ Μικρός θετικός αριθμός
4:  $m \leftarrow 0$                                        ▷ Αύξων αριθμός δείγματος
5:  $n_{rev} \ n_{LR} \leftarrow 0$                             ▷ Μετρητές κινήσεων και εφαρμογών
6:  $V_A(m) \leftarrow V_A(t)$                                 ▷ Δειγματοληψία τάσης
7:  $\bar{V}_A(m) \leftarrow V_A(m)$                             ▷ ΚΜΟ πρωτεύοντος
8:  $V_{Ar} \leftarrow 0$                                     ▷ Τάση αναφοράς LR
9: LIVES-restore  $\leftarrow$  False                            ▷ Σήμα LR
10:  $T_{LR} \leftarrow 0$                                     ▷ Χρονόμετρο LR
11: if  $n_{LR} \leq n_{LR}^{max}$  AND LIVES-alarm = True then
12:   Αντιστροφή λειτουργίας ΣΑΤΥΦ
13:   while LIVES-restore = False do
14:      $t \leftarrow t + \Delta t$                             ▷ Επόμενη χρονική στιγμή δειγματοληψίας, συγχρονισμένη με LA
15:      $m \leftarrow m + 1$ 
16:      $V_A(m) \leftarrow V_A(t)$                                 ▷ Δειγματοληψία τάσης
17:     if  $m > T/\Delta t$  then                            ▷ Αν υπάρχουν αρκετά δείγματα
18:        $\bar{V}_A(m) \leftarrow \bar{V}_A(m) + (\Delta t/T) \cdot [V_A(m) - V_A(m - T/\Delta t - 1)]$ 
19:     else                                                ▷ Δεν έχει γεμίσει το buffer
20:        $\bar{V}_A(m) \leftarrow \bar{V}_A(m) + (\Delta t/T) \cdot [V_A(m) - V_A(0)]$                             ▷ Ενημέρωση ΚΜΟ
21:     end if
22:     if  $abs(r_i(m) - r_i(m - 1)) > 0$  then                ▷ Υπήρξε μεταβολή του ΣΑΤΥΦ
23:        $n_{rev} \leftarrow n_{rev} + 1$                             ▷ Μέτρηση αντίστροφων κινήσεων
24:        $V_{Ar} \leftarrow \bar{V}_A(m)$                             ▷ Ενημέρωση τάσης αναφοράς LR
25:     end if
26:     if  $(n_{rev} > 1)$  AND  $(n_{rev} < n_{rev}^{max})$  then        ▷ Αγνόησε την πρώτη αντίστροφη κίνηση
27:       if  $V_{Ar} - \bar{V}_m(k) \leq 0$  then                            ▷ ΚΜΟ πάνω από αναφορά
28:         if  $(T + \epsilon_{lr}) - T_{LR} > 0$  then                ▷ Έλεγχος χρονόμετρου LR
29:            $T_{LR} \leftarrow T_{LR} + \Delta t$ 
30:           LIVES-restore  $\leftarrow$  False
31:         else                                                ▷ Ενεργοποίηση αποκατάστασης
32:           LIVES-restore  $\leftarrow$  True, LIVES-alarm  $\leftarrow$  False
33:           Μείωση τάσης αναφοράς δευτερεύοντος & κανονική λειτουργία ΣΑΤΥΦ
34:            $n_{rev} \leftarrow 0, n_{LR} \leftarrow n_{LR} + 1, V_{Ar} \leftarrow 0, T_{LR} \leftarrow \Delta t$ 
35:         end if
36:       else                                                ▷ Αναστολή αποκατάστασης
37:          $V_{Ar} = 0, \text{LIVES-restore} \leftarrow \text{False}, T_{LR} \leftarrow \Delta t$ 
38:       end if
39:     end if
40:     if  $(n_{rev} = n_{rev}^{max})$  then                            ▷ Ενεργοποίηση αποκατάστασης
41:       LIVES-restore  $\leftarrow$  True, LIVES-alarm  $\leftarrow$  False
42:       Μείωση τάσης αναφοράς δευτερεύοντος & κανονική λειτουργία ΣΑΤΥΦ
43:        $n_{rev} \leftarrow 0, n_{LR} \leftarrow n_{LR} + 1, V_{Ar} \leftarrow 0, T_{LR} \leftarrow \Delta t$ 
44:     end if
45:   end while
46: end if
```

Αλγόριθμος B.3 LTC-range restoration σε ελεγκτή ΣΑΤΥΦ

```

1: Constant:  $n_{LTC-rr}^{\max} = 2$                                 ▷ Μέγιστο επιτρεπτό όριο εφαρμογής LTC-rr
2: Constant:  $V_{LTC-rr}^{thres} = 0.9$  αμ                    ▷ Κατώφλι τάσης για ενεργοποίηση
3:  $k$                                                     ▷ Αύξων αριθμός δείγματος, καθορισμένος από LA
4:  $n_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Αύξων αριθμός ενεργοποίησης LTC-rr
