



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

**Εξελιγμένες μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε
πραγματικό χρόνο και μέτρα αντιμετώπισης με αξιοποίηση
δισπαρμένων πηγών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Μανδουλίδης

Αθήνα, Δεκέμβριος 2021



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

**Εξελιγμένες μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε
πραγματικό χρόνο και μέτρα αντιμετώπισης με αξιοποίηση
διεσπαρμένων πηγών**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Παναγιώτης Μανδουλίδης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Κωνσταντίνος Βουρνάς (επιβλέπων)

Γεώργιος Κορρές

Παύλος Γεωργιάκης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Δεκεμβρίου 2021.

Κ. Βουρνάς
Ομ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Π. Γεωργιάκης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΕΣ ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ 17.12.2021 11:40

Β. Νικολαΐδης
Επίκ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2021



.....
Μανδουλίδης Παναγιώτης

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

Copyright © Παναγιώτης Μανδουλίδης, 2021.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη τοπικών μεθόδων βασιζόμενων σε μετρήσεις για την ανίχνευση αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, καθώς και η ανάπτυξη σχημάτων προστασίας από κατάρρευση τάσης που αξιοποιούν τις δυνατότητες των διεσπαρμένων πηγών.

Πραγματοποιείται επέκταση και βελτίωση του τοπικού δείκτη *New LIVES Index – NLI* μέσω αξιοποίησης του εργαλείου από το πεδίο χρόνου-συχνότητας *Short-time Fourier Transform - STFT*, με αποτέλεσμα να διαπιστώνεται πολύ καλή συμπεριφορά σε έγκαιρη ανίχνευση της αστάθειας τάσης σε βροχοειδή συστήματα, υπό την παρουσία βραχυπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος και λευκού θορύβου μετρήσεων.

Αναπτύσσεται επίσης παραλλαγή του δείκτη *NLI*, και συγκεκριμένα ο δείκτης *ReLay based Index – RLI*, ο οποίος ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με τον δείκτη *NLI* αλλά διαθέτει λιγότερη πληροφορία για την ανίχνευση μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, καθώς στηρίζεται σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος αποκλειστικά από έναν ηλεκτρονόμο αποστάσεως. Με βάση τις προσομοιώσεις που διεξάγονται στη διατριβή, προκύπτουν εξίσου ενθαρρυντικά αποτελέσματα με αυτά του δείκτη *NLI*, με επιπρόσθετο κέρδος από τον δείκτη τη δυνατότητα αποτροπής ανεπιθύμητης εντολής αποσύνδεσης γραμμής, όταν η τροχιά της μετρούμενης από τον ηλεκτρονόμο σύνθετης αντίστασης *Z* εισέλθει στην τρίτη ζώνη προστασίας. Η απλότητα και ευκολία υλοποίησης των δύο δεικτών ανίχνευσης αστάθειας τάσης, καθώς και τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, τους καθιστούν ελκυστικούς για εφαρμογή σε πραγματικό σύστημα.

Με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης αστάθειας τάσης, εξετάζεται η επίδραση των απωλειών του τμήματος του συστήματος μεταφοράς που βρίσκεται στα κατάντη του σημείου από το οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις των δεικτών αστάθειας *NLI* και *RLI*. Η διερεύνηση γίνεται για ακτινικό σύστημα και αποδεικνύεται ότι για απομακρυσμένες από το φορτίο μετρήσεις η μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς φορτίου επιτυγχάνεται προ της μεγιστοποίησης της διερχόμενης από το σημείο μέτρησης ισχύος, ανεξάρτητα από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου.

Στη διατριβή αναπτύσσεται επίσης τοπική μέθοδος βασιζόμενη αποκλειστικά σε μετρήσεις με σκοπό την εκτίμηση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης. Ο υπολογισμός της εκτίμησης του περιθωρίου πραγματοποιείται αξιοποιώντας πολυώνυμα παρεμβολής σε συνδυασμό με τη χρονική απόκριση του δείκτη αστάθειας *NLI*. Η μέθοδος χαράσσει στον χώρο *GP* πολυώνυμο δευτέρου βαθμού όταν ο δείκτης *NLI* παρουσιάζει καθοδική πορεία για διαδοχικές χρονικές στιγμές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο στο ακτινικό όσο και στο βροχοειδές σύστημα δοκιμών *IEEE Nordic* είναι ενθαρρυντικά.

Διερευνάται επίσης η επίδραση της συνδεδεμένης στη διανομή διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση και ανίχνευση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, καθώς και ο προκαταρκτικός σχεδιασμός ενός σχήματος προστασίας από αστάθεια, το οποίο αξιοποιεί τις διεσπαρμένες πηγές και την έκτακτη λειτουργία ΣΑΤΥΦ. Η διεσπαρμένη παραγωγή μοντελοποιείται συγκεντρωτικά και θεωρείται εγκατεστημένη σε μικρή ηλεκτρική απόσταση από τα κέντρα κατανάλωσης, ώστε να μελετηθεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά της κατανάλωσης μίας περιοχής η οποία πλήττεται από αστάθεια τάσης. Οι προσομοιώσεις έγιναν στο σύστημα δοκιμών *IEEE Nordic* και εξετάστηκαν δύο εναλλακτικοί τρόποι συνδεσμολογίας της διεσπαρμένης παραγωγής (κοινός και μη κοινός μετασχηματιστής επί του ίδιου υποσταθμού), καθώς και δύο σχήματα ελέγχου (σταθερός μοναδιαίος συντελεστής ισχύος και σταθερή θερματική τάση) προκειμένου να αναδειχθούν οι κύριοι παράγοντες που συνθέτουν την επίδραση των διεσπαρμένων πηγών στην αστάθεια τάσης. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων διαπιστώνεται ότι η διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνει τα περιθώρια ευστάθειας τάσης ανεξάρτητα από τον τρόπο συνδεσμολογίας της στο δίκτυο διανομής και του σχήματος λειτουργίας της, όμως μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ανίχνευση της αστάθειας τάσης όταν συνδέεται στο ίδιο δίκτυο διανομής με την κατανάλωση και λειτουργεί με έλεγχο σταθερής τάσης. Οι εν λόγω διαπιστώσεις αξιοποιούνται για την ανάδειξη των ενδεδειγμένων συμβιβασμών που πρέπει να γίνονται στο σχεδιασμό σχημάτων προστασίας από κατάρρευση τάσης για την εξασφάλιση της ευστάθειας και τον περιορισμό των επενεργειών στους καταναλωτές.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ευστάθεια τάσης ΣΗΕ, ανίχνευση αστάθειας σε πραγματικό χρόνο, μονάδες μέτρησης φασιθετών, ηλεκτρονόμοι αποστάσεως, πολυώνυμα παρεμβολής, περιθώριο ευστάθειας τάσης, σχήμα προστασίας από κατάρρευση, έμμεση αποκοπή φορτίου, διεσπαρμένη παραγωγή

ABSTRACT

The scope of the current thesis is the development of local online measurement-based voltage instability detection methods in the long-term time scale, as well as the development of system protection schemes against voltage collapse which utilize the capabilities of distributed generation installed in the distribution networks.

Extension and enhancement of the local *New LIVES Index – NLI* is carried out, by utilizing mathematical tools from the time-frequency domain, namely the Short-Time Fourier Transform – STFT, in order to account for the system short-term dynamics, as well as the measurement noise. Numerical simulation results are very promising in terms of timely voltage instability detection in meshed networks.

A variation of the *NLI* index, namely the *ReLay based Index – RLI* is developed, which follows similar approach as the *NLI* index, but extracts results from the information provided by a single digital distance protection relay. According to the simulation results, the index provides equally satisfactory results as with the index *NLI*, while an additional benefit concerns the capability to block an undesired line trip in case of third zone breach, during a voltage instability incident.

In view of further refining the accuracy of voltage instability detection, the role of the active power losses of the network part located at the downstream of the point of measurements for indices *NLI* and *RLI* is investigated. The assessment is carried out for a radial system proving that when measurements are collected remotely from the load bus, then the maximum load consumption occurs before the point in which the measured active power is maximized, irrespective of the load power factor.

In addition, an online local measurement-based method for estimating the voltage stability margin is developed in the current dissertation. The voltage stability margin calculation is executed by utilizing interpolating polynomials of second degree, in conjunction with a decreasing trend of the *NLI* index. The interpolating polynomials are drawn in the *GP* plane when *NLI* drops for consecutive time instants. Numerical simulations are carried out in a radial network as well as in the IEEE Nordic test system, showing promising results.

The impact of inverter based distributed generation connected in the distribution networks on voltage instability onset and identification, as well as the development of system protection schemes against voltage collapse which take advantage of the distributed generation capabilities and OLTC emergency operation are also investigated in the thesis. Aggregate models are utilized for representing the distributed generation, considered to be located in close electrical distance from the load centers, in order to assess the impact of distributed generation on load consumption in an area prone to voltage instability. Two distributed generation connection configurations (under a common, or under different transformers in the same substation), as well as two control schemes (constant unity power factor and voltage control) are investigated. The simulation results on a modified version of the IEEE Nordic test system show that distributed generation increases the voltage stability margin irrespective of the control scheme or connection configuration, while it may negatively affect the voltage instability detection when the distributed sources operate under constant voltage control. These results are exploited in developing a system protection scheme against voltage collapse which combines OLTC emergency operation with distributed generation capabilities in order to mitigate the side-effects on the customers.

KEYWORDS

Power system voltage stability, online voltage instability detection, phasor measurement units, distance relays, interpolating polynomials, voltage stability margin, system protection against voltage collapse, indirect load curtailment, distributed generation

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι γραμμές αυτού του προλόγου γράφονται κατά το τελευταίο στάδιο συγγραφής της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η οποία αποτελεί και το σημαντικότερο κεφάλαιο της μέχρι τώρα επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Μου είναι αδύνατον να αποτυπώσω μέσα σε λίγες γραμμές κειμένου την ευγνωμοσύνη μου για τον καθηγητή μου κ. Κώστα Βουρνά. Τον ευχαριστώ θερμά που μου έδωσε την ευκαιρία να τον γνωρίσω και να συνεργαστώ μαζί του, καθώς αποτελεί έναν χαρισματικό άνθρωπο με ήθος και αξίες που αποτελούν αστείρευτη πηγή έμπνευσης και δημιουργίας. Η καθοδήγηση και συμβολή του στη διαμόρφωση της παρούσας διατριβής, η υπομονή του και κυρίως η πίστη του προς στο πρόσωπό μου ήταν οι βασικοί λόγοι για τους οποίους βρίσκομαι στην ευχάριστη θέση να συντάσσω το παρόν προοίμιο.

Θέλω ακόμη να ευχαριστήσω θερμά τον επ. καθηγητή κ. Βασίλη Νικολαΐδη για την πολύπλευρη υποστήριξη και άριστη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες επίσης προς τους διδάκτορες Μπάμπη Λάμπρου και Θοδωρή Σουξέ, αλλά και στους υποψήφιους διδάκτορες Κώστα Σεκλό και Γιώργο Πριονιστή για τις συνεργασίες και συζητήσεις (επιστημονικές και μη) που είχαμε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διατριβής.

Επιθυμώ επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς την εταιρεία PROTASIS και τον κ. Βασίλη Γεωργίου που χωρίς δεύτερη σκέψη δέχτηκε να ξεκινήσω την εκπόνηση της παρούσας διατριβής παράλληλα με την τότε συνεργασία μας, γεγονός που έπαιξε και καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη της διατριβής, ειδικά κατά τα πρώτα στάδια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω επίσης να δώσω στον Δρ. Μηχανικό κ. Γιάννη Καμπούρη για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ με τον Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος και να διευρύνω τους επαγγελματικούς μου ορίζοντες.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους γονείς μου και την αδερφή μου για όλα όσα μου έχουν προσφέρει αυτά τα χρόνια, όντας πάντα δίπλα μου όποτε χρειαζόταν.

Ειδικής αναφοράς χρήζουν οι δυο πολυαγαπημένες μου κόρες Κατερίνα και Ελένη, οι οποίες χωρίς να το ξέρουν, μου δίνουν δύναμη και κίνητρο για να συνεχίζω να προσπαθώ σε προσωπικό και επαγγελματικό επίπεδο.

Και κλείνοντας, το πιο μεγάλο ευχαριστώ θέλω να το δώσω στη σύζυγό μου Αναστασία Παπαντωνοπούλου, καθώς χωρίς την ανιδιοτελή, ακατάπαυστη και αμέριστη αγάπη και συμπαράστασή της, τίποτε από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό. Την ευχαριστώ από τα βάθη της ψυχής μου που αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μου και εύχομαι να καταφέρω κάποια στιγμή να της ανταποδώσω έστω και ένα κλάσμα αυτών που απλόχερα μου έχει προσφέρει.

Π. Μ.

Αθήνα, Δεκέμβρης 2021

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΟΡΟΛΟΓΙΑ.....	13
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Γενικά.....	15
1.2 Στοιχεία θεωρίας δυναμικών συστημάτων.....	16
1.2.1 Γραμμικοποίηση και ευστάθεια σημείων ισορροπίας.....	16
1.2.2 Θεωρία Διακλαδώσεων και διακλάδωση Σαγματικού Κόμβου.....	19
1.2.3 Συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς.....	20
1.2.4 Αδιαπέραστες επιφάνειες και επιφάνειες ιδιομορφιών.....	22
1.2.5 Ιδιάζουσες διαταραχές και οιονεί στατική προσέγγιση.....	22
1.3 Ευστάθεια ΣΗΕ.....	24
1.3.1 Γενικά.....	24
1.3.2 Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ.....	25
1.3.3 Ευστάθεια γωνίας.....	26
1.3.4 Ευστάθεια συχνότητας.....	27
1.3.5 Ευστάθεια τάσης.....	28
1.3.6 Ευστάθεια Συντονισμού [TR20].....	32
1.3.7 Ευστάθεια επαγόμενη από μετατροπείς ισχύος [TR20].....	32
1.4 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς (όριο φόρτισης συστήματος).....	33
1.4.1 Θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για δύο ζυγούς.....	33
1.4.2 Καμπύλες τάσης-ενεργού ισχύος.....	35
1.4.3 Χαρακτηριστικές φορτίου.....	38
1.4.4 Μηχανισμοί αστάθειας.....	39
1.5 Ασφάλεια ΣΗΕ.....	41
1.5.1 Γενικά.....	41
1.5.2 Ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ.....	43
1.5.3 Προσδιορισμός περιθωρίων ασφαλείας.....	43
1.5.4 Εκτίμηση ασφάλειας τάσης.....	44
1.6 Μονάδες παραγωγής με μετατροπείς ισχύος και ευστάθεια τάσης.....	44
1.6.1 Ανάγκες και απαιτήσεις.....	44
1.6.2 Μοντελοποίηση μονάδων με μετατροπείς.....	46
1.7 Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος.....	47
1.8 Επισκόπηση βιβλιογραφίας.....	48
1.8.1 Γενικά.....	48
1.8.2 Τοπικές μέθοδοι για παρακολούθηση και ανίχνευση αστάθειας τάσης.....	50
1.8.3 Μέθοδοι παρακολούθησης και ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις ευρείας περιοχής.....	52
1.8.4 Μέθοδοι ανίχνευσης περιθωρίου ευστάθειας τάσης.....	57
1.9 Σκοπός και δομή της διατριβής.....	58

2	ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ	61
2.1	Μέθοδος LIVES για ανίχνευση αστάθειας	61
2.1.1	Περιγραφή.....	61
2.1.2	Μέθοδος αποκατάστασης ευστάθειας LIVES-Restore	61
2.2	Μονάδες μέτρησης φασιθετών	62
2.2.1	Γενική περιγραφή και διάταξη	62
2.2.2	Σφάλματα μετρήσεων και προδιαγραφές	64
2.3	New LIVES Index (NLI)	65
2.3.1	Γενικά.....	65
2.3.2	Συνθήκες ευστάθειας τάσης σε ακτινικό δίκτυο αμελώντας τις ωμικές απώλειες	66
2.4	Συσχέτιση LIVES με δείκτη NLI	68
2.4.1	Εφαρμογή του δείκτη NLI σε διάδρομο μεταφοράς.....	70
2.5	Υλοποίηση NLI με κινητό μέσο όρο	73
2.5.1	Γενικά.....	73
2.5.2	Εφαρμογή κινητού μέσου όρου ως φίλτρου.....	73
2.6	Μέθοδοι ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων	74
2.6.1	Γενικά.....	74
2.6.2	Ψηφιακή επεξεργασία σήματος σε ΣΗΕ	75
2.7	Ο Μετασχηματισμός Fourier ως εργαλείο ανάλυσης.....	75
2.7.1	Γενικά.....	75
2.7.2	Ευθύς μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου.....	76
2.7.3	Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου.....	76
2.7.4	Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier	77
2.7.5	Ανάλυση με εργαλεία στο πεδίο χρόνου-συχνότητας	78
2.7.6	Οικογένεια παραθύρων Hann και Hamming.....	79
2.7.7	Ο μετασχηματισμός Short-Time Fourier Transform.....	80
3	ΝΕΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	85
3.1	Relay based Index (RLI).....	85
3.1.1	Ορισμός και υπολογισμός	85
3.1.2	Τρίτη ζώνη προστασίας ηλεκτρονόμου αποστάσεως.....	87
3.1.3	Αποφυγή ανεπιθύμητων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς λόγω τρίτης ζώνης.....	89
3.2	Εφαρμογή μετασχηματισμού STFT ως φίλτρου μετρήσεων	90
3.2.1	Προϋποθέσεις εφαρμογής STFT	90
3.2.2	Εφαρμογή STFT στη διατριβή	90
3.2.3	Υπολογισμός δεικτών αστάθειας με χρήση μετασχηματισμού STFT	92
3.3	Συνθήκες αστάθειας σε ενδιάμεσο ζυγό ακτινικού δικτύου.....	95
3.3.1	Ανάλυση χωρίς απώλειες δικτύου.....	96

3.3.2	Αριθμητικά αποτελέσματα χωρίς απώλειες δικτύου	97
3.3.3	Ακτινικό δίκτυο με απώλειες	98
3.3.4	Αριθμητικά αποτελέσματα με απώλειες δικτύου	101
3.4	Προσεγγιστική εκτίμηση παραμέτρων δικτύου προς τα κατάντη ζυγού μετρήσεων	102
3.4.1	Φορτίο χωρίς αντιστάθμιση	103
3.4.2	Ακτινικό φορτίο με αντισταθμισμένο φορτίο	105
3.4.3	Εφαρμογή με μη αντισταθμισμένο φορτίο	106
3.4.4	Εφαρμογή με αντισταθμισμένο φορτίο	107
3.5	Εκτίμηση περιθωρίου ασφαλείας από τοπικές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο	108
3.5.1	Αριθμητικά αποτελέσματα σε ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες	109
3.5.2	Αριθμητικά αποτελέσματα σε ακτινικό δίκτυο με απώλειες και θόρυβο μετρήσεων	110
4	ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ IEEE NORDIC	113
4.1	Περιγραφή συστήματος δοκιμών Nordic	113
4.2	Αξιολόγηση δείκτη <i>NLI</i>.....	118
4.2.1	Ανασφαλές σημείο λειτουργίας <i>A</i> : απώλεια γραμμής 4032-4044.....	118
4.2.2	Ασφαλές σημείο λειτουργίας <i>B</i>	124
4.3	Αξιολόγηση δείκτη <i>RLI</i>.....	128
4.3.1	Σενάρια προσομοιώσεων.....	128
4.3.2	Ανασφαλές σημείο <i>A</i> : Σύγκριση <i>RLI</i> με <i>NLI</i> (απώλεια γραμμής 4031-4041a).....	130
4.3.3	Ασφαλές σημείο <i>B</i> δείκτης <i>RLI</i>	133
4.3.4	Αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμής από εντολή 3 ^{ης} ζώνης προστασίας	138
4.4	Εφαρμογή μεθόδου εκτίμησης περιθωρίου στο σύστημα Nordic	141
4.4.1	Τροποποιημένο σημείο λειτουργίας <i>A</i>	141
4.4.2	Τροποποιημένο σημείο λειτουργίας <i>B</i>	147
5	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	151
5.1.1	Εισαγωγή.....	151
5.1.2	Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης.....	151
5.1.3	Παραλλαγή συστήματος δοκιμών IEEE Nordic	153
5.2	Επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης (συνδεσμολογία 1).....	155
5.3	Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης (συνδεσμολογία 2)	158
5.4	Ανίχνευση αστάθειας με τον δείκτη <i>NLI</i>	159
5.4.1	Συνδεσμολογία 1	160
5.4.2	Συνδεσμολογία 2	160
5.5	Αξιοποίηση διασπαρμένης παραγωγής για την αντιμετώπιση κατάρρευσης τάσης.....	161
5.5.1	Προτεινόμενα σχήματα	161
5.5.2	Αναγκαιότητα για έμμεση αποκοπή φορτίου	163
5.5.3	Επίδοση σχήματος ΣΠ1	164

5.5.4	Επίδοση σχήματος ΣΠ2.....	165
5.5.5	Επίδοση σχήματος ΣΠ3.....	167
5.5.6	Επίδοση σχήματος ΣΠ4.....	170
5.5.7	Επίδοση σχήματος ΣΠ5.....	171
5.5.8	Σύγκριση σχημάτων προστασίας για σενάριο 1UPF.....	174
5.6	Συμπεράσματα	177
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	181
6.1	Συμπεράσματα και συμβολή της διατριβής	181
6.1.1	Ανίχνευση αστάθειας τάσης από μετρήσεις πραγματικού χρόνου	181
6.1.2	Επίδραση απωλειών στην επίδοση των δεικτών <i>NLI/RLI</i>	182
6.1.3	Αναγνώριση κατάντη δικτύου	182
6.1.4	Υπολογισμός περιθωρίου ευστάθειας	182
6.1.5	Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής σε εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης	183
6.1.6	Σχήματα προστασίας με αξιοποίηση διεσπαρμένων πηγών	183
6.2	Προοπτικές συνέχισης της έρευνας	184
6.2.1	Ανίχνευση αστάθειας τάσης.....	184
6.2.2	Αναγνώριση παραμέτρων κατάντη δικτύου.....	184
6.2.3	Υπολογισμός περιθωρίου ευστάθειας	184
6.2.4	Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης.....	184
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	185
	ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ	197

ΓΛΩΣΣΑΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ

Αεργος Υποστήριξη	Reactive Power Support
Αναδίπλωση Σήματος	Aliasing
Ανίχνευση Αστάθειας	Instability Detection
Γεννήτρια εξοπλισμένη με ηλεκτρονικά ισχύος	Inverter-Based Generator
Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier	Discrete Fourier Transform
Διεσπαρμένη Παραγωγή	Distributed Generation
Έμμεση Αποκοπή Φορτίου	Indirect Load Curtailment
Ευστάθεια Τάσης	Voltage Stability
Ηλεκτρονόμος Αποστάσεως	Distance Relay
Κατάρρευση Τάσης	Voltage Collapse
Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς	Maximum Power Transfer
Μετατροπέας	Converter
Μονάδες μέτρησης φασιθετών	Phasor Measurement Units
Οιονεί Στατική Προσέγγιση	Quasi Steady-State
Παραθυρικός Μετασχηματισμός Fourier	Short-Time Fourier Transform
Περιθώριο Ευστάθειας Τάσης	Voltage Stability Margin
Πολύωνυμα Παρεμβολής	Interpolation Polynomial
Πραγματικός Χρόνος	Real-Time
Προσαρμογή Σύνθετων Αντιστάσεων	Impedance Matching
Σχήμα Προστασίας από Κατάρρευση Τάσης	System Protection Scheme against Voltage Collapse
Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	Electric Power System

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η ηλεκτρική ενέργεια έχει αποτελέσει εδώ και δεκαετίες βασικό μοχλό ανάπτυξης των σύγχρονων κοινωνιών, καθώς και της βιομηχανικής και οικονομικής δραστηριότητας. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), δηλαδή το σύνολο των μέσων και εγκαταστάσεων για την εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια, έχουν πετύχει τον σκοπό τους για πολλές δεκαετίες με πολύ υψηλό βαθμό επιτυχίας [BK96]. Η ολοένα και μεγαλύτερη εξάρτηση της ανθρώπινης δραστηριότητας από την ηλεκτρική ενέργεια έχει θεσπίσει αυστηρές απαιτήσεις που αφορούν σε:

- Διατήρηση της συχνότητας πολύ κοντά στην ονομαστική τιμή
- Διακύμανση της τάσης εντός αυστηρών προδιαγεγραμμένων διαστημάτων λειτουργίας
- Υψηλή αξιοπιστία λειτουργίας
- Περιορισμό διαταραχών λειτουργίας
- Βέλτιστη οικονομική λειτουργία

Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία των ΣΗΕ, ο οποίος αποτελεί και αντικείμενο διερεύνησης δεκαετιών, αφορά στα όρια φόρτισης. Η φόρτιση των ΣΗΕ παρουσιάζει μέγιστα όρια τα οποία δεν είναι σταθερά, αλλά εξαρτώνται από την τοπολογία του συνδυασμένου συστήματος μεταφοράς και παραγωγής. Συνεπώς τα όρια φόρτισης είναι μεταβλητά και είναι απαραίτητη η παρακολούθησή τους για τη διασφάλιση της εξυπηρέτησης των καταναλωτών [VCV08].

Ως *μέγιστο όριο μεταφοράς* νοείται η μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί σε μία περιοχή κατανάλωσης ενός ΣΗΕ. Τα όρια λειτουργίας των ΣΗΕ σε πολλές περιπτώσεις προκύπτουν όχι από τα φυσικά όρια λειτουργίας του επιμέρους εξοπλισμού (π.χ. γραμμών μεταφοράς, γεννητριών), αλλά από τις συνθήκες ευστάθειας του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς [Καρ05].

Η διαρκής ανάπτυξη της ανθρώπινης δραστηριότητας και η αύξηση της συνολικής ζήτησης, σε συνδυασμό με τις δυσκολίες επέκτασης των διασυνδεδεμένων συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει οδηγήσει στη σταδιακά αυξανόμενη φόρτιση των ΣΗΕ. Επιπρόσθετα, η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και η αυξανόμενη ένταξη μονάδων παραγωγής που διασυνδέονται μέσω διατάξεων μετατροπών ισχύος έχουν συμβάλλει στη λειτουργία των ΣΗΕ υπό συνθήκες αυξημένης αβεβαιότητας.

Από τη δεκαετία του 1970, η εντατική χρήση των ΣΗΕ συνέβαλε στην εμφάνιση ενός φαινομένου αστάθειας που χαρακτηρίζεται από αργή (συνήθως της τάξεως μερικών kV ανά λεπτό) αλλά σταδιακά εξελισσόμενη βύθιση των τάσεων του συστήματος. Η βύθιση αυτή παρατηρείται συνήθως σε μεμονωμένες περιοχές του συστήματος όπου η φόρτιση είναι υψηλή, αλλά μπορεί σχετικά γρήγορα να εξαπλωθεί στο σύστημα με οδυνηρές συνέπειες, όπως η μερική ή και ολική σβέση του συστήματος. Η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας έχει διεθνώς ονομαστεί ως *Αστάθεια Τάσης* (*Voltage Instability*) και αν και δεν υπάρχει κάποιος καθολικά αποδεκτός ορισμός της, ένας που περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου είναι ο εξής [VCV08]:

Η αστάθεια τάσης προκύπτει από την προσπάθεια της δυναμικής των ηλεκτρικών φορτίων να αυξήσουν την απορροφούμενη ενεργό ισχύ τους πέρα από την ικανότητα του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Η αστάθεια τάσης συνεπώς εμφανίζεται κατά την απόπειρα του συστήματος να εξυπηρετήσει συνολικό φορτίο, το οποίο υπερβαίνει το τρέχον μέγιστο όριο μεταφοράς. Επιπρόσθετα, η εμφάνιση ανεπιθύμητων διαταραχών (π.χ. απώλεια μονάδων παραγωγής, γραμμών μεταφοράς) αποδυναμώνει τη μεταφορική ικανότητα του συστήματος και διεγείρει τις εγγενείς δυναμικές των ηλεκτρικών φορτίων να αποκαταστήσουν την κατανάλωσή τους στα προ διαταραχής επίπεδα. Στην περίπτωση που το σύστημα μπορεί να ικανοποιήσει την κατανάλωση των φορτίων στα προ διαταραχής επίπεδα, το σύστημα ισορροπεί σε ένα σημείο λειτουργίας και ο μηχανισμός αποκατάστασης της ζήτησης ολοκληρώνεται. Στην περίπτωση όμως που η αρχική κατανάλωση υπερβαίνει τα κατώпин διαταραχής όρια φόρτισης του συστήματος, τότε ο μηχανισμός αποκατάστασης της κατανάλωσης καθίσταται ασταθής και προξενεί φαινόμενα αστάθειας τάσεως στο

σύστημα, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της κατανάλωσης και των τάσεων του συστήματος στην προβληματική, αρχικά, περιοχή του συστήματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται μία σύντομη αναφορά σε βασικές έννοιες, οι οποίες είναι απαραίτητες προκειμένου να τεθεί μία βάση ανάλυσης και ερμηνείας των αποτελεσμάτων που έχουν προκύψει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνεται μία σύντομη αναφορά σε στοιχεία και βασικές έννοιες από τη θεωρία δυναμικών συστημάτων και διαφορικών εξισώσεων, που υπεισέρχονται στην ανάλυση και ερμηνεία των φαινομένων που εμφανίζονται κατά την εκδήλωση αστάθειας τάσεως. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ευρέως αποδεκτή κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ, προκειμένου να καταστεί σαφές ποιο είναι το πλαίσιο στο οποίο οριοθετείται η ανάλυση της ευστάθειας τάσης. Κατόπιν γίνεται σύντομη αναφορά στην έννοια της *Ασφάλειας Τάσης (Voltage Security)*, στις πηγές που διασυνδέονται στο σύστημα μέσω μετατροπών ισχύος και σε Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος. Τέλος, παρατίθεται βιβλιογραφική αναφορά σχετικά με μεθόδους ανίχνευσης αστάθειας τάσης, καθώς και η συμβολή της παρούσας εργασίας.

1.2 Στοιχεία θεωρίας δυναμικών συστημάτων

Τα ΣΗΕ αποτελούν σύνθετα φυσικά συστήματα και μπορούν να μοντελοποιηθούν από ένα σύνολο μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες υπόκεινται σε αλγεβρικούς περιορισμούς. Καταστρώνεται με τον τρόπο αυτό ένα σύστημα από μη-γραμμικές αλγεβρικές και μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις (*Differential-Algebraic Systems - DAE*). Προτού γίνει περιγραφή των συστημάτων αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων, κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη αναφορά σε συστήματα μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων.

Τα περισσότερα δυναμικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν από ένα σύστημα n μη-γραμμικών διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \quad (1-1)$$

όπου $\mathbf{x}$ το $n \times 1$ διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, $\mathbf{z}$ το $r \times 1$ διάνυσμα μεταβλητών εισόδου, $\mathbf{f}$ το διάνυσμα των n μη-γραμμικών συναρτήσεων του $\mathbf{x}$ που ορίζεται στο διάστημα U , υποσύνολο του $\mathbb{R}^n$. Το διάνυσμα $\mathbf{f}$ μπορεί να είναι είτε χρονικά μεταβαλλόμενο, είτε χρονικά αμετάβλητο. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρούνται μόνο χρονικά αμετάβλητες συναρτήσεις $f_i, i = 1, \dots, n$. Η χρονική απόκριση του φυσικού συστήματος $\mathbf{x}(t)$ είναι η λύση της (1-1) για δοσμένο διάνυσμα εισόδων $\mathbf{z}(t)$ και αρχικές συνθήκες $\mathbf{x}_0$ και απεικονίζεται στον χώρο $\mathbb{R}^n$ ως τροχιά του συστήματος.

1.2.1 Γραμμικοποίηση και ευστάθεια σημείων ισορροπίας

Ως σημεία ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ του δυναμικού συστήματος (1-1), καλούνται τα σημεία $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ που για δοσμένο διάνυσμα εισόδων $\bar{\mathbf{z}}$ αποτελούν λύσεις της αλγεβρικής διανυσματικής σχέσης:

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{z}}) \quad (1-2)$$

Τα σημεία ισορροπίας αποτελούν σταθερές λύσεις του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (1-1), ονομάζονται και θέσεις μόνιμου καταστάσεως και αποτελούν τα σημεία στα οποία τα περισσότερα συστήματα τείνουν να βρίσκονται κατά την κανονική τους λειτουργία. Για τον λόγο αυτό, συνηθίζονται να αποκαλούνται και ως *σημεία λειτουργίας* του συστήματος.

Ιδιαίτερου ενδιαφέροντος χρήζει η έννοια της ευστάθειας ενός σημείου ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$. Η θεωρία ευστάθειας κατά Lyapunov ορίζει την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας ως εξής [BD99]:

- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ καλείται ευσταθές εάν για οποιαδήποτε περιοχή V του $\bar{\mathbf{x}}$ υπάρχει περιοχή V_1 τέτοια ώστε για σταθερή είσοδο $\bar{\mathbf{z}}$ και οποιαδήποτε αρχική συνθήκη $\mathbf{x}_0$ εντός της V_1 , η προκύπτουσα τροχιά $\mathbf{x}(t)$ του συστήματος παραμένει εντός της περιοχής V για $t > 0$.
- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ καλείται ασυμπτωτικά ευσταθές εάν όλες οι τροχιές $\mathbf{x}(t)$ που αντιστοιχούν σε αρχικές συνθήκες $\mathbf{x}_0$ εντός της V_1 τείνουν προς το $\bar{\mathbf{x}}$ για $t \rightarrow +\infty$.
- Ένα σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ καλείται ασταθές εάν δεν είναι ευσταθές.

Οι παραπάνω ορισμοί ευστάθειας αφορούν ένα συγκεκριμένο σημείο ισορροπίας, και επομένως δίνουν τοπική πληροφορία σχετικά με την ευστάθεια του δυναμικού συστήματος. Η μεγαλύτερη περιοχή V για την

οποία οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες εντός αυτής τείνουν ασυμπτωτικά στο σημείο ισορροπίας $\bar{x}$ καλείται *περιοχή έλξης* του $\bar{x}$ [VCV08].

Στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στοιχείων από τη θεωρία γραμμικών συστημάτων, καθώς τα μαθηματικά εργαλεία ανάλυσής τους βοηθούν στην ανάλυση των μη-γραμμικών συστημάτων. Για την εφαρμογή εργαλείων από τη θεωρία γραμμικών συστημάτων σε μη-γραμμικά συστήματα, γραμμικοποιούνται οι μη γραμμικές εξισώσεις (1-1) γύρω από ένα σημείο λειτουργίας $\bar{x}$. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η διαφορισιμότητα των συναρτήσεων f_i , $i = 1, \dots, n$ στο σημείο ισορροπίας $\bar{x}$.

Αναπτύσσοντας κατά Taylor τη σχέση (1-1) γύρω από το σημείο λειτουργίας $\bar{x}$ και αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης προκύπτει:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(\bar{x}, \bar{z}) + \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial z} \Delta z \Rightarrow \\ \dot{x} &= \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial z} \Delta z \Rightarrow \\ \Delta \dot{x} &= \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(\bar{x}, \bar{z})}{\partial z} \Delta z\end{aligned}\quad (1-3)$$

όπου είναι $\Delta \dot{x} = \dot{x}$, $\Delta x = x - \bar{x}$ και $\Delta z = z - \bar{z}$. Το γραμμικοποιημένο σύστημα (1-3) μπορεί να γραφεί ως:

$$\Delta \dot{x} = f_x \Delta x + f_z \Delta z \quad (1-4)$$

όπου ο πίνακας f_x ονομάζεται Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος, υπολογισμένος στο σημείο λειτουργίας $\bar{x}$. Η σχέση (1-4) μπορεί εναλλακτικά να γραφεί ως:

$$\dot{x} = Ax + Bz \quad (1-5)$$

Θεωρώντας σταθερούς τους πίνακες A και B η σχέση (1-5) περιγράφει ένα γραμμικό και χρονικά αμετάβλητο σύστημα. Το σύστημα (1-4) περιγράφει προσεγγιστικά τη δυναμική του μη-γραμμικού συστήματος (1-1) σε μία περιοχή γύρω από το σημείο ισορροπίας $\bar{x}$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρώντας μηδενική είσοδο ($z = 0$), το σύστημα (1-5) μεταπίπτει στην εξής περιγραφή:

$$\dot{x} = Ax \quad (1-6)$$

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η *ελεύθερη απόκριση* του γραμμικοποιημένου συστήματος, η οποία εξαρτάται από τον πίνακα κατάστασης A . Το μοναδικό σημείο ισορροπίας του συστήματος (1-6) είναι το $x = 0$ και η ευστάθειά του καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης A .

Ο $n \times n$ πίνακας A έχει n ιδιοτιμές λ_i , $i = 1, \dots, n$, οι οποίες όταν είναι διακεκριμένες καθιστούν τον A διαγωνοποιήσιμο. Οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης A είναι οι τιμές της βαθμωτής παραμέτρου λ_i για τις οποίες υπάρχουν μη τετριμμένες λύσεις της εξίσωσης:

$$Av_i = \lambda_i v_i \quad i = 1 \dots n \quad (1-7)$$

όπου v_i το άγνωστο δεξί ιδιοδιάνυσμα διάστασης $n \times 1$ που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή λ_i . Για τον υπολογισμό των ιδιοτιμών, η (1-7) γράφεται στη μορφή:

$$(A - \lambda I_n)v = 0 \quad (1-8)$$

όπου I_n είναι ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης $n \times n$. Για να προκύψουν μη τετριμμένες λύσεις ως προς το διάνυσμα v , θα πρέπει [Str09]:

$$\det(A - \lambda I_n) = 0 \quad (1-9)$$

Αναπτύσσοντας την ορίζουσα (1-9) προκύπτει το χαρακτηριστικό πολυώνυμο του πίνακα κατάστασης A . Οι n λύσεις ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) της (1-9) ορίζουν τις ιδιοτιμές του A , οι οποίες μπορούν να είναι πραγματικές ή μιγαδικές συζυγείς, δεδομένου ότι ο πίνακας A αποτελείται από πραγματικά στοιχεία. Εάν τα πραγματικά μέρη των λ_i είναι αρνητικά, τότε το σημείο ισορροπίας $x = 0$ του συστήματος (1-6) είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, ενώ εάν έστω και ένα λ_i έχει θετικό πραγματικό μέρος, τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι η περιοχή έλξης του σημείου ισορροπίας του ΓΧΑ συστήματος (1-6) είναι όλος ο χώρος κατάστασης. Έχοντας όμως υπόψιν ότι το σύστημα (1-6) περιγράφει τη συμπεριφορά του συστήματος (1-1) γύρω από το σημείο ισορροπίας $\bar{x}$, η περιοχή έλξης του $\bar{x}$ μπορεί να είναι φραγμένη.

Η απόκριση του συστήματος (1-6) χαρακτηρίζεται από μία τροχιά εντός του διανυσματικού χώρου S_n που περιγράφεται από τη χρονική μεταβολή του διανύσματος $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$. Ο διανυσματικός χώρος S_n καλείται *χώρος κατάστασης* του συστήματος και μία βάση αυτού αποτελούν τα γραμμικά ανεξάρτητα δεξιά ιδιοδιανύσματα $\mathbf{v}_i, i = 1, \dots, n$.

Σημαντικό ρόλο στην ανάλυση των ρυθμών απόκρισης του συστήματος (1-6) έχουν και τα ιδιοδιανύσματα του ανάστροφου πίνακα κατάστασης A^T , τα οποία καλούνται και αριστερά ιδιοδιανύσματα του πίνακα κατάστασης A καθώς ικανοποιούν τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} A^T \mathbf{w}_i &= \lambda_i \mathbf{w}_i & i &= 1 \dots n \\ \mathbf{w}_i^T A &= \lambda_i \mathbf{w}_i^T \end{aligned} \quad (1-10)$$

Επιπλέον ισχύουν οι σχέσεις:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_i = \mathbf{v}_i^T \mathbf{w}_i = C_i \quad i = 1, \dots, n \quad (1-11)$$

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_j^T \mathbf{w}_i = 0 \quad i \neq j \quad (1-12)$$

όπου C_i είναι μία μη μηδενική σταθερά. Συνήθως προτιμάται η κανονικοποιημένη μορφή των ιδιοδιανυσμάτων, έτσι ώστε $C_i = 1, i = 1, \dots, n$. Ορίζοντας τους πίνακες [Βου04]:

$$V = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n] \quad (1-13)$$

$$W = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n] \quad (1-14)$$

$$\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n] \quad (1-15)$$

οι οποίοι έχουν διανύσματα-στήλες τα δεξιά, αριστερά ιδιοδιανύσματα του πίνακα A , καθώς και τον διαγώνιο πίνακα με τις διακεκριμένες ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης A , τότε ισχύουν τα ακόλουθα:

$$A = V \Lambda W^T \quad (1-16)$$

$$\Lambda = W^T A V \quad (1-17)$$

Στο σύστημα (1-6) η δυναμική κάθε μεταβλητής κατάστασης x_i εξαρτάται από όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές κατάστασης, καθώς ο πίνακας κατάστασης A δεν είναι διαγώνιος. Η εύρεση των ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα A διευκολύνει την ανάλυση, καθώς προσδιορίζει τον γραμμικό συνδυασμό στοιχειωδών αποκρίσεων, που καλούνται *ρυθμοί απόκρισης* του συστήματος (1-6), που συνθέτει την απόκριση κάθε μεταβλητής κατάστασης x_i . Συγκεκριμένα ορίζοντας τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$\mathbf{x} = V \boldsymbol{\xi} \quad (1-18)$$

όπου $\boldsymbol{\xi}$ είναι το διάνυσμα με τους ρυθμούς απόκρισης του συστήματος, καθίσταται δυνατή η συσχέτιση του ποσοστού εμφάνισης κάθε ρυθμού απόκρισης $\xi_j(t)$ σε κάθε μεταβλητή κατάστασης $x_i(t)$. Με βάση τα παραπάνω ισχύει:

$$V \dot{\boldsymbol{\xi}} = A V \boldsymbol{\xi} \quad (1-19)$$

από όπου προκύπτει άμεσα λόγω της (1-17):

$$\dot{\boldsymbol{\xi}} = \Lambda \boldsymbol{\xi} \quad (1-20)$$

Στο γραμμικό σύστημα (1-20) η δυναμική του κάθε ρυθμού απόκρισης $\xi_i(t)$ δεν εξαρτάται από τους υπόλοιπους, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα (1-20) να λυθεί ξεχωριστά για κάθε $i = 1, \dots, n$ υπολογίζοντας τους ρυθμούς απόκρισης του συστήματος (1-6):

$$\xi_i(t) = \xi_{i,0} e^{\lambda_i t} \quad i = 1, \dots, n \quad (1-21)$$

Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_n] \boldsymbol{\xi} \\ \mathbf{x} &= [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_n] \begin{bmatrix} \xi_1(t) \\ \vdots \\ \xi_n(t) \end{bmatrix} \\ \mathbf{x} &= \sum_{i=1}^n \mathbf{v}_i \xi_{i,0} e^{\lambda_i t} \end{aligned} \quad (1-22)$$

Επιπρόσθετα, από την (1-18) επιλύοντας ως προς $\boldsymbol{\xi}$ προκύπτει:

$$\xi = V^{-1}x = W^T x \quad (1-23)$$

Συνεπώς, υπολογίζεται η ελεύθερη απόκριση των μεταβλητών κατάστασης x συναρτήσει των αρχικών συνθηκών x_0 , των ιδιοτιμών λ_i καθώς και των δεξιών και αριστερών ιδιοδιανυσμάτων του πίνακα A :

$$x = \sum_{i=1}^n v_i w_i^T x_0 e^{\lambda_i t} \quad (1-24)$$

Στην περίπτωση των μη-γραμμικών συστημάτων, τα σημεία ισορροπίας ποικίλουν, καθώς μπορούν να είναι περισσότερα του ενός ή ακόμη και κανένα. Το γεγονός επίσης ότι η περιοχή έλξης ενός σημείου ισορροπίας μη-γραμμικού συστήματος είναι, στη γενική περίπτωση, φραγμένη, συνεπάγεται ότι η ύπαρξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας μη-γραμμικού συστήματος δεν εγγυάται την ευσταθή απόκριση του συστήματος.

Επιστρέφοντας στη σχέση (1-4) και θεωρώντας $\Delta z = 0$ προκύπτει:

$$\Delta \dot{x} = f_x \Delta x \quad (1-25)$$

Ο Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του συστήματος υπολογισμένος στο σημείο λειτουργίας $\bar{x}$ υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_x = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} \right|_{x=\bar{x}} & \dots & \left. \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \right|_{x=\bar{x}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} \right|_{x=\bar{x}} & \dots & \left. \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \right|_{x=\bar{x}} \end{bmatrix} \quad (1-26)$$

Προσδιορίζοντας τις ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα f_x , η μελέτη ευστάθειας του σημείου ισορροπίας $\bar{x}$ του συστήματος (1-1) ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του σημείου ισορροπίας $\Delta x = 0$ του γραμμικοποιημένου συστήματος (1-25) γύρω από το $\bar{x}$.

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία λειτουργίας ενός μη-γραμμικού συστήματος ονομάζονται *ευσταθείς κόμβοι* (*stable nodes*). Τα ασταθή σημεία λειτουργίας, τα οποία έχουν όλες τις ιδιοτιμές με θετικά πραγματικά μέρη, ονομάζονται *πηγές* (*sources*), ή *ασταθείς κόμβοι* (*unstable nodes*). Τέλος, τα σημεία λειτουργίας των οποίων οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά αλλά και θετικά πραγματικά μέρη ονομάζονται *σαγματικά σημεία* ή *διάσελα* (*saddles*) [VCV08]. Στην περίπτωση που ο Ιακωβιανός πίνακας f_x έχει τουλάχιστον μία ιδιοτιμή με μηδενικό πραγματικό μέρος, τότε δεν μπορεί να προκύψει συμπέρασμα ως προς την ευστάθεια του σημείου ισορροπίας $\bar{x}$ από το γραμμικοποιημένο σύστημα (1-25).

Το σύστημα οδηγείται κατά τη συνήθη λειτουργία του από ακολουθία μικρών διαταραχών σε διαδοχικά σημεία ισορροπίας. Συνήθεις ακολουθίες μικρών διαταραχών μπορούν να θεωρηθούν, μεταξύ άλλων, η ομαλή μεταβολή της ηλεκτρικής ζήτησης των φορτίων ή οι μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των μετασχηματιστών (Μ/Σ) ισχύος. Η ανάλυση ευστάθειας των ΣΗΕ συνεπάγεται συνεπώς τη διερεύνηση των ιδιοτήτων των σημείων ισορροπίας στα οποία μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα.

1.2.2 Θεωρία Διακλαδώσεων και διακλάδωση Σαγματικού Κόμβου

Μία ποικιλία προβλημάτων που εμφανίζονται στη λειτουργία των ΣΗΕ μπορεί να ερμηνευτεί κάνοντας χρήση της θεωρίας διακλαδώσεων. Η θεωρία διακλαδώσεων αποτελεί βασικό εργαλείο ερμηνείας φαινομένων αστάθειας τάσης και εξετάζει την αλλαγή της συμπεριφοράς ενός μη-γραμμικού δυναμικού συστήματος, όταν ορισμένες παράμετροι αυτού αλλάζουν με μικρές και συνεχείς μεταβολές. Στην παρούσα εργασία η μορφή της ποιοτικής αλλαγής της συμπεριφοράς του συστήματος αφορά στην αλλαγή του αριθμού των σημείων ισορροπίας του.

Θεωρούμε το σύστημα της σχέσης (1-27):

$$\dot{x} = f(x, p) \quad (1-27)$$

όπου το $\mathbf{x}$ είναι το $n \times 1$ διάνυσμα κατάστασης και $\mathbf{p}$ το $k \times 1$ διάνυσμα ανεξάρτητων παραμέτρων του συστήματος το οποίο μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα και με συνεχή τρόπο. Εν γένει, τα σημεία ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ μεταβάλλονται εάν το διάνυσμα $\mathbf{p}$ αλλάξει και προκύπτουν από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) \quad (1-28)$$

Η κατηγορία διακλάδωσης που ενδιαφέρει περισσότερο την παρούσα εργασία και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ερμηνεία φαινομένων αστάθειας τάσης είναι η διακλάδωση σαγματικού κόμβου. Η συγκεκριμένη κατηγορία διακλάδωσης παρουσιάζεται όταν, ως συνέπεια μιας αργής μεταβολής του διανύσματος $\mathbf{p}$, εξαφανίζεται (ή εμφανίζεται) ένα ζευγάρι σημείων ισορροπίας, εκ των οποίων το ένα είναι ευσταθές και το άλλο ασταθές. Στην πράξη, η διακλάδωση σαγματικού κόμβου εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή εξαφάνισης ενός ευσταθούς και ενός ασταθούς σημείου ισορροπίας, τα οποία μεταβάλλονται με ομαλό τρόπο ως συνέπεια της μεταβολής του διανύσματος $\mathbf{p}$.

Αν και το φαινόμενο είναι φύσει μη-γραμμικό, εντούτοις μπορεί να ανιχνευτεί από τον Ιακωβιανό πίνακα κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται στο εκάστοτε σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ για την τρέχουσα τιμή του διανύσματος $\mathbf{p}$. Συγκεκριμένα, στο σημείο διακλάδωσης προκύπτει μη αντιστρεψιμότητα του Ιακωβιανού πίνακα του γραμμικοποιημένου συστήματος και κατά συνέπεια μηδενισμός της ορίζουσας:

$$\det(A) = 0 \quad (1-29)$$

Η παραπάνω σχέση συνεπάγεται ότι ο Ιακωβιανός πίνακας έχει τουλάχιστον μία μηδενική ιδιοτιμή στο σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$. Κατά συνέπεια, το σημείο ισορροπίας $\bar{\mathbf{x}}$ αποτελεί τη συγχώνευση του ζεύγους ευσταθούς και ασταθούς σημείου ισορροπίας των προηγούμενων τιμών του διανύσματος $\mathbf{p}$.

Κατά την εμφάνιση της διακλάδωσης του σαγματικού κόμβου, παύουν να υπάρχουν σημεία ισορροπίας στο σύστημα, ενώ παράλληλα απειρίζεται η ευαισθησία των τάσεων του συστήματος ως προς τις παραμέτρους [MRL01].

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

$$\mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (1-30)$$

$$\det \mathbf{f}_x(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) = 0 \quad (1-31)$$

$$\mathbf{w} \mathbf{f}_p^T(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{p}) \neq \mathbf{0} \quad (1-32)$$

$$\mathbf{v}^T \left(\sum_{i=1}^n w_i H_i \right) \mathbf{v} \neq 0 \quad (1-33)$$

όπου $\mathbf{v}$, $\mathbf{w}$, το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα της μηδενικής ιδιοτιμής του Ιακωβιανού πίνακα υπολογισμένου στο σαγματικό σημείο και H_i ο Ερσιανός πίνακας της $\mathbf{f}$, τα στοιχεία του οποίου δίνονται από τη σχέση:

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1-34)$$

Να σημειωθεί ότι το σημείο λειτουργίας του συστήματος στο οποίο εμφανίζονται οι σχέσεις (1-30) και (1-31) αποτελεί ασταθές σημείο ισορροπίας του συστήματος.

1.2.3 Συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς

Τα συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς περιγράφονται από ένα σύστημα n και m διαφορικών και αλγεβρικών αντίστοιχα εξισώσεων [VCV08]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \end{aligned} \quad (1-35)$$

όπου με $\mathbf{x}$ συμβολίζεται το διάνυσμα των n μεταβλητών κατάστασης του συστήματος, $\mathbf{y}$ το διάνυσμα των m αλγεβρικών μεταβλητών, ενώ με $\mathbf{p}$ συμβολίζεται το $k \times 1$ διάνυσμα των παραμέτρων του συστήματος. Οι διανυσματικές συναρτήσεις $\mathbf{f}$ και $\mathbf{g}$ θεωρούνται συνεχείς και διαφορίσιμες. Οι m αλγεβρικές εξισώσεις

ορίζουν μία *πολλαπλότητα* διάστασης $n + k$ διάστασης στον χώρο των μεταβλητών $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}$ διάστασης $n + m + k$ που ονομάζεται *πολλαπλότητα αλγεβρικών περιορισμών*.

Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν τεχνικά προβλήματα στην επίλυσή τους, που δεν σχετίζονται με τα πραγματικά δυναμικά συστήματα που μοντελοποιούν. Η τεχνικής φύσεως δυσκολία εμφανίζεται στις αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες δεν μπορούν πάντα να επιλυθούν ως προς τις μεταβλητές $\mathbf{y}$. Τα σημεία στα οποία δεν είναι δυνατή η επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων καλούνται *ιδιόμορφα σημεία* (*singular points*) και στα σημεία αυτά η απόκριση του συστήματος δεν μπορεί να οριστεί.

Τα συστήματα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς αναλύονται με χρήση του θεωρήματος *πεπλεγμένης συνάρτησης* (*Implicit Function Theorem*). Θεωρώντας ένα σημείο λειτουργίας $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{p}_0$ για το οποίο ο Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{g}_y$ των αλγεβρικών εξισώσεων είναι αντιστρέψιμος, τότε σύμφωνα με το θεώρημα *πεπλεγμένης συνάρτησης* υπάρχει τοπικά μία μοναδική ομαλή συνάρτηση $\mathbf{F}$ συνεχής και παραγωγίσιμη ως προς τα διανύσματα $\mathbf{x}$ και $\mathbf{p}$, η οποία απαλείφει τις αλγεβρικές μεταβλητές:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (1-36)$$

Με βάση την (1-36) το σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων μπορεί να μεταπέσει στην εξής περιγραφή:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_0, \mathbf{h}(\mathbf{x}_0, \mathbf{p}_0), \mathbf{p}_0) \quad (1-37)$$

Αντικαθιστώντας κατάλληλα προκύπτει:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{p}), \mathbf{p}) = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (1-38)$$

Η συνάρτηση $\mathbf{F}$ ορίζεται, είναι συνεχής και παραγωγίσιμη ως προς τις μεταβλητές $\mathbf{x}, \mathbf{p}$ σε όλα τα σημεία στα οποία ο αλγεβρικός Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{g}_y$ είναι αντιστρέψιμος και το σύστημα (1-35) έχει μοναδική λύση. Συμβολίζοντας με U_p το πεδίο ορισμού της *πεπλεγμένης συνάρτησης* $\mathbf{F}$ στον χώρο κατάστασης, τότε για δεδομένη τιμή του διανύσματος $\mathbf{p}$ η περιοχή αυτή φράσσεται από ένα σύνορο στο οποίο ο αλγεβρικός Ιακωβιανός πίνακας παύει να είναι αντιστρέψιμος, ισχύει δηλαδή:

$$\det(\mathbf{g}_y) = 0 \quad (1-39)$$

Για δεδομένη τιμή του διανύσματος $\mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}}$ τα σημεία ισορροπίας του συστήματος (1-35) υπολογίζονται από την επίλυση του συστήματος:

$$\begin{aligned} \mathbf{0} &= \mathbf{f}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{p}}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \bar{\mathbf{p}}) \end{aligned} \quad (1-40)$$

Κατ'επέκταση, η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας που προέκυψαν από την επίλυση του συστήματος (1-40) προσδιορίζεται τοπικά από το γραμμικοποιημένο σύστημα:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (1-41)$$

όπου $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}, \Delta \mathbf{y} = \mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}$ και $\mathbf{J}$ ο μη-ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (1-42)$$

και $\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_y, \mathbf{g}_x, \mathbf{g}_y$ οι Ιακωβιανοί πίνακες των $\mathbf{f}, \mathbf{g}$ υπολογισμένοι στα σημεία ισορροπίας που προκύπτουν για δεδομένη τιμή του $\mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}}$.

Το διάνυσμα των αποκλίσεων των αλγεβρικών μεταβλητών μπορεί να απαλειφθεί εάν ο Ιακωβιανός πίνακας $\mathbf{g}_y$ είναι αντιστρέψιμος. Απαλείφοντας τις αλγεβρικές μεταβλητές $\mathbf{y}$, η περιγραφή του γραμμικοποιημένου συστήματος μεταπίπτει στην εξής:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \Delta \mathbf{x} \quad (1-43)$$

Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ο ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος:

$$\mathbf{A} = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x \quad (1-44)$$

Η ευστάθεια ενός σημείου λειτουργίας του συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς για δεδομένη τιμή του διανύσματος παραμέτρων $\bar{p}$ προσδιορίζεται από τις ιδιοτιμές του ελαττωμένου Ιακωβιανού πίνακα A . Οι ευσταθείς και ασταθείς πολλαπλότητες του εξεταζόμενου σημείου λειτουργίας βρίσκονται πάνω στην πολλαπλότητα των αλγεβρικών περιορισμών στον χώρο κατάστασης και αλγεβρικών μεταβλητών [VCV08].

Καθώς μεταβάλλεται το διάνυσμα p , το σύστημα μεταβαίνει σε διαδοχικά νέα σημεία λειτουργίας και είναι δυνατόν να παρουσιαστεί διακλάδωση όπως και σε ένα δυναμικό σύστημα χωρίς αλγεβρικούς περιορισμούς.

Με βάση τον τύπο του Schur προκύπτει:

$$\det J = \det g_y \det(f_x - f_y g_y^{-1} g_x) \quad (1-45)$$

Η σχέση (1-45) συνεπάγεται ότι ο μηδενισμός της ορίζουσας του μη-ελαττωμένου Ιακωβιανού πίνακα J θα συμπίπτει με τον μηδενισμό της ορίζουσας του ελαττωμένου πίνακα κατάστασης A εφόσον ο Ιακωβιανός πίνακας αλγεβρικών μεταβλητών g_y είναι αντιστρέψιμος.

1.2.4 Αδιαπέραστες επιφάνειες και επιφάνειες ιδιομορφιών

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα σημεία της πολλαπλότητας των αλγεβρικών περιορισμών στα οποία ο Ιακωβιανός πίνακας g_y είναι μη-αντιστρέψιμος υπολογίζονται από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων:

$$\begin{aligned} 0 &= g(x, y, p) \\ 0 &= \det g_y(x, y, p) \end{aligned} \quad (1-46)$$

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων συνθέτει μία υπερεπιφάνεια διάστασης $n + k - 1$ η οποία βρίσκεται πάνω στην πολλαπλότητα των αλγεβρικών περιορισμών και είναι κατά μία διάσταση μικρότερη λόγω της επιπλέον εξίσωσης από τον μηδενισμό της ορίζουσας του Ιακωβιανού πίνακα. Η υπερεπιφάνεια αυτή καλείται και *αδιαπέραστη επιφάνεια* (*impassable surface*) καθώς οι τροχιές του συστήματος δεν μπορούν να τη διασχίσουν. Η αδιαπέραστη επιφάνεια χωρίζει την πολλαπλότητα αλγεβρικών περιορισμών σε *περιοχές αιτιότητας* (*causality regions*), διότι σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές υπάρχει μοναδική λύση των αλγεβρικών περιορισμών για όλες τις αρχικές τιμές εντός αυτών.

Για δεδομένη τιμή του διανύσματος παραμέτρων p η προβολή της αδιαπέραστης επιφάνειας στον χώρο κατάστασης συνθέτει μία υπερεπιφάνεια $n - 1$ διάστασης S_p , η οποία αποτελείται από ιδιομορφα σημεία αλγεβρικών εξισώσεων και ονομάζεται *επιφάνεια ιδιομορφιών*. Σημειώνεται ότι η επιφάνεια ιδιομορφιών καλείται και ως *επιφάνεια κατάρρευσης* στην περίπτωση των ΣΗΕ. Η επιφάνεια ιδιομορφιών φράσσει το πεδίο ορισμού της πεπλεγμένης συνάρτησης F U_p στον χώρο κατάστασης αποτελώντας έτσι το σύνορο, πέραν του οποίου η σχέση (1-38) δεν ορίζεται. Εν γένει για μεταβαλλόμενο διάνυσμα παραμέτρων p το πεδίο ορισμού U_p μεταβάλλεται και μπορεί να συρρικνώνεται ή να επεκτείνεται.

Θεωρούμε ένα σημείο λειτουργίας $\bar{x}, \bar{y}, \bar{p}$ του οποίου η προβολή στον χώρο κατάστασης είναι $\bar{x} \in U_p$. Οι λύσεις του συστήματος διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς για δεδομένη τιμή του p καταλήγουν σε πεπερασμένο χρόνο στο σύνορο της περιοχής U_p .

Γραμμικοποιώντας τις αλγεβρικές εξισώσεις (1-35) γύρω από ένα σημείο λειτουργίας πάνω στην αδιαπέραστη επιφάνεια προκύπτει:

$$0 = g_x \Delta x + g_y \Delta y + g_p \Delta p \quad (1-47)$$

και με δεδομένο ότι επί της αδιαπέραστης επιφάνειας ο Ιακωβιανός πίνακας g_y είναι μη-αντιστρέψιμος, θα υπάρχει μη μηδενική λύση ως προς το Δy όταν $\Delta x = \Delta p = 0$. Αυτό συνεπάγεται τον μηδενισμό των ευαισθησιών των διανυσμάτων x, p ως προς κάποιες από τις αλγεβρικές μεταβλητές, κάτι που αντιστοιχεί σε τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα όλων των μεταβλητών κατάστασης και παραμέτρων ως προς ορισμένες από τις αλγεβρικές μεταβλητές.

1.2.5 Ιδιαζουσες διαταραχές και οιονεί στατική προσέγγιση

Στην παρούσα παράγραφο παρατίθενται ορισμένα βασικά στοιχεία της θεωρίας των ιδιαζουσών διαταραχών που εφαρμόζεται σε δυναμικά συστήματα τα οποία περιέχουν δυναμικές σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Περισσότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στην εργασία [Μαν98].

Στην πράξη είναι αρκετά συνηθισμένο να συναντώνται δυναμικά συστήματα που περιέχουν δυναμικές οι οποίες εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες διαφορετικών τάξεων μεγέθους. Για την ακρίβεια, ορισμένες δυναμικές εξελίσσονται σε αρκετά πιο γρήγορη χρονική κλίμακα από άλλες, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως αργές. Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν εξυπηρετεί τους σκοπούς της ανάλυσης η χρήση ενιαίου μοντέλου για ένα σύστημα με δυναμικές σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες, καθώς η ενσωμάτωση όλων των εν λόγω δυναμικών αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα του μοντέλου και κατ'επέκταση το υπολογιστικό κόστος έναντι μικρού κέρδους σε ακρίβεια ανάλυσης.

Αυτό που στην πράξη ακολουθείται, είναι η επιλογή της χρονικής κλίμακας που ενδιαφέρει την ανάλυση και συνεπώς η σύνθεση ενός απλοποιημένου μοντέλου, το οποίο διατηρεί μόνο τις δυναμικές οι οποίες εντάσσονται στη χρονική κλίμακα που εξυπηρετεί τους σκοπούς της ανάλυσης. Για παράδειγμα, στην προσπάθεια διατήρησης ενός μοντέλου που περιγράφει μόνο τους δυναμικούς μηχανισμούς που εξελίσσονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, διατηρούνται οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τους γρήγορους δυναμικούς μηχανισμούς, ενώ αμελούνται οι δυναμικές που εξελίσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, καθώς αυτές μπορούν απλοποιητικά να θεωρηθούν σταθερές κατά τη διάρκεια του βραχυπρόθεσμου διαστήματος ανάλυσης. Το διάστημα της ανάλυσης στην προκειμένη περίπτωση αφορά αυτό στο οποίο εξελίσσονται οι γρήγορες δυναμικές. Αντίθετα, στα απλοποιημένα μοντέλα μακροπρόθεσμης ανάλυσης διατηρούνται μόνο οι δυναμικές που εξελίσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ γίνεται η απλοποιητική υπόθεση ότι οι γρήγορες δυναμικές έχουν ήδη έρθει σε ισορροπία για κάθε μεταβολή των αργών δυναμικών.

Με βάση την παραπάνω θεώρηση, εισάγεται η έννοια του διαχωρισμού του ενιαίου συστήματος πολλαπλών χρονικών κλιμάκων σε απλοποιημένα υποσυστήματα (*μοντέλα ελαττωμένης τάξης*), καθένα εκ των οποίων περιλαμβάνει δυναμικές που εξελίσσονται σε μία μόνο χρονική κλίμακα.

Στην περίπτωση που είναι εφικτή η αποσύμπλεξη των δυναμικών ενός συστήματος σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, χρησιμοποιούνται μοντέλα ελαττωμένης τάξης για την περιγραφή του δυναμικού υποσυστήματος που εξελίσσεται στην εκάστοτε χρονική κλίμακα. Η ζητούμενη αποσύμπλεξη επιτυγχάνεται μέσω της *ανάλυσης ιδιαζουσών διαταραχών* (*singular perturbation*) [KKO99]. Για παράδειγμα, μία προσέγγιση που εφαρμόζεται στην προσομοίωση ΣΗΕ αφορά στη θεώρηση κατά την οποία το ηλεκτρικό δίκτυο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, λόγω της πολύ ταχύτερης δυναμικής του σε σχέση με τις χρονικές σταθερές των υπόλοιπων συνιστωσών (π.χ. γεννήτριες, φορτία) [PC14].

Σύμφωνα με τη θεωρία ιδιαζουσών διαταραχών, ένα σύστημα που αποτελείται από αργά και γρήγορα δυναμικά φαινόμενα μπορεί να γραφτεί στην ακόλουθη μορφή:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (1-48)$$

$$\varepsilon \dot{y} = g(x, y) \quad (1-49)$$

οπου x το διάνυσμα των αργών μεταβλητών κατάστασης διάστασης $n \times 1$, y το διάνυσμα των γρήγορων διάστασης $m \times 1$, οι f και g θεωρούνται ομαλές συναρτήσεις, ενώ με ε συμβολίζεται μία πραγματική παράμετρος που μπορεί να είναι οσοδήποτε μικρή.

Δυναμικά συστήματα που περιγράφονται από τις σχέσεις (1-48) και (1-49) δημιουργούν σημαντικά προβλήματα σύγκλισης στους αλγορίθμους προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για την αριθμητική τους επίλυση. Για τον λόγο αυτό επιστρατεύονται ιδιαίτερες μαθηματικές τεχνικές για την εξασφάλιση της αριθμητικής ευστάθειας της προσομοίωσής τους. Εντούτοις στην παράγραφο αυτή ενδιαφέρει η ανάλυση του αρχικού συστήματος σε δύο υποσυστήματα διαφορετικών χρονικών κλιμάκων (γρήγορο και αργό), αποσκοπώντας στην απλοποίηση της ανάλυσης.

Μία συχνά αποδεκτή προσέγγιση του υποσυστήματος που περιγράφει τις αργές δυναμικές προκύπτει θέτοντας $\varepsilon = 0$ στις γρήγορες διαφορικές εξισώσεις της (1-49). Η προσέγγιση αυτή καλείται *οιονεί στατική προσέγγιση* - *Quasi Steady-State (QSS)* του αργού υποσυστήματος [VCV96]. Η βασική θεώρηση της οιονεί στατικής προσέγγισης έγκειται στο ότι μία απειροστή μεταβολή των αργών μεταβλητών κατάστασης οδηγεί

τις γρήγορες δυναμικές ακαριαία, μέσω των αλγεβρικών εξισώσεων που τις περιγράφουν στο ελαττωμένο σύστημα, σε ένα νέο σημείο ισορροπίας (στατική κατάσταση) προτού επέλθει η επόμενη απειροστή μεταβολή των αργών μεταβλητών κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο ελαττωμένης τάξης της οιονεί στατικής προσέγγισης περιγράφεται από τις εξής εξισώσεις:

$$\dot{x} = f(x, y) \quad (1-50)$$

$$0 = g(x, y) \quad (1-51)$$

Για δεδομένη τιμή του διανύσματος x , η σχέση (1-49) περιγράφει τη συνθήκη ισορροπίας των γρήγορων μεταβλητών y , αλλά δεδομένου ότι αυτό έχει θεωρηθεί επιβάλλοντας $\varepsilon = 0$, αυτό μπορεί να γίνει και για $\dot{y} \neq 0$, κάτι που σημαίνει ότι το διάνυσμα y μπορεί να μεταβάλλεται, ενώ ικανοποιείται η (1-49) και τα x μεταβάλλονται αργά. Ο ρυθμός μεταβολής του διανύσματος y κατά τη διάρκεια αργών, οιονεί στατικών μεταβολών μπορεί να υπολογιστεί από παραγωγή της (1-49) χρησιμοποιώντας τον κανόνα της αλυσίδας και την σχέση (1-48).

Με τον τρόπο αυτό, το ελαττωμένης τάξης αργό υποσύστημα προσεγγίζει τα αργά δυναμικά φαινόμενα του πλήρους συστήματος (εξαιρουμένης της αρχικής γρήγορης μεταβατικής απόκρισης λόγω των γρήγορων μεταβλητών κατάστασης) με ένα σφάλμα της τάξεως του ε εφόσον:

- Οι αλγεβρικές εξισώσεις (1-51) δεν παρουσιάζουν ιδιόμορφα σημεία. Σε αντίθετη περίπτωση το αλγεβρικό σύστημα (1-51) δεν μπορεί να επιλυθεί ως προς τις μεταβλητές y .
- Τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα είναι ευσταθή για σταθερές τιμές των αργών μεταβλητών x , δηλαδή οι ιδιοτιμές του πίνακα g_y έχουν ιδιοτιμές με αυστηρά αρνητικό πραγματικό μέρος.
- Το σύστημα κατόπιν της διαταραχής (όπως π.χ. μία μεταβολή του διανύσματος p) βρίσκεται εντός της περιοχής έλξης του ευσταθούς σημείου ισορροπίας των γρήγορων δυναμικών φαινομένων.

Από την ανάλυση των ιδιαζουσών διαταραχών προκύπτει ότι ένα σύστημα που εξελίσσεται σε δύο χρονικές κλίμακες μπορεί να προσεγγιστεί σαν ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων με αλγεβρικούς περιορισμούς. Ένα αρνητικό όμως χαρακτηριστικό των εν λόγω συστημάτων αφορά στο ότι αυτά παρουσιάζουν ιδιομορφίες στα σημεία όπου ο Ιακωβιανός πίνακας των αλγεβρικών μεταβλητών g_y είναι μη-αντιστρέψιμος.

Πιο συγκεκριμένα, εάν θεωρηθεί μία τροχιά του συστήματος που καταλήγει πάνω στην επιφάνεια ιδιομορφιών, τότε στο σημείο αυτό οι αλγεβρικές εξισώσεις (1-51) εμφανίζουν αλγεβρική ιδιομορφία καθώς η ορίζουσα του Ιακωβιανού πίνακα g_y μηδενίζεται. Κατά συνέπεια, παύουν να ισχύουν οι υποθέσεις για τον διαχωρισμό του συστήματος σε χρονικές κλίμακες, καθώς η μηδενική ιδιοτιμή αναιρεί τον υποτιθέμενο γρήγορο χαρακτήρα των μεταβλητών y . Το σημείο αυτό αποτελεί σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου του γρήγορου υποσυστήματος (στο οποίο οι αργές μεταβλητές κατάστασης x είναι σταθερές) και επομένως αποτελεί ασταθές σημείο ισορροπίας των γρήγορων μεταβλητών κατάστασης.

Από τη σκοπιά του αργού υποσυστήματος, η ιδιομορφία του πίνακα g_y εμφανίζεται ως κατάρρευση. Κοντά στο σημείο διακλάδωσης σαγματικού κόμβου, ακόμα και μικρές μεταβολές των αργών μεταβλητών κατάστασης συνεπάγονται μεγάλες μεταβολές του y με αποτέλεσμα οι παράγωγοι $\dot{x}$ να απειρίζονται. Κατά συνέπεια, η αστάθεια του γρήγορου υποσυστήματος προκαλεί μία πρακτικά ακαριαία μετάβαση των μεταβλητών x του αργού υποσυστήματος, με συνέπεια αυτό να καταρρέει. Αντίστοιχα, η κατάρρευση ενός συστήματος δύο χρονικών κλιμάκων θα μπορούσε να οριστεί ως η αστάθεια των γρήγορων δυναμικών φαινομένων.

1.3 Ευστάθεια ΣΗΕ

1.3.1 Γενικά

Η σημασία της ευστάθειας των ΣΗΕ είχε αναγνωριστεί ήδη από τις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα ως ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα λειτουργίας τους, λόγω της εμφάνισης ανεπιθύμητων συμβάντων τα οποία πολλές φορές οδηγούσαν σε σοβαρά λειτουργικά προβλήματα ή ακόμη και σε σβέσεις. Η ανάπτυξη των ΣΗΕ, καθώς και η διασύνδεση γειτονικών συστημάτων αύξησαν σημαντικά τον βαθμό πολυπλοκότητας, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη νέων μορφών αστάθειας. Τα τελευταία δε χρόνια, οι ραγδαίες αλλαγές που έχουν επέλθει στα ΣΗΕ λόγω της ένταξης εξοπλισμού που λειτουργεί με διατάξεις μετατροπών ισχύος (π.χ.

μονάδες ΑΠΕ, HVDC διασυνδέσεις, φορτία μέσω μετατροπών ισχύος κλπ.) έχουν μεταβάλλει σημαντικά τη δυναμική απόκριση των ΣΗΕ και κατ'επέκταση έχουν συντελέσει στην εμφάνιση νέων μορφών αστάθειας [TR20].

Ένας αποδεκτός ορισμός της ευστάθειας ΣΗΕ δόθηκε από την ομάδα εργασίας της IEEE/CIGRE και είναι ο εξής [KPA04]:

Η Ευστάθεια ΣΗΕ είναι η ικανότητα του συστήματος, για δεδομένη αρχική συνθήκη λειτουργίας να ανακτήσει βιώσιμη κατάσταση λειτουργίας (σημείο λειτουργίας) μετά από μία φυσική διαταραχή με τις περισσότερες μεταβλητές του συστήματος να είναι εντός επιτρεπτών ορίων λειτουργίας, ώστε το σύστημα να παραμείνει ανέπαφο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα ΣΗΕ είναι δυναμικά συστήματα πολλαπλών χρονικών κλιμάκων που παρουσιάζουν έντονες μη-γραμμικότητες. Η λειτουργία τους μεταβάλλεται διαρκώς, δεδομένου ότι οι παράμετροί τους παρουσιάζουν συνεχείς μεταβολές είτε μεγάλης είτε μικρής κλίμακας (π.χ. συνεχής μεταβολή ζήτησης, χειρισμοί, βραχυκυκλώματα κλπ.). Συνεπώς, η λειτουργία των ΣΗΕ συνοδεύεται διαρκώς από διαταραχές μικρής ή μεγάλης κλίμακας και η σημασία της ευστάθειας είναι προφανής. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μη-γραμμικότητα των ΣΗΕ περιπλέκει σημαντικά την ανάλυση της ευστάθειας και είναι χαρακτηριστικό ότι η ίδια διαταραχή μπορεί να προκαλέσει είτε ασταθή είτε ευσταθή απόκριση σε ένα ΣΗΕ για διαφορετικά σημεία λειτουργίας. Επίσης για ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας υπάρχουν ευσταθείς και ασταθείς διαταραχές, ενώ μπορεί επίσης ναδειχθεί ότι για ένα σημείο λειτουργίας υπάρχουν πάντα διαταραχές που μπορούν να προκαλέσουν ασταθή απόκριση στο σύστημα [Βου04].

Καθίσταται επομένως σαφές, ότι υπάρχει ένας υπόχωρος του χώρου κατάστασης εντός του οποίου το σύστημα μπορεί να υπόκειται σε ένα σύνολο από πιθανές διαταραχές και να αποκρίνεται ευσταθώς επιτυγχάνοντας νέο σημείο ισορροπίας. Ο υπόχωρος αυτός, λόγω της μη-γραμμικότητας, δεν είναι σταθερός αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με το σημείο λειτουργίας. Η περιοχή έλξης του εξεταζόμενου σημείου λειτουργίας είναι επομένως πεπερασμένη και όσο ευρύτερη είναι, τόσο πιο σθεναρό χαρακτηρίζεται το σύστημα. Εάν η διαταραχή είναι ομαλή, όπως μία μικρή μεταβολή παραμέτρου (π.χ. ηλεκτρικής ζήτησης), τότε το σύστημα κατευθύνεται συνήθως σε ένα γειτονικό νέο σημείο λειτουργίας. Αντίθετα, η εμφάνιση μίας μεγάλης διαταραχής, όπως π.χ. ένα βραχυκύκλωμα, μπορεί μεταβατικά να απομακρύνει σημαντικά το σύστημα από το αρχικό σημείο λειτουργίας.

Με βάση τα παραπάνω, η ευστάθεια ΣΗΕ είναι μία ιδιότητα του συστήματος που σχετίζεται με τη γενικότερη συμπεριφορά του γύρω από ένα εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας και πρέπει να εξασφαλίζεται στο μέτρο του δυνατού, με σκοπό την επίτευξη επαρκών επιπέδων ασφαλούς λειτουργίας, δηλαδή λειτουργία συστήματος με επαρκώς μεγάλη περιοχή έλξης. Ωστόσο, είναι αδιαμφισβήτητο ότι η επιδίωξη σχεδίασης των ΣΗΕ προκειμένου αυτά να μπορούν να ανταπεξέλθουν σε οποιαδήποτε πιθανή διαταραχή, είναι αντιοικονομική. Αντιθέτως, οι διαχειριστές συστημάτων συνεχίζουν να σχεδιάζουν τα ΣΗΕ με γνώμονα ότι αυτά θα πρέπει να μπορούν να ανταπεξέρχονται σε ένα σύνολο διαταραχών (*credible contingencies*) που έχουν ρεαλιστικές πιθανότητες εμφάνισης.

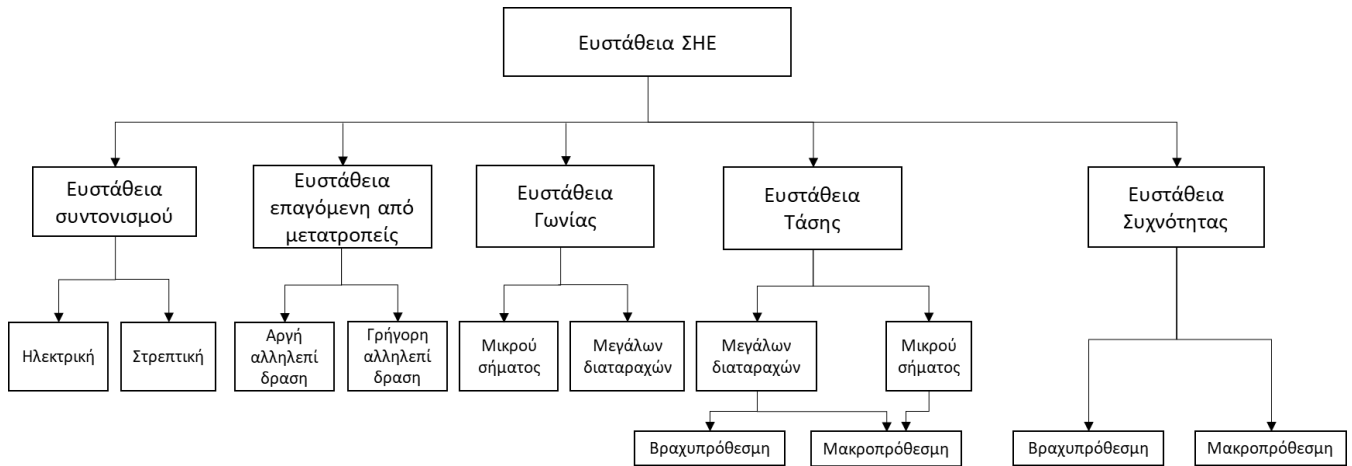
1.3.2 Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ

Αν και η ευστάθεια ΣΗΕ είναι ενιαίο πρόβλημα, η πολυπλοκότητα των διασυνδεδεμένων συστημάτων και η δυνατότητα αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης των μορφών αστάθειας, οδήγησαν στη θεώρηση απλοποιητικών παραδοχών και στην κατηγοριοποίηση. Η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ είναι καθοριστική για την κατάστρωση συστηματικών μεθόδων ενίσχυσης της ευστάθειας του συστήματος, λόγω της πληθώρας των δυναμικών μηχανισμών που μπορούν να επιφέρουν αστάθεια στο σύστημα.

Δεδομένου ότι τα ΣΗΕ αποτελούνται από πλήθος στοιχείων με δυναμικές που ανήκουν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, το χρονικό παράθυρο εξέλιξης της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κυμαίνεται από ms έως και αρκετά λεπτά της ώρας [TR20]. Εξάλλου, η ραγδαία ανάπτυξη και ενσωμάτωση διατάξεων με ηλεκτρονικά ισχύος τόσο στην ηλεκτροπαραγωγή όσο και στην κατανάλωση, έχει συντελέσει σε έναν πρωτόγνωρο μετασχηματισμό των χαρακτηριστικών των ΣΗΕ, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των δυναμικών των μετατροπών ισχύος με αυτές των σύγχρονων μηχανών, αλλά και λόγω της σταδιακής μείωσης της συνολικής αδράνειας του συστήματος και της μειωμένης συνεισφοράς σε ρεύμα βραχυκύκλωσης από τις διατάξεις μετατροπών ισχύος [TR20]. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαπίστωσης είναι η αυξανόμενη

επίδραση στη δυναμική συμπεριφορά των ΣΗΕ από τα στοιχεία με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος (π.χ. μονάδες ΑΠΕ, HVDC, FACTS) και η εμφάνιση νέων μορφών αστάθειας σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται κατηγοριοποίηση που είχε δημοσιευτεί στην εργασία [ΚΡΑ04].

Με βάση το [TR20] η πλέον αποδεκτή κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-1:



Σχήμα 1-1 Κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ [TR20]

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι κατηγορίες ευστάθειας συντονισμού και ευστάθειας επαγόμενης από μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος εξελίσσονται πρωτογενώς στην ηλεκτρομαγνητική χρονική κλίμακα, απαιτώντας την πλήρη μοντελοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών δυναμικών, λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης των συστημάτων ελέγχου των μετατροπέων ισχύος [TR20]. Αυτό ωστόσο δεν αποκλείει την επιρροή τους στη μακροπρόθεσμη δυναμική κλίμακα του συστήματος, όπως θα δειχθεί και στην παρούσα εργασία.

Με βάση το σχήμα 1-1, η κατηγοριοποίηση ευστάθειας ΣΗΕ βασίζεται στα ακόλουθα κριτήρια και κανόνες:

- Στον φυσικό τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η επικείμενη αστάθεια
- Στο μέγεθος της θεωρούμενης διαταραχής, που επηρεάζει τη μέθοδο πρόβλεψης της αστάθειας και μελέτης της δυναμικής συμπεριφοράς του ΣΗΕ
- Στις διατάξεις, τις διαδικασίες και τη χρονική κλίμακα που εστιάζεται το ενδιαφέρον της ανάλυσης

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται περιληπτικά τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της κάθε υποκατηγορίας ευστάθειας ΣΗΕ.

1.3.3 Ευστάθεια γωνίας

Η ευστάθεια γωνίας αναφέρεται στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών ενός διασυνδεδεμένου ΣΗΕ να παραμείνουν σε συγχρονισμό μετά από μία διαταραχή. Η συγκεκριμένη κατηγορία ευστάθειας εστιάζει κυρίως στην ικανότητα των σύγχρονων μηχανών να διατηρούν την ισορροπία μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της μηχανικής ροπής που εφαρμόζονται στον άξονά τους. Η αστάθεια γωνίας εμφανίζεται όταν παρατηρείται διακύμανση στην γωνία δρομέα μίας ή περισσότερων σύγχρονων μηχανών με το υπόλοιπο ΣΗΕ. Η διακύμανση αυτή μπορεί να εμφανίσει είτε ταλαντωτική συμπεριφορά με αυξανόμενο πλάτος είτε μονότονη συμπεριφορά.

Για την πιο συστηματική ανάλυση του φαινομένου και την καλύτερη κατανόηση της εσωτερικής φύσεως των προβλημάτων της αστάθειας γωνίας, γίνεται περαιτέρω κατηγοριοποίηση σε ευστάθεια γωνίας *μικρού σήματος* (ή *ευστάθεια μονίμου καταστάσεως*) και σε ευστάθεια γωνίας *μεγάλων διαταραχών* ή *μεταβατική ευστάθεια*.

Και οι δύο υποκατηγορίες ευστάθειας γωνίας αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η ενεργός ισχύς των σύγχρονων γεννητριών καθώς αλλάζει η γωνία δρομέα τους, τα χαρακτηριστικά όμως των δύο

προβλημάτων είναι διαφορετικά, καθώς το πρώτο αφορά σε μικρές συνήθως διαταραχές που μεταβάλουν τις γωνίες δρομέα, ενώ το δεύτερο σε διαταραχές σημαντικά πιο ισχυρές όπως αποτελούν τα βραχυκυκλώματα.

Και στις δύο υποκατηγορίες όμως η αστάθεια προκαλείται από τον ίδιο φυσικό μηχανισμό που αποτελεί την αδυναμία του συστήματος να απορροφήσει τις μεταβολές στην κινητική ενέργεια των αξόνων των σύγχρονων γεννητριών, οι οποίες έχουν προκληθεί από ανισορροπίες στα ζεύγη ηλεκτρομαγνητικής και μηχανικής ροπής του άξονά τους επιφέροντας έτσι μεταβολές στη γωνία του δρομέα τους.

Στην περίπτωση της ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών επιτρέπεται να γίνει ανάλυση με γραμμικοποίηση του μοντέλου, καθώς η εξεταζόμενη διαταραχή δεν απομακρύνει πολύ την τροχιά του συστήματος από το σημείο λειτουργίας προ διαταραχής. Η αστάθεια μπορεί να εμφανιστεί είτε ως μονότονη απεριοδική αύξηση της γωνίας δρομέα όταν δεν υπάρχει επαρκής ροπή συγχρονισμού, είτε με τη μορφή ταλαντωτικής συμπεριφοράς αυξανόμενου πλάτους όταν υπάρχει έλλειψη επαρκούς ροπής απόσβεσης. Το χρονικό παράθυρο ανάλυσης της ευστάθειας γωνίας μικρών διαταραχών είναι της τάξης των 10 δευτερολέπτων.

Η μεταβατική ευστάθεια περιγράφει την ικανότητα του συστήματος να διατηρήσει τις διασυνδεδεμένες σύγχρονες μηχανές σε συγχρονισμό μετά την επιβολή μίας σοβαρής διαταραχής όπως π.χ. ένα βραχυκύκλωμα. Η απόκριση του δικτύου σε τέτοιου είδους μεγάλες διαταραχές διακρίνεται από επίσης μεγάλες μεταβολές των γωνιών και των τάσεων με αποτέλεσμα η τροχιά του συστήματος να απομακρύνεται σημαντικά από το σημείο λειτουργίας προ της διαταραχής και να απαιτείται η χρήση μη-γραμμικών μοντέλων για τις ανάγκες της ανάλυσης. Η μεταβατική ευστάθεια εξαρτάται τόσο από το αρχικό σημείο λειτουργίας όσο και από την επιβαλλόμενη διαταραχή. Το σύστημα δεν χαρακτηρίζεται μεταβατικά ασταθές σε ένα σημείο λειτουργίας, παρά μόνο για μία συγκεκριμένη διαταραχή και η αστάθεια εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή απεριοδικής απομάκρυνσης των γωνιών λόγω ανεπαρκούς ροπής συγχρονισμού, αλλά σε μεγάλα ΣΗΕ μπορεί να εμφανιστεί και ως αποτέλεσμα επαλληλίας μίας αργής ταλάντωσης διασύνδεσης και μίας τοπικής ταλάντωσης, η οποία προκαλεί μία μεγάλη μεταβολή της γωνίας δρομέα μετά την πρώτη ταλάντωση [Kun94].