5:  $V(k)$                                                 ▷ Δειγματοληψία τάσης, ήδη υπολογισμένη από LA
6:  $\bar{V}(k)$                                             ▷ Κινητός μέσος δευτερεύοντος, ήδη υπολογισμένος από LA
7:  $V_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Τάση αναφοράς LTC-rr
8:  $LTC-rr \leftarrow \text{False}$                             ▷ Σήμα LTC-rr
9:  $T_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Χρονόμετρο LTC-rr
10: while  $n_{LTC-rr} \leq n_{LTC-rr}^{\max}$  do
11:    $t \leftarrow t + \Delta t$                             ▷ Επόμενη χρονική στιγμή δειγματοληψίας, συγχρονισμένη με LA
12:   if  $[V(k) < V^{min}]$  AND  $[V(k) > V_{LTC-rr}^{thres}]$  then ▷ Εκτός νεκρής ζώνης & πάνω από κατώφλι
13:     if ΣΑΤΥΦ Εξαντλημένο then
14:        $V_{LTC-rr} \leftarrow \bar{V}(k)$ 
15:     end if
16:     if  $T - T_{LTC-rr} > 0$  then                            ▷ Έλεγχος χρονομέτρου LTC-rr
17:        $T_{LTC-rr} \leftarrow T_{LTC-rr} + \Delta t$ 
18:        $LTC-rr \leftarrow \text{False}$ 
19:     else                                                ▷ Έχει συμπληρωθεί η απαιτούμενη χρονική καθυστέρηση
20:       if then  $(V_{LTC-rr} - \bar{V}(k)) \geq 0$ 
21:          $LTC-rr \leftarrow \text{True}$ 
22:         Μείωση τάσης αναφοράς NZ
23:          $n_{LTC-rr} \leftarrow n_{LTC-rr} + 1$ 
24:          $V_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Επαναφορά τάσης αναφοράς LTC-rr
25:          $T_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Επαναφορά χρονομέτρου LTC-rr
26:       else
27:          $LTC-rr \leftarrow \text{False}$ 
28:          $V_{LTC-rr} \leftarrow \bar{V}(k)$                             ▷ Ενημέρωση τάσης αναφοράς LTC-rr
29:          $T_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Επαναφορά χρονομέτρου LTC-rr
30:       end if
31:     end if
32:   else                                                ▷ Δευτερεύουσα τάσης εντός νεκρής ζώνης
33:      $LTC-rr \leftarrow \text{False}$ 
34:      $V_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Ενημέρωση τάσης αναφοράς LTC-rr
35:      $T_{LTC-rr} \leftarrow 0$                                 ▷ Επαναφορά χρονομέτρου LTC-rr
36:   end if
37: end while

```

Παράρτημα Γ

Δεδομένα εφαρμογών

Γ.1 Σύστημα Δοκιμών 9 Ζυγών

Πίνακας Γ.1: Δεδομένα μετασχηματιστών διανομής και αυτομετασχηματιστών Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών

Επίπεδο	T_i^o (s) ¹	T_i (s) ²	X_t (pu)	Δs (pu) ³	Ζυγός ⁴	r_o (pu) ⁵
ΥΥΤ/ΥΤ	20	8	0.03	0.01	7	1.00
					8	1.00
ΥΤ/ΜΤ	40	15	0.07	0.01	1	0.99
					2	1.01
					3	0.96
					4	0.97

¹ Αρχική συνολική χρονική καθυστέρηση

² Διαδοχική χρονική καθυστέρηση

³ Βήμα της μεταβλητής λήψης

⁴ Πλευρά εγκατάστασης μεταβλητής λήψης

⁵ Αρχική τιμή μεταβλητής λήψης

Πίνακας Γ.2: Δεδομένα γεννητριών και μετασχηματιστών ανύψωσης Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών

Ζυγός	V_{ref} (αμ)	E_f^{lim} (αμ)	T_G (s)	P_G (αμ)	X_s (αμ)	X_t (αμ)
G_1	1.07	3.0	30	1.05	1.47	0.05
G_2	1.05	2.5	19	1.05	1.33	0.05
8	1.04	-	-	-	-	-

Πίνακας Γ.3: Δεδομένα γραμμών Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών

Γραμμή	$R + jX$ (pu)	Γραμμή	$R + jX$ (pu)	Γραμμή	$R + jX$ (pu)
1-2	$0.02 + j0.12$	2-4	$0.030 + j0.18$	3-6	$0.04 + j0.24$
1-4	$0.04 + j0.24$	2-5	$0.010 + j0.03$	7-8	$0.04 + j0.24$
1-9	$0.01 + j0.03$	2-6	$0.010 + j0.06$	7-8	$0.04 + j0.24$
2-3	$0.03 + j0.18$	3-4	$0.005 + j0.03$		

Πίνακας Γ.4: Δεδομένα φορτίων Συστήματος Δοκιμών 9 Ζυγών

Ζυγός	P_D (MW)	Q_D (MVA _r)	T_D (s)	B_c (αμ)
1	160.0	5.0	60	0.0
2	70.0	0.0	60	0.0
3	120.0	40.0	60	0.3
4	110.0	0.0	60	0.0
Σύνολο:	460.0	45.0		

Γ.2 Τυποποιημένο σύστημα δοκιμών Nordic Test System της IEEE Task Force