Η ευστάθεια γωνίας επηρεάζεται σταδιακά από την ένταξη στοιχείων με μετατροπείς ισχύος είτε από τις στρατηγικές ελέγχου τους, είτε έμμεσα από τις επιπτώσεις που αυτές έχουν στο σύστημα (π.χ. σταδιακή απόσυρση σύγχρονων μηχανών). Πιο συγκεκριμένα, οι αλλαγές στις ροές ισχύος βασικών διαδρόμων ενέργειας, αλλά και η απόσυρση σύγχρονων μηχανών με σημαντική αδράνεια και σταθεροποιητές ισχύος επιδρούν στα χαρακτηριστικά των ρυθμών ταλάντωσης στο σύστημα (συχνότητα, απόσβεση κλπ.). Το γεγονός αυτό όμως δεν αντιτίθεται στη δυνατότητα αξιοποίησης των πηγών με μετατροπείς ισχύος προς όφελος τόσο της ευστάθειας μικρού σήματος όσο και της μεταβατικής ευστάθειας, πράγμα που αντικατοπτρίζεται στο μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον που βρίσκεται υπό εξέλιξη [TR20].

Η χρονική κλίμακα ανάλυσης προβλημάτων μεταβατική ευστάθειας είναι συνήθως της τάξης των 5 δευτερολέπτων, ωστόσο σε περιπτώσεις μεγάλων ΣΗΕ το διάστημα αυτό μπορεί να επεκταθεί σε λίγες δεκάδες δευτερόλεπτα λόγω της εμφάνισης των διασυνδεδετικών ταλαντώσεων.

1.3.4 Ευστάθεια συχνότητας

Η ευστάθεια συχνότητας εστιάζει στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρήσει τη συχνότητά του εντός προκαθορισμένων αυστηρών ορίων μετά την επιβολή μίας σοβαρής διαταραχής που επιφέρει ανισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Οι συνέπειες της απώλειας ευστάθειας συχνότητας εμφανίζονται με τη μορφή ταλαντώσεων στη συχνότητα, οι οποίες μπορεί να διεγείρουν περαιτέρω διατάξεις προστασίας, όπως ηλεκτρονόμους υποσυχνότητας, που με τη σειρά τους μπορούν να θέσουν εκτός λειτουργίας μονάδες παραγωγής ή περιοχές κατανάλωσης.

Όταν εμφανίζεται αστάθεια συχνότητας σε ένα ΣΗΕ, τότε αυτή αντικατοπτρίζεται σε διάφορα θεμελιώδη μεγέθη, όπως στις ροές ισχύος και στις τάσεις του συστήματος. Κατά την εκδήλωση αυτών των φαινομένων ενεργοποιούνται συνήθως διατάξεις που δεν ενεργοποιούνται στις υπόλοιπες κατηγορίες προβλημάτων ευστάθειας ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα οι λέβητες των μονάδων ή οι ηλεκτρονόμοι υποσυχνότητας.

Η ευστάθεια συχνότητας αποτελεί μείζον θέμα σε απομονωμένα ΣΗΕ στα οποία η στρεφόμενη εφεδρεία είναι συνήθως μικρή. Σε αυτά τα συστήματα η απώλεια μίας μονάδας παραγωγής ή ενός υποσταθμού μπορεί να προκαλέσει σημαντική ανισοκατανομή στο ισοζύγιο παραγωγής-κατανάλωσης και κατά συνέπεια να

προκληθούν σημαντικές διακυμάνσεις στη συχνότητα του συστήματος. Στα μεγάλα και διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, προβλήματα ευστάθειας συχνότητας προκύπτουν συνήθως μετά από μερικές νησιδοποιήσεις του συστήματος λόγω δράσης κάποιου εξοπλισμού προστασίας. Τα επιμέρους υποσυστήματα (νησίδες) που δημιουργούνται κατόπιν της νησιδοποίησης συνήθως έχουν σημαντική διαφορά μεταξύ τοπικής παραγωγής και τοπικής κατανάλωσης με αποτέλεσμα οι συχνότητές τους να μεταβάλλονται.

Κατά την εκδήλωση φαινομένων αστάθειας συχνότητας εμπλέκονται δυναμικές από διατάξεις που ανήκουν σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, όπως για παράδειγμα αυτές των ηλεκτρονόμων προστασίας (κλίμακα μερικών δευτερολέπτων) ή των ατμοπαραγωγών (μερικά λεπτά). Για τον λόγο αυτό η ευστάθεια συχνότητας χαρακτηρίζεται είτε ως βραχυπρόθεσμο φαινόμενο είτε ως μακροπρόθεσμο. Παράδειγμα βραχυπρόθεσμης αστάθειας συχνότητας αποτελεί η περίπτωση σχηματισμού μίας νησίδας ΣΗΕ μετά από τη δράση κάποιου ηλεκτρονόμου υποσυχνότητας, στην οποία υπάρχει έλλειψη παραγωγής και ανεπαρκές σχήμα αποκοπής φορτίου με αποτέλεσμα η νησίδα να καταρρέει εντός λίγων δευτερολέπτων. Από την άλλη μεριά, περιπτώσεις όπου η αστάθεια συχνότητας προκαλείται από διατάξεις ελέγχου υπερτάχυνσης στροβίλων ή προστασίας ατμοπαραγωγών ανήκουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα [Kun81].

Η επίδραση της σταδιακής αύξησης διείσδυσης πηγών με μετατροπείς ισχύος έχει προφανή επίδραση στην ευστάθεια συχνότητας, εξαιτίας της μειωμένης συνολικής αδράνειας του συστήματος. Ωστόσο, οι δυνατότητες ελέγχου των πηγών με μετατροπείς ισχύος είναι ισάξιες αν όχι καλύτερες από αυτές των σύγχρονων μηχανών αναφορικά με την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, αρκεί να δοθούν κίνητρα για την άρση της λειτουργίας τους στο σημείο μέγιστης αξιοποίησης της πρωτογενούς πηγής ενέργειας [TR20].

1.3.5 Ευστάθεια τάσης

Η ευστάθεια τάσης είναι η κατηγορία ευστάθειας ΣΗΕ με την οποία ασχολείται η παρούσα εργασία. Στην παρούσα ενότητα γίνεται μία εκτενέστερη ανάλυση των κυριότερων χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης υποκατηγορίας ευστάθειας ΣΗΕ.

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρήσει όλες τις τάσεις των ζυγών του σε τιμές πλησίον της ονομαστικής μετά την επιβολή διαταραχών. Η διατήρηση των τάσεων του συστήματος εντός προκαθορισμένων ορίων ασφαλείας συνεπάγεται ότι το σύστημα μπορεί να αποκαταστήσει την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής. Κατά την εκδήλωση αστάθειας τάσης, η ικανότητα του συστήματος να εξυπηρετήσει τη ζήτηση του φορτίου διαταράσσεται, και συγκεκριμένα η αστάθεια προέρχεται κυρίως από την απόπειρα του φορτίου να αυξήσει την κατανάλωσή του πέρα από τη φυσική ικανότητα μεταφοράς του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς [VCV08].

Η αστάθεια τάσης εκδηλώνεται αρχικά, μέσω βαθμιαίας και μονότονης πτώσης των τάσεων του συστήματος στην προβληματική περιοχή κατανάλωσης. Συνήθη ακόλουθα αποτελέσματα των φαινομένων αστάθειας τάσης είναι η αποσύνδεση γραμμών μεταφοράς λόγω υπερφόρτισης ή υπότασης, με συνέπεια την εμφάνιση διαδοχικών αποσυνδέσεων εξοπλισμού ισχύος που μπορεί να οδηγήσει σε μερική ή και ολική σβέση του συστήματος.

Ο βασικός μηχανισμός που προκαλεί την αστάθεια τάσης υποκινείται συνήθως από τα φορτία τα οποία τείνουν δυναμικά να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ τους. Παραδείγματα φορτίων με δυναμική αποκατάστασης της ισχύος είναι οι κινητήρες επαγωγής, οι οποίοι μεταβάλλουν την ολίσθησή τους ή τα θερμοστατικά φορτία που αυξάνουν την αγωγιμότητά τους βάσει του ελεγκτή θερμοκρασίας τους. Έμμεσοι μηχανισμοί που αποκαθιστούν την κατανάλωση των φορτίων, και κατ'επέκταση συμβάλλουν στην εκδήλωση φαινομένων αστάθειας τάσης, είναι οι ρυθμιστές τάσης των γεννητριών καθώς και τα ΣΑΤΥΦ με τα οποία είναι εξοπλισμένοι οι περισσότεροι μετασχηματιστές στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί, ότι η ολοένα και αυξανόμενη παρουσία διεσπαρμένης παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης επηρεάζει σημαντικά τη φαινόμενη στο επίπεδο της μεταφοράς δυναμική των φορτίων, γεγονός που συγκεντρώνει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια [TR20].

Οι παραπάνω μηχανισμοί αστάθειας ενισχύουν έναν βασικό παράγοντα της αστάθειας τάσης που αποτελεί το πρόβλημα των απωλειών κατά τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε ένα, κατά βάση, επαγωγικής φύσεως σύστημα μεταφοράς. Τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι γνωστό ότι εμφανίζουν πεπερασμένη ικανότητα μεταφοράς ισχύος και η κατάσταση δυσχεραίνεται ιδιαίτερα όταν σε καταστάσεις υψηλών επιπέδων φόρτισης του συστήματος πολλές σύγχρονες μηχανές λειτουργούν υπό περιορισμένο ρεύμα

διέγερσης λόγω υπερθέρμανσης του δρομέα τους. Η ενεργοποίησης του Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης συνεπάγεται την αδυναμία των μονάδων να ελέγξουν την θερμοκρασία τους τάση με αποτέλεσμα να καθίσταται πολύ δυσκολότερη η δυνατότητα στήριξης των τάσεων του δικτύου σε επίπεδα πλησίον της ονομαστικής τιμής. Το γεγονός αυτό αυξάνει περαιτέρω τις ενεργές και άεργες απώλειες του δικτύου και μειώνει περαιτέρω τη δυνατότητα παροχής αέργου ισχύος από διατάξεις αντιστάθμισης.

Για την αποτελεσματικότερη ανάλυσή της, η ευστάθεια τάσης χωρίζεται περαιτέρω σε υποκατηγορίες, εν προκειμένω στην ευστάθεια τάσης μικρών και μεγάλων διαταραχών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1, η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται σε φαινόμενα τα οποία εξελίσσονται τόσο στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (μερικά δευτερόλεπτα) όσο και στη μακροπρόθεσμη (έως και μερικές δεκάδες λεπτών). Η ευστάθεια τάσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί είτε με βάση τις χρονικές κλίμακες εξέλιξής της είτε με βάση το μέγεθος των εξεταζόμενων διαταραχών.

1.3.5.1 Ευστάθεια Τάσης Μεγάλων Διαταραχών

Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών εξετάζει την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τις τάσεις σε επιθυμητά επίπεδα μετά από επιβολή μεγάλης διαταραχής, όπως π.χ. η απώλεια μίας μεγάλης μονάδας παραγωγής, ή μίας διασύνδεσης που μεταφέρει σημαντικό ποσό ισχύος. Λόγω του μεγέθους της διαταραχής, η απομάκρυνση του συστήματος από το αρχικό σημείο ισορροπίας είναι συνήθως μεγάλη. Το γεγονός αυτό, όπως και στην περίπτωση της μεταβατικής ευστάθειας, απαιτεί την εξέταση της μη-γραμμικής δυναμικής του συστήματος στο πεδίο του χρόνου, προκειμένου να διαπιστωθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των διατάξεων του δικτύου όπως π.χ. γεννήτριες, φορτία, ΣΑΤΥΦ, στοιχεία αντιστάθμισης και των διαφορών συστημάτων ελέγχου αυτών.

1.3.5.2 Ευστάθεια Τάσης Μικρών Διαταραχών

Η ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών είναι συμπληρωματική της μη γραμμικής ανάλυσης και εξετάζει την ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί τις τάσεις του δικτύου εντός των επιθυμητών τιμών λειτουργίας στην περίπτωση που το σύστημα υποβάλλεται σε μικρές διαδοχικές μεταβολές λόγω επιβολής διαταραχών μικρής κλίμακας, όπως π.χ. η αύξηση της ζήτησης των φορτίων ή αλλαγές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ. Σε αυτού του είδους την ανάλυση είναι αποδεκτή η γραμμικοποίηση του μοντέλου του συστήματος γύρω από το σημείο λειτουργίας στο οποίο επιβάλλεται η εκάστοτε διαταραχή δίνοντας πληροφορίες σχετικά με την ευστάθεια του συστήματος γύρω από αυτό. Επίσης με την ανάλυση ευαισθησίας γίνεται εκτίμηση της μεταβολής των τάσεων για μικρές μεταβολές παραμέτρων ή εισόδων του συστήματος. Σημειώνεται ότι η γραμμικοποίηση δεν λαμβάνει υπόψη σημαντικά μη-γραμμικά φαινόμενα διατάξεων ενός ΣΗΕ όπως είναι οι νεκρές ζώνες των ΣΑΤΥΦ ή τα διακριτά βήματα λήψεων των ΣΑΤΥΦ.

Ως προς τη χρονική κλίμακα ανάλυσης του φαινομένου, η ευστάθεια τάσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη.

1.3.5.3 Βραχυπρόθεσμη Ευστάθεια Τάσης

Η ευστάθεια τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα συνήθως εξετάζει μετά από μεγάλες διαταραχές (π.χ. βραχυκύκλωμα) την επίδραση γρήγορων δυναμικών μηχανισμών αποκατάστασης της κατανάλωσης των φορτίων, όπως για παράδειγμα είναι οι κινητήρες επαγωγής, διατάξεις HVDC ή ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία. Η ανάλυση αυτών των βραχυπρόθεσμων φαινομένων γίνεται με προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου του πλήρους μη-γραμμικού μοντέλου ΣΗΕ σε μόνιμη ημιτονοειδή κατάσταση, προκειμένου να μπορέσουν να εντοπιστούν οι επιδράσεις αυτών των μηχανισμών στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης. Οι κύριοι μηχανισμοί με τους οποίους ένα ΣΗΕ μπορεί να οδηγηθεί σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι οι εξής [VCV08]:

- Απώλεια σημείου ισορροπίας βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων
- Έλλειψη επαρκούς έλξης προς το νέο (μετά τη διαταραχή) ευσταθές σημείο ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων φαινομένων
- Ταλαντωτική αστάθεια γύρω από το νέο σημείο ισορροπίας

Ένα τυπικό παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης αποτελεί η οριστική επιβράδυνση και ακινητοποίηση κινητήρων επαγωγής (stalling) μετά από μια διαταραχή, εξαιτίας έλλειψης σημείου τομής μεταξύ της

χαρακτηριστικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής-γωνιακής ταχύτητας του κινητήρα επαγωγής και μηχανικής ροπής-ταχύτητας του μηχανικού φορτίου. Η συμπερίληψη στοιχείων που συνδέονται στο δίκτυο μέσω διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάλυση φαινομένων βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, καθώς η συμπεριφορά τους κατά τη διάρκεια διαταραχών (π.χ. βραχυκύκλωμα) αλλά και η διαδικασία της επαναφοράς τους στο αρχικό, ή πλησίον του αρχικού σημείου λειτουργίας μετά το πέρας της διαταραχής είναι καθοριστικής σημασίας [TR20].

1.3.5.4 Μακροπρόθεσμη Ευστάθεια Τάσης

Η αστάθεια τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα αποτελεί και τη βασική κατηγορία ευστάθειας με την οποία ασχολείται η παρούσα ερευνητική εργασία. Η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης αναλύει προβλήματα αστάθειας που δημιουργούνται από πιο αργούς μηχανισμούς, όπως τα ΣΑΤΥΦ, τα αυτοεπαναφερόμενα θερμοστατικά φορτία, τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων μηχανών κλπ. Η ανάλυση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης πραγματοποιείται συνήθως με προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου κάνοντας χρήση του μη-γραμμικού δυναμικού μοντέλου ΣΗΕ και εξετάζουν την απόκριση του συστήματος για χρονικό διάστημα αρκετών λεπτών.

Η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης εμφανίζεται συνήθως είτε μετά από την επιβολή διαταραχής είτε μετά από προγραμματιζόμενη συνεχή αύξηση φορτίου (π.χ. πρωινή ράμπα). Στην αρχική φάση του φαινομένου το σύστημα συνήθως επιτυγχάνει διαδοχικά βραχυπρόθεσμα σημεία ισορροπίας χωρίς να εμφανίζονται αξιοσημείωτες διακυμάνσεις στη συχνότητα του συστήματος ή σημαντικές ταλαντώσεις ισχύος. Στη συνέχεια, επειδή οι μακροπρόθεσμοι μηχανισμοί δεν έχουν ακόμη φτάσει σε ισορροπία συνεχίζουν να εξελίσσονται σε χρονικό βάθος αρκετών λεπτών, οδηγώντας το σύστημα σε μία τροχιά που μεταβαίνει από διαδοχικά ευσταθή βραχυπρόθεσμα σημεία ισορροπίας, τα οποία όμως σταδιακά καθίστανται όλο και λιγότερο ευσταθή. Υποθέτοντας, σε αντιστοιχία με τα στοιχεία που αναφέρθηκαν προηγουμένως, ότι τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα είναι ευσταθή υπάρχουν τρεις μηχανισμοί που προξενούν μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [VCV08]:

- Απώλεια σημείου λειτουργίας μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων
- Έλλειψη επαρκούς έλξης προς το νέο ευσταθές σημείο λειτουργίας των μακροπρόθεσμων φαινομένων
- Αργή ταλαντωτική συμπεριφορά στις τάσεις του δικτύου αυξανόμενου πλάτους

Η πρώτη περίπτωση είναι και η πιο συνηθισμένη και αναφέρεται π.χ. στην περίπτωση όπου τα φορτία του συστήματος, είτε με εγγενείς δυναμικούς μηχανισμούς, είτε μέσω της δράσης του μηχανισμού των ΣΑΤΥΦ, προσπαθούν να αποκαταστήσουν την κατανάλωσή τους στα προ της διαταραχής επίπεδα, τα οποία είναι πέρα από το φυσικό όριο μεταφοράς ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της δεύτερης κατηγορίας μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης αποτελεί η περίπτωση του παραπάνω σεναρίου αποκατάστασης της κατανάλωσης των φορτίων, στο οποίο όμως εφαρμόζονται διορθωτικά μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας (π.χ. αντιστάθμιση, αποκοπή φορτίου), τα οποία όμως θα έπρεπε να έχουν εφαρμοστεί νωρίτερα, καθώς αποκαθιστούν μεν ένα μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας πλην όμως με καθυστέρηση τέτοια ώστε το σύστημα να μην μπορεί πλέον να κατευθυνθεί προς αυτό.

Η τρίτη περίπτωση αν και δεν έχει εμφανιστεί σε πρακτικά ΣΗΕ, εντούτοις θα μπορούσε να εμφανιστεί θεωρητικά εάν υπάρξει κακός συντονισμός σε μηχανισμούς ΣΑΤΥΦ μετασχηματιστών διαφορετικών επιπέδων τάσης όπως π.χ. ΥΥΤ/ΥΤ και ΥΤ/ΜΤ.

Για πολλά χρόνια υπήρχε η αντίληψη ότι η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι ένα πρόβλημα στατικής φύσεως και συνεπώς μπορεί να αναλυθεί κατάλληλα με χρήση αμιγώς στατικών μοντέλων. Η αρχική αυτή θεώρηση είχε εδραιωθεί λόγω κυρίως της χρήσης στατικών εργαλείων ανάλυσης του φαινομένου (όπως π.χ. προσαρμοσμένα προγράμματα ροής φορτίου) που επιτρέπουν την εξαγωγή απλούστερων και ταχύτερων αποτελεσμάτων. Σταδιακά όμως, και με την ανάλυση μιας σειράς από πραγματικά περιστατικά σβέσεων συστημάτων, έγινε ευρέως αποδεκτό ότι η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι ένα πρόβλημα που εμφανίζει δυναμική και συνεπώς τα φαινόμενα που παρουσιάζονται δεν μπορούν να εντοπιστούν αποτελεσματικά εάν δεν διεξαχθεί δυναμική ανάλυση. Αξίζει να αναφερθεί ωστόσο, ότι πολλές ερευνητικές προσπάθειες συνεχίζουν να χρησιμοποιούν στατικά μοντέλα συστήματος ιδιαίτερα όταν απαιτείται να εκτιμηθούν προσεγγιστικά τα περιθώρια ευστάθειας ή όταν είναι κρίσιμη η εξαγωγή

προσεγγιστικών αποτελεσμάτων σε εξαιρετικά σύντομο χρονικό διάστημα (π.χ. σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της στατικής ανάλυσης σε ταχύτητα και υπολογιστικό κόστος, αμελούνται σημαντικές συνιστώσες του συστήματος (π.χ. ΣΑΤΥΦ, κορεσμός σύγχρονων γεννητριών, συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης γεννητριών, χρονικές καθυστερήσεις συστημάτων προστασίας) η επίδραση των οποίων είναι καθοριστικής σημασίας στην ανάλυση μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης αλλά και στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσης του συστήματος. Ως εκ τούτου, η ανάγκη για συγκερασμό της ακρίβειας προσομοιώσεων του συστήματος στο πεδίο του χρόνου με τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου οδήγησε στην ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης με Οιονεί Στατικές Μεταβολές [VCV08]. Πολύ συχνά επίσης γίνεται χρήση εργαλείων γραμμικής και μη γραμμικής ανάλυσης, προκειμένου να επιτευχθεί διευρυμένη παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος. Συγκεκριμένα, υπολογίζοντας την Ιακωβιανή μήτρα του τρέχοντος σημείου λειτουργίας μπορεί να αναλυθεί η ευστάθεια του σημείου λειτουργίας, ενώ το περιθώριο ευστάθειας τάσης μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά κάνοντας χρήση του μη γραμμικού μοντέλου του συστήματος εφαρμόζοντας ένα σχήμα παραγωγής και υποθέτοντας συγκεκριμένη κατεύθυνση αύξησης της ζήτησης του συστήματος [TR20].

Με βάση τις χρονικές κλίμακες στις οποίες μπορεί να εμφανιστεί η αστάθεια τάσης, η εξέλιξή της μπορεί να διαρκέσει από μερικά μόνο δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδες λεπτών. Κάποιες από τις πιθανές καταλήξεις του φαινομένου, όπως έχει εμφανιστεί και στην πράξη σε πολλά blackout είναι οι εξής:

- Μια μη ομαλή κατάσταση λειτουργίας στην οποία οι τάσεις είναι χαμηλές (της τάξης του 0.8 αμ). Τέτοιες καταστάσεις μπορούν να εμφανιστούν όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια τάσης φτάνουν σε όρια λειτουργίας και παύουν να δυσχεραίνουν περαιτέρω την κατάσταση του συστήματος. Τυπική περίπτωση αποτελεί αυτή των ΣΑΤΥΦ, τα οποία οδηγούμενα προς την κατεύθυνση μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού τους με σκοπό την ανύψωση της ελεγχόμενης τάσης φτάνουν στα λειτουργικά τους όρια μην μπορώντας να κινηθούν περαιτέρω προς την κατεύθυνση που κινούνταν. Μία τέτοια κατάληξη χαρακτηρίζεται στη βιβλιογραφία ως *μερική κατάρρευση τάσης* [CIG93], [Tay94]. Η συγκεκριμένη κατάσταση ψευδοϊσορροπίας δεν συνεπάγεται απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας διότι οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές συνεχίζουν να είναι ευσταθείς, ενώ οι μακροπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος σταματούν να εξελίσσονται λόγω λειτουργικών ορίων αλλά έχουν οδηγήσει το σύστημα σε ασταθή λειτουργία. Συνεπώς, παρότι δεν επιτυγχάνεται μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, το σύστημα ισορροπεί σε μία οριακή αλλά ασταθή κατ'ουσίαν κατάσταση, η οποία χρήζει περαιτέρω μέτρων αντιμετώπισης προκειμένου να μπορέσει να ευσταθειοποιηθεί.
- Μία ξαφνική επιτάχυνση του φαινομένου κατά το οποίο, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές καθίστανται ασταθείς, προξενούν μία ακαριαία μεταβολή στις μακροπρόθεσμες δυναμικές υπό τη μορφή πολύ απότομης μείωσης των τάσεων. Η κατάληξη αυτή ονομάζεται *κατάρρευση τάσης* [Vou94] και το σύστημα οδηγείται είτε σε μερική σβέση στην προβληματική (ευάλωτη) περιοχή είτε σε ολική.

Κοντά στο σημείο της κατάρρευσης η μεταβολή της τιμής των τάσεων του συστήματος γίνεται ολοένα και πιο απότομη προτού καταλήξει σε μία κατακόρυφη πτώση τη στιγμή της κατάρρευσης. Στο σημείο κατάρρευσης εμφανίζεται μία ασυνέχεια στη λειτουργία του συστήματος, η οποία οφείλεται στην ίδια τη δυναμική του και όχι σε εξωτερικά αίτια όπως π.χ. διαταραχές. Συνοπτικά η έννοια της κατάρρευσης περιγράφεται στο [VCV08]:

Με τον όρο κατάρρευση χαρακτηρίζεται η πρακτικά ακαριαία και καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος η οποία οφείλεται στη συνεχή δυναμική του.

Η πρακτικά ακαριαία μετάβαση προϋποθέτει και τον απειρισμό των παραγώγων του συστήματος. Συνεπώς, η κατάρρευση τάσης ενός ΣΗΕ μπορεί να ερμηνευθεί ως μία αστάθεια που προκαλείται σε χρονική κλίμακα ταχύτερη από αυτήν που διενεργείται η ανάλυση. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 1.2.5, οι βραχυπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης του συστήματος καθίστανται ασταθείς λόγω των συνεχών μεταβολών των μακροπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης. Η ξαφνική αστάθεια των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών επιφέρει τον απειρισμό των παραγώγων των μακροπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης, ο οποίος με τη σειρά του επιφέρει την πρακτικά ακαριαία μεταβολή τους.

1.3.5.5 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Υπερτάσεων

Παρά το γεγονός ότι τα φαινόμενα αστάθειας τάσης εμφανίζονται κυρίως υπό τη μορφή εμφάνισης υποτάσεων στο σύστημα, έχουν παρατηρηθεί περιπτώσεις εμφάνισης ανεξέλεγκτων υπερτάσεων στο σύστημα [TR20]. Τα φαινόμενα αυτά προξενούνται από τη χωρητικής φύσεως συμπεριφορά του συστήματος μεταφοράς, η οποία εμφανίζεται σε καταστάσεις πολύ χαμηλής φόρτισης, κατά τις οποίες οι γραμμές μεταφοράς φορτίζονται σε επίπεδα μικρότερα από τη φυσική τους φόρτιση. Η κατάσταση δυσχεραίνεται περισσότερο στην περίπτωση ύπαρξης πυκνωτών αντιστάθμισης, αλλά και όταν οι μονάδες παραγωγής αδυνατούν να απορροφήσουν περαιτέρω ποσά αέργου ισχύος λόγω κινδύνου ενεργοποίησης των προστασιών υποδιέγερσης. Στην προκειμένη περίπτωση, η αστάθεια τάσης χαρακτηρίζεται από την αδυναμία του συστήματος να λειτουργήσει για επίπεδα φόρτισης μικρότερα ενός κατώτερου ορίου.

1.3.6 Ευστάθεια Συντονισμού [TR20]

Το συγκεκριμένο είδος ευστάθειας σχετίζεται τόσο με τις σύγχρονες μηχανές, όσο και με τις ασύγχρονες γεννήτριες διπλής τροφοδότησης και παρουσιάζεται λόγω συντονισμού των μηχανικών μερών του στροβίλου των σύγχρονων μηχανών με τις εν σειρά χωρητικότητες στις γραμμές μεταφοράς λόγω εφαρμογής αντιστάθμισης σειράς. Παρόμοιας μορφής συντονισμός εμφανίζεται μεταξύ της φαινόμενης στο σύστημα μεταφοράς αυτεπαγωγής της μηχανής επαγωγής με τη χωρητικότητα από την αντιστάθμιση σειράς στις γραμμές μεταφοράς. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία [TR20]

1.3.7 Ευστάθεια επαγόμενη από μετατροπείς ισχύος [TR20]

Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάζεται γύρω από τις μορφές αστάθειας οι οποίες επάγονται από τη λειτουργία των στοιχείων με μετατροπείς ισχύος. Το μεγάλο εύρος ζώνης των συστημάτων ελέγχου των διατάξεων με μετατροπείς ισχύος συνεπάγεται και τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τις ηλεκτρομηχανικές και ηλεκτρομαγνητικές δυναμικές του συστήματος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή ταλαντωτική συμπεριφορά στο σύστημα για ένα αρκετά εκτενές εύρος συχνοτήτων [TR20]. Ως εκ τούτου, η αλληλεπίδραση διαχωρίζεται σε γρήγορης και αργής κλίμακας στο σχήμα 1.1. Φαινόμενα αστάθειας επαγόμενης από μετατροπείς ισχύος με δυναμική στο εύρος των 10Hz συγκαταλέγονται στις αργές αλληλεπιδράσεις, ενώ φαινόμενα αστάθειας υψηλότερων συχνοτήτων (δεκάδων Hz έως και kHz) συγκαταλέγονται στις γρήγορες αλληλεπιδράσεις.

1.3.7.1 Γρήγορης αλληλεπίδρασης αστάθεια επαγόμενη από μετατροπείς ισχύος

Η συγκεκριμένη μορφή αστάθειας συναντάται και με τον όρο *αρμονική αστάθεια* και σχετίζεται με την αλληλεπίδραση που εμφανίζεται μεταξύ υποσυστημάτων γρήγορης δυναμικής, όπως είναι τα συστήματα ελέγχου των μετατροπέων ισχύος που σχετίζονται με τον βρόχο ρευμάτων και οι ηλεκτρομαγνητικές δυναμικές του στάτη των σύγχρονων μηχανών και του ηλεκτρικού δικτύου, που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλής συχνότητας (έως αρκετά kHz) ταλαντώσεις. Αντίστοιχα φαινόμενα αστάθειας έχουν παρατηρηθεί σε περιοχές με πολλούς μετατροπείς ισχύος, με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων συντονισμού σε πολλαπλές ιδιοσυχνότητες, ενώ παρατηρούνται επίσης φαινόμενα συντονισμού των φίλτρων LCL είτε από τα συστήματα ελέγχου του μετατροπέα της ίδιας εγκατάστασης, είτε από μετατροπείς ισχύος σε μικρή ηλεκτρική απόσταση. Ωστόσο, τα φαινόμενα αυτά μπορούν να εξαλειφθούν με κατάλληλη παραμετροποίηση των συστημάτων ελέγχου των μετατροπέων ισχύος, προς την κατεύθυνση μείωσης του εύρους ζώνης αυτών.

1.3.7.2 Αργής αλληλεπίδρασης αστάθεια επαγόμενη από μετατροπείς ισχύος

Τα φαινόμενα αστάθειας αυτής της κατηγορίας διεγείρονται από αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστημάτων ελέγχου μετατροπέων ισχύος και των ηλεκτρομηχανικών ή και μακροπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος, και συνεπώς χαρακτηρίζονται ως αργής αλληλεπίδρασης εν συγκρίσει με την κατηγορία των γρήγορων αλληλεπιδράσεων που εντάσσεται στην ηλεκτρομαγνητική χρονική κλίμακα.

Η περίπτωση ασθενούς δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση ταλαντώσεων πολύ χαμηλής απόσβεσης λόγω π.χ. ασταθούς λειτουργίας των διατάξεων PLL (Phase-Locked Loop). Η ένταση του φαινομένου επηρεάζεται από την παραμετροποίηση των συστημάτων ελέγχου και ειδικά του συστήματος PLL. Ιδιαίτερες δυσκολίες στον συγχρονισμό του PLL με το δίκτυο εμφανίζονται επίσης στην περίπτωση εκδήλωσης βραχυκυκλωμάτων σε ασθενή δίκτυα.

Τέλος, η εμφάνιση αδυναμίας μεταφοράς ισχύος από μονάδες παραγωγής με διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος σε ασθενή δίκτυα μπορεί επίσης να οδηγήσει το σύστημα σε αστάθεια. Το γεγονός αυτό είναι πιο πιθανό να παρατηρηθεί σε περιοχές που εγκαθίστανται μονάδες παραγωγής με μετατροπείς ισχύος, όταν αυτές εγκαθίστανται σε απομακρυσμένες και συνήθως ασθενείς περιοχές του δικτύου, ιδιαίτερα όταν το δίκτυο Μέσης Τάσης είναι εκτεταμένο. Η αστάθεια εμφανίζεται όταν ο μετατροπέας επιχειρεί να επιτύχει μία γωνία στην τερματική του τάση τέτοια ώστε να επιτρέψει την αποστολή της παραγόμενης ισχύος στο δίκτυο. Στην περίπτωση που η γωνία έχει υπερβεί το άνω όριο ευστάθειας, το δίκτυο αδυνατεί να την απορροφήσει, με αποτέλεσμα ο μετατροπέας να συνεχίσει να μεταβάλλει τη γωνία ανεξέλεγκτα. Αντίστοιχης μορφής αστάθεια μπορεί να εμφανιστεί στην περίπτωση που ο μετατροπέας ισχύος λειτουργεί υπό συνθήκες μέγιστου ρεύματος και η τάση του εξωτερικού δικτύου είναι επαρκώς χαμηλή ώστε περαιτέρω αύξηση της παραγόμενης ισχύος από την πηγή με μετατροπέα να μην μπορεί να αποσταλεί προς το δίκτυο. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις, για τη διατήρηση της ευστάθειας απαιτείται περικοπή της παραγόμενης από τον μετατροπέα ισχύος.

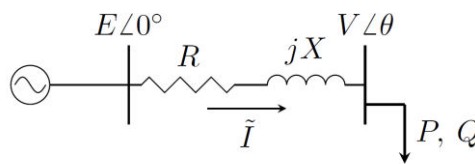
1.4 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς (όριο φόρτισης συστήματος)

1.4.1 Θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για δύο ζυγούς

Στην παρούσα ενότητα αναφέρεται το θεμελιώδες σημασία για την κατανόηση του προβλήματος της ευστάθειας τάσης θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Γίνεται η θεώρηση ενός ιδεατού συστήματος δύο ζυγών, που απεικονίζεται στο σχήμα 1-2. Το σύστημα αποτελείται από μία πηγή σταθερής τάσης μέτρου E και από ένα φορτίο το οποίο περιγράφεται με τη σύνθετη αντίσταση:

$$Z_l = R_l + jX_l \quad (1-52)$$



Σχήμα 1-2 Σύστημα άπειρου ζυγού - φορτίου

Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, η υπόθεση ότι το φορτίο αναπαρίσταται ως σύνθετη αντίσταση δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αλλά εξυπηρετεί τους υπολογισμούς.

Το ρεύμα που διέρχεται από τη γραμμή μεταφοράς είναι:

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}}{(R + R_l) + j(X + X_l)} \quad (1-53)$$

ενώ η αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο είναι:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2} \quad (1-54)$$

Στη γενική περίπτωση που οι μεταβλητές R_l και X_l είναι ελεύθερες, οι αναγκαίες συνθήκες ακρότατου της σχέσης (1-54) είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial R_l} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial X_l} &= 0 \end{aligned} \quad (1-55)$$

Από τις παραπάνω συνθήκες προκύπτει το εξής μη-γραμμικό σύστημα εξισώσεων:

$$(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2 - 2R_l(R + R_l) = 0 \quad (1-56)$$

$$2R_l(R + R_l) = 0$$

Δεδομένου ότι $R_l > 0$, προκύπτει μοναδική λύση του παραπάνω συστήματος:

$$\begin{aligned} R_l &= R \\ X_l &= -X \end{aligned} \quad (1-57)$$

η οποία ισοδύναμα μπορεί να γραφτεί και ως:

$$Z_l = Z^* \quad (1-58)$$

όπου είναι $Z = R + jX$ η σύνθετη αντίσταση της γραμμής.

Υπολογίζοντας τη δεύτερη παράγωγο της σχέσης (1-54) αποδεικνύεται ότι το παραπάνω ακρότατο αντιστοιχεί σε μέγιστο, κάτι που συνεπάγεται ότι η ισχύς του φορτίου μεγιστοποιείται στο σημείο λειτουργίας όπου η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γίνεται ίση με τη συζυγή τιμή της σύνθετης αντίστασης του δικτύου [VCV98]. Η σχέση (1-58) περιγράφει το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που μπορεί να διέλθει από μία γραμμή μεταφοράς στο σύστημα δύο ζυγών του σχήματος 1-2.

Είναι προφανές από την παραπάνω ανάλυση, ότι στο σημείο λειτουργίας μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η πηγή τάσης βλέπει ένα πλήρως ωμικό δίκτυο, διότι η χωρητική αντίδραση του φορτίου αντισταθμίζει πλήρως την επαγωγική αντίδραση του δικτύου. Με άλλα λόγια, δεν παρέχεται καθόλου άεργος ισχύς από την πηγή τάσης προς το δίκτυο και το φορτίο.

Η μέγιστη ισχύς που μεταφέρεται από το δίκτυο είναι ίση με:

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R} \quad (1-59)$$

ενώ η τάση στον ζυγό φορτίου είναι ίση με:

$$V = \frac{E}{2} \quad (1-60)$$

Στην πράξη όμως, η συνθήκη (1-58) δεν συντηρείται στα ΣΗΕ, παρά το γεγονός ότι τα χωρητικής φύσεως φορτία μπορούν να καταναλώσουν περισσότερη ενεργό ισχύ από το ίδιο σύστημα μεταφοράς, όπως θα δειχθεί στη συνέχεια. Με άλλα λόγια, τα φορτία δεν συνηθίζουν να είναι υπεραντισταθμισμένα στο επίπεδο της μεταφοράς, αν και η ένταξη διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής ενδεχομένως να αλλάξει τα δεδομένα. Σημειώνεται επίσης, ότι η ωμική αντίσταση του δικτύου R είναι πολύ μικρότερη από την επαγωγική του αντίδραση X , γεγονός που συνεπάγεται ότι η παράσταση $R_l I^2$ τείνει να απειριστεί, πράγμα μη ρεαλιστικό [VCV08].

Για τους παραπάνω λόγους τροποποιούνται οι υποθέσεις του θεωρήματος μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, και συγκεκριμένα θεωρείται ότι το φορτίο διατηρεί σταθερό συντελεστή ισχύος. Κατ'επέκταση, η μόνη ελεύθερη μεταβλητή ως προς την οποία βελτιστοποιείται η συνάρτηση ενεργού ισχύος P είναι η R_l .

Στην περίπτωση αυτή, η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γράφεται ως εξής:

$$Z_l = R_l(1 + j \tan \varphi) \quad (1-61)$$

όπου είναι $\varphi = \cos^{-1} \Sigma I$, η σταθερή γωνία του συντελεστή ισχύος (ΣI) του φορτίου. Με βάση την παραπάνω θεώρηση το ρεύμα προκύπτει:

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}}{(R + R_l) + j(X + R_l \tan \varphi)} \quad (1-62)$$

ενώ η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου είναι:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \varphi)^2} \quad (1-63)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η αναγκαία συνθήκη ακρότατου περιορίζεται στη σχέση:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0 \quad (1-64)$$

από την οποία προκύπτει ότι:

$$(R^2 + X^2) - R_l^2(1 + \tan^2 \varphi) = 0 \quad (1-65)$$

δηλαδή:

$$|Z_l| = |Z| \quad (1-66)$$

Η δεύτερη παράγωγος της σχέσης (1-54) ως προς την ελεύθερη μεταβλητή R_l προκύπτει πάντα αρνητική, γεγονός που συνεπάγεται ότι το ακρότατο είναι και μέγιστο. Η παραπάνω σχέση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι για το σύστημα δύο ζυγών του σχήματος 1-2, η καταναλισκόμενη ισχύς ενός φορτίου με σταθερό συντελεστή ισχύος μεγιστοποιείται όταν το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου γίνει ίσο με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του δικτύου.

Η μέγιστη ενεργός ισχύς που προκύπτει είναι [Καρ05]:

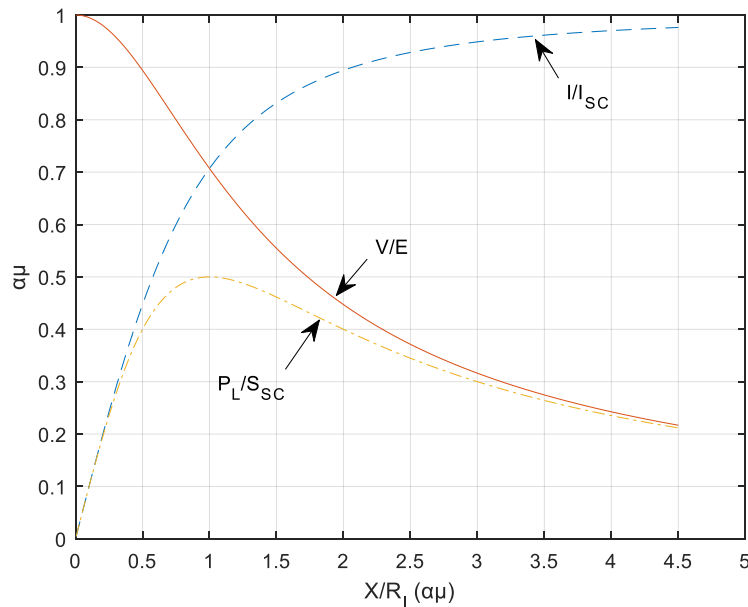
$$P_{max} = \frac{1}{2} \frac{E^2 \cos \varphi}{\sqrt{R^2 + X^2} + R \cos \varphi + X \sin \varphi} \quad (1-67)$$

Η τάση στα άκρα του φορτίου V_{maxP} στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι:

$$V_{maxP} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E}{\sqrt{1 + \frac{R \cos \varphi + X \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + X^2}}}} \quad (1-68)$$

Στο σχήμα 1-3 απεικονίζεται για την περίπτωση $R=0$ (σχήμα 1-2) η ενεργός ισχύς, το μέτρο της τάσης του ζυγού φορτίου και του ρεύματος γραμμής συναρτήσει του λόγου της επαγωγικής αντίδρασης του δικτύου X προς την ωμική αντίσταση του φορτίου R_l . Τα μεγέθη έχουν κανονικοποιηθεί ως προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc} και την ισχύ βραχυκύκλωσης S_{sc} στον ζυγό του φορτίου. Παρατηρείται ότι μεταβαίνοντας από την κατάσταση κενού φορτίου ($R_l \rightarrow \infty$) προς την κατάσταση βραχυκυκλώματος ($R_l \rightarrow 0$) η ισχύς αυξάνεται μονότονα μέχρι το σημείο όπου η τάση του φορτίου αρχίζει και μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από τον ρυθμό αύξησης του μέτρου του ρεύματος.

Αξίζει να τονιστεί το γεγονός ότι με βάση τη σχέση (1-67) η μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου δεν εξαρτάται από τη μοντελοποίηση του φορτίου (π.χ. σταθερής ισχύος, σταθερού ρεύματος κλπ.) αλλά από τα χαρακτηριστικά του δικτύου.



Σχήμα 1-3 Ενεργός Ισχύς P_L , μέτρο τάσης φορτίου V και ρεύματος I συναρτήσει R_L

1.4.2 Καμπύλες τάσης-ενεργού ισχύος

Με σκοπό την εξαγωγή γενικευμένων σχέσεων μεταξύ των μεγεθών της τάσης και της καταναλισκόμενης ενεργού και αέργου ισχύος, θεωρείται φορτίο που καταναλώνει ισχύ $S = P + jQ$. Θεωρώντας ότι $\hat{E} = E \angle 0^\circ$ και $\hat{V} = V \angle \theta$, τότε με βάση το σχήμα 1-2 προκύπτει:

$$\hat{V} = \hat{E} - (R + jX)\hat{I} \quad (1-69)$$

Η μιγαδική ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο είναι:

$$\begin{aligned} S = P + jQ &= \hat{V}\hat{I}^* = \hat{V} \frac{\hat{E}^* - \hat{V}^*}{R - jX} \\ &= V \frac{E \cos \theta + jE \sin \theta - V(R + jX)}{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (1-70)$$

Αναλύοντας τη σχέση (1-70) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος προκύπτει:

$$\begin{aligned} P &= V \frac{ER \cos \theta - EX \sin \theta - VR}{R^2 + X^2} \\ Q &= V \frac{EX \cos \theta + ER \sin \theta - VX}{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (1-71)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν τις εξισώσεις ροής φορτίου για το σύστημα δύο ζυγών του σχήματος 1-2. Θεωρώντας την ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου ως παραμέτρους, οι εξισώσεις μπορούν να επιλυθούν ως προς τις μεταβλητές V και θ . Με απαλοιφή της μεταβλητής θ από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η εξής διτετραγώνη σχέση:

$$(V^2)^2 + (2PR + 2XQ - E^2)V^2 + (P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) = 0 \quad (1-72)$$

Για την ύπαρξη τουλάχιστον μίας λύσης ως προς V^2 , θα πρέπει η διακρίνουσα της (1-72) να μην είναι αρνητική, δηλαδή:

$$(2PR + 2XQ - E^2)^2 - 4(P^2 + Q^2)(R^2 + X^2) \geq 0 \quad (1-73)$$

η οποία καταλήγει στην ακόλουθη σχέση:

$$-P^2 - R \left(\frac{E^2}{X^2} - \frac{2Q}{X} \right) P - \frac{E^2}{X} Q - \frac{R^2}{X^2} Q^2 + \left(\frac{E^2}{2X} \right)^2 \geq 0 \quad (1-74)$$

Η ισότητα της σχέσης (1-74) αντιστοιχίζεται σε παραβολή στον χώρο (επίπεδο) των φορτίων (P, Q) . Όλα τα σημεία στο εσωτερικό της παραβολής ικανοποιούν την ανίσωση της (1-74) και δίνουν δύο πιθανά σημεία λειτουργίας για το δίκτυο, ένα εκ των οποίων είναι ευσταθές και ένα ασταθές, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο σχήμα 1-2. Στον χώρο εκτός της παραβολής δεν υπάρχουν λύσεις της (1-74), ενώ επί της παραβολής η λύση είναι μοναδική (σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος). Πιο εκτενής ανάλυση μπορεί να αναζητηθεί στην εργασία [Vou15].

Εάν στο δίκτυο του σχήματος 1-2 τεθεί $R = 0$, $P = 0$, τότε προκύπτει από τη σχέση (1-74) ότι:

$$Q \leq \frac{E^2}{4X} \quad (1-75)$$

Η σχέση (1-75) δηλώνει ότι η μέγιστη δυνατή άεργος ισχύς κατανάλωσης του φορτίου ισούται με το ένα τέταρτο της ισχύος βραχυκύκλωσης στον ζυγό φορτίου. Κατ'αντιστοιχία, θέτοντας στη σχέση (1-74) $R = 0, Q = 0$ προκύπτει για την ενεργό ισχύ του φορτίου:

$$P \leq \frac{E^2}{2X} \quad (1-76)$$

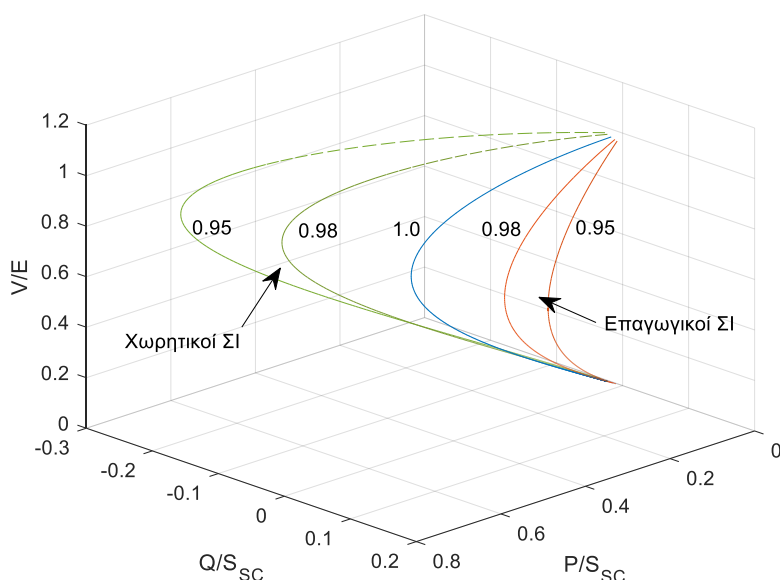
Από τις σχέσεις (1-75) και (1-76) συμπεραίνεται μία θεμελιώδης διαφορά μεταξύ ενεργού και αέργου ισχύος, η οποία πηγάζει από την επαγωγική φύση των συστημάτων μεταφοράς. Αμελώντας τις απώλειες ($R=0$), τότε εφόσον παρέχεται επαρκής ποσότητα αέργου ισχύος από τον ζυγό φορτίου προς στο δίκτυο, είναι δυνατόν να απορροφηθεί οποιοδήποτε ποσό ενεργού ισχύος από το φορτίο. Αντίθετα, η άεργος κατανάλωση από το φορτίο δεν μπορεί να υπερβεί το ένα τέταρτο της ισχύος βραχυκύκλωσης του ζυγού φορτίου. Αυτό

συμβαίνει διότι η επαγωγική φύση των συστημάτων μεταφοράς δεν επιτρέπει την αποστολή μεγάλων ποσοτήτων αέργου ισχύος, λόγω των μεγάλων μεταβολών του μέτρου τάσης που απαιτούνται για τη ροή της. Σημειώνεται ωστόσο, ότι τα παραπάνω συμπεράσματα τροποποιούνται στην περίπτωση όπου $R \neq 0$ (βλ. [Vou15]). Στην πράξη βέβαια, η εγχεόμενη αέργος ισχύς σε έναν ζυγό φορτίου δεν μπορεί να γίνει αυθαίρετα μεγάλη, διότι θα προκληθούν μεγάλες ανυψώσεις τάσεων στο δίκτυο και η λειτουργία καθίσταται μη ασφαλής.

Με βάση τη σχέση (1-74), προκύπτουν δύο πιθανές τάσεις λειτουργίας:

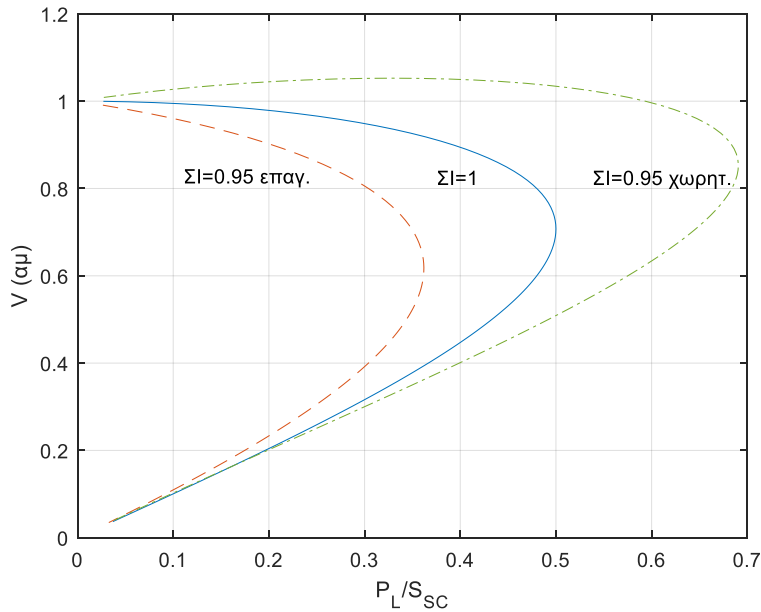
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^2}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q} \quad (1-77)$$

Η σχέση (1-77) ορίζει μία δισδιάστατη επιφάνεια στον τρισδιάστατο χώρο P, Q, V , η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 1-4. Για κάθε ζεύγος (P, Q) στο οριζόντιο επίπεδο προκύπτουν δύο τιμές τάσης από τη λύση της διτετράγωνης σχέσης (1-72), εκ των οποίων η μεγάλη τιμή αντιστοιχεί σε ευσταθές σημείο λειτουργίας, και η μικρή σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Σε τιμές P, Q για τις οποίες προκύπτει μοναδική λύση της (1-72), το σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί σε σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος και σταθερό δίκτυο. Η προβολή των εν λόγω σημείων λειτουργίας στο επίπεδο PQ αντιστοιχεί στην παραβολή που ορίζεται από την ισότητα της σχέσης (1-74).



Σχήμα 1-4 Τάση ζυγού φορτίου συναρτήσει καταναλισκόμενης P, Q

Από τις τομές μεταξύ κάθετων επιπέδων στο επίπεδο PQ και της χαρακτηριστικής επιφάνειας του δικτύου προκύπτουν καμπύλες στον χώρο P, Q, V , οι οποίες αντιστοιχούν σε σημεία λειτουργίας υπό σταθερό συντελεστή ισχύος. Προβάλλοντας τις συγκεκριμένες καμπύλες στο επίπεδο PV προκύπτουν οι γνωστές στη βιβλιογραφία PV καμπύλες που έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και ερμηνεία του φαινομένου της αστάθειας τάσης [VCV08].



Σχήμα 1-5 Καμπύλες PV του συστήματος δύο ζυγών για επαγωγικό, χωρητικό και ωμικό συντελεστή ισχύος φορτίου

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα ως ακολούθως:

- Για δεδομένο φορτίο εντός της παραβολής στο επίπεδο PQ προκύπτουν δύο λύσεις της σχέσης (1-72), μία με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα (ευσταθές σημείο ισορροπίας) και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα (ασταθές σημείο ισορροπίας).
- Καθώς αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου, η μέγιστη ισχύς που μπορεί να καταναλώσει το φορτίο αυξάνεται. Παράλληλα όμως, αυξάνεται και η τάση λειτουργίας V στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς, γεγονός ανεπιθύμητο από τη σκοπιά της ανάλυσης και ανίχνευσης της αστάθειας τάσης, καθώς οι δύο λύσεις της σχέσης (1-72) βρίσκονται όλο και πιο κοντά στα ονομαστικά επίπεδα τάσης.

1.4.3 Χαρακτηριστικές φορτίου

Στην πράξη, η ενεργός και άεργος κατανάλωση των φορτίων επηρεάζονται από το μέτρο της τάσης και της συχνότητας. Για τις ανάγκες των μελετών ευστάθειας τάσης ΣΗΕ γίνονται συνήθως απλουστευτικές παραδοχές αναπαράστασης του φορτίου συναρτήσεων του μέτρου της τάσης του ζυγού στον οποίο αυτό συνδέεται και μίας αδιάστατης ελεύθερης μεταβλητής που καλείται ζήτηση και συμβολίζεται με z [VCV08]. Η παράλειψη της εξάρτησης του φορτίου από τη συχνότητα θεωρείται αποδεκτή, δεδομένου ότι στις περιπτώσεις που εμφανίζονται φαινόμενα μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, η συχνότητα του συστήματος συνήθως δεν παρουσιάζει ουσιαστική διακύμανση από την ονομαστική της τιμή. Αυτό προκύπτει, διότι συνήθως στην πράξη η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης εξελίσσεται μέσω διαδοχικών διαταραχών μικρής κλίμακας, κατά τις οποίες οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος είναι ευσταθείς.

Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η αναπαράσταση του φορτίου (*χαρακτηριστική φορτίου*) στην ανάλυση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ συνήθίζεται να περιγράφεται από τις ακόλουθες γενικού τύπου σχέσεις:

$$\begin{aligned} P &= P(V, z) \\ Q &= Q(V, z) \end{aligned} \quad (1-78)$$

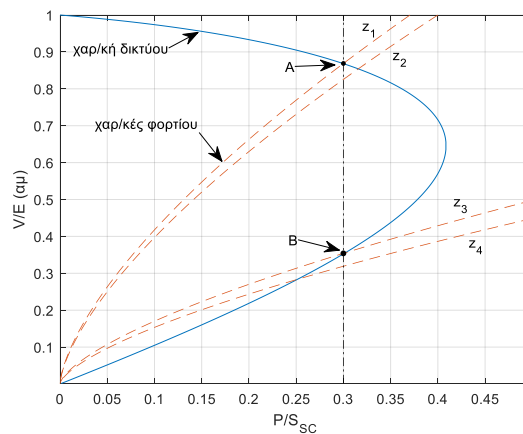
Η διάκριση μεταξύ των εννοιών της καταναλισκόμενης ισχύος και της ζήτησης είναι σημαντική, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου, που κυρίως ευθύνεται για τα φαινόμενα αστάθειας τάσης. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, σε καταστάσεις αστάθειας τάσης η ζήτηση του φορτίου συνήθως βγαίνει αυξανόμενη, ενώ η κατανάλωση τείνει να μειώνεται.

Για δεδομένη τιμή ζήτησης z , οι σχέσεις (1-78) περιγράφουν καμπύλες στον χώρο PQV που τέμνουν τη χαρακτηριστική δικτύου σε διαφορετικό εν γένει αριθμό πιθανών σημείων λειτουργίας, ανάλογα με το είδος και τη μορφή των χαρακτηριστικών φορτίου.

Ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο για την ανάλυση ευστάθειας τάσης ΣΗΕ είναι το εκθετικό φορτίο, το οποίο περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} P &= zP_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^\alpha \\ Q &= zQ_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^\beta \end{aligned} \quad (1-79)$$

Όπου V_0 η ονομαστική τάση λειτουργίας, P_0 και Q_0 η ενεργός και άεργος κατανάλωση για μοναδιαία τιμή ζήτησης και ονομαστική τάση λειτουργίας. Οι εκθέτες α και β κυμαίνονται μεταξύ ενός περιορισμένου εύρους τιμών με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία. Στο σχήμα 1-6 φαίνονται για διαδοχικές τιμές της ζήτησης z οι χαρακτηριστικές φορτίου για τιμές $\alpha=\beta=1.5$ και για λόγο $P_0/Q_0=0.2$. Τα σημεία A και B αντιστοιχούν σε ίδιες καταναλώσεις P , αλλά για διαφορετικές τιμές ζήτησης.



Σχήμα 1-6 Χαρακτηριστική δικτύου και φορτίου για μεταβαλλόμενη ζήτηση

1.4.4 Μηχανισμοί αστάθειας

Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύντομη περιγραφή των μηχανισμών μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο βασικός μηχανισμός μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι η απόπειρα των φορτίων να αποκαταστήσουν τη ζήτησή τους σε επίπεδα πέραν του φυσικού ορίου του συνδυασμένου συστήματος μεταφοράς και παραγωγής. Ο εν λόγω μηχανισμός εξηγείται στην παρούσα ενότητα πιο συστηματικά με βάση τις έννοιες της χαρακτηριστικής δικτύου και φορτίου του συστήματος δύο ζυγών που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 1.4.2 και 1.4.3 αντίστοιχα.

Για το σταθερό δίκτυο του σχήματος 1-2 θεωρείται μία αύξηση στη ζήτηση του φορτίου. Στην πράξη, η χαρακτηριστική δικτύου που αντιστοιχεί σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς δεν παραμένει σταθερή, ωστόσο για τις ανάγκες κατανόησης του μηχανισμού της αποκατάστασης του φορτίου υιοθετείται η συγκεκριμένη απλούστευση.

Καθώς ζήτηση z μεταβάλλεται, μετατοπίζεται η χαρακτηριστική φορτίου με βάση τη σχέση (1-78), μεταβάλλοντας αντίστοιχα και το σημείο λειτουργίας του συστήματος. Αυτό φαίνεται ποιοτικά στο σχήμα 1-6, όπου εάν θεωρηθεί ότι το σύστημα βρίσκεται στο σημείο λειτουργίας A , τότε για δεδομένη μεταβολή της ζήτησης από την τιμή z_1 στην τιμή z_2 , το σημείο λειτουργίας μετατοπίζεται προς τα δεξιά επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη κατανάλωση και μικρότερη τάση. Στην αντίθετη περίπτωση όπου το σύστημα ισορροπεί στο σημείο B , αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης από την τιμή z_3 στη z_4 έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης και της κατανάλωσης του φορτίου.

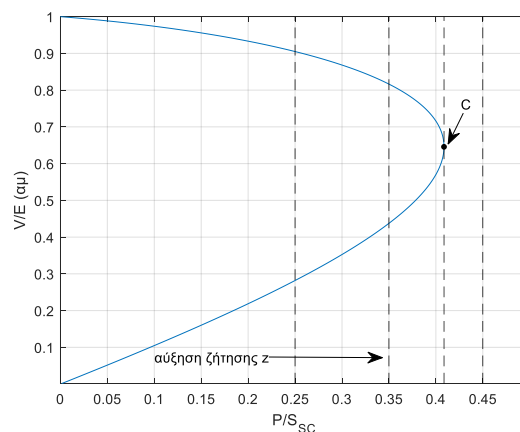
Με βάση τα παραπάνω, το σημείο A καλείται ευσταθές, ενώ αντίθετα το B ασταθές. Σημειώνεται για το σημείο ισορροπίας B , ότι θεωρητικά θα μπορούσε να αποτελεί σημείο ισορροπίας εάν οι μακροπρόθεσμες

δυναμικές του συστήματος παρέμεναν σταθερές (z σταθερό). Στην πράξη όμως το σημείο B είναι ασταθές, διότι για οσοδήποτε μικρή αύξηση του z το σύστημα αδυνατεί να αποκαταστήσει την κατανάλωση, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μετακίνηση του σημείου λειτουργίας προς χαμηλότερα επίπεδα τάσεων και κατανάλωσης.

Τονίζεται ότι η παραπάνω συμπεριφορά που μπορεί να παρουσιάσει η κατανάλωση, παρατηρείται συχνά στην πράξη από τη συνισταμένη λειτουργία συγκεκριμένων διατάξεων στο σύστημα. Για παράδειγμα, η κατανάλωση του φορτίου τείνει να παρουσιάζει αντίστοιχα χαρακτηριστικά δυναμικής αποκατάστασης λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ ή λόγω εγγενούς δυναμικής, όπως εμφανίζεται στα θερμοστατικά φορτία. Αντίστοιχη, αλλά στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, δυναμική αποκατάστασης της κατανάλωσης εμφανίζουν οι κινητήρες επαγωγής, οι διασυνδέσεις HVDC, αλλά και φορτία ελεγχόμενα από διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος.

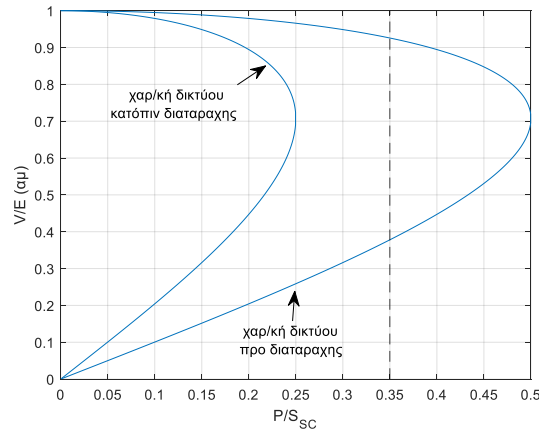
Στην πράξη η συμπεριφορά του συνολικού φορτίου, όπως αυτό φαίνεται στο σύστημα μεταφοράς, είναι πιο σύνθετη, καθώς η μεν βραχυπρόθεσμη κατανάλωση επηρεάζεται σημαντικά από το μέτρο της τάσης, ενώ η δε μακροπρόθεσμη συμπεριφορά μπορεί να παρουσιάζει χαρακτηριστικά σταθερής ισχύος. Αυτό απεικονίζεται και στο σχήμα 1-6, όπου η κάθετη διακεκομμένη γραμμή αποτελεί τη λεγόμενη μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική του φορτίου ενώ οι διακεκομμένες καμπύλες γραμμές τις βραχυπρόθεσμες χαρακτηριστικές του φορτίου.

Συνεπώς, εάν το επίπεδο της κατανάλωσης που επιχειρείται να αποκατασταθεί μακροπρόθεσμα βρίσκεται εντός των ορίων φόρτισης του συστήματος, τότε είναι δυνατή η επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας (βλ. σχήμα 1-6). Στην περίπτωση όμως που το φορτίο τείνει μακροπρόθεσμα να αποκαταστήσει ένα επίπεδο κατανάλωσης το οποίο βρίσκεται εκτός της παραβολής (1-74), τότε δεν προκύπτουν σημεία τομής μεταξύ χαρακτηριστικής δικτύου και μακροπρόθεσμης χαρακτηριστικής φορτίου, με αποτέλεσμα την αδυναμία λειτουργίας του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση το σύστημα οδηγείται σταδιακά προς το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επί της χαρακτηριστικής δικτύου (σημείο C σχήμα 1-7) και επιχειρώντας να οδηγηθεί σε επίπεδα κατανάλωση πέραν του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προκύπτει αδυναμία επίτευξης βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και κατάρρευση του συστήματος.



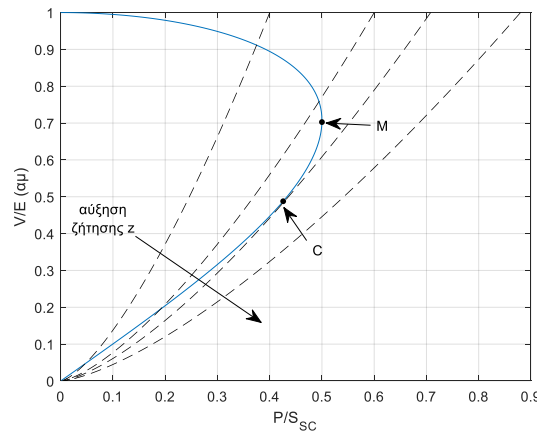
Σχήμα 1-7 Αστάθεια τάσης συστήματος δύο ζυγών λόγω μεταβολής ζήτησης. Χαρακτηριστική φορτίου σταθερής ισχύος

Μία επίσης πιθανή περίπτωση μηχανισμού αστάθειας απεικονίζεται στο Σχήμα 1-8, όπου θεωρείται ότι εμφανίζεται μία διαταραχή στο δίκτυο με αποτέλεσμα αυτό να καθίσταται λιγότερο ισχυρό μετά τη διαταραχή (π.χ. απώλεια γραμμής μεταφοράς). Η κατάσταση αυτή μπορεί να προκύψει στο απλοποιημένο δίκτυο του σχήματος 1-2 διπλασιάζοντας τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μετά τη διαταραχή. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1-8, μετά τη διαταραχή παύουν να υπάρχουν σημεία τομής μεταξύ των δύο χαρακτηριστικών με αποτέλεσμα την κατάρρευση του συστήματος.



Σχήμα 1-8 Αστάθεια τάσης λόγω αλλαγής χαρακτηριστικής δικτύου.

Αντίστοιχες περιπτώσεις αστάθειας στο απλοποιημένο σύστημα δύο ζυγών του σχήματος 1-2 μπορούν να παρασταθούν για εκθετικές χαρακτηριστικές φορτίου με παρόμοια συμπεριφορά και τελική κατάρρευση του συστήματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-9.



Σχήμα 1-9 Αστάθεια τάσης συστήματος δύο ζυγών λόγω μεταβολής ζήτησης. Εκθετική χαρακτηριστική φορτίου

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 1-9, το σύστημα οδηγείται σταδιακά λόγω της αύξησης της ζήτησης από το υγιές άνω τμήμα της χαρακτηριστικής δικτύου προς το ασταθές διασχίζοντας το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος M . Το τελευταίο (ασταθές) σημείο λειτουργίας αντιστοιχεί στο σημείο τομής C των δύο χαρακτηριστικών.

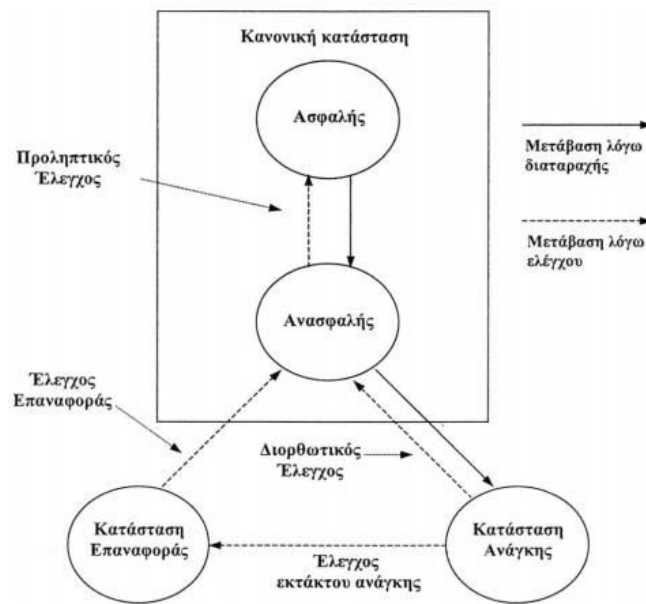
Με αφορμή την παρούσα ενδεικτική ανάλυση του απλοποιημένου συστήματος δύο ζυγών, η ανίχνευση του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος M σε βροχοειδή συστήματα μεταφοράς κάνοντας χρήση αποκεντρωμένων μεθόδων που βασίζονται αποκλειστικά σε μετρήσεις, αποτελεί από τα βασικά αντικείμενα της παρούσας εργασίας.

1.5 Ασφάλεια ΣΗΕ

1.5.1 Γενικά

Με τον όρο *Ασφάλεια Τάσης* ορίζεται ο βαθμός απουσίας κινδύνου διακοπής της λειτουργίας του συστήματος και αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να μπορεί να ανταπεξέλθει σε ένα σύνολο ρεαλιστικών διαταραχών χωρίς να διατρέχει κίνδυνος για τη λειτουργία του [VCV98]. Τα τελευταία χρόνια, δεδομένης της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της στοχαστικότητας του συστήματος παραγωγής εξαιτίας της ένταξης πηγών με μετατροπείς ισχύος, η σημασία της ασφάλειας τάσης

γίνεται όλο και πιο κρίσιμη για τους διαχειριστές των συστημάτων μεταφοράς. Οι λειτουργικές καταστάσεις ενός ΣΗΕ μπορούν να παρασταθούν σχηματικά με βάση το Σχήμα 1-10:



Σχήμα 1-10 Διαχωρισμός λειτουργικών καταστάσεων ΣΗΕ [Lia78], [FC78]

Επί της ουσίας, η λειτουργία ενός ΣΗΕ υπόκειται σε δύο βασικά είδη περιορισμών:

- Στους περιορισμούς λειτουργίας, οι οποίοι επιβάλλουν όρια (μέγιστα ή ελάχιστα) στις μεταβλητές του συστήματος όπως π.χ. ρεύματα γραμμών, τάσεις ζυγών, άεργος και ενεργός παραγωγές μονάδων και σχετίζονται με τις συνιστώσες του συστήματος. Οι λειτουργικοί περιορισμοί λαμβάνονται υπόψη με τη μορφή ανισώσεων στην περιγραφή ενός ΣΗΕ.
- Στους περιορισμούς φορτίου, οι οποίοι εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος που πρέπει να ικανοποιείται καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας. Οι περιορισμοί αυτοί λαμβάνονται υπόψη στην αναπαράσταση του ΣΗΕ με τη μορφή εξισώσεων, όπως αυτές της ροής φορτίου.

Οι λειτουργικές καταστάσεις ενός ΣΗΕ, με βάση το Σχήμα 1-10 μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Κανονική κατάσταση, στην οποία ικανοποιούνται τόσο οι λειτουργικοί περιορισμοί όσο και οι περιορισμοί φορτίου.
- Κατάσταση ανάγκης, κατά την οποία παραβιάζονται ορισμένοι κανόνες λειτουργίας.
- Κατάσταση επαναφοράς, κατά την οποία ικανοποιούνται μεν οι περιορισμοί λειτουργίας, αλλά παραβιάζονται ορισμένοι περιορισμοί φορτίου π.χ. λόγω διορθωτικών δράσεων που έχουν προηγηθεί.

Η κανονική κατάσταση διακρίνεται περαιτέρω σε:

- ✓ Ασφαλή κατάσταση, στην οποία προβλέπεται ότι το σύστημα ανταπεξέρχεται σε ένα σύνολο προεπιλεγμένων και πιθανών διαταραχών χωρίς να διατρέχει κίνδυνο μετάβασης σε κατάσταση ανάγκης.
- ✓ Ανασφαλή κατάσταση, όπου υπάρχει σύνολο διαταραχών η εμφάνιση οποιασδήποτε εκ των οποίων προβλέπεται ότι θα μεταβάλει την κατάσταση του συστήματος σε κατάσταση ανάγκης.

Κατά τη διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας ενός συστήματος, η λειτουργική κατάσταση ενός ΣΗΕ μπορεί να μεταβληθεί. Για παράδειγμα, η εμφάνιση μίας σφοδρής διαταραχής είναι ικανή να οδηγήσει το σύστημα από την κανονική κατάσταση σε κατάσταση ανάγκης, ενώ μία διαταραχή μικρής κλίμακας διατηρεί το ΣΗΕ σε κανονική κατάσταση. Σε κάθε περίπτωση, η γνώση της λειτουργικής κατάστασης ενός συστήματος μεταφοράς, με βάση το σχήμα 1-10 είναι καθοριστικής σημασίας για τη διασφάλιση επαρκούς βαθμού αξιοπιστίας και της κατά το δυνατόν αδιάλειπτης λειτουργίας των σύγχρονων ΣΗΕ. Για τον λόγο

αυτό επενδύονται σημαντικοί πόροι από τους διαχειριστές συστημάτων με σκοπό την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων παρακολούθησης και ανάλυσης της ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο.

1.5.2 Ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ εξετάζει την ικανότητα ενός ΣΗΕ να μπορέσει να ανταπεξέλθει σε ένα προκαθορισμένο σύνολο διαταραχών με ρεαλιστικές πιθανότητες εμφάνισης. Η υλοποίηση της ανάλυσης ασφάλειας ΣΗΕ πραγματοποιείται ιδανικά σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου με εξειδικευμένα λογισμικά εργαλεία τα οποία συνήθως εγκαθίστανται στα κέντρα ελέγχου ενέργειας των διαχειριστών και πραγματοποιούν προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου.

Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού φόρτου που προκύπτει από την ανάγκη πολλαπλών προσομοιώσεων στο πεδίο του χρόνου, μια κατηγορία εργαλείων προσομοίωσης κάνουν χρήση αμιγώς στατικών μεθόδων, ενώ άλλα χρησιμοποιούν τεχνικές με το δίκτυο είτε σε οιονεί στατική κατάσταση είτε σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση ασφάλειας ΣΗΕ μπορεί να διαχωριστεί σε *στατική* και *δυναμική*. Στη στατική εκτίμηση ασφάλειας λαμβάνονται υπόψη μόνο οι αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου (ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος), και εξετάζεται εάν το σύστημα μετά τη διαταραχή μπορεί να επιτύχει νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, χωρίς να δίνεται έμφαση στη χρονική αλληλουχία των δυναμικών μηχανισμών που υπεισέρχονται στην προσομοίωση μέχρι την επίτευξη του νέου μακροπρόθεσμου σημείου λειτουργίας. Στον αντίποδα, η δυναμική εκτίμηση ασφάλειας λαμβάνει επιπρόσθετα υπόψη και δυναμικά μοντέλα συνιστωσών του συστήματος. Κατά συνέπεια, στη δυναμική εκτίμηση ασφάλειας εξετάζεται καταρχάς η ευστάθεια των βραχυπρόθεσμων δυναμικών, ελέγχοντας εάν το σύστημα μπορεί να εξασφαλίσει βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας μετά από την επιβολή διαταραχής, και στη συνέχεια καταγράφεται με λεπτομέρεια η χρονική αλληλουχία των συνεχών και διακριτών μακροπρόθεσμων (ή και βραχυπρόθεσμων) δυναμικών του συστήματος, μέχρι την επίτευξη του νέου μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας ή τον τερματισμό της προσομοίωσης λόγω εμφάνισης αστάθειας στο σύστημα. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται αδιάλειπτα σε ένα κέντρο ελέγχου ενέργειας με σημείο εκκίνησης συνήθως ένα στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος, όπως αυτό έχει προκύψει μετά από την εκτίμηση κατάστασης του συστήματος [Vaa14].

1.5.3 Προσδιορισμός περιθωρίων ασφαλείας

Ένας βασικός περιορισμός της ανάλυσης ασφάλειας ΣΗΕ σχετίζεται με το ότι η ανάλυση αφορά ένα συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας του συστήματος. Ακόμα και όταν είναι γνωστό ότι το τρέχον σημείο λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι ασφαλές ως προς ένα προεπιλεγμένο σύνολο διαταραχών, είναι συχνά επιθυμητή η γνώση της επιτρεπτής απομάκρυνσης του συστήματος από το τρέχον σημείο λειτουργίας, υπό την προϋπόθεση όμως το σύστημα να παραμείνει σε ασφαλή κατάσταση, δηλαδή η γνώση του περιθωρίου ασφαλείας του συστήματος.

Τα περιθώρια ασφαλείας σχετίζονται με την *καταπόνηση συστήματος* (*system stress*), δηλαδή τη μεταβολή παραμέτρων του συστήματος, όπως π.χ. το συνολικό φορτίο ή τα επίπεδα παραγωγής των μονάδων [VCV08]. Η καταπόνηση του συστήματος χαρακτηρίζεται επίσης από μία κατεύθυνση στον χώρο των παραμέτρων, και παίρνει τη μορφή συντελεστών συμμετοχής ζυγών του συστήματος στην αύξηση των φορτίων ή στον επαναπρογραμματισμό της παραγωγής των μονάδων. Η εκτίμηση των περιθωρίων ασφαλείας καθίσταται όλο και πιο σημαντική για τη διασφάλιση επαρκούς βαθμού αξιοπιστίας στη λειτουργία ενός συστήματος μεταφοράς, λόγω αφενός της σταδιακής απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλά κράτη, με συχνή συνέπεια τα μη προβλέψιμα σχήματα προγραμματισμού παραγωγής μονάδων και ροών ισχύος, αλλά και αφετέρου λόγω της συνεχούς ένταξης μονάδων με μετατροπείς ισχύος, οι οποίες αλλάζουν σημαντικά τις ροές ισχύος στο σύστημα και εισάγουν σημαντικό βαθμό στοχαστικότητας στη λειτουργία του συστήματος παραγωγής.

Το περιθώριο ασφαλείας είναι ένα μέτρο απόστασης από:

- ✓ Το όριο φόρτισης του συστήματος μετά από κάποια διαταραχή και ονομάζεται *περιθώριο φόρτισης*.
- ✓ Το όριο ασφαλούς λειτουργίας, και ονομάζεται *περιθώριο ασφαλούς λειτουργίας*.

Για τον υπολογισμό του περιθωρίου φόρτισης, η ανάλυση υποθέτει ότι πρώτα εφαρμόζεται στο σύστημα μία διαταραχή και στη συνέχεια αυτό καταπονείται σταδιακά προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αντίστοιχα, για τον προσδιορισμό του περιθωρίου ασφαλούς λειτουργίας εφαρμόζεται σταδιακή καταπόνηση

συστήματος προς μία κατεύθυνση (π.χ. μέσω ακολουθίας μικρών μεταβολών σε παραμέτρους του συστήματος) και η διαταραχή επιβάλλεται σε κάθε νέο σημείο λειτουργίας που προκύπτει μετά την εκάστοτε σταδιακή αύξηση των παραμέτρων, μέχρις ότου προκύψει ανασφαλές σημείο λειτουργίας, δηλαδή σημείο στο οποίο η διαταραχή θέτει το σύστημα σε λειτουργική κατάσταση ανάγκης (βλ. Σχήμα 1-10).

1.5.4 Εκτίμηση ασφάλειας τάσης

Η εκτίμηση ασφάλειας τάσης (*Voltage Security Assessment - VSA*) αποτελεί κομμάτι της δυναμικής ασφάλειας ΣΗΕ. Ως εκ τούτου, διαφοροποιείται από τη στατική ανάλυση ασφάλειας ενώ μπορεί να εστιάζει τόσο στη μακροπρόθεσμη ευστάθεια όσο και στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης [Sav09]. Οι συνήθεις διαταραχές που λαμβάνονται υπόψη για τις μελέτες ασφάλειας τάσης αφορούν σε απλές απώλειες εξοπλισμού (π.χ. γεννήτριες, γραμμές κλπ.) ή και σε ορισμένες πολλαπλές (διπλές ή τριπλές) απώλειες στοιχείων ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες του κάθε συστήματος και την εμπειρία του προσωπικού.

Οι μελέτες ασφάλειας τάσης διεξάγονται είτε σε περιβάλλον εκτός λειτουργίας (*off-line*) είτε σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου (*on-line*). Μία αδυναμία της εκτός λειτουργίας εκτίμησης ασφάλειας τάσης αφορά στην υπόθεση του σημείου λειτουργίας του συστήματος, η οποία μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές με την πραγματικότητα. Ως εκ τούτου, από την *off-line* ανάλυση ασφάλειας τάσης εξάγονται όρια ασφαλείας τα οποία αντιστοιχούν σε μερικές μόνο καταστάσεις λειτουργίας και υπό πολύ συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Κάτι τέτοιο οδηγεί συνήθως στη θεώρηση περισσότερο συντηρητικών ορίων λειτουργίας συστήματος, αποσκοπώντας κυρίως σε αποφυγή αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με υποθέσεις σε παραμέτρους του συστήματος, για τις οποίες υπάρχει αβεβαιότητα [VCV08].

Τα τελευταία χρόνια, και με δεδομένη τη ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες για ανάπτυξη εφαρμογών εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο [Sav14], [Vaa14], [TF21]. Πολλοί διαχειριστές συστημάτων προσανατολίζονται προς αυτήν την κατεύθυνση καθώς τα πλεονεκτήματα σε σχέση με την εκτός λειτουργίας ανάλυση είναι πολλαπλά με βασικό το ότι η εκτίμηση ασφάλειας τάσης υπολογίζεται για το τρέχον σημείο λειτουργίας του συστήματος και όχι κάποιο υποθετικό. Ως εκ τούτου, η πλειοψηφία των δευτερευουσών παραμέτρων του συστήματος λαμβάνουν ρεαλιστικές τιμές [VCV08] και η εκτίμηση ασφάλειας προσδίδει στους χειριστές σημαντική εποπτεία για τα χαρακτηριστικά της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος.

Ένας δεσμευτικός παράγοντας για το σύνολο των εξεταζόμενων διαταραχών αφορά στο ότι ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης και εξαγωγής συμπερασμάτων για την ασφάλεια τάσης του τρέχοντος σημείου λειτουργίας θα πρέπει να είναι εύλογος, ώστε η διαδικασία να επαναλαμβάνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα με νέο στιγμιότυπο λειτουργίας.

1.6 Μονάδες παραγωγής με μετατροπείς ισχύος και ευστάθεια τάσης

1.6.1 Ανάγκες και απαιτήσεις

Οι κλιματολογικές αλλαγές των τελευταίων δεκαετιών λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας έχουν οδηγήσει πολλά κράτη στη θέσπιση πολιτικών και στρατηγικών που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στην προώθηση τεχνολογιών φιλικότερων προς το περιβάλλον. Στην Ευρώπη, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει καθορίσει συγκεκριμένους ενεργειακούς στόχους που προβλέπεται να επιτευχθούν μέχρι το 2050 και αφορούν στην παραγωγή του 32% της συνολικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) έως το 2030, καθώς και στον μετασχηματισμό της Ευρώπης σε ενεργειακά ουδέτερη ήπειρο έως το 2050 [KHZ19]. Υπό αυτό το πρίσμα, αν και το μεγαλύτερο ποσοστό της παραγωγής συνεχίζει να παρέχεται από σύγχρονες μηχανές και συμβατικούς σταθμούς, ο ρυθμός ένταξης των μονάδων παραγωγής με μετατροπείς ισχύος βαίνει αυξανόμενος [WAI15], μεταβάλλοντας και τα χαρακτηριστικά των διασυνδεδεμένων και μη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Αν και οι πρώτοι σταθμοί ΑΠΕ που εντάχθηκαν στο σύστημα είχαν ευνοϊκούς όρους μεταχείρισης από τους διαχειριστές συστημάτων αναφορικά με τις απαιτήσεις σε μόνιμη και μεταβατική κατάσταση λειτουργίας (π.χ. έλεγχος ροής ενεργού/αέργου ισχύος, έλεγχος τάσης ή συνεισφορά σε βραχυκύκλωμα) [ENE12], η σταδιακή αντικατάσταση των σύγχρονων μηχανών από μονάδες που συνδέονται στο δίκτυο μέσω μετατροπέων ισχύος έχει καταστήσει αναγκαία την αλλαγή των απαιτήσεων λειτουργίας τους, προκειμένου

να εξασφαλιστεί ικανοποιητικό επίπεδο ελέγχου και λειτουργίας στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Εξάλλου, η εν λόγω αντικατάσταση σύγχρονων μηχανών με πηγές με μετατροπείς ισχύος έχει σημαντική επίδραση στη δυναμική και στην ευστάθεια των συστημάτων μεταφοράς [MDH18], [PMG20], [PGG20]. Το γεγονός αυτό έχει επιφέρει μία σειρά από νομοθετικές διατάξεις, οι οποίες οδήγησαν στην αναδιαμόρφωση των κωδίκων σύνδεσης χρηστών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι κώδικες σύνδεσης χρηστών (*Connection Network Codes – CNC*) αποτελούν ένα σύνολο κανόνων και υποχρεώσεων σχετικών με τη σύνδεση χρηστών στα συστήματα μεταφοράς. Συντάσσονται από διαχειριστές συστημάτων σε στενή συνεργασία με τις αρμόδιες ρυθμιστικές αρχές ενέργειας. Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο έχουν συνταχθεί από τους ENTSO-E και ACER και βασίζονται στις κατευθυντήριες γραμμές του Κανονισμού Ευρωπαϊκής Ένωσης 714/2009 και αποτελούν βασική προϋπόθεση του 3ου ενεργειακού πακέτου σε ότι αφορά την εναρμόνιση και ολοκλήρωση της ενιαίας Ευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και της επίτευξης των ενεργειακών στόχων της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Ο κανονισμός Ευρωπαϊκής Ένωσης 631/2016 περιγράφει τις απαιτήσεις σύνδεσης ηλεκτροπαραγωγών στο δίκτυο αναφορικά με τη μόνιμη αλλά και τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, τόσο για σύγχρονες μηχανές, όσο και για μηχανές με μετατροπείς ισχύος. Οι απαιτήσεις ηλεκτροπαραγωγών, διαφοροποιούνται ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού ή και το επίπεδο τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης, αλλά αναφέρονται εν γένει σε απαιτήσεις ως προς:

- ✓ Τη συχνότητα του δικτύου, και πιο συγκεκριμένα:
 - παραμονή σε διαταραχές
 - ρύθμιση ενεργού ισχύος
- ✓ Την παραμονή σε βραχυκύκλωμα και την παροχή ρεύματος βραχυκύκλωσης με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά
- ✓ Τη συμμετοχή σε επανηλέκτριση συστήματος μετά από μερική ή ολική σβέση (blackout)
- ✓ Την τάση του συστήματος και πιο συγκεκριμένα:
 - παραμονή σε διακυμάνσεις της τάσης του δικτύου
 - παροχή αέργου ισχύος στο σημείο κοινής σύνδεσης

Παρά τη διαφοροποίηση των απαιτήσεων ανάλογα με το μέγεθος και το σημείο σύνδεσης των σταθμών παραγωγής, έχει καταστεί σαφές ότι η δυνατότητα για παροχή επικουρικών υπηρεσιών από σταθμούς ΑΠΕ που συνδέονται είτε απευθείας στο σύστημα μεταφοράς είτε στο δίκτυο διανομής μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια και ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται αφενός η επίδραση που έχει η παροχή αέργου ισχύος από διεσπαρμένες πηγές στο δίκτυο διανομής στην εκδήλωση και ανίχνευση της ευστάθειας τάσης, και αφετέρου η δυνατότητα αξιοποίησης της διεσπαρμένης παραγωγής ως ήπιο μέτρο προστασίας από κατάρρευση. Το δίκτυο στο οποίο πραγματοποιείται η διερεύνηση αφορά στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic [TF15], το οποίο και τροποποιείται αναλόγως για τους σκοπούς της διερεύνησης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιες τροποποιήσεις στο σύστημα Nordic έχουν δημοσιευτεί και σε άλλες εργασίες, με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης των διεσπαρμένων πηγών στη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης.

Πιο συγκεκριμένα, στην αναφορά [HTC19] εξετάζεται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση αστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, καθώς και ένα σχήμα ελέγχου αέργου ισχύος με σκοπό την παροχή της μόλις η τάση μειωθεί κάτω από ένα ελάχιστο επιτρεπτό όριο (0.95 αμ), δίνοντας έμφαση κυρίως στη μείωση της καταπόνησης των μετατροπέων. Μία άλλη διερεύνηση πραγματοποιείται στην αναφορά [HPR21], στην οποία αντικαθίσταται ποσοστό της συμβατικής παραγωγής (35%) με μονάδες μετατροπέων ισχύος, και συμπεραίνεται ότι αφενός η συνολική ισχύς βραχυκύκλωσης του συστήματος μειώνεται αισθητά και αφετέρου ότι η κατάρρευση τάσης επέρχεται νωρίτερα σε σχέση με την αναφορά [TF15] λόγω μειωμένων περιθωρίων αέργου παραγωγής από τις διεσπαρμένες πηγές σε σχέση με τους συμβατικούς σταθμούς. Στην εργασία [AVV15] τίθεται το ζήτημα της επίδρασης που έχει ο έλεγχος των τάσεων διανομής από τη συνδυαστική λειτουργία ΣΑΤΥΦ και διεσπαρμένης παραγωγής στην κατανάλωση των φορτίων. Τα συμπεράσματα της εργασίας ωστόσο, εξετάζουν ένα συγκεκριμένο σχήμα τοπολογίας και

ελέγχου της διεσπαρμένης παραγωγής και συνεπώς η εργασία δεν επιχειρεί να κατηγοριοποιήσει τους διαφορετικούς παράγοντες που διαδραματίζουν ρόλο στο συγκεκριμένο ζήτημα.

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η εξέταση της επίδρασης μεμονωμένων παραγόντων που αφορούν τη διεσπαρμένη παραγωγή στην αστάθεια τάσης. Μεταβάλλοντας τους συγκεκριμένους παράγοντες επιχειρείται η εκτίμηση της επίδρασής τους με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Αποσκοπείται κατά αυτόν τον τρόπο, η εξαγωγή πιο θεμελιωδών συμπερασμάτων για την επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην αστάθεια τάσης, ώστε αυτά να λειτουργήσουν ως κατευθυντήριες γραμμές για τον σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου σχήματος προστασίας συστήματος από αστάθεια τάσης που θα εκμεταλλεύεται την έκτακτη λειτουργία από τις διεσπαρμένες πηγές.

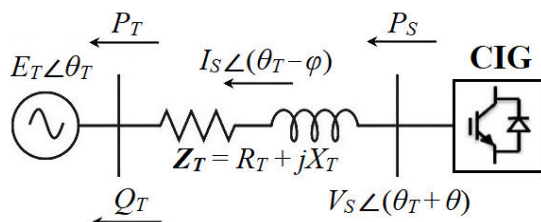
1.6.2 Μοντελοποίηση μονάδων με μετατροπείς

Τα μοντέλα των μονάδων με μετατροπείς είναι απλοποιημένα και συγκεντρωτικά, καθώς η διερεύνηση αποσκοπεί στην επίδραση που έχουν οι μονάδες στο σύστημα. Στην παρούσα ενότητα γίνεται μία πολύ συνοπτική παρουσίαση των χρησιμοποιούμενων μοντέλων, καθώς δεν αποτελεί το βασικό αντικείμενο της εργασίας. Λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στη διατριβή [Σου19].

Η ανάλυση που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια αναφέρεται σε οιονεί στατική κατάσταση, καθώς εξετάζονται φαινόμενα μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης αποκλειστικά. Ως εκ τούτου, θεωρείται ότι ο βρόχος ενεργού ισχύος διατηρεί σταθερή την ενεργό παραγωγή της μονάδας σε κάθε βήμα προσομοίωσης, ενώ ως προς τη λειτουργία ελέγχου αέργου ισχύος, θεωρείται ότι η μονάδα λειτουργεί σε μία από τις ακόλουθες καταστάσεις:

- Λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος, συνήθως μοναδιαίου ($Q_s = 0$)
- Λειτουργία σταθερής τάσης, κάνοντας χρήση ολοκληρωτικού ελέγχου για τον έλεγχο της τερματικής τάσης.
- Λειτουργία μέγιστου ρεύματος. Πρακτικά η μονάδα μεταπίπτει στη συγκεκριμένη λειτουργική κατάσταση όποτε γίνει παραβίαση του μέγιστου ρεύματος μετατροπέα, π.χ. λόγω υπερβολικής έγχυσης αέργου ισχύος στο σύστημα για το συγκεκριμένο επίπεδο ενεργού παραγωγής.

Στο Σχήμα 1-11 απεικονίζεται ένα ισοδύναμο Thévenin δίκτυο όπως αυτό φαίνεται από τους ακροδέκτες ενός πάρκου με μετατροπείς ισχύος.



Σχήμα 1-11 Ισοδύναμο Thévenin δίκτυο, όπως φαίνεται από τους ακροδέκτες ενός πάρκου συνδεδεμένου με μετατροπείς ισχύος

Η παραγόμενη από το πάρκο ενεργό ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$P_S = \frac{E_T V_S}{Z_T} \sin(\theta - \beta) + \frac{V_S^2}{Z_T^2} R_T \quad (1-80)$$

όπου είναι $\beta = \sin^{-1}(R_T/Z_T)$ η γωνία απωλειών της αντίστασης Thévenin [TR20]. Με σταθερές τις τάσεις ζυγών, η ισχύς από το πάρκο μεγιστοποιείται όταν:

$$\theta_{max P_S} = \pi/2 + \beta \quad (1-81)$$

Το συγκεκριμένο όριο ευστάθειας ωστόσο δεν αναμένεται να εμφανιστεί σε ρεαλιστικά συστήματα όπως αναφέρεται και στις εργασίες [SV17], [SPV20]. Ωστόσο, σε περιπτώσεις συνθηκών δυσμενούς λειτουργίας

του συστήματος, είναι πιθανόν το δίκτυο να απαιτήσει σημαντικά ποσά αέργου ισχύος από το πάρκο, με αποτέλεσμα η μονάδα να υπερβεί το όριο μέγιστου ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή θα ισχύει ότι:

$$P_T = E_T I_S \cos \varphi \quad (1-82)$$

όπου με φ συμβολίζεται η γωνία του ρεύματος ως προς την τάση Thévenin E_T . Στη συγκεκριμένη κατάσταση, η ενεργός ισχύς P_S τροφοδοτεί την εγγεόμενη στο ισοδύναμο δίκτυο ισχύ P_T καθώς και τις σταθερές απώλειες του δικτύου.

$$P_S = E_T I_S \cos \varphi + I_S^2 R_T \quad (1-83)$$

Συνεπώς όταν το ρεύμα μεγιστοποιηθεί ($I_S = I_S^{lim}$) μεγιστοποιείται η μεταφερόμενη ισχύς από το πάρκο προς το σύστημα όταν $\cos \varphi = 1$. Η μέγιστη μεταφερόμενη από το πάρκο ισχύς υπό λειτουργία σταθερού ρεύματος είναι:

$$P_S^{lim} = I_S^{lim} (E_T + I_S^{lim} R_T) \quad (1-84)$$

Όταν ενεργοποιηθεί το όριο της σχέσης (1-84), το σύστημα καθίσταται ασταθές, καθώς η ισχύς P_S δεν μπορεί να μεταφερθεί προς το σύστημα, διότι είτε για αυξανόμενη είτε για μειούμενη V_S , το ρεύμα βαίνει αυξανόμενο και επομένως δεν μπορεί να διατηρηθεί σταθερό στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του μετατροπέα. Για την αποφυγή αυτής της κατάστασης μειώνεται η ενεργός ισχύς P_S με βάση την τιμή της ευαισθησίας της θερμικής τάσης ως προς το εγγεόμενο από το πάρκο ρεύμα. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στην εργασία [SPV20].

1.7 Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστήματος

Είναι γνωστό ότι η απελευθέρωση των ηλεκτρικών αγορών έχει οδηγήσει στην υπερεκμετάλλευση των διαθέσιμων υποδομών των συστημάτων μεταφοράς, καθώς και σε σημαντικές μεταβολές του σχήματος παραγωγής [VC00]. Ως εκ τούτου, η πολυπλοκότητα στη λειτουργία των σύγχρονων διασυνδεδεμένων συστημάτων μεταφοράς έχει αυξηθεί σημαντικά, τόσο εξαιτίας της αυξανόμενης ηλεκτρικής ζήτησης όσο και του γενικότερου μετασχηματισμού του μίγματος παραγωγής. Είναι χαρακτηριστικό ότι η αύξηση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλάζει σημαντικά τις ροές ισχύος στο σύστημα και επιδρά καθοριστικά στην ηλεκτρική ζήτηση στα όρια του συστήματος μεταφοράς, αυξάνοντας τις διακυμάνσεις της και τη στοχαστικότητα της. Η αυξανόμενη ηλεκτρική ζήτηση αυξάνει τη φόρτιση των συστημάτων μεταφοράς με συνέπεια αυτά να λειτουργούν όλο και πιο συχνά κοντά στα όρια ευστάθειας, ενώ η αλλαγή του μίγματος της παραγωγής την καθιστά περισσότερο στοχαστική [TF17]. Τα παραπάνω επαναφέρουν στο προσκήνιο την επανεξέταση των μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας συστήματος και προστασίας του, καθώς η λειτουργία των σύγχρονων ΣΗΕ καθίσταται περισσότερο απρόβλεπτη και ευάλωτη σε εξωγενείς παράγοντες.

Είναι επίσης γνωστό, ότι για λόγους κόστους ο βαθμός ασφάλειας στη λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς καλύπτει μόνο ένα μικρό σχετικά σύνολο ρεαλιστικών διαταραχών, με αποτέλεσμα να εφαρμόζεται συνήθως στην πράξη το κριτήριο $N-1$. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των πιθανών καταστάσεων λειτουργίας που μπορούν να παρουσιαστούν στο σύστημα μεταφοράς και παραγωγής, καθώς και τις τυχόν ιδιαιτερότητες του συστήματος λόγω γεωγραφικών χαρακτηριστικών, δεν μπορούν να αποκλειστούν καταστάσεις λειτουργίας κατά τις οποίες η εμφάνιση ορισμένων διαταραχών μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στο σύστημα. Μία κρίσιμη διαταραχή που προκαλεί μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης συνήθως πρώτα επηρεάζει μία περιορισμένη περιοχή του συστήματος μεταφοράς, αλλά είναι πολύ πιθανή η επέκταση των επιπτώσεων σε μία ευρύτερη περιοχή του συστήματος σε χρονικό διάστημα μερικών δευτερολέπτων ή λεπτών. Υπό αυτό το πρίσμα, η αστάθεια τάσης χαρακτηρίζεται καταρχάς ως τοπικό φαινόμενο και σκοπός είναι να περιοριστεί στην κατά το δυνατόν μικρότερη δυνατή έκταση στο σύστημα εάν ληφθούν άμεσα και αποδοτικά μέτρα αντιμετώπισης του φαινομένου. Δεδομένης της ανάπτυξης των τηλεπικοινωνιακών μέσων και των δυνατοτήτων που αυτά έχουν προσδώσει στον εξοπλισμό ισχύος, και με γνώμονα τη βελτίωση του χρόνου αντίδρασης για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης κατά της αστάθειας, πολλοί διαχειριστές συστημάτων αναπτύσσουν ειδικά σχήματα προστασίας, που συναντώνται στη βιβλιογραφία ως

Σχήματα Προστασίας Ακεραιότητας Συστημάτων Μεταφοράς (*System Integrity Protection Schemes – SIPS*) ή Ειδικά Σχήματα Προστασίας Συστήματος (*Special Protection Schemes – SPS*) [Kar01], [AL96].

Βασική επιδίωξη των SIPS είναι η προστασία του συστήματος μεταφοράς με σκοπό την αποφυγή εξάπλωσης της αστάθειας και των καταστροφικών συνεπειών της (π.χ. μερική ή ολική σβέση). Αναφορικά με τα SIPS έναντι αστάθειας τάσης, συνηθίζεται να ενεργοποιούνται στα κέντρα ελέγχου, ενώ η λειτουργία τους τείνει να συνδυάζεται ολοένα και περισσότερο με τοπικές ή κεντρικές μεθόδους ανίχνευσης αστάθειας τάσης. Τα τελευταία χρόνια, και δεδομένης της αυξανόμενης χρήσης των PMUs και των τηλεπικοινωνιών στα συστήματα μεταφοράς, έχει καταστεί σαφές ότι το πεδίο της ευστάθειας τάσης είναι ιδιαίτερα πρόσφορο για εφαρμογή των PMUs στην παρακολούθηση και ανίχνευση αστάθειας τάσης [NMB08], [RB01], [RB02]. Ως εκ τούτου, τα SIPS μετασχηματίζονται σε νέα συστήματα παρακολούθησης, ελέγχου και προστασίας ευρείας περιοχής (*Wide-Area Monitoring Protection And Control – WAMPAC*), με σκοπό τη βελτίωση αξιοπιστίας και απόδοσης [Ter11]. Τα δε μέτρα αντιμετώπισης που συνήθως εφαρμόζονται στα WAMPAC αφορούν διορθωτικές δράσεις, όπως αποκοπή φορτίου, αναδιανομή της ενεργού/αέργου παραγωγής ή ενεργοποίηση στοιχείων αντιστάθμισης [ARF09], [VCV07].

Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ραγδαίας διείσδυσης σταθμών ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, εξετάζεται η δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών ως εναλλακτική και ηπιότερη μορφή μέτρων αντιμετώπισης έναντι φαινομένων αστάθειας τάσης [TF07], [TF17]. Σε πολλές αναφορές, εξετάζονται συστήματα προστασίας από κατάρρευση τάσης ή ευρύτερα συστήματα ελέγχου τάσης και παροχής αέργου ισχύος αξιοποιώντας τις δυνατότητες των πηγών με μετατροπείς ισχύος. Στις αναφορές [VLA15], [VAS17], [PSV20], εξετάζονται συστήματα έκτακτης παροχής αέργου ισχύος από σταθμούς με μετατροπείς ισχύος ή διατάξεις αντιστάθμισης που συνδέονται απευθείας στο σύστημα μεταφοράς, ενώ στις αναφορές [VVC13], [ZG14], [BVC18], [AVV15], εξετάζονται οι δυνατότητες συνεισφοράς σε άεργο ισχύ και έλεγχο τάσης από μονάδες ΑΠΕ συνδεδεμένες στη διανομή, διαμορφώνοντας την έννοια του *ενεργού δικτύου διανομής* (*Active Distribution Network – ADN*). Στις αναφορές [OVC20], [OVC21] εξετάζονται οι δυνατότητες έκτακτης συνεισφοράς αέργου ισχύος από διεσπαρμένες μονάδες ΑΠΕ στη διανομή. Καθώς η ένταξη διεσπαρμένων πηγών σε σύστημα και δίκτυο συνεχίζεται, έχει πλέον καταστεί σαφές ότι η σχεδίαση συστημάτων προστασίας από αστάθεια τάσης τα οποία βασίζονται σε προεπιλεγμένα κριτήρια υπότασης και προβαίνουν σε άμεση αποκοπή φορτίου δεν αποτελεί την βέλτιστη σχεδιαστική προσέγγιση, δεδομένου ότι τα προεπιλεγμένα κατώφλια τάσης παραδοσιακά βασίζονταν σε τοπικές ιδιαιτερότητες των συστημάτων [Tay92], [LBV04]. Η σύγχρονη λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς, σε συνδυασμό με το μεταβαλλόμενο μίγμα παραγωγής, καθιστούν τις παραπάνω ιδιαιτερότητες των συστημάτων περισσότερο ευμετάβλητες, ενώ η άμεση αποκοπή φορτίου θα αποφεύγεται όλο και περισσότερο αφενός λόγω της μεταβλητότητας της κατανάλωσης από τη διεσπαρμένη παραγωγή που πολλές φορές προκαλεί ανάποδης φοράς ροές ισχύος στους υποσταθμούς YT/MT και αφετέρου όταν υπάρχει περιθώριο αξιοποίησης έκτακτης λειτουργίας από τις διεσπαρμένες πηγές.

Στην παρούσα εργασία επανεξετάζονται ορισμένα σχήματα προστασίας από παλαιότερες εργασίες, ενώ προτείνονται νέα που εκμεταλλεύονται τις διεσπαρμένες πηγές, αλλά λαμβάνουν υπόψιν και την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ όταν το σύστημα βρίσκεται σε ασταθή λειτουργία. Τέλος γίνεται σύγκριση με σχήμα προστασίας από τη βιβλιογραφία και αναδεικνύονται βασικές σχεδιαστικές παράμετροι που βελτιώνουν την απόδοση ενός σχήματος προστασίας από κατάρρευση τάσης.

1.8 Επισκόπηση βιβλιογραφίας

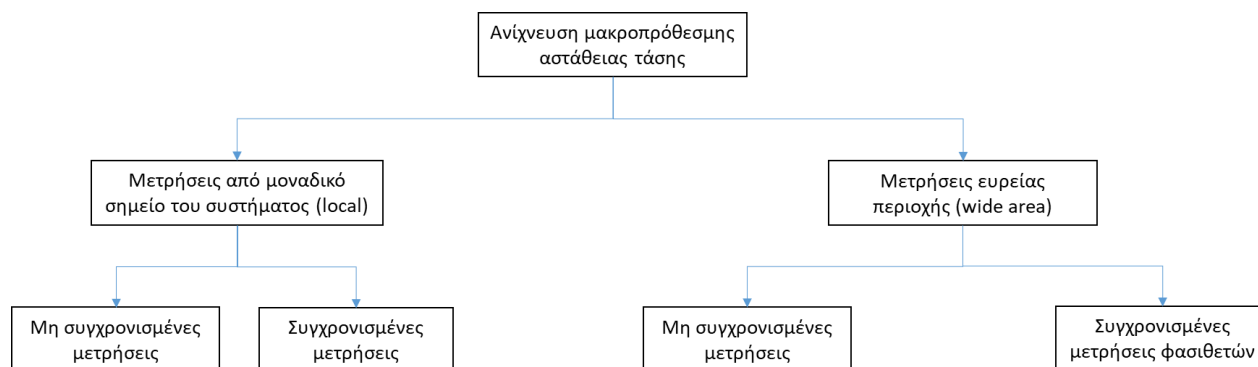
1.8.1 Γενικά

Η ανίχνευση αστάθειας τάσης (*voltage instability detection*) αποσκοπεί στον εντοπισμό συνθηκών παραβίασης της ευστάθειας τάσης σε ένα σύστημα μεταφοράς. Ιδανικά, οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης στοχεύουν στην ανίχνευση της εκδήλωσης της αστάθειας παρά των επιπτώσεων που αυτή επιφέρει στη λειτουργία του συστήματος, καθώς όπως έχει δείχθει στην εργασία [GVC11], ο διαθέσιμος χρόνος για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης έναντι της αστάθειας τάσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του φορτίου, και μπορεί να είναι αρκετά περιορισμένος σε περίπτωση μεγάλης συμμετοχής φορτίου βιομηχανικού τύπου. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δημοσιευτεί πλήθος ερευνητικών εργασιών με βασικό αντικείμενο την ανίχνευση αστάθειας τάσης, κυρίως στη μακροπρόθεσμη και σε πιο

περιορισμένο βαθμό στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στην παρούσα εργασία ωστόσο, η βιβλιογραφική αναφορά θα περιοριστεί στις επιστημονικές εργασίες ανίχνευσης αστάθειας τάσης μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας, καθώς και σε εργασίες υπολογισμού του περιθωρίου ευστάθειας, ενώ επιχειρείται να δοθεί περισσότερη έμφαση στις πιο πρόσφατες εργασίες. Σημειώνεται, ότι η αναφορά του όρου αστάθειας τάσης στο υπόλοιπο της εργασίας θα υπονοεί την αστάθεια τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Στην εργασία [HVC94] γίνεται αναφορά των πρώτων επιστημονικών εργασιών στις οποίες αναπτύχθηκαν δείκτες με σκοπό την ανίχνευση μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, ενώ στην εργασία [GVC11] γίνεται κατηγοριοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης χρησιμοποιώντας μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, με βάση το πλήθος και είδος των μετρήσεων. Στην αναφορά [HTC18] περιγράφονται συνοπτικά πρόσφατοι τοπικοί δείκτες ανίχνευσης αστάθειας τάσης που βασίζονται σε συγχρονισμένες μετρήσεις.

Κατά την αναφορά [GVC11], οι μέθοδοι ανίχνευσης μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το Σχήμα 1-12:



Σχήμα 1-12 Κατηγοριοποίηση μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης βασιζόμενες σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου

Οι μέθοδοι ανίχνευσης που βασίζονται σε δεδομένα από μοναδικό σημείο μέτρησης στο σύστημα καλούνται συνήθως *τοπικές (local)* ή *αποκεντρωμένες (decentralized)*, ενώ όταν βασίζονται σε μετρήσεις από περισσότερα σημεία του συστήματος μεταφοράς χαρακτηρίζονται ως *ευρείας περιοχής (wide-area)*. Μία υποκατηγορία των μεθόδων που βασίζονται σε μετρήσεις ευρείας περιοχής, ανακατασκευάζει την κατάσταση του συστήματος, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί μοντέλο του συστήματος και ώστε να εφαρμοστούν αναλυτικές μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης [GVC11].

Τα πλεονεκτήματα των τοπικών μεθόδων ανίχνευσης είναι η απλότητα και η αξιοπιστία, λόγω των μικρών απαιτήσεων σε εξοπλισμό, όμως συγκεντρώνουν περιορισμένη πληροφορία για την εκτίμηση της ευστάθειας τάσης. Είναι συνεπώς αναμενόμενο ότι η εκτίμηση της ευστάθειας με τοπικές μεθόδους καθίσταται δυσκολότερη σε σχέση με τις μεθόδους που βασίζονται σε μετρήσεις ευρείας περιοχής. Παρόλα αυτά, η βασική ιδέα ανάπτυξης τοπικών μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης επικεντρώνεται στο ότι η διαθέσιμη πληροφορία είναι ικανή ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα επαρκούς ακρίβειας.

Αντιθέτως, οι μέθοδοι που βασίζονται σε δεδομένα ευρείας περιοχής συλλέγουν δεδομένα μετρήσεων από πολλαπλά σημεία του συστήματος, με συνέπεια τη δυνατότητα αξιοποίησής τους τόσο για παρακολούθηση ευστάθειας συστήματος σε πραγματικό χρόνο, όσο και για προστασία και έλεγχο [LKZ07]. Το μειονέκτημά τους έγκειται κυρίως σε απαιτήσεις εξοπλισμού, σε αξιοπιστία, καθώς και στο κόστος. Οι μέθοδοι ευρείας περιοχής μπορούν να διαχωριστούν περαιτέρω σε μεθόδους που απαιτούν γνώση της κατάστασης του συστήματος και σε μεθόδους που διαθέτουν μετρήσεις ευρείας περιοχής συστήματος, χωρίς ωστόσο να απαιτείται η κατάσταση του συστήματος.

Οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης που προϋποθέτουν γνωστή την κατάσταση του συστήματος κάνουν χρήση αναλυτικού μοντέλου του συστήματος, εν αντιθέσει με τις μεθόδους που βασίζονται σε μερική πληροφορία της κατάστασης του συστήματος και βασίζουν την ανάλυσή τους συνήθως σε απλοποιημένο μοντέλο. Η κατάσταση του συστήματος παραδοσιακά υπολογίζεται αξιοποιώντας μετρήσεις από συστήματα SCADA, αλλά τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλο ενδιαφέρον στη βέλτιστη τοποθέτηση PMUs

στο σύστημα μεταφοράς με απώτερο σκοπό το σύστημα να καταστεί πλήρως παρατηρήσιμο από συγχρονισμένες μετρήσεις με PMU. Παρόλα αυτά, οι οικονομικοί περιορισμοί δυσκολεύουν την εφαρμογή τους στην πράξη [KWH14].

1.8.2 Τοπικές μέθοδοι για παρακολούθηση και ανίχνευση αστάθειας τάσης

Οι αποκεντρωμένες ή τοπικές μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο επιχειρούν την ανίχνευση της αστάθειας τάσης συλλέγοντας μετρήσεις από συγκεκριμένα μόνο σημεία ενός συστήματος. Η διαφοροποίηση και αξιοποίηση της τεχνολογίας των PMUs εν συγκρίσει με τις μετρήσεις από RTUs έγκειται στο γεγονός ότι οι συγχρονισμένες μετρήσεις έχουν μεγαλύτερο ρυθμό δειγματοληψίας.

Ένας μεγάλος αριθμός δημοσιευμένων εργασιών εστιάζουν στη μέτρηση του ρεύματος και της τάσης σε ένα ζυγό φορτίου και στην αναγνώριση *συνθηκών προσαρμογής* της σύνθετης αντίστασης (*impedance matching condition*) του φορτίου με αυτήν του συστήματος προς τα ανάντη, υποθέτοντας ότι το τελευταίο μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ισοδύναμο Thévenin δίκτυο, το οποίο παραμένει *σταθερό* κατά τη χρονική διάρκεια του παραθύρου λήψης μετρήσεων και του ελέγχου των συνθηκών προσαρμογής [BHV18]. Η συνθήκη προσαρμογής σύνθετης αντίστασης συγκρίνει το μέτρο της διαφοράς (ή τον λόγο) μεταξύ της τρέχουσας σύνθετης αντίστασης του φορτίου και της σύνθετης αντίστασης του ισοδύναμου Thévenin, προκειμένου να υπολογιστεί δείκτης ευστάθειας τάσης που εκφράζει την *απόσταση* του τρέχοντος σημείου λειτουργίας από το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στον εξεταζόμενο ζυγό φορτίου.

Πέραν των τοπικών μεθόδων που βασίζονται στη συνθήκη προσαρμογής, έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία εναλλακτικές τοπικές μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα που επιχειρούν να ανιχνεύσουν συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε γραμμή μεταφοράς στο σύστημα. Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός στις σημαντικότερες βιβλιογραφικές αναφορές.

1.8.2.1 Τοπικές μέθοδοι βασιζόμενες στη συνθήκη προσαρμογής σύνθετης αντίστασης

Η συγκεκριμένη κατηγορία τοπικών μεθόδων έχει πολύ μεγάλη απήχηση στη διεθνή βιβλιογραφία, αν και παρουσιάζει μία σειρά μειονεκτημάτων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Ίσως η πιο δημοφιλής εργασία είναι η [VBN99], στην οποία οι παράμετροι του ισοδύναμου δικτύου προς τα ανάντη του ζυγού φορτίου υπολογίζονται αριθμητικά με χρήση ελαχίστων τετραγώνων, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο μετρήσεων τάσης και ρεύματος στον εξεταζόμενο ζυγό φορτίου που υπερβαίνει σε πλήθος τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό για την εύρεση μοναδικής λύσης. Στην εργασία [Haq03] παρουσιάζεται παραλλαγή της μεθόδου [VBN99] που χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της τάσης του ζυγού και της ενεργού και αέργου κατανάλωσης από τον ζυγό φορτίου. Η ίδια μέθοδος διευρύνεται στην εργασία [QUI00] με εφαρμογή σε μεμονωμένες διασυνδετικές γραμμές ενός διαδρόμου ισχύος μεταξύ δύο περιοχών σύγχρονα συνδεδεμένων. Στην εργασία αυτή, μία διασυνδετική γραμμή του διαδρόμου αντικαθίσταται από δύο ισοδύναμα δίκτυα στα οποία εφαρμόζεται η μέθοδος της εργασίας [VBN99]. Στην εργασία [JSV00] η μέθοδος της εργασίας [VBN99] εμπλουτίζεται με μία εναλλακτική θεώρηση, στην οποία γίνεται γραμμική προσέγγιση της απόστασης από την αστάθεια αξιοποιώντας το περιθώριο ενεργού ισχύος. Ένα πρακτικό πρόβλημα που εμφανίζεται σε όλες τις παραπάνω μεθόδους σχετίζεται με τις μεταβολές του συστήματος και τον υπεισερχόμενο θόρυβο στις μετρήσεις, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εφαρμογή τους.

Στην εργασία [SVG06] αξιοποιείται η διαφορική μορφή του θεωρήματος Tellegen προκειμένου να υπολογιστεί η σύνθετη αντίσταση Thévenin ως ο λόγος της μεταβολής της τάσης προς τη μεταβολή του ρεύματος. Παρά την πρωτοτυπία της μεθόδου, ο δείκτης παρουσιάζει προβλήματα στην επιλογή του κατωφλίου μεταβολής ρεύματος για διαφορετικά συστήματα μεταφοράς και επηρεάζεται σημαντικά από τον θόρυβο μετρήσεων [YL14].

Στην αναφορά [CT08] προτείνεται μία προσαρμοστική μέθοδος μετρήσεων από PMU και αλγορίθμου πέντε βημάτων για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου Thévenin. Η βασική παρατήρηση στην οποία στηρίζεται η μέθοδος είναι ότι η τάση της πηγής Thévenin θα πρέπει να μειώνεται όταν η απόκλιση μεταξύ της σύνθετης αντίστασης του φορτίου και της υπολογισμένης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thévenin είναι προς την ίδια κατεύθυνση, και να αυξάνεται σε αντίθετη περίπτωση.

Αναφορικά με τις μεθόδους που υπολογίζουν το ισοδύναμο Thévenin, είναι γεγονός ότι η παρακολούθηση του ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να παρουσιάσει μεγάλη ευαισθησία και προβλήματα

σύγκλισης σε παρουσία θορύβου, ενώ συναντά δυσκολίες προσαρμογής όταν συμβαίνουν διακριτές αλλαγές στο σύστημα παραγωγής (π.χ. ενεργοποιήσεις συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης). Πιο συγκεκριμένα, ο θόρυβος από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος καθιστά προβληματική την εκτίμηση των παραμέτρων του ισοδύναμου δικτύου Thévenin. Μία δεύτερη δυσκολία, που επισημαίνεται στις εργασίες [Pal92] και [CT07], αφορά στο ότι κατά τις συνθήκες βελτιστοποίησης της ισχύος του φορτίου το δίκτυο συνεχίζει να αναπαρίσταται από το ίδιο ισοδύναμο Thévenin μέσω της στατικής *PV* χαρακτηριστικής, ενώ είναι αδιαμφισβήτητο ότι συστήματα ελέγχου όπως τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών ή οι ρυθμιστές τάσης και τα ΣΑΤΥΦ έχουν καθοριστική επίδραση στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς του συστήματος μεταφοράς, και συνεπώς και του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin. Επιπρόσθετα, η υπόθεση ότι κατά τη βελτιστοποίηση το φορτίο αυξάνει υπό σταθερό συντελεστή ισχύος δεν είναι κατ' ανάγκη αληθές. Τέλος, όπως έχει δείχθει στην εργασία [VS07], δεδομένου ότι στο ισοδύναμο Thévenin ανήκουν και τα φορτία όλων των υπόλοιπων ζυγών του συστήματος, η συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων ικανοποιείται μετά την εκδήλωση της αστάθειας τάσης. Τέλος, στην εργασία [ARM16] υποστηρίζεται ότι ο υπολογισμός του ισοδύναμου Thévenin για διαφορετικά σημεία λειτουργίας συνεχίζει να αποτελεί ένα πρόβλημα που δεν έχει επιλυθεί ικανοποιητικά, ενώ στην αναφορά [LVT15] περιγράφονται οι τεχνικές δυσκολίες που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του ισοδύναμου Thévenin κυκλώματος και γίνεται μία συγκριτική ανάλυση τριών μεθόδων υπολογισμού του ισοδύναμου κυκλώματος σε ένα μικρό σύστημα δοκιμών, όπου και προτείνεται ο υπολογισμός των παραμέτρων του ισοδύναμου κυκλώματος με χρήση μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων παρουσιάζοντας σχετικά αποδεκτή συμπεριφορά σε παρουσία θορύβου μετρήσεων. Ωστόσο, δεδομένου ότι το χρονικό παράθυρο των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι μεγάλο, οι υπεισερχόμενες καθυστερήσεις στην αναγνώριση της αστάθειας και του περιθωρίου αυτής είναι σημαντικές. Στην αναφορά [YL14] συγκρίνεται η επίδοση των δεικτών ανίχνευσης αστάθειας [VBN99], [SVG06], [CT08] και [WPL11] σε συγκεκριμένο σύστημα δοκιμών, και τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μόνο οι μέθοδοι [VBN99] και [SVG06] ανιχνεύουν επιτυχώς δύο συμβάντα αστάθειας τάσης, γεγονός που εγείρει προβληματισμούς ως προς τη χρήση μεθόδων που βασίζονται στη συνθήκη προσαρμογής σύνθετης αντίστασης. Στην εργασία [BBN13] γίνεται μία αναφορά στις τεχνικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μέθοδοι που επιχειρούν, μέσω τοπικών μετρήσεων, να αναγνωρίσουν ένα ισοδύναμο δίκτυο Thévenin και προτείνεται ο υπολογισμός ενός δείκτη αστάθειας, που αποτελεί εξέλιξη της εργασίας [VBN99], εξετάζοντας ζυγούς δικτύου σε διαδρόμους ισχύος και λαμβάνοντας υπόψη στους υπολογισμούς όλη την ισχύ άφιξης στον ζυγό, ιεραρχώντας τους ζυγούς του διαδρόμου ανάλογα με το περιθώριο φόρτισής τους. Σημειώνεται ότι τα ισοδύναμα Thévenin δίκτυα στους ζυγούς άφιξης του διαδρόμου εμφανίζουν επικάλυψη.

1.8.2.2 Υβριδικές μέθοδοι παρακολούθησης και ανίχνευσης αστάθειας τάσης

Τα τελευταία χρόνια δημοσιεύονται εργασίες προς την κατεύθυνση της υβριδικής προσέγγισης, κατά την οποία αξιοποιείται η μέθοδος προσαρμογής σύνθετης αντίστασης και συνδυάζεται με τις ευαισθησίες από την Ιακωβιανή μήτρα εξισώσεων ροής φορτίου, με απώτερο στόχο την εκτίμηση ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο αξιοποιώντας το κριτήριο προσαρμογής σύνθετων αντιστάσεων.

Η εργασία [ZSL18] αξιοποιεί τις προσεγγίσεις των δημοσιεύσεων [RS07] και [YL15], στις οποίες η *N-1* κατάσταση υπολογίζεται γραμμικά με χρήση των ευαισθησιών από την Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων ροής φορτίου του τρέχοντος σημείου λειτουργίας, προκειμένου να εφαρμοστεί ο δείκτης ευστάθειας της εργασίας [MAj17].

Αν και η εφαρμογή της προσαρμογής των σύνθετων αντιστάσεων στην ανάλυση ασφάλειας τάσης έχει αποκτήσει απήχηση, το βασικό μειονέκτημα των εν λόγω υβριδικών προσεγγίσεων αποτελεί το γεγονός ότι δεν μειώνονται οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό σε σχέση με τις μεθόδους ευρείας περιοχής, καθώς προκειμένου να υπολογιστούν οι ευαισθησίες της πλήρους Ιακωβιανής μήτρας ροής φορτίου, είναι απαραίτητη η εκτίμηση κατάστασης του συστήματος. Επιπρόσθετα, οι συγκεκριμένες υβριδικές μέθοδοι περιορίζονται σε στατική ανάλυση ασφάλειας τάσης, πράγμα που εισάγει ατέλειες όσον αφορά τις επιδράσεις μηχανισμών όπως μεταξύ άλλων τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης και τα ΣΑΤΥΦ.

1.8.2.3 Εναλλακτικές τοπικές μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης

Στην εργασία [GS97] προτείνεται τοπικός δείκτης αστάθειας τάσης αποκλειστικά για ακτινικά δίκτυα, για τον υπολογισμό του οποίου μετασχηματίζεται ένα ακτινικό δίκτυο σε ισοδύναμο δίκτυο δύο ζυγών,

θεωρώντας όμως ότι το ισοδύναμο δίκτυο κατά τη βελτιστοποίηση δεν μεταβάλλεται. Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν έχει δοκιμαστεί σε μεγάλα συστήματα λόγω περιορισμού στις υποθέσεις της και επίσης υπάρχει δυσκολία στον εντοπισμό των κρίσιμων ζυγών στο σύστημα.

Στο [VG04] γίνεται εκτίμηση του σημείου κατάρρευσης από τοπικές μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων σε ψηφιακό ηλεκτρονόμο γραμμής μεταφοράς, με βάση τη θεώρηση ότι στο σημείο κατάρρευσης η μεταβολή της αποστελλόμενης ισχύος από το άκρο αναχώρησης της γραμμής καταναλώνεται εξ'ολοκλήρου από την ίδια τη γραμμή. Ωστόσο η ανάλυση είναι στατική, δεν λαμβάνει υπόψη τον θόρυβο των μετρήσεων, ενώ ο καθορισμός κατωφλίων για τους υπολογισμούς δεν είναι συστηματικός. Στην αναφορά [ARM16] προτείνεται αντίστοιχος δείκτης ευστάθειας τάσης που βασίζεται στις εξισώσεις ροής ισχύος γραμμής μεταφοράς και στηρίζεται στον απειρισμό της ευαισθησίας της τάσης ως προς τη ροή ισχύος στο σημείο κατάρρευσης. Η θεώρηση όμως ότι το μέτρο της τάσης του ζυγού αναχώρησης έχει μηδενική ευαισθησία (PV ζυγός) ως προς την ενεργό ισχύ, ότι η μετρούμενη από το PMU άεργος ισχύς διορθώνεται βάσει της εκτιμώμενης εγκάρσιας επαγωγικής αγωγιμότητας της γραμμής, καθώς και το ότι η μέθοδος έχει δοκιμαστεί αποκλειστικά σε στατικό μοντέλο, μειώνουν την αξιοπιστία της ακόμη και όταν ληφθεί υπόψη το ισοδύναμο Thévenin κύκλωμα βάσει της μεθόδου [VBN99].

Μία διαφορετική προσέγγιση παρουσιάζεται στην εργασία [YLC18] όπου η ιδέα βασίζεται στο γεγονός ότι η χαρακτηριστική φορτίου και δικτύου έχουν την ίδια εφαιπόμενη στο σημείο κατάρρευσης στο επίπεδο PV και ως εκ τούτου ο δείκτης ευστάθειας τάσης υπολογίζεται ως η διαφορά των εφαιπόμενων της χαρακτηριστικής δικτύου από την χαρακτηριστική φορτίου. Η συγκεκριμένη θεώρηση δεν διερευνά την επίδραση του θορύβου και δεν λαμβάνει υπόψη μηχανισμούς αστάθειας όπως ΣΑΤΥΦ, και συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης αλλά ούτε και διαταραχές στην τοπολογία, ενώ ενδεχομένως να παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία σε πρακτική εφαρμογή όπου η χαρακτηριστική φορτίου είναι πιθανόν να μεταβάλλεται σε πραγματικό χρόνο.

Η εργασία [MR02] παρουσιάζει έναν τοπικό δείκτη ευστάθειας τάσης ο οποίος εστιάζει στη λειτουργία γραμμής μεταφοράς με ισοδύναμο ανάντη και κατάντη δίκτυο ανιχνεύοντας το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της, όμως η υπόθεση της απαλοιφής της διαφοράς γωνίας των δύο άκρων είναι προβληματική, τουλάχιστον για σημεία λειτουργίας όπου εμφανίζεται μεγάλη ροή ισχύος στη γραμμή, ενώ η μέθοδος δεν έχει δοκιμαστεί λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική του συστήματος ή τον θόρυβο μετρήσεων ώστε να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά της. Παρόμοιας λογικής τοπικοί δείκτες ευστάθειας τάσης που αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένη γραμμή μεταφοράς παρουσιάζονται στην εργασία [MJY98], στην οποία οι υπολογισμοί αφορούν στην ανίχνευση του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε γραμμή μεταφοράς διαχωρίζοντας την επίδραση της ενεργού και αέργου ισχύος υπολογίζοντας ξεχωριστούς δείκτες, όμως η ανάλυση περιορίζεται μόνο στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

Στην εργασία [VVC08] παρουσιάζεται μία μέθοδος βασιζόμενη σε τοπικές μετρήσεις ενός υποσταθμού YT/MT η οποία στηρίζεται στην παραβίαση των ικανών συνθηκών ευστάθειας τάσης που παρουσιάστηκαν στην εργασία [MIC87]. Στη συγκεκριμένη μέθοδο επιτηρείται η ευστάθεια παρακολουθώντας τη χρονική απόκριση της ρυθμιζόμενης από τα ΣΑΤΥΦ τάσης και αποστέλλεται σήμα συναγερμού όταν το ΣΑΤΥΦ αδυνατεί να ελέγξει την τάση μετά από έναν αριθμό αποτυχημένων προσπαθειών. Στις εργασίες [VS07] και [MLV11] εξετάζεται η συμπεριφορά της συγκεκριμένης μεθόδου σε ένα σύστημα τριών και εννέα ζυγών αντίστοιχα, ενώ στην εργασία [LMV11] διερευνάται η επίδοση της ίδιας μεθόδου σε σύστημα έντεκα ζυγών υπό την παρουσία ταυτόχρονης δράσης των ΣΑΤΥΦ YYT/YT και YT/MT. Συνέχεια των παραπάνω εργασιών αποτελούν οι [VLG10] και [VLK15], στις οποίες παρουσιάζεται ολοκληρωμένο και αποκεντρωμένο σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης, ενσωματώνοντας σύστημα άμεσης αποκοπής φορτίου για την προστασία συστήματος από κατάρρευση. Στην εργασία [RWH13] παρουσιάζεται ένα διανεμημένο σύστημα ανίχνευσης αστάθειας τάσης και προστασίας συστήματος βασισμένο σε παραλλαγή της μεθόδου της εργασίας [VVC08]. Η αρχική παραλλαγή παρουσιάζεται στο [WPV17], η οποία εκτιμά την αδυναμία ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ από τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά της ελεγχόμενης από το ΣΑΤΥΦ τάσης, χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση με αναδρομικά γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα. Δείχνεται ότι η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικό χρόνο και είναι προσαρμοστική σε μεταβολές της τοπολογίας του δικτύου, ενώ εξετάζεται η δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ κοντινών υποσταθμών με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας του σχήματος προστασίας. Για τη λήψη των μέτρων αντιμετώπισης δεν απαιτείται συμφωνία μεταξύ των διανεμημένων ελεγκτών για λόγους αποφυγής ανεπιθύμητων χρονικών καθυστερήσεων.

1.8.3 Μέθοδοι παρακολούθησης και ανίχνευσης αστάθειας τάσης με μετρήσεις ευρείας περιοχής

Εν αντιθέσει με τις τοπικές μεθόδους ανίχνευσης αστάθειας τάσης, υπάρχει πλήθος εργασιών οι οποίες βασίζονται σε συλλογή δεδομένων από τουλάχιστον δύο σημεία στο σύστημα, καθώς και μεθόδων οι οποίες ανακατασκευάζουν την κατάσταση του συστήματος, προκειμένου να κάνουν χρήση μοντέλου δικτύου. Παρακάτω διαχωρίζονται οι εργασίες σε μεθόδους οι οποίες απαιτούν γνώση της κατάστασης του συστήματος και σε μεθόδους που απαιτούν μόνο ύπαρξη μετρήσεων από μία διευρυμένη περιοχή στο σύστημα, χωρίς όμως να είναι γνωστή η πλήρης κατάσταση του συστήματος.

1.8.3.1 Ανίχνευση αστάθειας τάσης αξιοποιώντας την κατάσταση συστήματος

Παραδοσιακά, το διάνυσμα κατάστασης (μέτρα και γωνίες τάσεων ζυγών) του συστήματος υπολογίζεται από μετρήσεις SCADA, ενώ υπάρχουν πρόσφατες εργασίες [XA18] όπου το πρόβλημα της (στατικής) εκτίμησης κατάστασης μεταπίπτει σε γραμμικό αξιοποιώντας συγχρονισμένες μετρήσεις από PMU. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η ανασύνθεση της κατάστασης του συστήματος σήμερα συνεχίζει να γίνεται από μετρήσεις SCADA [Zha19] και μπορεί να επιτύχει ρυθμούς ανανέωσης μικρότερους του δευτερολέπτου [CRG15] αξιοποιώντας τεχνικές παράλληλης επεξεργασίας. Αξίζει να σημειωθεί πως, εξαιτίας της ολοένα και αυξανόμενης διείσδυσης ΑΠΕ στο σύστημα μεταφοράς και διανομής, η σημερινή τάση στον χώρο της εκτίμησης κατάστασης εστιάζεται στη δυναμική εκτίμηση κατάστασης [Zha19], [Zha21], η οποία στόχο έχει να υπολογίσει σε πραγματικό χρόνο την εκτίμηση κατάστασης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική του συστήματος.

Οι πρώτες εργασίες πάνω στην ανίχνευση αστάθειας τάσης στηρίχθηκαν σε κεντρικές μεθόδους με αξιοποίηση του στατικού μοντέλου του συστήματος, οι οποίες λόγω του επαναληπτικού χαρακτήρα των υπολογισμών τους δεν ήταν κατάλληλες για εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιήθηκαν περισσότερο για τις ανάγκες σχεδιασμού συστήματος. Στην εργασία [KG86] αναπτύσσεται ένας δείκτης ευστάθειας τάσης ο οποίος βασίζεται σε στατική ανάλυση, αλλά χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα όρια υπερδιέγερσης των μονάδων, συσχετίζει την ευστάθεια τάσης με τον βαθμό αδυναμίας επίλυσης των εξισώσεων ροής φορτίου που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος, ενώ στην εργασία [WWL13] επεκτείνεται η ανάλυση [KG86], με συμπερίληψη στον δείκτη ευστάθειας ισοδύναμου μοντέλου σύγχρονης μηχανής, δείχνοντας ότι η συμπερίληψη του εν λόγω δυναμικού μοντέλου αναβαθμίζει σημαντικά την ακρίβεια του δείκτη της εργασίας [KG86], ειδικά όταν υπάρχουν μονάδες κοντά σε κέντρα κατανάλωσης. Ωστόσο, η συγκεκριμένη μέθοδος υποθέτει ότι οι παράμετροι των μονάδων είναι ήδη γνωστές ή ότι μπορούν να εκτιμηθούν με τοπικές συγχρονισμένες μετρήσεις, καθώς και ότι υπάρχουν συγχρονισμένες μετρήσεις σε όλους τους ζυγούς γεννητριών. Στην αναφορά [FOC90] υπολογίζονται οι συνθήκες αστάθειας τάσης με βάση τις ευαισθησίες της τάσης του φορτίου ως προς την άεργο κατανάλωσή του. Οι υπολογισμοί γίνονται από τον αντίστροφο Ιακωβιανό πίνακα ροής φορτίου κατά την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τα περιθώρια αέργου παροχής ισχύος των μονάδων. Η μέθοδος όμως απαιτεί αναλυτικό υπολογισμό των περιθωρίων αέργου παραγωγής των μονάδων, το οποίο δεν είναι κατ'ανάγκη διαθέσιμο σε πραγματικό χρόνο, ενώ το περιθώριο ευστάθειας τάσης δίνεται σε MVA ανά ζυγό φορτίου, αντί για την πιο χειροπιαστή ένδειξη σε MW. Στην εργασία [TT88] γίνεται χρήση της ελάχιστης ιδιάζουσας τιμής της Ιακωβιανής μήτρας των εξισώσεων ροής φορτίου, η οποία όμως μπορεί να είναι υπολογιστικά απαιτητική για μεγάλα συστήματα και για τον λόγο αυτό προτείνεται αποδοτικό τρόπο υπολογισμού της στην εργασία [LSA92] κάνοντας χρήση της Ιακωβιανής μήτρας αέργου ροής φορτίου J_{QV} , ενώ στην αναφορά [CSQ96] συγκρίνεται η επίδοση της μεθόδου [LSA92] με μία παραλλαγή στην οποία ο δείκτης υπολογίζεται από την J_{QV} , αφαιρώντας τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν στην ελάχιστη ιδιάζουσα τιμή και αντικαθιστώντας τα από μοναδιαία διανύσματα για να αποφευχθεί η μη-αντιστρεψιμότητα του πίνακα στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

1.8.3.2 Μηχανική μάθηση και δέντρα αποφάσεων

Μία διαφορετική προσέγγιση για την ανίχνευση μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης αξιοποιεί τεχνικές μάθησης με χρήση δέντρων αποφάσεων [CWP93], [DSV09]. Τα δέντρα αποφάσεων δημιουργούνται από εκτενείς μελέτες εκτός λειτουργίας από μία μεγάλη βάση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων του συστήματος και για πολλά σημεία λειτουργίας αλλά και διαφορετικές διαταραχές. Το δέντρο απόφασης ιεραρχεί

καταλλήλως τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βάσει επιλεχθέντων χαρακτηριστικών. Δημιουργείται με τον τρόπο αυτό ένα δέντρο αποφάσεων που επιχειρεί να κατατάξει το τρέχον σημείο λειτουργίας του συστήματος σε κάποια κατηγορία καταστάσεων από τις ήδη αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων ώστε να εξάγει συμπέρασμα ως προς την αστάθεια τάσης σε πραγματικό χρόνο. Η αδυναμία όμως της μεθόδου αφορά εστιάζεται στο ότι στηρίζεται σε εν γένει παλαιότερα δεδομένα του συστήματος, τα οποία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά και για τρέχουσα κατάσταση, γεγονός που μπορεί να μην ισχύει. Στην εργασία [DSV09] γίνεται περιοδική ενημέρωση του δέντρου απόφασης από τις καταστάσεις του συστήματος της προηγούμενης ημέρα λειτουργίας, αλλά και της πρόβλεψης για την επόμενη, προκειμένου να ενημερώνεται εγκαίρως η βάση δεδομένων. Στην αναφορά [AV18] προτείνεται η χρήση δέντρου αποφάσεων για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων από προσομοιώσεις εκτός λειτουργίας για την ευστάθεια τάσης του συστήματος με βάση το τρέχον σημείο λειτουργίας. Η μέθοδος εκτιμά την καμπύλη PV του συστήματος από αποθηκευμένες προσομοιώσεις και εξάγει το περιθώριο ευστάθειας τάσης του τρέχοντος σημείου λειτουργίας, ωστόσο η εκτίμηση της καμπύλης γίνεται με βάση αυθαίρετα επιλεγμένες μεταβολές φορτίου, που δεν συνάδουν κατά βάση με αυτές που θα γίνουν και στην πραγματική λειτουργία. Παρόμοιες λογικές αποτελούν και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν νευρωνικά δίκτυα με μειωμένα [PKK98] ή με πλήρη μοντέλα συστήματος [CJ04], [KST06], [ZAR10], [LA17], [CMH20]. Οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις καλούνται να διαμορφώσουν ένα κατά το δυνατόν εκτενές σύνολο μάθησης (βάσης δεδομένων), με σκοπό να χρησιμοποιηθεί ένα σύνολο παραμέτρων και χαρακτηριστικών του συστήματος για αντιστοίχιση της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος με την πλησιέστερη αποθηκευμένη στη βάση δεδομένων κατάσταση, προκειμένου να εξαχθεί συμπέρασμα ως προς την αστάθεια τάσης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της αυξανόμενης χρήσης των PMUs αλλά και της ωρίμανσης των τεχνικών μηχανικής μάθησης, τείνουν να εμφανίζονται όλο και πιο συχνά σχετικές εργασίες. Ομοίως με τα δέντρα αποφάσεων, το βασικό πρόβλημα των συγκεκριμένων μεθόδων αποτελεί η διαδικασία της μάθησης και πιο συγκεκριμένα η δημιουργία και συντήρηση της βάσης δεδομένων με αντιπροσωπευτικό αριθμό ευσταθών και ασταθών σεναρίων, τα οποία είναι αρκετά δύσκολο να κατασκευαστούν, λόγω των πρακτικά μη μετρήσιμων πιθανών καταστάσεων στις οποίες μπορούν να λειτουργήσουν τα σύγχρονα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς.

1.8.3.3 Προσαρμογή αντιστάσεων από μετρήσεις ευρείας περιοχής

Παρά τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπάρχει αξιοσημείωτος αριθμός από πρόσφατες μεθόδους εκτίμησης του Thévenin ισοδύναμου κυκλώματος, οι οποίες αξιοποιούν μετρήσεις ευρείας περιοχής με σκοπό την ανίχνευση αστάθειας τάσης. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να θεωρηθούν επέκταση των τοπικών μεθόδων εκτίμησης του ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin και παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρούσα ενότητα. Παρά τη φαινομενική χρησιμότητα των εν λόγω μεθόδων, είναι αμφίβολη η αναγκαιότητα συσχέτισης πληροφορίας που είναι διαθέσιμη σε ένα ΚΕΕ με τοπικές μεθόδους.

Μία διαφορετική προσέγγιση του θεωρήματος προσαρμογής σύνθετης αντίστασης δίνεται στην αναφορά [LCX10], στην οποία αποσυνπλέκεται το πραγματικό σύστημα σε ένα σύνολο από συζευγμένα ισοδύναμα κυκλώματα Thévenin (πολύθυρο ισοδύναμο Thévenin), ένα για κάθε ζυγό φορτίου. Στην εργασία αναδεικνύεται το γεγονός ότι στη μεγιστοποίηση της ισχύος της συνολικής ισχύος του συστήματος δεν παρουσιάζεται την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης σε τουλάχιστον ένα από τα αποσυνζευγμένα Thévenin κυκλώματα. Συνέχεια της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η [WPL11], στην οποία εφαρμόζεται το θεώρημα προσαρμογής σύνθετης αντίστασης στα συζευγμένα μεταξύ τους Thévenin κυκλώματα, σε καθένα από τα οποία υπάρχει επιπρόσθετο στοιχείο, σε μορφή είτε πηγής τάσης, είτε παράλληλου φορτίου σταθερής ισχύος, είτε προτιμότερα σύνθετης αντίστασης, που λαμβάνει υπόψιν την παρουσία των υπόλοιπων μη γραμμικών φορτίων στο σύστημα. Η μέθοδος, αν και στατική, υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το περιθώριο ευστάθειας τάσης, αλλά αφενός απαιτεί εγκατάσταση PMU στους ζυγούς όλων των μονάδων και φορτίων και αφετέρου λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο για ομοιόμορφη αύξηση φορτίου, όπως αναφέρεται στις εργασίες [LC14] και [BHV18]. Εξαιτίας του τελευταίου μειονεκτήματος, βελτίωση της εκτίμησης περιθωρίου επιτυγχάνεται στην αναφορά [LC14] για την περίπτωση της μη ομοιόμορφης αύξησης των φορτίων, όπου γίνεται χρήση ενός επιπρόσθετου εγκάρσιου στοιχείου στο κύκλωμα Thévenin. Στην αναφορά [BHV18] χρησιμοποιείται ο ίδιος δείκτης προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης όπως στην εργασία [WPL11], με τη διαφορά ότι γίνεται εκμετάλλευση της μερικής παρατηρησιμότητας του συστήματος μέσω συγχρονισμένων μετρήσεων. Η σύνθετη αντίσταση Thévenin μεταβάλλεται δυναμικά και υπολογίζεται ως ο λόγος της διαφοράς τάσης ως προς τη διαφορά ρεύματος φορτίου, εκφράζοντας την τάση του ζυγού φορτίου ως πολυωνυμική συνάρτηση του ρεύματος, ενώ οι παράμετροι Thévenin υπολογίζονται όπως στην εργασία

[WPL11] έχοντας όμως πληροφορία μόνο από το ελαττωμένο ισοδύναμο σύστημα που εκτείνεται στα όρια του παρατηρήσιμου συστήματος.

Στην αναφορά [PWX13] παρουσιάζεται μέθοδος αποσύνθεσης ενός συστήματος μεταφοράς σε ένα ισοδύναμο σύνολο από υποσυστήματα ακτινικών δικτύων τύπου Thévenin και δίνονται κριτήρια εύρεσης του πιο κρίσιμου ζυγού και γεννήτριας που συμβάλλουν στην αστάθεια τάσης. Στην ίδια μέθοδο ανίχνευσης αστάθειας τάσης βασίζεται και η αναφορά [ASM20] η οποία υπολογίζει τα αποδοτικότερα μέτρα αντιμετώπισης υπολογίζοντας την επίδρασή τους στην ευαισθησία του περιθωρίου ευστάθειας τάσης.

Στις αναφορές [MAj17] και [MA17] συσχετίζεται ο δείκτης της εργασίας [VBN99] με τις ευαισθησίες του μέτρου τάσης και γωνίας του ζυγού φορτίου ως προς την παράμετρο φόρτισης του συστήματος λ. Η μέθοδος μπορεί να λαμβάνει επίσης υπόψη την επίδραση των αέργων περιθωρίων των μονάδων, γεγονός που απαιτεί πληροφορία από την Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων ροής φορτίου του συστήματος, αλλά και της αέργου φόρτισης των μονάδων. Το πλεονέκτημα της μεθόδου εντοπίζεται στο γεγονός ότι ο υπολογισμός δεν απαιτεί πολλαπλές μετρήσεις, παρά τις μετρήσεις του τρέχοντος σημείου λειτουργίας και συνεπώς αίρεται η απαίτηση του σταθερού Thévenin δικτύου κατά το χρονικό παράθυρο μετρήσεων.

Στην αναφορά [LRB03] συλλέγονται δεδομένα από τα δύο άκρα των γραμμών που βρίσκονται σε διάδρομο ισχύος και υπολογίζεται ισοδύναμο κύκλωμα του διαδρόμου και του ανάντη δικτύου, ωστόσο η μέθοδος υποθέτει ότι το ανάντη σύστημα του διαδρόμου είναι ένα σχετικά σταθερό σύστημα παραγωγής, γεγονός που δεν ισχύει κατ'ανάγκη στην πράξη. Στις εργασίες [WH01] και [WH02] παρουσιάζεται μία μέθοδος που συνδυάζει μετρήσεις από PMU γειτονικών ζυγών προκειμένου να προτείνει έναν βελτιωμένο τρόπο υπολογισμού του δικτύου Thévenin σε σχέση με την εργασία [VBN99] και να υπολογίσει δείκτη εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης που βασίζεται σε εκτιμήσεις αλλαγής του φορτίου προς ορισμένες επιλεγμένες κατευθύνσεις.

Στην εργασία [MB03] παρουσιάζεται μία μέθοδος η οποία προτείνει τη συλλογή δεδομένων από γεννήτριες και φορτία πλησίον της περιοχής στην οποία εστιάζεται το ενδιαφέρον για τη σύνθεση ενός πολύθυρου (*multi-port*) Thévenin δικτύου και την παρακολούθηση της συνθήκης μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Ωστόσο και η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει ιδιαίτερη ευαισθησία στον υπολογισμό του κυκλώματος Thévenin.

Στην αναφορά [PRO14] γίνεται χρήση του Thévenin ισοδύναμου δικτύου και της έννοιας της σχετικής ηλεκτρικής απόστασης μεταξύ των ζυγών φορτίου και γεννητριών προκειμένου να υπολογιστεί δείκτης ευστάθειας τάσης, ο οποίος όμως απαιτεί γνώση και αντιστροφή της μήτρας αγωγιμοτήτων του δικτύου, ενώ παρουσιάζει προβλήματα σε περίπτωση αλλαγής τοπολογίας του συστήματος.

Μία διαφορετική προσέγγιση για την ανίχνευση αστάθειας τάσης παρουσιάζεται στην εργασία [HSD16], η οποία στηρίζεται στη χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών μίας περιοχής φορτίου, η οποία οριοθετείται από N συνοριακούς ζυγούς. Η περιοχή φορτίου συνδέεται με N διασυνδετικές γραμμές με το υπόλοιπο σύστημα και υπολογίζει ένα ισοδύναμο δίκτυο $N+1$ ζυγών θεωρώντας ότι όλες οι ισοδύναμες διασυνδετικές γραμμές συνδέονται με μία ισοδύναμη πηγή τάσης Thévenin που επίσης υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο. Για κάθε ισοδύναμη διασυνδετική γραμμή η μέθοδος υπολογίζει το όριο φόρτισής της ως προς τις παραμέτρους του ισοδύναμου δικτύου, οι οποίες διαμορφώνονται σε πραγματικό χρόνο στους συνοριακούς ζυγούς της περιοχής ενδιαφέροντος. Η μέθοδος επεκτείνεται στην εργασία [HSS17], με σκοπό την ανάλυση ασφάλειας τάσης και υπολογισμό περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο με το κριτήριο $N-1$.

Μία μέθοδος η οποία εμφανίζει ότι ξεπερνάει τη δυσκολία των μετρήσεων PMU που παρουσιάζονται στο [VBN99] είναι η [RKS20], στην οποία προτείνεται υβριδική προσέγγιση εκτίμησης ευστάθειας και ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο με υπολογισμό δείκτη ευστάθειας που λαμβάνει υπόψη το περιθώριο αέργου παραγωγής των μονάδων προσεγγίζοντάς το με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Η ανάλυση χρησιμοποιεί διαθέσιμες μετρήσεις PMU από τους ζυγούς γεννητριών και φορτίων και υπολογίζει δείκτη ευστάθειας τάσης με και χωρίς πρόβλεψη εξάντλησης περιθωρίων παροχής αέργου παραγωγής τόσο για την τρέχουσα -διαθέσιμη- κατάσταση του συστήματος όσο και για εν δυνάμει $N-1$ καταστάσεις κάνοντας χρήση της ταχείας μεθόδου υπολογισμού της εργασίας [RS07]. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού αστάθειας και ασφάλειας τάσης παρουσιάζει ωστόσο δυσκολίες υλοποίησης, καθώς θεωρεί ότι υπάρχουν διαθέσιμες PMU μετρήσεις σε όλους τους ζυγούς γεννητριών και φορτίων σε ένα σύστημα μεταφοράς, πράγμα όχι πάντα

εφικτό. Παρόμοιας λογικής εργασία είναι η [YL15] η οποία εφαρμόζει υβριδική μέθοδο προκειμένου να εφαρμόσει τον δείκτη της εργασίας [MB03] στην τρέχουσα αλλά και σε πιθανές $N-1$ καταστάσεις. Προκειμένου να αποφευχθεί ο υπολογισμός των πιθανών $N-1$ καταστάσεων με επαναληπτικές μεθόδους, υλοποιείται γραμμική προσέγγιση με χρήση ευαισθησιών από την Ιακωβιανή μήτρα της ροής φορτίου που αντιστοιχεί στην τρέχουσα κατάσταση για κάθε εξεταζόμενη διαταραχή, υπολογίζοντας ένα ισοδύναμο σύστημα, από το οποίο αφαιρείται το στοιχείο δικτύου και μεταβάλλονται κατάλληλα οι εγχύσεις ισχύος των ζυγών στα άκρα του. Η μέθοδος αν και επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση σε υπολογιστικό φόρτο χαρακτηρίζεται από τα προαναφερόμενα μειονεκτήματα του υπολογισμού του ισοδύναμου ανάντη δικτύου, ενώ η ακρίβεια των υπολογισμών των $N-1$ καταστάσεων εξαρτάται από τον ρυθμό ανανέωσης της εκτίμησης κατάστασης, προκειμένου να επανυπολογιστεί η Ιακωβιανή μήτρα.

1.8.3.4 Με διαθέσιμη την κατάσταση του συστήματος

Μία σημαντική κατηγορία μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσεως υποθέτει ότι υπάρχει επάρκεια συγχρονισμένων μετρήσεων έτσι ώστε να είναι διαθέσιμη η τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Συνήθως οι μέθοδοι που κατατάσσονται στην εν λόγω κατηγορία κάνουν χρήση μοντέλου συστήματος, γεγονός που προσδίδει πολυπλοκότητα αλλά και καλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα, πάντα σε συνάρτηση με την ακρίβεια και πιστότητα του μοντέλου.

Στις εργασίες [VLL11] και [LZV16] αξιοποιείται η $Q-V$ ευαισθησία σε έναν υποσταθμό για την ένδειξη αστάθειας τάσης. Ανά δύο διαδοχικές μετρήσεις υπολογίζονται οι ευαισθησίες κάθε γραμμής που συνδέεται με ζυγό εξοπλισμένο με PMU και αυτές κατατάσσονται σε δύο γκρουπ θετικών και αρνητικών ευαισθησιών κρατώντας ιστορικό ορισμένων δευτερολέπτων. Στη συνέχεια υπολογίζονται η σταθμισμένη μέση θετική και αρνητική ευαισθησία κάθε γραμμής με σκοπό τον υπολογισμό της $Q-V$ ευαισθησίας του ζυγού. Οι συνολικές ευαισθησίες των υποσταθμών αποστέλλονται στο KEE και οι ζυγοί με τις απολύτως μικρότερες ευαισθησίες θεωρούνται οι λιγότερο εύρωστοι και συνεπώς επιρρεπείς σε εμφάνιση αστάθειας τάσης. Τα αποτελέσματα ωστόσο σε προσομοιώσεις του blackout στο δυτικό ΣΗΕ των ΗΠΑ δείχνει ακαμψία των ευαισθησιών καθώς το σύστημα οδεύει προς κατάρρευση.

Στην αναφορά [SSS12] παρακολουθείται μέσω συγχρονισμένων μετρήσεων το μέτρο, η απόκλιση και ο ρυθμός απόκλισης των τάσεων κάθε ζυγού φορτίου μίας επιφορτισμένης περιοχής και διαμορφώνεται σε πραγματικό χρόνο δείκτης ευστάθειας τάσης, ο οποίος φιλτράρεται ώστε να αποφεύγονται οι υπολογισμοί του όταν αναγνωρίζονται απότομες αιχμές από μεταβατικά βραχυπρόθεσμης κλίμακας στο σύστημα και αποτελείται από συντελεστές βαρύτητας, οι τιμές των οποίων ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο. Η επιλογή όμως κατωφλίων απόκλισης τάσης και ρυθμού απόκλισης, των κατωφλίων αναγνώρισης αιχμών στο σύστημα, καθώς και η μέθοδος ανανέωσης των συντελεστών βαρύτητας απαιτούν σημαντικό αριθμό προσομοιώσεων εκτός λειτουργίας, γεγονός που δυσκολεύει την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου.

Ίσως οι πιο πλήρεις αναφορές για την ανίχνευση αστάθειας τάσεως με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων ευρείας περιοχής αποτελούν οι εργασίες [GVC09a] και [GVC09b], στις οποίες χρησιμοποιείται ένα σύνολο εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος που προσαρμόζεται στην τρέχουσα διαθέσιμη κατάσταση συστήματος. Η μέθοδος υλοποιεί ανάλυση ευαισθησίας που λαμβάνει υπόψη τα συστήματα ΣΑΤΥΦ και συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών. Οι ευαισθησίες που υπολογίζονται αφορούν σε αυτές της συνολικής αέργου παραγωγής του συστήματος ως προς την άεργο κατανάλωση κάθε ζυγού φορτίου και χρησιμοποιούνται για ανίχνευση εάν κάποιος συνδυασμός από φορτία περνάει από μέγιστο. Σε αυτό το σημείο οι ευαισθησίες μεταβάλλονται απότομα από μεγάλη θετική τιμή σε μεγάλη αρνητική τιμή σηματοδοτώντας την αστάθεια τάσης του συστήματος. Το μειονέκτημα όμως της μεθόδου έγκειται στην απαίτηση για πλήρη γνώση της κατάστασης του συστήματος στον ρυθμό ανανέωσης των συγχρονισμένων μετρήσεων, γεγονός που συνεπάγεται μεγάλες απαιτήσεις σε εξοπλισμό.

Στην εργασία [GM07] προτείνεται άθροιση των πτώσεων τάσης επί των κλάδων που συνθέτουν το πιο ελάχιστο ηλεκτρικά μονοπάτι από τον ζυγό ενδιαφέροντος μέχρι την κοντινότερη ηλεκτρικά γεννήτρια που βρίσκεται σε λειτουργία με ενεργοποιημένο το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης προκειμένου το κριτήριο ισότητας των σύνθετων αντιστάσεων να μετατρέπεται σε κριτήριο ισότητας πτώσεων τάσης για την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.

1.8.3.5 Με συμπερίληψη αέργου περιθωρίου παραγωγής μονάδων

Στο [ISM15] προτείνεται διαχωρισμός του συστήματος σε περιοχές αξιοποιώντας την έννοια της ηλεκτρικής απόστασης. Για την εκτίμηση ανάγκης λήψης μέτρων αντιμετώπισης υπολογίζεται σε πραγματικό χρόνο και σε κάθε περιοχή δείκτης ευστάθειας τάσης που λαμβάνει υπόψη τις αποκλίσεις των τάσεων των ζυγών από ένα ελάχιστο επιτρεπτό όριο, καθώς και τις υπερβάσεις αέργου παραγωγής από το άνω επιτρεπτό όριο των γεννητριών. Για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης από κατάρρευση (σύνδεση πυκνωτών και αποκοπή φορτίου) επιλέγονται επίσης αυθαίρετα κατώφλια τα οποία με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων ενεργοποιούνται προτού το σύστημα περάσει σε ασταθή λειτουργία, γεγονός που δεν συνάδει με τον βασικό τους στόχο που αποτελεί την αποκατάσταση της ευστάθειας του συστήματος. Αξίζει επίσης να τονιστεί ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί σημαντικές υποδομές για την υλοποίησή της.

Η αναφορά [LAD18] χρησιμοποιεί τεχνικές παλινδρόμησης αξιοποιώντας τα άεργα περιθώρια των μονάδων προκειμένου να εκτιμηθεί το περιθώριο ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο. Η μάθηση του μοντέλου στηρίζεται σε αντιστοίχιση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης με τα άεργα περιθώρια από προσομοιώσεις εκτός λειτουργίας μέσω πολυωνυμικών συναρτήσεων, οι οποίες όμως μετριάζουν τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά (τάσεις, ροές ισχύος) προκειμένου να αντιστοιχίσουν το πραγματικό σημείο λειτουργίας με το πλησιέστερο στη βάση δεδομένων, ενώ εμφανίζουν δυσκολία προσαρμογής σε περιπτώσεις που υπάρχει σημαντική εγκατεστημένη ισχύς από σταθμούς ΑΠΕ.

1.8.4 Μέθοδοι ανίχνευσης περιθωρίου ευστάθειας τάσης

Με τη σταδιακά αυξανόμενη χρήση PMU στα συστήματα μεταφοράς αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια μέθοδοι υπολογισμού του περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο.

Στην εργασία [CP119] παρουσιάζεται μέθοδος βασισμένη σε συγχρονισμένες μετρήσεις ευρείας περιοχής για τον υπολογισμό του περιθωρίου ευστάθειας τάσης. Προκειμένου να υπολογιστεί το περιθώριο γίνεται χρήση δείκτη ευστάθειας τάσης που παρουσιάζεται στην εργασία [CP219] και στη συνέχεια αυτό υπολογίζεται σε ένα πλήθος ζυγών της εξεταζόμενης περιοχής. Ο δείκτης ευστάθειας τάσης υπολογίζει το ισοδύναμο Thevenin κύκλωμα από την μήτρα αγωγιμοτήτων του συστήματος, γεγονός αρκετά απαιτητικό υπολογιστικά λόγω ανάγκης αντιστροφής μητρών, ειδικά όταν το σύστημα λειτουργεί κοντά στα όρια ευστάθειας τάσης και προκύπτουν προβλήματα αδυναμίας του εκτιμητή κατάστασης, ενώ η μέθοδος βασίζεται επίσης σε ιστορικά δεδομένα από προσομοιώσεις του συστήματος, οι οποίες συνήθως διαφέρουν από την πραγματική κατάσταση του συστήματος.

Στην εργασία [HET20] παρουσιάζεται μέθοδος που λαμβάνει υπόψη τη δυναμική απόκριση του συστήματος, στην οποία το περιθώριο ευστάθειας τάσης νοείται κατά τον τρόπο της εργασίας [VMM99], δηλαδή ως η απόσταση σε MW του τρέχοντος σημείου λειτουργίας από το κοντινότερο ανασφαλές σημείο ως προς κατεύθυνση φόρτισης ΔP και για μία προεπιλεγμένη λίστα διαταραχών. Για βελτίωση της απόδοσης γίνεται χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης για γρήγορη αναζήτηση αποτελεσμάτων από δυναμικές προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις αυτές ως αρχικές τιμές για τον υπολογισμό του πραγματικού δυναμικού περιθωρίου ευστάθειας τάσης. Η μέθοδος όμως αφενός απαιτεί τη δημιουργία μεγάλης βάσης ιστορικών δεδομένων, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα της μεθόδου και την αποτελεσματικότητά της σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και αφετέρου απαιτεί διαφορετικής αρχιτεκτονικής νευρωνικά δίκτυα για διαφορετικά συστήματα μεταφοράς, ενώ παρά το κέρδος σε υπολογιστικό κόστος δεν καταφέρνει να επιτύχει χρόνους εκτέλεσης προκειμένου να αξιοποιηθεί σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου.

Η πρόσφατη εργασία [FLZ17], η οποία αποτελεί συνέχεια της εργασίας [FLQ15], βασίζεται σε στατική ανάλυση και υλοποιεί τεχνικές μηχανικής μάθησης, προκειμένου να υπολογίσει σε πραγματικό χρόνο το περιθώριο ευστάθειας τάσης ενός συστήματος. Η πρωτοτυπία βρίσκεται στον αλγόριθμο αναζήτησης, ο οποίος υπολογίζει τη συσχέτιση μεταξύ της μεταβλητής-στόχου (περιθώριο ευστάθειας τάσης) και ενός αριθμού από σύνολα με ελάχιστα στοιχεία τα οποία έχουν την ελάχιστη μεταξύ επικάλυψη, αλλά και τη μέγιστη επίδραση στον προσδιορισμό της μεταβλητής-στόχου. Τα ελάχιστα στοιχεία του κάθε συνόλου σχετίζονται με το περιθώριο ευστάθειας μέσω οριακών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας. Η μέθοδος όμως δεν εγγυάται ότι το επιλεγθέν σύνολο στοιχείων είναι το βέλτιστο και παρά τον τεράστιο όγκο δεδομένων, δεν αποκλείεται η εμφάνιση μίας πραγματικής τοπολογίας η οποία να απαιτεί εκ νέου μηχανική μάθηση με χρόνο υπολογισμού έως και 10 λεπτά, προκειμένου να μπορούν να υπολογιστούν αποτελέσματα,

γεγονός αποτρεπτικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ενώ δεν γίνεται αναφορά σχετικά με την αναπαράσταση των μονάδων και ειδικά ως προς τα άεργα περιθώριά τους.

1.9 Σκοπός και δομή της διατριβής

Βασικός στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη τοπικών μεθόδων παρακολούθησης και ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο, καθώς και η διαμόρφωση σχημάτων προστασίας από κατάρρευση τα οποία αξιοποιούν ήπια μέτρα αντιμετώπισης ώστε να μετριάσουν κατά το δυνατόν την επίπτωση στους καταναλωτές. Ως εκ τούτου, διερευνώνται ζητήματα που ασχολούνται τόσο με την ανίχνευση της αστάθειας τάσης, όσο και με την ανάπτυξη μέτρων αντιμετώπισης για την αποφυγή της κατάρρευσης, αξιοποιώντας και τη διεσπαρμένη παραγωγή.

Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται μέθοδος που αξιοποιεί εργαλεία από το πεδίο χρόνου-συχνότητας για την αποδοτική προσαρμογή της μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης που παρουσιάστηκε στην εργασία [VLM17]. Η μέθοδος αξιοποιεί εργαλεία ψηφιακής επεξεργασίας σήματος, και συγκεκριμένα, τον *παραθυρικό μετασχηματισμό Fourier (Short-Time Fourier Transform - STFT)* με σκοπό την επεξεργασία και φιλτράρισμα των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών για τη διατήρηση των μακροπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος σε αυτά και την κατά το δυνατόν απόρριψη των βραχυπρόθεσμων δυναμικών, οι οποίες δυσχεραίνουν την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την ευστάθεια τάσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος δοκιμάζεται στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic παρουσιάζοντας πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα που καταδεικνύουν την καταλληλότητά της και την προοπτική για εφαρμογή σε πραγματικό σύστημα.

Στη συνέχεια αναπτύσσεται τοπική μέθοδος που επίσης βασίζεται αμιγώς σε μετρήσεις με σκοπό την εκτίμηση του διαθέσιμου περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε συστήματα μεταφοράς. Η μέθοδος αξιοποιεί τον δείκτη ευστάθειας τάσης *NLI* της εργασίας [VLM17] και χρησιμοποιεί πολυώνυμα παρεμβολής με σκοπό την εκτίμηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε έναν διάδρομο ενέργειας, όταν το σύστημα οδεύει προς την αστάθεια. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόστηκε επίσης στο σύστημα IEEE Nordic παρουσιάζοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα που δικαιολογούν την προοπτική εφαρμογής της σε πραγματικό σύστημα.

Στη διατριβή αναπτύσσεται επίσης η μέθοδος *RLI* για την ανίχνευση αστάθειας τάσης, η οποία βασίζεται στην αξιοποίηση ηλεκτρονόμων αποστάσεως σε γραμμές μεταφοράς. Η μέθοδος αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου που παρουσιάστηκε στην εργασία [VLM17] και παρά το γεγονός της αξιοποίησης λιγότερης διαθέσιμης πληροφορίας, καταφέρνει να ανιχνεύσει την αστάθεια τάσης το ίδιο αποδοτικά με τη μέθοδο της εργασίας [VLM17]. Η εν λόγω μέθοδος μπορεί επιπρόσθετα να αξιοποιηθεί για την παρεμπόδιση της ενεργοποίησης της τρίτης ζώνης προστασίας του ηλεκτρονόμου, όταν ανιχνεύσει συνθήκες ότι η γραμμή έχει υπερβεί το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, ενώ η ευκολία υλοποίησής της είναι προφανής, λόγω της διαθεσιμότητας ψηφιακών ηλεκτρονόμων στην πλειοψηφία των γραμμών μεταφοράς.

Ένα άλλο ζήτημα στο οποίο αποσκοπεί να συμβάλλει η διατριβή αφορά την επίδραση των ωμικών απωλειών στην εκδήλωση και ανίχνευση της αστάθειας τάσης. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται ένα ακτινικό δίκτυο τριών ζυγών με σκοπό την εξαγωγή αναλυτικών σχέσεων στις οποίες αποτυπώνεται η επίδραση της ωμικής αντίστασης του δικτύου που βρίσκεται στα κατάντη του σημείου μετρήσεων. Η ανάλυση δείχνει ότι οι ωμικές απώλειες αφενός καθυστερούν την ανίχνευση αστάθειας τάσης, όταν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ζυγό απομακρυσμένο από τα φορτία, ενώ αφετέρου αλλοιώνουν την ακρίβεια της ανίχνευσης της αστάθειας τάσης, με την αλλοίωση, ωστόσο, να αντισταθμίζεται στην περίπτωση βροχοειδών δικτύων λόγω ενός χαρακτηριστικού που συναντάται στα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς και επεξηγείται στη συνέχεια της διατριβής. Η επίδραση των απωλειών δικτύου στην ανίχνευση της αστάθειας τάσης δίνει επίσης το κίνητρο για την ανάπτυξη μιας μεθόδου βασισμένης σε μετρήσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων του τμήματος του δικτύου που βρίσκεται στα κατάντη του σημείου μετρήσεων, η οποία δοκιμάζεται στο σύστημα τριών ζυγών και αποτελεί μία ακόμη προτεινόμενη συμβολή της διατριβής.

Μία ακόμη συμβολή της διατριβής αφορά τη διερεύνηση της επίδρασης της διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση και ανίχνευση της αστάθειας τάσης στο σύστημα IEEE Nordic, ενώ αναπτύσσονται εναλλακτικά σχήματα προστασίας συστήματος από κατάρρευση τάσης που αξιοποιούν τις δυνατότητες της διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς και την έκτακτη λειτουργία των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ. Πιο συγκεκριμένα, αναδεικνύεται η επίπτωση από τον τρόπο διασύνδεσης των μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα, καθώς και από το σχήμα ελέγχου τους (ρύθμιση συντελεστή ισχύος ή τερματικής τάσης) στην αλληλεπίδραση

της διεσπαρμένης παραγωγής με την κατανάλωση των φορτίων, και συνεπακόλουθα στην εκδήλωση της αστάθειας τάσης. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η σύνδεση της διεσπαρμένης παραγωγής στον ίδιο μετασχηματιστή διανομής με το φορτίο ή σε αποκλειστικό μετασχηματιστή, σε συνδυασμό με δυνατότητα λειτουργίας υπό σταθερό (μοναδιαίο) συντελεστή ισχύος ή σταθερής τερματικής τάσης. Με βάση τα συμπεράσματα που προκύπτουν, δοκιμάζονται εναλλακτικά σχήματα προστασίας από κατάρρευση τάσης που συνδυάζουν την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ με αυτήν της διεσπαρμένης παραγωγής και προτείνονται κατευθυντήριες γραμμές για την προοπτική αξιοποίησης των επικουρικών υπηρεσιών από διεσπαρμένες πηγές με έμφαση στην επίδρασή τους στην ευστάθεια τάσης και στην αποφυγή της κατάρρευσης.

Πιο αναλυτικά, η δομή της διδακτορικής διατριβής είναι μετά το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο η ακόλουθη:

Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται συνοπτικά οι αλγόριθμοι παρακολούθησης και ανίχνευσης αστάθειας τάσης και τα σχήματα προστασίας συστήματος από κατάρρευση από παλαιότερες ερευνητικές εργασίες. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφεται συνοπτικά ο αλγόριθμος ανίχνευσης αστάθειας τάσης *Local Identification of Voltage Emergency Situations* (LIVES) και ο αλγόριθμος LIVES-Restore που ανιχνεύει την επαναφορά υγείων συνθηκών λειτουργίας συστήματος. Στη συνέχεια, περιγράφεται ο δείκτης ανίχνευσης αστάθειας τάσης *New LIVES Index* (NLI) και ο τρόπος υλοποίησής του χρησιμοποιώντας φίλτρα κινητού μέσου όρου. Στη συνέχεια του κεφαλαίου 2 γίνεται αναφορά σε στοιχεία και έννοιες για μεθόδους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος στον βαθμό που ενδιαφέρει τις εφαρμογές που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία, ενώ περιγράφονται οι βασικές ιδιότητες του παραθυρικού μετασχηματισμού Fourier, ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυση που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται σύντομη αναφορά στα κυριότερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας των PMUs στον βαθμό κυρίως που αυτά αφορούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Το κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει τις νέες μεθόδους και τεχνικές που αναπτύσσονται και εφαρμόζονται στα πλαίσια της διατριβής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ο δείκτης *Relay-based Index* (RLI), ο οποίος εκμεταλλεύεται μετρήσεις από ηλεκτρονόμο αποστάσεως σε μεμονωμένη γραμμή μεταφοράς με σκοπό την ανίχνευση συνθηκών αστάθειας τάσης. Η υλοποίηση του δείκτη RLI ακολουθεί την ίδια φιλοσοφία με αυτήν του δείκτη NLI με τη διαφορά ότι τα μετρούμενα μεγέθη αναφέρονται σε γραμμή μεταφοράς αντί για διάδρομο μεταφοράς. Στη συνέχεια αναλύεται η επίδραση των απωλειών δικτύου στην εκδήλωση και ανίχνευση της αστάθειας τάσης για την περίπτωση ενός δικτύου τριών ζυγών, ενώ παρατίθενται αριθμητικά αποτελέσματα για καλύτερη κατανόηση και επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων. Επίσης, στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία αποκεντρωμένη μέθοδος εκτίμησης του περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο, η οποία βασίζεται αποκλειστικά σε συγχρονισμένες μετρήσεις από ένα PMU που συνδέεται σε ζυγό του συστήματος μεταφοράς. Οι συγχρονισμένες μετρήσεις υλοποιούνται με τις μονάδες PMU και η μέθοδος συνδυάζει την πληροφορία από τον δείκτη NLI προκειμένου να εκτιμήσει το περιθώριο φόρτισης του συστήματος χρησιμοποιώντας πολυώνυμα παρεμβολής δευτέρας τάξης.