Πίνακας Γ.5: Δεδομένα αρχικής χρονικής καθυστέρησης T_1 και διαδοχικής χρονικής καθυστέρησης T_2 ΣΑΤΥΦ μετασχηματιστών Nordic Test System. Πηγή: [Van15]

Μετασχηματιστής	T_1 (s)	T_2 (s)	Μετασχηματιστής	T_1 (s)	T_2 (s)
11-1011	30	8	41-4041	31	9
12-1012	30	9	42-4042	31	10
13-1013	30	10	43-4043	31	11
22-1022	30	11	46-4046	31	12
1-1041	29	12	47-4047	30	8
2-1042	29	8	51-4051	30	9
3-1043	29	9	61-4061	30	10
4-1044	29	10	62-4062	30	11
5-1045	29	11	63-4063	30	12
31-2031	29	12	71-4071	31	9
32-2032	31	8	72-4072	31	11

Πίνακας Γ.6: Κατανάλωση ισχύος στους ζυγούς διανομής υπό ονομαστική τάση 20 kV, Nordic Test System. Πηγή: [Van15]

Ζυγός	P (MW)	Q (MVAr)	Ζυγός	P (MW)	Q (MVAr)
1	600.72	148.56	41	541.79	132.27
2	329.60	70.83	42	401.93	128.63
3	260.68	84.24	43	898.83	253.94
4	840.34	252.20	46	700.70	212.22
5	722.82	191.89	47	100.50	44.44
11	199.48	68.44	51	801.76	259.34
12	300.75	84.22	61	502.56	123.76
13	100.43	34.70	62	299.94	83.77
22	281.35	80.67	63	590.47	265.02
31	99.58	24.49	71	299.16	83.33
32	200.44	39.77	72	2005.21	398.17

Πίνακας Γ.7: Δεδομένα σεναρίων με διαφοροποιημένους εκθέτες φορτίου, για την Κεντρική περιοχή του Nordic Test System. Οι εκθέτες είναι τυχαίοι αριθμοί που ακολουθούν την ομοιόμορφη κατανομή, με τον εκθέτη για την ενεργό ισχύ στην περιοχή 0.5–1.5 και τον εκθέτη για την άεργο ισχύ 1.5–2.5

Ζυγός	Αριθμός Σεναρίου										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	α	0.6	1.3	1.4	1.2	0.7	0.8	0.6	1.5	0.9	0.9
	β	2.3	2.3	1.8	2.2	1.7	2.3	1.8	1.8	2.2	1.9
2	α	1.1	1.5	0.9	1.5	0.8	0.7	1.2	0.5	1.3	0.6
	β	2.2	2.0	2.2	2.3	1.6	2.0	2.1	2.0	2.1	1.5
3	α	0.7	0.5	0.9	0.9	1.2	1.0	1.1	0.9	1.0	0.8
	β	2.3	2.4	2.0	2.2	2.0	2.4	1.9	1.7	2.2	1.8
4	α	0.5	1.0	1.5	1.5	1.0	1.4	1.3	1.2	1.0	0.8
	β	1.9	2.4	1.9	1.5	1.7	1.6	2.3	2.2	1.9	2.2
5	α	1.2	0.6	1.4	0.8	1.1	1.1	0.9	0.8	1.4	0.8
	β	2.1	2.1	2.1	2.3	2.4	1.9	1.9	2.4	2.1	2.3
41	α	0.8	1.3	1.2	1.4	0.7	0.6	1.2	0.7	0.9	0.7
	β	2.1	1.6	2.3	2.4	1.6	2.4	2.0	1.8	2.3	2.0
42	α	1.2	1.5	1.5	1.0	0.7	0.9	1.3	1.2	0.9	0.8
	β	2.0	1.7	2.1	2.3	1.5	2.4	2.2	2.2	1.5	2.2
43	α	0.9	0.6	1.3	0.9	1.3	0.6	0.8	1.1	1.5	0.6
	β	1.8	1.7	2.1	1.5	2.1	2.2	2.5	1.6	1.6	2.4
46	α	1.1	1.4	0.8	0.7	1.3	1.0	1.1	1.1	0.5	1.4
	β	1.7	1.5	2.1	1.9	2.3	2.1	1.8	2.3	2.5	1.6
47	α	0.5	0.5	1.2	0.6	1.4	0.9	1.5	1.2	1.5	0.6
	β	2.0	1.6	2.0	2.2	1.8	1.8	2.3	1.6	2.2	1.8
51	α	1.4	1.2	0.7	0.8	0.6	1.5	1.0	0.5	0.7	1.4
	β	1.7	1.2	1.6	2.2	1.7	2.4	2.2	2.1	1.7	1.5

Γ.3 Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Πίνακας Γ.8: Επιβαλλόμενες διαταραχές στο σύστημα κατά την προσομοίωση

Ωρα	t (s)	Στοιχείο	Ζυγός	Διαταραχή
11:30:10	10			Ομοιόμορφη αύξηση του φορτίου με ρυθμό 0.0038%/s για τα επόμενα περίπου 80 min
12:01:00	1860	Λαύριο II	660	Η μονάδα εντάσσεται στο σύστημα. Αναλαμβάνει 58 MW εντός των επόμενων 3 min
12:04:00	2040	Λαύριο II	660	Η μονάδα μειώνει την παραγωγή της κατά 1 MW περίπου μέσα στο επόμενο 1 min
12:05:00	2100	Λαύριο II	660	Η μονάδα αυξάνει την παραγωγή της κατά 12 MW περίπου μέσα στα επόμενα 2 min
12:07:00	2220	Λαύριο II	660	Η μονάδα μειώνει την παραγωγή της κατά 33 MW περίπου μέσα στα επόμενα 3 min
12:10:00	2400	Λαύριο II	660	Η μονάδα αυξάνει την παραγωγή της κατά 9 MW περίπου μέσα στα επόμενα 2 min
12:13:00	2580	Λαύριο II	660	Η μονάδα κρατείται λόγω βλάβης
12:17:10	2830	Λαύριο 3	659 ^α	Η μονάδα μειώνει την παραγωγή της κατά 57 MW περίπου μέσα στα επόμενα 10 min
12:27:10	3430	Λαύριο 3	659	Η μονάδα αυξάνει την παραγωγή της κατά 1 MW περίπου μέσα στο επόμενο 1 min
12:28:10	3490	Λαύριο 3	659	Η μονάδα μειώνει την παραγωγή της κατά 56 MW περίπου μέσα στα επόμενα 9 min
12:38:10	4090	Αλιβέρι III	337	Η μονάδα αποσυνδέεται ξαφνικά ^β

^α Λόγω έλλειψης στοιχείων οι μονάδες Λαύριο 3 και Λαύριο 5 αναπαριστούνται σαν αρνητικά φορτία PQ που συνδέονται στον ζυγό ΥΤ 150 kV 659.