Το κεφάλαιο 4 εστιάζει στην αξιολόγηση των μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και εκτίμησης περιθωρίου που περιγράφονται στο κεφάλαιο 3, και συγκεκριμένα παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων από το σύστημα δοκιμών IEEE Nordic test system [TF15]. Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων έχουν χρησιμοποιηθεί τρία λογισμικά πακέτα προσομοίωσης ΣΗΕ, και πιο συγκεκριμένα (α) το λογισμικό WPSTAB του εργαστηρίου ΕΜΠ [Βου99] που υλοποιεί προσομοίωση με το δίκτυο σε οιονεί στατική κατάσταση, (β) το λογισμικό Rapid Multiprocessor Simulation of Electric power Systems (RAMSES) του πανεπιστημίου της Λιέγης, το οποίο μοντελοποιεί βραχυπρόθεσμες αλλά και μακροπρόθεσμες δυναμικές θεωρώντας ότι το δίκτυο βρίσκεται σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση, και (γ) το εμπορικό πακέτο DigSilent PowerFactory που επίσης υλοποιεί προσομοίωση με το δίκτυο σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση, αλλά διαθέτει και μοντέλα ηλεκτρονόμων αποστάσεως, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του δείκτη RLI αναφορικά με την αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμών μεταφοράς σε συνθήκες αστάθειας τάσεως.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μία άλλη σημαντική συμβολή της διατριβής, συγκεκριμένα η ανάλυση σχετικά με την επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην αστάθεια τάσης, καθώς και η αξιοποίηση των δυνατοτήτων ελέγχου των μετατροπέων ως ήπιο μέτρο αντιμετώπισης ενάντια στην κατάρρευση τάσης. Στη διατριβή γίνεται χρήση συγκεντρωτικών μοντέλων διεσπαρμένης παραγωγής, καθώς σκοπός ήταν να δοθεί έμφαση αποκλειστικά στη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και όχι σε αυτήν των δικτύων διανομής. Η

ανάλυση λαμβάνει υπόψιν δύο ανεξάρτητους παράγοντες, που σχετίζονται με την τοπολογία της διεσπαρμένης παραγωγής ως προς το σύστημα μεταφοράς και με τον τρόπο λειτουργίας τους. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων τροποποιήθηκε το σύστημα δοκιμών IEEE Nordic ενσωματώνοντας επιπρόσθετη παραγωγή από διεσπαρμένες πηγές και τροποποιώντας κατάλληλα το φορτίο, προκειμένου το σημείο A να παραμείνει αμετάβλητο σε σχέση με το αρχικό σύστημα. Από τις προσομοιώσεις αναδεικνύονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε τοπολογίας, σε συνδυασμό με το σχήμα λειτουργίας της διεσπαρμένης παραγωγής και βάσει αυτών σχεδιάζονται εναλλακτικά σχήματα προστασίας από κατάρρευση, που αξιοποιούν τις δυνατότητες της διεσπαρμένης παραγωγής, σε συνδυασμό και με την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Τα προτεινόμενα σχήματα προστασίας, μαζί με ένα επιπρόσθετο που έχει αναπτυχθεί στην εργασία [OVC21] και τροποποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συγκρίνονται μεταξύ τους και αναδεικνύονται τα κυριότερα προτερήματα και μειονεκτήματα αυτών, με σκοπό την εξαγωγή κατευθυντηρίων γραμμών και αναπόφευκτων συμβιβασμών σχετικά με την προσέγγιση σχεδίασης ολοκληρωμένων σχημάτων προστασίας συστήματος από κατάρρευση τάσης.

Στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αναφέρονται οι προοπτικές για τη συνέχιση της έρευνας.

2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ

2.1 Μέθοδος LIVES για ανίχνευση αστάθειας

2.1.1 Περιγραφή

Η μέθοδος *Local Identification of Voltage Emergency Situations - LIVES* παρουσιάστηκε στην εργασία [VVC08] και βασίζεται στην παρακολούθηση της τάσης ενός μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ από την πλευρά του δευτερεύοντος τυλίγματος, η οποία και ελέγχεται από το ΣΑΤΥΦ. Σκοπός της μεθόδου είναι η αναγνώριση αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο λαμβάνοντας υπόψιν μετρήσεις τάσεως σε αποκλειστικό σημείο του συστήματος.

Παρότι η μέθοδος LIVES επιτηρεί την τάση διανομής (δευτερεύοντος τυλίγματος) και συνεπώς συγκαταλέγεται στις τοπικές μεθόδους αναγνώρισης αστάθειας τάσης, λαμβάνει έμμεσα υπόψιν την επίδραση του υπόλοιπου συστήματος, καθώς αυτή αποτυπώνεται στη μετρούμενη τάση του τοπικού ζυγού φορτίου. Ο αλγόριθμος της LIVES ενεργοποιεί σήμα συναγερμού όταν η τάση δευτερεύοντος αδυνατεί να αυξηθεί μεταξύ δύο διαδοχικών δράσεων του ΣΑΤΥΦ. Σημειώνεται, ότι λόγω θορύβου μετρήσεων γίνεται χρήση από τεχνικές φίλτρων τύπου κινητού μέσου που περιγράφονται λεπτομερώς στη διατριβή [Λαμ17]. Οι συγκεκριμένες τεχνικές παρακολουθούν τον κινητό μέσο όρο της τάσης, προκειμένου να εντοπιστεί η αδυναμία του ΣΑΤΥΦ να επαναφέρει την τάση διανομής εντός της νεκρής ζώνης.

Η αδυναμία του ΣΑΤΥΦ να αυξήσει την τάση δευτερεύοντος σηματοδοτεί και τοπική αδυναμία εξυπηρέτησης ισχύος. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η τάση δευτερεύοντος διασχίζει ένα τοπικό μέγιστο, πράγμα που υπονοεί και μεγιστοποίηση της ισχύος του φορτίου που εξυπηρετείται από τον συγκεκριμένο μετασχηματιστή, με αποτέλεσμα τη σήμανση τοπικού συναγερμού.

Το σήμα συναγερμού, αν και τοπικό, μπορεί να αποστέλλεται στο κέντρο ελέγχου, ενημερώνοντας για τοπική ανίχνευση αστάθειας τάσης. Βασική αδυναμία της μεθόδου LIVES είναι η ανικανότητά της να παρακολουθεί την ευστάθεια τάσης όταν εξαντλούνται οι θέσεις των ΣΑΤΥΦ, αλλά και η δυσκολία που μπορεί να εμφανιστεί όταν παρουσιάζονται διακριτά φαινόμενα στο σύστημα (π.χ. διαταραχές) μεταξύ διαδοχικών δράσεων του ΣΑΤΥΦ που μπορούν να επηρεάσουν τον κινητό μέσο όρο της επιτηρούμενης τάσης.

Στις εργασίες [VSC08], [VLG10], [MLV11], [LMV11], και [VLK16] παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων σε μικρής και μεγάλης κλίμακας συστήματα μεταφοράς και αξιολογείται η επίδοση αποκεντρωμένων συστημάτων προστασίας από κατάρρευση τάσης, τα οποία αξιολογούν τη μέθοδο LIVES σε συνδυασμό με συστήματα έμμεσης και άμεσης αποκοπής φορτίου.

2.1.2 Μέθοδος αποκατάστασης ευστάθειας LIVES-Restore

Όταν η μέθοδος LIVES εκδίδει σήμα συναγερμού, τότε είναι απαραίτητη η λήψη διορθωτικών μέτρων για αποκατάσταση της ευστάθειας. Μία προσέγγιση σχήματος προστασίας συστήματος από κατάρρευση που παρουσιάζεται στις αναφορές [VLK16], [Λαμ17] αφορά σε λήψη τοπικών μέτρων αντιμετώπισης, και πιο συγκεκριμένα στην ενεργοποίηση έκτακτης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, μέσω αντίστροφων δράσεων αποκατάστασης της τάσης πρωτεύοντος, στον ζυγό όπου ενεργοποιήθηκε ο συναγερμός. Οι αντίστροφες δράσεις του ΣΑΤΥΦ έχουν σκοπό την επίτευξη έμμεσης μείωσης της τοπικής κατανάλωσης (λόγω μειωμένης τάσης διανομής) και σταματούν όταν παρατηρηθεί ανύψωση της τάσης μεταφοράς στη πλευρά πρωτεύοντος του μετασχηματιστή ή, εάν αυτό δεν επιτευχθεί, συμπληρωθεί ένας μέγιστος επιτρεπτός αριθμός αντίστροφων δράσεων.

Με την επίτευξη των παραπάνω συνθηκών αποκατάστασης ευστάθειας, ο αλγόριθμος LIVES-Restore εκδίδει τοπικό σήμα αποκατάστασης με σκοπό την αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, αφού όμως προσαρμοστεί η κεντρική τιμή της νεκρής ζώνης στην τιμή της τάσης διανομής κατά τη στιγμή έκδοσης του σήματος αποκατάστασης, ενώ παράλληλα ο αλγόριθμος παρακολουθήσει ευστάθεια τάσης της LIVES παραμένει ενεργός για πιθανή ανίχνευση νέας αστάθειας. Με την παραπάνω διαδικασία η τάση διανομής βρίσκεται πλέον εντός της νέας νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα να διακόπτεται ο μηχανισμός της

αποκατάστασης του φορτίου λόγω της δράσης του ΣΑΤΥΦ. Σημειώνεται ωστόσο, ότι ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου μπορεί να συνεχίζει να εκδηλώνεται στην περίπτωση ύπαρξης δυναμικών φορτίων στη διανομή (π.χ. κινητήρες επαγωγή, θερμοστατικά φορτία [MLV11]).

2.2 Μονάδες μέτρησης φασιθετών

2.2.1 Γενική περιγραφή και διάταξη

Η τεχνολογία της μέτρησης των φασιθετών έχει αναπτυχθεί από τα τέλη της δεκαετίας του '80. Σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη στους τομείς των τηλεπικοινωνιών και ψηφιακών υπολογιστών, δημιουργήθηκαν μεγάλες προοπτικές για τη διεξαγωγή έρευνας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία. Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (*Phasor Measurement Unit - PMU*) συγχρονίζονται μεταξύ τους εκμεταλλευόμενες την τεχνολογία του παγκόσμιου συστήματος σιγματοθέτησης (*Global Positioning System - GPS*). Αυτή τη στιγμή υπάρχει πολύ έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον και μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων που ασχολούνται με το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης PMUs σε σημεία του συστήματος μεταφοράς, με σκοπό την επίτευξη παρατηρησιμότητας συστήματος με το ελάχιστο δυνατό κόστος [JV21].

Με δεδομένη την έντονη ανάπτυξη της τεχνολογίας των PMUs, αναπτύχθηκε σημαντικός αριθμός από επιστημονικές εργασίες που προτείνουν μεθόδους, είτε ευρείας περιοχής είτε τοπικές, για την ανίχνευση αστάθειας τάσης που εκμεταλλεύονται τις συγχρονισμένες μετρήσεις από μονάδες PMU [GVC11].

Με τις μονάδες PMU δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης των φασιθετών σε ένα κοινό πλαίσιο αναφοράς, το οποίο στρέφεται με την ονομαστική συχνότητα του συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης βασιζόμενες σε συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε τοπικές μεθόδους και τις μεθόδους που βασίζονται σε μετρήσεις ευρείας περιοχής.

Αναφορικά με τις μεθόδους ανίχνευσης που χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις ευρείας περιοχής, πρωταρχικός στόχος είναι η συγκέντρωση των μετρήσεων από τα διασκορπισμένα στο σύστημα PMU στο κέντρο ελέγχου, προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός ηλεκτρικών μεγεθών που αφορούν την ευρεία περιοχή. Δίνεται με αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα εποπτείας της λειτουργικής κατάστασης μίας περιοχής του συστήματος με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας, πράγμα που δεν ήταν στο παρελθόν εφικτό με τις μετρήσεις από τα συστήματα SCADA.

Αν και τα τελευταία χρόνια υπάρχει μία αυξανόμενη τάση τοποθέτησης PMU σε διευρυμένες περιοχές των συστημάτων μεταφοράς, το -ακόμη και σήμερα- αυξημένο κόστος εγκατάστασης των PMU και η ανάγκη για βελτίωση των διαθέσιμων αλγορίθμων επεξεργασίας του μεγάλου όγκου δεδομένων από συγχρονισμένες μετρήσεις, έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της εξάπλωσης μονάδων PMUs στα συστήματα μεταφοράς. Ως εκ τούτου, οι διαχειριστές συστημάτων τοποθετούν σχετικά περιορισμένο αριθμό PMUs στα συστήματα και συγκεκριμένα περισσότερο σε υποσταθμούς οι οποίοι θεωρούνται κρίσιμοι ως προς τη λειτουργία του συστήματος.

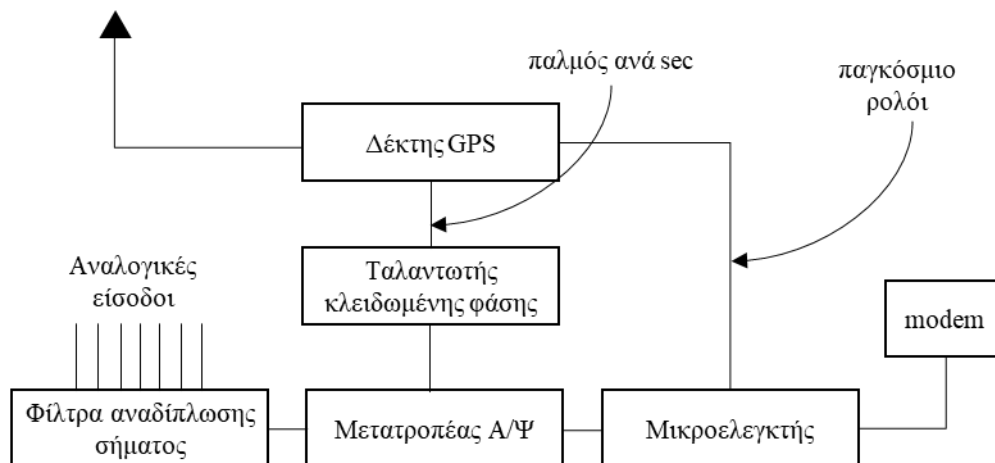
Οι φασιθέτες χρησιμοποιούνται κατά κόρον στη στατική και δυναμική ανάλυση ΣΗΕ, καθώς η συχνότητα του δικτύου παραμένει στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πολύ κοντά στην ονομαστική της τιμή. Κάτι τέτοιο μπορεί εύκολα να εξακριβωθεί από τη φασματική ανάλυση ενός ηλεκτρικού σήματος, κατά την οποία μπορεί να παρατηρηθεί ότι η κυρίαρχη συνιστώσα του φάσματος είναι αυτή της ονομαστικής συχνότητας. Ακόμη και όταν ένα σύστημα βρίσκεται σε μεταβατική κατάσταση, το γεγονός ότι οι μεταβολές των ηλεκτρικών μεγεθών οδηγούνται πρωτίστως από τις ηλεκτρομηχανικές δυναμικές του συστήματος, προκαλούν αργές και ομαλές μεταβολές στη συχνότητα, γεγονός που δικαιολογεί την ανάλυση των συστημάτων με τη θεώρηση της οιονεί ημιτονοειδούς κατάστασης. Ως εκ τούτου, οι φασιθέτες είναι κατάλληλοι για την περιγραφή της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ακόμη και όταν οι κυματομορφές ηλεκτρικών μεγεθών μεταβάλλονται γρήγορα, είναι αποδεκτό να γίνεται υπολογισμός και εκτίμηση φασιθέτη που αντιστοιχεί σε παράθυρο παρατήρησης ενός ή ακόμη και σε μισού ηλεκτρικού κύκλου [Pha93].

Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο, ότι η σταδιακή απένταξη σύγχρονων μηχανών και η αντικατάστασή τους από πηγές που συνδέονται στο σύστημα με μετατροπείς ισχύος επηρεάζει τις δυναμικές του συστήματος, με

αποτέλεσμα να γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη για ανάλυση της λειτουργίας των ΣΗΕ στην ηλεκτρομαγνητική χρονική κλίμακα, λόγω των ταχέων δυναμικών που εισάγονται από τη λειτουργία των μετατροπέων, οι οποίες εξελίσσονται σε χρονική κλίμακα που είναι υποπολλαπλάσια του ηλεκτρικού κύκλου.

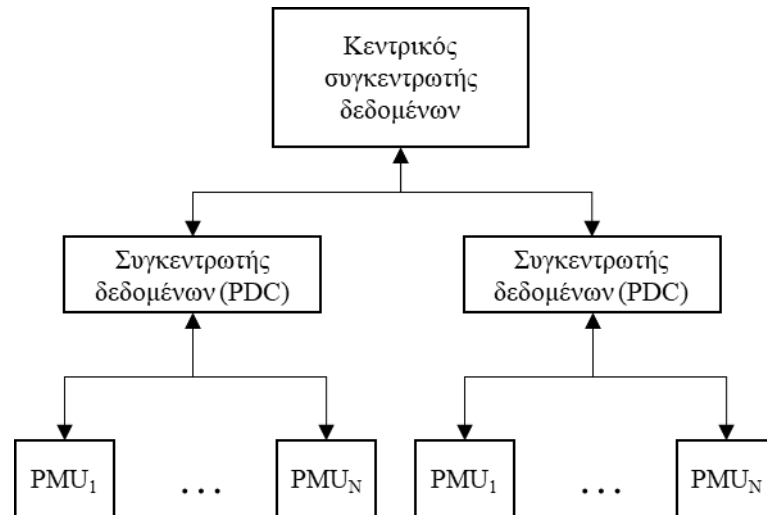
Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών είναι ψηφιακές συσκευές ειδικά κατασκευασμένες για την εκτίμηση φασιθετών τάσης και ρεύματος, καθώς και για εκτίμηση της συχνότητας και του ρυθμού μεταβολής της. Τα αναλογικά σήματα εισόδου υποβιβάζονται κατάλληλα στο εύρος μέτρησης του PMU μέσω μετασχηματιστών τάσης και έντασης προτού περάσουν από διαδικασία εφαρμογής φίλτρου και ψηφιοποίησης. Στο σχήμα 2-1 απεικονίζονται τα κυριότερα μέρη από τα οποία συνίσταται μία μονάδα μέτρησης φασιθετών.

Για να αποφευχθεί το φαινόμενο της φασματικής αναδίπλωσης του μετρούμενου αναλογικού σήματος, ο (σταθερός) ρυθμός δειγματοληψίας του σήματος εισόδου από τις μονάδες PMU είναι αρκετά υψηλός και ανέρχεται έως και σε 128 δείγματα ανά ηλεκτρικό κύκλο. Η δειγματοληψία των PMUs είναι συγχρονισμένη με τη βοήθεια χρονικών παλμών από το ρολόι του συστήματος GPS σε ώρα UTC (*Universal Time Coordinated*). Ως εκ τούτου, γνωρίζοντας τις ακριβείς συντεταγμένες των PMUs αποστέλλεται από το σύστημα GPS ένας παλμός ανά δευτερόλεπτο σε κάθε μονάδα PMU, ώστε οι συγχρονισμένοι παλμοί να φτάνουν σε όλους τους δέκτες με σφάλμα λιγότερο από 1μs και να επιτυγχάνεται συγχρονισμός των μονάδων PMU με βάση τον χρόνο UTC [Pha02]. Με δεδομένο τον συγχρονισμό των μονάδων PMU στο σύστημα, καθίσταται δυνατή η μέτρηση και απεικόνιση των φασιθετών από διαφορετικές τοποθεσίες του συστήματος σε κοινή χρονική βάση. Στη γενική περίπτωση, οι συγχρονισμένοι φασιθέτες είναι συναρτήσεις του χρόνου, καθώς τόσο η συχνότητα όσο και το μέτρο τους μεταβάλλεται [IEE11].



Σχήμα 2-1 Διάγραμμα λειτουργίας PMU

Ως προς τη συλλογή και καταγραφή των δεδομένων, γίνεται ιεράρχηση σε δύο κύριες βαθμίδες (Σχήμα 2-2). Η πρώτη αναφέρεται στο τοπικό επίπεδο του υποσταθμού, όπου συλλέγονται τα δεδομένα από τις μονάδες PMU και η δεύτερη στο επίπεδο των συγκεντρωτών δεδομένων (*Phasor Data Concentrators - PDC*) οι οποίοι εγκαθίστανται συνήθως σε περιφερειακά κέντρα ελέγχου, συγκεντρώνοντας και αποθηκεύοντας τα δεδομένα ευρείας περιοχής από τις μονάδες PMU με τις οποίες επικοινωνούν.



Σχήμα 2-2 Ιεραρχία μετρήσεων φασιθετών

Η βασική κατεύθυνση μετάδοσης των δεδομένων είναι από τα PMU προς τους συγκεντρωτές, ωστόσο υπάρχει δυνατότητα για αμφίδρομη κατεύθυνση πληροφορίας όταν απαιτείται. Η επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνολογίες όπως είναι οι οπτικές ίνες, η μικροκυματική ζεύξη και οι κομιστές γραμμής ρεύματος (power line carriers). Σήμερα λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι οπτικές ίνες, έχουν κυριαρχήσει ως το βασικό μέσο για την αποστολή των δεδομένων. Τα μηνύματα μπορεί να προωθούνται με πρωτόκολλο μεταφοράς TCP ή UDP πάνω σε IP, το οποίο είναι συνήθως πάνω σε Ethernet ή οποιοδήποτε άλλο επίπεδο ζεύξης δεδομένων.

2.2.2 Σφάλματα μετρήσεων και προδιαγραφές

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται συνοπτικά οι προδιαγραφές που τηρούνται από τις μονάδες PMU, αναφορικά με την εκτίμηση των συγχρονισμένων φασιθετών.

Εάν υποθεθεί μία ημιτονοειδής κυματομορφή:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \theta) \quad (2-1a)$$

τότε η κυματομορφή μπορεί να αναπαρασταθεί με τη χρήση ενός φασιθέτη ως εξής:

$$x(t) = \text{Re}\{X_m e^{j\omega t} e^{j\theta}\} \quad (2-1b)$$

Ορίζεται συνεπώς με βάση τις σχέσεις (2-1a) και (2-1b) ο φασιθέτης X του ημιτονοειδούς μεγέθους $x(t)$:

$$\hat{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\theta} = X(\cos\theta + j\sin\theta) = a + jb = X \angle \theta \quad (2-2)$$

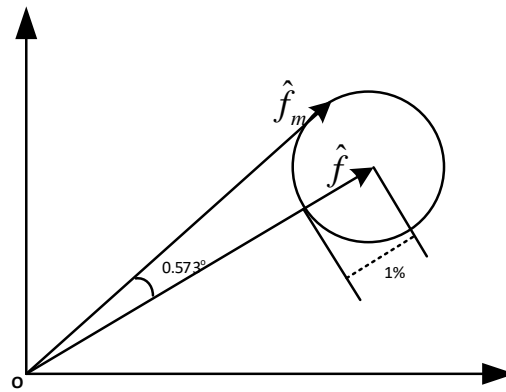
όπου το μέτρο του διανύσματος του φασιθέτη είναι ίσο με την ενεργό τιμή της ημιτονοειδούς κυματομορφής $x(t)$, ενώ με a και b συμβολίζονται αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του φασιθέτη.

Με δεδομένο ότι οι συγχρονισμένοι φασιθέτες ορίζονται σε κοινή χρονική βάση (σε ώρα UTC) και υπολογίζονται ως προς την ονομαστική κυκλική συχνότητα ω_0 , η γωνία θ στη σχέση (2-2) δεν είναι σταθερή, διότι η συχνότητα του φασιθέτη μπορεί να μεταβάλλεται. Ορίζεται συνεπώς ως θ η στιγμιαία γωνιακή απόκλιση από τη γωνία αναφοράς $\theta=0$ του στρεφόμενου με συχνότητα ω_0 κοινού πλαισίου το οποίο είναι συγχρονισμένο με την ώρα UTC. Ομοίως με τη γωνία θ , το μέτρο του φασιθέτη είναι επίσης μεταβλητό μέγεθος.

Στο πρότυπο [IEE11] ορίζεται το συνολικό σφάλμα εκτίμησης διανύσματος (*Total Vector Error – TVE*) ως το κανονικοποιημένο μέτρο της διαφοράς μεταξύ του εκτιμώμενου από το PMU φασιθέτη και της θεωρητικής τιμής αυτού:

$$TVE = \frac{|\hat{f}_m - \hat{f}|}{|\hat{f}|} \quad (2-3)$$

όπου με $\hat{f}_m$ συμβολίζεται ο εκτιμώμενος από το PMU φασιθέτης και $\hat{f}$ η θεωρητική τιμή του. Με βάση το πρότυπο [IEE11], η αποδεκτή τιμή του συνολικού σφάλματος εκτίμησης διανύσματος TVE πρέπει να είναι μικρότερη του 1%. Το TVE συμπεριλαμβάνει όλες τις διεργασίες που εισάγουν σφάλμα στην τελική εκτίμηση του φασιθέτη, όπως σφάλματα συγχρονισμού, σφάλματα εκτίμησης φάσης και σφάλματα εκτίμησης μέτρου. Στο Σχήμα 2-3 απεικονίζεται το αποδεκτό σφάλμα TVE ως κύκλος με κέντρο το πέρας του φασιθέτη.



Σχήμα 2-3 Αποδεκτό κριτήριο TVE 1% εκτιμώμενου φασιθέτη

Με βάση τα παραπάνω, εκτιμήσεις ενός φασιθέτη εντός του κύκλου του σχήματος 2-3 θεωρούνται αποδεκτές. Ως εκ τούτου, στην παρούσα διατριβή γίνεται η θεώρηση ότι το σφάλμα εκτίμησης του φασιθέτη μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένας φασιθέτης:

$$\hat{V}_{noise} = m e^{j\theta} \quad (2-4)$$

ο οποίος αναπαριστά τον θόρυβο μετρήσεων. Με βάση τα παραπάνω, $|m| \leq 0,01$ και $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$. Στη διατριβή επιλέχθηκε κανονική κατανομή για την τυχαία μεταβλητή m μέσης τιμής $\mu=0$ και τυπικής απόκλισης $\sigma=0,3\%$ και ομοιόμορφη κατανομή για την τυχαία μεταβλητή θ στο διάστημα $(-180^\circ, 180^\circ)$.

2.3 New LIVES Index (NLI)

2.3.1 Γενικά

Ο δείκτης αναγνώρισης αστάθειας τάσης *NLI* παρουσιάστηκε στην εργασία [VLM17] και πρόκειται για γενίκευση της μεθόδου LIVES που παρουσιάστηκε στην ενότητα 2.1. Βασίζεται αποκλειστικά σε τοπικές συγχρονισμένες μετρήσεις από PMU που θεωρείται εγκατεστημένο στον υποσταθμό, ο οποίος δεν πρόκειται κατ'ανάγκη για υποσταθμό υποβιβασμού YT/MT. Ο κύριος στόχος του δείκτη *NLI* είναι η παρακολούθηση της ευστάθειας τάσης σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου και η έγκαιρη αναγνώριση εκδήλωσης αστάθειας τάσης.

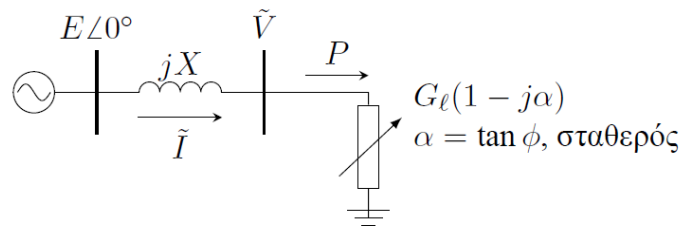
Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης αστάθειας τάσης *NLI* βασίζεται στον υπολογισμό της ευαισθησίας της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος από τον ζυγό μετρήσεων ως προς την ωμική αγωγιμότητα, όπως αυτή φαίνεται από τον ζυγό του PMU. Ο ζυγός των μετρήσεων θεωρείται ότι βρίσκεται σε σημείο του συστήματος που τροφοδοτεί με ισχύ μία ευρύτερη, και προς τα κατάντη, περιοχή κατανάλωσης, αποτελεί δηλαδή τμήμα

ενός διαδρόμου μεταφοράς. Ως μεταφερόμενη ενεργός ισχύς από τον ζυγό μετρήσεων νοείται η ενεργός ισχύς που διέρχεται από τον ζυγό και κατευθύνεται προς την ευρύτερη περιοχή κατανάλωσης.

Η αρχή λειτουργίας του δείκτη βασίζεται στο γεγονός ότι η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα από τον ζυγό μετρήσεων μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει την ενεργό ζήτηση της περιοχής φορτίου συμπεριλαμβανομένων και των αντίστοιχων απωλειών του δικτύου που παρεμβάλλεται από το σημείο μετρήσεων έως και τις καταναλώσεις. Στην περίπτωση που η αύξηση της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας συνοδεύεται από αύξηση της ενεργού ισχύος που μεταφέρεται από τον ζυγό μετρήσεων, τότε η ζήτηση της περιοχής φορτίου θεωρείται ότι μπορεί να εξυπηρετηθεί από το σύστημα μεταφοράς και συνεπώς η απόκριση του συστήματος είναι ευσταθής. Στην αντίθετη περίπτωση που η αύξηση της φαινόμενης αγωγιμότητας συνοδεύεται από μείωση της ισχύος που μεταφέρεται από τον ζυγό μετρήσεων, τότε η μεταφερόμενη ισχύς διέρχεται από τοπικό μέγιστο, γεγονός που σηματοδοτεί και το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος από τον συγκεκριμένο διάδρομο μεταφοράς. Καθίσταται επίσης σαφές, ότι στην περίπτωση μείωσης της φαινόμενης από τον ζυγό μετρήσεων αγωγιμότητας, το σύστημα κατευθύνεται σε κατάσταση μικρότερης φόρτισης και συνεπώς απομακρύνεται από την αστάθεια τάσης.

2.3.2 Συνθήκες ευστάθειας τάσης σε ακτινικό δίκτυο αμελώντας τις ωμικές απώλειες

Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζεται ένα ακτινικό δίκτυο στο οποίο αμελούνται οι ωμικές απώλειες, και με φορτίο που θεωρείται ότι διατηρεί σταθερό συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 2-4 Ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος

Για την περίπτωση του παραπάνω ακτινικού δικτύου, ο δείκτης NLI ισοδυναμεί με τη συνθήκη προσαρμογής των σύνθετων αντιστάσεων φορτίου και δικτύου. Συμβολίζοντας με Z_l τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου:

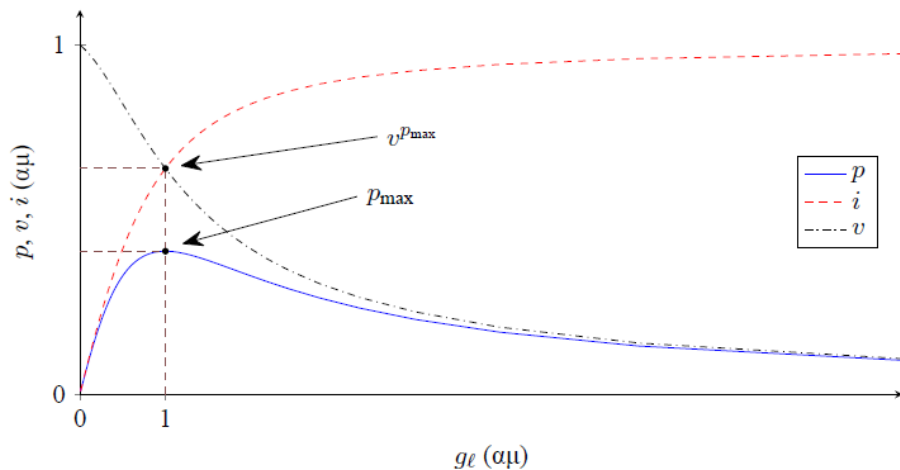
$$Z_l = R_l(1 + ja) \quad (2-5)$$

όπου $a = \tan \phi$ ο σταθερός συντελεστής ισχύος του φορτίου με την παραδοχή επαγωγικού φορτίου όταν $a > 0$. Η σύνθετη αγωγιμότητα του φορτίου είναι:

$$Y_l = \frac{1}{Z_l} = G_l(1 - ja) = \frac{1}{R_l(1 + a^2)} \quad (2-6)$$

Στην ιδεατή περίπτωση που οι απώλειες δικτύου είναι μηδενικές, η μεταφερόμενη ισχύς P ισούται με:

$$P = G_l V^2 = \frac{E^2 G_l (1 + a^2)}{1 + [X G_l (1 + a^2) + a]^2} \quad (2-7)$$



Σχήμα 2-5 Ενεργός ισχύς, τάση φορτίου και ρεύμα συναρτήσει αγωγιμότητας

Στο Σχήμα 2-5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της ενεργού ισχύος P , της τάσης V και του ρεύματος I συναρτήσει της ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου G_L . Για το συγκεκριμένο ακτινικό δίκτυο, η προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης του φορτίου με αυτήν του δικτύου επιτυγχάνεται όταν ισχύει η εξής σχέση:

$$G_L \sqrt{1 + \alpha^2} = \frac{1}{X} \quad (2-8)$$

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από το σχήμα 2-5, το οποίο απεικονίζει τον μηχανισμό αποκατάστασης της ζήτησης, καθώς η αγωγιμότητα του φορτίου αυξάνει, η μείωση της τάσης υπερκαλύπτεται από την αύξηση του ρεύματος, με αποτέλεσμα η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου να συνεχίζει να αυξάνει. Η ευσταθής αυτή συμπεριφορά του συστήματος συνεχίζεται μέχρι και το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (βλ. σχήμα 1-6 πορεία σημείου A). Η τιμή της αγωγιμότητας στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος αντιστοιχεί στη συνθήκη προσαρμογής (2-8). Για τιμές αγωγιμότητας φορτίου που υπερβαίνουν αυτήν της σχέσης (2-8) η πτώση τάσης υπερσχύει της αύξησης του ρεύματος, με αποτέλεσμα η καταναλισκόμενη ισχύς να μειώνεται, όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από την PV καμπύλη του σχήματος 1-6.

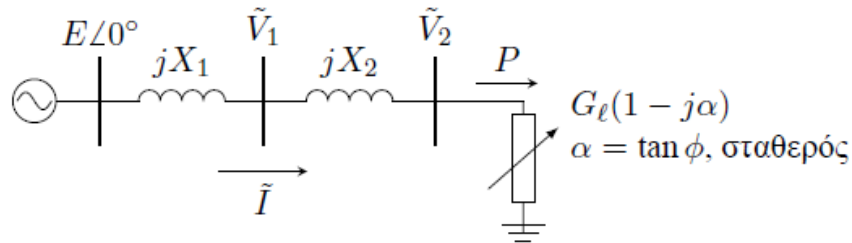
Με βάση τα παραπάνω, παρατηρείται ότι το σύστημα λειτουργεί ευσταθώς, αποκαθιστώντας την κατανάλωση εφόσον ισχύει η ακόλουθη ανισότητα:

$$G_L \sqrt{1 + \alpha^2} < \frac{1}{X} \quad (2-9)$$

Συνεπώς, υπό την προϋπόθεση της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου υπό σταθερό συντελεστή ισχύος, η συνθήκη (2-9) αποτελεί ικανή και αναγκαία συνθήκη ευστάθειας τάσης. Η αδυναμία ικανοποίησης της σχέσης (2-9) συνεπάγεται ότι το σύστημα παύει να είναι ευσταθές έχοντας διασχίσει το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Σε συνθήκες εμφάνισης αστάθειας τάσης η ζήτηση του φορτίου υπερβαίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ από το συνδυασμένο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς, με αποτέλεσμα να προκαλείται μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος και απότομη μείωση των τάσεων.

Όπως έχει συζητηθεί στην αναφορά [VLM17], η παρακολούθηση της συνθήκης (2-9) σε πραγματικό χρόνο μπορεί να πραγματοποιείται με απευθείας υπολογισμό της ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου G_L από τις συγχρονισμένες μετρήσεις τάσης και ρεύματος, καθώς και με παράλληλη εκτίμηση του δικτύου προς τα ανάντη του ζυγού μετρήσεων. Πολλές από τις εργασίες που αναφέρθηκαν στην ενότητα 1.8 επιχειρούν αυτήν ακριβώς την προσέγγιση. Όπως όμως επισημάνθηκε, οι συγκεκριμένες μέθοδοι προϋποθέτουν ότι τόσο ο συντελεστής ισχύος του φορτίου όσο και το ισοδύναμο δίκτυο Thévenin προς τα ανάντη του ζυγού φορτίου παραμένουν σταθερά. Στην πράξη παρόλα αυτά, συνήθως καμία από τις παραπάνω υποθέσεις δεν αληθεύει, καθώς αφενός το ισοδύναμο δίκτυο μεταβάλλεται συνεχώς λόγω αλλαγών είτε στο σύστημα μεταφοράς είτε στα υπόλοιπα φορτία του συστήματος, όπως αναφέρεται και στην εργασία [WPL11]. Επιπρόσθετα, όπως

δείχνεται στην [VLM17], ακόμη και όταν ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι σταθερός, εάν οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ζυγό του συστήματος μεταφοράς που είναι απομακρυσμένος από την περιοχή κατανάλωσης, τότε ο μετρούμενος συντελεστής ισχύος είναι μεταβλητός, λόγω του ενδιάμεσου τμήματος δικτύου προς τα κατάντη του ζυγού μετρήσεων. Εάν για παράδειγμα θεωρηθεί το δίκτυο του σχήματος 2-6 τότε λαμβάνοντας μετρήσεις στον ενδιάμεσο ζυγό με τάση $\tilde{V}_1$ η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση ισούται με:



Σχήμα 2-6 Ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες με μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε ενδιάμεσο ζυγό

$$Z_{app} = jX_2 + \frac{1}{G_\ell(1 - ja)} \quad (2-10)$$

Δεδομένου ότι η σύνθετη αντίσταση του ισοδύναμου δικτύου Thévenin ισούται με X_1 , η συνθήκη προσαρμογής της μετρούμενης σύνθετης αγωγιμότητας στον ενδιάμεσο ζυγό δίνει:

$$Y_{app} = \frac{1}{X_1} \quad (2-11)$$

Η σχέση (2-11) όμως δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική συνθήκη ευστάθειας τάσης, η οποία συνεχίζει να είναι η (2-9) με $X = X_1 + X_2$. Πιο συγκεκριμένα, κατά την ευσταθή λειτουργία του δικτύου ισχύουν οι ανισότητες:

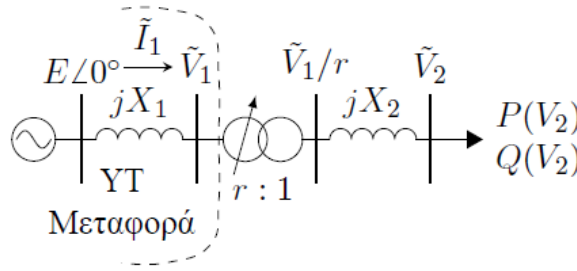
$$Z_{app} > \frac{1}{G_\ell\sqrt{1+a^2}} > \sqrt{(X_1 + X_2)^2} > X_1 \quad (2-12)$$

Δεδομένης της σχέσης (2-12), συνεπάγεται ότι κατά την εμφάνιση της συνθήκης αστάθειας (2-9) συνεχίζει να ισχύει η σχέση $Z_{app} > X_1$ δίνοντας ψευδή ένδειξη ευστάθειας.

Κατ'έκταση, παρά την απόπειρα πολλών ερευνητικών προσπαθειών που αναφέρθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο σχετικά με την εκτίμηση της σύνθετης αντίστασης Thévenin του δικτύου προς τα ανάντη του σημείου μετρήσεων, καθίσταται σαφές ότι εάν το σημείο μέτρησης δεν βρίσκεται ακριβώς σε έναν υποσταθμό με φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, τότε το κριτήριο προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης του φορτίου με αυτήν του ισοδύναμου Thévenin δεν θα δώσει έγκαιρη προειδοποίηση για την ανίχνευση αστάθειας τάσης. Είναι επίσης σαφές, ότι όσο μεγαλύτερη η τιμή της παρεμβαλλόμενης σύνθετης αντίστασης X_2 , τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το σφάλμα ανίχνευσης της αστάθειας.

2.4 Συσχέτιση LIVES με δείκτη NLI

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται συνοπτικά η ιδέα γενίκευσης της μεθόδου LIVES, προκειμένου να γίνει πιο σαφής η συσχέτισή της με τον δείκτη αστάθειας NLI . Στο Σχήμα 2-7 παρουσιάζεται ένα ακτινικό δίκτυο, στο οποίο θεωρείται ότι το φορτίο τροφοδοτείται από μετασχηματιστή εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, ενώ αμελούνται οι ωμικές απώλειες.



Σχήμα 2-7 Ακτινικό δίκτυο με υποσταθμό YT/MT εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ

Όταν αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού r , μεταβάλλεται η φαινόμενη στο πρωτεύον σύνθετη αγωγιμότητα φορτίου, αλλά ο συντελεστής ισχύος του φορτίου διατηρείται σταθερός. Η μείωση του λόγου μετασχηματισμού r συνεπάγεται αύξηση της φαινόμενης αγωγιμότητας στο πρωτεύον του μετασχηματιστή, πράγμα που αντιστοιχεί και σε αύξηση της ζήτησης, ενώ η αύξηση συνεπάγεται το αντίθετο.

Χωρίς βλάβη της γενικότητας και στην υποθετική περίπτωση που η σύνθετη αντίσταση Thévenin του ανάντη δικτύου παραμένει σταθερή κατά τη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού, τότε η ικανή και αναγκαία συνθήκη για ευστάθεια τάσης εξακολουθεί να είναι η (2-9) με $X = X_l$. Σημειώνεται ότι για να συμβεί αυτό στην πράξη, θα πρέπει η μοναδική μεταβολή στο σύστημα μεταφοράς να αφορά στον λόγο μετασχηματισμού r , ειδάλλως οιαδήποτε μεταβολή στο υπόλοιπο σύστημα έχει αντίκτυπο στη σύνθετη αντίσταση του δικτύου Thévenin.

Με βάση την ανάλυση που έχει παρουσιαστεί στις εργασίες [VVC08] και [VS07] η ικανή συνθήκη ευστάθειας τάσης μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta r} < 0 \quad (2-13)$$

Η σχέση (2-13) είναι ισοδύναμη με τη συνθήκη μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, διότι η αύξηση της φαινόμενης αγωγιμότητας στην πλευρά πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή λόγω μείωσης του λόγου μετασχηματισμού, συνοδεύεται και από αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος. Ο παραπάνω συλλογισμός στηρίζεται στην υπόθεση ότι η κατανάλωση είναι συνάρτηση της τάσης και συνεπώς αυξάνει με την αύξηση της τάσης δευτερεύοντος V_2 .

Στη συνέχεια, υπό την προϋπόθεση ότι οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε έναν ζυγό μεταφοράς (π.χ. ζυγό πρωτεύοντος του μετασχηματιστή) από μία μονάδα μέτρησης φασιθετών, είναι σαφές ότι η μείωση του λόγου μετασχηματισμού r συνεπάγεται και αύξηση της φαινόμενης στο πρωτεύον ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου. Κατά αντιστοιχία, η αύξηση του μέτρου της τάσης V_2 συνεπάγεται και αύξηση της αποστελλόμενης ενεργού ισχύος στη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα, όταν το σύστημα ανταποκρίνεται ευσταθώς. Με βάση τα παραπάνω, η ικανή συνθήκη ευστάθειας μπορεί να μετατραπεί στην ακόλουθη:

$$\frac{\Delta P}{\Delta G_{app}} > 0 \quad (2-14)$$

όπου με G_{app} συμβολίζεται η φαινόμενη αγωγιμότητα στο πρωτεύον του μετασχηματιστή:

$$G_{app} = Re \left\{ \hat{I}_1 / \hat{V}_1 \right\} \quad (2-15)$$

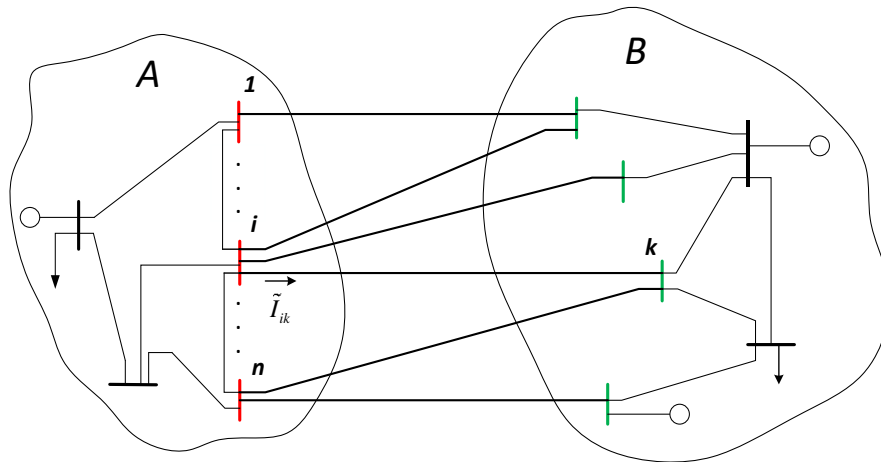
Το βασικό πλεονέκτημα στην προκειμένη περίπτωση αφορά στο ότι η ικανή και αναγκαία συνθήκη για την ανίχνευση αστάθειας τάσης έχει εκφραστεί με ηλεκτρικά μεγέθη που δεν απαιτούν ΣΑΤΥΦ για την επιτήρηση της ευστάθειας τάσης. Συνεπώς, υπό την προϋπόθεση διαθεσιμότητας συγχρονισμένων μετρήσεων τάσης και ρεύματος σε έναν ζυγό του συστήματος μεταφοράς, είναι δυνατόν να υλοποιηθεί μέθοδος επιτήρησης ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο αξιοποιώντας τη σχέση (2-14). Η δυνατότητα αυτή

παρέχεται είτε από PMU, είτε από ψηφιακό ηλεκτρονόμο, καθώς δεν είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός του εξοπλισμού με τους υπόλοιπους υποσταθμούς του συστήματος, εφόσον η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας τάσης περιορίζεται αμιγώς στο επίπεδο ενός υποσταθμού.

2.4.1 Εφαρμογή του δείκτη NLI σε διάδρομο μεταφοράς

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς είναι κατά κανόνα βροχοειδούς δομής, και μόνο κατ'εξάιρεση εμφανίζουν ακτινική τοπολογία σε απομακρυσμένα συνήθως σημεία. Τα δε κέντρα κατανάλωσης συνηθίζεται να τροφοδοτούνται από ένα σύνολο γραμμών μεταφοράς (κυκλωμάτων) οι οποίες συνδέονται, κατά κανόνα, με διαφορετικά κέντρα παραγωγής, προκειμένου να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός βαθμός αξιοπιστίας κατά τη λειτουργία του συστήματος. Το σύνολο των γραμμών που εξυπηρετούν τα κέντρα κατανάλωσης χαρακτηρίζεται συνήθως ως *διάδρομος μεταφοράς ισχύος*, διότι αφενός συνδέει δύο διακριτές περιοχές του συστήματος μεταφέροντας ενέργεια, ενώ αφετέρου διαχωρίζει ηλεκτρικά τις δύο περιοχές εάν το σύνολο των γραμμών τεθεί εκτός λειτουργίας, ορίζοντας παράλληλα την έννοια του *συνόλου διαχωρισμού* (*cut-set*) [DP10]. Σημειώνεται ότι ο όρος *περιοχή κατανάλωσης* δεν αποκλείει την ύπαρξη μονάδων παραγωγής στην περιοχή, αλλά σηματοδοτεί κυρίως την ανάγκη της περιοχής για εισαγωγή ενέργειας σε συστηματική βάση, ώστε να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος.

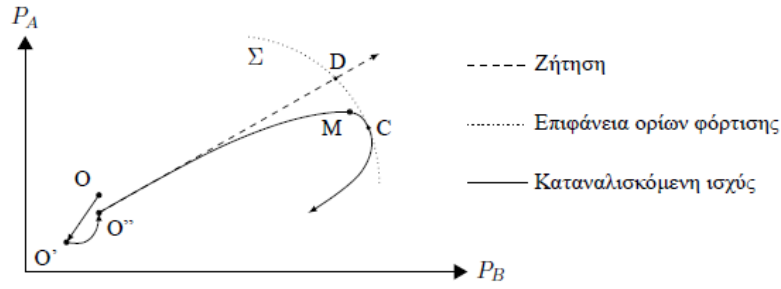
Ενδεικτικά απεικονίζονται στο Σχήμα 2-8 δύο περιοχές ενός συστήματος μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή κατανάλωσης A τροφοδοτείται από την περιοχή B μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς ισχύος που απαρτίζεται από έξι γραμμές μεταφοράς. Για τους σκοπούς της ανάλυσης θεωρείται ότι η περιοχή A συνδέεται *ασθενώς* με την περιοχή B και συνεπώς είναι επιρρεπής σε εκδήλωση φαινομένων αστάθειας τάσης. Με τον όρο *ασθενής σύνδεση*, νοείται η σύνδεση δύο περιοχών από γραμμές μεταφοράς, των οποίων η συνολική σύνθετη αντίσταση είναι επαρκώς μεγάλη, ώστε σε συνάρτηση με τις διακινούμενες ποσότητες ισχύος μεταξύ των δύο περιοχών και τη διαθεσιμότητα τοπικής παραγωγής να είναι δυνατόν να εμφανιστούν φαινόμενα αστάθειας τάσης.



Σχήμα 2-8 Δύο διακριτές περιοχές ΣΗΕ με ευάλωτο κέντρο κατανάλωσης την περιοχή A , ισχυρό σύστημα την περιοχή B και διάδρομο μεταφοράς

Ως *συνοριακοί ζυγοί* (*boundary buses*) ορίζονται οι ζυγοί στους οποίους συνδέονται οι γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς [DP10]. Οι συνοριακοί ζυγοί της περιοχής A καλούνται και συνοριακοί ζυγοί *άφιξης*, ενώ οι συνοριακοί ζυγοί από την πλευρά του διαδρόμου που αποστέλλεται η ισχύς καλούνται συνοριακοί ζυγοί *αναχώρησης*.

Στο σχήμα 2-9 απεικονίζεται μία τροχιά του συστήματος στον χώρο κατάστασης των συνολικών καταναλώσεων των περιοχών A και B . Ως τροχιά φόρτισης του συστήματος νοείται η καμπύλη που προκύπτει από τα επιμέρους σημεία λειτουργίας εκ των οποίων διέρχεται το σύστημα καθώς μεταβάλλεται η φόρτισή του. Η κατεύθυνση φόρτισης του συστήματος δεν είναι κατ'ανάγκη σταθερή, αλλά καθορίζεται από τους συντελεστές συμμετοχής των επιμέρους φορτίων των περιοχών του συστήματος.



Σχήμα 2-9 Επιφάνεια ορίων φόρτισης στον χώρο αθροιστικών φορτίων περιοχής Α και Β

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, το σχήμα 2-9 απεικονίζει την πορεία που ακολουθεί το σημείο λειτουργίας του συστήματος κατά την εμφάνιση ενός συμβάντος που καταλήγει σε εκδήλωση αστάθειας τάσεως. Αρχικά το σύστημα θεωρείται ότι ισορροπεί στο σημείο O , όταν μία υποθετική διαταραχή (π.χ. βραχυκύκλωμα) οδηγεί το σημείο λειτουργίας ακαριαία στο O' και στη συνέχεια το σύστημα οδηγείται στο νέο σημείο ισορροπίας O'' , το οποίο βρίσκεται στη γειτονιά του αρχικού σημείου ισορροπίας. Κατόπιν θεωρείται ότι η ζήτηση των περιοχών Α και Β αυξάνεται σταδιακά προς την κατεύθυνση που ορίζει το διακεκομμένο βέλος του σχήματος 2-9.

Κατά τη διάρκεια που αυξάνεται η ζήτηση των περιοχών Α και Β, το σύστημα κινείται προς την κατεύθυνση του διακεκομμένου βέλους, και κατά την αρχική φάση η τροχιά ταυτίζεται με την πορεία αύξησης της ζήτησης, υποδηλώνοντας ότι το σύστημα ανταποκρίνεται επιτυχώς στην αύξηση της ζήτησης. Στη συνέχεια όμως, καθώς αυξάνει η συνολική φόρτιση των περιοχών, οι τάσεις διανομής της περιοχής Α δυσκολεύονται σταδιακά να παραμείνουν εντός της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ, γεγονός που αντικατοπτρίζεται από τη μείωση του ρυθμού αύξησης της κατανάλωσης της περιοχής Α και την ταυτόχρονη ενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ, προκειμένου να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης. Αυτό σταδιακά επιφέρει τερματισμό των λόγων μετασχηματισμού r των ΣΑΤΥΦ της περιοχής Α, γενικότερη αδυναμία στήριξης της τάσης της περιοχής και συνεπώς αδυναμία περαιτέρω εξυπηρέτησης της ζήτησης. Η αδυναμία κάλυψης ζήτησης της περιοχής Α, αποτυπώνεται από την απόκλιση της τροχιάς του συστήματος στον χώρο των συνολικών καταναλώσεων, με τη μέγιστη κατανάλωση της περιοχής Α να επιτυγχάνεται στο σημείο M του σχήματος 2-9. Σημειώνεται ωστόσο, ότι η μεγιστοποίηση της κατανάλωσης στην περιοχή Α, δεν είναι όριο ευστάθειας του συστήματος, καθώς τα όρια αυτά βρίσκονται επί της επιφάνειας των ορίων φόρτισης. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές ότι πέραν του σημείου M η αποκατάσταση της ζήτησης της περιοχής Α δεν είναι δυνατή και συνεπώς επιτρέπεται η λήψη μέτρων αντιμετώπισης, προκειμένου αυτή να περιοριστεί.

Ενόσω η συνολική ζήτηση του συστήματος συνεχίζει να αυξάνει, η τροχιά προσεγγίζει και εφάπτεται τελικά στην επιφάνεια ορίων φόρτισης (σημείο C Σχήμα 2-9) προτού η συνολική κατανάλωση των δύο περιοχών αρχίσει να μειώνεται σηματοδοτώντας το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και την εκδήλωση αστάθειας τάσης. Όπως περιγράφεται και στις αναφορές [VCV08], [VVC10], όταν η ζήτηση ισχύος επιχειρήσει να υπερβεί τα όρια φόρτισης του συστήματος τότε η κατανάλωση μίας ευάλωτης περιοχής θα προλάβει να φτάσει σε μέγιστο προτού το σύστημα διασχίσει το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, που αποτελεί και το σημείο αστάθειας (σημείο C στο Σχήμα 2-9). Το αντίστοιχο επιχείρημα περιγράφεται παρόμοια στην αναφορά [Gri12], όπου και αποδεικνύεται ότι αναπαριστώντας ένα σύστημα μεταφοράς μέσω των εξισώσεων ροής φορτίου, τότε πριν την εμφάνιση της διακλάδωσης σαγματικού κόμβου τουλάχιστον μία γραμμή μεταφοράς στο σύστημα θα έχει περάσει από μέγιστο.

Με αφορμή το σχήμα 2-8, και επιχειρώντας να γενικευτεί ο δείκτης NLI σε βροχοειδή συστήματα, υπολογίζεται η συνολική αφικνούμενη ενεργός ισχύς σε έναν συνοριακό ζυγό άφιξης. Για να γίνει αυτό, υπολογίζεται πρώτα το ρεύμα άφιξης στον i -οστό συνοριακό ζυγό άφιξης ως εξής:

$$\hat{I}_i = -\sum_{k \in K_i} \hat{I}_{ik}, \quad i = 1, \dots, n \quad (2-16)$$

όπου με K_i συμβολίζεται το σύνολο που περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του συνοριακού ζυγού i με τους συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης, και περιλαμβάνει τους δείκτες k που αντιστοιχούν στις γραμμές μεταφοράς του διαδρόμου που συνδέονται στον συνοριακό ζυγό i .

Υποθέτοντας διαθέσιμο PMU στον συνοριακό ζυγό άφιξης i , είναι δυνατόν να μετρηθούν η τάση του ζυγού και το συνολικό ρεύμα άφιξης από τα επιμέρους ρεύματα των γραμμών του διαδρόμου που προσπίπτουν στον ζυγό i . Γνωρίζοντας τους φασιθέτες της τάσης $\hat{V}_i$ και του συνολικού ρεύματος άφιξης $\hat{I}_i$, υπολογίζονται άμεσα η αφικνούμενη ενεργός ισχύς P_i και η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα προς τα κατάντη του συνοριακού ζυγού άφιξης G_i από τις σχέσεις:

$$P_i = \text{Re}\{\hat{V}_i \hat{I}_i^*\} \quad (2-17)$$

$$G_i = \text{Re}\{\hat{I}_i / \hat{V}_i\} \quad (2-18)$$

Με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, καθώς η ζήτηση της περιοχής A αυξάνει, αναμένεται να παρατηρηθεί μείωση της ενεργού ισχύος άφιξης στην περιοχή A κατά τη διέλευση του συστήματος από το σημείο M στο C . Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι σε τουλάχιστον έναν συνοριακό ζυγό άφιξης της περιοχής A και σε τουλάχιστον μία από τις γραμμές του συνόλου διαχωρισμού αναμένεται να παρατηρηθεί μεγιστοποίηση της ισχύος άφιξης, ενόσω η ζήτηση της περιοχής συνεχίζει να αυξάνει. Σημειώνεται ότι η αύξηση της ζήτησης της περιοχής A αντικατοπτρίζεται στην αύξηση της ωμικής αγωγιμότητας, όπως αυτή φαίνεται από κάθε συνοριακό ζυγό της. Το φαινόμενο αυτό προκαλείται από τον μηχανισμό αποκατάστασης του φορτίου, ο οποίος μπορεί να εκδηλωθεί είτε μέσω της μείωσης των λόγων μετασχηματισμού r των ΣΑΤΥΦ, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.4, είτε από άλλον εγγενή μηχανισμό αποκατάστασης του φορτίου (π.χ. θερμοστατικά φορτία).

Προκειμένου να ανιχνευτεί η παραπάνω συνθήκη, παρακολουθείται καταρχάς η ισχύς άφιξης σε κάθε συνοριακό ζυγό της περιοχής A , με βάση τη σχέση (2-17). Η μεγιστοποίηση της ισχύος άφιξης αναμένεται να ανιχνευτεί από τη σχέση (2-19) σε τουλάχιστον ένα συνοριακό ζυγό άφιξης:

$$\Delta P_i = P_i(t) - P_i(t - \Delta t) < 0, \quad t > t_M, i = 1, \dots, n \quad (2-19)$$

όπου t_M η χρονική στιγμή κατά την οποία η τροχιά του συστήματος διέρχεται από το σημείο M και Δt ο ρυθμός δειγματοληψίας της μέτρησης ενεργού ισχύος. Στη συνέχεια, και με βάση την προηγηθείσα ανάλυση, κατά τη διάσχιση της τροχιάς του συστήματος από το σημείο M στο σημείο C η ζήτηση της περιοχής A αυξάνει. Αυτό αναμένεται να παρατηρηθεί σε τουλάχιστον έναν από τους συνοριακούς ζυγούς της περιοχής με βάση τη σχέση (2-20):

$$\Delta G_i = G_i(t) - G_i(t - \Delta t) > 0, \quad t > 0, i = 1, \dots, n \quad (2-20)$$

Με βάση τη σχέση (2-14), όταν η τροχιά του συστήματος διασχίσει το σημείο M , τότε η ποσότητα $\Delta P / \Delta G$ αναμένεται να γίνει αρνητική σε τουλάχιστον έναν συνοριακό ζυγό άφιξης της περιοχής A πριν η τροχιά προσεγγίσει το σημείο C της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, το οποίο και σηματοδοτεί την αστάθεια τάσης. Κατά συνέπεια, η σχέση:

$$NLI_i = \frac{\Delta P_i}{\Delta G_i} > 0 \quad (2-21)$$

για κάθε συνοριακό ζυγό $i = 1, \dots, n$ είναι μία ικανή συνθήκη ευστάθειας τάσης για μία περιοχή κατανάλωσης του συστήματος, η οποία τροφοδοτείται μέσω του διαδρόμου μεταφοράς και τείνει να είναι ευάλωτη σε αστάθεια τάσης. Η παραβίαση της (2-21) σηματοδοτεί αδυναμία αποκατάστασης της ζήτησης της παρακολουθούμενης περιοχής και αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την επερχόμενη αστάθεια τάσης στο σύστημα.

Το γεγονός ότι το σημείο M προηγείται του σημείου C λειτουργεί ευεργετικά ως προς την υπεισερχόμενη καθυστέρηση ανίχνευσης της αστάθειας, η οποία προκαλείται αφενός από την εφαρμογή φίλτρων στα μετρούμενα ηλεκτρικά μεγέθη όπως θα φανεί σε επόμενη ενότητα αλλά και αφετέρου από τις απώλειες του τμήματος δικτύου που παρεμβάλλεται μεταξύ των σημείων μέτρησης και της κατανάλωσης, όπως αναλύεται στην ενότητα 3.3. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο δείκτης NLI (2-21) μπορεί να λειτουργήσει ως μία έγκαιρη ένδειξη κατάστασης έκτακτης ανάγκης για το σύστημα, δεδομένου ότι αυτό λειτουργεί πλησίον των ορίων φόρτισής του.

2.5 Υλοποίηση NLI με κινητό μέσο όρο

2.5.1 Γενικά

Με βάση τις σχέσεις (2-14) και (2-21), ο δείκτης NLI βασίζεται στον υπολογισμό της ευαισθησίας της ενεργού ισχύος ως προς τη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα σε έναν ζυγό μεταφοράς του συστήματος, και ειδικότερα σε έναν συνοριακό ζυγό μιας περιοχής εάλωτης σε αστάθεια τάσης. Δεδομένου ότι ο υπολογισμός υλοποιείται από μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο, είναι αναγκαία η διακριτοποίηση των σχέσεων (2-14) και (2-21).

Σημειώνεται ότι οι υλοποιήσεις μεθόδων που βασίζονται σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη και κατά το δυνατόν να εξουδετερώνουν ανεπιθύμητα φαινόμενα που σχετίζονται είτε με τη διαδικασία δειγματοληψίας των σημάτων, όπως π.χ. είναι ο θόρυβος των μετρήσεων, είτε με δυναμικές του συστήματος οι οποίες δεν σχετίζονται άμεσα με την ευστάθεια τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, όπως είναι π.χ. οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι ο δείκτης αστάθειας NLI αποσκοπεί στην ανίχνευση αστάθειας τάσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οι διαφορές ΔP , ΔG της σχέσης (2-21) θα πρέπει να αναφέρονται σε μακροπρόθεσμες μεταβολές των μεγεθών, δηλαδή σε χρονικά διαστήματα που συμβαδίζουν με τις χρονικές σταθερές των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, χωρίς όμως να προξενούνται σημαντικές καθυστερήσεις στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την ευστάθεια του συστήματος. Συνεπώς, απώτερος σκοπός της χρήσης ενός φίλτρου για τον υπολογισμό της σχέσης (2-21) είναι η ελαχιστοποίηση της επίδρασης των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, αλλά και του θορύβου μετρήσεων στη χρονική απόκριση των υπολογιζόμενων ηλεκτρικών μεγεθών G και P στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εάν αυτό δεν επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό, τότε υποβαθμίζεται εκ των πραγμάτων η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του δείκτη NLI , λόγω εμφάνισης ανεπιθύμητων φαινομένων, όπως π.χ. ταλαντωτική συμπεριφορά δείκτη ή/και ψευδείς ενδείξεις αστάθειας.

Για την αντιμετώπισή των παραπάνω ανεπιθύμητων φαινομένων έχουν χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας δύο διαφορετικές μέθοδοι. Η πρώτη αφορά στη χρήση φίλτρου κινητού μέσου όρου (*moving average filter*), ενώ η δεύτερη κάνει χρήση εργαλείων στο πεδίο χρόνου-συχνότητας, και συγκεκριμένα του μετασχηματισμού STFT που παρουσιάζεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

2.5.2 Εφαρμογή κινητού μέσου όρου ως φίλτρου

Η πρώτη προσέγγιση υλοποίησης του NLI παρουσιάστηκε στην εργασία [VLM17] και βασίζεται στον υπολογισμό κινούμενου μέσου όρου του ψηφιακού σήματος. Συγκεκριμένα, με δεδομένο έναν τυπικό ρυθμό δειγματοληψίας PMU ενός δείγματος ανά κύκλο ($\Delta t = 20$ ms), υπολογίζονται τα φιλτραρισμένα σήματα $\bar{G}$ (και $\bar{P}$ αντίστοιχα) ως εξής:

$$\bar{G} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} G(t - i\Delta t) \quad (2-22)$$

Η παράμετρος N αναφέρεται στο εύρος του παραθύρου από το οποίο υπολογίζεται ο κινητός μέσος όρος και είναι καθοριστική διότι η αύξησή της βελτιώνει την εξομάλυνση του σήματος, αλλά αυξάνει και την καθυστέρηση παρακολούθησης του πρωτογενούς σήματος. Εάν π.χ. χρησιμοποιηθούν οι τιμές παραμέτρων $N = 50$ και $\Delta t = 20$ ms, τότε το παράθυρο υπολογισμού των κινούμενων μέσων όρων $\bar{G}$ και $\bar{P}$ περιέχει μετρήσεις G και P που αντιστοιχούν σε χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου. Η ανανέωση του κινητού μέσου όρου είναι σημαντικό να διενεργείται αρκετά συχνά, προκειμένου να περιορίζονται οι απότομες μεταβολές. Δεδομένου του μικρού υπολογιστικού κόστους που επιτυγχάνεται όταν τα δεδομένα αποθηκεύονται κυκλικά

στη μνήμη (*circular buffers*), η ανανέωση του κινητού μέσου μπορεί να πραγματοποιείται με το διάβασμα κάθε νέας μέτρησης, απορρίπτοντας την παλαιότερη από τη μνήμη.

Με βάση τα παραπάνω, τροποποιείται η σχέση (2-21) ώστε να αναφέρεται σε διαφορές $\Delta\bar{G}$ και $\Delta\bar{P}$ κινητών μέσων των μεγεθών P και G και προκειμένου οι διαφορές να αφορούν τη μακροπρόθεσμη δυναμική του συστήματος, θα πρέπει να αφαιρούν τιμές κινητών μέσων όρων που θα απέχουν μεταξύ τους χρονικό διάστημα ΔT της τάξεως των 7-10 δευτερολέπτων. Ένα διάστημα ΔT της συγκεκριμένης τάξης μεγέθους θεωρείται επαρκές, προκειμένου τυχόν βραχυπρόθεσμα φαινόμενα να έχουν προλάβει να αποσβεστούν επαρκώς. Συνεπώς, οι διαφορές $\Delta\bar{G}$ (αντίστοιχα οι $\Delta\bar{P}$) υπολογίζονται ως εξής:

$$\Delta\bar{G}_k = \Delta\bar{G}(t_k) = \bar{G}(t_k) - \bar{G}(t_k - \Delta T), \quad t_k = t_{k-1} + \Delta T \quad (2-23)$$

Παρά το γεγονός ότι στην (2-23) οι ποσότητες έχουν εξομαλυνθεί από τη χρήση του κινητού μέσου, ο υπολογισμός διαφορών εισάγει τεχνητό θόρυβο. Το γεγονός αυτό μπορεί να επανεμφανίσει ανεπιθύμητες διακυμάνσεις και ταλαντωτική συμπεριφορά στα αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό τίθεται ένα ελάχιστο όριο ε ώστε οι σχετικές διαφορές που υπολογίζονται βάσει της σχέσης (2-23) να απορρίπτονται εάν δεν υπερβαίνουν το εν λόγω όριο, όπως μπορεί να συμβεί στην πράξη λόγω π.χ. θορύβου μετρήσεων. Συνεπώς, για τη συμπερίληψη των διαφορών της (2-23) στους υπολογισμούς της (2-21), θα πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$$\frac{\Delta\bar{G}_k}{\bar{G}(t_{k-1})} \geq \varepsilon \quad (2-24)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή της παραμέτρου ε δεν προκύπτει συστηματικά, αλλά μπορεί να προσαρμοστεί στο εκάστοτε σύστημα δοκιμών, δεδομένων των χαρακτηριστικών του συστήματος. Σε κάθε περίπτωση η εκλογή της παραμέτρου ε πρέπει να είναι τέτοια ώστε αφενός να ελαχιστοποιείται η επίδραση του θορύβου μετρήσεων και αφετέρου να μην απορρίπτονται διαφορές που αντιστοιχούν σε αργή αλλά ρεαλιστική αύξηση του φορτίου.

Εκτός της χρήσης του κατωφλίου ε , ένα επιπρόσθετο στάδιο φίλτρου υπολογίζει τον κινούμενο μέσο όρο των N πιο πρόσφατων αποδεκτών διαφορών $\Delta\bar{G}_k$ και $\Delta\bar{P}_k$ ως εξής:

$$\overline{\Delta\bar{G}}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta\bar{G}_{k-i} \quad (2-25)$$

Σημειώνεται ότι η παράμετρος N δεν πρέπει να είναι μεγάλη καθώς, όπως γίνεται αντιληπτό, αυξάνει σημαντικά τη χρονική καθυστέρηση στην ανίχνευση της αστάθειας. Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω, ο NLI υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$NLI_k = NLI(t_k) = \frac{\overline{\Delta\bar{P}}_k}{\overline{\Delta\bar{G}}_k} \quad (2-26)$$

Το τελευταίο στάδιο φίλτρου της συγκεκριμένης υλοποίησης του NLI αφορά στον υπολογισμό ενός κινούμενου μέσου όρου από τους τελευταίους N υπολογισμούς NLI_k . Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ποσότητα:

$$\overline{NLI}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} NLI_{k-i} \quad (2-27)$$

Συνεπώς, με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε στις ενότητες 2.4 και 2.4.1, μόλις παρατηρηθεί αλλαγή προσήμου του δείκτη $\overline{NLI}_k$ ενεργοποιείται σήμα συναγερμού. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη συγκεκριμένη προσέγγιση υλοποίησης κινούμενου μέσου αναφορικά με την περίπτωση της προσομοίωσης με το σύστημα σε οιονεί στατικής κατάσταση μπορούν να βρεθούν στην εργασία [Λαμ17].

2.6 Μέθοδοι ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων

2.6.1 Γενικά

Το επιστημονικό πεδίο της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη από τη δεκαετία του 1960 λόγω της αυξανόμενης χρήσης των ψηφιακών υπολογιστών και έχει βρει εφαρμογή σε μία αδιαμφισβήτητα πολύ μεγάλη γκάμα εφαρμογών του επιστημονικού φάσματος. Ωστόσο, οι πρώτες εφαρμογές σε πεδία της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού δεν σχετίζονταν με την ενέργεια αλλά με πεδία των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, των τηλεπικοινωνιών, και εφαρμογών σχετικών με επεξεργασία ήχου και εικόνας.

Με την αυξανόμενη όμως αξιοποίηση των ψηφιακών υπολογιστών και των μετρητικών διατάξεων στις εγκαταστάσεις των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ξεκίνησε η σταδιακή διείσδυση των εφαρμογών επεξεργασίας σήματος στην ηλεκτρική βιομηχανία.

2.6.2 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος σε ΣΗΕ

Οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης εφαρμογών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έγιναν κυρίως με αφορμή ζητήματα ποιότητας ισχύος [BG06] που εμφανίζονταν σε διασυνδεδεμένα ΣΗΕ είτε λόγω της αυξανόμενης χρήσης διατάξεων με μετατροπείς ισχύος, είτε λόγω άλλων μη γραμμικών διατάξεων και φαινομένων που επηρέαζαν την κυματομορφή των βασικών ηλεκτρικών μεγεθών (π.χ. ζεύξεις διατάξεων κλπ.). Η παρουσία αρμονικού περιεχομένου στις μετρήσεις προκαλούσε προβλήματα στον υπολογισμό βασικών ηλεκτρικών μεγεθών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δυσκολίες στη λειτουργία σχημάτων ελέγχου και προστασίας. Οι εργασίες [GH82], [BDD93], [LR97] επικεντρώνονταν στη μέτρηση και παρακολούθηση της συχνότητας ενός ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο υπό την παρουσία αρμονικού περιεχομένου σε ηλεκτρικά μεγέθη. Ακόμη και σήμερα υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον γύρω από το συγκεκριμένο θέμα και έχει δημοσιευτεί ένας μεγάλος αριθμός εργασιών.

Σε πλήθος ερευνητικών εργασιών σχετικές με εφαρμογές μεθόδων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος σε ΣΗΕ χρησιμοποιείται ο DFT, μαζί με τον *παραθυρικό μετασχηματισμό Fourier* ή *μετασχηματισμό Fourier μικρής διάρκειας* – (*Short-Time Fourier Transform – STFT*) που αποτελεί μία εκδοχή υλοποίησης του DFT σε εφαρμογές που ασχολούνται με την ψηφιακή επεξεργασία σημάτων μη προκαθορισμένης διάρκειας.

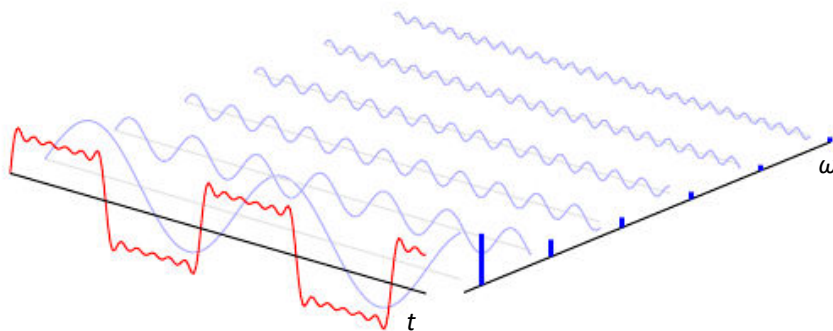
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας γίνεται χρήση εργαλείων φασματικής ανάλυσης στο πεδίο χρόνου-συχνότητας, λόγω της ανάγκης για παρακολούθηση και επεξεργασία σημάτων μη προκαθορισμένης διάρκειας για τον υπολογισμό δεικτών αστάθειας τάσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μαθηματικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, στη λεπτομέρεια που αφορά τις εφαρμογές που αναπτύχθηκαν.

2.7 Ο Μετασχηματισμός Fourier ως εργαλείο ανάλυσης

2.7.1 Γενικά

Ο *μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου* (*Continuous Time Fourier Transform*) αποτελεί μία επέκταση της σειράς Fourier και βρίσκει εφαρμογή στην κατηγορία των συνεχών και απειροδικών συναρτήσεων στο πεδίο του χρόνου.

Ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου αποτελεί μία γενίκευση της σειράς Fourier, η οποία εκφράζει την ισοδύναμη αναπαράσταση ενός περιοδικού και συνεχούς σήματος $f(t)$ στο πεδίο του χρόνου από έναν γραμμικό συνδυασμό μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων συγκεκριμένου πλάτους και κυκλικής συχνότητας. Κάθε μιγαδική εκθετική συνάρτηση χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο πλάτος και αρχική φάση. Τα διαγράμματα πλάτους και φάσης στο πεδίο της συχνότητας των μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων που συνθέτουν το σήμα $f(t)$ αποτελούν το φασματικό περιεχόμενο ή *φάσμα* του σήματος $f(t)$.



Σχήμα 2-10 Περιοδικό σήμα $f(t)$ στο πεδίο του χρόνου και φασματικό περιεχόμενο

Για την εξασφάλιση ύπαρξης και σύγκλισης της σειράς Fourier, απαιτείται η ικανοποίηση των συνθηκών Dirichlet από την περιοδική συνάρτηση $f(t)$ στο διάστημα μίας περιόδου της, οι οποίες είναι οι εξής:

- Πρέπει να είναι απολύτως ολοκληρώσιμη
- Δεν πρέπει να εμφανίζει απειρισμούς
- Πρέπει να εμφανίζει πεπερασμένο αριθμό ασυνεχειών

Τα πλάτη και οι αρχικές φάσεις των μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων αποτελούν το *φασματικό περιεχόμενο* του σήματος και εκφράζουν τη συμμετοχή κάθε κυκλικής συχνότητας ω στην κατασκευή του σήματος $f(t)$. Οι σειρές Fourier βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε περιοδικές συναρτήσεις στο πεδίο του χρόνου, και συνεπώς δεν μπορούν να καλύψουν όλες τις κατηγορίες των σημάτων που εμφανίζονται στην πράξη. Ως εκ τούτου, η ανάγκη για ανάλυση σημάτων απεριοδικής φύσεως, οδήγησε στην επέκταση των σειρών Fourier.

Στην παρούσα εργασία και στην ανάλυση που ακολουθεί, περιοριζόμαστε σε πραγματικές και διακριτοποιημένες συναρτήσεις πραγματικής μεταβλητής στο πεδίο του χρόνου. Ως εκ τούτου, ο μετασχηματισμός Fourier ενός πραγματικού σήματος πραγματικής μεταβλητής είναι μία πραγματική συνάρτηση στο πεδίο της συχνότητας.

2.7.2 Ευθύς μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μία απεριοδική συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου η οποία ικανοποιεί τις συνθήκες Dirichlet μπορεί να αναπαρασταθεί ως γραμμικός συνδυασμός μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων, κάθε μία από τις οποίες χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο πλάτος και κυκλική συχνότητα. Προκειμένου να αναλυθεί χωρίς καμία αλλοίωση μία πραγματική απεριοδική συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου σε μιγαδικές εκθετικές συναρτήσεις, απαιτείται συνεχές αρμονικό περιεχόμενο. Με άλλα λόγια, απαιτείται απειρωστή απόσταση κυκλικών συχνοτήτων μεταξύ διαδοχικών μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων, γεγονός που μετατρέπει τη σειρά Fourier σε ολοκλήρωμα Fourier. Ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου, αποτελεί συνεπώς τη γενίκευση της σειράς Fourier και εφαρμόζεται σε συνεχή συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου υπολογίζοντας το φασματικό της περιεχόμενο.

Σε μία πραγματική και απεριοδική συνάρτηση μίας πραγματικής μεταβλητής $f(t)$ μπορεί να θεωρηθεί χωρίς βλάβη της γενικότητας ότι το πεδίο ορισμού εκτείνεται από το $-\infty$ έως το $+\infty$. Με βάση την υπόθεση αυτή, η συνάρτηση f μπορεί να μετασχηματιστεί στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier συνεχούς χρόνου και να μετατραπεί σε μία συνεχή συνάρτηση μίας πραγματικής μεταβλητής ω ως εξής:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2-28)$$

όπου η κυκλική συχνότητα ω αντικαθιστά τη διακριτή συχνότητα $k\omega_0$ των διακριτών αρμονικών που χρησιμοποιούνται στις σειρές Fourier. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που το απεριοδικό σήμα $f(t)$ μετατραπεί σε περιοδικό $\tilde{f}(t)$ με διαδοχική επανάληψη, τότε το φασματικό του περιεχόμενο μπορεί να υπολογιστεί κάνοντας χρήση της αντίστοιχης σειράς Fourier. Ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου

$F(\omega)$ της συνάρτησης $f(t)$ περιγράφει το φασματικό περιεχόμενο της συνάρτησης $f(t)$ και ορίζεται με τον τρόπο αυτό μονοσήμαντα ένα ζευγάρι αντιστοίχισης μίας συνάρτησης στο πεδίο του χρόνου με μία στο πεδίο της συχνότητας [Kra92]:

$$f(t) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} F(\omega)$$

2.7.3 Αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου

Σε αντιστοιχία με τον μετασχηματισμό ενός απεριοδικού σήματος από το πεδίο του χρόνου σε αυτό της συχνότητας μέσω του ευθέως μετασχηματισμού Fourier συνεχούς χρόνου, είναι δυνατή η αντίστροφη διαδικασία μετασχηματισμού της συνάρτησης $F(\omega)$ από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου, χωρίς να αλλοιωθεί πληροφορία. Συγκεκριμένα, μια συνάρτηση $f(t)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί πλήρως εάν είναι γνωστός ο μετασχηματισμός Fourier της, ως εξής [Kra92]:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-29)$$

Η σχέση (2-29) ορίζει τον *αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier συνεχούς χρόνου* (*inverse continuous time Fourier Transform*), ο οποίος αποτελεί το μαθηματικό εργαλείο ανακατασκευής ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου εάν είναι γνωστό το φασματικό του περιεχόμενο $F(\omega)$.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της φασματικής ανάλυσης και των μαθηματικών εργαλείων στο πεδίο της συχνότητας έγκειται στη δυνατότητα επεξεργασίας του φασματικού περιεχομένου $F(\omega)$ ενός αρχικού σήματος στο πεδίο του χρόνου $f(t)$, επιτρέποντας την τεχνητή αλλοίωση του αρχικού σήματος $f(t)$ και την ανακατασκευή ενός εναλλακτικού σήματος $\hat{f}(t)$, το οποίο θα εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς. Η επεξεργασία του φασματικού περιεχομένου μπορεί να γίνει με χρήση συναρτήσεων φίλτρου, οι οποίες παραποιοούν τον αρχικό μετασχηματισμό Fourier, ώστε το νέο φάσμα να προσδίδει διαφορετικές ιδιότητες στο ανακατασκευασμένο σήμα στο πεδίο του χρόνου.

Στην πράξη όμως, η χρήση του μετασχηματισμού Fourier δεν συνηθίζεται παρά το γεγονός ότι τα συστήματα που συναντώνται στη φύση περιγράφονται ως συστήματα συνεχούς χρόνου. Ο βασικός λόγος για τον οποίο δεν εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου είναι η ψηφιοποίηση των σημάτων και συστημάτων, πράγμα που οδηγεί στην απαίτηση επέκτασης του μετασχηματισμού Fourier συνεχούς χρόνου στον μετασχηματισμό Fourier διακριτού χρόνου και πιο συγκεκριμένα στον διακριτό μετασχηματισμό Fourier.

2.7.4 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier

Ο DFT είναι μία από τις διακριτές κλάσεις του μετασχηματισμού Fourier συνεχούς χρόνου [Kra92] και εφαρμόζεται στην κατηγορία των διακριτών περιοδικών σημάτων στο πεδίο του χρόνου, τα οποία μετασχηματίζει σε επίσης διακριτά περιοδικά σήματα στο πεδίο της συχνότητας. Η υλοποίησή του σε ψηφιακό υπολογιστή πραγματοποιείται με τον ευρέως διαδεδομένο αλγόριθμο *Fast-Fourier Transform (FFT)* και αποτελούν θεμελιώδη μαθηματικά εργαλεία για την επεξεργασία και ανάλυση ψηφιακών σημάτων.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (*Discrete-Time Fourier Transform - DTFT*) υποθέτει ότι το εκάστοτε τμήμα είναι μία συνάρτηση που εκτείνεται χρονικά έως το άπειρο γεγονός που συνεπάγεται ότι το φάσμα του σήματος είναι συνεχής συνάρτηση. Στην πράξη όμως, οι υπολογισμοί σε πραγματικό χρόνο αφορούν αποκλειστικά πεπερασμένης διάρκειας σήματα και επομένως είναι αναγκαίο το εκάστοτε τμήμα να αναλύεται ως περιοδικό, με αποτέλεσμα το φάσμα του να είναι διακριτή συνάρτηση. Δεδομένου όμως ότι στην πραγματικότητα το τμήμα του σήματος δεν είναι περιοδικό, είναι απαραίτητη η μετατροπή του σε ψευδοπεριοδικό χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση παραθύρου.

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, η ανάγκη για μετάβαση σε μαθηματικά εργαλεία όπως ο DFT σχετίζεται με πρακτικά ζητήματα τα οποία άπτονται τόσο των χαρακτηριστικών των πραγματικών σημάτων όσο και με τις πεπερασμένες δυνατότητες των ψηφιακών υπολογιστών. Παραδείγματος χάριν, η συνθήκη ολοκλήρωσης των σχέσεων (2-28) και (2-29) σε μη πεπερασμένο πεδίο ορισμού συναντά πρακτικές δυσκολίες που σχετίζονται με το γεγονός ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί άπειρο εύρος ζώνης από τους ψηφιακούς υπολογιστές. Καθίσταται επομένως αναγκαία η χρήση ενός

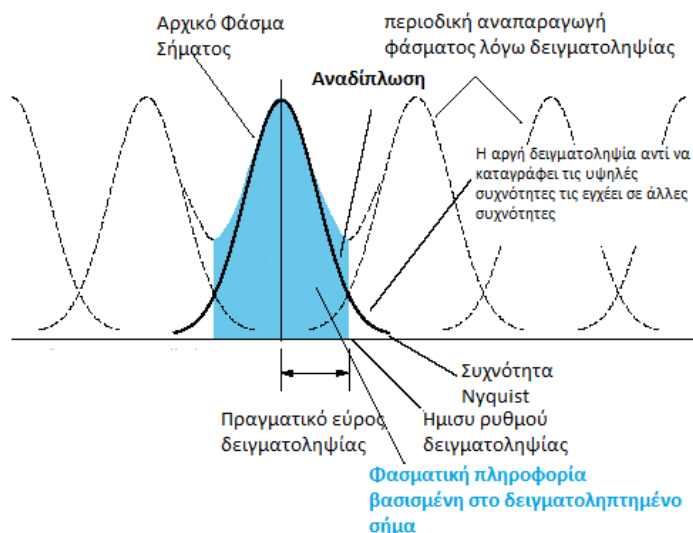
μετασχηματισμού, ώστε το φασματικό περιεχόμενο του σήματος στο πεδίο του χρόνου να είναι πεπερασμένου και διακριτού εύρους ζώνης.

Ωστόσο, η διακριτή φύση που αποκτούν τα σήματα μετά τη διαδικασία δειγματοληψίας, καθώς και το περιορισμένο εύρος ζώνης που επιτυγχάνεται στην πράξη από τους υπολογιστές, μπορούν να δημιουργήσουν άλλης φύσεως ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως π.χ. η φασματική αναδίπλωση. Τα φαινόμενα αυτά θα πρέπει να εξουδετερώνονται ειδικά καθίστανται αναξιόπιστα τα αποτελέσματα της φασματικής ανάλυσης.

Για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της φασματικής αναδίπλωσης, πρέπει πρώτα να αναφερθούν συνοπτικά ορισμένα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη δειγματοληψία ενός σήματος. Πιο συγκεκριμένα, ενώ ένα συνεχές σήμα στο πεδίο του χρόνου αντιστοιχίζεται σε συνεχές φάσμα, εφόσον το αρχικό σήμα υποστεί δειγματοληψία, τότε αυτό αντιστοιχίζεται σε διακριτό και περιοδικό φάσμα, του οποίου οι διακριτές συχνότητες αντιστοιχούν σε τιμές πολλαπλασίες της συχνότητας δειγματοληψίας ($i/\Delta T$), όπου ΔT το διάστημα δειγματοληψίας. Όταν ένα αναλογικό σήμα $f(t)$ υπόκειται σε δειγματοληψία με συχνότητα δειγματοληψίας f_s , τότε η υψηλότερη συχνότητα που μπορεί να περιέχεται στο περιοδικό διακριτό φάσμα του σήματος ισούται με το ήμισυ της συχνότητας δειγματοληψίας και καλείται *συχνότητα αποκοπής* ή *συχνότητα Nyquist*:

$$f_{nyquist} = \frac{f_s}{2} \quad (2-30)$$

Στην περίπτωση που το αρχικό αναλογικό σήμα περιέχει φασματικό περιεχόμενο μεγαλύτερο από τη συχνότητα Nyquist, τότε αυτές θα εμφανιστούν στο ψηφιακό σήμα ως συχνότητες μικρότερης τιμής [BG06]. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας δειγματοληψία με συχνότητα f_s , τότε μία αρμονική συνιστώσα σε συχνότητα f_x με $(1/2)f_s < f_x < f_s$, θα εμφανιστεί στο ανακατασκευασμένο ψηφιακό σήμα στο πεδίο του χρόνου ως μία αρμονική συνιστώσα συχνότητας $f_s - f_x$ παραμορφώνοντας έτσι και την αρμονική συνιστώσα που τυχόν υπάρχει σε αυτή τη συχνότητα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο απεικονίζεται στο Σχήμα 2-11, όπου μπορεί να παρατηρηθεί η ανύψωση του τελικού φάσματος λόγω επικάλυψής του με το γειτονικό.