^β Η απώλεια της μονάδας Αλιβέρι III γίνεται μόνο στο ασταθές σενάριο.

Πίνακας Γ.9: Ονομαστική ισχύς θερμικών μονάδων νοτίου συστήματος 12^{ης} Ιουλίου 2004

Μονάδα	Ζυγός	Ον. Ισχύς (MW)
Αλιβέρι III	337	150
Αλιβέρι IV	338	150
Μεγλόπολη II	573	125
Μεγλόπολη III	569	300
Μεγλόπολη IV	575	300
Λαύριο I	664	150
Λαύριο II	660	300
Λαύριο 3 & 5 ^α	659	550
Λαύριο 4	667	560
Αγ. Γεώργιος 8	674	160
Αγ. Γεώργιος 9	675	200

^α Λόγω έλλειψης στοιχείων οι μονάδες Λαύριο 3 και Λαύριο 5 αναπαριστάνονται σαν αρνητικά φορτία PQ που συνδέονται στον ζυγό YT 150 kV 659. Ως εκ τούτου η ισχύς αναφέρεται συνολικά και στις δύο μονάδες

Βιβλιογραφία

- [ADH94] F. ALVARADO, I. DOBSON, and Y. HU. “Computation of closest bifurcations in power systems”. In: *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 2, May 1994, pp. 918–928.
- [AFV14] P. ARISTIDOU, D. FABOZZI, and T. VAN CUTSEM. “Dynamic Simulation of Large-Scale Power Systems Using a Parallel Schur-Complement-Based Decomposition Method”. In: *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 25, no. 10, Oct. 2014, pp. 2561–2570.
- [AM15] S. M. ABDELKADER and D. J. MORROW. “Online Thévenin Equivalent Determination Considering System Side Changes and Measurement Errors”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, Sept. 2015, pp. 2716–2725.
- [BBN13] C. BAI, M. BEGOVIC, R. NUQUI, D. SOBAJIC, and Y. SONG. “On voltage stability monitoring with voltage instability predictors”. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), 2013 IREP Symposium*. Aug. 2013, pp. 1–8.
- [BCF03] A. BIHAIN, D. CIRIO, M. FIORINA, R. LOPEZ, et al. “OMASES: a dynamic security assessment tool for the new market environment”. In: *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*. Vol. 3. June 2003, 8 pp.
- [BCK05] J. BERTSCH, C. CARNAL, D. KARLSON, J. MCDANIEL, and K. VU. “Wide-Area Protection and Power System Utilization”. In: *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 5, May 2005, pp. 997–1003.
- [BD99] W. BOYCE and R. DIPRIMA. *Στοιχειώδεις διαφορικές εξισώσεις και προβλήματα συνοριακών τιμών*. Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 1999.
- [Beg03] M. BEGOVIC (CHAIR). *Wide Area Protection and Emergency Control*. IEEE PES, Power System Relaying Committee, System Protection Subcommittee, Working Group C-6, Jan. 2003.
- [Beg10] M. BEGOVIC (CHAIR). *Undervoltage Load Shedding Protection*. IEEE PES, Power System Relaying Committee, System Protection Subcommittee, Working Group C-13, 2010.
- [BHX03] L. BAO, Z. HUANG, and W. XU. “Online voltage stability monitoring using VAr reserves”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 4, Nov. 2003, pp. 1461–1469.
- [BNK05] M. BEGOVIC, D. NOVOSEL, D. KARLSSON, C. HENVILLE, and G. MICHEL. “Wide-Area Protection and Emergency Control”. In: *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 5, May 2005, pp. 876–891.
- [CC05] F. CAPITANESCU and T. V. CUTSEM. “Unified sensitivity analysis of unstable or low voltages caused by load increases or contingencies”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 1, Feb. 2005, pp. 321–329.
- [CCW09] F. CAPITANESCU, T. V. CUTSEM, and L. WEHENKEL. “Coupling Optimization and Dynamic Simulation for Preventive-Corrective Control of Voltage Instability”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, May 2009, pp. 796–805.

- [CIG01] CIGRE TF 38.02.19. *System Protection Schemes in Power Networks*. CIGRE, June 2001. URL: <http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=187.pdf> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [CIG07] CIGRE WC C4.601. *Review of on-line dynamic security assessment tools and techniques*. CIGRE, June 2007. URL: <http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=325.pdf> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [CIG93] CIGRE TF 38.02.10. *Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*. CIGRE, 1993. URL: <http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=075.pdf> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [CIG95a] CIGRE TF 38.02.08. *Long Term Dynamics Phase II Final Report*. CIGRE, Mar. 1995. URL: <http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=102.pdf> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [CIG95b] CIGRE TF 38.02.12. *Criteria and Countermeasures for Voltage Collapse*. CIGRE, Oct. 1995. URL: <http://www.e-cigre.org/Search/download.asp?ID=101.pdf> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [CKV05] G. CHRISTOFORIDIS, J. KABOURIS, C. VOURNAS, and T. VAN CUTSEM. “Investigation of parameters affecting voltage security of the Hellenic interconnected system”. In: *Proc. 15th Power System Computation Conference (PSCC’05)*. Liege, Belgium, 2005.
- [CKV06] G. CHRISTOFORIDIS, J. KABOURIS, C. VOURNAS, and T. VAN CUTSEM. “Experience Gained by the Application of a Real-time Voltage Security Assessment Method at the Hellenic Transmission System Operator”. In: *CIGRE Session*. Paper C2-206. 2006.
- [CT08] S. CORSI and G. N. TARANTO. “A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, Aug. 2008, pp. 1271–1279.
- [DL93] I. DOBSON and L. LU. “New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse”. In: *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, Aug. 1993, pp. 905–913.
- [DP10] I. DOBSON and M. PARASHAR. “A cutset area concept for phasor monitoring”. In: *IEEE PES General Meeting*. July 2010, pp. 1–8.
- [DSV09] R. DIAO, K. SUN, V. VITTAL, R. O’KEEFE, et al. “Decision Tree-Based Online Voltage Security Assessment Using PMU Measurements”. In: *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 2, May 2009, pp. 832–839.
- [Edr97] A.-A. EDRIS (CHAIR). “Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS)”. In: *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 4, Oct. 1997, pp. 1848–1853.
- [FC78] L. H. FINK and K. CARLSEN. “Operating under stress and strain [electrical power systems control under emergency conditions]”. In: *IEEE Spectrum*, vol. 15, no. 3, Mar. 1978, pp. 48–53.
- [GM07] B. GENET and J.-C. MAUN. “Voltage-Stability Monitoring Using Wide-Area Measurement Systems”. In: *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*. July 2007, pp. 1712–1717.
- [Gri12] S. GRIJALVA. “Individual Branch and Path Necessary Conditions for Saddle-Node Bifurcation Voltage Collapse”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 1, Feb. 2012, pp. 12–19.

- [GSG06] Y. GONG, N. SCHULZ, and A. GUZMAN. “Synchrophasor-Based Real-Time Voltage Stability Index”. In: *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES*. Oct. 2006, pp. 1029–1036.
- [GV09a] M. GLAVIC and T. VAN CUTSEM. “Wide-Area Detection of Voltage Instability From Synchronized Phasor Measurements. Part I: Principle”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, Aug. 2009, pp. 1408–1416.
- [GV09b] M. GLAVIC and T. VAN CUTSEM. “Wide-Area Detection of Voltage Instability From Synchronized Phasor Measurements. Part II: Simulation Results”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, Aug. 2009, pp. 1417–1425.
- [GV10] M. GLAVIC and T. VAN CUTSEM. “Adaptive wide-area closed-loop undervoltage load shedding using synchronized measurements”. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*. July 2010, pp. 1–8.
- [GV11] M. GLAVIC and T. VAN CUTSEM. “Investigating state reconstruction from scarce synchronized phasor measurements”. In: *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. June 2011, pp. 1–8.
- [HK96] J. K. HALE and H. KOÇAC. *Dynamics and Bifurcations*. New York: Springer - Verlag, 1996.
- [HSD16] F. HU, K. SUN, A. DEL ROSSO, E. FARANTATOS, and N. BHATT. “Measurement-Based Real-Time Voltage Stability Monitoring for Load Areas”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, July 2016, pp. 2787–2798.
- [IEE11] IEEE STD C37.118.1-2011. *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*. IEEE, 2011, pp. 1–61.
- [ILK97] B. INGELSSON, P. O. LINDSTROM, D. KARLSSON, G. RUNVIK, and J. O. SJODIN. “Wide-area protection against voltage collapse”. In: *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 10, no. 4, Oct. 1997, pp. 30–35.
- [Int91] INTERCONNECTION DYNAMICS TASK FORCE. *Survey of the Voltage Collapse Phenomenon*. NERC, Aug. 1991.
- [Jen77] A. JENNINGS. *Matrix Computation for Engineers and Scientists*. John Wiley & Sons, 1977.
- [Joh99] S. G. JOHANSSON. “Mitigation of voltage collapse caused by armature current protection”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, May 1999, pp. 591–599.
- [JSV00] D. JULIAN, R. SCHULZ, K. VU, W. QUAINANCE, et al. “Quantifying proximity to voltage collapse using the Voltage Instability Predictor (VIP)”. In: *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE*. Vol. 2. 2000, pp. 931–936.
- [Kar09] M. J. KARKI. “Methods for online voltage stability monitori”. Paper 11086. Graduate Thesis and Disseratations. Iowa State University, 2009.
- [KG86] P. KESSEL and H. GLAVITSCH. “Estimating the Voltage Stability of a Power System”. In: *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 1, no. 3, July 1986, pp. 346–354.
- [KKO99] P. KOKOTOVIC, H. KHALIL, and J. O'REILLY. *Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [KPA04] P. KUNDUR, J. PASERBA, V. AJJARAPU, G. ANDERSSON, et al. “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, Aug. 2004, pp. 1387–1401.
- [Kun94] P. KUNDUR. *Power System Stability and Control*. EPRI Power System Engineering Series. Mc Graw-Hill, 1994.

- [Lia78] T. E. D. LIACCO. “Power/energy: System security: The computer’s role: Several security-related functions can be aided by the digital computer, and linked together by a software scheme”. In: *IEEE Spectrum*, vol. 15, no. 6, June 1978, pp. 43–50.
- [LMV11] C. LAMBROU, P. MANDOULIDIS, and C. VOURNAS. “Local voltage instability monitoring and protection in the presence of self-restoring loads and two-level LTCs”. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. July 2011, pp. 1–9.
- [LRB03] M. LARSSON, C. REHTANZ, and J. BERTSCH. “Real-Time Voltage Stability Assessment of Transmission Corridors”. In: *Proc. IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems*. Seoul, S. Korea, 2003.