Σχήμα 2-11 Το φαινόμενο της αναδίπλωσης σήματος

Το παραπάνω φαινόμενο συναντάται διεθνώς με τον όρο *aliasing* ή *αναδίπλωση σήματος*, με αποτέλεσμα να μην καθίσταται δυνατή η πλήρης ανακατασκευή του αρχικού διακριτοποιημένου σήματος, καθώς το φασματικό περιεχόμενο του σήματος έχει παραποιηθεί από τη διαδικασία της δειγματοληψίας. Η αναδίπλωση σήματος αποφεύγεται με χρήση φίλτρων στα οποία γίνεται κατάλληλη επιλογή της συχνότητας Nyquist, προκειμένου αυτή να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα που χρειάζεται να αναπαρασταθεί. Το βαθυπερατό φίλτρο στο μετρητικό σύστημα επιλέγεται να έχει συχνότητα αποκοπής (f_c) μικρότερη από τη συχνότητα $f_{nyquist}$. Τα συγκεκριμένου τύπου βαθυπερατά φίλτρα συνηθίζεται να συναντώνται στη βιβλιογραφία με τον όρο *anti-aliasing filter* και η εφαρμογή τους προηγείται του σταδίου της μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό.

Στην πράξη, επειδή οι συχνότητες των μετρούμενων σημάτων δεν είναι εκ των προτέρων γνωστές, η επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας γίνεται με γνώμονα το επιθυμητό εύρος αρμονικών που επιδιώκεται να ανιχνευτεί και υπολογιστεί, σε συνάρτηση πάντα με τον σκοπό της κάθε εφαρμογής. Συνεπώς, στην πράξη ο ρυθμός δειγματοληψίας που προεπιλέγεται για μία εφαρμογή είναι περισσότερες από δύο φορές μεγαλύτερος από τη μέγιστη συχνότητα που ενδιαφέρει την εφαρμογή.

2.7.5 Ανάλυση με εργαλεία στο πεδίο χρόνου-συχνότητας

Στις πρακτικές εφαρμογές είναι συνήθως ζητούμενη η φασματική πληροφορία ενός σήματος ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς η παρακολούθηση και επεξεργασία του σήματος είναι δυνατόν να διαρκεί για απροσδιόριστο χρονικό διάστημα. Μία άλλη βασική παρατήρηση αφορά στο ότι τα σήματα που εμφανίζονται στην πράξη δεν παρουσιάζουν κατ'ανάγκη φασματικό περιεχόμενο σταθερών χαρακτηριστικών, καθώς οι ιδιότητες των συστημάτων από όπου προέρχονται δεν διατηρούνται αμετάβλητες. Παραδείγματος χάριν, λόγω των ποικίλων διαταραχών που μπορούν να συμβαίνουν στα φυσικά συστήματα αλλά και της στοχαστικότητας που αυτά μπορούν σε ένα βαθμό να εμφανίζουν, οι παράμετροί τους ενδέχεται να παρουσιάζουν αργές ή και γρήγορες μεταβολές. Τα παραπάνω τείνουν να εμφανίζονται σε πολλά συστήματα στην πράξη, προσδίδοντάς τους την ιδιότητα της *μη-στασιμότητας*, δηλαδή την εμφάνιση αργών ή και γρήγορων μεταβολών στα στατιστικά τους χαρακτηριστικά, όπως στη μέση τιμή και μεταβλητότητα [BG06].

Το ανεπιθύμητο φαινόμενο της μη-στασιμότητας των σημάτων αντιμετωπίζεται από τη σκοπιά της φασματικής ανάλυσης με χρήση μαθηματικών εργαλείων επεξεργασίας στο πεδίο χρόνου-συχνότητας. Οι μέθοδοι φασματικής ανάλυσης στο πεδίο χρόνου-συχνότητας επεξεργάζονται τμηματικά το σήμα εισόδου, υποθέτοντας ότι το υπό ανάλυση τμήμα διατηρεί στάσιμα φασματικά χαρακτηριστικά εντός της χρονικής διάρκειας του παραθύρου ανάλυσης [BG06]. Σημειώνεται, ότι αν και δεν ικανοποιείται απαραίτητα η εν λόγω υπόθεση στην πράξη, είναι αναγκαία για την εφαρμογή των εργαλείων επεξεργασίας στο πεδίο χρόνου-συχνότητας.

Το χρονικό διάστημα ανάλυσης για κάθε τμήμα του σήματος εισόδου διατηρείται συνήθως σταθερό, ενώ για τις ανάγκες των υπολογισμών γίνεται χρήση μίας *συνάρτησης παραθύρου* (*window function*) [OSB99]. Η συνάρτηση παραθύρου αποτελεί μία προεπιλεγμένη πραγματική συνάρτηση μιας μεταβλητής, η οποία οριοθετεί τη χρονική διάρκεια του σήματος που πρόκειται να αναλυθεί, με αποτέλεσμα ο μετασχηματισμός DFT να εφαρμόζεται αποκλειστικά στο συγκεκριμένο κομμάτι του σήματος. Κατά συνέπεια, αξιοποιώντας τις παραθυρικές συναρτήσεις η φασματική ανάλυση ενός μη-στάσιμου σήματος μη προκαθορισμένης διάρκειας μπορεί να επαναλαμβάνεται για αυθαίρετη χρονική διάρκεια, δίνοντας μία νέα διάσταση στο χρονικά μεταβαλλόμενο φάσμα, αυτήν της χρονικής του εξέλιξης.

Η χρήση παραθυρικών συναρτήσεων στο πεδίο του χρόνου είναι επίσης καθοριστική για την αντιμετώπιση ακόμη ενός άλλου ανεπιθύμητου φαινομένου που σχετίζεται με το μετασχηματισμό DFT και αποτελεί τη *φασματική διαρροή* (*spectral leakage*) η οποία αποτελεί τη διάχυση ενέργειας των αρμονικών συνιστωσών σε γειτονικές συχνότητες του διακριτού φάσματος. Το φαινόμενο της φασματικής διαρροής εμφανίζεται κατά την εφαρμογή του DFT επειδή το τμήμα του σήματος που κάθε φορά αναλύεται δεν είναι κατ'ανάγκη περιοδικό. Είναι συνεπώς κρίσιμη η απομείωση των ασυνεχειών του σήματος στα άκρα της παραθυρικής συνάρτησης, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το εν λόγω φαινόμενο. Όπως θα δειχθεί στη συνέχεια, η κατάλληλη επιλογή και μετακύλιση της παραθυρικής συνάρτησης καθιστά δυνατή τη διόρθωση της φασματικής διαρροής που εμφανίζεται στο πιο πρόσφατα επεξεργασμένο τμήμα του σήματος.

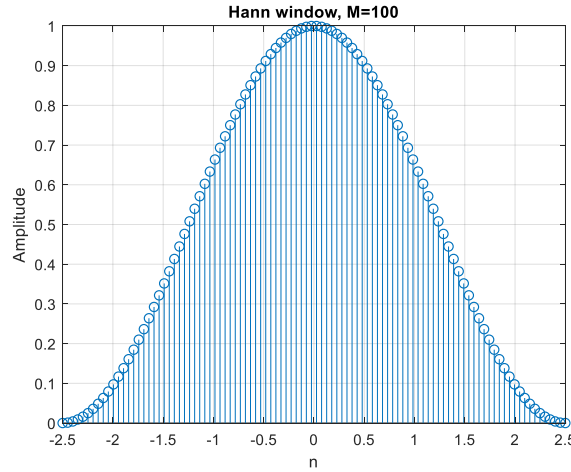
Φασματική διαρροή μπορεί να προκληθεί στην περίπτωση σημάτων ηλεκτρικών μεγεθών είτε λόγω μεταβολής της θεμελιώδους συχνότητας των 50 Hz του συστήματος, είτε επειδή έχει επιλεγεί ακατάλληλη παραθυρική συνάρτηση, με αποτέλεσμα ο συνδυασμός του σήματος εισόδου και της συνάρτησης παραθύρου να παράγουν ένα αποτέλεσμα που να μην εμφανίζει ακέραιο αριθμό περιόδων της θεμελιώδους αρμονικής του. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται περισσότερο όταν χρησιμοποιούνται τετραγωνικά παράθυρα και για τον λόγο αυτό επιλέγεται η χρήση ημιτονοειδούς τύπου παραθυρικών συναρτήσεων, όπως η κατηγορία Hann και Hamming που παρουσιάζεται συνοπτικά στη συνέχεια.

2.7.6 Οικογένεια παραθύρων Hann και Hamming

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση του παραθύρου τύπου Hann, της οικογένειας Hann και Hamming, μία κατηγορία παραθυρικών συναρτήσεων ημιτονοειδούς τύπου. Τα συγκεκριμένης κατηγορίας παράθυρα

προτιμούνται στην πράξη επειδή εξαλείφουν αποδοτικά το φαινόμενο της φασματικής διαρροής, που εξηγήθηκε προηγουμένως. Το παράθυρο Hann πρόκειται κατ'ουσίαν για μία μετατοπισμένη ημιτονοειδή συνάρτηση της οποίας η ελάχιστη τιμή της είναι μηδενική:

$$w(n) = \frac{1}{2} [1 - \cos 2\pi n/M], \quad n = 0, \dots, M-1 \quad (2-31)$$



Σχήμα 2-12 Παράθυρο Hann με $M=100$

Ο πολλαπλασιασμός της συνάρτησης παραθύρου Hann με το σήμα εισόδου δημιουργεί μία ψευδοπεριοδικότητα στο αποτέλεσμα, καθώς η αρχική και τελική τιμή του αποτελέσματος επιβάλλεται να είναι μηδέν, παραποιώντας προσωρινά το σήμα εισόδου, πράγμα όμως απαραίτητο προκειμένου να αποφευχθεί η φασματική διαρροή κατά την εφαρμογή του DFT. Παρόλα αυτά, η παραποίηση του σήματος αντιμετωπίζεται μέσω της επαναληπτικής εφαρμογής του μετασχηματισμού DFT σε μερικώς επικαλυπτόμενα τμήματα του σήματος εισόδου, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

2.7.7 Ο μετασχηματισμός Short-Time Fourier Transform

2.7.7.1 Ιδιότητες

Ο μετασχηματισμός STFT αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα μαθηματικά εργαλεία ανάλυσης στο πεδίο χρόνου-συχνότητας. Πρόκειται ουσιαστικά για τη συνδυαστική και διαδοχική εφαρμογή του μετασχηματισμού DFT με παραθυρικές συναρτήσεις, προκειμένου να καταστεί δυνατή η φασματική ανάλυση ενός μη στάσιμου σήματος μη προκαθορισμένης διάρκειας.

Η θεωρητική περιγραφή του μετασχηματισμού STFT περιγράφεται με λεπτομέρεια στις εργασίες [AR77], [RH07]. Πιο συγκεκριμένα, ο STFT περιγράφεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου:

$$X_m(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)w(n-mR)e^{-j\omega n} \quad (2-32)$$

όπου $x(n)$ το σήμα εισόδου, n ο διακριτοποιημένος χρόνος, $w(n)$ η συνάρτηση παραθύρου διάρκειας M (συνήθως περιττός φυσικός αριθμός), $X_m(\omega)$ ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου τη χρονική στιγμή mR και R το βήμα ολίσθησης ή βήμα *hop* της παραθυρικής συνάρτησης w .

Εφόσον η παραθυρική συνάρτηση w ικανοποιεί τη σχέση (2-33) για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια R :

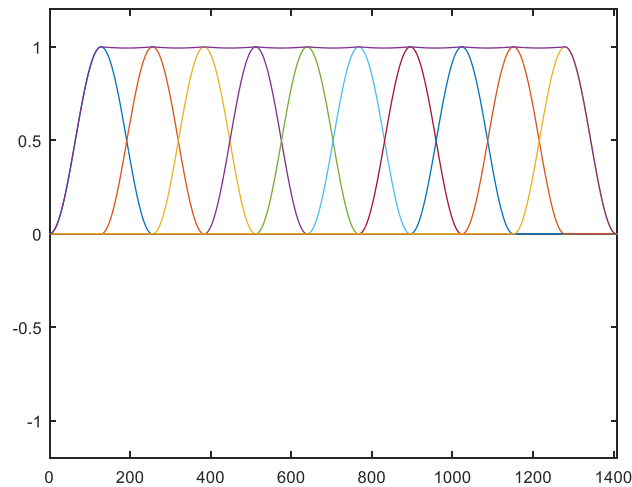
$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} w(n-mR) = 1, \quad \forall n \in \mathbb{Z} \quad (2-33)$$

τότε το άθροισμα των χρονικά μετατοπισμένων και επικαλυπτόμενων κατά σταθερό χρονικό διάστημα R παραθυρικών συναρτήσεων w παραμένει σταθερό. Η ιδιότητα της σχέσης (2-33) ονομάζεται *Constant Overlap-Add (COLA)* στο διάστημα $\text{hop } R$. Με δεδομένο ότι μία παραθυρική συνάρτηση έχει την παραπάνω ιδιότητα, τότε εάν μία χρονοσειρά $x(n)$ χωριστεί σε τμήματα πλήθους M , τα οποία επικαλύπτονται μεταξύ τους κατά R δείγματα (R/M το ποσοστό επικάλυψης) και στη συνέχεια αυτά πολλαπλασιαστούν με το παράθυρο $w(n)$, τότε το άθροισμα των διαδοχικών φασμάτων θα ισούται με το φάσμα της συνολικής χρονοσειράς, δηλαδή:

$$\begin{aligned} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X_m(\omega) &\triangleq \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) w(n - mR) e^{-j\omega n} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} w(n - mR) \xrightarrow{w \in \text{COLA}(R)} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\omega n} \triangleq X(\omega) \end{aligned}$$

Η παραθυρική συνάρτηση τύπου Hann μπορεί να αποδειχτεί ότι έχει την ιδιότητα $\text{COLA}(M/2)$, πράγμα που σημαίνει ότι εάν η επικάλυψη των τμημάτων $x[n]$ είναι ίση με 50% ($R=M/2$), τότε η εφαρμογή του STFT δεν αλλοιώνει το φάσμα του σήματος $x[n]$. Στο Σχήμα 2-13 παρουσιάζεται μία ακολουθία από μετατοπισμένες συναρτήσεις Hann, οι οποίες έχουν βήμα $R=M/2$. Αθροίζοντας τις επιμέρους συναρτήσεις παρατηρείται ότι, πέραν του πρώτου μισού της πρώτης και του δεύτερου μισού της τελευταίας συνάρτησης παραθύρου, το άθροισμα αυτών ισούται προσεγγιστικά με μονάδα.

Η παραπάνω ιδιότητα επιτρέπει στον μετασχηματισμό STFT να αναλύει μη-στάσιμα σήματα χωρίς να τα παραμορφώνει, παρακάμπτοντας το γεγονός ότι η φύση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier προϋποθέτει περιοδικότητα του σήματος που αναλύεται, η οποία στην πράξη δεν υφίσταται. Η συγκεκριμένη όμως διαδικασία υπονοεί και μία εγγενή, αλλά αναγκαία καθυστέρηση στη φασματική ανάλυση του σήματος x , καθώς προκειμένου το φάσμα του τμήματος $x[n]$ να υπολογιστεί σωστά, θα πρέπει να πολλαπλασιαστεί με δύο διαδοχικές παραθυρικές συναρτήσεις, οι οποίες θα απέχουν μεταξύ τους κατά το χρονικό διάστημα που αντιστοιχεί στο ποσοστό επικάλυψης, δηλαδή R . Αυτό είναι αναγκαίο, διότι κατά τον πρώτο υπολογισμό, το δεύτερο μισό τμήμα της παραθυρικής συνάρτησης w παραμορφώνει το εξεταζόμενο τμήμα x , μέχρις ότου αυτό επιδιορθωθεί από τον αμέσως επόμενο υπολογισμό, ο οποίος θα επικαλύψει το αρχικά παραμορφωμένο μισό τμήμα του προηγούμενου υπολογισμού. Η καθυστέρηση που υπονοείται έχει διάρκεια R , όση δηλαδή είναι η χρονική διάρκεια μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών.



Σχήμα 2-13 Ακολουθία συναρτήσεων παραθύρου τύπου Hann με $M=256$

Από το σχήμα 2-13 μπορεί να παρατηρηθεί ότι, εάν εξαιρεθεί η πρώτη συνάρτηση παραθύρου, τότε ανά $R=128$ δείγματα ολοκληρώνεται μία συνάρτηση παραθύρου και ξεκινάει η αμέσως επόμενη. Τις χρονικές στιγμές $kM + M/2$ έχουν διαβαστεί $M/2$ νέα δείγματα του σήματος $x[n]$ σε σχέση με τον τελευταίο DFT ο οποίος υπολογίστηκε τη στιγμή kM . Απορρίπτοντας τα παλαιότερα $M/2$ δείγματα του σήματος x και αντικαθιστώντας τα με τα πρόσφατα διαβασμένα $M/2$ είναι συνεπώς δυνατόν να υπολογίζεται ο DFT κάθε $M/2$ νέα δείγματα ώστε να επεξεργάζεται τα νεοεισερχόμενα $M/2$ δείγματα του $x[n]$ μαζί με τα αμέσως προηγούμενα $M/2$, που είχαν επίσης ληφθεί υπόψιν κατά τον προηγούμενο DFT και παραποιηθεί λόγω της παραθυρικής συνάρτησης. Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα γρηγορότερης ανανέωσης στους υπολογισμούς STFT, μειώνοντας την καθυστέρηση εξαγωγής αποτελεσμάτων στο μισό.

Αν και η σχέση (2-32) περιγράφει θεωρητικά τον μετασχηματισμό STFT, στην πράξη ο STFT αναλύει ένα πεπερασμένης διάρκειας τμήμα του σήματος $x[n]$, συνολικού αριθμού δειγμάτων N . Επιπρόσθετα, προκειμένου να είναι δυνατή η πλήρης ανακατασκευή του σήματος $x[n]$ από τους διαδοχικούς STFT, θα πρέπει να ισχύει $N \geq M$ και N άρτιος. Με βάση τα παραπάνω, ο STFT υλοποιείται ως μία ακολουθία διαδοχικών υπολογισμών DFT του σήματος εισόδου πολλαπλασιασμένο με τη συνάρτηση παραθύρου που ολισθαίνει στον χρόνο. Συγκεκριμένα, από τη (2-32) προκύπτει:

$$X_m(k) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} x(n+mR)w(n)e^{-j\frac{2\pi k}{N}(n+mR)} \quad (2-34)$$

2.7.7.2 Υπολογισμός STFT

Στην παρούσα ενότητα γίνεται σύντομη αναφορά των βασικότερων ιδιοτήτων του μετασχηματισμού STFT, προκειμένου να καταστεί πιο σαφής η επιλογή των παραμέτρων που επιλέχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Έστω φυσικό μέγεθος x στο οποίο πραγματοποιείται δειγματοληψία με συχνότητα f_s κατασκευάζοντας μία ακολουθία διακριτοποιημένων τιμών $x[n]=x[t_n]$. Στη συνέχεια, η ακολουθία $x[n]$ χωρίζεται σε υποακολουθίες-τμήματα σταθερού αριθμού δειγμάτων. Πολλαπλασιάζοντας το μέγεθος $x[n]$ με ένα πεπερασμένης διάρκειας, κατά προτίμηση ίσου αριθμού δειγμάτων, κατάλληλο παράθυρο $w[n]$ παράγεται το αποτέλεσμα $x[n] \cdot w[n]$, το οποίο όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.7.6 μετατρέπεται προσωρινά σε ψευδοπεριοδικό, προκειμένου να ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις εφαρμογής του DFT.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το φασματικό περιεχόμενο του τροποποιημένου σήματος $x[n] \cdot w[n]$ χρονικής διάρκειας N εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό DFT.

$$X_m[m, k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]w[n-mR]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0..N-1 \quad (2-35)$$

όπου $x[n]$ το σήμα εισόδου τη χρονική στιγμή $n\Delta t=t_n$, $w[n]$ η διάρκειας M δειγμάτων παραθυρική συνάρτηση και R το μήκος (σε πλήθος δειγμάτων) του βήματος hop μεταξύ των διαδοχικών υπολογισμών DFT που υλοποιούνται κατά την εφαρμογή του STFT. Με την παραπάνω διαδικασία το μετρούμενο σήμα x επιμερίζεται σε μικρότερα τμήματα (*dataframes*) τα οποία επικαλύπτονται ανάλογα με την επιλογή του βήματος hop.

Με τον παραπάνω τρόπο καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός του διακριτού φάσματος του $x[n]$ διάρκειας N δειγμάτων και υπολογίζεται ο DFT συνήθως εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο FFT. Επαναλαμβάνεται ότι ο αλγόριθμος FFT θεωρεί ότι το φασματικό περιεχόμενο του εκάστοτε υπό επεξεργασία σήματος παραμένει αμετάβλητο χρονικά (περιοδικότητα), αν και στην πράξη τα φασματικά περιεχόμενα διαδοχικών τμημάτων διαφέρουν, λόγω της μη στασιμότητας του σήματος x . Η υλοποίηση επομένως του STFT συνίσταται στην επαναληπτική εφαρμογή του DFT ανά τακτά χρονικά διαστήματα, σε τμήματα σήματος με διαφορετικό εν γένει φασματικό περιεχόμενο.

Υπενθυμίζεται ότι η ιδιότητα $COLA(R)$ της παραθυρικής συνάρτησης w δίνει τη δυνατότητα πλήρους ανακατασκευής του σήματος x , δεδομένου ότι η συχνότητα αποκοπής είναι τουλάχιστον διπλάσια του

φάσματος συχνοτήτων που απαιτεί η εφαρμογή. Ωστόσο, η ανακατασκευή του σήματος πραγματοποιείται μετά από χρονική καθυστέρηση διάρκειας ίσης με R δείγματα, προκειμένου να αρθεί η προσωρινή παραμόρφωση του σήματος x από την παραθυρική συνάρτηση w . Η χρονική καθυστέρηση R μπορεί να κυμαίνεται σε ευρύ φάσμα τιμών, το οποίο εξαρτάται καθαρά από τους σκοπούς της κάθε εφαρμογής. Στην παρούσα διατριβή η συγκεκριμένη καθυστέρηση είναι της τάξης των τεσσάρων δευτερολέπτων.

3 ΝΕΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟΥ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

3.1 Relay based Index (*RLI*)

3.1.1 Ορισμός και υπολογισμός

Όπως είναι γνωστό, οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προστασίας γραμμών μεταφοράς έχουν προηγμένες δυνατότητες σε μέτρηση, δειγματοληψία και επεξεργασία αναλογικών ηλεκτρικών μεγεθών. Οι δυνατότητες αυτές είναι συχνά παρόμοιων προδιαγραφών με αυτές των PMUs, με τη διαφορά ότι οι χρονισμοί των ρολογιών από διαφορετικούς ηλεκτρονόμους δεν είναι ταυτοχρονισμένοι. Τα παραπάνω καθιστούν τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους ιδιαίτερα αξιόπιστους για μία ευρεία γκάμα εφαρμογών, όπως προστασία εξοπλισμού, καταγραφές συμβάντων και εποπτεία συστήματος. Ως εκ τούτου, οι σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι μπορούν να αξιοποιηθούν εξίσου καλά και για την ανάπτυξη μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μία εναλλακτική τοπική μέθοδος ανίχνευσης μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης η οποία βασίζεται αποκλειστικά σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου και στη χρήση ψηφιακών ηλεκτρονόμων, οι οποίοι θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένοι σε γραμμές διαδρόμου μεταφοράς.

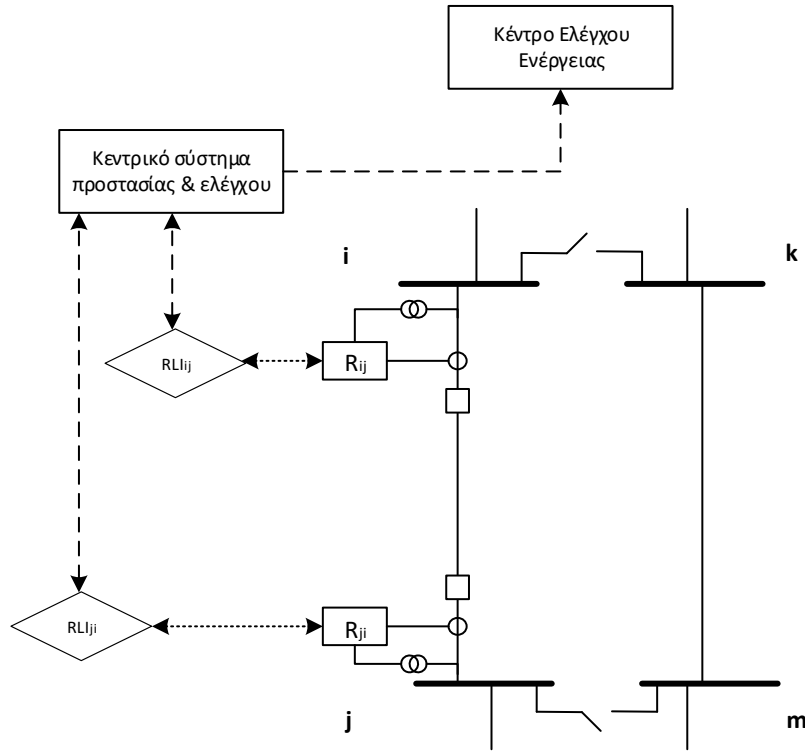
Η προτεινόμενη μέθοδος επεξεργάζεται σε πραγματικό χρόνο τους φασιθέτες τάσης και έντασης και υπολογίζει έναν αντίστοιχο με τον *NLI* δείκτη, ο οποίος ονομάζεται *Relay-based Local Index (RLI)*. Ο δείκτης *RLI* έχει δύο βασικές αρμοδιότητες:

- Την ανίχνευση επερχόμενης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο,
- Την αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμής μεταφοράς λόγω ενεργοποίησης προστασίας από τον ηλεκτρονόμο αποστάσεως κατά τη διάρκεια εξέλιξης φαινομένων αστάθειας τάσης.

Με βάση την τιμή που λαμβάνει σε πραγματικό χρόνο ο δείκτης *RLI*, μπορεί να ενεργοποιηθεί σήμα συναγερμού μόλις ανιχνευτούν συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Το σήμα συναγερμού μπορεί παράλληλα να αποσταλεί στο κέντρο ελέγχου ενέργειας ενημερώνοντας τους χειριστές του συστήματος για την επικείμενη ανάγκη λήψης διορθωτικών μέτρων.

Στο σχήμα 3-1 απεικονίζεται μία διάταξη για την περίπτωση δύο υποσταθμών ενός συστήματος μεταφοράς. Οι συγκεκριμένοι υποσταθμοί, μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελούν συνοριακούς ζυγούς μεταξύ δύο περιοχών, κατά αντιστοιχία με τον διάδρομο μεταφοράς του σχήματος 2-8. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι ηλεκτρονόμοι στα άκρα αναχώρησης και άφιξης των γραμμών μεταφοράς του διαδρόμου μπορούν να ενσωματώνουν τη ρουτίνα υπολογισμού του δείκτη *RLI* με σκοπό την ανίχνευση εκτάκτων συνθηκών λειτουργίας. Στην περίπτωση που ο δείκτης κάποιου εκ των εγκατεστημένων ηλεκτρονόμων ανιχνεύσει παραβίαση, τότε μπορεί να επικοινωνήσει με το κέντρο ελέγχου ενέργειας για να αποστείλει το σήμα συναγερμού. Σημειώνεται, ότι ο υπολογισμός του δείκτη *RLI* γίνεται ανεξάρτητα από τον κάθε ηλεκτρονόμο.

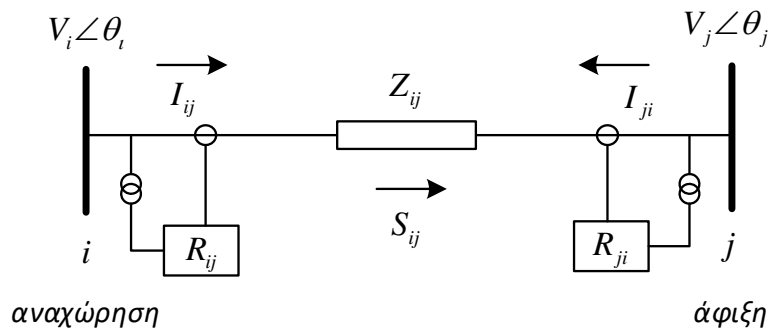
Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί επίσης ότι, αν και απαιτείται τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός για την αποστολή του σήματος συναγερμού στο κέντρο ελέγχου, δεν απαιτείται καμία περαιτέρω επικοινωνία του ηλεκτρονόμου με άλλο εξοπλισμό για τον υπολογισμό του *RLI*, καθώς ο υπολογισμός του δείκτη βασίζεται αποκλειστικά στις μετρήσεις του ηλεκτρονόμου από τα ηλεκτρικά μεγέθη της γραμμής μεταφοράς την οποία και προστατεύει. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται επομένως μία διττή αξιοποίηση του ηλεκτρονόμου, καθώς αφενός προσφέρει προστασία εξοπλισμού ενώ αφετέρου προσφέρει συστημική προστασία από αστάθεια τάσης.



Σχήμα 3-1 Διάταξη και συνδεσμολογία σημάτων RLI για αποστολή σήματος συναγερμού

Στο σχήμα 3-2 παρουσιάζεται η τυπική διάταξη και συρμάτωση του εξοπλισμού προστασίας γραμμής μεταφοράς, η οποία συνδέεται μεταξύ των ζυγών αναχώρησης i και άφιξης j . Κάθε ηλεκτρονόμος λαμβάνει μετρήσεις από τους μετασχηματιστές τάσης και έντασης του άκρου στο οποίο συνδέεται. Αναφορικά με τους μετασχηματιστές τάσης, αυτοί μπορούν να εγκατασταθούν είτε στον ζυγό, είτε στο άκρο της γραμμής χωρίς ουσιαστική διαφορά.

Στο σημείο αυτό, για διευκόλυνση της ανάλυσης θεωρείται και πάλι ένα σύστημα δύο περιοχών (σχήμα 2-8), όπου θεωρείται ότι όλες οι γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς είναι εξοπλισμένες με ηλεκτρονόμους που έχουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν τον δείκτη RLI τόσο από την πλευρά του άκρου αναχώρησης, όσο και από αυτήν του άκρου άφιξης.



Σχήμα 3-2 Γραμμή μεταφοράς με προστασία ηλεκτρονόμου αποστάσεως

Με γνωστούς τους φασιθέτες τάσης $\hat{V}_i$ ($\hat{V}_j$) και έντασης $\hat{I}_{ij}$, μπορούν άμεσα να υπολογιστούν οι ακόλουθες ποσότητες που αφορούν τη γραμμή μεταφοράς:

$$P_{ij} = \text{Re}\{\hat{V}_i \hat{I}_{ij}^*\} > 0 \quad (3-1)$$

$$P_{ji} = \text{Re}\{\hat{V}_j(-\hat{I}_{ji}^*)\} > 0 \quad (3-2)$$

Αντίστοιχα υπολογίζονται οι φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες από το κάθε άκρο της γραμμής:

$$G_{ij} = \text{Re}\{\hat{I}_{ij}/\hat{V}_i\} \quad (3-3)$$

$$G_{ji} = \text{Re}\{-\hat{I}_{ji}/\hat{V}_i\} \quad (3-4)$$

Ενώ η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση από κάθε άκρο της γραμμής είναι:

$$Z_{ij} = \text{Re}\{\hat{V}_i/\hat{I}_{ij}\} \quad (3-5)$$

$$Z_{ji} = \text{Re}\{\hat{V}_i/(-\hat{I}_{ji})\} \quad (3-6)$$

Με βάση το Σχήμα 3-2 για τον ζυγό αναχώρησης, θετική ενεργός ισχύς αντιστοιχεί σε ενεργό ισχύ που εισέρχεται από το ζυγό και με κατεύθυνση προς την επιτηρούμενη γραμμή μεταφοράς. Με τον τρόπο αυτό η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση που αντιστοιχεί σε θετική ενεργό ισχύ απεικονίζεται στο δεξί μιγαδικό ημιεπίπεδο σύνθετης αντίστασης RX , ενώ αντιστοίχως αυτή που αντιστοιχεί σε αρνητική ενεργό ισχύ στο αριστερό. Η θεώρηση αυτή διαφοροποιείται για τον ζυγό άφιξης, στον οποίο η φορά αναφοράς του ρεύματος αντιστρέφεται, δεδομένης της ροής ισχύος στη γραμμή. Αυτή η τροποποίηση γίνεται ώστε να λαμβάνεται ως θετική ισχύς η αποστελλόμενη από τη γραμμή προς τον συνοριακό ζυγό άφιξης που ανήκει στην περιοχή που εισάγει ισχύ (βλ. Σχήμα 2-8).

Σε αντιστοιχία με τη σχέση (2-21) του δείκτη NLI , ο δείκτης RLI υπολογίζεται ως εξής:

$$RLI_{ij} = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta G_{ij}} \quad (3-7)$$

Με βάση τον ορισμό (3-7) του δείκτη RLI και σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της εργασίας [Gri12], τουλάχιστον σε μία γραμμή μεταφοράς προς την περιοχή κατανάλωσης η ενεργός ισχύς μεγιστοποιείται. Συνεπώς, ένας από τους δείκτες RLI των ηλεκτρονόμων που επιτηρούν τις γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς αναμένεται να γίνει αρνητικός, λόγω της μεγιστοποίησης της διερχόμενης από την αντίστοιχη γραμμή ισχύος και της συνεχιζόμενης αύξησης της ζήτησης. Σημειώνεται ότι, όπως και στην περίπτωση του δείκτη NLI , ο συναγερμός του δείκτη RLI αναμένεται να ενεργοποιηθεί πριν από το σημείο αστάθειας C (βλ. Σχήμα 2-9), το οποίο σηματοδοτεί την αστάθεια τάσης.

Ο δείκτης αστάθειας RLI συνιστά επομένως μία εναλλακτική μέθοδο ανίχνευσης αστάθειας τάσης που βασίζεται αποκλειστικά σε τοπικές μετρήσεις φασιστητών οι οποίοι υπολογίζονται από ψηφιακό ηλεκτρονόμο που ήδη επιτηρεί την προστασία της γραμμής ενός διαδρόμου μεταφοράς. Έχει ακόμη λιγότερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό σε σχέση με αυτές του δείκτη NLI , και όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εμφανίζει πρακτικά την ίδια αξιοπιστία. Σε επόμενη ενότητα δίνονται στοιχεία για την προτεινόμενη υλοποίηση του δείκτη, αξιοποιώντας μαθηματικά εργαλεία από το πεδίο χρόνου-συχνότητας.

Θετικές τιμές του δείκτη RLI συνεπάγονται ευσταθή απόκριση του συστήματος, διότι η αυξανόμενη ζήτηση (φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα) συνοδεύεται από αυξημένη ροή ενεργού ισχύος στη γραμμή. Αντιθέτως, όταν ο δείκτης αλλάξει πρόσημο και γίνει αρνητικός, η μεταφερόμενη ισχύς από τη γραμμή έχει διέλθει από μέγιστο, η ζήτηση συνεχίζει να αυξάνει και συνεπώς ενεργοποιείται σήμα συναγερμού.

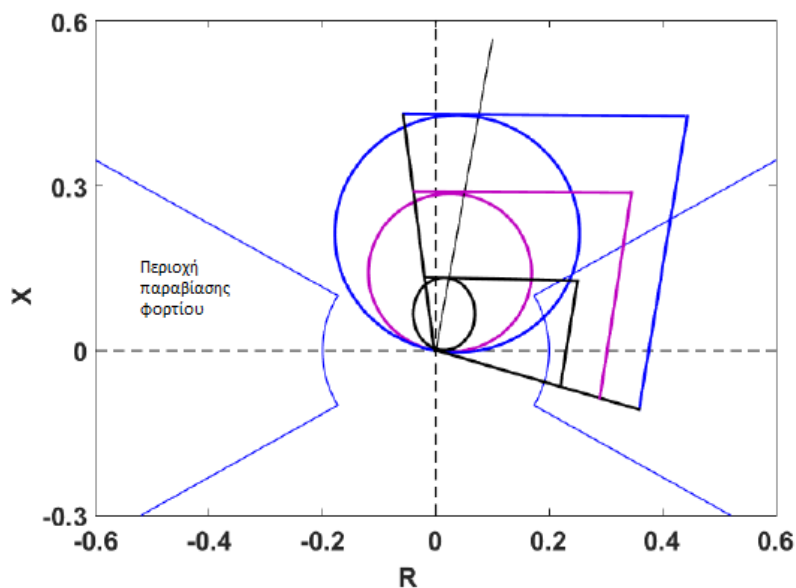
3.1.2 Τρίτη ζώνη προστασίας ηλεκτρονόμου αποστάσεως

Παραδοσιακά οι ηλεκτρονόμοι αποστάσεως ρυθμίζονται ώστε να παρέχουν πρωτεύουσα και δευτερεύουσα προστασία στον εξοπλισμό ισχύος από σφάλματα στο δίκτυο [HP06]. Ο τρόπος με τον οποίο αυτό επιτυγχάνεται είναι η χρήση των λεγόμενων ζωνών προστασίας, οι οποίες αποτελούν περιοχές στο

μιαδικό επίπεδο RX , εντός των οποίων εφόσον βρεθεί η μετρούμενη από τον ηλεκτρονόμο σύνθετη αντίσταση για χρονικό διάστημα που υπερβαίνει μία προκαθορισμένη τιμή καθυστέρησης, τότε δίνεται εντολή ανοίγματος της γραμμής από τον ηλεκτρονόμο, ώστε να προστατευτεί η γραμμή μεταφοράς. Οι περιοχές του μιαδικού επιπέδου που καλύπτονται από τις ζώνες προστασίας του ηλεκτρονόμου αντιστοιχούν σε ένα ποσοστό της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς την οποία προστατεύουν, γεγονός που συνιστά λειτουργική κατάσταση βραχυκυκλώματος.

Στην πράξη, για λόγους εφεδρείας και κάλυψης αστοχιών εξοπλισμού, οι ηλεκτρονόμοι ρυθμίζονται συμπληρωματικά ώστε να παρέχουν δευτερεύουσα προστασία και για τις γειτονικές γραμμές μεταφοράς. Εν προκειμένω, η τρίτη ζώνη προστασίας είναι μία ζώνη μεγαλύτερης εμβέλειας, η οποία ρυθμίζεται στους ηλεκτρονόμους αποστάσεως με σκοπό να παρέχει εφεδρική προστασία της αντίστοιχης πρώτης και δεύτερης ζώνης του ιδίου αλλά και γειτονικών ηλεκτρονόμων. Για λόγους επιλεκτικότητας, οι χρόνοι ενεργοποίησης της τρίτης ζώνης είναι της τάξης των 1-2 δευτερολέπτων, ενώ η έκταση της τρίτης ζώνης στο επίπεδο RX είναι τέτοια που υπερκαλύπτει τον πρωτεύοντα εξοπλισμό, με συνέπεια να δεσμεύει μεγαλύτερη έκταση στο επίπεδο (βλ. Σχήμα 3-3) αντιστοιχώντας σε λειτουργική κατάσταση απομακρυσμένου σφάλματος.

Στην πράξη ωστόσο, έχουν παρατηρηθεί καταστάσεις λειτουργίας στις οποίες το σύστημα λειτουργεί έντονα φορτισμένο και ο συνδυασμός των μετρούμενων από τον ηλεκτρονόμο τιμών τάσης και έντασης είναι τέτοιος που η τροχιά στο μιαδικό επίπεδο RX τείνει να παραβιάσει την τρίτη ζώνη προστασίας αποστάσεως της γραμμής [HP06]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον κίνδυνο ανοίγματος γραμμής μεταφοράς χωρίς να έχει εκδηλωθεί σφάλμα στο σύστημα. Το γεγονός αυτό έχει συμβεί επανειλημμένα στην πράξη και σηματοδοτεί μία ιδιαίτερα ανεπιθύμητη παρενέργεια των ηλεκτρονόμων αποστάσεως, καθώς η αποσύνδεση γραμμών μεταφοράς λόγω ενεργοποίησης τρίτης ζώνης ενόσω το σύστημα λειτουργεί σε κατάσταση έντονης φόρτισης το αποδυναμώνει και αυξάνει σημαντικά τον κίνδυνο αλληπάλληλων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς λόγω υπερφόρτισης με απρόβλεπτες για το σύστημα συνέπειες.



Σχήμα 3-3 Ζώνες προστασίας και χαρακτηριστική περιοχή φορτίου ηλεκτρονόμου αποστάσεως

Τα βασικά χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στο σύστημα κατά τη διάρκεια εξέλιξης φαινομένων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι οι χαμηλές τάσεις και οι αυξημένες ποσότητες διακινούμενης ενέργειας ή/και αέργου ισχύος προς τα κέντρα κατανάλωσης, συνήθως λόγω μεγάλης ζήτησης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο συνδυασμός των σχετικά χαμηλών τάσεων στο σύστημα και των αυξημένων εντάσεων στις γραμμές μεταφοράς μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στο σημείο σύνδεσης του ηλεκτρονόμου, με αποτέλεσμα αυτή να ενδέχεται να εισέλθει σε περιοχές του μιαδικού επιπέδου RX που υπό κανονικές συνθήκες το σύστημα δεν αναμένεται να βρεθεί, εξαιρουμένης της περίπτωσης εκδήλωσης ασθενούς σφάλματος. Καθίσταται συνεπώς σαφές ότι όταν το σύστημα είναι έντονα φορτισμένο, αυξάνεται ο κίνδυνος πρόκλησης ανεπιθύμητης αποσύνδεσης των γραμμών μεταφοράς λόγω παραβίασης της τρίτης ζώνης προστασίας τους. Οι συγκεκριμένες αποσυνδέσεις είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητες καθώς επιτείνουν

δραματικά τη φόρτιση των υπόλοιπων γραμμών μεταφοράς στο σύστημα, μειώνουν ακόμη περισσότερο την ικανότητα μεταφοράς του συστήματος και είναι πολύ πιθανόν να οδηγήσουν σε φαινόμενα ανεξέλεγκτων συνεπακόλουθων αποσυνδέσεων γραμμών με πολύ δυσάρεστες συνέπειες [TF07].

Η πλειοψηφία ωστόσο των σύγχρονων ψηφιακών ηλεκτρονόμων παρέχουν τη δυνατότητα ορισμού μίας *περιοχής φορτίου (load encroachment area)* στο μιγαδικό επίπεδο RX , η οποία προβλέπεται να αξιοποιηθεί σε καταστάσεις του συστήματος κατά τις οποίες η ζήτηση είναι υψηλή. Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης δυνατότητας αφορά στο ότι εάν η τροχιά της σύνθετης αντίστασης Z παραβιάσει κάποια από τις ζώνες προστασίας της γραμμής, αλλά ταυτόχρονα βρίσκεται εντός της περιοχής φορτίου, τότε παρεμποδίζεται η εντολή αποσύνδεσης της γραμμής. Στο σχήμα 3-3 φαίνεται η τυπική μορφή που έχει η εν λόγω περιοχή στο επίπεδο RX . Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η περιοχή καλύπτει συγκεκριμένους συντελεστές ισχύος που αναμένονται να συναντηθούν στην πράξη για τις καταναλώσεις του συστήματος.

Με βάση τη χαρακτηριστική του σχήματος 3-3, η περιοχή φορτίου ορίζεται τόσο για την αποστελλόμενη όσο και για την ισχύ άφιξης στη γραμμή μεταφοράς, αν και οι ζώνες προστασίας δεν είναι κατ'ανάγκη συμμετρικές. Με βάση το σχήμα, όταν η μετρούμενη από τον ηλεκτρονόμο σύνθετη αντίσταση βρίσκεται εντός της περιοχής φορτίου τότε εμποδίζεται η αποσύνδεση της γραμμής ανεξάρτητα από την ενεργοποίηση κάποιας από τις ζώνες προστασίας. Ένα μειονέκτημα της συγκεκριμένης λειτουργίας αποτελεί η εκτίμηση της περιοχής σε συνάρτηση με τις ζώνες προστασίας του ηλεκτρονόμου και η προσαρμοστικότητα της σε τοπολογικές αλλαγές του συστήματος. Μία πιθανή παρενέργεια που μπορεί να προκύψει από την περιοχή φορτίου, αφορά στην μη ορθή ενεργοποίησή της σε περίπτωση π.χ. εκδήλωσης απομακρυσμένου σφάλματος, με αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη παρεμπόδιση εντολής αποσύνδεσης γραμμής, με απρόβλεπτες περαιτέρω συνέπειες για το σύστημα. Δεν αποκλείονται επίσης και οι περιπτώσεις στις οποίες η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση μπορεί να εισέλθει στην τρίτη ζώνη από τροχιά που βρίσκεται εκτός της χαρακτηριστικής φορτίου, με αποτέλεσμα αυτή να μην αποτρέψει την ανεπιθύμητη αποσύνδεση της γραμμής. Τέτοιες περιπτώσεις συμβαίνουν συνήθως σε φαινόμενα μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης κατά τα οποία ο μηχανισμός αποκατάστασης των φορτίων σε συνδυασμό με τη δράση των ΣΑΤΥΦ παράγουν ασυνήθιστες τροχιές σύνθετης αντίστασης [Nik16]. Συνεπώς, για την ορθή αξιοποίηση της περιοχής φορτίου είναι απαραίτητη η διεξαγωγή προσομοιώσεων λειτουργίας, ειδικά δεν μπορεί να αποκλειστεί ο κίνδυνος η περιοχή φορτίου να μην ανταποκρίνεται ορθά στα χαρακτηριστικά του συστήματος.

Κατά τη διάρκεια φαινομένων αστάθειας τάσης ή και εν γένει υψηλών φορτίσεων είναι σύνηθες να εφαρμόζονται κεντρικές ή αποκεντρωμένες μέθοδοι για την προσαρμογή ή και την πλήρη απενεργοποίηση ζωνών προστασίας μεγάλης εμβέλειας, προκειμένου να αποφευχθεί ο κίνδυνος αλληπάλληλων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς [Nik16], [NSS14], [SLA09], [LCS15]. Το γεγονός αυτό δείχνει την αναγκαιότητα για ανάπτυξη εργαλείων και μεθόδων που θα προσδίδουν προσαρμοστικότητα στο σύστημα, προκειμένου αυτό να θωρακίζεται από τυχόν παρενέργειες του εξοπλισμού προστασίας, οι οποίες ενδέχεται να το οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες και απρόβλεπτες καταστάσεις.

Στο [TF07] προτείνεται η χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων ευρείας περιοχής για τον υπολογισμό ευαισθησιών με σκοπό την αποφυγή ανεπιθύμητων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς λόγω ενεργοποίησης της τρίτης ζώνης προστασίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως. Ωστόσο, δεδομένου ότι ακόμη και σήμερα η τοποθέτηση PMU σε μεγάλο αριθμό ζυγών στο σύστημα εξελίσσεται με σχετικά αργό ρυθμό, εναλλακτικές μέθοδοι ανίχνευσης της αστάθειας τάσης που θα αξιοποιούνται και για την αποφυγή ανεπιθύμητων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς είναι επιθυμητές.

3.1.3 Αποφυγή ανεπιθύμητων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς λόγω τρίτης ζώνης

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.1.1, ο δείκτης RLI μπορεί να αξιοποιηθεί ως μέσο αποσόβησης ανεπιθύμητων αποσυνδέσεων γραμμών μεταφοράς από παραβίαση της τρίτης ζώνης προστασίας κατά τη διάρκεια εκδήλωσης φαινομένων αστάθειας τάσης. Η ιδέα είναι πολύ απλή και βασίζεται στην αξιοποίηση του σήματος συναγερμού από τον RLI ως επικουρικό σήμα παρεμπόδισης της ενεργοποίησης της τρίτης ζώνης προστασίας του ηλεκτρονόμου. Δεδομένης της τηλεπικοινωνίας των ηλεκτρονόμων στα δύο άκρα της γραμμής, το σήμα συναγερμού που θα ενεργοποιηθεί στον πρώτο ηλεκτρονόμο θα πρέπει να αποστέλλεται και στον απέναντι για λόγους επιλογικής συνεργασίας.

Ταυτόχρονα, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι ο *RLI* δεν θα εγείρει εσφαλμένα σήματα συναγερμού κατά τη διάρκεια ενός απομακρυσμένου βραχυκυκλώματος (π.χ. ενός βραχυκυκλώματος εντός της τρίτης ζώνης του ηλεκτρονόμου), προκειμένου να μην εμποδίζει ανεπιθύμητα την ορθή εντολή αποσύνδεσης από τον ηλεκτρονόμο. Για τα παραπάνω αρκεί να ληφθεί υπόψιν ότι το φαινόμενο της αστάθειας τάσης είναι κατά καλή προσέγγιση συμμετρικό και συνεπώς η πιθανότητα εσφαλμένου συναγερμού αποφεύγεται στην περίπτωση ασύμμετρων σφαλμάτων, εφόσον η περιγραφείσα δυνατότητα είναι ενεργή μόνο σε συμμετρικές συνθήκες λειτουργίας του ΣΗΕ. Παραδείγματος χάριν, για την απενεργοποίηση της συγκεκριμένης δυνατότητας του δείκτη *RLI* θα μπορούσαν να τεθούν κριτήρια ανίχνευσης αρνητικής/μηδενικής ακολουθίας στον φασιθέτη του ρεύματος. Στην περίπτωση των τριφασικών σφαλμάτων, όπως θα φανεί και στη συνέχεια της διατριβής, η χρήση κατάλληλων συναρτήσεων φίλτρου σε συνδυασμό με τη χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα φαινόμενα αστάθειας τάσης, ελαχιστοποιούν την πιθανότητα σήμανσης εσφαλμένου συναγερμού.

Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζονται αποτελέσματα της αποκεντρωμένης μεθόδου *RLI* στην ενότητα 4.3.4, στα οποία το σήμα συναγερμού χρησιμοποιείται ως επικουρικό εσωτερικό σήμα για την παρεμπόδιση της εντολής αποσύνδεσης γραμμής λόγω παραβίασης της τρίτης ζώνης προστασίας.

3.2 Εφαρμογή μετασχηματισμού STFT ως φίλτρου μετρήσεων

3.2.1 Προϋποθέσεις εφαρμογής STFT

Προτού εξηγηθούν οι λεπτομέρειες της εφαρμογής του μετασχηματισμού STFT στη διατριβή, αξίζει να σημειωθεί ότι μία προϋπόθεση για τη χρήση εργαλείων από το πεδίο χρόνου-συχνότητας αφορά στο ότι το φασματικό περιεχόμενο των μετρούμενων σημάτων θα πρέπει να μην μεταβάλλεται με πολύ γρήγορο ρυθμό, προκειμένου αυτό να μπορεί να καταγραφεί με επαρκή ακρίβεια από τους αλληλέλληλους φασματικούς υπολογισμούς.

Για παράδειγμα, ένα φυσικό μέγεθος που παραμένει σχεδόν σταθερό για διάστημα της τάξης των 10 – 30ms είναι αποδεκτό ώστε να αναλυθεί με τα εν λόγω εργαλεία. Η παραπάνω προϋπόθεση ικανοποιείται στη γενική περίπτωση για τους φασιθέτες στα συστήματα μεταφοράς, γεγονός που δικαιολογείται και από την υπόθεση ανάλυσης δικτύου σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση.

3.2.2 Εφαρμογή STFT στη διατριβή

Ο μετασχηματισμός STFT εφαρμόζεται στην παρούσα διατριβή ως φίλτρο για τις ανάγκες υπολογισμού των δεικτών αστάθειας *NLI* και *RLI*. Πιο συγκεκριμένα, ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται ανεξάρτητα στα ηλεκτρικά μεγέθη *G* και *P* που υπολογίζει είτε το PMU, είτε ο ψηφιακός ηλεκτρονόμος από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος. Σε αντιστοιχία με αυτά που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2, η πολυπλοκότητα και στοχαστικότητα που χαρακτηρίζει τις δυναμικές του συστήματος, δικαιολογεί την υπόθεση ότι τα σήματα *G* και *P* μπορούν να θεωρηθούν μη-στάσιμα, ότι δηλαδή προκύπτουν από μη-στάσιμες διεργασίες και έχοντας φασματικό περιεχόμενο που δεν παρουσιάζει περιοδικότητα [BG06].

Το βασικό κέρδος που προκύπτει από τη χρήση του μετασχηματισμού STFT έναντι της διαδικασίας του κινητού μέσου όρου της ενότητας 2.5, αφορά στο γεγονός ότι παρακάμπτεται ένα στάδιο εξομάλυνσης και συγκεκριμένα αυτό της σχέσης (2-25):

$$\overline{\Delta G}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \Delta \bar{G}_{k-i}$$

γεγονός που μειώνει την καθυστέρηση ανίχνευσης της αστάθειας και την ταλαντωτική συμπεριφορά του δείκτη. Από την άλλη, οι μη σχετικές με τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης βραχυπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος, μπορούν να οδηγήσουν σε προβληματικούς υπολογισμούς και λανθασμένους συναγερμούς τους δείκτες αστάθειας, όταν γίνεται χρήση κινητού μέσου όρου με σχετικά μικρή χρονική σταθερά, ενώ η δοκιμή χρήσης μεγαλύτερου χρονικού παραθύρου στον υπολογισμό του κινητού μέσου όρου αυξάνει σημαντικά την καθυστέρηση στη χρονική απόκριση του σήματος, με αποτέλεσμα να καθυστερεί και η ανίχνευση της αστάθειας.

Αν και όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.7.7 ο STFT παρέχει όλη τη φασματική πληροφορία του τμήματος του σήματος που αναλύεται, ο σκοπός εφαρμογής του στην παρούσα εργασία είναι η αποδοτική παρακολούθηση της μακροπρόθεσμης εξέλιξης (τάσης) των μεγεθών ενεργού ισχύος και φαινόμενης αγωγιμότητας. Όπως εξηγήθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, οι δυναμικές που διεγείρονται στα συστήματα μεταφοράς κατά την εμφάνιση διαταραχών μικρής ή και μεγάλης κλίμακας είναι ποικίλες και διαφορετικών χρονικών κλιμάκων, γεγονός που δεν ευνοεί την παρακολούθηση των στιγμιαίων τιμών των φασισθετών για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης.

Με δεδομένο ότι οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές χρειάζονται ένα διάστημα ορισμένων δευτερολέπτων έως ότου φτάσουν σε ισορροπία, η βασική ιδέα που αναπτύχθηκε αφορά στον επιμερισμό των μετρούμενων ηλεκτρικών σημάτων σε τμήματα της τάξης των 5-10 δευτερολέπτων, από τα οποία η χρήσιμη πληροφορία αναφορικά με τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του ηλεκτρικού μεγέθους εστιάζεται στη μέση τιμή του, αφού όμως πρώτα απορριφθεί η πληροφορία που προκύπτει από το αρμονικό περιεχόμενο, καθώς αυτό προέρχεται από τις βραχυπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος και τον θόρυβο μετρήσεων προσδίδοντας πληροφορία που δεν σχετίζεται άμεσα με τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του μετρούμενου ηλεκτρικού μεγέθους. Με άλλα λόγια, από τη σχέση (2-35)

$$X_m[m, k] = \sum_{n=0}^{n=N-1} x[n]w[n - mR]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, k = 0..N - 1$$

επιλέγεται αποκλειστικά ο όρος για $k=0$, δηλαδή η DC συνιστώσα του μετασχηματισμού Fourier:

$$X_{m,DC} = X_m[m, 0] = \sum_{n=0}^{n=N-1} x[n]w[n - mR] \quad (3-8)$$

Πολλαπλασιάζοντας συνεπώς το σήμα $x[n]$ με μία σταθμισμένη συνάρτηση w τύπου Hann (βλ. ενότητα 2.7.6) επιτυγχάνεται η αποκοπή του αρμονικού περιεχομένου του σήματος x , το οποίο παραμένει στους υπολογισμούς της υλοποίησης με τον κινούμενο μέσο όρο (ενότητα 2.5). Το ανακατασκευασμένο σήμα στο πεδίο του χρόνου υπολογίζεται από τον αντίστροφο μετασχηματισμό ως:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_m[m, k] \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$$

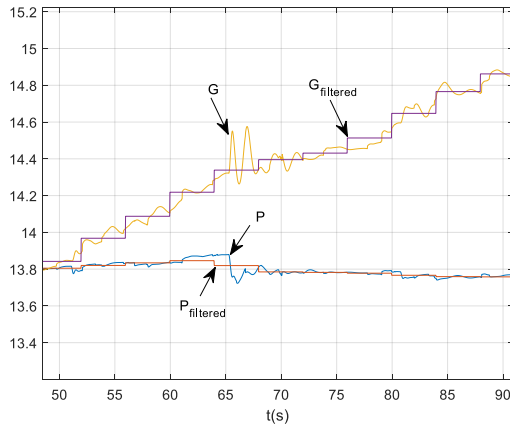
όπου για $k=0$ προκύπτει:

$$x_{DC}[n] = \frac{1}{N} X_{m,DC} \quad (3-9)$$

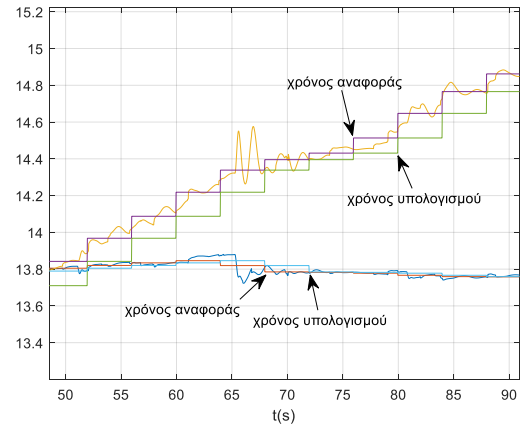
Το ανακατασκευασμένο σήμα της σχέσης (3-9) παρακολουθεί την εξέλιξη του μετρούμενου μεγέθους στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα έχοντας απορρίψει την πληροφορία που προκύπτει από το αρμονικό περιεχόμενο του αρχικού μεγέθους.

Στο σχήμα 3-4 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χρονικής απόκρισης των ηλεκτρικών μεγεθών ενεργού ισχύος και φαινόμενης αγωγιμότητας. Στο σχήμα 3-4(a) απεικονίζονται επίσης τα δύο επεξεργασμένα σήματα ($G_{filtered}$, $P_{filtered}$) που προσεγγίζουν τα αρχικά μέσω τμηματικά σταθερών αποκρίσεων (DC-αποκρίσεις), βάσει εφαρμογής του μετασχηματισμού STFT και της σχέσης (3-9), παρακολουθώντας τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του αντίστοιχου αρχικού σήματος. Στο Σχήμα 3-4(b) απεικονίζονται επίσης τα ανακατασκευασμένα σήματα $G_{filtered}$ και $P_{filtered}$ με άξονα αναφοράς τον χρόνο υπολογισμού τους και όχι τον χρόνο στον οποίο αναφέρονται, καθώς, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2.7.7, προκειμένου να ανακατασκευαστεί ορθά το σήμα, θα πρέπει το χρονικό διάστημα στο οποίο αναφέρεται να έχει επικαλυφτεί πλήρως από τις παραθυρικές συναρτήσεις. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για το εκάστοτε τελευταίο τμήμα του σήματος που αναλύεται εξαιτίας του ότι δεν ισχύει η ιδιότητα $COLA(R)$ (βλ. σχήμα 2-13):

$$\sum_{m=-\infty}^{+\infty} w(n - mR) = 1, \quad \forall n \in \mathbb{Z}$$



(a)



(b)

Σχήμα 3-4 Ανακατασκευασμένα σήματα εισόδου με DC απόκριση: (a) χρόνος αναφοράς, (b) χρόνος αναφοράς και χρόνος υπολογισμού

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τα διαδοχικά τμήματα του υπό επεξεργασία σήματος παρουσιάζουν 50% επικάλυψη ($R=M/2$). Έχοντας επιλέξει $N=400$, ο επανυπολογισμός του STFT πραγματοποιείται με το διάβασμα κάθε 200 νέων δειγμάτων. Στην περίπτωση που η δειγματοληψία στο σήμα γίνεται με ρυθμό 50Hz (νέο δείγμα ανά 20ms), τότε ο επανυπολογισμός του μετασχηματισμού πραγματοποιείται κάθε 4 δευτερόλεπτα.

Η αρχική αλλοίωση που προκαλείται στο πιο πρόσφατο τμήμα του σήματος (δηλαδή τα δείγματα $n = N/2+1 \dots N$) από την παραθυρική συνάρτηση εξουδετερώνεται με την ολοκλήρωση του αμέσως επόμενου υπολογισμού DFT λόγω της ιδιότητας $COLA(R)$ (2-33). Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι το φιλτραρισμένο σήμα $x_{DC}[n]$ είναι ορθώς ανακατασκευασμένο μέχρι και τα τελευταία $M/2$ δείγματα, γεγονός που αναγκάζει την αναμονή μέχρι και τον επόμενο υπολογισμό μετά από διάστημα R προκειμένου να αρθεί η παραμόρφωση του ανακατασκευασμένου σήματος.

Τα παραπάνω έχουν άμεση επίδραση σε όλα τα μεγέθη που εξαρτώνται από τους συγκεκριμένους υπολογισμούς και συνεπώς στους δείκτες αστάθειας τάσης, καθώς για τον ορθό υπολογισμό του δείκτη, π.χ. κατά τη χρονική στιγμή kM , θα πρέπει να έχει ολοκληρωθεί ο DFT υπολογισμός της χρονικής στιγμής $kM+M/2$. Δεδομένου όμως ότι οι εν λόγω υπολογισμοί αφορούν μεγέθη και φαινόμενα που ανήκουν στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, οι καθυστερήσεις της τάξης των $M/2$ δευτερολέπτων μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στη συνέχεια.

3.2.3 Υπολογισμός δεικτών αστάθειας με χρήση μετασχηματισμού STFT

Προκειμένου να γίνει χρήση του μετασχηματισμού STFT στο υπολογισμό των δεικτών αστάθειας NLI και RLI , στη σχέση (2-21) οι διαφορές αναφέρονται στις ποσότητες της σχέσης (3-9) των επιμέρους ηλεκτρικών μεγεθών, δηλαδή στις τμηματικά σταθερές συναρτήσεις που προσεγγίζουν τα πρωτογενή σήματα ενεργού ισχύος και φαινομένης ωμικής αγωγιμότητας. Με βάση τα παραπάνω, οι σχέσεις υπολογισμού των δεικτών NLI και RLI κατά τη χρονική στιγμή t_k για τον ζυγό i ή τη γραμμή μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς $i-j$ τροποποιούνται ως εξής:

$$\overline{NLI}_{k,i} = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \frac{\Delta P_{f,i}(t_k)}{\Delta G_{f,i}(t_k)} \quad (3-10)$$

$$\overline{RLI}_{k,i,j} = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \frac{\Delta P_{f,i,j}(t_k)}{\Delta G_{f,i,j}(t_k)} \quad (3-11)$$

όπου ο δείκτης f υποδεικνύει ότι το μέγεθος έχει προκύψει κατόπιν εφαρμογής του μετασχηματισμού STFT με βάση την προηγούμενη ανάλυση, ενώ επίσης εισάγεται ένα επιπλέον στάδιο κινούμενου μέσου όρου με τους q πιο πρόσφατους υπολογισμούς NLI ή RLI για τελική εξομάλυνση, σε αναλογία με τη σχέση (2-27) της υλοποίησης των δεικτών αστάθειας με βάση τον κινητό μέσο όρο. Η συγκεκριμένη εξομάλυνση χρειάζεται για την αποφυγή λανθασμένου συναγερμού σε περίπτωση μεταβατικής βύθισης στο σύστημα λόγω κάποιου σφάλματος. Σημειώνεται ότι η τιμή της παραμέτρου q πρέπει να είναι μικρή για να αποφεύγονται καθυστερήσεις στην ανίχνευση τυχόν αστάθειας.

Σε αναλογία με την ανάλυση που προηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι υπολογισμοί των δεικτών NLI και RLI θα πρέπει να πραγματοποιούνται αποκλειστικά για θετικές μεταβολές $\Delta\bar{G}_{f,i}$ (αύξηση της ζήτησης), και για τιμές μεταβολής αυστηρά μεγαλύτερες από ένα κατώτατο όριο, ώστε να αποφεύγονται αχρείαστοι υπολογισμοί λόγω θορύβου μετρήσεων. Το συγκεκριμένο όριο δεν θα πρέπει να είναι εν γένει ίσο για τους δύο δείκτες αστάθειας NLI και RLI , καθώς διαφορετική ζήτηση αντιστοιχεί στο σύνολο των γραμμών μεταφοράς που προσπίπτουν σε έναν συννοριακό ζυγό σε σχέση με τη ζήτηση που εξυπηρετείται από κάθε γραμμή. Για τον λόγο αυτό, τίθενται δύο διαφορετικά κατώτατα όρια για τους δείκτες NLI και RLI , αναφορικά με τις μεταβολές της φαινόμενης αγωγιμότητας:

$$\frac{\Delta\bar{G}_{f,i}(t_k)}{\bar{G}_{f,i}(t_{k-1})} > \varepsilon \quad (3-12)$$

$$\frac{\Delta\bar{G}_{f,ij}(t_k)}{\bar{G}_{f,ij}(t_{k-1})} > \eta \quad (3-13)$$

Σκοπός χρήσης των κάτω ορίων των σχέσεων (3-12) και (3-13) είναι η αποφυγή υπολογισμών των δεικτών όταν παρουσιάζονται μικρές μεταβολές στην αγωγιμότητα, οι οποίες αποδίδονται συνήθως σε θόρυβο μετρήσεων, ή σε μικρές στοχαστικής φύσεως μεταβολές στο φορτίο ή στην παραγωγή σταθμών ΑΠΕ.

Ένα επιπλέον είδος περιορισμού που χρειάζεται να τεθεί σχετίζεται με την επίπτωση που έχουν οι μεγάλες διαταραχές στους δείκτες αστάθειας NLI και RLI . Δεδομένου ότι οι ροές ισχύος στο σύστημα μπορούν να εμφανίσουν ξαφνικές και απότομες μεταβολές μετά από εμφάνιση μεγάλης διαταραχής (π.χ. βραχυκύκλωμα, απώλεια μονάδας, άνοιγμα γραμμής κλπ.), είναι αναγκαίο να τεθούν άνω όρια, προκειμένου τυχόν μεταβολές ισχύος που τα υπερβαίνουν να αμελούνται από τους υπολογισμούς των δεικτών αστάθειας, καθώς δεν πρόκειται για μεταβολές από μακροπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος, αλλά έχουν προκληθεί από κάποιο συμβάν το οποίο δεν σχετίζεται πρωτίστως με τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Επιπλέον, τίθεται ένα κάτω όριο για τις απόλυτες διαφορές της ενεργού ισχύος, προκειμένου να αποφεύγονται υπολογισμοί των δεικτών αστάθειας με μεταβολές ισχύος που προέρχονται είτε από θόρυβο μετρήσεων είτε από στοχαστικές μεταβολές μικρής κλίμακας από τις καταναλώσεις του συστήματος ή τις μονάδες ΑΠΕ.

Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται για άνω όρια οι τιμές $\Delta P_{NLI,max}$ και $\Delta P_{RLI,max}$ και για κάτω όρια οι ποσότητες ζ και κ , προκειμένου οι υπολογισμοί των δεικτών να πραγματοποιούνται μόνο όταν η μεταβολή της ενεργού ισχύος είναι αρκούντως μεγάλη ώστε να μη θεωρείται αμελητέα, αλλά ταυτόχρονα και μικρότερη από ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο, δηλαδή:

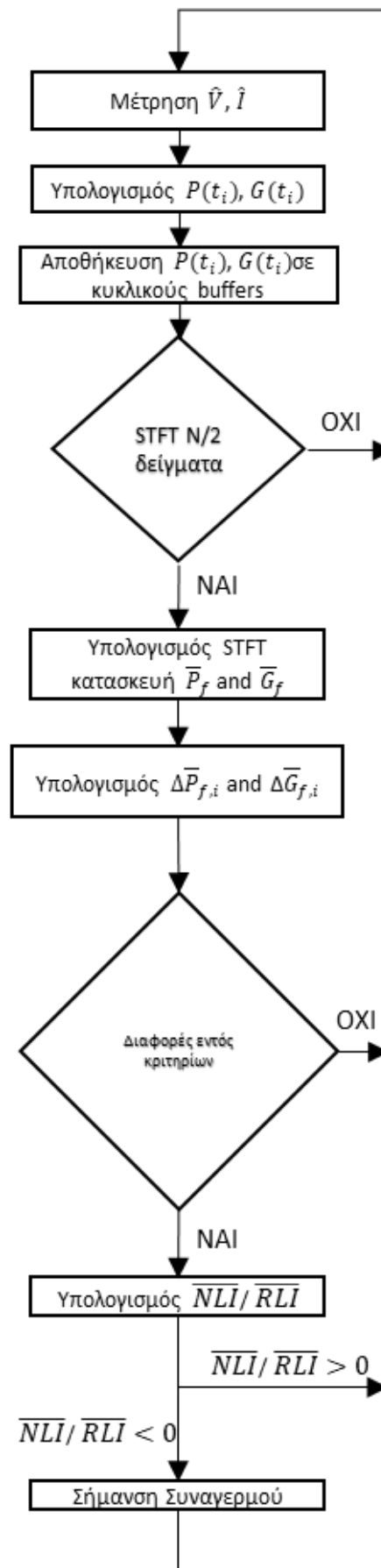
$$\frac{\Delta\bar{P}_{f,i}(t_k)}{\bar{P}_{f,i}(t_{k-1})} < \Delta P_{NLI,max} \quad (3-14)$$

$$\frac{\Delta\bar{P}_{f,ij}(t_k)}{\bar{P}_{f,ij}(t_{k-1})} < \Delta P_{RLI,max} \quad (3-15)$$

$$\frac{|\Delta\bar{P}_{f,i}(t_k)|}{\bar{P}_{f,i}(t_{k-1})} < \zeta \quad (3-16)$$

$$\frac{|\Delta\bar{P}_{f,ij}(t_k)|}{\bar{P}_{f,ij}(t_{k-1})} < \kappa \quad (3-17)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τους επιπρόσθετους περιορισμούς (3-12)-(3-17), ο αλγόριθμος υπολογισμού των δεικτών αστάθειας NLI και RLI απεικονίζεται στο σχήμα 3-5 σε μορφή διαγράμματος ροής:

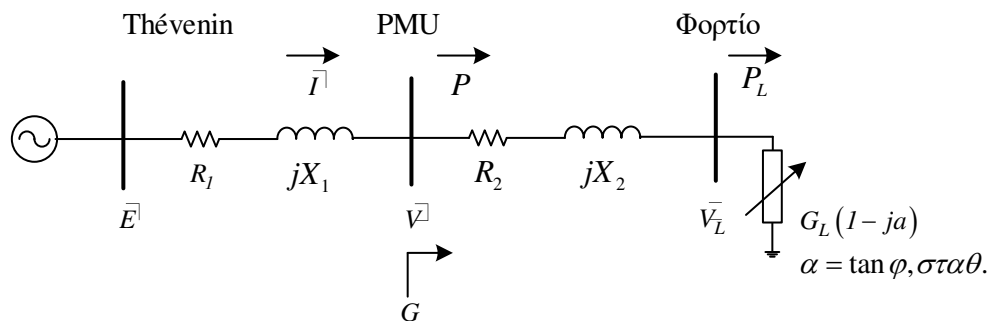


Σχήμα 3-5 Διάγραμμα ροής υπολογισμού NLI και RLI

3.3 Συνθήκες αστάθειας σε ενδιάμεσο ζυγό ακτινικού δικτύου

Στην παρούσα ενότητα γίνεται διερεύνηση της επίδρασης των απωλειών του δικτύου στην ανίχνευση αστάθειας τάσης σε ακτινικό σύστημα τριών ζυγών. Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των απωλειών συστήματος στην ανίχνευση της αστάθειας τάσης από τους δείκτες *NLI* και *RLI* στην περίπτωση του ακτινικού δικτύου, ώστε να αποκτηθεί μία αίσθηση για την αντίστοιχη επίδραση σε μεγαλύτερα δίκτυα βροχοειδούς τοπολογίας, προσομοιώσεις των οποίων θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις τόσο για την περίπτωση δικτύου στο οποίο αμελούνται οι απώλειες όσο και όταν αυτές συμπεριλαμβάνονται, ενώ παρουσιάζονται και αριθμητικά αποτελέσματα για ένα συγκεκριμένο σετ παραμέτρων.

Το ακτινικό δίκτυο που στο οποίο πραγματοποιείται η ανάλυση φαίνεται στο σχήμα 3-6. Στον ενδιάμεσο ζυγό, τάσης V , θεωρείται ότι βρίσκεται PMU που λαμβάνει μετρήσεις των φασιθετών τάσης και ρεύματος. Θεωρείται επίσης ότι το ανάντη σύστημα μεταφοράς μπορεί να αναπαρασταθεί από σταθερό ισοδύναμο δίκτυο Thévenin παραμέτρων E , R_1 και X_1 , καθώς και ότι ο συντελεστής ισχύος του φορτίου διατηρείται σταθερός. Αν και η υπόθεση του σταθερού Thévenin αποτελεί φυσικά προσέγγιση, δεν επηρεάζει το βασικό σκέλος των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την ανάλυση, όπως θα φανεί στη συνέχεια.



Σχήμα 3-6 Ακτινικό δίκτυο με μέτρηση σε ενδιάμεσο ζυγό μεταφοράς

Σημειώνεται ότι το δίκτυο Thévenin αναπαρίσταται ως μία σταθερή πηγή τάσης, θεωρείται σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση, ενώ ο μοναδικός δυναμικός μηχανισμός είναι αυτός της μεταβαλλόμενης αγωγιμότητας φορτίου. Με βάση τα παραπάνω, το δίκτυο θεωρείται ότι ισορροπεί μετά από κάθε μεταβολή της αγωγιμότητας του φορτίου G_L .

Στη συνέχεια παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων που αφορούν τα αριθμητικά παραδείγματα της παρούσας ενότητας. Ο πίνακας 3-1 περιέχει τις τιμές των παραμέτρων του δικτύου, ενώ αντίστοιχα στον πίνακα 3-2 παρατίθενται οι τιμές των παραμέτρων θορύβου μετρήσεων από το PMU (βλ. ενότητα 2.2.2). Ο πίνακας 3-3 περιλαμβάνει τις παραμέτρους που σχετίζονται με τους υπολογισμούς των δεικτών *NLI* και *RLI* και τέλος, ο πίνακας 3-4 περιλαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων με τις οποίες υλοποιήθηκε ο μετασχηματισμός STFT στο ακτινικό δίκτυο του σχήματος 3-6.

Πίνακας 3-1 Παράμετροι Ακτινικού Δικτύου σε βάση ισχύος $S_B=100$ MVA

E	1.00 αμ
R_1	0.05 αμ
R_2	0.03 αμ
X_1	0.15 αμ
X_2	0.20 αμ
$\cos\varphi$	1.0

Πίνακας 3-2 Παράμετροι θορύβου μετρήσεων

σ_m	0.033
μ_m	0

Πίνακας 3-3 Παράμετροι δείκτη NLI

ε	10^{-4}
$\Delta P_{NLI,min}$	10^{-3}

Πίνακας 3-4 Παράμετροι μετασχηματισμού STFT ακτινικού δικτύου

R	M	N	q	w
20	40	40	1	Hann

3.3.1 Ανάλυση χωρίς απώλειες δικτύου

Αμελώντας τις απώλειες του τμήματος του δικτύου που βρίσκεται προς τα κατάντη του ζυγού μετρήσεων ($R_2=0$) και συμβολίζοντας με G τη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα από τον ενδιάμεσο ζυγό του PMU, ισχύουν στο ανά μονάδα σύστημα τα ακόλουθα:

$$P = GV^2 = G_L V_L^2 \quad (3-18)$$

Η τάση στον ζυγό φορτίου γράφεται συναρτήσει της τάσης στον ενδιάμεσο ζυγό ως εξής:

$$\hat{V}_L = \frac{1}{1 + aG_L X_2 + jG_L X_2} \hat{V} \quad (3-19)$$

ενώ η φαινόμενη αγωγιμότητα στον ενδιάμεσο ζυγό μετρήσεων ισούται με:

$$G = \frac{G_L}{(1 + aG_L X_2)^2 + (G_L X_2)^2} \quad (3-20)$$

Διαφορίζοντας τη σχέση (3-20) ως προς G_L με σκοπό την εύρεση του σημείου μεγίστου ($maxG$) για τη συνάρτηση $G(G_L)$, προκύπτει ότι αυτό επιτυγχάνεται όταν η αγωγιμότητα φορτίου G_L ισούται με:

$$G_L = G_{L,maxG} = \frac{1}{X_2 \sqrt{1 + a^2}} \quad (3-21)$$

Συνεπώς, αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου G_L μέχρι την τιμή $G_{L,maxG}$ της σχέσης (3-21) συνεπάγεται και αύξηση της φαινόμενης αγωγιμότητας G στον ενδιάμεσο ζυγό μετρήσεων. Στη συνέχεια, για περαιτέρω αύξηση της αγωγιμότητας φορτίου G_L προκύπτει μείωση της φαινόμενης αγωγιμότητας G . Συνοψίζοντας, ισχύουν οι εξής σχέσεις:

$$\Delta G_L > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta G > 0 & \text{εάν } G_L < G_{L,maxG} \\ \Delta G < 0 & \text{εάν } G_L > G_{L,maxG} \end{cases} \quad (3-22)$$

Το σύστημα είναι ευσταθές όταν αύξηση της ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου συνεπάγεται αύξηση της καταναλισκόμενης ισχύος του, όταν δηλαδή ισχύει:

$$\Delta G_L > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta P > 0 & \text{εάν } G_L < \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}(X_1 + X_2)} = G_{L,maxP_L} = G_{L,maxP} \\ \Delta P < 0 & \text{εάν } G_L > G_{L,maxP_L} \end{cases} \quad (3-23)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις και δεδομένου ότι $\frac{1}{(X_1 + X_2)} < 1/X_2$ προκύπτουν οι ακόλουθες περιπτώσεις:

$$\Delta G_L > 0 \Rightarrow \begin{cases} \Delta G > 0, \Delta P > 0 & \text{εάν } G_L < G_{L,maxP} \\ \Delta G > 0, \Delta P < 0 & \text{εάν } G_{L,maxP} < G_L < G_{L,maxG} \\ \Delta G < 0, \Delta P < 0 & \text{εάν } G_L > G_{L,maxG} \end{cases} \quad (3-24)$$

ή χρησιμοποιώντας τον ορισμό του δείκτη αστάθειας NLI :

$$\Delta G_L > 0 \Rightarrow \begin{cases} NLI > 0 & \text{εάν } 0 < G_L < G_{L,maxP} \\ NLI < 0 & \text{εάν } G_{L,maxP} < G_L < G_{L,maxG} \\ NLI \text{ δεν υπολογίζεται} & \text{εάν } G_L > G_{L,maxG} \end{cases} \quad (3-25)$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι ο δείκτης NLI παραμένει θετικός όσο το σύστημα είναι ευσταθές, δηλαδή μέχρις ότου αυτό φτάσει στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προς το φορτίο αγωγιμότητας G_L . Το σημαντικό γεγονός που προκύπτει από τη σχέση (3-24) είναι ότι η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα αυξάνει μαζί με αυτήν του φορτίου μετά το σημείο της αστάθειας στο σύστημα. Στη συνέχεια η περαιτέρω αύξηση της αγωγιμότητας προκαλεί την αλλαγή προσήμου του δείκτη NLI και συνεπώς αντίστροφή της αστάθειας. Αυτό συνεπάγεται ότι η σχέση (2-14)

$$\frac{\Delta P}{\Delta G_{app}} > 0$$

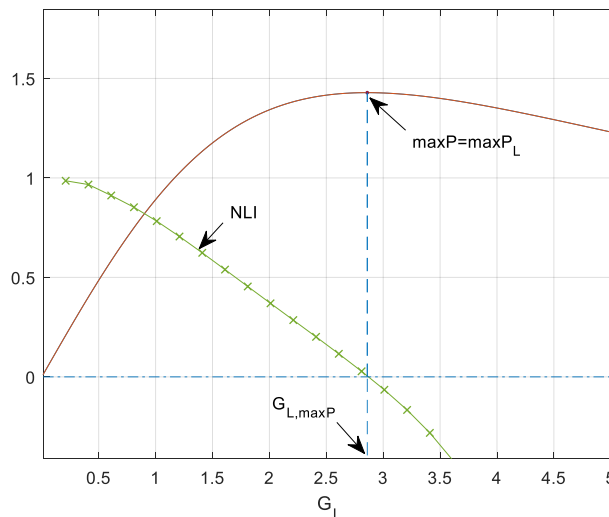
αποτελεί αναγκαία και ικανή συνθήκη ευστάθειας τάσης για ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες.

Σημειώνεται ότι στην περίπτωση $1/X_2 < G_L \sqrt{1+a^2}$, λόγω μείωσης της ποσότητας G ο δείκτης NLI δεν υπολογίζεται, όπως έχει εξηγηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

3.3.2 Αριθμητικά αποτελέσματα χωρίς απώλειες δικτύου

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του δικτύου του σχήματος 3-6 με βάση τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρονται στους πίνακες 3-1 έως 3-3. Η διαταραχή που επιβάλλεται στο δίκτυο αφορά αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου G_L με σταθερά βήματα 0,01 αμ προκειμένου να προκληθεί αστάθεια τάσης στο δίκτυο. Υπενθυμίζεται, ότι στην περίπτωση ακτινικής τοπολογίας οι δείκτες NLI και RLI ταυτίζονται και συνεπώς στις αποκρίσεις που ακολουθούν υπονοούνται πανομοιότυπες τιμές και για τον δείκτη RLI . Σημειώνεται ότι πέραν των απωλειών δικτύου, αμελείται επίσης και ο θόρυβος μετρήσεων. Με βάση τα παραπάνω, ισχύει $P=P_L$ για το δίκτυο του σχήματος 3-6.

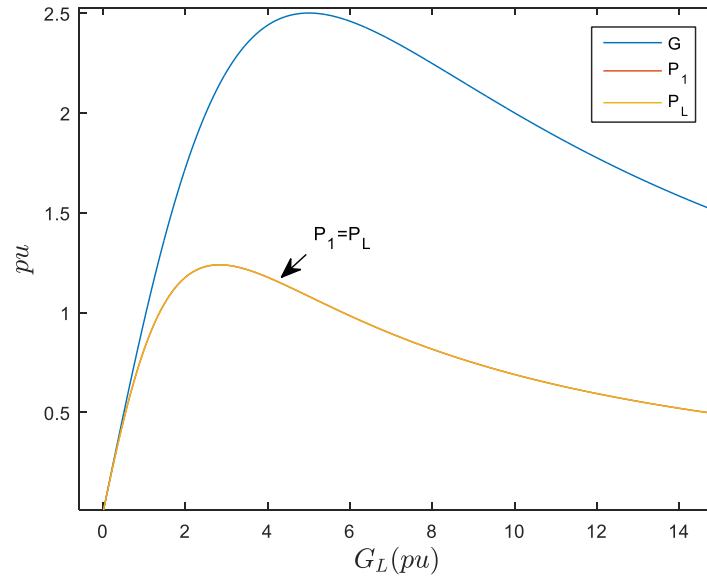
Στο σχήμα 3-7 εμφανίζεται η ενεργός ισχύς $P=P_L$ συναρτήσει της ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου G_L . Όπως φαίνεται, το δίκτυο φτάνει το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, ενώ για τιμές G_L πέραν της $G_{L,maxP} = 1/(X_1 + X_2) = 2,857$ η καταναλισκόμενη ισχύς μειώνεται. Σημειώνεται ότι οι αποκρίσεις ως προς την ωμική αγωγιμότητα του φορτίου G_L μπορούν να θεωρηθούν και χρονικές αποκρίσεις εάν υποθεθεί ρυθμός μεταβολής $\Delta G_L/\Delta t = 0,01$ αμ/s.



Σχήμα 3-7 Δίκτυο χωρίς απώλειες, αποκρίσεις P_L , P και NLI

Τα μεγέθη στο σχήμα 3-7 παριστάνονται συναρτήσει της ανά μονάδα ωμικής αγωγιμότητας του φορτίου, για βασική ισχύ 100MVA. Μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών του δείκτη NLI , η μεταβολή της ζήτησης είναι της τάξης του 0,2αμ. Με βάση το σχήμα 3-7 επαληθεύεται ότι στην περίπτωση ενός δικτύου χωρίς

απώλειες ο NLI γίνεται αρνητικός ακριβώς στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και άρα κατά την εκδήλωση της αστάθειας τάσης.



Σχήμα 3-8 Ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες, $G, P=P_L$ συναρτήσει G_L

Από το σχήμα 3-8 επαληθεύεται το γεγονός ότι $G_{LmaxG} > G_{LmaxP}$, ότι δηλαδή η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα θα μεγιστοποιηθεί αρκετά μετά το σημείο μεγιστοποίησης της ενεργού ισχύος $P_L=P$. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη συνέχιση των υπολογισμών του NLI , και συνεπώς την ανίχνευση της αστάθειας, ακριβώς όταν συμβαίνει.

3.3.3 Ακτινικό δίκτυο με απώλειες

Η ανάλυση της προηγούμενης ενότητας βασίστηκε σε θεώρηση μηδενικών απωλειών δικτύου και αποδείχτηκε ότι η θετική τιμή του δείκτη NLI αποτελεί ικανή και αναγκαία συνθήκη ευστάθειας τάσης για το ακτινικό δίκτυο του σχήματος 3-6. Στην παρούσα ενότητα, η ανάλυση επαναλαμβάνεται με μη μηδενική ωμική αντίσταση R_2 , με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την επίδραση των απωλειών δικτύου στην ανίχνευση ευστάθειας τάσης.

Με δεδομένες τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος στον ενδιάμεσο ζυγό, καθώς και ότι οι παράμετροι E, R_1, X_1, R_2, X_2 , και α , δεν μεταβάλλονται, υπολογίζεται η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στον ενδιάμεσο ζυγό G , καθώς και η αποστελλόμενη ενεργός ισχύς P .

Η ισχύς που καταναλώνεται από το φορτίο είναι:

$$P_L = \frac{G_L(1 + \alpha^2)E^2}{[1 + (R_1 + R_2)G_L(1 + \alpha^2)]^2 + [\alpha + (X_1 + X_2)G_L(1 + \alpha^2)]^2} \quad (3-26)$$

Με βάση τις υποθέσεις σταθερών παραμέτρων, η ενεργός ισχύς του φορτίου αποτελεί συνάρτηση μόνο της αγωγιμότητας φορτίου G_L . Εφαρμόζοντας το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, η μέγιστη κατανάλωση του φορτίου επιτυγχάνεται κατά την προσαρμογή των σύνθετων αντιστάσεων φορτίου και δικτύου. Συμβολίζοντας με $G_{L,maxP_L}$ την ωμική αγωγιμότητα κατά την οποία αυτό συμβαίνει θα ισχύει:

$$G_{L,maxP_L} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad (3-27)$$

Η σχέση (3-27) προκύπτει και με παρατήρηση από τη σχέση (2-12), λαμβάνοντας υπόψιν ότι στο δίκτυο συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες.