- [LVC13] C. LAMBROU, C. VOURNAS, G. CHRISTOFORIDIS, and J. KAMBOURIS. “Voltage stability monitoring and control studies in the Hellenic interconnected system”. In: *IEEE/PES Grenoble PowerTech*. France, June 2013, pp. 1–6.
- [Man90] Y. MANSOUR (CHAIR). *Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience*. System Dynamic Performance Subcommittee, Power System Engineering Committee, PES, 1990, p. 202. URL: <http://resourcecenter.ieee-pes.org/pes/product/tutorials/PESTP283> (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [MB03] B. MILOSEVIC and M. BEGOVIC. “Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, Feb. 2003, pp. 121–127.
- [MB09] V. MADANI (CHAIR) and M. BEGOVIC (VICE-CHAIR). *Global Industry Experiences with System Integrity Protection Schemes (SIPS)*. IEEE PES, Power System Relaying Committee, Working Group C4, 2009.
- [McC10] J. MCCALLEY (PROJECT LEADER). *Final Project Report: System Protection Schemes: Limitations, Risks and Management*. Final Project Report. Power Systems Engineering Research Center - PSERC, Dec. 2010. URL: http://pserc.wisc.edu/documents/publications/reports/2010_reports/S-35_Final-Report_Dec-2010.pdf (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [MF96] F. P. d. MELLO and J. W. FELTES. “Voltage oscillatory instability caused by induction motor loads”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 3, Aug. 1996, pp. 1279–1285.
- [MIC87] J. MEDANIC, M. ILIC-SPONG, and J. CHRISTENSEN. “Discrete Models of Slow Voltage Dynamics for under Load Tap-Changing Transformer Coordination”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 4, Nov. 1987, pp. 873–880.
- [MLC00] C. MOORS, D. LEFEBVRE, and T. V. CUTSEM. “Design of load shedding schemes against voltage instability”. In: *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*. Vol. 2. Jan. 2000, pp. 1495–1500.
- [MLV11] P. MANDOULIDIS, C. LAMBROU, and C. VOURNAS. “Effect of Load Restoration on an Integrated Autonomous Protection System Against Voltage Instability”. In: *IEEE/PES Trondheim PowerTech*. High Quality Paper Certificate. Norway, June 2011, pp. 1–8.
- [MV00] N. G. MARATOS and C. D. VOURNAS. “Relationships between static bifurcations and constrained optima”. In: *2000 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Emerging Technologies for the 21st Century. Proceedings*. Vol. 2. Geneva, Switzerland, May 2000, pp. 477–480.
- [MWK04] K. MORISON, L. WANG, and P. KUNDUR. “Power system security assessment”. In: *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 2, no. 5, Sept. 2004, pp. 30–39.

- [NV08] V. NIKOLAIDIS and C. D. VOURNAS. “Design Strategies for Load-Shedding Schemes Against Voltage Collapse in the Hellenic System”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, May 2008, pp. 582–591.
- [NVF07] V. C. NIKOLAIDIS, C. D. VOURNAS, G. A. FOTOPOULOS, G. P. CHRISTOFORIDIS, et al. “Automatic Load Shedding Schemes against Voltage Instability in the Hellenic System”. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES GM’07)*. June 2007, pp. 1–7.
- [O M74] R. O’ MALLEY. *Introduction to Singular Perturbation*. Academic Press, 1974.
- [OGV13] B. OTOMEGA, M. GLAVIC, and T. VAN CUTSEM. “A two-level emergency control scheme against power system voltage instability”. In: *Control Engineering Practice*, 2013. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066113001895>.
- [OV07] B. OTOMEGA and T. VAN CUTSEM. “Undervoltage Load Shedding Using Distributed Controllers”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, Nov. 2007, pp. 1898–1907.
- [OV09] B. OTOMEGA and T. VAN CUTSEM. “Local vs. wide-area undervoltage load shedding in the presence of induction motor loads”. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. June 2009, pp. 1–7.
- [PSB04] S. PATEL, K. STEPHAN, M. BAJPAI, R. DAS, et al. “Performance of Generator protection during major system disturbances”. In: *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 4, Oct. 2004, pp. 1650–1662.
- [RB02] C. REHTANZ and J. BERTSCH. “Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control”. In: *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*. Vol. 2. 2002, pp. 842–847.
- [SAP84] P. SAUER, S. AHMED-ZAID, and M. PAI. “Systematic Inclusion of Stator Transients in Reduced Order Synchronous Machine Models”. In: *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-103, no. 6, June 1984, pp. 1348–1354.
- [Sav09] S. C. SAVULESCU (EDITOR). *Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Centers*. IEEE Press Series on Power Engineering. John Wiley & Sons, 2009.
- [SP98] P. W. SAUER and M. PAI. *Power System Dynamics and Stability*. Prentice Hall, 1998.
- [SVG06] I. SMON, G. VERBIC, and F. GUBINA. “Local voltage-stability index using tellegen’s Theorem”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, Aug. 2006, pp. 1267–1275.
- [Tay92] C. W. TAYLOR. “Concepts of undervoltage load shedding for voltage stability”. In: *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 7, no. 2, Apr. 1992, pp. 480–488.
- [Tay94] C. W. TAYLOR. *Power system voltage stability*. EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill, 1994.
- [Van00] T. VAN CUTSEM. “Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods”. In: *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, Feb. 2000, pp. 208–227.
- [Van15] T. VAN CUTSEM (CHAIR). *Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment*. PES Tech. Rep. PES-TR19. IEEE/PES Task Force, Power System Dynamic Performance Committee, Aug. 2015, p. 161. URL: http://ewh.ieee.org/soc/pes/psdpc/PSDP_benchmark_systems.htm (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [VBN99] K. VU, M. BEGOVIC, D. NOVOSEL, and M. SAHA. “Use of local measurements to estimate voltage-stability margin”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, Aug. 1999, pp. 1029–1035.

- [VHM04] T. VAN CUTSEM, G. HASSE, C. MOORS, S. GUILLON, and R. MAILHOT. “A new training simulator for improved voltage control of the Hydro-Quebec system”. In: *Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES*. Oct. 2004, pp. 366–371.
- [VKC05] T. VAN CUTSEM, J. KABOURIS, G. CHRISTOFORIDIS, and C. VOURNAS. “Application of real-time voltage security assessment to the Hellenic interconnected system”. In: *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 152, no. 1, Jan. 2005, pp. 123–131.
- [VLA15] C. VOURNAS, C. LAMBROU, I. ANAGNOSTOPOULOS, G. CHRISTOFORIDIS, and J. KABOURIS. “Effect of distributed reactive support on voltage stability limits: the example of Peloponnese in the Hellenic Interconnected System”. In: *Power Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*. July 2015, pp. 1–5.
- [VLG10] C. VOURNAS, C. LAMBROU, M. GLAVIC, and T. VAN CUTSEM. “An integrated autonomous protection system against voltage instability based on Load Tap Changers”. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - VIII, iREP Symposium*. Búzios, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2010, pp. 1–14.
- [VLK16] C. D. VOURNAS, C. LAMBROU, and M. KANATAS. “Application of Local Autonomous Protection Against Voltage Instability to IEEE Test System”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, July 2016, pp. 3300–3308.
- [VLM16] C. D. VOURNAS, C. LAMBROU, and P. MANDOULIDIS. “Voltage Stability Monitoring from a Transmission Bus PMU”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, 2016. Accepted for publication, pp. 1–9.
- [VLN16] C. VOURNAS, C. LAMBROU, and V. NIKOLAIDIS. “System Protection against Voltage Instability and Impact of Generator Protection”. In: *CIGRE 2016 Session*. Aug. 2016, pp. 1–10.
- [VMK03] C. D. VOURNAS, G. A. MANOS, J. KABOURIS, G. CHRISTOFORIDIS, et al. “On-line voltage security assessment of the Hellenic interconnected system”. In: *IEEE Power Tech Conference Proceedings*. Vol. 3. Bologna, Italy, June 2003, pp. 1–8.
- [VMK04] C. VOURNAS, A. METSIU, M. KOTLIDA, V. NIKOLAIDIS, and M. KARYSTIANOS. “Comparison and combination of emergency control methods for voltage stability”. In: *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*. Vol. 2. June 2004, pp. 1799–1804.
- [VMS99] C. D. VOURNAS, G. A. MANOS, P. W. SAUER, and M. PAI. “Effect of overexcitation limiters on power system long-term modeling”. In: *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 4, Dec. 1999, pp. 1529–1536.
- [VNT05] C. D. VOURNAS, V. C. NIKOLAIDIS, and A. TASSOULIS. “Experience from the Athens blackout of July 12, 2004”. In: *IEEE Power Tech Conference Proceedings*. June 2005, pp. 1–7.
- [VNT06] C. D. VOURNAS, V. C. NIKOLAIDIS, and A. A. TASSOULIS. “Postmortem analysis and data validation in the wake of the 2004 Athens blackout”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, Aug. 2006, pp. 1331–1339.
- [Vou12] Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ (ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ). *Ερευνητικό Έργο: Παρακολούθηση Ευστάθειας Τάσεως και Μέτρα Προστασίας από Κατάρρευση στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα*. Τελική Έκθεση. ΕΠΙΣΕΥ, Σεπτέμβριος 2012.
- [Vou94] C. D. VOURNAS. “On the modelling of collapse in dynamical systems”. In: *Bulk Power System Voltage Phenomena - Voltage stability and security III*. Davos, Switzerland, Aug. 1994, pp. 1–8.

- [VS06] C. D. VOURNAS and N. G. SAKELLARIDIS. “Region of attraction in a power system with discrete LTCs”. In: *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 53, no. 7, July 2006, pp. 1610–1618.
- [VS07] C. D. VOURNAS and N. G. SAKELLARIDIS. “Tracking maximum loadability conditions in power systems”. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, iREP Symposium*. Charleston, SC, Aug. 2007, pp. 1–12.
- [VS08] C. D. VOURNAS and N. G. SAKELLARIDIS. “Problems and solutions for local identification of voltage instability and emergency control”. In: *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES GM’08) - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*. July 2008, pp. 1–7.
- [VS16] C. VOURNAS and T. SOUXES. “Modeling reactive support from distributed resources in hellenic interconnected system”. In: *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*. July 2016, pp. 1–5.
- [VSC08] C. VOURNAS, N. SAKELLARIDIS, G. CHRISTOFORIDIS, J. KABOURIS, and T. VAN CUTSEM. “Investigation of a Local Indicator of Voltage Emergency in the Hellenic Interconnected System”. In: *16th PSCC*. Glasgow, Scotland, July 2008.
- [VV07] T. VAN CUTSEM and C. D. VOURNAS. “Emergency Voltage Stability Controls: an Overview”. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting (PES GM’07)*. June 2007, pp. 1–10.
- [VV08a] T. VAN CUTSEM and C. VOURNAS. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Springer, 2008.
- [VV08b] C. D. VOURNAS and T. VAN CUTSEM. “Local Identification of Voltage Emergency Situations”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, Aug. 2008, pp. 1239–1248.