Αντίστοιχα, η κατανάλωση ενεργού ισχύος του φορτίου στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προκύπτει ίση με:

$$\max P_L = \frac{E^2}{2\sqrt{1 + \alpha^2} \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} + (R_1 + R_2) + \alpha(X_1 + X_2)} \quad (3-28)$$

Το πρόβλημα στην προκειμένη περίπτωση προκύπτει από το γεγονός ότι το PMU βρίσκεται στον ενδιάμεσο ζυγό και συνεπώς δεν μπορεί να ανιχνεύσει άμεσα την προσαρμογή της σύνθετης αντίστασης του φορτίου, καθώς συνυπολογίζει και τη σύνθετη αντίσταση $Z_2 = R_2 + jX_2$ στις μετρήσεις. Αυτό συνεπάγεται επίσης ότι, ακόμη και όταν ο συντελεστής ισχύος του φορτίου παραμένει σταθερός, ο φαινόμενος συντελεστής ισχύος στον ζυγό μετρήσεων παύει να είναι σταθερός λόγω της υπεισερχόμενης σύνθετης αντίστασης του δικτύου που βρίσκεται μεταξύ ζυγού μετρήσεων και φορτίου.

Ως εκ τούτου, και σε αντιστοιχία με την ανάλυση της ενότητας 2.3.2, η συνθήκη προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης αν εφαρμοστεί στον ενδιάμεσο ζυγό δεν αντιστοιχεί σε μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

Πιο συγκεκριμένα, η φαινόμενη αγωγιμότητα στον ενδιάμεσο ζυγό ισούται με:

$$G = \operatorname{Re}\{\hat{I}/\hat{V}\} = \frac{G_L(1 + \alpha^2)[1 + R_2 G_L(1 + \alpha^2)]}{[1 + R_2 G_L(1 + \alpha^2)]^2 + [a + X_2 G_L(1 + \alpha^2)]^2} \quad (3-29)$$

Αναζητώντας το ακρότατο της σχέσης (3-29), υπό την προϋπόθεση ότι μεταβάλλεται μόνο η παράμετρος G_L , προκύπτει ότι η μέγιστη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα στον ενδιάμεσο ζυγό θα αντιστοιχεί σε αγωγιμότητα φορτίου:

$$G_{L, \max G} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2}(X_2 - aR_2) - (1 + \alpha^2)R_2} \quad (3-30)$$

Η ποσότητα $G_{L, \max G}$ έχει ιδιαίτερη σημασία στην προκειμένη περίπτωση, διότι οριοθετεί το διάστημα στο οποίο ο δείκτης NLI μπορεί να υπολογιστεί, καθώς υπενθυμίζεται ότι οι δείκτες αστάθειας της παρούσας εργασίας δεν υπολογίζονται όταν η φαινόμενη αγωγιμότητα μειώνεται, αφού αυτό υπονοεί μείωση της ζήτησης του συστήματος. Με άλλα λόγια, για φαινόμενη αγωγιμότητα πέραν της τιμής $G_{L, \max G}$ προκύπτει $\Delta G < 0$, γεγονός που εμποδίζει τους προτεινόμενους δείκτες αστάθειας να υπολογιστούν.

Η αποστελλόμενη ισχύς από τον ενδιάμεσο ζυγό είναι ίση με:

$$P = \frac{G_L(1 + \alpha^2)[1 + R_2 G_L(1 + \alpha^2)]E^2}{[1 + (R_1 + R_2)G_L(1 + \alpha^2)]^2 + [a + (X_1 + X_2)G_L(1 + \alpha^2)]^2} \quad (3-31)$$

Με δεδομένο ότι οι ποσότητες P_L και P είναι συναρτήσεις αποκλειστικά της ωμικής αγωγιμότητας G_L , για τη μεγιστοποίηση της αποστελλόμενης από τον ενδιάμεσο ζυγό ισχύος P , η ωμική αγωγιμότητα φορτίου προκύπτει:

$$G_{L, \max P} = \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha^2} \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2 - aR_2)^2} - (1 + \alpha^2)R_2} \quad (3-32)$$

Συγκρίνοντας τις σχέσεις (3-27) και (3-32) μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η συνθήκη προσαρμογής της σύνθετης αντίστασης του φορτίου δεν ταυτοχρονίζεται με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στον ενδιάμεσο ζυγό.

Δεδομένου επίσης ότι $X_1 > 0$ και $R_1 > 0$, από τις σχέσεις (3-30) και (3-32) συνεπάγεται ότι για όλους τους συντελεστές ισχύος φορτίου θα ισχύει:

$$G_{L, \max P} < G_{L, \max G} \quad (3-33)$$

Συνεπώς, με αύξηση της αγωγιμότητας φορτίου, η φαινόμενη από τον ενδιάμεσο ζυγό ωμική αγωγιμότητα G συνεχίζει να αυξάνεται ακόμη και πέρα από το σημείο της μέγιστης αποστελλόμενης ισχύος $\max P$ από τον ενδιάμεσο ζυγό. Το παραπάνω εξασφαλίζει ότι υπάρχει διάστημα μετρούμενης αγωγιμότητας στο οποίο μπορεί να ανιχνευτεί η αστάθεια με βάση τους προτεινόμενους δείκτες της παρούσας εργασίας.

Από την παραπάνω ανάλυση είναι επίσης σκόπιμο να συσχετιστούν οι ποσότητες $G_{L,maxP_L}$ και $G_{L,maxP}$. Εάν η παρουσία της παραμέτρου R_2 συνεπάγεται και καθυστέρηση στην ανίχνευση της αστάθειας από το PMU, τότε αυτό θα πρέπει ισοδύναμα να αποτυπώνεται στη σχέση $G_{L,maxP} > G_{L,maxP_L}$. Συγκρίνοντας τις σχέσεις (3-27) και (3-32) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2 - aR_2)^2} &\leq R_2\sqrt{(1+a^2)} + \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} \Rightarrow \\ -(R_1 + R_2) - a(X_1 + X_2) &\leq \sqrt{1+a^2}\sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X^2} \end{aligned} \quad (3-34)$$

Διερευνώντας περαιτέρω τη σχέση (3-34), όταν το αριστερό της μέλος είναι αρνητικό, δηλαδή όταν ισχύει:

$$\alpha \geq -\frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2}$$

τότε η (3-34) ικανοποιείται, διότι το δεξί μέλος είναι πάντα θετική ποσότητα. Αυτό σημαίνει ότι η (3-34) ικανοποιείται για όλα τα επαγωγικά φορτία αλλά και για φορτία χωρητικής φύσεως, μέχρι ένα συγκεκριμένο χωρητικό συντελεστή ισχύος.

Στην περίπτωση τώρα που το αριστερό μέλος της (3-34) είναι θετικό, δηλαδή όταν:

$$\alpha < -\frac{R_1 + R_2}{X_1 + X_2}$$

προκειμένου να ισχύει η (3-34), θα πρέπει να ικανοποιείται και η ακόλουθη σχέση που προκύπτει υψώνοντας στο τετράγωνο:

$$(R_1 + R_2)^2 + \alpha^2(X_1 + X_2)^2 + 2(R_1 + R_2)\alpha(X_1 + X_2) \leq (1 + a^2)[(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2]$$

η οποία κατόπιν πράξεων καταλήγει στην ακόλουθη:

$$((X_1 + X_2) - \alpha(R_1 + R_2))^2 \geq 0$$

που αληθεύει πάντα. Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει το γενικευμένο συμπέρασμα για το ακτινικό δίκτυο ότι:

$$G_{L,maxP_L} < G_{L,maxP} \quad (3-35)$$

Η βασική συνέπεια της σχέσης (3-35) είναι ότι, δεδομένης της αύξησης της αγωγιμότητας του φορτίου G_L , το σύστημα θα μεταβεί στο σημείο $maxP$ αφού πρώτα περάσει από το σημείο λειτουργίας $maxP_L$. Με άλλα λόγια, θα παρατηρηθεί στην περίπτωση αυτή μία καθυστερημένη ανίχνευση της αστάθειας από τους δείκτες NLI και RLI .

Στο σημείο αυτό είναι επίσης χρήσιμο να ποσοτικοποιηθεί η προσέγγιση της ανίχνευσης αστάθειας όταν συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες δικτύου. Για τον λόγο αυτό ορίζεται η κάτωθι ποσότητα:

$$e = \frac{\Delta G_M}{G_{L,maxP_L}} \quad (3-36)$$

όπου είναι $\Delta G_M = G_{L,maxP} - G_{L,maxP_L}$. Προκύπτει συνεπώς ότι το σφάλμα ανίχνευσης της αστάθειας αυξάνει όσο πιο απομακρυσμένα από το φορτίο τοποθετείται το PMU στο ακτινικό δίκτυο.

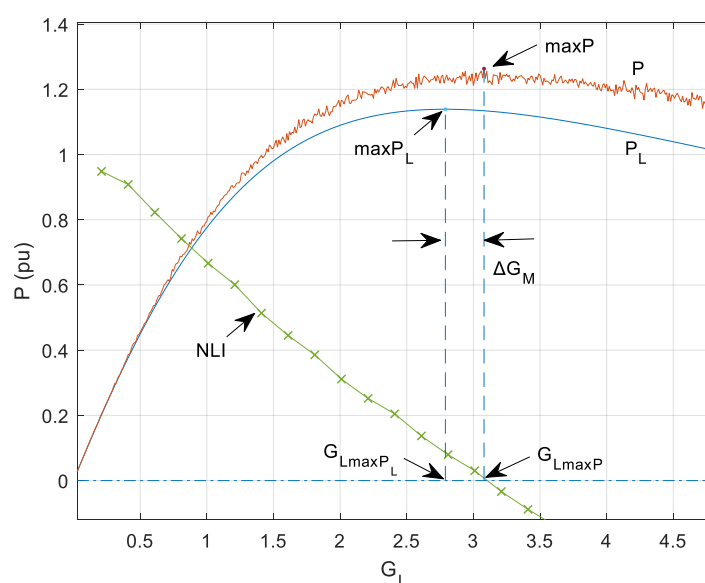
Είναι σαφές ότι η παραπάνω ανάλυση έχει προεκτάσεις και στην περίπτωση βροχοειδούς δικτύου. Υπενθυμίζεται στο σημείο αυτό ωστόσο, ότι η καθυστέρηση ανίχνευσης λόγω των απωλειών συστήματος αφορά στην καθυστέρηση ανίχνευσης του σημείου M του σχήματος 2-9, το οποίο, όπως εξηγήθηκε,

προηγείται του σημείου αστάθειας τάσης C . Στο σημείο αυτό πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι πέραν της αναμενόμενης καθυστέρησης ανίχνευσης του σημείου M (βλ. σχήμα 2-9) λόγω απωλειών του τμήματος δικτύου μεταξύ του σημείου μέτρησης και των φορτίων, πρέπει να συμπεριληφθεί και η επιπρόσθετη καθυστέρηση ενεργοποίησης σήματος συναγερμού λόγω της χρήσης φίλτρων, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 3.2.

Από την ανάλυση της παρούσας ενότητας αναδεικνύεται επίσης το γεγονός ότι το σφάλμα στην εκτίμηση της αστάθειας θα μπορούσε να μειωθεί ή και εξουδετερωθεί, εάν ήταν δυνατή η εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου που βρίσκεται προς στα κατάντη του ζυγού μετρήσεων.

3.3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα με απώλειες δικτύου

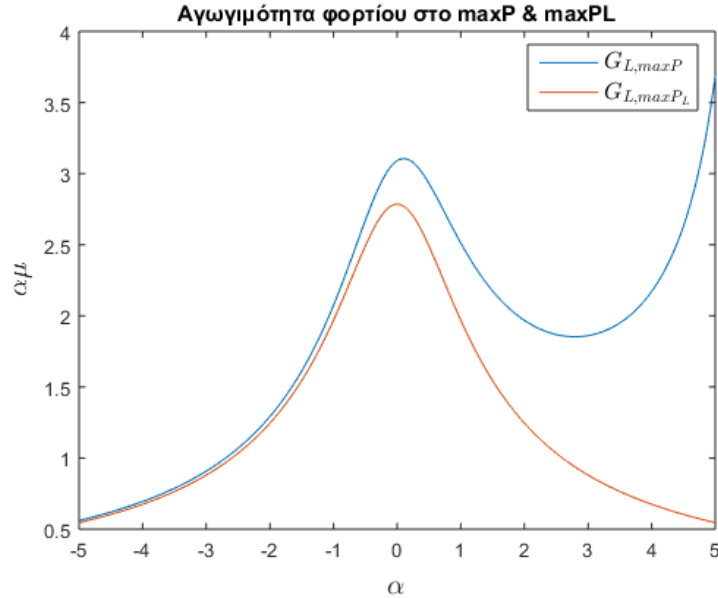
Για την περίπτωση μη μηδενικής αντίστασης R_2 (βλ. σχήμα 3-6) πραγματοποιείται η ίδια αριθμητική εφαρμογή της ενότητας 3.3.2, λαμβάνοντας υπόψη και τον θόρυβο στις μετρήσεις του PMU με βάση τις παραμέτρους του πίνακα 3-2. Στο σχήμα 3-9 φαίνεται η απόκριση της ισχύος φορτίου P_L , της αποστελλόμενης ισχύος P από τον ενδιαμέσο ζυγό, καθώς και τον υπολογιζόμενο δείκτη NLI .



Σχήμα 3-9 Ακτινικό δίκτυο με απώλειες: P_L , P και NLI συναρτήσει G_L

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο δείκτης NLI παρουσιάζει μικρή κυμάτωση, η οποία αποδίδεται στον θόρυβο μετρήσεων. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί η ποσότητα ΔG_M της σχέσης (3-36), από την οποία ποσοτικοποιείται η καθυστέρηση στην ανίχνευση της αστάθειας. Με βάση τις τιμές των παραμέτρων που έχουν ληφθεί υπόψη (πίνακες 3-1 έως 3-4) προκύπτει $\Delta G_M = 0,3$ αμ, ενώ αντίστοιχα το σχετικό σφάλμα e της σχέσης (3-36) προκύπτει ίσο με 0,11 (11%).

Στο σχήμα 3-10 απεικονίζονται οι σχέσεις (3-27) και (3-32) συναρτήσει του συντελεστή ισχύος, όπου και επαληθεύεται η σχέση (3-35).



Σχήμα 3-10 Γράφημα των $G_{L,maxP}$ και $G_{L,maxPL}$ συναρτήσεων συντελεστή ισχύος

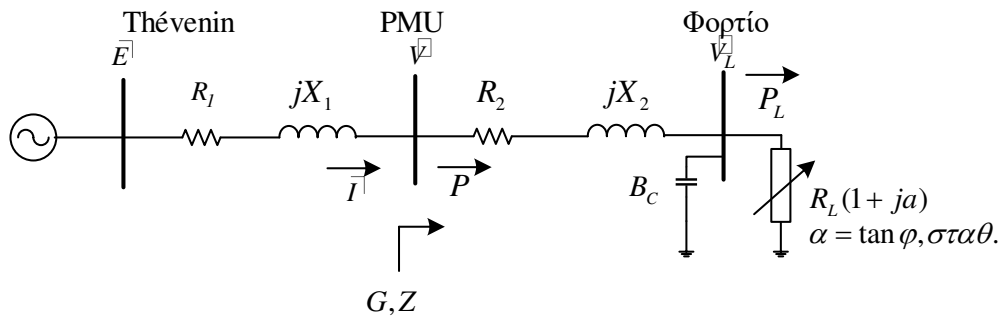
Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί, το σημείο $G_{L,maxPL}$ προηγείται λειτουργικά του $G_{L,maxP}$ ανεξάρτητα της τιμής του συντελεστή ισχύος του φορτίου. Αυτό συνεπάγεται καθυστέρηση στην ανίχνευση της αστάθειας τάσης από τον δείκτη NLI , γεγονός που καθιστά σκόπιμη την ανίχνευση των παραμέτρων του δικτύου στα κατάντη του ζυγού μετρήσεων.

3.4 Προσεγγιστική εκτίμηση παραμέτρων δικτύου προς τα κατάντη ζυγού μετρήσεων

Από την ανάλυση της προηγούμενης ενότητας προέκυψε το συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση του PMU σε ενδιάμεσο ζυγό σε ένα ακτινικό δίκτυο εισάγει σφάλμα (καθυστέρηση) στην ανίχνευση της αστάθειας τάσης. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να αρθεί εάν ήταν δυνατόν να εκτιμηθεί η ωμική αντίσταση R_2 στο τμήμα του δικτύου που βρίσκεται προς τα κατάντη του ζυγού μετρήσεων. Στην περίπτωση αυτή είναι $P = P_L + R_2 I^2$, συνεπώς ο δείκτης μπορεί να διορθωθεί ώστε να υπολογίζει την ποσότητα $\Delta P_L / \Delta G$ αντί για την $\Delta P / \Delta G$.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται μία μέθοδος βασισμένη αποκλειστικά σε μετρήσεις για την εκτίμηση των παραμέτρων του τμήματος του δικτύου που παρεμβάλλεται μεταξύ του ζυγού μετρήσεων και του ζυγού φορτίου, για την περίπτωση του ακτινικού δικτύου του σχήματος 3-11.

Σημειώνεται επίσης, ότι η συγκεκριμένη ανάλυση αφορά την περίπτωση αμιγώς παθητικού δικτύου στα κατάντη του ενδιάμεσου ζυγού, ενώ παρουσιάζονται δύο περιπτώσεις ανάλυσης, μία με μη αντισταθμισμένο φορτίο και μία με παρουσία παράλληλης σταθερής αντιστάθμισης B_C .



Σχήμα 3-11 Ακτινικό δίκτυο με απώλειες, αντιστάθμιση και μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε ενδιάμεσο ζυγό

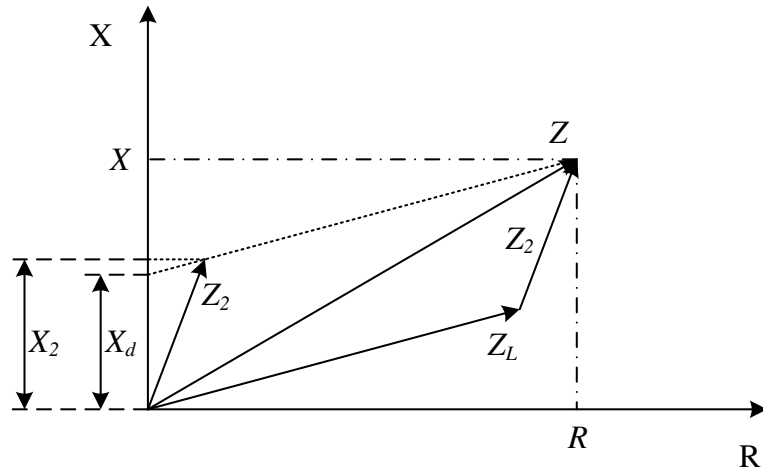
3.4.1 Φορτίο χωρίς αντιστάθμιση

Όταν $B_C=0$, η μετρούμενη από το PMU σύνθετη αντίσταση ισούται με:

$$Z = R_2 + jX_2 + R_L(1 + ja) \quad (3-37)$$

$$Z = Z_2 + Z_L \quad (3-38)$$

Υπό την προϋπόθεση ότι $a = \text{σταθ.}$ ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της (3-38) είναι ευθεία στο επίπεδο σύνθετης αντίστασης RX .



Σχήμα 3-12 Φαινόμενο Z , Z_2 και Z_L στο επίπεδο $R-X$

Με βάση τις σχέσεις (3-37) και (3-38) είναι εμφανές ότι είναι αδύνατον να προσδιοριστεί μονοσήμαντα η παράμετρος R_2 από το Z λόγω απειρίας λύσεων. Για παράδειγμα, η περίπτωση $R_2=0$, $X_2=X_d$ είναι μία αποδεκτή λύση της (3-38). Ομοίως όμως αποδεκτή είναι και η λύση:

$$R_2 = R'_2 - ja\Delta R_2 + \Delta R_2(1 + ja) = R'_2 + \Delta R_2$$

από την οποία προκύπτει η ίδια φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στο PMU, αλλά με διαφορετικό συνδυασμό δικτύου και φορτίου:

$$Z = R'_2 + j(X_2 - a\Delta R_2) + (R_L + \Delta R_2)(1 + ja)$$

Η παραπάνω ιδιότητα περιορίζει τη δυνατότητα διαχωρισμού μεταξύ δικτύου και φορτίου, υποδεικνύοντας ότι είναι απαραίτητη περαιτέρω πληροφορία. Παρόλα αυτά, υπό την προϋπόθεση σταθερού δικτύου προς τα κατάντη του ζυγού μετρήσεων και συντελεστή ισχύος φορτίου, ο συντελεστής ισχύος είναι δυνατόν να προσδιοριστεί από δύο μετρήσεις Z και $Z+\Delta Z$ διότι:

$$Z' = Z_2 + Z'_L$$

$$Z' - Z = \Delta Z = Z_L - Z'_L = \Delta R_L(1 + ja) \quad (3-39)$$

Η σχέση (3-39) πρακτικά περιγράφει ότι στην περίπτωση σταθερού δικτύου και συντελεστή ισχύος ο γεωμετρικός τόπος των μετρήσεων του Z θα βρίσκεται σε ευθεία παράλληλη με αυτήν της σύνθετης αντίστασης φορτίου Z_L .

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τον προσδιορισμό των παραμέτρων R_2 , X_2 και Z_L απαιτείται ένα ακόμη στοιχείο, προκειμένου να αρθεί η απειρία των λύσεων της (3-37). Το στοιχείο αυτό μπορεί για παράδειγμα να είναι ο λόγος $\lambda = R_2/X_2$ ωμικής αντίστασης προς αντίδραση του δικτύου.

Εάν εκτιμηθεί ο λόγος λ , τότε έχοντας δύο μετρήσεις διαθέσιμες είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο σταθερός συντελεστής ισχύος του φορτίου όπως προαναφέρθηκε από την (3-39) και αξιοποιώντας στη συνέχεια τις σχέσεις:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{R - R_L}{X - X_L} \\ X_L &= aR_L \\ R_2 &= \lambda X_2 \\ \tan\varphi = \alpha &= \frac{X_2 - X_d}{R_2} = \frac{X - X_d}{R}\end{aligned}$$

προκύπτει:

$$\begin{aligned}R_L &= \frac{R - \lambda X}{1 - \alpha\lambda} \\ X_d &= X - aR\end{aligned}$$

ενώ η επαγωγική αντίδραση της γραμμής προκύπτει:

$$\begin{aligned}X_2 &= a\lambda X_2 + X_d \quad \text{ή} \\ X_2 &= \frac{X_d}{1 - \lambda\alpha} = \frac{X - aR}{1 - \lambda\alpha}\end{aligned}$$

Στην περίπτωση που οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο, τότε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων Z στο επίπεδο RX μπορεί να προσεγγισθεί με γραμμική παλινδρόμηση κάνοντας χρήση του κριτηρίου των ελαχίστων τετραγώνων. Σημειώνεται ωστόσο, ότι για την εφαρμογή τεχνικών παλινδρόμησης χρειάζεται το σύνολο των μετρήσεων να υπερβαίνει το σύνολο των αγνώστων παραμέτρων, προκειμένου να προκύπτει δυνατότητα βελτιστοποίησης με το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων.

Το σύστημα εξισώσεων που καταστρώνεται στην προκειμένη περίπτωση απαιτεί οι διαδοχικές μετρήσεις να απέχουν επαρκώς μεταξύ τους, ώστε να είναι ανεξάρτητες και να αποφεύγονται προβλήματα σύγκλισης του αλγορίθμου. Για τον σκοπό αυτό, τίθεται η απαίτηση κάθε νέα μέτρηση ($k+1$) να διαφέρει από την προηγούμενη κατά τουλάχιστον ένα ελάχιστο κατώφλι:

$$\frac{|Z_{k+1} - Z_k|}{|Z_k|} \geq \kappa > 0 \quad (3-40)$$

όπου το κατώφλι κ ποσοτικοποιείται σε επόμενο κεφάλαιο με αριθμητικά αποτελέσματα. Το σύστημα που καταστρώνεται είναι συνεπώς το κάτωθι:

$$\begin{aligned}R^{(1)} + jX^{(1)} &= R_2 + jX_2 + R_L^{(1)}(1 + ja) \\ &\vdots \\ R^{(N)} + jX^{(N)} &= R_2 + jX_2 + R_L^{(N)}(1 + ja)\end{aligned} \quad (3-41)$$

από όπου είναι εμφανές ότι με $N \geq 4$ είναι δυνατόν να εφαρμοστεί γραμμική παλινδρόμηση. Τονίζεται ότι η παραδοχή του παραπάνω συστήματος εξισώσεων αφορά στο ότι κατά την καταγραφή των μετρήσεων οι μεταβολές αφορούν σε αλλαγή φορτίου και όχι του συστήματος προς τα κατάντη του ζυγού μετρήσεων, το οποίο θεωρείται σταθερό.

Για τη συμπερίληψη θορύβου μετρήσεων στην παραπάνω ανάλυση ακολουθείται η θεώρηση της ενότητας 2.2.2 ότι δηλαδή ο θόρυβος υπερτίθεται στον φασιθέτη A που μπορεί να αναφέρεται είτε στην τάση είτε στο ρεύμα ως εξής:

$$A_m = A(1 + me^{j\theta}) \quad (3-42)$$

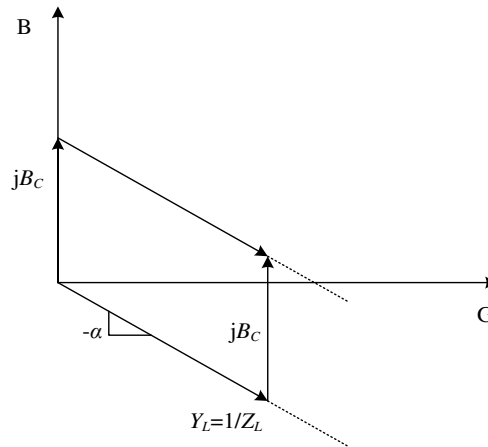
όπου m είναι τυχαίος αριθμός που ακολουθεί κανονική κατανομή μέσης τιμής $\mu = 0$ και τυπικής απόκλισης σ , ενώ θ τυχαίος αριθμός που ακολουθεί ομοιόμορφη στο διάστημα τιμών $[-\pi/2, \pi/2]$. Η τιμή της τυπικής απόκλισης είναι τέτοια ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση του προτύπου [IEE11] για σφάλμα $TVE \leq 1\%$.

3.4.2 Ακτινικό φορτίο με αντισταθμισμένο φορτίο

Στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται παράλληλος πυκνωτής στο δίκτυο του σχήματος 3-11, τότε μπορεί να αποδειχθεί ότι για την περίπτωση φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος, σταθερού πυκνωτή και δικτύου ότι ο γεωμετρικός τόπος που διαγράφουν οι μετρήσεις Z στο επίπεδο RX είναι κύκλος.

Το παραπάνω προκύπτει λαμβάνοντας υπόψιν ότι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου $1/Z_L$ απεικονίζεται ως ευθεία κλίσης $-\alpha$ που διέρχεται από την αρχή των αξόνων στο επίπεδο GB . Η πρόσθεση της ποσότητας jB_c (παράλληλη σύνδεση αντιστάθμισης) μετατοπίζει την ευθεία κατά ισόποση ποσότητα. Η μετατοπισμένη ευθεία (βλ. σχήμα 3-13) περιγράφεται από τη μιγαδική σχέση (3-43) [Chu48]:

$$(-\alpha + j)Y + (-\alpha - j)Y^* + 2B_c = 0 \quad (3-43)$$



Σχήμα 3-13 Y , Y_L και jB_c στο επίπεδο GB

Εφαρμόζοντας τον μετασχηματισμό $f(Z) = 1/Y$ για μεταφορά στο επίπεδο Z προκύπτει η παράσταση:

$$ZZ^* - \frac{\alpha - j}{2B_c} Z^* - \frac{\alpha + j}{2B_c} Z = 0 \quad (3-44)$$

η οποία αντιστοιχεί σε γεωμετρικό τόπος κύκλου κέντρου Z_0 και ακτίνας r :

$$(Z - Z_0)(Z^* - Z_0^*) - r^2 = 0 \quad (3-45)$$

και συγκρίνοντας τις σχέσεις (3-44) και (3-45) άμεσα προκύπτει:

$$Z_0 = R_0 + jX_0 = \frac{\alpha - j}{2B_c}$$

$$r = |Z_0| = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2}}{2B_c} \quad (3-46)$$

και ο κύκλος περνάει από το σημείο 0 (αρχή των αξόνων).

Δεδομένου ότι η μετρούμενη από το PMU σύνθετη αντίσταση εμπεριέχει τη σύνθετη αντίσταση $R_2 + jX_2$ πέραν του παράλληλου συνδυασμού φορτίου και πυκνωτή, το κέντρο του κύκλου (R_c , X_c) μετατοπίζεται κατά τη σταθερή ποσότητα της σύνθετης αντίστασης του δικτύου που βρίσκεται στα κατάντη του PMU, δηλαδή θα ισχύει:

$$R_c = R_2 + \frac{\alpha}{2B_c} \quad (3-47)$$

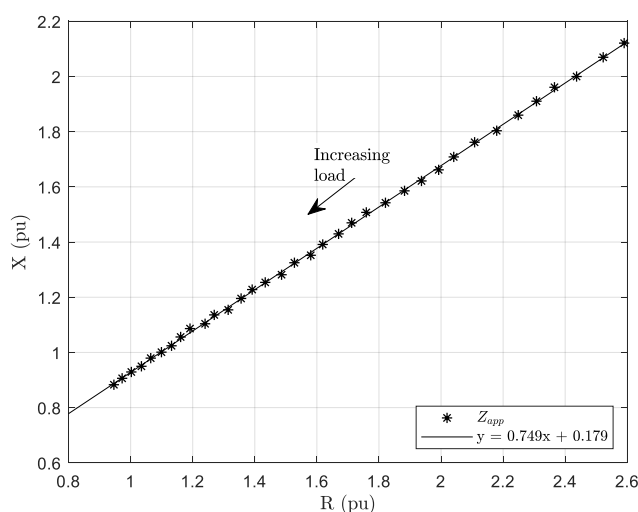
$$X_c = X_2 - \frac{1}{2B_c} \quad (3-48)$$

Εάν το κέντρο και η ακτίνα του μετρούμενου από το PMU κύκλου είναι γνωστά, τότε μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι R_2 , X_2 , B_c από τις σχέσεις (3-46)-(3-48) δεδομένου ότι είναι επίσης γνωστός ο λόγος $\lambda=R_2/X_2$ όπως και στην περίπτωση του μη αντισταθμισμένου φορτίου. Η συμπερίληψη του θορύβου μετρήσεων υλοποιείται και στη συγκεκριμένη περίπτωση με τον ίδιο τρόπο όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά τώρα η εκτίμηση δίνει κύκλο αντί ευθείας.

3.4.3 Εφαρμογή με μη αντισταθμισμένο φορτίο

Οι δοκιμές της παρούσας και της επόμενης ενότητας πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας [Σεκ19]. Για το δίκτυο του σχήματος 3-11 με $B_c=0$ γίνεται χρήση των παραμέτρων της ενότητας 3.3, με τη διαφορά ότι ο συντελεστής ισχύος του φορτίου επιλέγεται 0,8 επαγωγικός. Το κατώφλι κ της σχέσης (3-40) επιλέγεται ίσο με 0,025 αμ, ενώ τα χαρακτηριστικά του θορύβου μετρήσεων έχουν παρθεί από τον πίνακα 3-2. Για τις ανάγκες της εφαρμογής, η αγωγιμότητα G_L μεταβάλλεται από 0,2 έως 1,2 αμ με σταθερά βήματα 0,01 αμ και καταγράφονται μετρήσεις Z βάσει της σχέσης (3-40) καταστρώνοντας το σύστημα εξισώσεων (3-41).

Από δοκιμές παρατηρήθηκε ότι για τουλάχιστον $N=35$ δείγματα, η ακρίβεια της γραμμικής παρεμβολής επί της τροχιάς των μετρήσεων επιτυγχάνει σφάλμα εκτίμησης του συντελεστή ισχύος φορτίου μικρότερο από 0,1%, ενώ για λιγότερα από 25 δείγματα το σφάλμα υπερβαίνει το 0,5%. Στο σχήμα 3-14 απεικονίζεται η τροχιά των μετρήσεων Z στο επίπεδο RX , μαζί με τη βέλτιστη εκτίμηση για τον συντελεστή ισχύος με βάση το κριτήριο των ελαχίστων τετραγώνων.



Σχήμα 3-14 Μετρούμενη σύνθετη αντίσταση και εκτίμηση συντελεστή ισχύος φορτίου για $N=35$

Για την εκτίμηση των παραμέτρων δικτύου επιλέγονται τρεις εκτιμήσεις του λόγου λ , η πραγματική 0,15, καθώς και δύο προσεγγίσεις, μία υποεκτίμηση και μία υπερεκτίμηση. Στον πίνακα 3-5 παρατίθενται οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του κατάντη δικτύου, καθώς και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα.

Πίνακας 3-5 Παράμετροι Ακτινικού Δικτύου

λ	ΣΙ	X_2 (αμ)	R_2 (αμ)	$\Delta X_2 / X_2$ %	$\Delta R_2 / R_2$ %
0.10	0.8005	0.1937	0.0194	-3.138	-35.43
0.15	0.8005	0.2019	0.0303	0.947	0.947
0.20	0.8005	0.2108	0.0422	5.392	40.523

Από τα παραπάνω μπορεί να παρατηρηθεί ότι η εκτίμηση του συντελεστή ισχύος είναι αρκετά ακριβής και δεν επηρεάζεται από την εκτίμηση του λόγου λ . Κάτι τέτοιο όμως δεν ισχύει για την εκτίμηση των

παραμέτρων, και ειδικά της ωμικής αντίστασης R_2 , καθώς το σφάλμα εκτίμησης της ωμικής αντίστασης αυξάνει αντίστοιχα με το σφάλμα εκτίμησης του λόγου λ ($\pm 33\%$).

3.4.4 Εφαρμογή με αντισταθμισμένο φορτίο

Το αριθμητικό παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας επαναλαμβάνεται με τη διαφορά ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται σταθερή αντιστάθμιση $B_c = 0,1$ αμ συνδεδεμένη παράλληλα με το φορτίο. Όταν απουσιάζει ο θόρυβος από τις μετρήσεις, τα ακριβή χαρακτηριστικά του κύκλου προκύπτουν από τις σχέσεις (3-47) και (3-48) και παρουσιάζονται στον πίνακα 3-6:

Πίνακας 3-6 Κέντρο και ακτίνα τροχιάς μετρήσεων για $B_c=0.1$ αμ χωρίς θόρυβο μετρήσεων

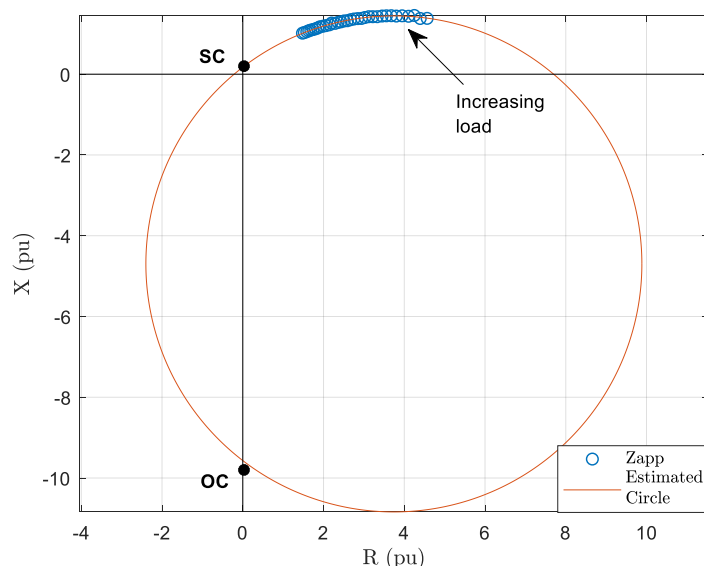
Ακτίνα	R_c	X_c
6.25	3.78	-4.8

Στην περίπτωση που συμπεριλαμβάνεται θόρυβος μετρήσεων ίδιων χαρακτηριστικών με της προηγούμενης ενότητας (βλ. πίνακα 3-1), τότε η τροχιά της σύνθετης αντίστασης μπορεί να εκτιμηθεί προσεγγιστικά από κύκλο [Pra87]. Ο πίνακας 3-7 περιέχει τις εκτιμήσεις του κύκλου και τα αντίστοιχα σφάλματα. Πρακτικά παρατηρείται ότι το σφάλμα της εκτίμησης του κύκλου δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των μετρήσεων, αρκεί αυτές να βρίσκονται σε ένα εύλογο εύρος.

Πίνακας 3-7 Εκτιμήσεις κύκλου και σφάλματα για $\lambda=0,15$ με παρουσία θορύβου μετρήσεων

N	Ακτίνα	R_c	X_c	Σφάλμα ακτίνας%	R_c σφάλμα %	X_c σφάλμα%
25	5.841	3.726	-4.395	-6.539	-1.419	-8.436
35	6.142	3.742	-4.698	-1.723	-0.995	-2.129
45	6.140	3.742	-4.695	-1.762	-0.997	-2.180

Στο σχήμα 3-15 απεικονίζεται ο εκτιμώμενος κύκλος της τροχιάς των μετρούμενων από το PMU σύνθετων αντιστάσεων Z_k για $N=35$ μετρήσεις. Πέραν των σημείων που βρίσκονται στο πρώτο τεταρτημόριο, εμφανίζονται δύο ακόμη, ένα που αντιστοιχεί σε συνθήκες ανοιχτοκυκλώματος $G_L = 0$ (OC) και ένα που αντιστοιχεί σε συνθήκες βραχυκυκλώματος (SC).



Σχήμα 3-15 Τροχιά Z και εκτιμώμενος κύκλος

Στον πίνακα 3-8 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του κατάντη δικτύου για την περίπτωση $B_c=0,1$ αμ θεωρώντας τις ίδιες εκτιμήσεις της παραμέτρου λ με την προηγούμενη ενότητα.

Πίνακας 3-8 Εκτιμήσεις κύκλου και σφάλματα για τρεις εκτιμήσεις του $\lambda=R_2/X_2$

λ	ΣΙ	B_c (αμ)	X_2 (αμ)	R_2 (αμ)	Σφάλμα ΣΙ (%)	Σφάλμα B_c (%)	Σφάλμα X_2 (%)	Σφάλμα R_2 (%)
0.1	0.795	0.102	0.187	0.019	-0.59	2.357	-6.463	-37.642
0.15	0.797	0.102	0.195	0.029	-0.426	2.189	-2.448	-2.448
0.20	0.798	0.102	0.204	0.041	-0.249	2.008	1.903	35.871

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση του μη αντισταθμισμένου φορτίου, τα σφάλματα στην ανίχνευση της παραμέτρου R_2 φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντική ευαισθησία στην επιλογή της παραμέτρου λ . Κάτι τέτοιο μπορεί εν μέρει να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η παράμετρος R_2 είναι τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους μικρότερη από τις υπόλοιπες παραμέτρους.

3.5 Εκτίμηση περιθωρίου ασφαλείας από τοπικές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται επίσης μία τοπική μέθοδος εκτίμησης του περιθωρίου ευστάθειας τάσης. Η μέθοδος βασίζεται σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος από ένα PMU που συνδέεται σε ζυγό του συστήματος μεταφοράς και προβαίνει σε εκτίμηση του σημείου μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που διέρχεται από έναν συνοριακό ζυγό άφιξης ενός διαδρόμου ισχύος. Σημειώνεται ότι ο ζυγός στον οποίο συνδέεται το PMU θεωρείται συνοριακός ζυγός μίας περιοχής κατανάλωσης, κατά αντιστοιχία με την περιοχή A του σχήματος 2-8.

Η μέθοδος εκμεταλλεύεται τις διαθέσιμες μετρήσεις ενεργού ισχύος στον συνοριακό ζυγό άφιξης από τις γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς που προσπίπτουν στον ζυγό και φαινόμενης από τον ζυγό ωμικής αγωγιμότητας. Η μέθοδος εκτίμησης βασίζεται σε πολυωνυμική παρεμβολή με σκοπό τον εντοπισμό του σημείου όπου η μετρούμενη ισχύς μεγιστοποιείται. Η ισχύς θεωρείται πολυωνυμική συνάρτηση της μετρούμενης φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G .

Το εκτιμώμενο σημείο μέγιστης ισχύος άφιξης στον ζυγό προσεγγίζει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να διοχετευτεί από τον συνοριακό ζυγό προς την ευάλωτη περιοχή. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι τέτοια ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί αυτόνομα σε κάθε συνοριακό ζυγό, εκτιμώντας τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ δια μέσου του εκάστοτε συνοριακού ζυγού.

Θεωρούνται διαθέσιμα τρία διαδοχικά ζευγάρια μετρήσεων ενεργού ισχύος άφιξης και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας σε έναν συνοριακό ζυγό άφιξης:

$$[G_0, P_0] = [G_f(t_{k-2}), P_f(t_{k-2})] \quad (3-49)$$

$$[G_1, P_1] = [G_f(t_{k-1}), P_f(t_{k-1})] \quad (3-50)$$

$$[G_2, P_2] = [G_f(t_k), P_f(t_k)] \quad (3-51)$$

όπου με δείκτη f η DC συνιστώσα του STFT και t_{k-2} , t_{k-1} , t_k , οι χρονικές στιγμές υπολογισμού των STFT. Για τα τρία ζεύγη μετρήσεων (3-49) - (3-51) έχουν υπολογιστεί δύο διαδοχικοί δείκτες NLI_{k-1} και NLI_k . Θεωρούμε ικανοποιούνται οι συνθήκες (3-12), (3-14) και (3-16), οι οποίες επαναλαμβάνονται για διευκόλυνση:

$$\frac{\Delta \bar{G}_{f,i}(t_k)}{\bar{G}_{f,i}(t_{k-1})} > \varepsilon$$

$$\frac{\Delta \bar{P}_{f,i}(t_k)}{\bar{P}_{f,i}(t_{k-1})} < \Delta P_{NLI,max}$$

$$\frac{|\Delta \bar{P}_{f,i}(t_k)|}{\bar{P}_{f,i}(t_{k-1})} < \zeta$$

δεδομένου ότι αυτές είναι οι προϋποθέσεις για υπολογισμό του δείκτη NLI τις χρονικές στιγμές t_{k-1} , t_k . Εάν επιπλέον ισχύει:

$$NLI_k - NLI_{k-1} < 0 \quad (3-52)$$

δηλαδή μείωση του αντίστοιχου δείκτη NLI , τότε η μέθοδος θεωρεί ότι η περιοχή προς τα κατάντη του συνοριακού ζυγού άφιξης τείνει να φτάσει σε σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και κατασκευάζει πολυώνυμο παρεμβολής με βάση τα τρία πιο πρόσφατα διαθέσιμα ζευγάρια τιμών $[G_{k-2}, P_{k-2}] - [G_k, P_k]$.

Το πολυώνυμο παρεμβολής κατασκευάζεται στον χώρο $G - P$ και εξαιτίας της σχέσης (3-52) εμφανίζει τα κοίλα προς τα κάτω, δηλαδή παρουσιάζει μέγιστη τιμή για τιμή $G > G_k$. Η συνάρτηση παρεμβολής είναι ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού που κατασκευάζεται με τον κανόνα του Lagrange [BF04] τη χρονική στιγμή t_k ως εξής:

$$p_k(G) = \sum_{j=0}^2 P_j L_{2,j}(G) \quad (3-53)$$

όπου η συνάρτηση $L_{2,j}(G)$ είναι το πολυώνυμο δευτέρου βαθμού που αντιστοιχεί στο ζευγάρι $[G_j, P_j]$ και έχει την ιδιότητα $L_{2,j}(G_i) = 0$ εάν $i \neq j$ και $L_{2,j}(G_i) = 1$ όταν $i = j$. Στη γενική περίπτωση ενός πολυωνύμου παρεμβολής βαθμού n (που αντιστοιχεί σε $n+1$ ζευγάρια μετρήσεων $[G_0, P_0] - [G_n, P_n]$) η μορφή του πολυωνύμου παρεμβολής θα είναι η εξής:

$$L_{n,j}(G) = \frac{[G - G_0] \dots [G - G_{j-1}][G - G_{j+1}] \dots [G - G_n]}{[G_j - G_0] \dots [G_j - G_{j-1}][G_j - G_{j+1}] \dots [G_j - G_n]} \quad (3-54)$$

Η μέγιστη τιμή που προκύπτει από το πολυώνυμο παρεμβολής $p_k(G)$ μπορεί να θεωρηθεί ως μία εκτίμηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος δια μέσω του συνοριακού ζυγού άφιξης στον οποίο είναι εγκατεστημένο το PMU:

$$\hat{P}(t_k) = \max p_k(G) \quad (3-55)$$

Με βάση τα παραπάνω, το εκτιμώμενο περιθώριο ευστάθειας τάσης P_M τη χρονική στιγμή t_k μπορεί να υπολογιστεί με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$P_M(t_k) = \hat{P}(t_k) - P_f(t_k) \quad (3-56)$$

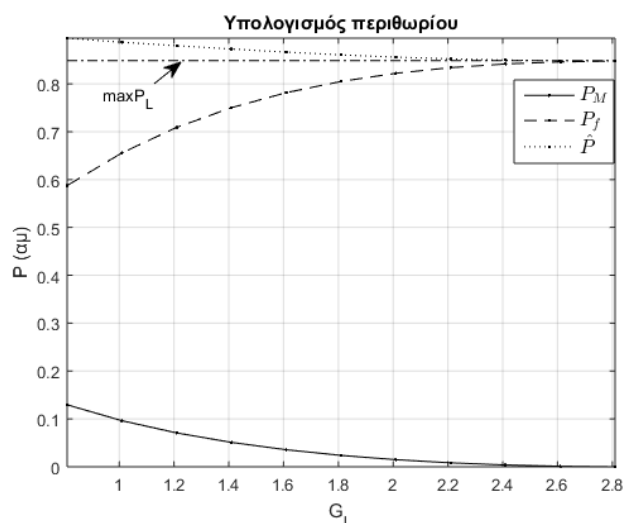
δηλαδή ισούται με τη διαφορά της εκτιμώμενης μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος $\hat{P}(t_k)$ από την τρέχουσα τιμή της εισερχόμενης ισχύος $P_f(t_k)$. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για την περίπτωση του ακτινικού δικτύου του σχήματος 3-6, ενώ στο κεφάλαιο 4 η μέθοδος δοκιμάζεται στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic.

3.5.1 Αριθμητικά αποτελέσματα σε ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες

Για τη δοκιμή της μεθόδου εκτίμησης περιθωρίου στην περίπτωση του ακτινικού δικτύου του σχήματος 3-6 με $R_2=0$ και παραμέτρων βάσει των πινάκων 3-1 έως 3-4, επαναλαμβάνεται η προσομοίωση της ενότητας 3.3.1. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 3-7, η πορεία του NLI είναι πτωτική καθ'όλη τη διάρκεια αύξησης της παραμέτρου G_L . Συνεπώς, ισχύει η σχέση (3-52) και είναι δυνατοί οι διαδοχικοί υπολογισμούς του περιθωρίου P_M με κάθε νέο υπολογισμό του NLI .

Το σχήμα 3-16 παρουσιάζει την αλληλουχία των εκτιμήσεων του περιθωρίου ευστάθειας P_M καθώς η αγωγιμότητα φορτίου G_L αυξάνεται με σταθερό βήμα 0,01 αμ. Υπενθυμίζεται ότι στην περίπτωση όπου $R_2=0$ προκύπτει $G_{L,maxP}=2,857$ αμ. Στο σχήμα 3-16 απεικονίζονται τα μεγέθη της ισχύος P_f κατόπιν εφαρμογής

φίλτρου STFT, η εκτιμώμενη από τη συνάρτηση (3-53) μέγιστη ενεργός ισχύς $\hat{P}$ καθώς και το υπολογιζόμενο περιθώριο P_M βάσει της σχέσης (3-56).

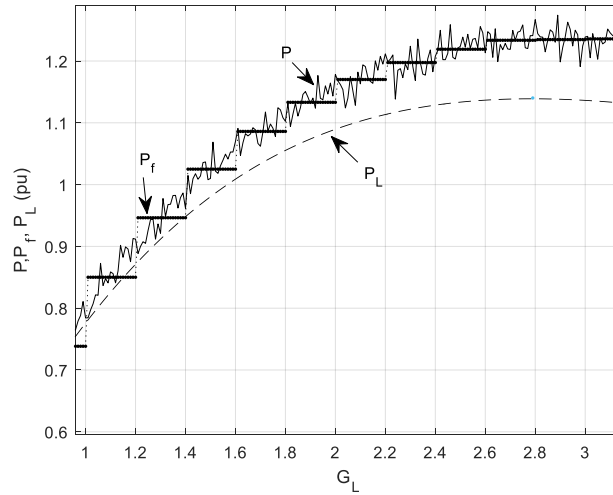


Σχήμα 3-16 Αποκρίσεις $\hat{P}$, P_f , και περιθώριου P_M σε ακτινικό δίκτυο χωρίς συμπερίληψη απωλειών

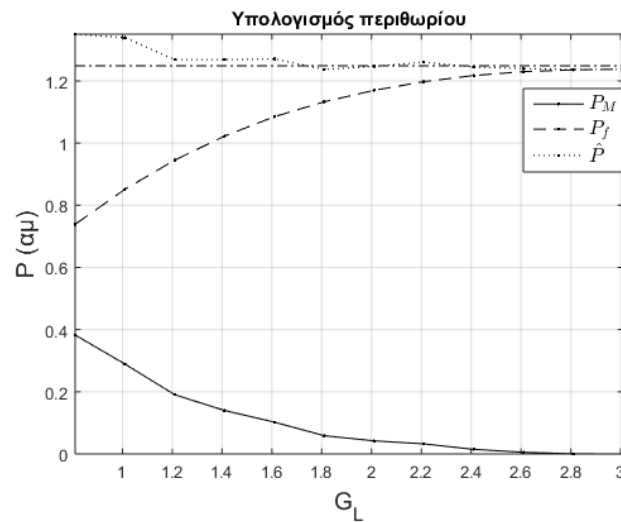
Από το σχήμα 3-16 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η συνάρτηση (3-53) υπερεκτιμά ελαφρά τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποσταλεί από το σύστημα, αλλά το σφάλμα πρόβλεψης βαίνει μειούμενο καθώς το σύστημα οδηγείται προς το πραγματικό σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι προκύπτει λόγω των μεγαλύτερων μεταβολών ισχύος και αγωγιμότητας, τα οποία προσδίδουν μεγαλύτερη καμπυλότητα στο πολυώνυμο παρεμβολής. Τονίζεται ωστόσο, ότι στα συγκεκριμένα αποτελέσματα το σύστημα βρίσκεται σε οιονεί στατική κατάσταση, ενώ επίσης αμελείται και ο θόρυβος μετρήσεων.

3.5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα σε ακτινικό δίκτυο με απώλειες και θόρυβο μετρήσεων

Το παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας επαναλαμβάνεται λαμβάνοντας υπόψιν τις απώλειες και τον θόρυβο μετρήσεων με βάση τις παραμέτρους των πινάκων 3-1 έως 3-4, κατά αντιστοιχία με την ενότητα 3.3.4. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός του περιθωρίου επηρεάζεται, διότι όπως είχε επισημανθεί στην ενότητα 3.3.4 και στο σχήμα 3-9, τα μεγέθη ισχύος και αγωγιμότητας παρουσιάζουν κυμάτωση καθώς υπολογίζονται από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος, οι οποίες περιέχουν θόρυβο. Ωστόσο, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στο σχήμα 3-17, η χρήση του μετασχηματισμού STFT βοηθάει στην απομείωση της επίδρασης του θορύβου. Στο σχήμα 3-18 παρουσιάζεται η απόκριση της ισχύος P και της φιλτραρισμένης ισχύος P_f , ενώ για λόγους πληρότητας συμπεριλαμβάνεται και η ισχύς φορτίου P_L όπου και παρατηρείται ότι το ανακατασκευασμένο σήμα P_f απορρίπτει το αρμονικό περιεχόμενο του υπολογιζόμενου από τις μετρήσεις μεγέθους P και παρακολουθεί τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του μεγέθους.



Σχήμα 3-17 Ακτινικό δίκτυο με απώλειες: P_L , P και P_f συναρτήσει G_L



Σχήμα 3-18 Αποκρίσεις $\hat{P}$, P_f , και περιθωρίου P_M ακτινικό δίκτυο με απώλειες και θόρυβο μετρήσεων

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι υπολογισμοί των περιθωρίων πραγματοποιούνται από αρκετά μικρότερη τιμή ζήτησης σε σχέση με την τιμή $G_{L,maxP}$ λόγω της πτωτικής πορείας του NLI (βλ. σχήμα 3-9). Συγκρίνοντας τα σχήματα 3-16 και 3-18 είναι εμφανές ότι υπάρχει περισσότερη διακύμανση στη συμπεριφορά του περιθωρίου P_M , ωστόσο η πρόβλεψη δείχνει μία σαφή τάση για σύγκλιση προς την μέγιστη ισχύ. Συνεπώς, η μέθοδος εκτίμησης περιθωρίου καταφέρνει και στην περίπτωση ακτινικού δικτύου με απώλειες και θόρυβο μετρήσεων να αναγνωρίσει την μέγιστη ισχύ που καταναλώνει το ακτινικό σύστημα του σχήματος 3-6.

4 ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ IEEE NORDIC

Το σύστημα στο οποίο διεξάγονται προσομοιώσεις σε αυτό το κεφάλαιο είναι ένα πρότυπο σύστημα δοκιμών της IEEE για ανάλυση ευστάθειας τάσης και ονομάζεται IEEE Nordic Test System [TF15]. Τα αναλυτικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του εν λόγω συστήματος είναι διαθέσιμα ηλεκτρονικά στην ιστοσελίδα της επιτροπής IEEE PSDP [Psd15].

Για την προσομοίωση του συστήματος Nordic στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έχουν χρησιμοποιηθεί τρία λογισμικά προσομοίωσης ΣΗΕ, ενώ το υπολογιστικό πακέτο της MATLAB έχει χρησιμοποιηθεί για δευτερογενή επεξεργασία αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις.

Το λογισμικό ΣΗΕ που έχει χρησιμοποιηθεί εκτενέστερα στην εργασία ονομάζεται RAMSES. Το συγκεκριμένο λογισμικό έχει αναπτυχθεί στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης και περιγράφεται πιο διεξοδικά στην εργασία [AFV14]. Το λογισμικό υλοποιεί προσομοίωση λαμβάνοντας υπόψη τη βραχυπρόθεσμη, όσο και τη μακροπρόθεσμη δυναμική. Έτσι ελέγχεται η δυνατότητα των μεθόδων ανίχνευσης να φιλτράρουν τα ταχύτερα δυναμικά φαινόμενα, όπως π.χ. αυτά των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

Επιπρόσθετα, προσομοιώσεις έχουν διεξαχθεί και στο λογισμικό WPSTAB, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο ΣΗΕ του ΕΜΠ [Βου99] και έχει περιγραφεί λεπτομερώς στην εργασία [Λαμ17]. Το λογισμικό WPSTAB υλοποιεί προσομοίωση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα με οιονεί στατική προσέγγιση και η βασική αιτία που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου είναι ο υπολογισμός του σημείου εμφάνισης αστάθειας τάσης στα σενάρια προσομοίωσης που εξετάστηκαν, μέσω παρακολούθησης της κρίσιμης ιδιοτιμής του μακροπρόθεσμου πίνακα κατάστασης του συστήματος [VCV98].

Τέλος, έχει χρησιμοποιηθεί και το εμπορικό λογισμικό PowerFactory της εταιρείας DigSilent το οποίο πέραν της δυνατότητας προσομοίωσης με το δίκτυο σε οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση συμπεριλαμβάνοντας βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες δυναμικές, περιλαμβάνει και μοντέλα ηλεκτρονόμων αποστάσεως, που χρησιμοποιούνται στην εργασία στα πλαίσια αποτίμησης της δυνατότητας του δείκτη RLI να αποτρέψει τυχόν ανεπιθύμητες ενεργοποιήσεις τρίτης ζώνης προστασίας ηλεκτρονόμων.

4.1 Περιγραφή συστήματος δοκιμών Nordic

Το σύστημα Nordic είναι απλοποιημένη απεικόνιση του πραγματικού Σκανδιναβικού ΣΗΕ και αποτελείται από 74 ζυγούς συνολικά, εκ των οποίων οι 32 είναι ζυγοί YYT και YT, 22 ζυγοί αφορούν διανομή MT, ενώ οι υπόλοιποι 20 είναι ζυγοί γεννητριών. Υπάρχουν 102 κλάδοι εκ των οποίων οι 22 είναι μετασχηματιστές ισχύος με ΣΑΤΥΦ και 20 είναι μετασχηματιστές ανύψωσης γεννητριών. Αναλυτικές τιμές των παραμέτρων μπορούν να βρεθούν στο [TF15]. Το μονογραμμικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4-1.

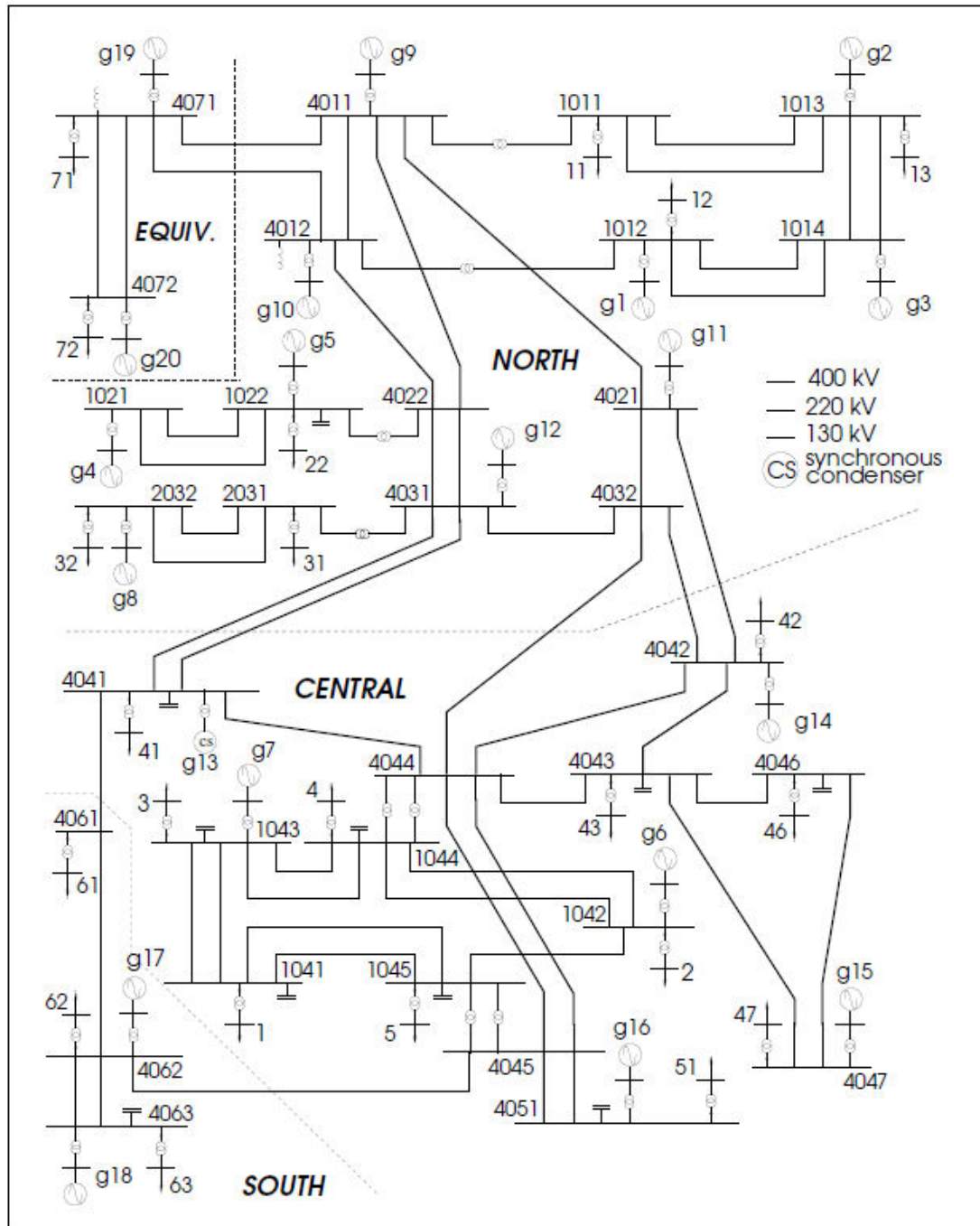
Όπως περιγράφεται και στο [TF15] το σύστημα μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις διακριτές περιοχές με τα εξής επί μέρους χαρακτηριστικά:

- Βόρεια περιοχή: Αποτελεί την κύρια περιοχή παραγωγής του συστήματος με υδροηλεκτρικούς κυρίως σταθμούς.
- Κεντρική περιοχή: Αποτελεί την κύρια περιοχή φορτίου στην οποία υπάρχουν και ορισμένες θερμικές μονάδες.
- Νότια περιοχή: Περιέχει ένα μικρό ποσοστό παραγωγής με θερμικούς σταθμούς.
- Εξωτερική περιοχή: Αποτελεί ένα απλοποιημένο ισοδύναμο του εξωτερικού συστήματος που συνδέεται με τη βόρεια περιοχή.

Επειδή οι κυρίως καταναλώσεις βρίσκονται στην κεντρική περιοχή, υπάρχουν μεγάλες ροές ισχύος από τη βόρεια προς την κεντρική περιοχή του συστήματος. Με βάση την ανάλυση που περιλαμβάνεται στο [TF15], στο εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας A (το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια) το σύστημα εμφανίζει

μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης σε κατάσταση $N-1$ που αφορά απώλεια κυκλώματος του διαδρόμου μεταφοράς ισχύος.

Οι μονάδες που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή παίζουν σημαντικό ρόλο στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να μεταφερθεί προς την κεντρική περιοχή και για τον λόγο αυτό ρυθμίζονται έτσι ώστε οι τάσεις στην κεντρική περιοχή να είναι ελαφρά πιο υψηλές από αυτές των άλλων περιοχών, προκειμένου να ενισχύεται η ικανότητα μεταφοράς ισχύος προς την κεντρική περιοχή.



Σχήμα 4-1 Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος δοκιμών IEEE Nordic Test System

Καθοριστική σημασία στη διαμόρφωση συνθηκών αστάθειας τάσης έχουν τόσο τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών στην κεντρική και βόρεια περιοχή όσο και τα ΣΑΤΥΦ με τα οποία είναι εξοπλισμένοι όλοι οι μετασχηματιστές των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ τείνοντας να επαναφέρουν την κατανάλωση των φορτίων στα προ της διαταραχής επίπεδα. Ο πίνακας 4-1 παραθέτει τις χρησιμοποιούμενες καθυστερήσεις των ΣΑΤΥΦ για την πρώτη και μετέπειτα αλλαγή λήψης αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι

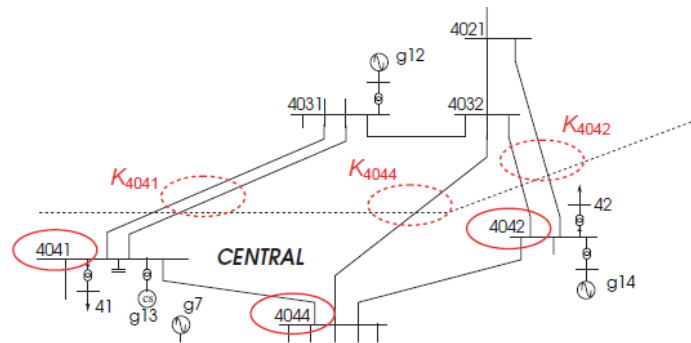
χρονικές καθυστερήσεις είναι διαφορετικές μεταξύ τους για να αποφεύγεται ο τεχνητός ταυτοχρονισμός των δράσεων των ΣΑΤΥΦ κατά την προσομοίωση, η οποία καθίσταται έτσι πιο ρεαλιστική.

Πίνακας 4-1 Χρονικές καθυστερήσεις ΣΑΤΥΦ

Μ/Σ	Καθυστερήσεις	
	τ_1 (s)	τ_2 (s)
11-1011	30	8
12-1012	30	9
13-1013	30	10
22-1022	30	11
1-1041	29	12
2-1042	29	8
3-1043	29	9
4-1044	29	10
5-1045	29	11
31-2031	29	12
32-2032	31	8
41-4041	31	9
42-4042	31	10
43-4043	31	11
46-4046	31	12
47-4047	30	8
51-4051	30	9
61-4061	30	10
62-4062	30	11
63-4063	30	12
71-4071	31	9
72-4072	31	11

Με βάση το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος, είναι δυνατόν να οριστεί ένας διάδρομος μεταφοράς από τη βόρεια προς την κεντρική περιοχή, ο οποίος αποτελείται από πέντε γραμμές μεταφοράς, τρεις συνοριακούς ζυγούς αναχώρησης (4021, 4031, 4032) και τρεις συνοριακούς ζυγούς άφιξης (4041, 4042, 4044).

Γίνεται η υπόθεση ότι σε κάθε έναν από τους συνοριακούς ζυγούς άφιξης είναι εγκατεστημένο ένα PMU για τις απαραίτητες μετρήσεις τάσης και ρευμάτων ώστε να μπορέσουν να υπολογιστούν τα μεγέθη της ενεργού ισχύος άφιξης και της φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας που απαιτούνται για τους υπολογισμούς του δείκτη *NLI*. Στις αντίστοιχες προσομοιώσεις που εξετάζουν τον δείκτη αστάθειας *RLI* θεωρείται ότι υπάρχει ηλεκτρονόμος αποστάσεως σε κάθε άκρο των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς, ώστε να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός του *RLI* κάθε γραμμής του διαδρόμου.



Σχήμα 4-2 Συνοριακοί ζυγοί άφιξης, σύνολα διαχωρισμού

Στο σχήμα 4-2 φαίνονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι συνοριακοί ζυγοί άφιξης με τα αντίστοιχα σύνολα διαχωρισμού που αφορούν τον διάδρομο ισχύος από τη βόρεια περιοχή στην κεντρική. Για τον υπολογισμό των ισοδύναμων ρευμάτων άφιξης προκύπτουν όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 (ενότητα 2.4.1) τα ακόλουθα σύνολα συνδεδεμένων ζυγών για κάθε ζυγό άφιξης:

$$K_{4041} = \{4031\} \quad (4-1)$$

$$K_{4042} = \{4021, 4032\} \quad (4-2)$$

$$K_{4044} = \{4032\} \quad (4-3)$$

Για τον υπολογισμό του ρεύματος άφιξης σε κάθε συνοριακό ζυγό άφιξης i συμπεριλαμβάνεται κάθε ζυγός του αντίστοιχου συνόλου K_i . Η αντίστοιχη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα κάθε ζυγού άφιξης μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύει το φορτίο που βλέπει ο κάθε ζυγός άφιξης, συμπεριλαμβάνοντας και τις απώλειες του συστήματος μετά τον ζυγό μέτρησης και μέχρι τις καταναλώσεις, ενώ οι παραγωγές θεωρούνται ως αρνητικά φορτία.

Το σύστημα IEEE Nordic εμφανίζει διάφορες μορφές αστάθειας όπως π.χ. αστάθεια γωνίας για περιπτώσεις βραχυκυκλωμάτων σε συγκεκριμένους ζυγούς του συστήματος, ωστόσο διαταραχές που συνεπάγονται αστάθεια διαφορετικής μορφής από τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης δεν αφορούν τους σκοπούς της διατριβής. Στο παρόν παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων με αφετηρία δύο σημεία λειτουργίας που αναφέρονται διεξοδικά στο [TF15].

Το πρώτο αρχικό σημείο λειτουργίας αναφέρεται ως *σημείο Α* στο οποίο μία διαταραχή απώλειας κυκλώματος στον διάδρομο ισχύος βόρειας-κεντρικής περιοχής οδηγεί σε μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης και κατάρρευση. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν η απώλεια του κυκλώματος γίνεται μετά από προσομοιούμενο βραχυκύκλωμα και ακόλουθη εκκαθάριση με απομόνωση από τους ηλεκτρονόμους αποστάσεως στα δύο άκρα του κυκλώματος.

Το δεύτερο αρχικό σημείο λειτουργίας αναφέρεται ως *σημείο Β* και χρησιμοποιείται για να εξεταστεί η ορθή λειτουργία των δεικτών ανίχνευσης αστάθειας *NLI* και *RLI* σε διαταραχές για τις οποίες το σύστημα είναι ασφαλές. Οι αντίστοιχες απώλειες κυκλωμάτων στον διάδρομο ισχύος οδηγούν σε οριακά ευσταθείς αποκρίσεις και επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας.. Πιο συγκεκριμένα, το σημείο *Β* αποτελεί παρόμοιο αρχικό σημείο λειτουργίας με το *Α*, με τη διαφορά ότι έχουν θεωρηθεί ορισμένες τροποποιήσεις στο σχήμα παραγωγής που ενισχύουν ελαφρώς το σύστημα, ώστε να αποφευχθεί οριακά η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Οι τροποποιήσεις είναι οι εξής:

- Μία δεύτερη γεννήτρια τοποθετείται παράλληλα στη γεννήτρια g16 με όμοιο μετασχηματιστή ανύψωσης. Το γεγονός αυτό προκαλεί μείωση της αρχικής συνολικής εισαγωγής ισχύος της κεντρικής περιοχής και παράλληλη προσαρμογή της παραγωγής του ζυγού ταλάντωσης.

- Τα δύο σύνολα των γεννητριών g15 και g18 συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων μετασχηματιστών ανύψωσης διαιρούνται σε δύο υποσύνολα με στοιχεία μισής ονομαστικής ισχύος.

Τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών διανομής ελέγχουν τις τάσεις διανομής ώστε αυτές να παραμένουν εντός του εύρους 0.99 έως 1.01 αμ, ενώ τα φορτία αναπαρίστανται με στατικό μοντέλο εκθετικού τύπου:

$$\begin{aligned} P &= zP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \\ Q &= zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \end{aligned} \quad (4-4)$$

όπου έχουν τεθεί οι τιμές $\alpha=1$ για την ενεργό κατανάλωση και $\beta=2$ για την άεργο σε όλα τα φορτία.

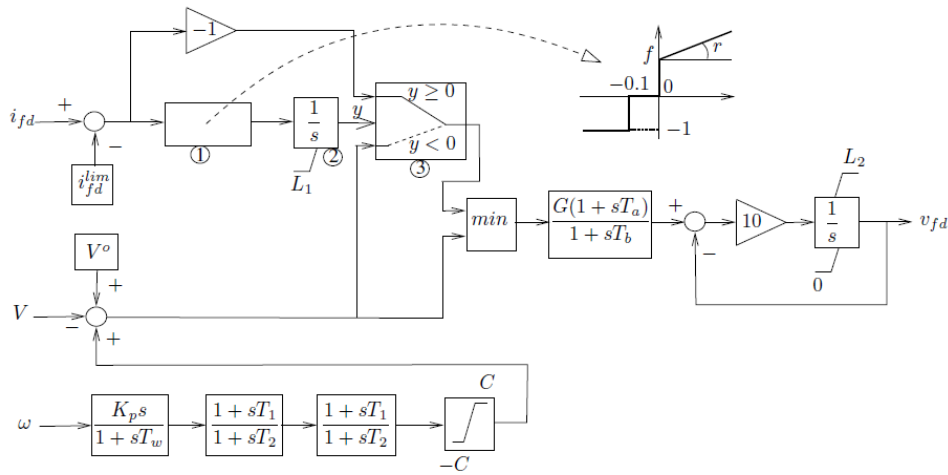
Οι γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα αναπαρίστανται στο λογισμικό RAMSES με μοντέλο 6^{ης} τάξης που περιλαμβάνει δύο τυλίγματα απόσβεσης στον άξονα q , ενώ οι αντίστοιχες εκτύπων πόλων με μοντέλο 5^{ης} τάξης. Σε όλες τις σύγχρονες μηχανές έχει μοντελοποιηθεί κορεσμός με συντελεστή κορεσμού k ίσο με:

$$k = 1 + m(V_{nl})^n \quad (4-5)$$

όπου με V_{nl} συμβολίζεται η τάση ανοιχτοκύκλωσης σε δεδομένο ρεύμα διέγερσης i_{fd} και γίνονται οι εξής θεωρήσεις:

- Για $V_{nl}=1$ αμ είναι $k=1,1$ και προκύπτει $m=1,1$.
- Για $V_{nl}=1,2$ αμ είναι $k=1,3$ και προκύπτει $n=6,0257$.
- Αντίδραση σκέδασης $X_f=0,15$ αμ για τον ευθύ και εγκάρσιο άξονα κάθε γεννήτριας.

Το μοντέλο του συστήματος διέγερσης και ρυθμιστή τάσης των μονάδων είναι κοινό και παρουσιάζεται στο σχήμα 4-3 περιέχοντας τόσο τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης, το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης και τον σταθεροποιητή συστήματος. Οι παράμετροι των μοντέλων διαφοροποιούνται ανάλογα με την κάθε μονάδα στο σύστημα όπως φαίνεται αναλυτικότερα στον πίνακα 4-2.



Σχήμα 4-3 Μοντέλο συστήματος διέγερσης, αυτόματου ρυθμιστή τάσης, σταθεροποιητή και σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης λογισμικού RAMSES

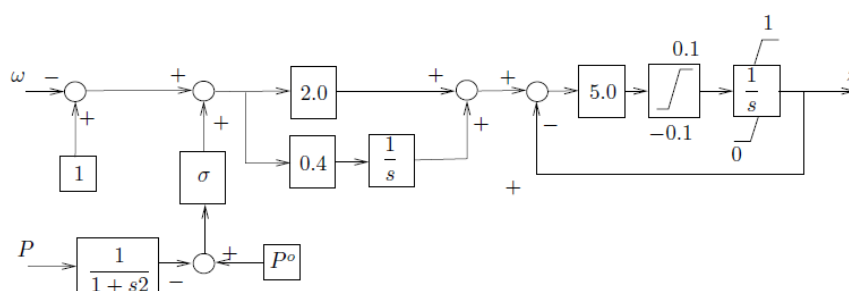
Η διεγέρτρια αναπαρίσταται από ένα πρώτης τάξης σύστημα με χρονική σταθερά 0,1s με άνω και κάτω όρια στον ολοκληρωτή, ενώ το υποσύστημα του αυτόματου ρυθμιστή τάσης εμπεριέχει μεταβατικό κέρδος. Ο πίνακας 4-2 περιέχει επίσης τα κέρδη K_p των σταθεροποιητών συστήματος των μονάδων. Όλες οι μονάδες του συστήματος είναι εξοπλισμένες με σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, ώστε να περιορίζεται το ρεύμα

διέγερσης σε τιμή 105% του ονομαστικού i_{fd}^{rated} . Ο περιορισμός γίνεται στις τέσσερις μικρότερες μονάδες με καμπύλη σταθερού χρόνου 20s (στήλη f) και στις υπόλοιπες με καμπύλη αντιστρόφου χρόνου (στήλη r).

Πίνακας 4-2 Παράμετροι συστήματος διέγερσης, αυτόματων ρυθμιστών τάσης, σταθεροποιητών και συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης

Μονάδα	i_{fd}^{lim} (αμ)	f	r	L_1	G (s)	T_a (s)	T_b (αμ)	L_2	K_p (s)	T_w (s)	T_1 (s)	T_2 (αμ)	C
g1,g2,g3	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g4	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	150	15	0.20	0.010	0.1
g5	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g6	3.0618	1	0	-20	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g7	3.0618	1	0	-20	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g8,g9,g10	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g11	1.8991	1	0	-20	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g12	1.8991	1	0	-20	70	10	20.0	4	75	15	0.20	0.010	0.1
g13	2.9579	0	1	-17	50	4	20.0	4	0				
g14	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g15,g16	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	75	15	0.22	0.012	0.1
g17,g18	3.0618	0	1	-18	120	5	12.5	5	150	15	0.22	0.012	0.1
g19,g20	1.8991	0	1	-11	70	10	20.0	4	0				

Στο σχήμα 4-4 παρουσιάζεται το μοντέλο του ρυθμιστή στροφών που χρησιμοποιείται για όλες τις υδροηλεκτρικές μονάδες στο σύστημα. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύστημα πρώτης τάξης για τον σερβομηχανισμό της υδατοθυρίδας, ενώ η μόνη παράμετρος που διαφέρει στις μονάδες είναι ο στατισμός σ . Σημειώνεται ότι η ρύθμιση της συχνότητας θεωρείται ότι γίνεται μόνο από τις υδροηλεκτρικές μονάδες στη βόρεια και στην εξωτερική περιοχή του συστήματος. Αυτό συνεπάγεται ότι για τις υπόλοιπες μονάδες χρησιμοποιείται μοντέλο σταθερής μηχανικής ισχύος και οι μονάδες δεν συμμετέχουν στη ρύθμιση της συχνότητας.



Σχήμα 4-4 Μοντέλο ρυθμιστή στροφών λογισμικού RAMSES

Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα έχουν υλοποιηθεί στα λογισμικά RAMSES, WPSTAB και DigSilent PowerFactory. Το μοντέλο του συστήματος Nordic για το λογισμικό PowerFactory έχει παρθεί από την πηγή [VSA15] και οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας [NMV18]. Λεπτομέρειες αναπαραγωγής των αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο λογισμικό PowerFactory δίνονται στο [OCL17].

Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας NLI και RLI καθώς και εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης αφορούν σε ανάλυση στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ο σκοπός της χρήσης προγραμμάτων πολλαπλών χρονικών κλιμάκων, με συμπερίληψη των βραχυπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος, είναι να αξιολογηθεί η επίδοση τόσο της τεχνικής φίλτρου με τη χρήση του μετασχηματισμού STFT, όσο και της μεθόδου εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης ενόσω στο σύστημα εμφανίζονται

βραχυπρόθεσμες δυναμικές και θόρυβος. Η ύπαρξη βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και θορύβου εισάγει σημαντικές δυσκολίες στις μεθόδους που έχουν παρουσιαστεί στις προηγούμενες ενότητες, οι οποίες αμελούνται σε περίπτωση προσομοιώσεων με το σύστημα σε οιονεί στατική κατάσταση. Εξάλλου, όπως παρουσιάστηκε και στην ενότητα 1.8, ένα βασικό μειονέκτημα πολλών μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης σχετίζεται με το γεγονός ότι αυτές έχουν ελεγχθεί με προσομοιώσεις που αμελούν τις βραχυπρόθεσμες ή και μακροπρόθεσμες δυναμικές.

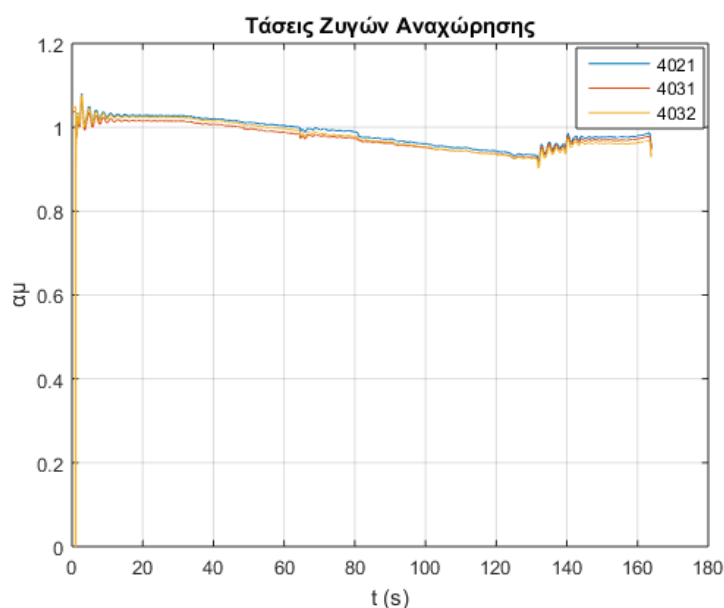
Σημειώνεται επίσης ότι το βήμα ολοκλήρωσης στο λογισμικό RAMSES είναι μεταβλητό, ωστόσο η δειγματοληψία όλων των μεταβλητών που ενδιαφέρουν την ανάλυση έχει τεθεί να εκτελείται κάθε 20ms.

4.2 Αξιολόγηση δείκτη NLI

4.2.1 Ανασφαλές σημείο λειτουργίας A: απώλεια γραμμής 4032-4044

Στην παρούσα ενότητα η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στο άκρο αναχώρησης της γραμμής 4032-4044 τη χρονική στιγμή $t=1s$, που εκκαθαρίζεται μετά από 100ms, ενώ στη συνέχεια η γραμμή αποσυνδέεται. Λόγω του βραχυκυκλώματος το σύστημα μετακινείται από το αρχικό σημείο ισορροπίας και στη συνέχεια ισορροπεί σε νέο βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας μετά την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων. Στη συνέχεια λόγω των μειωμένων τάσεων στη διανομή, ο μηχανισμός των ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται με σκοπό να τις επαναφέρει εντός νεκρής ζώνης, επαναφέροντας έμμεσα και την κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος στα προ διαταραχής επίπεδα και έτσι αρχίζει η μακροπρόθεσμη δυναμική συμπεριφορά.

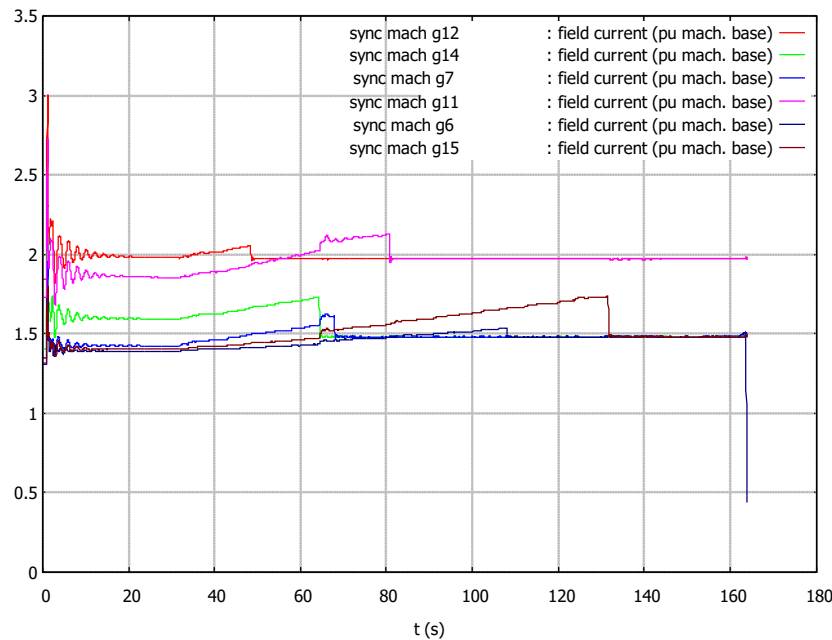
Στο σχήμα 4-5 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των μέτρων των τάσεων των συνοριακών ζυγών αναχώρησης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το σύστημα καταρρέει λίγο μετά τα 160s της προσομοίωσης. Κάτι αξιοσημείωτο είναι ότι οι τάσεις στο επίπεδο της μεταφοράς διατηρούνται σε επίπεδα πλησίον της ονομαστικής τους τιμής μέχρι την κατάρρευση.



Σχήμα 4-5 Σενάριο σημείου A: Τάσεις συνοριακών ζυγών αναχώρησης

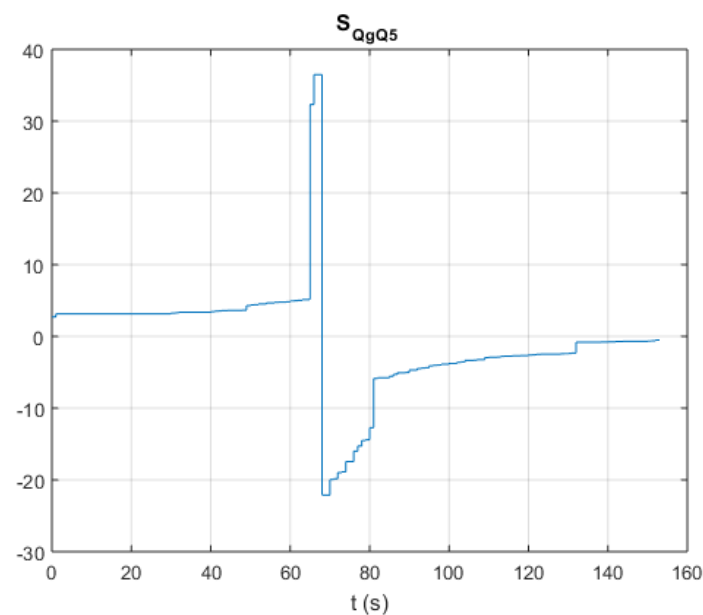
Η δράση των ΣΑΤΥΦ αυξάνει σταδιακά την ανάγκη παροχής αέργου ισχύος από τις μονάδες της βόρειας και κεντρικής περιοχής και κατ'επέκταση τα ρεύματα διέγερσης αυξάνουν, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 4-6. Σταδιακά, τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών g12, g14, g7, g11, g6, g15 και g16 ενεργοποιούνται επηρεάζοντας τη δυνατότητα στήριξης των τάσεων στο σύστημα. Στα [TF15] και [VLM17] υλοποιείται ανάλυση ευαισθησιών, και συγκεκριμένα υπολογίζεται η ευαισθησία της συνολικά παραγόμενης αέργου ισχύος από τις μονάδες του συστήματος ως προς την άεργο κατανάλωση διαφόρων φορτίων του συστήματος. Όπως έχει αναλυθεί στο [VCV08] και στα [GVC09a], [GVC09b], οι

ευαισθησίες αυξάνονται σταδιακά καθώς η τροχιά του συστήματος κατευθύνεται προς το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, ενώ καθώς το σύστημα διασχίζει το σημείο αυτό οι ευαισθησίες αλλάζουν πρόσημο μέσω απειρισμού.