- [VV10] C. VOURNAS and T. VAN CUTSEM. “On-Line Voltage Security Assessment”. In: *Real-Time Stability in Power Systems*. Ed. by S. SAVULESCU. Springer, 2010. Chap. 10.
- [VV96] T. VAN CUTSEM and C. VOURNAS. “Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, Feb. 1996, pp. 146–154.
- [VWP93] T. VAN CUTSEM, L. WEHENKEL, M. PAVELLA, B. HEILBRONN, and M. GOUBIN. “Decision tree approaches to voltage security assessment”. In: *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 140, no. 3, May 1993, pp. 189–198.
- [WH02] L. WARLAND and A. T. HOLEN. “Estimation of distance to voltage collapse: testing an algorithm based on local measurements”. In: *Proc. 14th Power System Computational Conference*. Seville, Spain, 2002, pp. 1–7.
- [AΔM02] ΑΔΜΗΕ. *Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Περίοδου 2001–2005*. 2002. URL: http://www.desmie.gr/fileadmin/user_upload/Files/masm/masm_2001-2005_map.pdf (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [AΔM16] ΑΔΜΗΕ. *Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2017-2026*. Εγκεκριμένη έκθεση. Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Διεύθυνση Σχεδιασμού Ανάπτυξης Συστήματος, 2016. URL: http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDAS_DSS/MASM/DPA_2017-2026_Final/DPA_2017-2026.pdf (τελευταίος έλεγχος 11/11/2016).
- [Bou99] Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ (ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ). *Ερευνητικό Έργο: Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα*. Τεχνική Έκθεση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 1999.

- [Eπi04] ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΤΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ 12-07-2004. *Πόρισμα*. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, 2004. URL: <http://www.rae.gr/old/cases/C13/BO-report.pdf>.
- [Καν14] Μ. ΚΑΝΑΤΑΣ. “Αξιολόγηση Αποκεντρωμένου Συστήματος Προστασίας Από Κατάρρευση Τάσεως”. Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2014.
- [Καρ05] Μ. ΚΑΡΥΣΤΙΑΝΟΣ. “Βελτιστοποίηση Ορίων Μεταφοράς Ισχύος σε Συνθήκες Ασφάλειας Τάσεως”. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2005.
- [ΚΧ01] Γ. ΚΟΝΤΑΞΗΣ and Ν. ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ. *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001.
- [Μαν10] Π. ΜΑΝΔΟΥΛΙΔΗΣ. “Πρόγραμμα Προσομοίωσης Ευστάθειας Τάσης και Μέτρων Προστασίας από Κατάρρευση”. Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2010.
- [Μαν98] Γ. ΜΑΝΟΣ. “Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευση Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 1998.
- [Νικ07] Β. ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ. “Σχεδίαση Προστασίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης”. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Απρίλιος 2007.
- [Σακ10] Ν. ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΔΗΣ. “Εφαρμογές Μη Γραμμικής Δυναμικής στην Ανάλυση Ευστάθειας Τάσης”. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2010.

Δημοσιεύσεις του συγγραφέα

Δημοσιεύσεις σε περιοδικά

1. C. D. VOURNAS, C. LAMBROU, and M. ΚΑΝΑΤΑΣ. “Application of Local Autonomous Protection Against Voltage Instability to IEEE Test System”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, July 2016, pp. 3300–3308.
2. C. D. VOURNAS, C. LAMBROU, and P. MANDOULIDIS. “Voltage Stability Monitoring from a Transmission Bus PMU”. In: *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PP, no. 99, 2016. Accepted for publication, pp. 1–9.

Ανακοινώσεις σε συνέδρια

1. C. VOURNAS and C. LAMBROU. “Overview of local identification of emergency and protection against voltage collapse”. In: *Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010), 7th Mediterranean Conference and Exhibition on*. Nov. 2010, pp. 1–8.
2. C. VOURNAS, C. LAMBROU, M. GLAVIC, and T. VAN CUTSEM. “An integrated autonomous protection system against voltage instability based on Load Tap Changers”. In: *Bulk Power System Dynamics and Control - VIII, iREP Symposium*. Búzios, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2010, pp. 1–14.
3. C. LAMBROU, P. MANDOULIDIS, and C. VOURNAS. “Local voltage instability monitoring and protection in the presence of self-restoring loads and two-level LTCs”. In: *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*. July 2011, pp. 1–9.
4. P. MANDOULIDIS, C. LAMBROU, and C. VOURNAS. “Effect of Load Restoration on an Integrated Autonomous Protection System Against Voltage Instability”. In: *IEEE/PES Trondheim PowerTech*. High Quality Paper Certificate. Norway, June 2011, pp. 1–8.
5. C. LAMBROU, C. VOURNAS, G. CHRISTOFORIDIS, and J. KAMBOURIS. “Voltage stability monitoring and control studies in the Hellenic interconnected system”. In: *IEEE/PES Grenoble PowerTech*. France, June 2013, pp. 1–6.
6. C. VOURNAS, C. LAMBROU, I. ANAGNOSTOPOULOS, G. CHRISTOFORIDIS, and J. KAMBOURIS. “Effect of distributed reactive support on voltage stability limits: the example of Peloponnese in the Hellenic Interconnected System”. In: *Power Energy Society General Meeting, 2015 IEEE*. July 2015, pp. 1–5.
7. C. VOURNAS, C. LAMBROU, and V. NIKOLAIDIS. “System Protection against Voltage Instability and Impact of Generator Protection”. In: *CIGRE 2016 Session*. Aug. 2016, pp. 1–10.