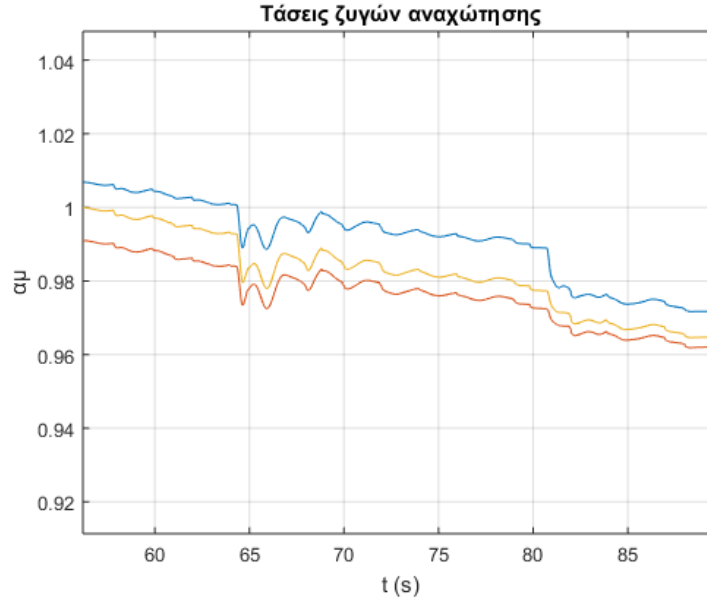


Σχήμα 4-6 Σενάριο σημείου A: Ρεύματα διέγερσης μονάδων στην κεντρική και βόρεια περιοχή

Στο σχήμα 4-7 απεικονίζεται σε οιονεί στατική προσομοίωση με το πρόγραμμα WPSTAB η ευαισθησία της συνολικής αέργου παραγωγής ως προς την άεργο κατανάλωση του ζυγού 5 S_{QgQ5} , όπου και παρατηρείται ότι η ευαισθησία αλλάζει απότομα πρόσημο τη χρονική στιγμή $t=68s$, πλησίον της οποίας επενεργούν τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των μονάδων g14 και g7 που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή του συστήματος. Οι διαδοχικές ενεργοποιήσεις των προστασιών υπερδιέγερσης στις μονάδες g14 και g17 επιδρούν σημαντικά στις τάσεις του συστήματος, καθώς όπως φαίνεται στο σχήμα 4-5 κατά το χρονικό διάστημα [65- 68]s παρατηρείται μία διακύμανση στις τάσεις, γεγονός που παραπέμπει σε διακριτό συμβάν. Το συγκεκριμένο φαινόμενο απεικονίζεται λεπτομερέστερα σε προσομοίωση μαζί με βραχυπρόθεσμη δυναμική από το πρόγραμμα RAMSES στο σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-7 Σενάριο σημείου A: Ευαισθησία S_{QgQ5} (WPSTAB)



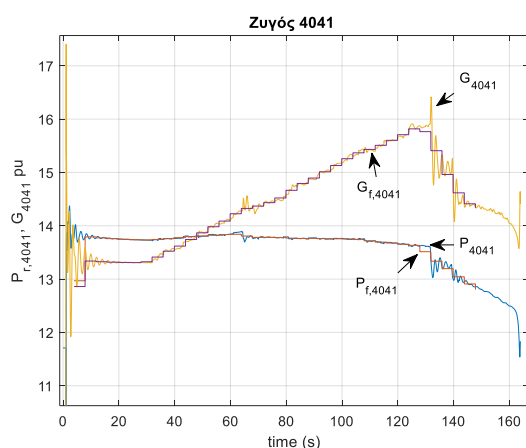
Σχήμα 4-8 Σενάριο σημείου λειτουργίας A: Βραχυπρόθεσμη βύθιση μέτρων τάσεων λόγω υπερδιέγερσης μονάδας g14 και g7 (RAMSES)

Μετά τη μετάβαση του συστήματος στην ασταθή λειτουργία, οι τάσεις στους ζυγούς μεταφοράς συνεχίζουν να φθίνουν, ενώ όλο και περισσότερες μονάδες εισέρχονται σε λειτουργία με περιορισμό υπερδιέγερσης. Ο περιορισμός υπερδιέγερσης της g15 σηματοδοτεί μία έντονη ταλάντωση με αργή απόσβεση προτού το σύστημα καταρρεύσει λίγο μετά τα 160s της προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι ο ζυγός άφιξης 4044 παύει να αποτελεί συνοριακό ζυγό μετά την αποσύνδεση της γραμμής του διαδρόμου που συνδέεται σε αυτόν.

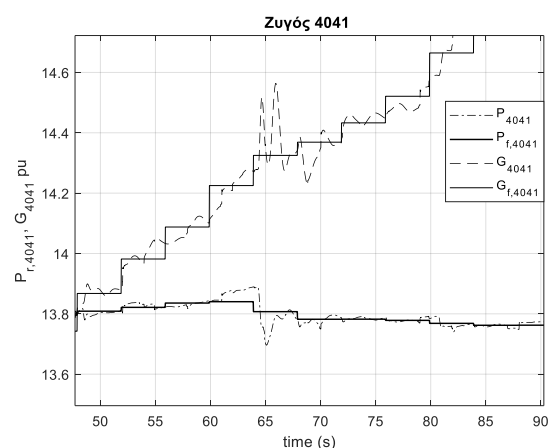
Στο σχήμα 4-9(a) απεικονίζεται η χρονική απόκριση της εισερχόμενης ισχύος P_{4041} και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας G_{4041} πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού STFT σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ στο σχήμα 4-9(b) δίνεται έμφαση στην εφαρμογή του φίλτρου από τον μετασχηματισμό STFT κατά τη φάση της αποκατάστασης της κατανάλωσης της κεντρικής περιοχής. Αντίστοιχα μεγέθη απεικονίζονται για τον ζυγό 4042 στο Σχήμα 4-10(a), ενώ στο Σχήμα 4-10(b) εστιάζεται το χρονικό διάστημα της απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων αμέσως μετά την αποσύνδεση της γραμμής 4032-4044. Ο πίνακας 4-3 περιλαμβάνει τις τιμές των παραμέτρων με τις οποίες υλοποιήθηκε ο μετασχηματισμός STFT. Κάθε υπολογισμός STFT γίνεται σε $M=400$ δείγματα που αντιστοιχούν σε ιστορικό 8 δευτερολέπτων (δειγματοληψία με $f_s=50\text{Hz}$). Το βήμα της επικάλυψης γίνεται σε ποσοστό 50% ($R=200$), γεγονός που συνεπάγεται ότι οι υπολογισμοί STFT επαναλαμβάνονται κάθε 4 δευτερόλεπτα με τη λήψη 200 νέων δειγμάτων, ενώ η τελική εξομάλυνση (βλ. σχέση (3-10)) γίνεται λαμβάνοντας τη μέση τιμή των τελευταίων $q=5$ δεικτών NLI . Ως εκ τούτου, οι χρονικές στιγμές στις οποίες σχεδιάζονται οι τιμές των δεικτών NLI και RLI δεν ανταποκρίνονται στην πραγματική στιγμή υπολογισμού τους, καθώς για την ορθή απεικόνιση των δεικτών τη στιγμή t θα πρέπει να έχει παρέλθει χρονικό διάστημα $R\Delta t=4$ δευτερολέπτων ($\Delta t=1/f_s=20\text{ms}$) για να υπολογιστεί ο διαδοχικός δείκτης. Με άλλα λόγια, η τιμή ενός δείκτη τη χρονική στιγμή t έχει πρακτικά υπολογιστεί τη στιγμή $t+4 \text{ sec}$. Για τον λόγο αυτό οι χρόνοι που αναφέρονται σε μεγέθη που προκύπτουν από τα φιλτραρισμένα μεγέθη ενεργού ισχύος και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας (όπως π.χ. οι δείκτες NLI/RLI) γράφονται σε ζεύγη εντός και εκτός παρενθέσεως. Οι εκτός παρενθέσεως χρόνοι θα αφορούν τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης στην οποία οι υπολογισμοί αναφέρονται, ενώ οι εντός παρενθέσεως χρόνοι θα αναφέρονται στην πραγματική στιγμή υπολογισμού τους και θα είναι μετατοπισμένοι κατά τη χρονική διάρκεια που αντιστοιχεί στο βήμα $\text{hop } R\Delta t=4\text{s}$

Πίνακας 4-3 Παράμετροι μετασχηματισμού STFT

R	M	N	$t_{\text{hop}}(\text{s})$	q	w	ε	$\Delta P_{NLI,\min}$	$\Delta P_{NLI,\max}$
200	400	400	4	5	Hann	0,001	0,0007	0,35

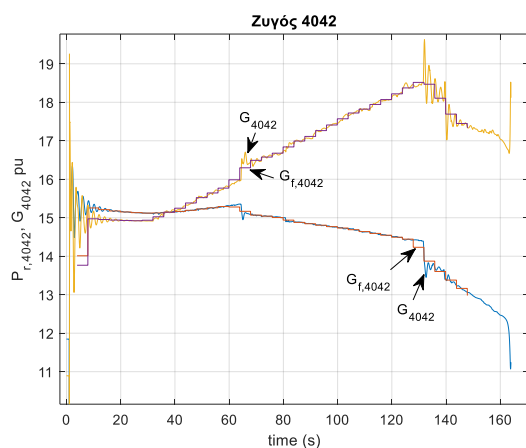


(a)

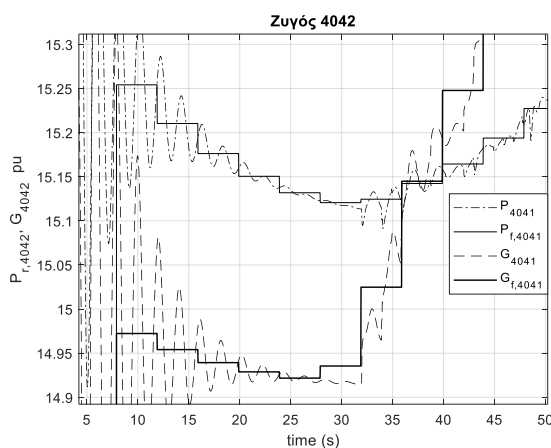


(b)

Σχήμα 4-9 Σενάριο σημείου A: Ζυγός άφιξης 4041: μεγέθη P_{4041} , $P_{f,4041}$, G_{4041} , $G_{f,4041}$ (a) συνολικό διάστημα προσομοίωσης, (b) εστίαση στο διάστημα [50-90]s



(a)



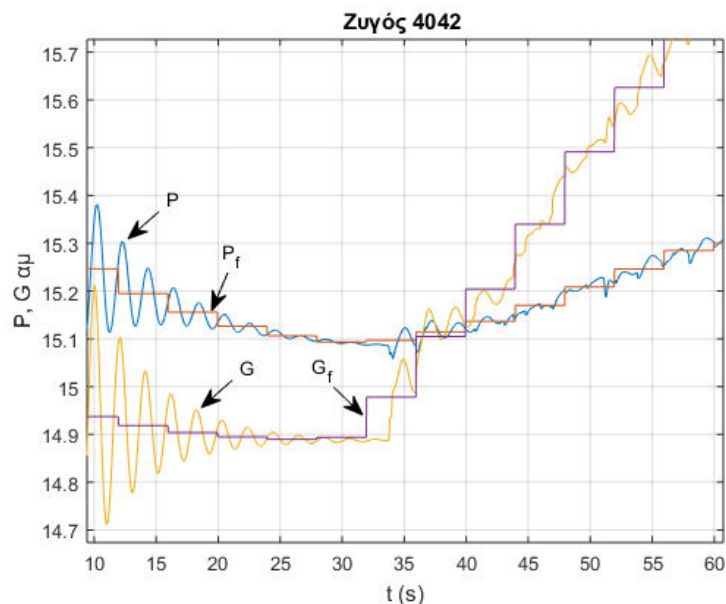
(b)

Σχήμα 4-10 Σενάριο σημείου A: Ζυγός άφιξης 4042: P_{4042} , $P_{f,4042}$, G_{4042} , $G_{f,4042}$ (a) συνολικό διάστημα προσομοίωσης, (b) εστίαση στο διάστημα [5-50]s

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα σχήματα 4-9 και 4-10 η φαινόμενη αγωγιμότητα τόσο από τον ζυγό 4041 όσο και από τον ζυγό 4042 μετά τα πρώτα περίπου 30 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης (μετά δηλαδή από το πέρας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων) συνεχώς αυξάνει, αντικατοπτρίζοντας πολύ πιστά τον μηχανισμό αποκατάστασης της ζήτησης από τα ΣΑΤΥΦ. Οι εισερχόμενες ισχείς P_{4041} και P_{4042} αυξάνονται λόγω της απώλειας της γραμμής 4032-4044 και κατά τη διάρκεια των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που ακολουθούν τη διαταραχή ακολουθούν μία ελαφρά πτωτική πορεία ενώ στη συνέχεια αυξάνονται σταδιακά, ικανοποιώντας την αυξανόμενη ζήτηση των φορτίων λόγω μεταβολής ΣΑΤΥΦ μέχρις ότου ενεργοποιηθούν τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των μονάδων g14 και g7. Τη χρονική στιγμή $t=65s$ παρατηρείται τόσο στα σχήματα 4-9(a),(b) όσο και στο σχήμα 4-10(a) μία διακύμανση στην ενεργό ισχύ άφιξης κάθε συνοριακού ζυγού, ακολουθούμενη από μία μείωση τόσο στην P_{4042} κυρίως όσο και στην P_{4041} σε μικρότερο βαθμό, ενώ παράλληλα οι φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες από τους ίδιους συνοριακούς ζυγούς συνεχίζουν να αυξάνονται μονότονα.

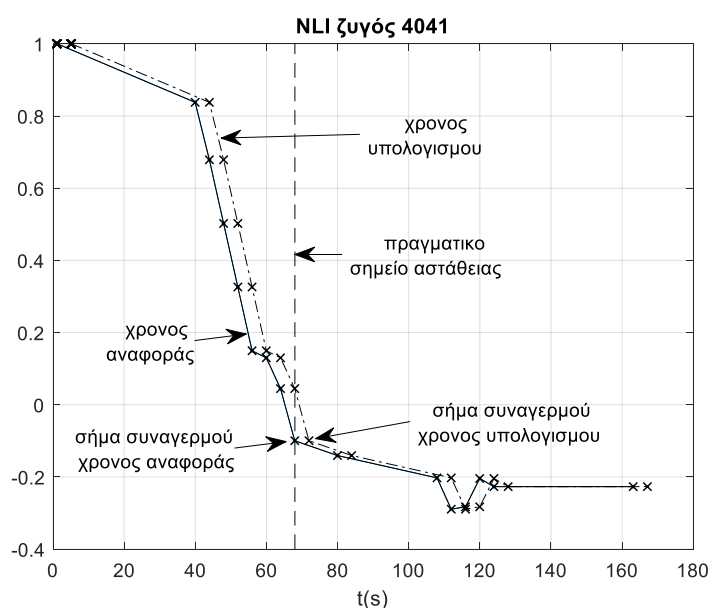
Η αποτελεσματικότητα του μετασχηματισμού STFT μπορεί να φανεί πιο λεπτομερώς στα σχήματα 4-9(b), 4-10(b) και 4-11, στα οποία απεικονίζονται ορισμένα χρονικά διαστήματα από τις αποκρίσεις των μεγεθών P και G στους συνοριακούς ζυγούς άφιξης 4041 και 4042. Τα μετασχηματισμένα σήματα P_f και G_f αποτελούν τις κλιμακωτές συναρτήσεις που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της μεθόδου του STFT έχοντας

κρατήσει από το φάσμα κάθε τμήματος του σήματος μόνο τη συνιστώσα μηδενικής συχνότητας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τμηματικά σταθερές συναρτήσεις ακολουθούν τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη του σήματος, η οποία χαρακτηρίζει στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα εάν το σήμα τείνει να αυξηθεί ή να μειωθεί.

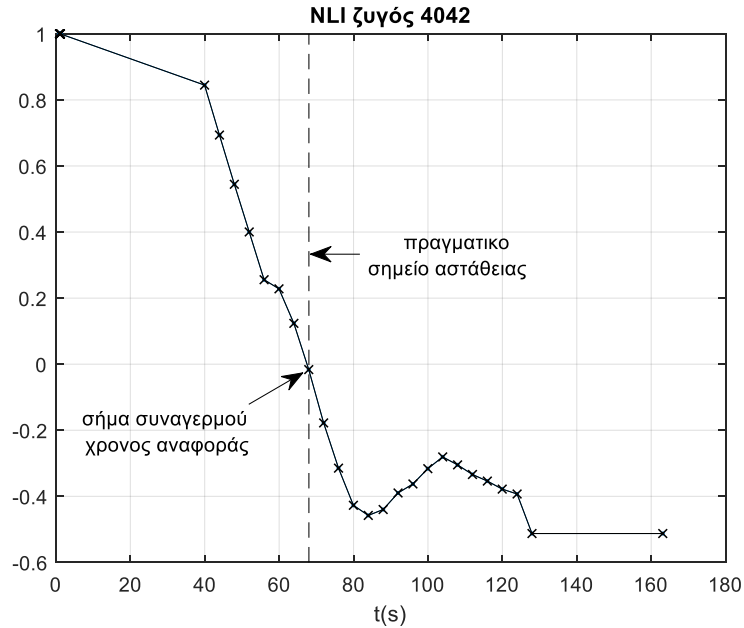


Σχήμα 4-11 Σενάριο σημείου A: Εισερχόμενη ενεργός ισχύς P_{4042} και φαινόμενη αγωγιμότητα G_{4042} πριν και μετά την εφαρμογή του μετασχηματισμού STFT, εστίαση στο διάστημα [10-60]s

Με βάση τις παραπάνω αποκρίσεις είναι εμφανές ότι αμφότερες οι ισχύεις άφιξης των ζυγών 4041 και 4042 παρουσιάζουν μέγιστο ενόσω η ωμική αγωγιμότητα των φορτίων προς τα κατάντη συνεχίζει να αυξάνεται. Με βάση τα όσα έχουν περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια, ο δείκτης NLI μπορεί να αναγνωρίσει την αρχή μη εξυπηρέτησης της αυξανόμενης ζήτησης. Οι δείκτες NLI για τους συνοριακούς ζυγούς άφιξης 4041 και 4042 παρουσιάζονται στα σχήματα 4-12 και 4-13 αντίστοιχα. Στο σχήμα 4-12 παρουσιάζεται η απόκριση του δείκτη NLI με βάση τον χρόνο αναφοράς, καθώς και με βάση τον χρόνο κατά τον οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί. Η καθυστέρηση μεταξύ των δύο αποκρίσεων αντιστοιχεί σε σταθερή χρονική διάρκεια $R\Delta t=4s$. Σε όλα τα υπόλοιπα σχήματα στα οποία απεικονίζονται αποκρίσεις των δεικτών NLI από το λογισμικό RAMSES υπονοείται η ίδια χρονική καθυστέρηση τεσσάρων δευτερολέπτων.



Σχήμα 4-12 Δείκτης NLI ζυγού 4041 σενάριο σημείο A



Σχήμα 4-13 Δείκτης *NLI* ζυγού 4042 σενάριο σημείο *A*

Οι δείκτες μπορούν να εντοπίσουν έγκαιρα τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης καθώς τόσο ο δείκτης *NLI* του ζυγού άφιξης 4041, όσο και του 4042 γίνονται αρνητικοί τη χρονική στιγμή 68s(72s). Επαναλαμβάνεται ότι οι συναγερμοί από τους *NLI* είναι πρακτικά διαθέσιμοι τη χρονική στιγμή 72s όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 3.1.

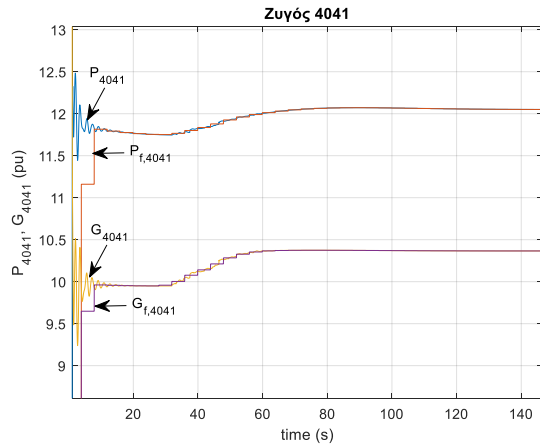
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος υπολογισμού του *NLI* όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 3.2.3 συνιστά στο να μην επηρεάζονται ουσιαστικά οι υπολογισμοί από απότομα συμβάντα όπως π.χ. βραχυκυκλώματα. Αυτό επιτυγχάνεται διότι για ένα τυπικό βραχυκύκλωμα διάρκειας 100-200ms τα δείγματα που θα καταγραφούν (εφόσον ικανοποιείται η σχέση (3-14)) κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος αναμένεται να είναι περίπου 5 έως 10, ένα μικρό ποσοστό δηλαδή του συνολικού αριθμού δειγμάτων ενός τμήματος ($N=400$) που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς του *NLI*.

4.2.2 Ασφαλές σημείο λειτουργίας *B*

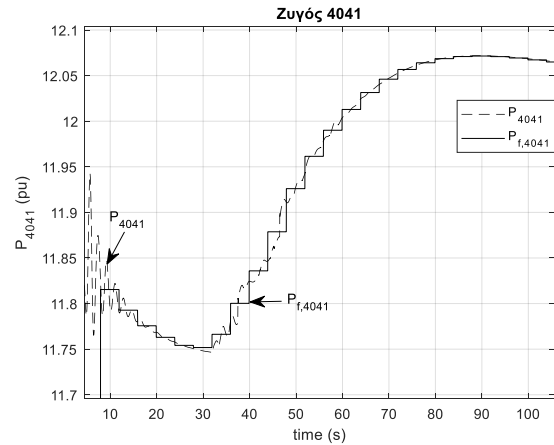
Στην παρούσα ενότητα το σύστημα ισορροπεί αρχικά στο σημείο λειτουργίας *B* και συνεπώς έχει μεγαλύτερα περιθώρια ασφάλειας συγκριτικά με το σημείο *A*. Με σκοπό τη δοκιμή της συμπεριφοράς του δείκτη *NLI* σε ευσταθείς διαταραχές, εξετάζονται δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο εξετάζεται η ίδια ακριβώς διαταραχή με αυτήν της ενότητας 4.2.1, ενώ το δεύτερο αφορά σε αύξηση της ζήτησης των φορτίων της κεντρικής περιοχής.

4.2.2.1 Βραχυκύκλωμα και απώλεια γραμμής 4032-4044

Εφαρμόζοντας την ίδια διαταραχή με την ενότητα 4.2.1, το σύστημα ανταποκρίνεται ικανοποιητικά εξασφαλίζοντας νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις αποκρίσεις που παρουσιάζονται στα σχήματα 4-14 και 4-15, το σύστημα μεταβαίνει μετά την πάροδο περίπου 100s σε νέο σημείο ισορροπίας, στο οποίο οι ισχείς και οι φαινόμενες αγωγιμότητες από τους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4044 αυξάνονται, καθώς η προ διαταραχής ισχύς που διερχόταν από τη γραμμή 4032-4044 πρέπει να διέλθει από τις γραμμές των υπόλοιπων συνοριακών ζυγών, δεδομένου ότι η κατανάλωση των φορτίων της κεντρικής περιοχής αποκαθίσταται από τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Τα μεγαλύτερα περιθώρια ασφάλειας τάσης που υπάρχουν στο αρχικό σημείο ισορροπίας *B*, έχουν ως αποτέλεσμα την αποφυγή των αλληλέπλληλων ενεργοποιήσεων συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός αποκατάστασης της κατανάλωσης στα προ διαταραχής επίπεδα από τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ να μην προκαλεί αστάθεια τάσης στο σύστημα.

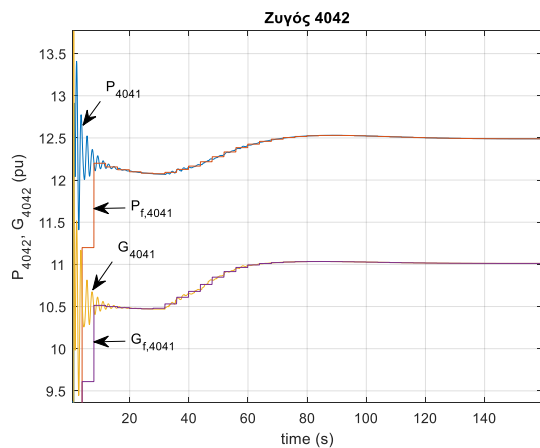


(a)

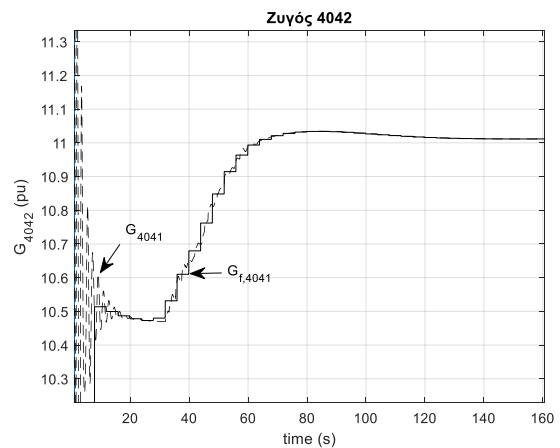


(b)

Σχήμα 4-14 Σενάριο σημείου *B*, απώλεια γραμμής 4032-4044: Ζυγός άφιξης 4041: P_{4041} , $P_{f,4041}$, G_{4041} , $G_{f,4041}$ (a) συνολικό διάστημα προσομοίωσης, (b) εστίαση ενεργού ισχύος στο διάστημα [10-100]s



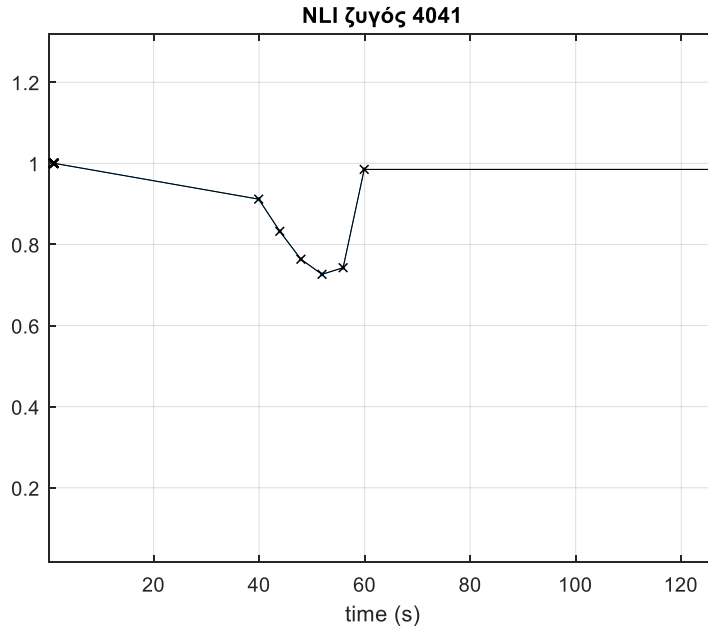
(a)



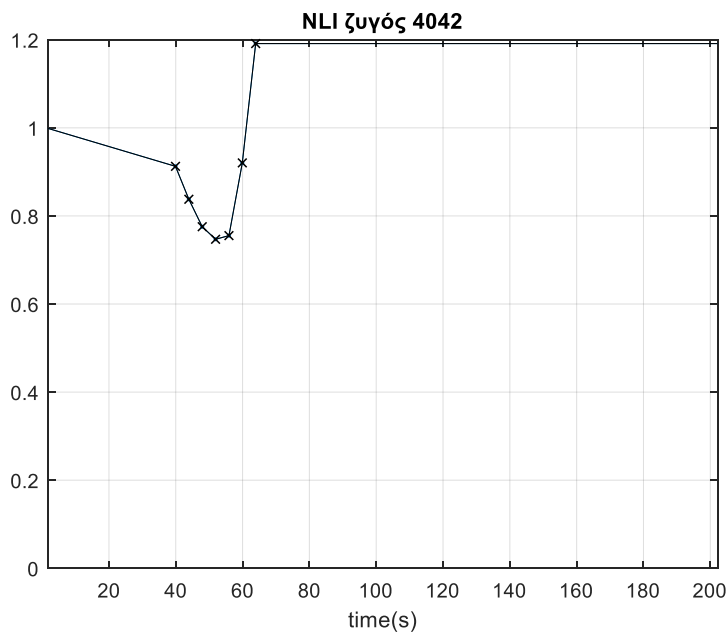
(b)

Σχήμα 4-15 Σενάριο σημείου *B*, απώλεια γραμμής 4032-4044: Ζυγός άφιξης 4042: P_{4042} , $P_{f,4042}$, G_{4042} , $G_{f,4042}$ (a) συνολικό διάστημα προσομοίωσης, (b) εστίαση φαινόμενης αγωγιμότητας στο διάστημα [10-160]s

Στα σχήματα 4-16 και 4-17 παρουσιάζεται η χρονική απόκριση των δεικτών *NLI* στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τιμές των δεικτών παραμένουν αρκετά πάνω από την τιμή 0.5 και συνεπώς αποφεύγεται η σήμανση ανεπιθύμητου λανθασμένου συναγερμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται στο διάστημα από την αρχή έως το πέρας της ανοδικής ράμπας ζήτησης, δηλαδή μετά τα 40s της προσομοίωσης. Τη στιγμή εκείνη έχουν ισορροπήσει οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές λόγω των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, οι οποίες διεγέρθηκαν από το βραχυκύκλωμα και την απώλεια γραμμής. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια της ηλεκτρομηχανικής ταλάντωσης δεν πραγματοποιούνται καθόλου υπολογισμοί του δείκτη *NLI* λόγω της μεταβατικής μείωσης που υφίσταται η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 4.15(b), ενώ αμέσως μετά το άνοιγμα της γραμμής 4032-4044 και κατά την αρχική εμφάνιση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων η απότομη μεταβολή της ισχύος ΔP υπερβαίνει το κατώφλι $\Delta P_{NLI,max}$ που έχει τεθεί (βλ. πίνακα 4-3) με αποτέλεσμα πάλι να μην πραγματοποιούνται υπολογισμοί στον δείκτη *NLI*.



Σχήμα 4-16 Σενάριο σημείου *B*, απώλεια γραμμής 4032-4044: Δείκτης *NLI* ζυγού 4041



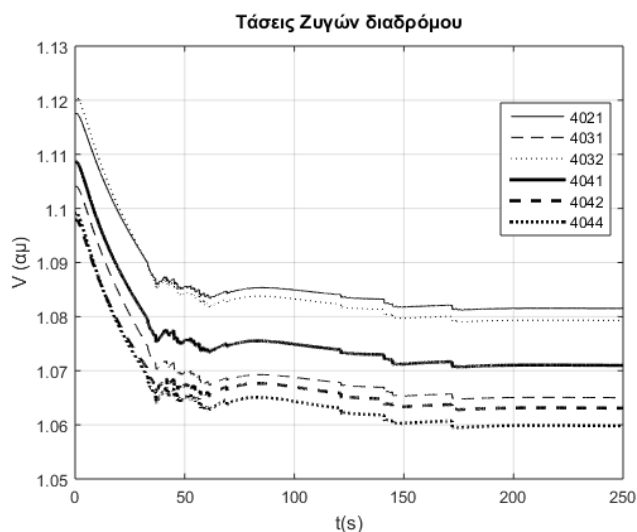
Σχήμα 4-17 Σενάριο σημείου *B*, απώλεια γραμμής 4032-4044: Δείκτης *NLI* ζυγού 4042

4.2.2.2 Αύξηση ζήτησης 5% φορτίων κεντρικής περιοχής

Η δεύτερη διαταραχή που εξετάζεται για το αρχικό σημείο ισορροπίας *B* αφορά σε διαταραχή ράμπας αύξησης φορτίου σε διάστημα 65 δευτερολέπτων, στην οποία η ζήτηση όλων των φορτίων αυξάνει αναλογικά κατά 5%. Το σύστημα είναι ασφαλές για τη συγκεκριμένη διαταραχή και συνεπώς η απόκριση είναι ευσταθής, εξασφαλίζοντας νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας μετά την πάροδο περίπου 200s. Στην περίπτωση αυτή σημειώνεται ότι ο ζυγός 4044 παραμένει συννοριακός, καθώς η διαταραχή αφορά αποκλειστικά σε αύξηση της ζήτησης.

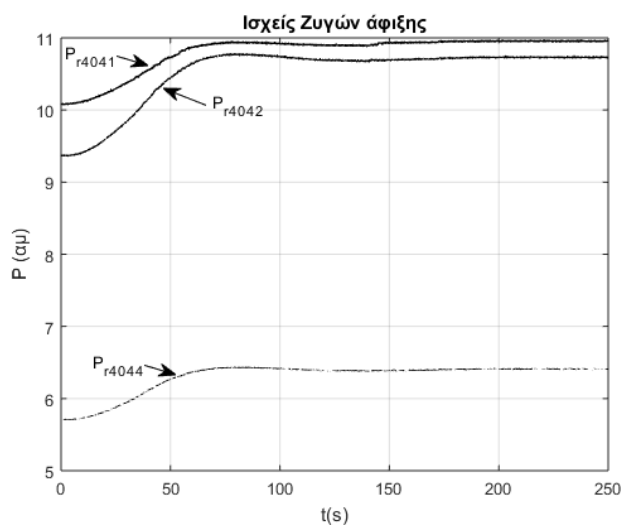
Στο σχήμα 4-18 παρουσιάζεται η απόκριση των τάσεων των ζυγών του διαδρόμου. Οι τάσεις των ζυγών μειώνονται μεν, αλλά ισορροπούν σε τιμές σχετικά κοντά στις αρχικές, ενώ μπορούν επίσης να

παρατηρηθούν οι διακριτές μεταβολές σε αυτές λόγω των δράσεων των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής του συστήματος.

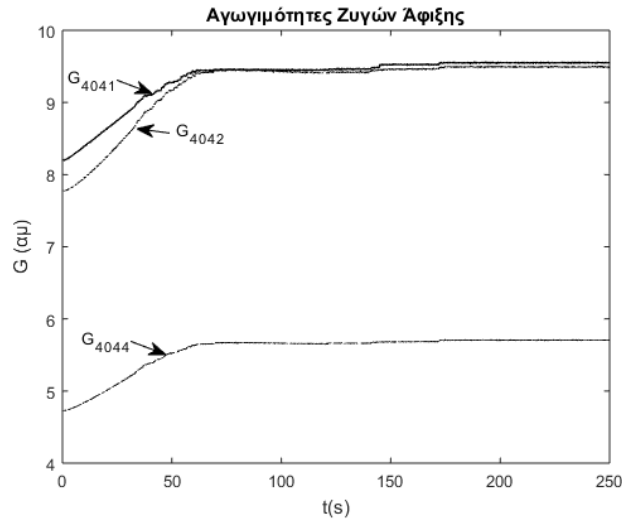


Σχήμα 4-18 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: Τάσεις ζυγών διαδρόμου

Στο σχήμα 4-19 παρουσιάζονται οι εισερχόμενες ισχείς στους ζυγούς άφιξης 4041, 4042 και 4044 οι οποίες παρατηρείται ότι ακολουθούν τις αντίστοιχες ράμπες αύξησης των φαινομένων ωμικών αγωγιμοτήτων του σχήματος 4-20. Η ράμπα αύξησης της ζήτησης είναι περισσότερο σταθερή σε σχέση με αυτές της ενεργού ισχύος, διότι η αύξηση των αγωγιμοτήτων επηρεάζει μεταβατικά τις τάσεις διανομής της κεντρικής περιοχής, γεγονός που τείνει να καθυστερήσει την αύξηση της κατανάλωσης, έως ότου ενεργοποιηθούν τα ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής.

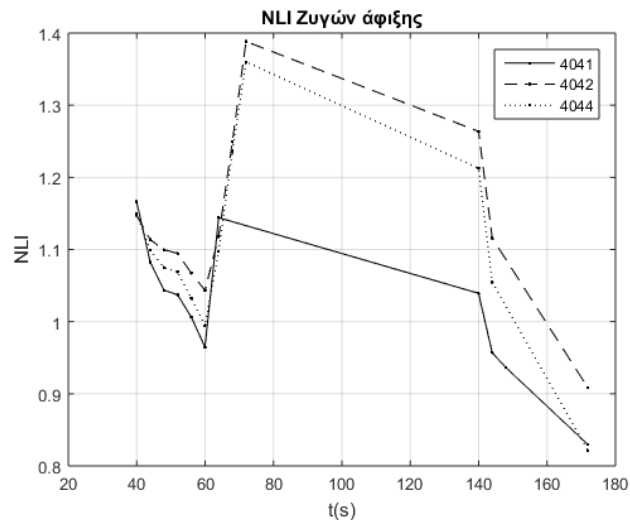


Σχήμα 4-19 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: Ενεργός ισχύς ζυγών άφιξης



Σχήμα 4-20 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: Φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες ζυγών άφιξης

Στο σχήμα 4-21 παρατίθενται οι *NLI* δείκτες στους συνοριακούς ζυγούς άφιξης 4041, 4042, 4044. Είναι εμφανές ότι οι τιμές τους παραμένουν υψηλές, αντικατοπτρίζοντας την ευσταθή απόκριση του συστήματος. Παρατηρείται επίσης ότι πραγματοποιούνται υπολογισμοί *NLI* κυρίως κατά τη διάρκεια της ράμπας και μέχρι τα 70 δευτερόλεπτα όπου ολοκληρώνεται η ράμπα ισχύος άφιξης και φαινόμενης αγωγιμότητας. Στη συνέχεια παύουν να πραγματοποιούνται υπολογισμοί λόγω διατήρησης της αγωγιμότητας σε σταθερή περίπου τιμή ($\Delta G_{f,i}/G_{f,i} < \varepsilon$), μέχρι περίπου τα 140 δευτερόλεπτα όπου μπορούν να παρατηρηθούν δράσεις από ΣΑΤΥΦ, τα οποία επηρεάζουν τις αγωγιμότητες των ζυγών άφιξης.



Σχήμα 4-21 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: Δείκτες *NLI* ζυγών άφιξης

Συμπεραίνεται επομένως ότι ο δείκτης *NLI* διατηρεί τιμές αρκούντως μεγάλες όταν η απόκριση του συστήματος είναι ευσταθής και αυτό οδηγείται σε νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.

4.3 Αξιολόγηση δείκτη *RLI*

4.3.1 Σενάρια προσομοιώσεων

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.1, για την αξιολόγηση του δείκτη αστάθειας *RLI* γίνεται η θεώρηση ότι υπάρχουν εγκατεστημένοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι στα δύο άκρα αναχώρησης και άφιξης των

γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς μεταξύ βόρειας και κεντρικής περιοχής του συστήματος. Οι δείκτες *RLI* έχουν υπολογιστεί με βάση τη σχέση (3-11), που επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία:

$$\overline{RLI}_{k,ij} = \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q \frac{\Delta \bar{P}_{f,ij}(t_k)}{\Delta \bar{G}_{f,ij}(t_k)}$$

με τιμές παραμέτρων που παρατίθενται στον πίνακα 4-4, οι οποίες θεωρούνται κοινές για όλους τους ηλεκτρονόμους των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί αντιπαραβάλλοντας τους πίνακες 4-3 και 4-4 οι παράμετροι παρουσιάζουν μικρές διαφορές, όπως π.χ. στο κατώφλι $\Delta P_{RLI,max}$. Σημειώνεται ωστόσο, ότι κάτι τέτοιο δεν θα πρέπει να θεωρηθεί ως γενικευμένο συμπέρασμα για τυχόν πραγματικές εφαρμογές των δεικτών αστάθειας, κυρίως ως προς τα άνω και κάτω όρια μεταβολών.

Πίνακας 4-4 Παράμετροι για υπολογισμό δεικτών *RLI*

<i>R</i>	<i>M</i>	<i>N</i>	<i>t_{hop}</i> (s)	<i>q</i>	<i>w</i>	<i>η</i>	$\Delta P_{RLI,min}$	$\Delta P_{RLI,max}$
200	400	400	4	5	Hann	0,001	0,0007	0,15

Οι πίνακες 4-5 και 4-6 παραθέτουν ορισμένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την αξιολόγηση του δείκτη *RLI*. Σημειώνεται ότι στα συγκεκριμένα σενάρια πραγματοποιήθηκε αντιπαραβολή και με τον δείκτη *NLI* για λόγους σύγκρισης και πληρότητας. Τα σενάρια προσομοιώσεων του πίνακα 4-5 έχουν υλοποιηθεί τόσο στο λογισμικό RAMSES όσο και στο WPSTAB, με τη διαφορά ότι στο WPSTAB δεν έχει προσομοιωθεί το βραχυκύκλωμα, παρά μόνο η απώλεια γραμμής, καθώς το WPSTAB θεωρεί ότι οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές βρίσκονται σε ισορροπία.

Σε όλα τα σενάρια έχει προσομοιωθεί βραχυκύκλωμα κοντά σε ζυγό τη χρονική στιγμή $t=1s$, το οποίο θεωρείται ότι καθαρίζεται μετά από 100ms. Το βραχυκύκλωμα στον ζυγό προσεγγίζει την περίπτωση αυτό να συνέβαινε στο άκρο γραμμής μεταφοράς που συνδέεται στον θεωρούμενο ζυγό. Έτσι για τους σκοπούς της ανάλυσης γίνεται η απλοποίηση ότι αυτό πραγματοποιείται στο άκρο της γραμμής μεταφοράς, η οποία απομονώνεται μετά την εκκαθάρισή του.

Η στήλη «Αστάθεια» του πίνακα 4-5 αναφέρεται στη χρονική στιγμή που η ευαισθησία S_{QgQ5} αλλάζει πρόσημο (σημείο αστάθειας) και έχει εξαχθεί από το λογισμικό WPSTAB, ενώ οι στήλες με τις χρονικές στιγμές της κατάρρευσης και των συναγερμών από τους δείκτες *NLI* και *RLI* έχουν εξαχθεί από τις προσομοιώσεις στο λογισμικό RAMSES.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι τα αποτελέσματα από την οιονεί στατική προσομοίωση τείνουν να εξάγουν νωρίτερα τα αποτελέσματα σε αντιπαραβολή με την πλήρη προσομοίωση πολλαπλών χρονικών κλιμάκων λόγω της χρήσης αλγεβρικών εξισώσεων ισορροπίας στην οιονεί στατική προσέγγιση αντί των αντίστοιχων διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τις δυναμικές βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Αυτό το γεγονός επιδρά τόσο στις αλλαγές λήψεων των ΣΑΤΥΦ όσο και στην ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Υπενθυμίζεται ότι οι εκτός παρενθέσεως χρόνοι στις στήλες των *NLI* και *RLI* αφορούν τη χρονική στιγμή της προσομοίωσης στην οποία οι υπολογισμοί αναφέρονται, ενώ οι εντός παρενθέσεως αναφέρονται στην πραγματική στιγμή υπολογισμού τους, δηλαδή είναι μετατοπισμένοι κατά τη χρονική διάρκεια που αντιστοιχεί στο βήμα $hop\ R\Delta t=4s$.

Πίνακας 4-5 Σενάρια ασταθών προσομοιώσεων δείκτη *RLI*

Διαταραχή		Κατάρρευση (s)	Αστάθεια (s)	<i>NLI</i> συναγερμός		<i>RLI</i> συναγερμός	
Ζυγός βραχυκυκ λώματος	Απώλεια στοιχείου			t (s)	Ζυγός	t (s)	Γραμμή
4031	4022- 4031	193	42	76(80)	4041	92(96)	4031-4041a,b
				80(84)	4042	55 (59)	4021-4042
						55 (59)	4032-4042

				72(76)	4044	76 (80)	4032-4044
4031	4031-4032	174	70	95(99)	4041	112(116)	4031-4041a,b
				90(94)	4042	112(116)	4021-4042
				85(89)	4044	87(91)	4032-4042
						92(96)	4032-4044
4041	4031-4041a	188	78	81(85)	4041	84(88)	4031-4041a,b
				81(85)	4042	88(92)	4021-4042
				80(84)	4044	88(92)	4032-4042
						80(84)	4032-4044
4041	4041-4044	204	94	120(124)	4041	120(124)	4031-4041a,b
				92(96)	4042	108(112)	4021-4042
				92(96)	4044	112(116)	4032-4042
						100(104)	4032-4044
4041	g14	100	19	44(48)	4041	52(56)	4031-4041a,b
				32(36)	4042	32(36)	4021-4042
				32(36)	4044	36(40)	4032-4042
						32(36)	4032-4044
4032,	4032-4044	164	68	67(71)	4041	91(95)	4031-4041a,b
				71(75)	4042	80(84)	4021-4042
				-	4044	92(96)	4032-4042
						-	4032-4044

Πίνακας 4-6 Σενάρια ευσταθών προσομοιώσεων δείκτη *RLI*

Διαταραχή		Κατάρρευση (s)	Αστάθεια (s)	<i>NLI</i> συναγερμός		<i>RLI</i> συναγερμός	
Ζυγός βραχυκυκλώ ματος	Απώλεια στοιχείου			t (s)	Ζυγός	t (s)	Γραμμή
4041	g13	-	-	Κανένας εσφαλμένος συναγερμός από <i>NLI/RLI</i>			
4041	4042-4044	-	-				
4041	4043-4044	-	-				
4041	4044-4045	-	-				

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί σε όλα τα ασταθή σενάρια εμφανίζονται σημάνσεις συναγερμών από τους δείκτες *NLI* και *RLI*, οι οποίες μεταξύ τους παρουσιάζουν αποδεκτή χρονική απόκλιση, δεδομένου ότι σε όλα τα ασταθή σενάρια ο χρόνος από τη σήμανση του πρώτου συναγερμού μέχρι και το σημείο κατάρρευσης του συστήματος είναι επαρκής, ώστε να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης είτε από τους χειριστές είτε προτιμότερα από ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος.

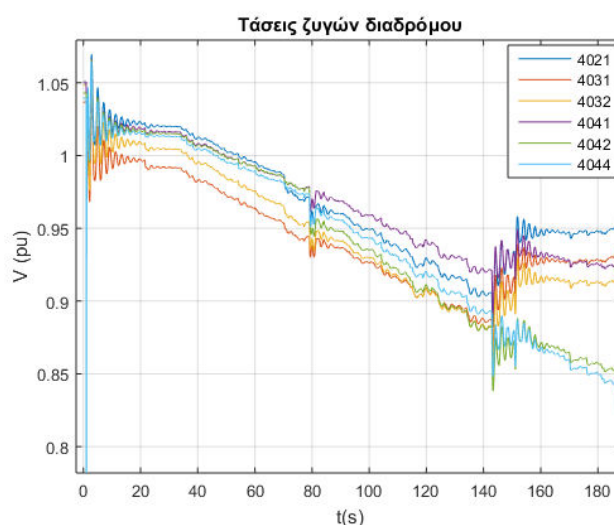
Είναι επίσης σημαντικό το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκε σενάριο ευσταθούς απόκρισης του συστήματος, στο οποίο να ενεργοποιήθηκε εσφαλμένο σήμα συναγερμού. Η συμβολή των μεθόδων φίλτρου είναι καθοριστική σε αυτό, καθώς σε διαφορετική περίπτωση, οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές του συστήματος είναι ικανές να δημιουργήσουν σημαντική ταλαντωτική συμπεριφορά στους δείκτες αστάθειας που θα οδηγούσαν σε λανθασμένα συμπεράσματα αναφορικά με τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης.

4.3.2 Ανασφαλές σημείο A: Σύγκριση *RLI* με *NLI* (απώλεια γραμμής 4031-4041a)

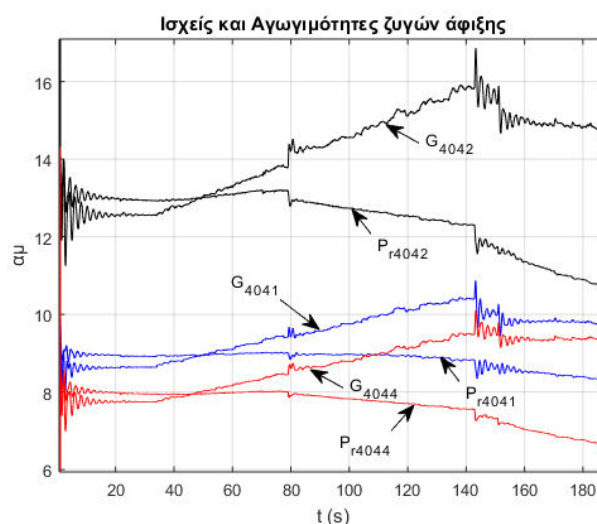
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η τρίτη διαταραχή του πίνακα 4-5, η οποία είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.2.1, με σκοπό την αξιολόγηση της επίδοσης του δείκτη *RLI* αλλά και τη σύγκριση με τον *NLI*. Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται ότι το σύστημα ισορροπεί αρχικά στο ανασφαλές

σημείο λειτουργίας *A* προτού συμβεί τριφασικό στερεό βραχυκύκλωμα πολύ κοντά στον ζυγό 4041 (στο άκρο άφιξης της γραμμής 4031-4041a) τη χρονική στιγμή $t=1s$. Το σφάλμα εκκαθαρίζεται 100ms αργότερα και για την απομόνωσή του τίθεται εκτός λειτουργίας η μία από τις δύο παράλληλες γραμμές 4031-4041. Η αστάθεια τάσης εξελίσσεται παρόμοια με την περίπτωση της απώλειας γραμμής 4032-4044 που εξετάστηκε στην ενότητα 4.2.1, καθώς η απόπειρα αποκατάστασης της κατανάλωσης της κεντρικής περιοχής στα προ διαταραχής επίπεδα προξενεί αστάθεια τάσης στο σύστημα, με αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρέει στα 188 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης.

Με βάση την ανάλυση ευαισθησιών του λογισμικού WPSTAB, η αστάθεια τάσης εμφανίζεται τη χρονική στιγμή $t=78s$, με αποτέλεσμα να απομένουν περίπου 100s μέχρι την κατάρρευση του συστήματος. Στο σχήμα 4-22 παρουσιάζεται η χρονική απόκριση των τάσεων στους ζυγούς του διαδρόμου μεταφοράς, όπου και μπορεί να παρατηρηθεί ότι τη χρονική στιγμή της αστάθειας τα μέτρα των τάσεων είναι περίπου 0.95 αμ, γεγονός που δυσκολεύει πολύ την εκτίμηση κατωφλίου τάσης για μεθόδους και μέτρα αντιμετώπισης που στηρίζονται αποκλειστικά στα μέτρα των τάσεων (*undervoltage load shedding schemes – UVLS*).



Σχήμα 4-22 Σενάριο σημείου *A*, απώλεια γραμμής 4031-4041a: Μέτρα τάσεων ζυγών διαδρόμου μεταφοράς



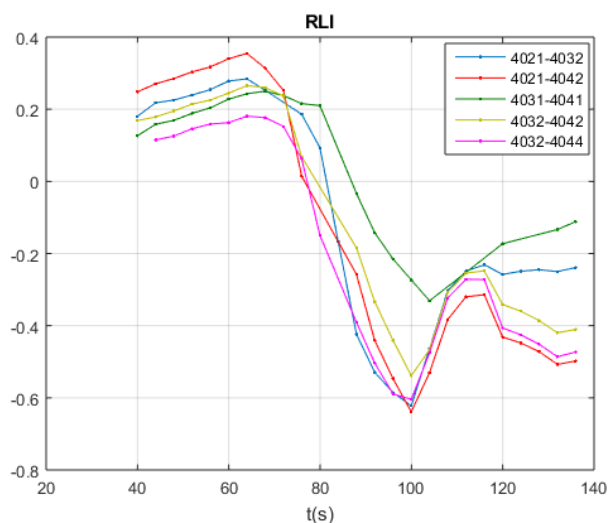
Σχήμα 4-23 Σενάριο σημείου *A*, απώλεια γραμμής 4031-4041a: Ισχείς άφιξης και φαινόμενες αγωγιμότητες συνοριακών ζυγών άφιξης

Στο σχήμα 4-23 φαίνονται οι χρονικές αποκρίσεις των φαινόμενων ωμικών αγωγιμοτήτων G_i από τους ζυγούς άφιξης και οι αντίστοιχες εισερχόμενες ισχύεις αυτών P_i . Μπορεί να παρατηρηθεί ότι αμέσως μετά την

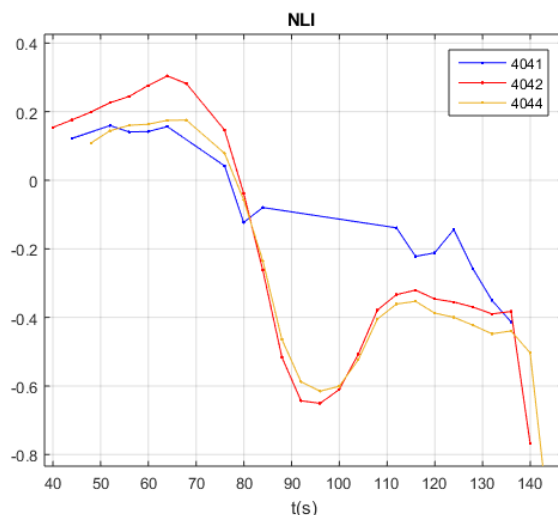
προσωρινή ισορροπία των βραχυπρόθεσμων δυναμικών ($t \approx 20s$) η ενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής ξεκινά τη διαδικασία αποκατάστασης της κατανάλωσης της κεντρικής περιοχής, με αποτέλεσμα οι φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες στους συντομικούς ζυγούς άφιξης να ακολουθούν μία αύξουσα πορεία. Παράλληλα, οι ισχείς άφιξης στους συντομικούς ζυγούς αυξάνονται μέχρι περίπου τη χρονική στιγμή $t=80s$, ενώ στο μεταξύ ενεργοποιούνται διαδοχικά τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης μονάδων από την κεντρική και βόρεια περιοχή, σε αντιστοιχία με την αλληλουχία διακριτών συμβάντων της διαταραχής της ενότητας 4.2.1. Οι διαδοχικές ενεργοποιήσεις συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης σε μονάδες της κεντρικής περιοχής, έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία περαιτέρω αύξησης της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή του συστήματος, πράγμα που υποδηλώνει και την αδυναμία ικανοποίησης της ζήτησης της κεντρικής περιοχής στα προ διαταραχής επίπεδα.

Στο σχήμα 4-24 παρουσιάζεται η απόκριση των δεικτών RLI όπως αυτοί υπολογίζονται από τους ηλεκτρονόμους στους ζυγούς αναχώρησης των γραμμών του διαδρόμου, ενώ στο σχήμα 4-25 οι δείκτες NLI των ζυγών άφιξης.

Η αρχική απότομη αύξηση της ισχύος στα εναπομείναντα κυκλώματα του διαδρόμου μεταφοράς, λόγω της αποσύνδεσης της γραμμής 4031-4041a, υπερβαίνει το κατώφλι $\Delta P_{RLI,max}$ και $\Delta P_{NLI,max}$ των σχέσεων (3-15) και (3-14) αντίστοιχα, με αποτέλεσμα οι δείκτες να μην επηρεάζονται από τη διαταραχή. Στη συνέχεια, η προσωρινή μείωση της φαινόμενης αγωγιμότητας, εξαιτίας της μείωσης των τάσεων διανομής λόγω της διαταραχής, καθώς και διότι τα ΣΑΤΥΦ δεν έχουν ακόμη ξεκινήσει τη διαδικασία αποκατάστασης της κατανάλωσης, εμποδίζει τους υπολογισμούς τόσο των δεικτών NLI όσο και των RLI . Μπορεί να παρατηρηθεί, ότι οι δείκτες NLI και RLI παρουσιάζουν αρκετά παρόμοια συμπεριφορά, ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι κανένας δείκτης δεν παραμένει θετικός κατά την προσομοίωση. Δεδομένου ότι το σύστημα καταρρέει στο $t=188s$, υπάρχει επαρκής χρόνος για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης, κατά προτίμηση από ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος.



Σχήμα 4-24 Σενάριο σημείου Α, απόλεια γραμμής 4031-4041a: Δείκτες RLI στα άκρα αναχώρησης των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς



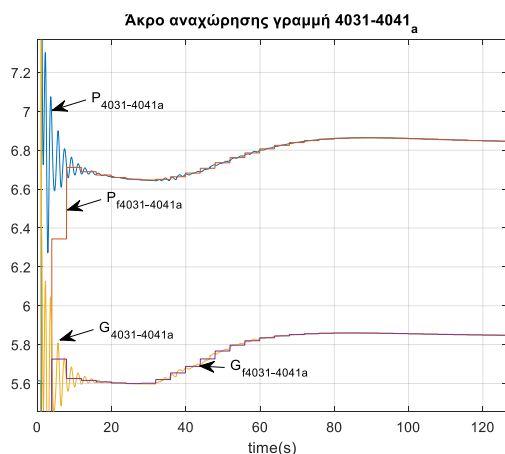
Σχήμα 4-25 Σενάριο σημείου A, απώλεια γραμμής 4031-4041a: Δείκτες NLI συνοριακών ζυγών άφιξης

4.3.3 Ασφαλές σημείο B δείκτης RLI

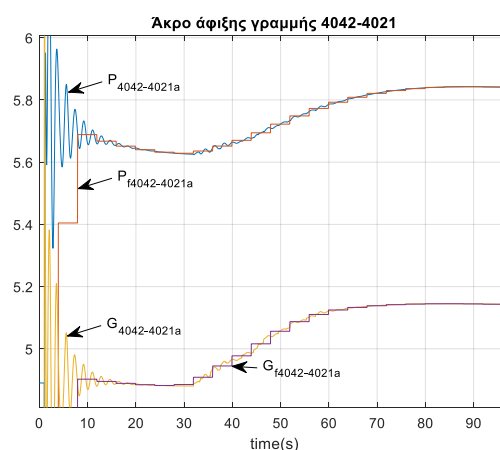
Σε αντιστοιχία με την ενότητα 4.2.2, εξετάζεται η συμπεριφορά του δείκτη RLI οι δύο ευσταθείς διαταραχές, και συγκεκριμένα στην απώλεια της γραμμής 4032-4044 και στην αύξηση κατά 5% της ζήτησης της κεντρικής περιοχής.

4.3.3.1 Βραχυκύκλωμα και απώλεια γραμμής 4032-4044

Το σενάριο της ενότητα 4.2.2.1 (βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4032 και άνοιγμα γραμμής 4032-4044) επαναλαμβάνεται για την εξέταση της συμπεριφοράς των δεικτών RLI στα άκρα αναχώρησης και άφιξης των γραμμών του διαδρόμου μεταφοράς μεταξύ της βόρειας και κεντρικής περιοχής του συστήματος. Στο σχήμα 4-26 παρατίθενται αποκρίσεις ενεργού ισχύος και φαινόμενης αγωγιμότητας από δύο γραμμές του διαδρόμου μεταφοράς, όπου και μπορεί να παρατηρηθεί παρόμοια συμπεριφορά των μεγεθών G_{ij} και P_{ij} των γραμμών μεταφοράς μεταξύ των $i-j$ συνοριακών ζυγών με τα αντίστοιχα μεγέθη ισχύος άφιξης και φαινόμενης αγωγιμότητας, για τους υπολογισμούς των δεικτών NLI .



(a)

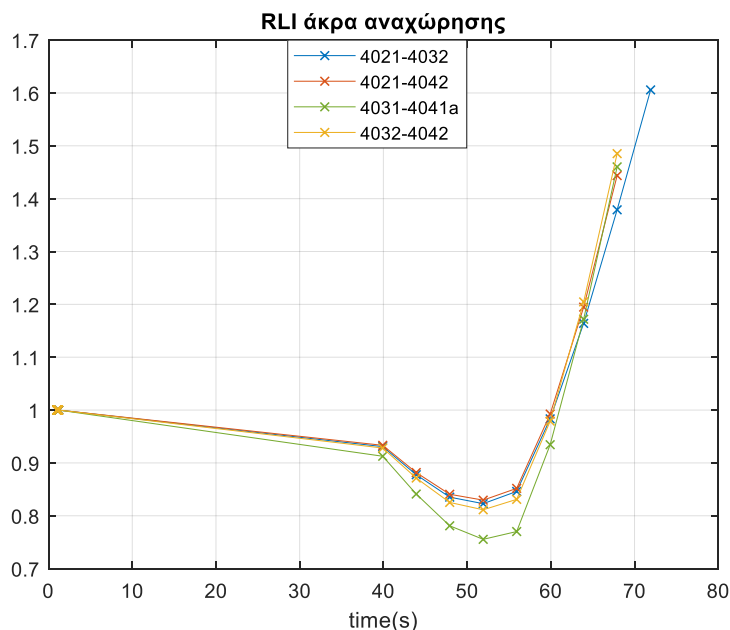


(b)

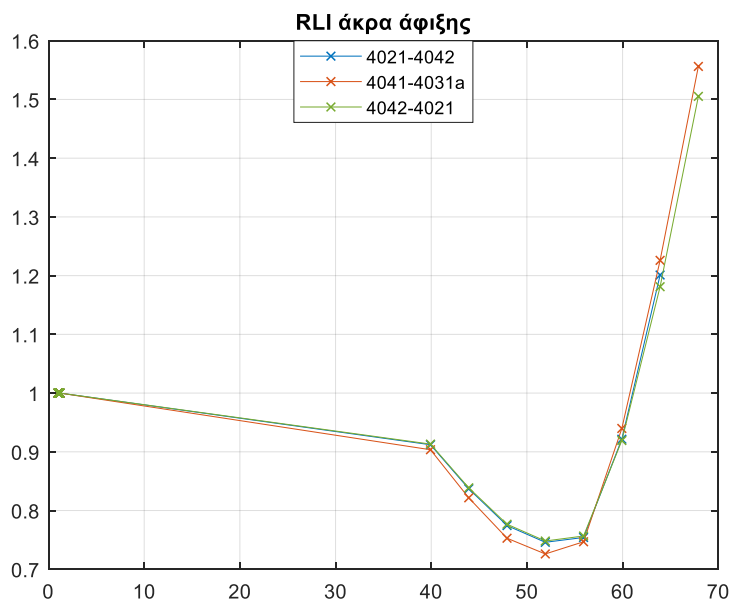
Σχήμα 4-26 Σενάριο σημείου B, απώλεια γραμμής 4032-4044: Ζυγός άφιξης 4041, $P_{4031-4041}$, $P_{f, 4031-4041}$, $G_{4031-4041}$, $G_{f, 4031-4041}$

Όμοια με τους δείκτες NLI , οι υπολογισμοί των δεικτών RLI γίνονται με την έναρξη της αποκατάστασης της κατανάλωσης των φορτίων της κεντρικής περιοχής λόγω δράσης των ΣΑΤΥΦ. Σε κάθε περίπτωση, τόσο

οι τιμές των RLI στα άκρα αναχώρησης όσο και στα άκρα άφιξης των γραμμών μεταφοράς του διαδρόμου διατηρούν σημαντικά υψηλές τιμές, με αποτέλεσμα να αποφεύγεται ο κίνδυνος σήμανσης λανθασμένου συναγερμού.



Σχήμα 4-27 Σενάριο σημείου B , απώλεια γραμμής 4032-4044: Δείκτες RLI άκρων αναχώρησης

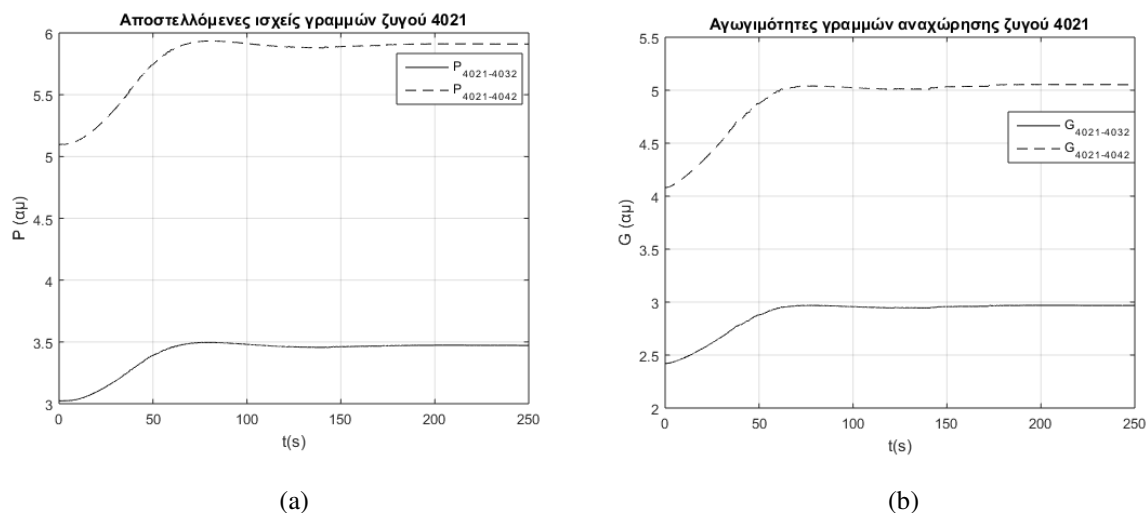


Σχήμα 4-28 Σενάριο σημείου B , απώλεια γραμμής 4032-4044: Δείκτες RLI άκρων άφιξης

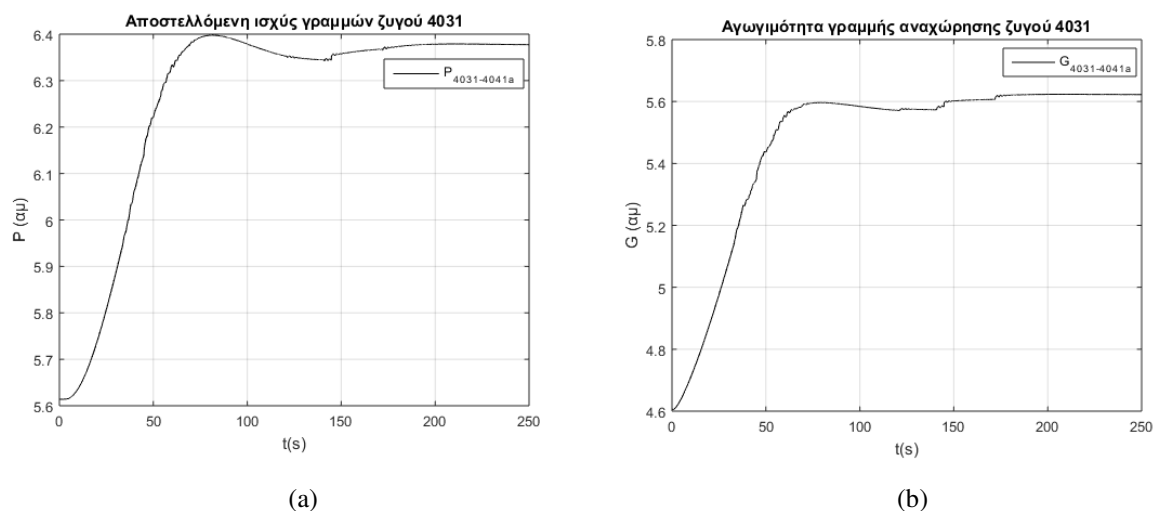
4.3.3.2 Αύξηση ζήτησης 5% φορτίων κεντρικής περιοχής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ίδια προσομοίωση της ενότητας 4.2.2.2, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδοση του δείκτη RLI σε ευσταθείς διαταραχές ενός συστήματος. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αύξηση της ζήτησης είναι αναλογική, έτσι αναμένεται αύξηση τόσο στις ροές ενεργού ισχύος σε όλες τις γραμμές μεταφοράς του διαδρόμου, όσο και στις φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες αυτών. Στα σχήματα 4-29 έως 4-31 παρατίθενται οι αποκρίσεις των ενεργών ισχύων και φαινόμενων αγωγιμοτήτων από τις μεμονωμένες γραμμές του διαδρόμου, τόσο στο άκρο αναχώρησης όσο και στο άκρο άφιξης. Η

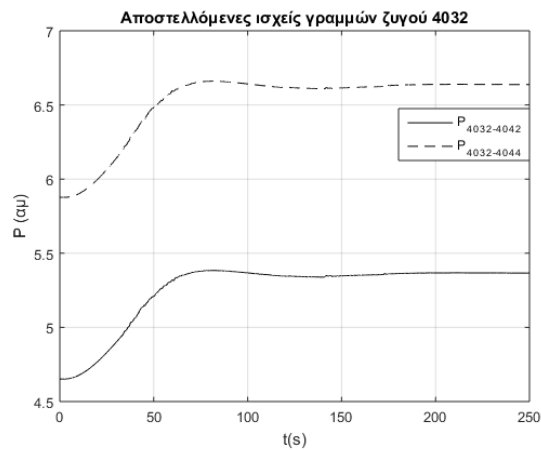
απόκριση της αποστελλόμενης ενεργού ισχύος και φαινόμενης αγωγιμότητας των γραμμών διαδρόμου που αναχωρούν από τον ζυγό 4021 απεικονίζονται στο σχήμα 4-29 (a) και (b). Τα αντίστοιχα μεγέθη για τις γραμμές διαδρόμου που αναχωρούν από τους ζυγούς 4031 και 4032 φαίνονται στα σχήματα 4-30 και 4-31 αντίστοιχα.



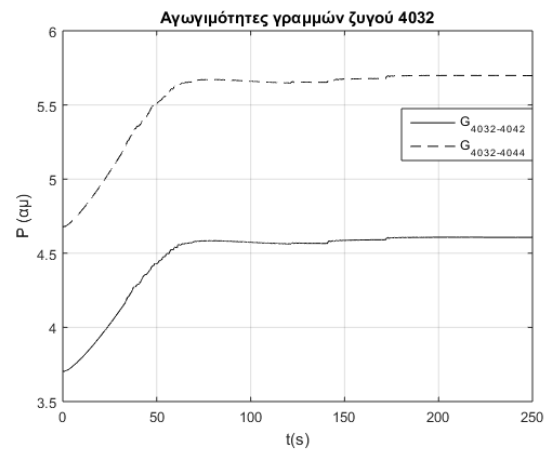
Σχήμα 4-29 Σενάριο σημείου *B*, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Μεταφερόμενες ισχείς και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που αναχωρούν από τον ζυγό 4021



Σχήμα 4-30 Σενάριο σημείου *B*, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Μεταφερόμενες ισχείς και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που αναχωρούν από τον ζυγό 4031



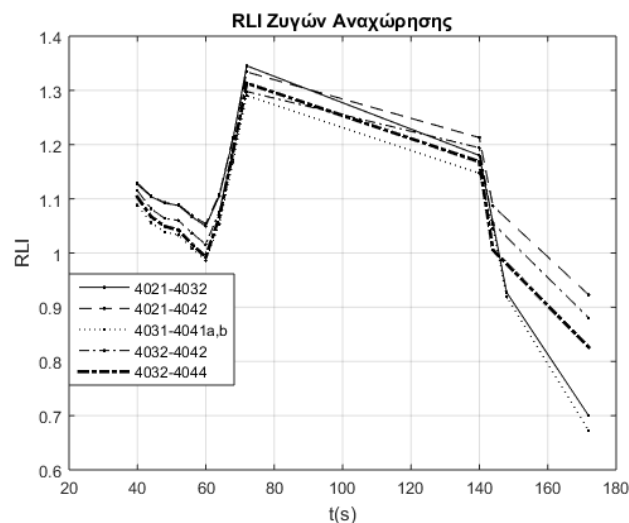
(a)



(b)

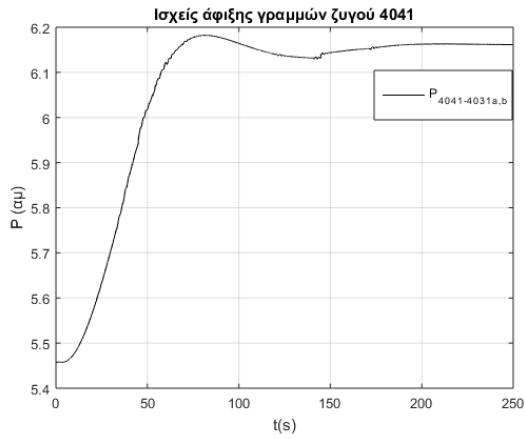
Σχήμα 4-31 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Μεταφερόμενες ισχύεις και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που αναχωρούν από τον ζυγό 4032

Όπως παρατηρείται, οι ροές από τις γραμμές των συνοριακών ζυγών αναχώρησης και αντίστοιχα οι φαινόμενες ωμικές αγωγιμότητες αυτών ακολουθούν ευσταθή απόκριση αντικατοπτρίζοντας τη ράμπα αύξησης της ζήτησης. Είναι εμφανές ότι για αυξανόμενη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα προκύπτει αύξηση στην μεταφερόμενη ροή ισχύος, πράγμα που υποδηλώνει ότι οι αντίστοιχοι δείκτες *RLI* αναμένονται να έχουν θετικές τιμές. Κάτι τέτοιο επαληθεύεται στο σχήμα 4-32, όπου απεικονίζονται οι δείκτες *RLI* για τις γραμμές διαδρόμου από τον ηλεκτρονόμο που είναι εγκατεστημένος στο άκρο αναχώρησής τους.

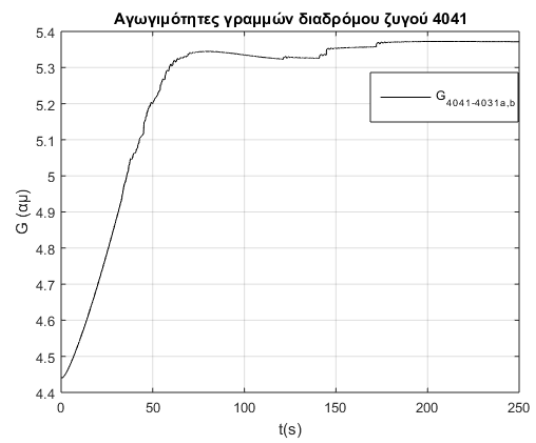


Σχήμα 4-32 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: *RLI* ζυγών αναχώρησης

Αντίστοιχες είναι και οι αποκρίσεις των ενεργών ισχύων άφιξης και των αντίστοιχων φαινομένων αγωγιμοτήτων, όπως μπορούν να παρατηρηθούν στα σχήματα 4-33-4-35.

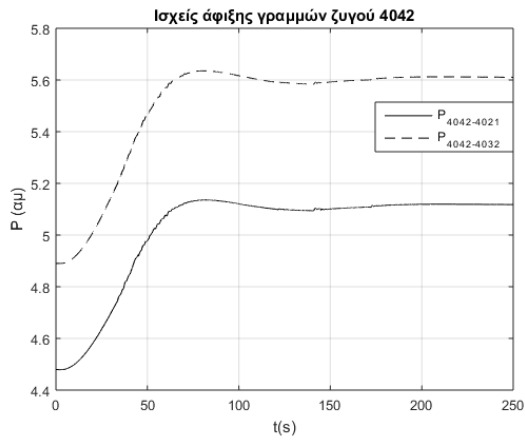


(a)

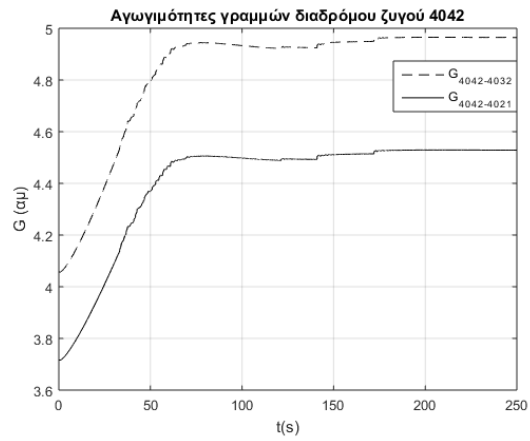


(b)

Σχήμα 4-33 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Ισχύς άφιξης και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που συνδέονται στον ζυγό 4041

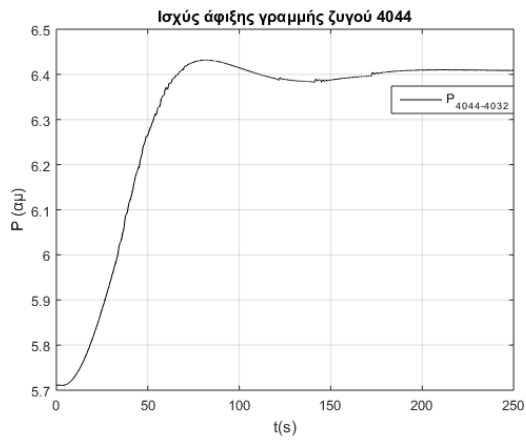


(a)

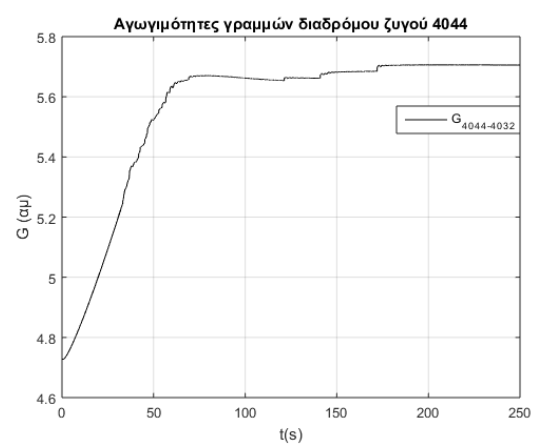


(b)

Σχήμα 4-34 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Ισχύς άφιξης και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που συνδέονται στον ζυγό 4042



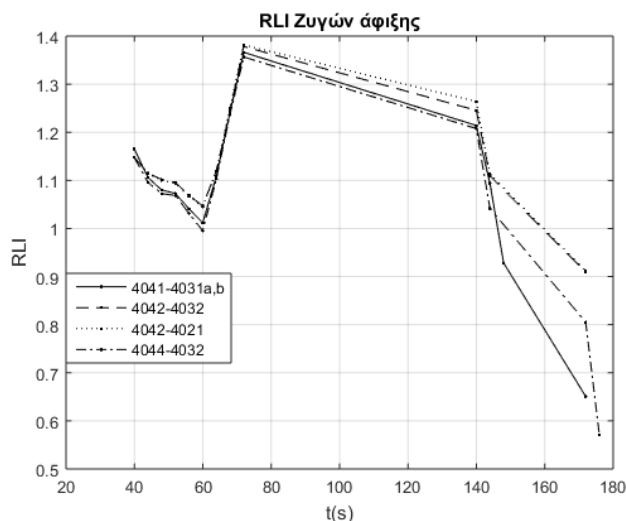
(a)



(b)

Σχήμα 4-35 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: (a) Ισχύς άφιξης και (b) φαινόμενες αγωγιμότητες γραμμών διαδρόμου που συνδέονται στον ζυγό 4044

Στο σχήμα 4-36 παρατίθενται οι αποκρίσεις των δεικτών RLI στο άκρο άφιξης των γραμμών του διαδρόμου. Είναι εμφανές ότι και στο άκρο άφιξης των γραμμών του διαδρόμου οι ηλεκτρονόμοι διατηρούν αρκετά υψηλές τιμές, και συνεπώς η πιθανότητα σήμανσης λανθασμένου συναγερμού ελαχιστοποιείται.



Σχήμα 4-36 Σενάριο σημείου B, αύξηση ζήτησης 5%: RLI ζυγών άφιξης

Από τις προσομοιώσεις της παρούσας ενότητας, διαπιστώθηκε αναφορικά με τις περιπτώσεις ευσταθών αποκρίσεων του συστήματος, ότι τόσο ο δείκτης NLI όσο και ο δείκτης RLI συμπεριφέρονται αποδεκτά, διατηρώντας επαρκή περιθώρια ώστε να αποφεύγεται η σήμανση εσφαλμένου συναγερμού.

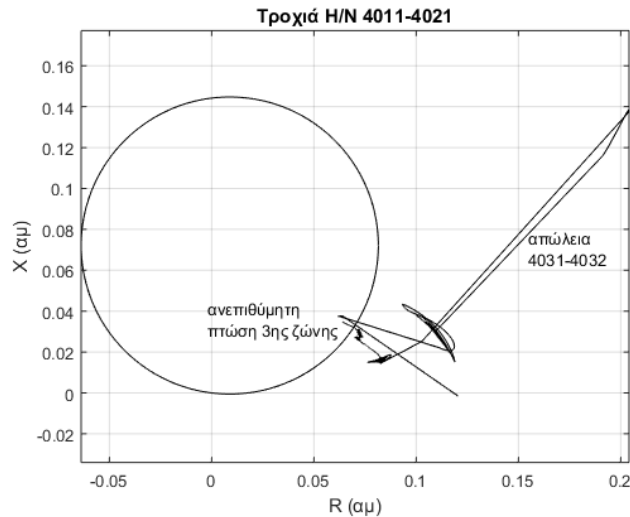
4.3.4 Αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμής από εντολή 3^{ης} ζώνης προστασίας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται ένα σενάριο στο οποίο εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης του δείκτη RLI για αποτροπή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμής μεταφοράς, λόγω παραβίασης της τρίτης ζώνης προστασίας των αντίστοιχων ηλεκτρονόμων αποστάσεως που την επιτηρούν.

Οι προσομοιώσεις της παρούσας ενότητας έχουν εκτελεστεί στο λογισμικό DigSilent PowerFactory στα πλαίσια της εργασίας [NMV18]. Για τους σκοπούς της ανάλυσης έχουν χρησιμοποιηθεί μοντέλα ηλεκτρονόμων αποστάσεως τύπου Mho από τις βιβλιοθήκες του λογισμικού PowerFactory με ρυθμίσεις που μπορούν να βρεθούν στην εργασία [Nik16]. Σημειώνεται, ότι στην παρούσα ανάλυση έχουν απενεργοποιηθεί οι ζώνες παραβίασης φορτίου για την καλύτερη αξιολόγηση της συγκεκριμένης δυνατότητας από τον δείκτη RLI .

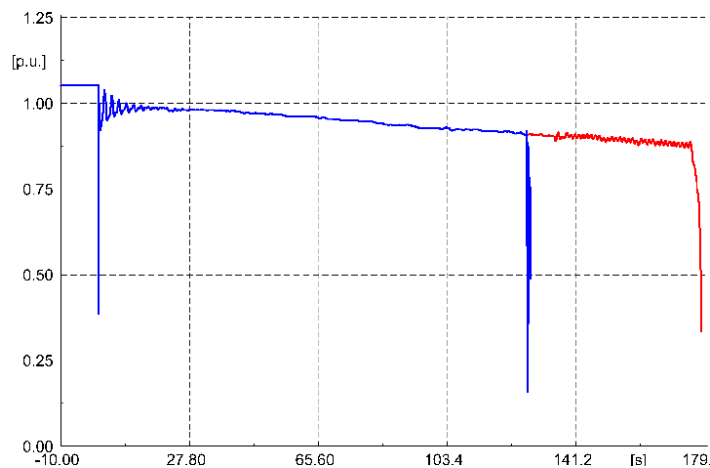
Το σενάριο προσομοίωσης έχει παρθεί από την εργασία [VSA15], και πιο συγκεκριμένα προσομοιώνεται τριφασικό βραχυκύκλωμα στο μέσον της γραμμής 4031-4032 τη χρονική στιγμή $t=1s$, το οποίο εκκαθαρίζεται 50ms αργότερα από την ενεργοποίηση του στοιχείου της πρώτης ζώνης προστασίας των εγκατεστημένων ηλεκτρονόμων αποστάσεως της γραμμής. Το σύστημα ανταπεξέρχεται αμέσως μετά την εκκαθάριση του σφάλματος εξασφαλίζοντας βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, προτού ξεκινήσει ο μηχανισμός των ΣΑΤΥΦ να επαναφέρει τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης και αποκαταστήσει έμμεσα την κατανάλωση στα προ διαταραχής επίπεδα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 4-37, η τρίτη ζώνη προστασίας του ηλεκτρονόμου αποστάσεως $R_{4011-4021}$ ενεργοποιείται λόγω εισχώρησης της μετρούμενης φαινόμενης σύνθετης αντίστασης Z εντός αυτής και δίνει εντολή αποσύνδεσης της γραμμής 4011-4021 τη χρονική στιγμή $t=126s$ από το στοιχείο της τρίτης ζώνης το οποίο καλύπτει ποσοστό 254% του μήκους της γραμμής. Η απώλεια της γραμμής 4011-4021 έχει ως συνέπεια τις αλληπάλληλες αποσυνδέσεις των γραμμών 4031-4041a, 4031-4041b, 4061-4041 και 4045-4062 προξενώντας κατάρρευση στο σύστημα. Η κατάρρευση του συστήματος επέρχεται στα 128 δευτερόλεπτα εξαιτίας της ταχείας αποδυνάμωσης του συστήματος από τις αλληπάλληλες ανεπιθύμητες αποσυνδέσεις γραμμών. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει αφενός την κρισιμότητα μοντελοποίησης στοιχείων προστασίας και αφετέρου την ανάγκη για αποφυγή ανεπιθύμητων δράσεων προστασίας σε καταστάσεις όπου το σύστημα λειτουργεί κοντά στα όρια φόρτισης.



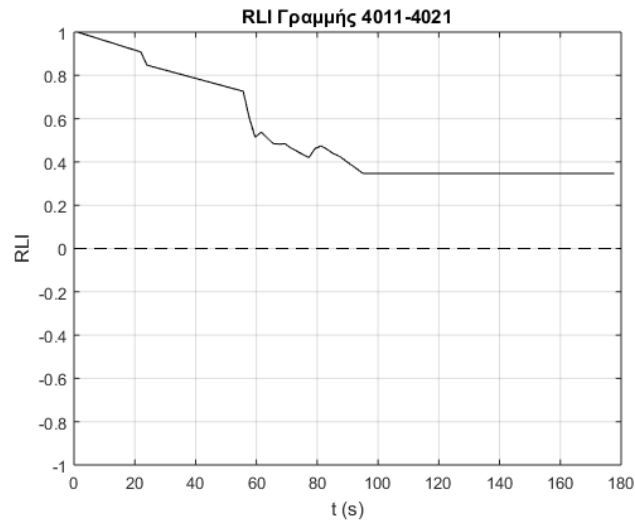
Σχήμα 4-37 Τροχιά φαινόμενης σύνθετης αντίστασης του ηλεκτρονόμου $R_{4011-4021}$

Το ίδιο σενάριο προσομοιώνεται αλλά με ενεργοποιημένη τη δυνατότητα απενεργοποίησης της τρίτης ζώνης κάθε ηλεκτρονόμου όταν ο δείκτης RLI της αντίστοιχης γραμμής γίνεται αρνητικός. Όπως μπορεί να φανεί στο σχήμα 4-38, η κατάρρευση δεν αποφεύγεται, αλλά μετατίθεται κατά περίπου 51 δευτερόλεπτα αργότερα, χρονικό διάστημα αρκετό για τη λήψη κατάλληλων μέτρων αντιμετώπισης από ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος.

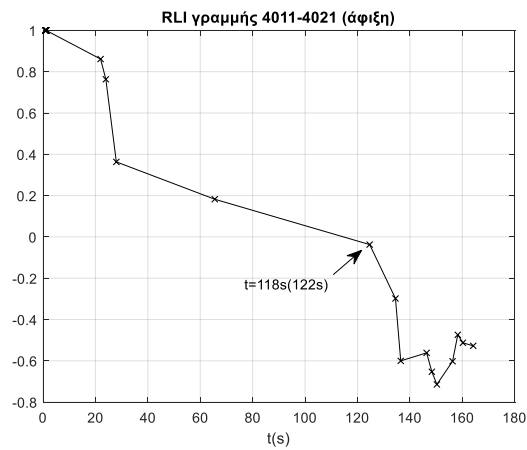


Σχήμα 4-38 Τάση ζυγού 4042 με και χωρίς τη δυνατότητα απενεργοποίησης 3^{ης} ζώνης ηλεκτρονόμου αποστάσεως

Στο σχήμα 4-39 απεικονίζεται η απόκριση του δείκτη RLI της γραμμής 4011-4021 στο άκρο του ζυγού αναχώρησης 4011. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο δείκτης δεν γίνεται αρνητικός, καθώς παύει να υπολογίζεται μετά τα περίπου 100 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, λόγω μείωσης της φαινόμενης αγωγιμότητας προς τα κατάντη του ζυγού 4011. Ωστόσο στο σχήμα 4-40 παρουσιάζεται ο δείκτης RLI της γραμμής 4011-4021 που υπολογίζεται στο άκρο του ζυγού 4021, ο οποίος γίνεται αρνητικός στο $t=118s(122s)$ και μπορεί να εμποδίσει την ενεργοποίηση της εντολής αποσύνδεσης της γραμμής λόγω του ηλεκτρονόμου $R_{4011-4021}$ που δίνεται στο $t=126s$, κερδίζοντας πολύτιμο χρόνο για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης και αποφυγής της κατάρρευσης.

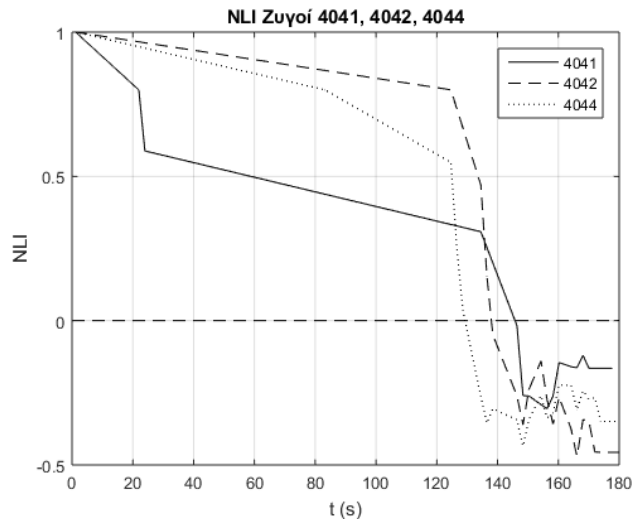


Σχήμα 4-39 Απόκριση *RLI* γραμμής 4011-4021 στο άκρο του ζυγού 4011



Σχήμα 4-40 Απόκριση *RLI* γραμμής 4011-4021 στο άκρο του ζυγού 4021

Η απόκριση των δεικτών *NLI* απεικονίζεται στο σχήμα 4-41. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο δείκτης του ζυγού 4044 γίνεται αρνητικός στο $t=125s(129s)$. Παρά το γεγονός ότι το χρονικό διάστημα της τάξης των 30 δευτερολέπτων είναι μικρό, επαρκεί για να λειτουργήσει επιτυχώς ένα σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος.



Σχήμα 4-41 Απόκριση NLI ζυγών 4041, 4042, 4044

Με έναν διάυλο επικοινωνίας μεταξύ του άκρου αναχώρησης και του άκρου άφιξης της γραμμής είναι δυνατόν να εμποδιστεί η εντολή αποσύνδεσης της γραμμής σε καταστάσεις ανάλογες όπως αυτή που παρουσιάστηκε στην παρούσα ενότητα, καθώς όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σε αντίθετη περίπτωση επέρχεται άμεση επιτάχυνση της κατάρρευσης του συστήματος, λόγω αλληπάλληλων αποσυνδέσεων γραμμών.

4.4 Εφαρμογή μεθόδου εκτίμησης περιθωρίου στο σύστημα Nordic

Στην παρούσα ενότητα η εξετάζεται η μέθοδος εκτίμησης του περιθωρίου ευστάθειας τάσης, που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.5, στους συνοριακούς ζυγούς άφιξης της κεντρικής περιοχής του συστήματος δοκιμών IEEE Nordic, δεδομένου ότι όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.5, η μέθοδος είναι τοπική και μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο υποσταθμού χωρίς την ανάγκη επικοινωνίας με απομακρυσμένο εξοπλισμό.

Η μέθοδος εξετάζεται στα σενάρια προσομοίωσης των ενότητων 4.2.1 και 4.2.2.1, που προσομοιώνουν βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4032 και απώλεια γραμμής 4032-4044 στο ανασφαλές σημείο λειτουργίας A και στο ασφαλές σημείο λειτουργίας B αντίστοιχα. Τα αρχικά σημεία λειτουργίας τροποποιούνται ωστόσο ελαφρώς, προκειμένου να επιτευχθεί μία αρχικοποίηση των δεικτών αστάθειας NLI στους συνοριακούς ζυγούς με συστηματικό τρόπο. Η τροποποίηση των σεναρίων περιγράφεται λεπτομερέστερα στις παρακάτω ενότητες.

4.4.1 Τροποποιημένο σημείο λειτουργίας A

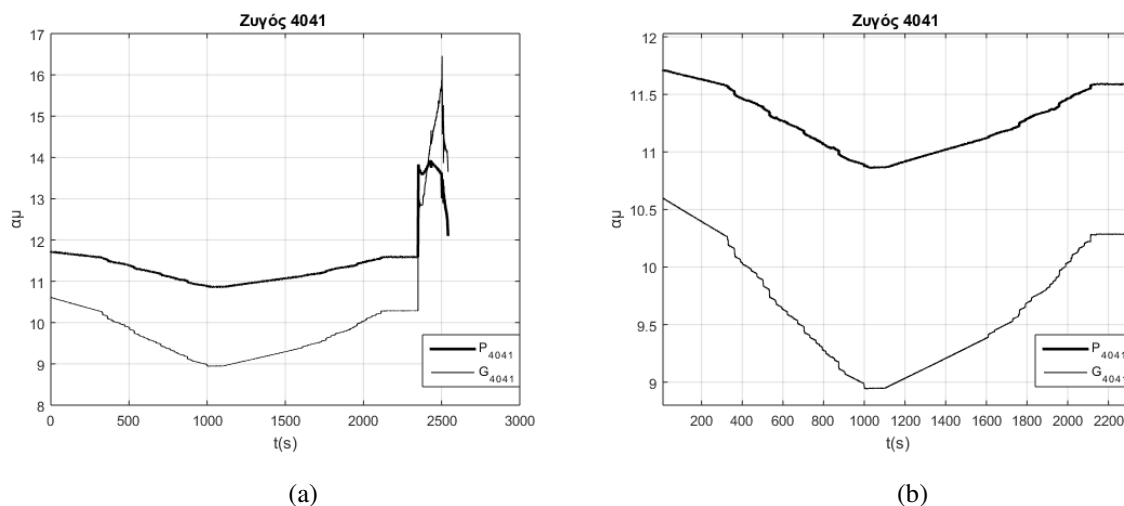
4.4.1.1 Αρχικοποίηση δείκτη NLI

Το σενάριο προσομοίωσης της ενότητας 4.2.1, στο οποίο το σύστημα ισορροπεί αρχικά στο σημείο λειτουργίας A , τροποποιείται με σκοπό την αρχικοποίηση του δείκτη NLI σε ένα εύρος τιμών που θα αντιστοιχεί σε τυπική λειτουργία ενός συστήματος προτού εμφανιστεί ένα απρόβλεπτο συμβάν. Για τον σκοπό αυτό προσομοιώνεται αργή μεταβολή στη ενεργό και άεργο ζήτηση της κεντρικής περιοχής του συστήματος όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Με αφετηρία το σημείο A εφαρμόζεται ράμπα μείωσης της ενεργού και αέργου ζήτησης στα φορτία της κεντρικής περιοχής του συστήματος με σταθερό ρυθμό 7% και διάρκειας 1000 δευτερολέπτων, την οποία διαδέχεται αντίστοιχη ράμπα αύξησης ηλεκτρικής ζήτησης ίδιου ρυθμού και διάρκειας. Το συνολικό αποτέλεσμα των συγκεκριμένων διαταραχών είναι η επαναφορά του συστήματος περίπου στο αρχικό σημείο λειτουργίας, αλλά με τους δείκτες NLI των συνοριακών ζυγών άφιξης αρχικοποιημένους, λόγω της αυξομειώσεως της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή. Μετά το πέρας της ράμπας αύξησης και αφού το σύστημα εξασφαλίσει νέο μακροπρόθεσμο σημείο λειτουργίας, εφαρμόζεται η διαταραχή της ενότητας 4.2.1, δηλαδή τριφασικό βραχυκύκλωμα στη γραμμή 4032-4044 στο άκρο της γραμμής πλησίον του ζυγού 4032, το

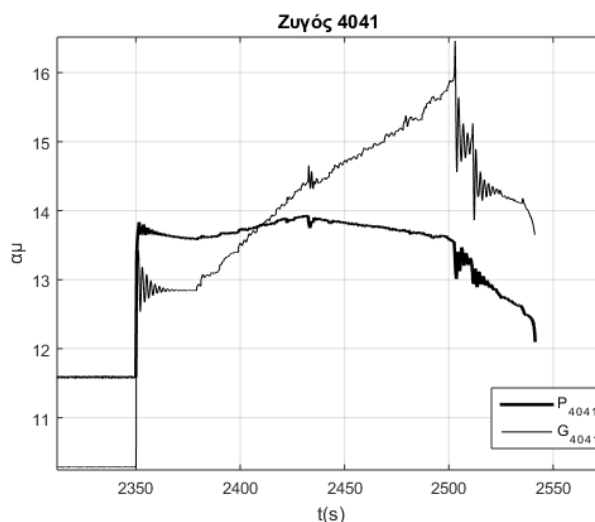
οποίο διαρκεί 100ms και απομονώνεται με την αποσύνδεση της γραμμής 4032-4044. Δεδομένου ότι το σύστημα ισορροπεί σε παρόμοιο σημείο λειτουργίας με το *A*, συνεχίζει να είναι ανασφαλές στη συγκεκριμένη διαταραχή, με αποτέλεσμα να προκαλείται αστάθεια τάσης και κατάρρευση, με την ίδια αλληλουχία διακριτών συμβάντων, όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2.1.

Στο σχήμα 4-42 απεικονίζεται η απόκριση της ενεργού ισχύος άφιξης και φαινόμενης αγωγιμότητας του ζυγού 4041. Στο σχήμα 4-42 (a) απεικονίζεται η συνολική χρονική απόκριση της προσομοίωσης ενώ στο σχήμα 4-42 (b) έχει δοθεί έμφαση στο αρχικό διάστημα κατά το οποίο εμφανίζεται η ράμπα μείωσης και αύξησης της ζήτησης φορτίου κεντρικής περιοχής. Στο σχήμα 4-42 (b) μπορούν επίσης να παρατηρηθούν διακριτές μεταβολές τόσο στην ενεργό ισχύ όσο και στην αγωγιμότητα, γεγονός που αποδίδεται σε δράσεις από τα ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής.



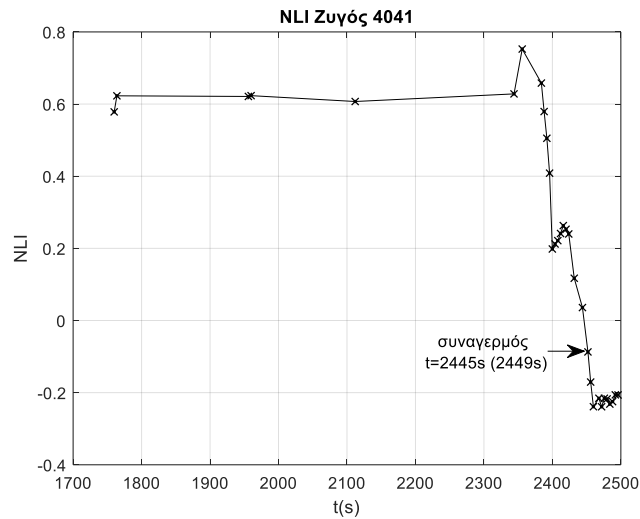
Σχήμα 4-42 Σενάριο παραλλαγής σημείου *A*: Ζυγός άφιξης 4041, ενεργός ισχύς και φαινόμενη αγωγιμότητα (a) ολική απόκριση και (b) κατά την αρχικοποίηση του δείκτη *NLI*

Η διαταραχή εφαρμόζεται στο $t=2350$ s όπου και μπορούν να παρατηρηθούν απότομες αυξήσεις ισχύος και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας του συνοριακού ζυγού 4041 στο σχήμα 4-42(a) και του ζυγού 4042 στο σχήμα 4-45, ενώ το σύστημα καταρρέει στο $t=2542$ s. Στο σχήμα 4-43 παρουσιάζεται η απόκριση των μεγεθών G και P του συνοριακού ζυγού 4041 δίνοντας έμφαση στο διάστημα μετά την εμφάνιση της διαταραχής και παρατηρείται ότι ενώ η αγωγιμότητα διατηρεί μία περίπου σταθερά ανοδική κλίση, η ενεργός ισχύς που διέρχεται από τον ζυγό 4041 προσεγγίζει μέγιστο περίπου στο $t=2440$ s.

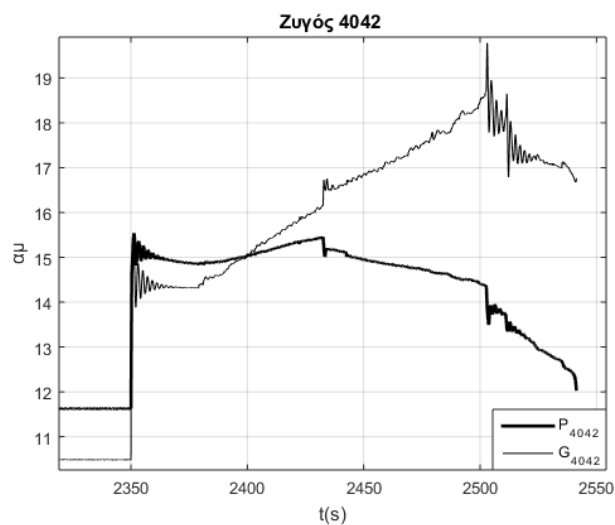


Σχήμα 4-43 Σενάριο παραλλαγής σημείου *A*: Ζυγός 4041, απόκριση P_{4041} και G_{4041} μετά την απώλεια γραμμής 4032-4044

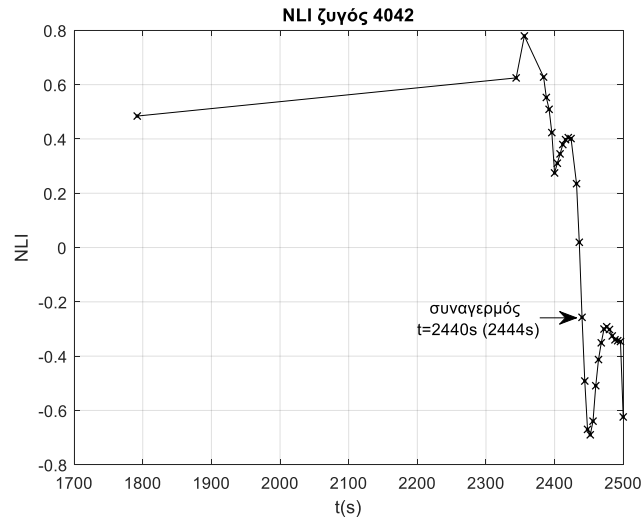
Στο σχήμα 4-44 απεικονίζεται η απόκριση του *NLI* στον συνοριακό ζυγό 4041. Μπορεί να παρατηρηθεί η αρχικοποίησή του κατά τη διάρκεια της αύξησης της ζήτησης φορτίου, καθώς και η αλλαγή προσήμου του περίπου στο $t=2445\text{s}$ (2449s). Αντίστοιχη είναι και η χρονική εξέλιξη του *NLI* στον συνοριακό ζυγό 4042 (σχήμα 4-46), ο οποίος αρχικοποιείται πρώτα από την ανοδική ράμπα της κατανάλωσης και αλλάζει πρόσημο στο $t=2440\text{s}$ (2444s).



Σχήμα 4-44 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: *NLI* ζυγού 4041



Σχήμα 4-45 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: Ζυγός 4042, απόκριση ενεργού ισχύος και φαινόμενης αγωγιμότητας μετά την απώλεια γραμμής 4032-4044

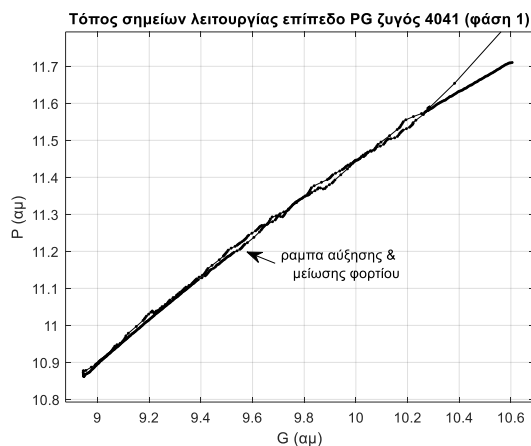


Σχήμα 4-46 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: NLI ζυγού 4042

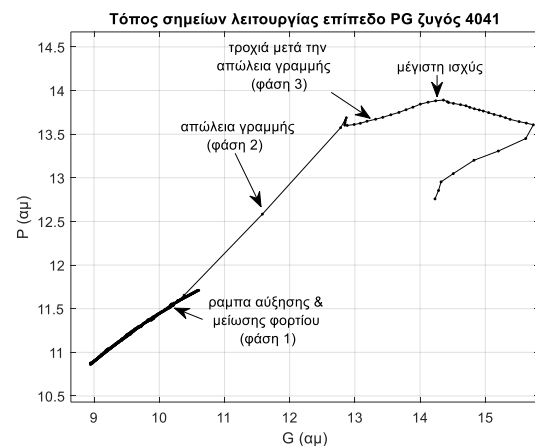
4.4.1.2 Υπολογισμός περιθωρίου

Με δεδομένο ότι ο ζυγός 4044 παύει να είναι συνοριακός μετά την αποσύνδεση της γραμμής 4032-4044, η μέθοδος εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης εφαρμόζεται στους εναπομείναντες συνοριακούς ζυγούς της κεντρικής περιοχής 4041 και 4042.

Η πορεία που ακολουθεί το σύστημα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μέχρι και την κατάρρευση ($t=2542s$), μπορεί, να χωριστεί σε τρεις διακριτές φάσεις και πιο συγκεκριμένα, (α) στη φάση 1 κατά την οποία εμφανίζεται στο σύστημα η καθοδική και ανοδική ράμπα ζήτησης της κεντρικής περιοχής, (β) στη φάση 2 στην οποία εμφανίζεται το βραχυκύκλωμα και η απώλεια της γραμμής 4032-4044 μέχρι και τη χρονική στιγμή που έχουν αποσβεστεί επαρκώς οι ταλαντώσεις του συστήματος και (γ) στη φάση 3, όπου το σύστημα οδηγείται προς την αστάθεια λόγω του μηχανισμού αποκατάστασης της κατανάλωσης της κεντρικής περιοχής από τα τοπικά ΣΑΤΥΦ. Στα σχήματα 4-47 και 4-48 απεικονίζεται ο τόπος των σημείων λειτουργίας ($G_{f,4041}, P_{f,4041}$) για τον ζυγό 4041 και ($G_{f,4042}, P_{f,4042}$) για τον ζυγό 4042 αντίστοιχα στο επίπεδο φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας – ενεργού ισχύος GP . Σημειώνεται ότι τα σημεία προκύπτουν από την απόκριση των μεγεθών G_f και P_f , δηλαδή κατόπιν εφαρμογής μετασχηματισμού STFT, για λόγους εξομάλυνσης τροχιάς λόγω των βραχυπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος αλλά και του θορύβου μετρήσεων. Οι παράμετροι για τον μετασχηματισμό STFT είναι πανομοιότυπες με αυτές του πίνακα 4-3.

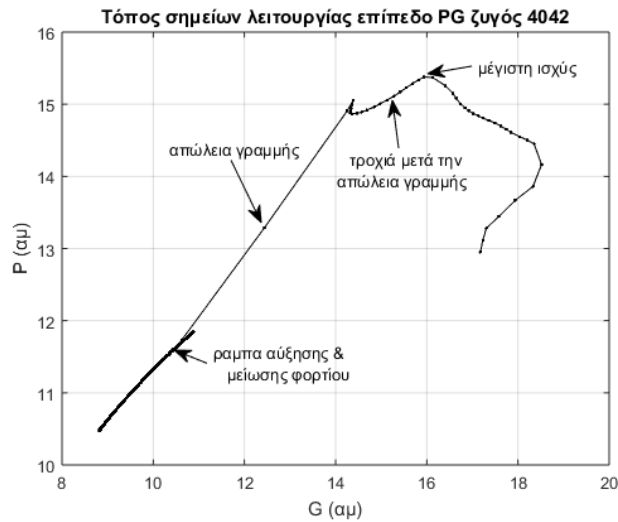


(a)



(b)

Σχήμα 4-47 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: Σημεία λειτουργίας συστήματος επίπεδο $G - P$ ζυγός 4041 (a) φάση 1 προ διαταραχής, (b) συνολική τροχιά



Σχήμα 4-48 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: Σημεία λειτουργίας συστήματος επίπεδο $G - P$ ζυγός 4042

Η φάση 1 αντιστοιχεί στα πρώτα 2350 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, όπου από τα σχήματα 4-47(a) και 4-48 παρατηρείται ότι η τροχιά ακολουθεί πορεία που προσεγγίζει την ευθεία γραμμή λόγω της ράμπας μείωσης και αύξησης του φορτίου, με το σύστημα τελικά να επανέρχεται σε γειτονικό σημείο λειτουργίας με το αρχικό. Στη συνέχεια, κατά τη φάση 2 παρατηρείται μία διακριτή μετάβαση λόγω της απώλειας της γραμμής 4032-4044, με το σημείο λειτουργίας να μετακινείται απότομα προς αρκετά μεγαλύτερες τιμές αγωγιμότητας και ενεργού ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, για τον ζυγό 4041 η ωμική αγωγιμότητα μετακινείται από 10,4 αμ σε 12,75 αμ και η ενεργός ισχύς από 11,6 αμ σε 13,6 αμ, ενώ αντίστοιχα για τον ζυγό 4042 η αγωγιμότητα μεταβάλλεται από 10,49 αμ σε 14,25 αμ και η ισχύς άφριξης από 11,61 αμ σε 14,91 αμ.

Τέλος, κατά τη διάρκεια της τρίτης φάσης, η τροχιά καμπυλώνει και φτάνει σε μέγιστη τιμή $P_{f,max,4041} = 13,9$ αμ για τον ζυγό 4041 και $P_{f,max,4042} = 15,38$ αμ για τον ζυγό 4042 αντίστοιχα. Κατά τη συγκεκριμένη περίοδο, οι δείκτες NLI των ζυγών 4041 και 4042 σταδιακά μειώνονται, όπως παρατηρείται στα σχήματα 4-44 και 4-46 προτού αλλάξουν πρόσημο και εκδώσουν σήμα συναγερμού. Οι σταδιακές μειώσεις των δεικτών NLI έχουν ως αποτέλεσμα την ικανοποίηση των κριτηρίων (3-52) και (3-53), με αποτέλεσμα τον υπολογισμό εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης μέσω πολυωνύμων παρεμβολής, όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 3.5. Τα υπολογιζόμενα πολυώνυμα παρεμβολής για τον ζυγό 4041 παρατίθενται στον πίνακα 4-7, ενώ για τον ζυγό 4042 στον πίνακα 4-8 αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, οι στήλες G_{k-2} έως P_k περιέχουν τα σημεία από τα οποία πρέπει κάθε πολυώνυμο να περάσει, ενώ ο χρόνος υπολογισμού t_k του κάθε πολυωνύμου ταυτίζεται με τον υπολογισμό του NLI που αναφέρεται στη στιγμή t_k και συνεπώς υπολογίζεται τη στιγμή $t_k + M/2$. Η στήλη $\hat{P}$ του πίνακα 4-7 περιλαμβάνει τη μέγιστη τιμή κάθε πολυωνύμου, ενώ στην επόμενη στήλη περιέχεται το σχετικό σφάλμα που προκύπτει από το κάθε πολυώνυμο παρεμβολής ως προς τη μέγιστη τιμή $P_{f,max}$ που καταγράφηκε στην προσομοίωση για κάθε συνοριακό ζυγό άφριξης.

Πίνακας 4-7 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: Πολυώνυμα παρεμβολής, $\hat{P}$, $P_{f,max}$ και σχετικό σφάλμα στον συνοριακό ζυγό 4041

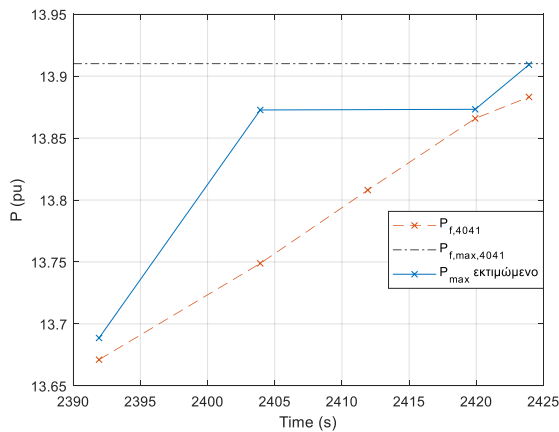
#	Χρόνος υπολογισμού t_k (s)	G_{k-2} (αμ)	G_{k-1} (αμ)	G_k (αμ)	P_{k-2} (αμ)	P_{k-1} (αμ)	P_k (αμ)	$\hat{P}$ (αμ)	$\frac{\hat{P} - P_{f,max}}{P_{f,max}}$ (%)	$NLI_{4041} < 0$ (s)
1	2392 (2396)	13.083	13.186	13.318	13.624	13.648	13.671	13.69	-1.51%	
2	2404 (2408)	13.428	13.552	13.675	13.693	13.722	13.749	13.87	-0.22%	2445
3	2420 (2424)	13.888	14.003	14.122	13.808	13.843	13.866	13.87	-0.22%	(2449)
4	2424 (2428)	14.003	14.122	14.239	13.843	13.866	13.883	13.91	0.07%	

Πίνακας 4-8 Πολυώνυμα παρεμβολής, $\hat{P}$, $P_{f,max}$ και σχετικό σφάλμα στον συνοριακό ζυγό 4042 (σενάριο παραλλαγής σημείου A)

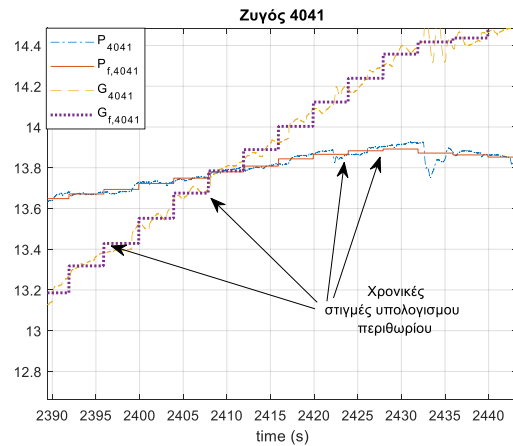
#	Χρόνος υπολογισμού t_k (s)	G_{k-2} (αμ)	G_{k-1} (αμ)	G_k (αμ)	P_{k-2} (αμ)	P_{k-1} (αμ)	P_k (αμ)	$\hat{P}$ (αμ)	$\frac{\hat{P}-P_{f,max}}{P_{f,max}}$ (%)	$NLI_{4042} < 0$
1	2420 (2424)	15.553	15.689	15.820	15.230	15.288	15.338	15.53	0.98%	2440
2	2424 (2428)	15.689	15.820	15.939	15.288	15.338	15.378	15.52	0.91%	(2444)

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί τόσο από τους πίνακες 4-7 και 4-8, αλλά και από τα σχήματα 4-49 (a) και 4-50(a), η μέθοδος υπολογίζει τέσσερις συνολικά φορές το περιθώριο ευστάθειας τάσης στον συνοριακό ζυγό 4041 και δύο φορές στον συνοριακό ζυγό 4042. Οι αποκλίσεις σε σχέση με το πραγματικό μέγιστο, το οποίο επιτυγχάνεται τη στιγμή 2432s για τον ζυγό 4041 και 2428s για τον ζυγό 4042 απέχουν λιγότερο από 2% και 1% αντίστοιχα, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τους πίνακες 4-7 και 4-8. Τα δε χρονικά περιθώρια όμως είναι μικρά και συγκεκριμένα 40s για τον ζυγό 4041 και 8s για τον ζυγό 4042 από τις χρονικές στιγμές επίτευξης μέγιστης ισχύος, ή 53s και 20s από τις χρονικές στιγμές έκδοσης του αντίστοιχου σήματος συναγερμού, γεγονός που αφήνει περιθώρια για λήψη μόνο αυτοματοποιημένων μέτρων αντιμετώπισης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη χρονική στιγμή $t=2392s(2396s)$ του πρώτου υπολογισμού περιθωρίου ευστάθειας τάσης από τον ζυγό 4041, η τάση του ζυγού 4041 είναι λίγο υψηλότερη από 1αμ, γεγονός που αναδεικνύει τη δυνατότητα της μεθόδου να διακρίνει την επικείμενη αδυναμία περαιτέρω εξυπηρέτησης της κατανάλωσης μίας περιοχής ενόσω οι τάσεις είναι ακόμη πλησίον της ονομαστικής τους τιμής.



(a)



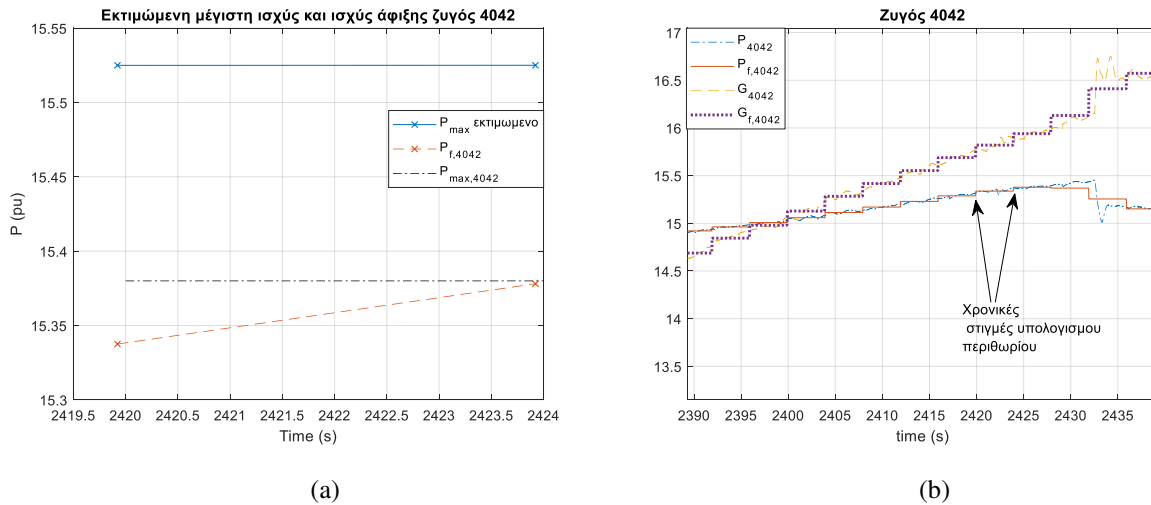
(b)

Σχήμα 4-49 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: (a) $\hat{P}$, $P_{f,4041}$, $P_{f,max,4041}$, (b) P_{4041} , $P_{f,4041}$, G_{4041} , $G_{f,4041}$ και χρονικές στιγμές υπολογισμών περιθωρίου ζυγού 4041

Στο σχήμα 4-49(a) παρουσιάζονται τα μεγέθη $\hat{P}$, P_f και $P_{f,max,4041}$ για τον συνοριακό ζυγό 4041, όπου και μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μέγιστη απόκλιση εκτιμώμενου μεγίστου από τη μέγιστη τιμή $P_{f,max,4041}$ δεν υπερβαίνει τα 25MW, αν και το περιθώριο αρχικά υποεκτιμάται σε σχέση με την πραγματική μέγιστη τιμή, ενώ στη συνέχεια προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή $P_{f,max,4041}$. Στο σχήμα 4-49(b) παρουσιάζεται η χρονική απόκριση της ενεργού ισχύος άφιξης και φαινόμενης ωμικής αγωγιμότητας του ζυγού 4041 πριν και μετά την εφαρμογή του φίλτρου, καθώς και οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί του περιθωρίου από τη μέθοδο. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν τα μεγέθη $\hat{P}$ και P_f στον ζυγό 4042 (σχήμα 4-50(a)), με τη διαφορά ότι στον συγκεκριμένο συνοριακό ζυγό παρατηρείται μία σταθερή υπερεκτίμηση του περιθωρίου κατά περίπου 20 MW.

Σημειώνεται, ότι ο υπολογισμός περιθωρίου ευστάθειας ή η τυχόν προσωρινή παραβίαση του εκτιμώμενου μεγίστου $\hat{P}$ δεν συνιστά συναγερμό για το σύστημα, καθώς αυτός ενεργοποιείται μόνο όταν ο δείκτης NLI ενός συνοριακού ζυγού γίνει αρνητικός. Ωστόσο, ο υπολογισμός του περιθωρίου σε έναν συνοριακό ζυγό μπορεί να εκληφθεί ως προειδοποίηση προς στους χειριστές του συστήματος, για τη λήψη

μέτρων ενίσχυσης του συστήματος, ή για την όπλιση κατάλληλου σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος από κατάρρευση τάσης.



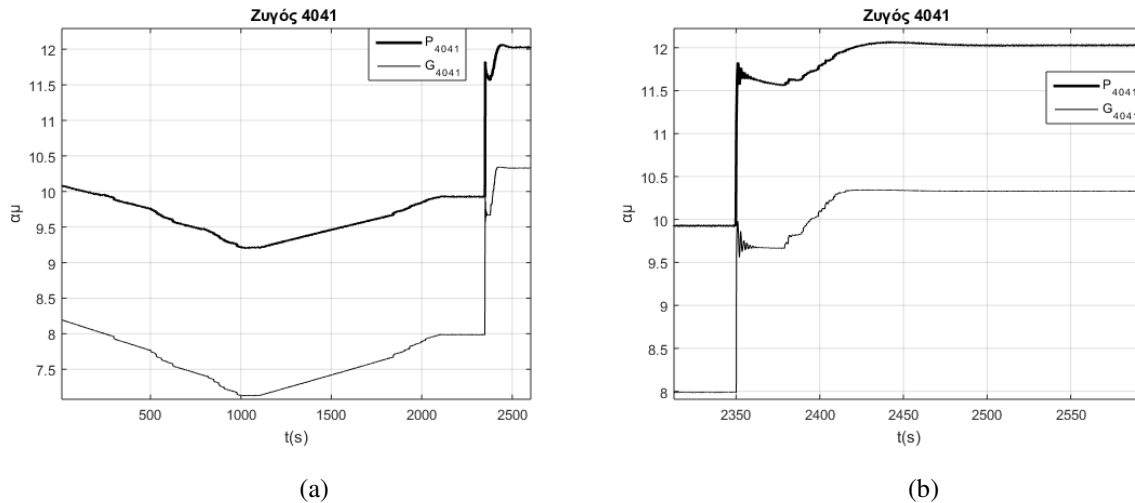
Σχήμα 4-50 Σενάριο παραλλαγής σημείου A: (a) $\hat{P}$, $P_{f,4042}$, $P_{f,max,4042}$, (b) P_{4042} , $P_{f,4042}$, G_{4042} , $G_{f,4042}$ και χρονικές στιγμές υπολογισμών περιθωρίου ζυγού 4042

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού περιθωρίου ευστάθειας τάσης μπορεί να υπολογίσει προσεγγιστικά σε πραγματικό χρόνο το περιθώριο αύξησης της εξυπηρέτησης μίας περιοχής που πλησιάζει σε κατάσταση μέγιστης κατανάλωσης από μετρήσεις σε έναν συνοριακό ζυγό της. Τα σφάλματα υπολογισμών που προκύπτουν είναι της τάξης του 1-1.5%, αν και τα χρονικά περιθώρια είναι μικρά ώστε να δώσουν τη δυνατότητα λήψης προβλεπτικών μέτρων από τους χειριστές του συστήματος, και συνεπώς ευνοούν περισσότερο τη λήψη αυτοματοποιημένων μέτρων με κατάλληλη εκμετάλλευση ενός σχήματος προστασίας ακεραιότητας συστήματος.

4.4.2 Τροποποιημένο σημείο λειτουργίας B

Στα πλαίσια ελέγχου της συμπεριφοράς της μεθόδου υπολογισμού περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε διαταραχές για τις οποίες το σύστημα είναι ασφαλές, τροποποιείται το σενάριο προσομοίωσης της ενότητας 4.2.2.1, στο οποίο το σύστημα ισορροπούσε αρχικά στο σημείο λειτουργίας B. Η τροποποίηση είναι παρόμοια με αυτήν που περιγράφηκε στην ενότητα 4.4.1. Εφαρμόζεται αρχικά ράμπα μείωσης και αύξησης της ζήτησης της κεντρικής περιοχής, με σκοπό την αρχικοποίηση των δεικτών NLI , ενώ στη συνέχεια επιβάλλεται βραχυκύκλωμα και απώλεια της γραμμής 4032-4044 τη στιγμή $t=2350s$. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από τα σχήματα 4-51 και 4-54, τόσο η φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα όσο και η ενεργός ισχύς άφιξης στους ζυγούς 4041 και 4042 παρουσιάζουν παρόμοια εξέλιξη στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ κατά τη στιγμή της διαταραχής παρατηρείται έντονη αύξηση και στα δύο μεγέθη, καθώς οι εναπομείναντες συνοριακοί ζυγοί πρέπει να αναλάβουν σημαντικό ποσοστό της ισχύος που αποστέλλοταν από τη γραμμή 4032-4044. Όμοια με την ανάλυση της ενότητας 4.4.1, η χρονική απόκριση του συστήματος μπορεί να διαχωριστεί σε τρεις φάσεις, (a) τη φάση αυξομειώσεως της ζήτησης για την αρχικοποίηση των δεικτών NLI , (b) τη φάση της διαταραχής και (c) τη φάση της αποκατάστασης και τελικής κατάρρευσης.

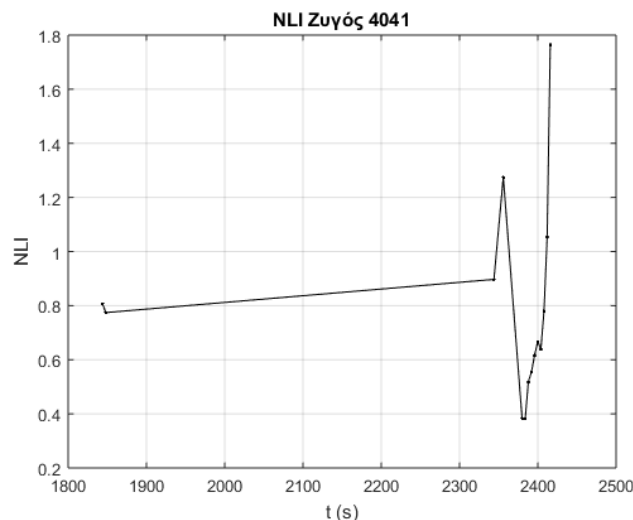
Στα σχήματα 4-52 και 4-55 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των δεικτών NLI στους ζυγούς 4041 και 4042 αντίστοιχα, όπου και είναι εμφανές ότι αυτοί διατηρούν αρκετά υψηλές τιμές, ώστε να μην προμηνύεται αδυναμία εξυπηρέτησης της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή.



Σχήμα 4-51 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: Ζυγός άφιξης 4041, ενεργός ισχύς και φαινόμενη αγωγιμότητα (a) ολική απόκριση και (b) μετά την απώλεια γραμμής 4032-4044

Είναι εμφανές από τα σχήματα 4-51 και 4-54 ότι ο μηχανισμός αποκατάστασης της ζήτησης από την ενεργοποίηση των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής κατά την τρίτη φάση της προσομοίωσης είναι ευσταθής, καθώς για αυξανόμενη φαινόμενη ωμική αγωγιμότητα αυξάνεται παρόμοια και η ενεργός ισχύς άφιξης από τους συνοριακούς ζυγούς. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται και στην απόκριση του *NLI* των δύο συνοριακών ζυγών (σχήματα 4-52 και 4-55), καθώς αυτοί δεν παρουσιάζουν πτωτική πορεία, παρά μόνο για έναν συγκεκριμένο υπολογισμό, γεγονός που αποδίδεται στη δυναμική του συστήματος αμέσως μετά την ισορροπία των βραχυπρόθεσμων δυναμικών λόγω της διαταραχής.

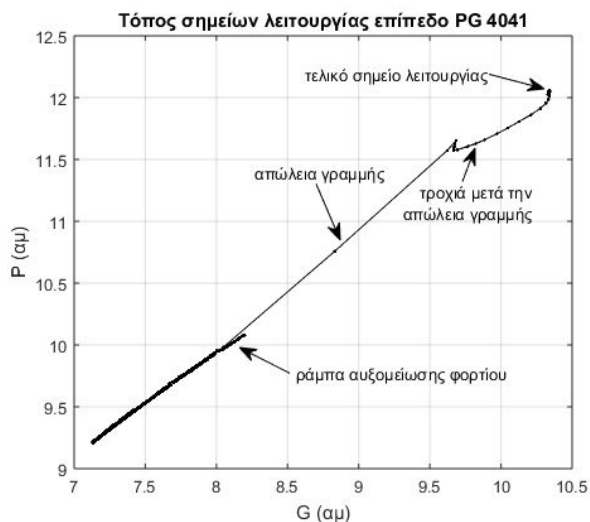
Το γεγονός ότι οι δείκτες *NLI* δεν παρουσιάζουν διαδοχική μείωση συνεπάγεται την μη ικανοποίηση των συνθηκών (3-52) και (3-53), με αποτέλεσμα η μέθοδος υπολογισμού περιθωρίου ευστάθειας τάσης να παραμένει αδρανής. Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό, καθώς ο υπολογισμός περιθωρίου θα πρέπει να εκλαμβάνεται ως μία προειδοποίηση προς το κέντρο ελέγχου ότι ανιχνεύτηκε μία πτωτική τάση εξυπηρέτησης της κατανάλωσης μίας περιοχής, πράγμα που προμηνύει πιθανή αδυναμία περαιτέρω αύξησης της κατανάλωσης και επερχόμενη αστάθεια τάσης.



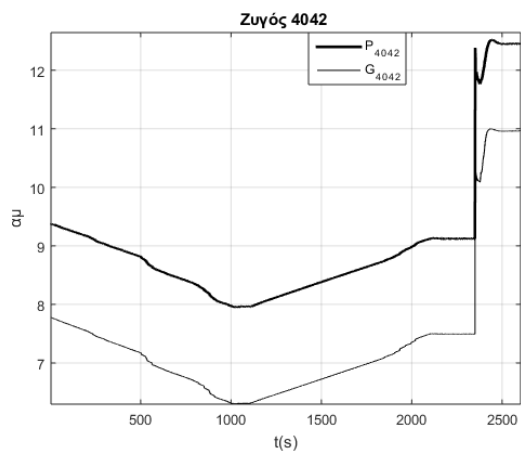
Σχήμα 4-52 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: *NLI* ζυγού 4041

Οι τροχιές των σημείων λειτουργίας στο επίπεδο *GP* για τα μεγέθη $P_{f,4041}$ - $G_{f,4041}$ του ζυγού 4041 και $P_{f,4042}$ - $G_{f,4042}$ του ζυγού 4042 αντίστοιχα απεικονίζονται στα σχήματα 4-53 και 4-56 αντίστοιχα, όπου μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απόκριση μέχρι και τη διαταραχή της απώλειας γραμμής 4032-4044 είναι παρόμοια με

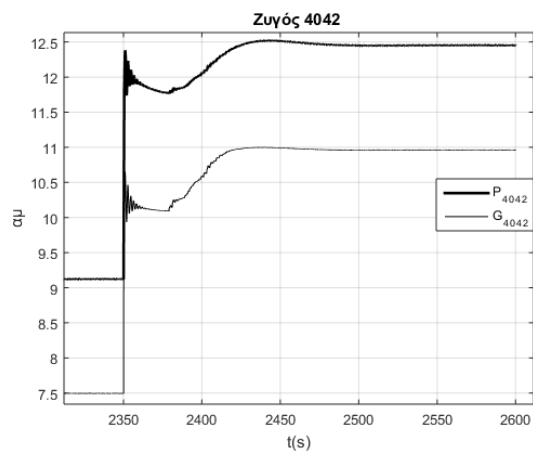
αυτή του σεναρίου της ενότητας 4.4.1 (σχήματα 4-47 και 4-48). Στη συνέχεια οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως κατά τις φάσεις αποκατάστασης της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή λόγω λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, όπου στην προκειμένη περίπτωση οι τροχιές καταλήγουν σε μακροπρόθεσμο σημείο λειτουργίας του συστήματος ακολουθώντας διαφορετικής καμπυλότητας πορεία. Είναι χαρακτηριστικό ότι η κλίση της τροχιάς του συστήματος, καθώς αυτό προσεγγίζει το νέο μακροπρόθεσμο σημείο λειτουργίας εμφανίζει συνεχή αύξηση και στους δύο συννοριακούς ζυγούς, με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η ενεργοποίηση των κριτηρίων (3-52) και (3-53) και ο υπολογισμός περιθωρίου από τη μέθοδο.



Σχήμα 4-53 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: Σημεία λειτουργίας συστήματος επίπεδο $G - P$ ζυγός 4041

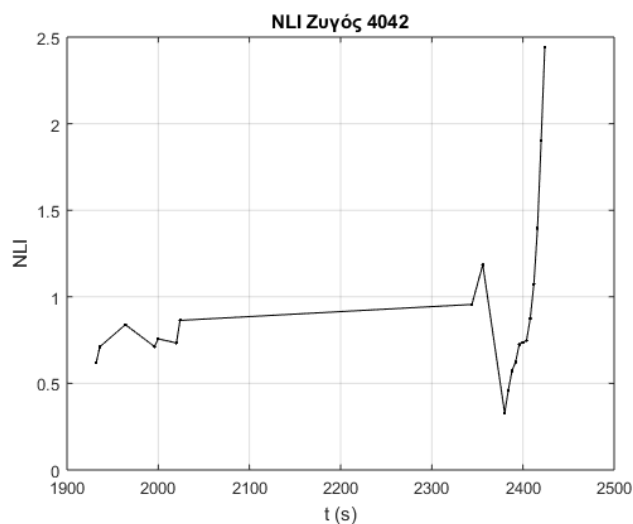


(a)

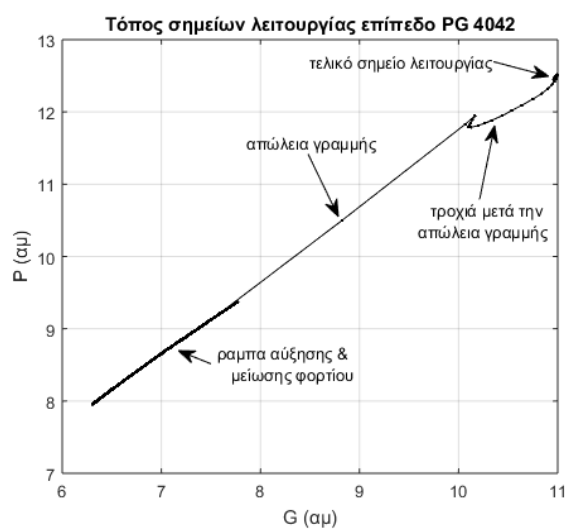


(b)

Σχήμα 4-54 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: Ζυγός άφιξης 4042, ενεργός ισχύς και φαινόμενη αγωγιμότητα (a) ολική απόκριση και (b) μετά την απώλεια γραμμής 4032-4044



Σχήμα 4-55 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: NLI ζυγού 4041



Σχήμα 4-56 Σενάριο παραλλαγής σημείου B: Σημεία λειτουργίας συστήματος επίπεδο $G - P$ ζυγός 4042

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης περιθωρίου ευστάθειας τάσης ανταποκρίνεται ορθά σε ευσταθείς αποκρίσεις του συστήματος. Η ευσταθής απόκριση του συστήματος συντελεί στην μη ικανοποίηση των κριτηρίων υπολογισμού του περιθωρίου, με αποτέλεσμα η μέθοδος να παραμένει αδρανής και να αποφεύγονται ανεπιθύμητοι υπολογισμοί που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΚΑΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

5.1.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, η ταχεία ενσωμάτωση μονάδων που συνδέονται στο σύστημα μεταφοράς ή διανομής μέσω μετατροπών ισχύος, πέραν των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει, έχει επίσης προκαλέσει προβληματισμό αναφορικά με την επίδρασή τους στην αλλαγή των χαρακτηριστικών του συστήματος και συνεπώς στη δυναμική και στην ευστάθεια αυτού [HMR21]. Η μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ στη μεταφορά και διανομή έχει καταστήσει περισσότερο στοχαστική τη φύση αφενός του συστήματος παραγωγής, αλλά και αφετέρου της κατανάλωσης. Είναι χαρακτηριστικό ότι η πρόβλεψη της κατανάλωσης σε επίπεδο φορτίου συστήματος καθίσταται όλο και πιο πολύπλοκη λόγω στοχαστικότητας παραγωγής των διεσπαρμένων πηγών στα δίκτυα διανομής, ενώ οι ροές ισχύος στο σύστημα μεταφοράς τείνουν να μεταβάλλονται όλο και πιο απρόβλεπτα, αυξάνοντας την αβεβαιότητα στο επίπεδο της λειτουργίας.

Η αδιαμφισβήτητη ωστόσο εξέλιξη των πηγών με μετατροπείς ισχύος σε δυνατότητες ελέγχου, τις έχει καταστήσει καταλυτικές για τη διατήρηση αλλά και βελτίωση της ευστάθειας του συστήματος [TF17]. Ως εκ τούτου, η λειτουργία των διασυνδεδεμένων συστημάτων υπό συνεχώς μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ είναι ένα μεγάλο στοίχημα, το οποίο για να πετύχει θα πρέπει η αξιοποίηση των ΑΠΕ να γίνει με βασικό γνώμονα τη διατήρηση του βαθμού αξιοπιστίας και ασφάλειας στα συστήματα μεταφοράς. Υπό αυτό το πρίσμα, οι ΑΠΕ θα πρέπει να αξιοποιηθούν σε πολλαπλά λειτουργικά επίπεδα (βλ. σχήμα 1-10). Παραδείγματος χάριν, σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας συστήματος θα πρέπει να συνδράμουν στην εξασφάλιση του απαραίτητου βαθμού ελέγχου και ασφαλείας, ενώ σε καταστάσεις ανάγκης ή και επαναφοράς, η συμβολή τους θα πρέπει να είναι καθοριστική τόσο για την ελαχιστοποίηση κινδύνων οδήγησης του συστήματος σε δυσμενείς καταστάσεις (π.χ. σβέσεις), όσο και για την επαναφορά του συστήματος σε κανονική κατάσταση. Καθίσταται συνεπώς προφανές, ότι πέραν της μείζονος για τη λειτουργία του συστήματος σημασίας παροχής επικουρικών υπηρεσιών (βλ. ενότητα 1.6.1), είναι επίσης σκόπιμη η εκμετάλλευση της έκτακτης λειτουργίας ΑΠΕ για την ανάπτυξη προηγμένων σχημάτων προστασίας συστήματος που θα συμβάλλουν στην περαιτέρω θωράκισή του.

5.1.2 Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης

Η διερεύνηση της παρούσας εργασίας εστιάζεται αφενός στην επίδραση που έχουν οι επικουρικές υπηρεσίες από τη διεσπαρμένη παραγωγή στην εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης, καθώς και στην ανάπτυξη συστημάτων προστασίας ακεραιότητας συστήματος έναντι κατάρρευσης που εκμεταλλεύονται τη διεσπαρμένη παραγωγή, ώστε η προστασία συστήματος να επιτυγχάνεται με ηπιότερα μέτρα για τους καταναλωτές. Απώτερος στόχος είναι η σχεδίαση σχημάτων ακεραιότητας συστήματος έναντι αστάθειας τάσης που θα μπορούν να αναγνωρίσουν τη σφοδρότητα της εκάστοτε διαταραχής στο σύστημα και να προβαίνουν σε λήψη κατάλληλων και προσαρμοσμένων μέτρων αντιμετώπισης ώστε να εξασφαλίζουν την ευστάθεια του συστήματος, αποφεύγοντας αχρείαστες επενέργειες στους καταναλωτές.

Για την επίτευξη ενός επιθυμητού βαθμού προσαρμοστικότητας, είναι απαραίτητο το σχήμα προστασίας να έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης της αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο εξετάζεται η αξιοποίηση δεικτών ανίχνευσης αστάθειας τάσεως που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας σε σχήμα προστασίας ακεραιότητας συστήματος. Σε δεύτερο χρόνο, η προσαρμοστικότητα του σχήματος προστασίας μπορεί να μεταφραστεί σε επιστράτευση ήπιων μέτρων αντιμετώπισης προς τους καταναλωτές, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του συστήματος με τις μικρότερες δυνατές επενέργειες στην κατανάλωση, εν αντιθέσει με τα εν ισχύ σχήματα προστασίας συστήματος, τα οποία συνήθως προβαίνουν σε άμεση αποκοπή φορτίων. Ως μέτρα αντιμετώπισης θεωρούνται στην παρούσα εργασία η παροχή αέργου ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και η έκτακτη δράση των ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές ισχύος των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ.

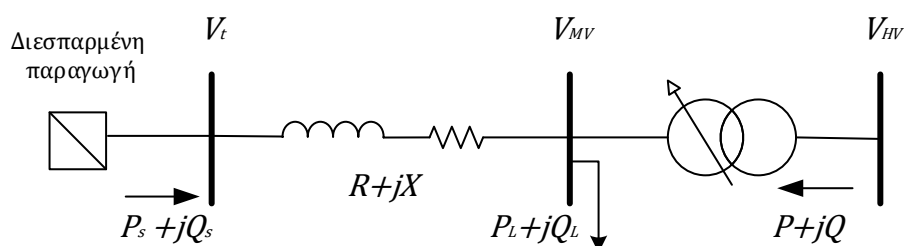
Εξετάζονται διαφορετικά σχήματα παροχής της αέργου ισχύος και αναδεικνύονται προτερήματα και μειονεκτήματα. Αναφορικά με τα εξεταζόμενα στην εργασία εναλλακτικά σχήματα προστασίας ακεραιότητας

συστήματος, η διερεύνηση καταδεικνύει παρενέργειες που είναι δυνατόν να προκύψουν στη λειτουργία του συστήματος συναρτήσει:

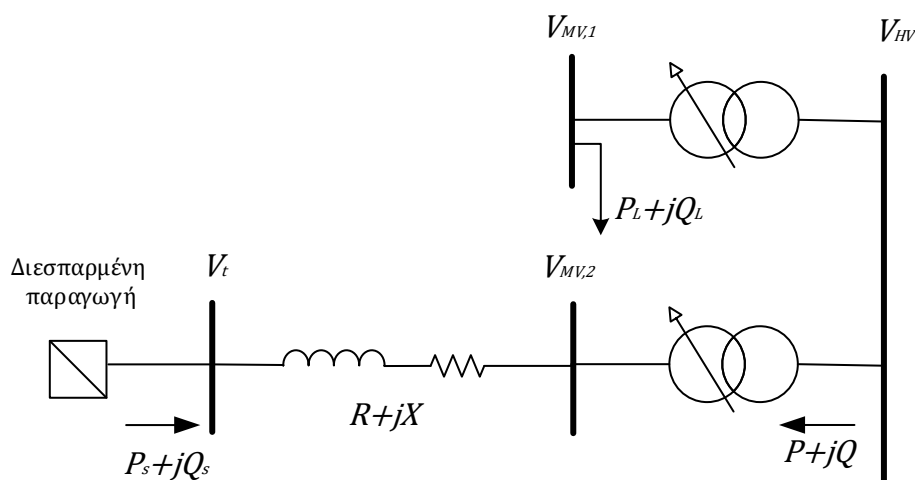
- του τρόπου σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα μεταφοράς και
- του σχήματος ελέγχου τους.

Η μοντελοποίηση των σταθμών με μετατροπείς γίνεται συγκεντρωτικά, καθώς σκοπός είναι να δοθεί έμφαση στην επίδραση αυτών στο σύστημα μεταφοράς και όχι στη διανομή.

Ως προς την επίδραση του τρόπου σύνδεσης των πηγών με μετατροπείς στην ευστάθεια τάσης, εξετάζονται δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες, οι οποίες φαίνεται στα σχήματα 5-1 και 5-2. Η συνδεσμολογία του σχήματος 5-1 θεωρεί τη συγκεντρωμένη διεσπαρμένη παραγωγή στο ίδιο δίκτυο διανομής με το συγκεντρωμένο φορτίο. Αντιθέτως, η δεύτερη (Σχήμα 5-2) εξετάζει την περίπτωση σύνδεσης φορτίου και διεσπαρμένης παραγωγής σε διαφορετικούς μετασχηματιστές υποβιβασμού, σε κοινό όμως υποσταθμό. Σημειώνεται ότι στα σχήματα 5-1 και 5-2 ο ζυγός τάσης V_{HV} αντιστοιχεί στον ζυγό πρωτεύοντος τυλίγματος κάθε ζυγού φορτίου της κεντρικής περιοχής του σχήματος 4-1.



Σχήμα 5-1 Συνδεσμολογία 1: Φορτίο και διεσπαρμένη παραγωγή στον ίδιο μετασχηματιστή



Σχήμα 5-2 Συνδεσμολογία 2: Φορτίο και διεσπαρμένη παραγωγή συνδεδεμένα σε διαφορετικούς μετασχηματιστές στον ίδιο υποσταθμό

Σε αμφότερες τις συνδεσμολογίες, οι μονάδες με μετατροπείς θεωρείται ότι βρίσκονται σε μικρή ηλεκτρική απόσταση από τα κέντρα κατανάλωσης και συνεπώς η επικουρική υπηρεσία έκτακτης παροχής αέργου ισχύος προς το σύστημα μεταφοράς επηρεάζει τις τάσεις των γειτονικών ζυγών και συνεπώς και την κατανάλωση των φορτίων.

Ως προς τα διαφορετικά σχήματα ελέγχου της διεσπαρμένης παραγωγής εξετάζονται οι εξής δυνατότητες:

- Λειτουργία υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος ($Q_s=0$)
- Λειτουργία ελέγχου σταθερής τερματικής τάσης ($V_t=\text{σταθ.}$)

Στα παραπάνω σχήματα ελέγχου λαμβάνονται υπόψιν τα όρια λειτουργίας των μετατροπέων και συγκεκριμένα το μέγιστο ρεύμα I^{lim} και η μέγιστη θερμοκρασιακή τάση $V_{t,max}$ κατά την έκτακτη λειτουργία. Στις προσομοιώσεις που ακολουθούν δοκιμάζονται συνδυασμοί των παραπάνω παραγόντων, με σκοπό την ανάδειξη των επιδράσεων που προκύπτουν από τις διαφορετικές περιπτώσεις. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται η ανάγκη για μία εναλλακτική προσέγγιση στην εκμετάλλευση των επικουρικών υπηρεσιών στήριξης τάσης από τη διεσπαρμένη παραγωγή.

5.1.3 Παραλλαγή συστήματος δοκιμών IEEE Nordic

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης και στα μέτρα προστασίας του συστήματος. Η διερεύνηση εστιάζεται σε διεσπαρμένη παραγωγή που βρίσκεται στη διανομή MT. Σκοπός της διερεύνησης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την επίδραση των μονάδων με μετατροπείς ισχύος στην εκδήλωση και στην ανίχνευση της αστάθειας τάσης στο σύστημα μεταφοράς. Οι δοκιμές γίνονται στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic [TF15] του κεφαλαίου 4 στο οποίο εντάχθηκαν συγκεντρωτικά μοντέλα ισοδύναμων διεσπαρμένων πηγών.

Το σύστημα Nordic τροποποιείται στην παρούσα ενότητα, και πιο συγκεκριμένα προστίθενται 970 MW συνολικής παραγωγής ΑΠΕ στους ζυγούς φορτίου της κεντρικής περιοχής (βλ. Σχήμα 4-1), με βάση τις δύο εναλλακτικές συνδεσμολογίες των σχημάτων 5-1 και 5-2. Για λόγους σύγκρισης ωστόσο, το συνολικό φορτίο στην υψηλή τάση (πρωτεύοντα τυλίγματα μετασχηματιστών διανομής) δεν μεταβάλλεται ως προς την αναφορά [TF15], ώστε η αρχικοποίηση του σημείου λειτουργίας A να παραμένει ίδια. Για τον λόγο αυτό γίνεται κατάλληλη προσαρμογή στο ενεργό και άεργο φορτίο στην κεντρική περιοχή του συστήματος, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Τροποποιημένα φορτία κεντρικής περιοχής

# Ζυγού φορτίου	P_L (MW)	Q_L (MVar)
1	696.78	142.47
2	425.22	62.65
3	321.60	78.12
4	927.60	241.11
5	800.65	185.60
41	651.05	121.57
42	457.89	122.04
43	1005.1	241.58
46	787.11	206.65
47	188.82	36.11
51	866.53	252.07

Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι των γραμμών σύνδεσης MT της διεσπαρμένης παραγωγής, μαζί με τον αριθμό ζυγού YT ο οποίος σχετίζεται με τη συγκεκριμένη ισοδύναμη διεσπαρμένη παραγωγή. Οι παράμετροι των γραμμών σύνδεσης MT έχουν παρθεί από αποκλειστικές γραμμές αιολικών πάρκων του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος και έχουν προσαρμοστεί αναλογικά στα εγκατεστημένα MW της αντίστοιχης ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής.

Πίνακας 5.2 Παράμετροι γραμμών σύνδεσης MT διεσπαρμένης παραγωγής (αμ σε $S_B=100\text{MVA}$)

# Ισοδύναμου πάρκου	# ζυγού YT	R (αμ)	X (αμ)
1	1041	0.004413	0.060800
2	1042	0.045050	0.091650
3	1043	0.077986	0.147573

4	1044	0.030800	0.139600
5	1045	0.005296	0.072960
6	4041	0.038614	0.078557
7	4042	0.082964	0.156993
8	4043	0.025666	0.116333
9	4046	0.004903	0.067555
10	4047	0.048267	0.098196
11	4051	0.072209	0.136642

Ο πίνακας 5.3 περιέχει τις παραγωγές P_s , την ονομαστική ισχύ P_{max} καθώς και τον ζυγό σύνδεσης κάθε ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής με το υπόλοιπο σύστημα, ανάλογα με την εκάστοτε συνδεσμολογία. Οι παραγωγές P_s παραμένουν σταθερές κατά τις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι μονάδων με μετατροπείς ισχύος

# Ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής	# ζυγού σύνδεσης ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής		P_s (MW)	P_{max} (MW)
	Συνδεσμολογία 1	Συνδεσμολογία 2		
1	1	1041	97.20	108.00
2	2	1042	99.30	104.55
3	3	1043	64.60	68.00
4	4	1044	90.00	90.00
5	5	1045	81.00	90.00
6	41	4041	115.88	121.98
7	42	4042	60.72	63.92
8	43	4043	108.00	108.00
9	46	4046	87.48	97.20
10	47	4047	92.70	97.58
11	51	4051	69.70	73.44

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, προστίθενται έντεκα ισοδύναμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής σε ισάριθμους ζυγούς φορτίου στην κεντρική περιοχή του συστήματος. Η διείσδυση αντιστοιχεί σε ποσοστό 10.3% της συνολικής συμβατικής παραγωγής (9368,8 MW) του συστήματος και σε 13,6% της συνολικής κατανάλωσης της κεντρικής περιοχής του συστήματος (7128,35 MW) για το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας. Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των συντομεύσεων που χρησιμοποιούνται για τα εξεταζόμενα σενάρια.

Πίνακας 5.4 Σενάρια προσομοιώσεων

#	Σχ. Λειτουργίας	Συνδεσμολογία
0	-	-
1UPF	Μοναδιαίος ΣΙ	1
1VC	Σταθερή τερματική τάση	1
2UPF	Μοναδιαίος ΣΙ	2
2VC	Σταθερή τερματική τάση	2

Το σενάριο 0 αναφέρεται στην προσομοίωση που παρουσιάζεται για το σημείο λειτουργίας A στην αναφορά [TF15] χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή. Η συντομογραφία UPF (Unity Power Factor) αναφέρεται σε λειτουργία διεσπαρμένης παραγωγής με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, ενώ η συντομογραφία VC (Voltage Control) αναφέρεται σε λειτουργία ελέγχου τερματικής τάσης. Τέλος, ο αριθμός 1/2 αναφέρεται στην αντίστοιχη συνδεσμολογία της ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής με βάση τα σχήματα 5-1 και 5-2.

Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια παραμένει σταθερή η ενεργός ισχύς P_s των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων, εκτός εάν παραβιάζεται η συνθήκη ευστάθειας που εξετάστηκε στο κεφάλαιο 1 στη σχέση (1-84). Οι προσομοιώσεις του τρέχοντος κεφαλαίου έχουν πραγματοποιηθεί στο λογισμικό WPSTAB του εργαστηρίου ηλεκτρικής ισχύος ΕΜΠ, το οποίο υλοποιεί οιονεί στατική προσομοίωση.

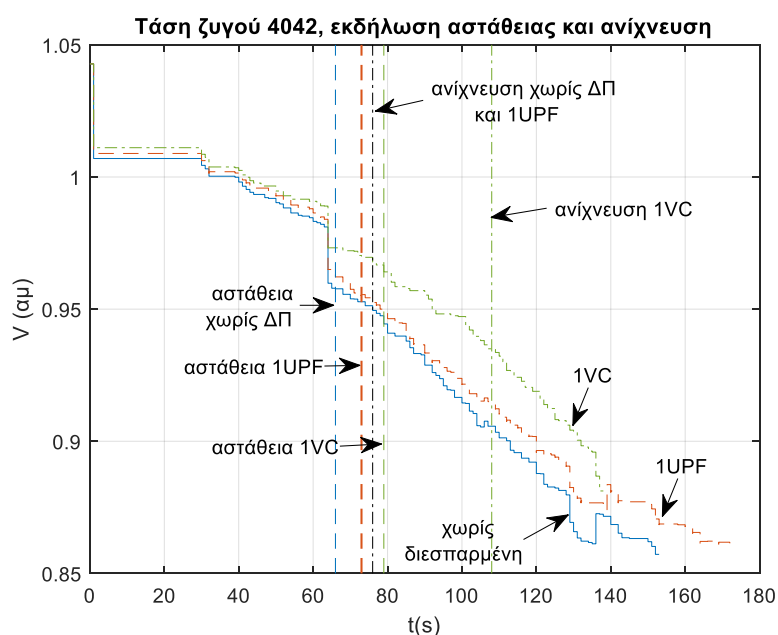
Σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση, η εκδήλωση της αστάθειας τάσης υπολογίζεται με έλεγχο σε κάθε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας της ευαισθησίας της συνολικής παραγόμενης αέργου ισχύος των μονάδων ως προς την άεργο κατανάλωση ενός ζυγού φορτίου, αξιοποιώντας την Ιακωβιανή μήτρα των εξισώσεων μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Η εν λόγω ευαισθησία αλλάζει πρόσημο μέσω του απείρου μόλις εκδηλωθεί η αστάθεια τάσης στο σύστημα, γεγονός που ανιχνεύεται και από τη μη αντιστρεψιμότητα της Ιακωβιανής μήτρας λόγω μηδενισμού ιδιοτιμής της. Συνεπώς, η εκδήλωση της αστάθειας τάσης υπολογίζεται με ακρίβεια κατά την προσομοίωση, ενώ παράλληλα η ανίχνευση της αστάθειας τάσης πραγματοποιείται με τη χρήση των μεθόδων LIVES και *NLI* που αναφέρθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια.

5.2 Επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης (συνδεσμολογία 1)

Η συνδεσμολογία 1 της διεσπαρμένης παραγωγής αναφέρεται σε αυτή του σχήματος 5-1, όπου η διεσπαρμένη παραγωγή συνδέεται στον ίδιο μετασχηματιστή με το φορτίο. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων με τη διεσπαρμένη παραγωγή συνδεδεμένη σε συνδεσμολογία 1, χωρίς την εφαρμογή σχήματος προστασίας.

Όπως αναφέρθηκε και προηγούμενως, το αρχικό σημείο ισορροπίας είναι πανομοιότυπο με αυτό της ενότητας 4.2.1. Η διαταραχή εφαρμόζεται τη χρονική στιγμή $t=1s$ και αφορά την απώλεια της γραμμής 4032-4044. Λόγω της οιονεί στατικής προσέγγισης του προγράμματος WPSTAB το βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4032 δεν προσομοιώνεται και αντί αυτού υπολογίζεται απευθείας το σημείο ισορροπίας μετά την εκκαθάριση αυτού και την αποσύνδεση της σχετικής γραμμής.

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η απόκριση της τάσης του συνοριακού ζυγού 4042 για κάθε σχήμα λειτουργίας (1VC & 1UPF) και αντιπαραβάλλονται με την αντίστοιχη απόκριση του σεναρίου 0 (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή). Είναι χαρακτηριστικό ότι η τάση του ζυγού διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα καθ'όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης στα σενάρια που έχει ενσωματωθεί η διεσπαρμένη παραγωγή, και ειδικά στο σενάριο 1VC λόγω της παροχής αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή.



Σχήμα 5-3 Τάση ζυγού 4042 στα σενάρια 0 (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή), 1UPF και 1VC (χωρίς σχήμα προστασίας)

Ο Πίνακας 5.5 περιλαμβάνει τη χρονική στιγμή του πρώτου σήματος συναγερμού από τη LIVES, τον ζυγό στον οποίο αυτό ενεργοποιείται, καθώς και τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης του συστήματος ανά σενάριο προσομοίωσης. Είναι χαρακτηριστικό, ότι παρά την ενσωμάτωση διεσπαρμένης παραγωγής με σταθερή παραγωγή P_s , η κατάρρευση δεν μπορεί να αποφευχθεί σε κανένα από τα δύο σενάρια 1UPF και 1VC. Η χρονική αλληλουχία των υπόλοιπων σημάτων συναγερμού για τα σενάρια 1UPF και 1VC αποτυπώνονται στους πίνακες 5.6 και 5.7 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.5 Συνδεσμολογία 1: Χρόνοι και ζυγοί πρώτων συναγερμών LIVES, σημείο αστάθειας και κατάρρευσης (χωρίς σχήμα προστασίας)

#	Αστάθεια (s)	1 ^{ος} LIVES συναγερμός (s)	Ζυγός	Κατάρρευση (s)
0	66	76	43	153
1UPF	73	76	43	172
1VC	79	108	3	138

Πίνακας 5.6 Σενάριο 1UPF: Συναγερμοί LIVES και τάσεις ζυγών μεταφοράς

$t(s)$	LIVES συναγερμός σε ζυγό φορτίου #	Τάση μεταφοράς (αμ) τη στιγμή συναγερμού
76	43	$V_{4043}=0.9654$
78	1	$V_{1041}=0.9328$
80	4	$V_{1044}=0.9267$
80	46	$V_{4046}=0.9712$
82	42	$V_{4042}=0.9464$
85	5	$V_{1045}=0.9369$
88	3	$V_{1043}=0.9365$

Πίνακας 5.7 Σενάριο 1VC: Συναγερμοί LIVES και τάσεις ζυγών μεταφοράς

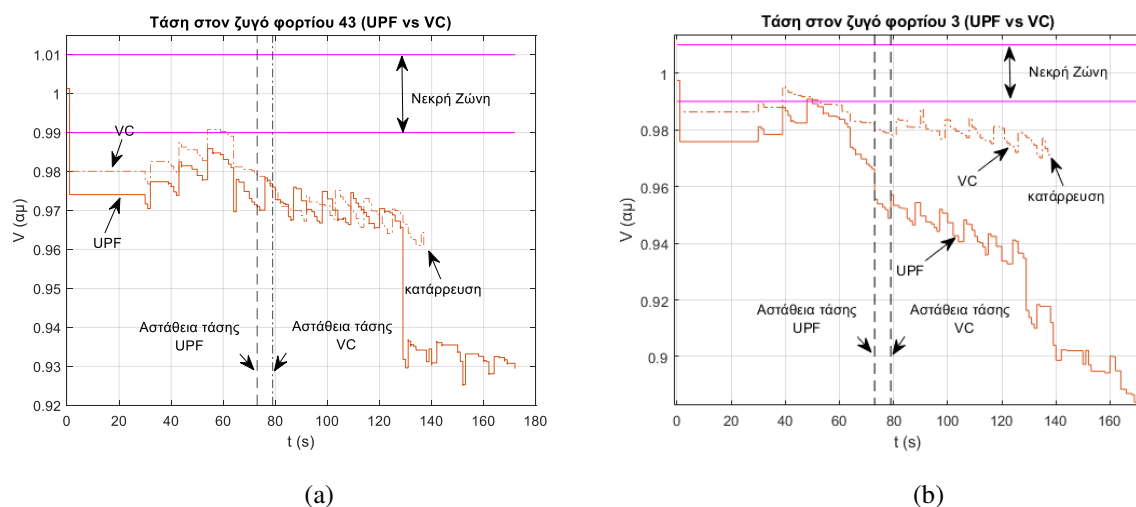
$t(s)$	LIVES συναγερμός σε ζυγό φορτίου #	Τάση μεταφοράς (αμ) τη στιγμή συναγερμού
108	3	$V_{1043}=0.9517$
109	1	$V_{1041}=0.9328$
121	4	$V_{1044}=0.9055$
122	42	$V_{4042}=0.9139$
123	5	$V_{1045}=0.9226$
125	43	$V_{4043}=0.9347$
129	46	$V_{4046}=0.9472$

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τόσο στην περίπτωση λειτουργίας υπό σταθερό (μοναδιαίο) συντελεστή ισχύος (1UPF) όσο και στη λειτουργία σταθερής τάσης (1VC), η αστάθεια καθυστερεί να εμφανιστεί, γεγονός που δείχνει ότι το σύστημα έχει μεγαλύτερο περιθώριο ευστάθειας τάσης, σε σχέση με την αρχική περίπτωση. Η καθυστέρηση εκδήλωσης της αστάθειας είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση ελέγχου τάσεως. Η μέθοδος LIVES ανιχνεύει εγκαίρως την αστάθεια στην περίπτωση σταθερού συντελεστή ισχύος, αλλά πολύ αργοπορημένα στην εκδοχή ρύθμισης τάσης από τη διεσπαρμένη παραγωγή, και μάλιστα σε διαφορετικό ζυγό. Η καθυστέρηση ανίχνευσης αφήνει σημαντικά μικρότερο χρονικό περιθώριο για διορθωτικές κινήσεις, και συνεπώς είναι κρίσιμη για την απόδοση των μέτρων προστασίας από κατάρρευση, όπως θα δειχθεί και σε

επόμενη ενότητα. Από τη σύγκριση των τάσεων μεταφοράς στους πίνακες 5.6 και 5.7 μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι οι τάσεις μεταφοράς κατά τις στιγμές ενεργοποίησης των συναγερμών είναι χαμηλότερες στο σενάριο 1VC σε σχέση με το 1UPF κυρίως λόγω του γεγονότος ότι οι συναγερμοί ενεργοποιούνται αρκετά αργότερα στο σενάριο 1VC σε σχέση με το 1UPF.

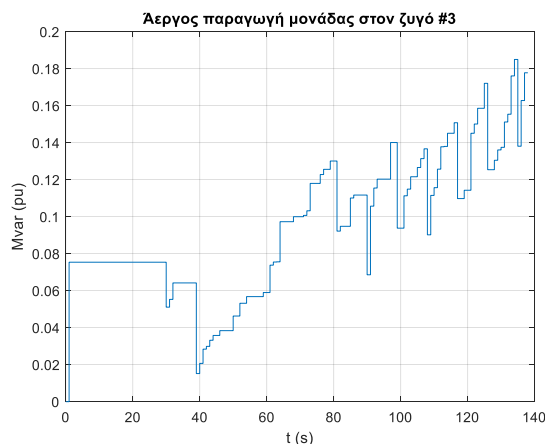
Συμπεραίνεται από τα παραπάνω ότι όταν υπάρχει ρύθμιση τάσης από τη διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνουν τα περιθώρια ευστάθειας του συστήματος (μεταγενέστερη εκδήλωση αστάθειας), αλλά η εκδήλωση και εξέλιξη της αστάθειας είναι αρκετά πιο απότομη. Η απότομη εκδήλωση και εξέλιξη της αστάθειας προκύπτει κυρίως από το γεγονός ότι η διατήρηση ενός σχετικά σταθερού προφίλ τάσεων στους ζυγούς διανομής της κεντρικής περιοχής διατηρεί την κατανάλωση σε μεγαλύτερα επίπεδα, γεγονός που καταπονεί τις μονάδες παραγωγής, με αποτέλεσμα τη σταδιακή εξάντληση των άεργων περιθωρίων και την ενεργοποίηση συστημάτων περιορισμού υπερδιέγερσης.

Μία ενδεικτική σύγκριση των αποκρίσεων των τάσεων στους ζυγούς φορτίου 3 και 43 φαίνεται στα σχήματα 5-4(a) και 5-4(b).



Σχήμα 5-4 Σύγκριση σεναρίων 1UPF και 1VC (a) Ζυγός 43 και (b) Ζυγός 3

Είναι εμφανές από τα σχήματα 5-4(a) και 5-4(b) ότι οι τάσεις είναι αισθητά υψηλότερες όταν η διεσπαρμένη παραγωγή βρίσκεται σε λειτουργία ελέγχου τάσης, καθώς η εγχεόμενη άεργος ισχύς από τη διεσπαρμένη παραγωγή επηρεάζει σημαντικά και την τάση του ζυγού φορτίου. Η υψηλότερη τιμή των τάσεων στους ζυγούς της κεντρικής περιοχής του σεναρίου 1VC δημιουργεί σημαντικά προβλήματα στη μέθοδο LIVES να ανιχνεύσει εγκαίρως την αστάθεια τάσης, καθώς αυτή ανιχνεύεται 29s μετά την εκδήλωση της αστάθειας (79s). Η διατήρηση των τάσεων προκύπτει προφανώς από την εγχεόμενη από τη διεσπαρμένη παραγωγή άεργο ισχύ στο δίκτυο, προκειμένου ο ζυγός της διεσπαρμένης παραγωγής να παραμείνει στην τάση αναφοράς. Στο σχήμα 5-5 φαίνεται η άεργος παραγωγή των μονάδων με μετατροπείς που συνδέονται πλησίον του ζυγού 3.



Σχήμα 5-5 Αεργος παραγωγή μονάδας πλησίον ζυγού φορτίου 3 (σενάριο 1VC)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-4(a), στον ζυγό 43 η τάση διανομής εισέρχεται στη νεκρή ζώνη σε χρόνο 54s κατά το σενάριο 1VC. Αυτό καθυστερεί σημαντικά την επόμενη δράση του ΣΑΤΥΦ (κάτι που δεν συμβαίνει στο σενάριο 1UPF) και έτσι η ανίχνευση LIVES που στηρίζεται στη δράση των ΣΑΤΥΦ καθυστερεί σημαντικά. Τέλος, αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η διαφορά στην απόκριση των τάσεων είναι πιο έντονη στους ζυγούς που βρίσκονται σε μεγάλη ηλεκτρική απόσταση από το επίπεδο της υπερυψηλής τάσης, όπως π.χ. ο ζυγός 3, εξαιτίας του γεγονότος ότι το σύστημα είναι περισσότερο ισχυρό στο επίπεδο της υπερυψηλής τάσης.

5.3 Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης (συνδεσμολογία 2)

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδραση της συνδεσμολογίας 2 στην εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 5-2, στη συγκεκριμένη περίπτωση η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ φορτίων και διεσπαρμένης παραγωγής είναι μεγαλύτερη από τη συνδεσμολογία 1, καθώς φορτίο και διεσπαρμένη παραγωγή συνδέονται σε διαφορετικούς μετασχηματιστές του ίδιου υποσταθμού.

Στον πίνακα 5.8 καθώς παρατίθενται οι επιδράσεις που έχει η διεσπαρμένη παραγωγή υπό τη συνδεσμολογία 2, αναφορικά με την εκδήλωση της αστάθειας, τον χρόνο και σημείο ανίχνευσης της αστάθειας από τη μέθοδο LIVES, αλλά και την τελική έκβαση της προσομοίωσης.

Πίνακας 5.8 Συνδεσμολογία 2: Χρόνοι και ζυγοί πρώτων συναγερμών LIVES, σημείο αστάθειας και κατάρρευσης (χωρίς σχήμα προστασίας)

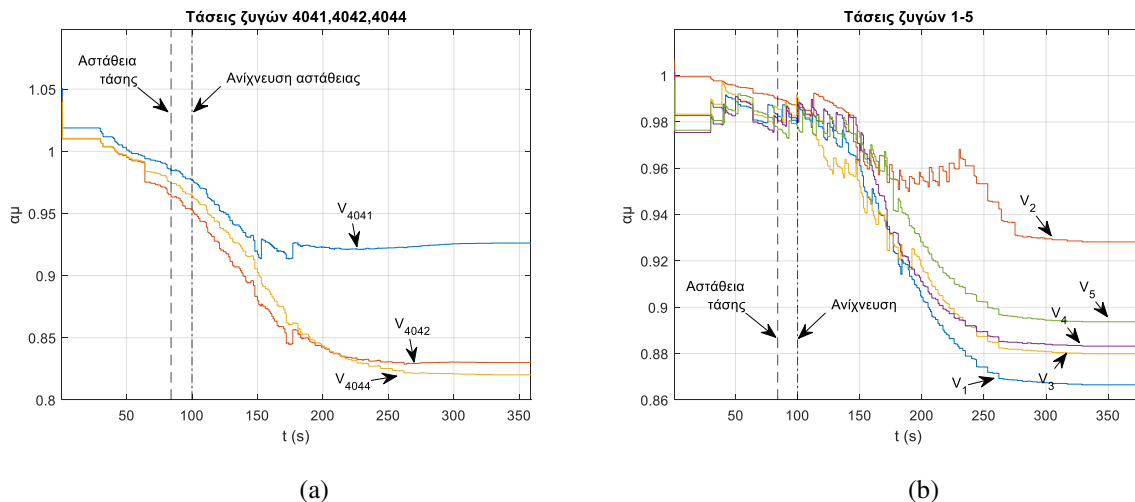
#	Αστάθεια (s)	1 ^{ος} συναγερμός LIVES (s)	Ζυγός	Collapse (s)
0	66	76	43	153
2UPF	71	76	43	150
2VC	84	100	1	-

Η καθυστέρηση της εκδήλωσης τα αστάθειας είναι παρόμοια με την πρώτη συνδεσμολογία (βλ. Πίνακα 5.5). Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η ένταξη διεσπαρμένης παραγωγής αυξάνει την ευστάθεια του συστήματος ανεξάρτητα της συνδεσμολογίας.

Ωστόσο, η επίδραση της συνδεσμολογίας 2 στην κατάρρευση τάσης είναι διαφορετική, καθώς στη μεν περίπτωση λειτουργίας σταθερού συντελεστή ισχύος η κατάρρευση επέρχεται περίπου την ίδια χρονική στιγμή με το σενάριο 0, στη δε περίπτωση ελέγχου τάσης το σύστημα καταφέρνει να αποφύγει την κατάρρευση. Είναι σαφές ότι η λειτουργία ελέγχου τάσης σε συνδεσμολογία 2 ενισχύει περισσότερο την ευστάθεια του συστήματος σε σχέση με τη συνδεσμολογία 1, καθώς η ζεύξη με το σύστημα μεταφοράς είναι άμεση μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης, ο οποίος, επιπρόσθετα, αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική

απόσταση προς το φορτίο, και συνεπώς την επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην κατανάλωση ισχύος.

Αν και το σύστημα δεν καταρρέει στο σενάριο 2VC, πρέπει να σημειωθεί ότι το νέο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας είναι μη αποδεκτό διότι οι τάσεις διανομής βρίσκονται σε αρκετά χαμηλές τιμές όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5-6(b), όπου απεικονίζονται οι τάσεις διανομής των ζυγών φορτίου 1-5 στην κεντρική περιοχή. Το σύστημα δεν καταρρέει διότι σταματάει ο μηχανισμός αποκατάστασης της κατανάλωσης λόγω τερματισμού των λήψεων r των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής.



Σχήμα 5-6 Σενάριο 2VC: (a) Τάσεις ζυγών μεταφοράς 4041, 4042, 4044, (b) τάσεις ζυγών διανομής 1-5

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5-6 ότι το σύστημα είναι επί της ουσίας ασταθές, καθώς όλα τα ΣΑΤΥΦ αδυνατούν να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης.

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι, όπως στην περίπτωση 1VC, τόσο και στην περίπτωση 2VC υπάρχει σημαντική καθυστέρηση ανίχνευσης της αστάθειας τάσης από τη LIVES. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στους ίδιους παράγοντες, καθώς είναι σαφές από το σχήμα 5-6(b) ότι το σχεδόν σταθερό προφίλ τάσης μέχρι τα 100s εμποδίζει την τοπική ανίχνευση.

Συμπεραίνεται συνεπώς, ότι η παροχή αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή αποκρύπτει προσωρινά την αδυναμία των ΣΑΤΥΦ να αποκαταστήσουν τις τάσεις διανομής, καθιστώντας τα ευσταθή για μικρό, αλλά κρίσιμο χρονικό διάστημα για την εφαρμογή λήψης μέτρων αντιμετώπισης. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητο, διότι η τοπική ανίχνευση αστάθειας τάσης τείνει να καταστεί ανεπαρκής στις περιπτώσεις που η διεσπαρμένη παραγωγή στηρίζει το σύστημα μεταφοράς, ενόσω το σύστημα πλησιάζει προς το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Από τις προσομοιώσεις των προηγούμενων υποενοτήτων καθίσταται σαφής η ανάγκη για επιλογική λειτουργία και συνεργασία της επικουρικής υπηρεσίας διεσπαρμένων πηγών για στήριξη τάσεως με τοπικές μεθόδους ανίχνευσης αστάθειας τάσης, καθώς όταν αυτό δεν συμβαίνει υπάρχει κίνδυνος δυσλειτουργίας των τελευταίων με δυσμενείς συνέπειες για τη λειτουργία του συστήματος. Οι προσομοιώσεις με τη διεσπαρμένη παραγωγή σε έλεγχο τάσης υπέδειξαν ότι είναι δυνατόν να αποκρύψουν τον ασταθή μηχανισμό αποκατάστασης της κατανάλωσης μίας περιοχής, με τον κίνδυνο εάν εξαντληθούν τα περιθώρια αέργου παροχής από τη διεσπαρμένη παραγωγή, το σύστημα να καταρρεύσει πιο σύντομα και απότομα, αφήνοντας λιγότερο χρόνο αντίδρασης για τη λήψη διορθωτικών μέτρων. Για τους παραπάνω λόγους, οι προσομοιώσεις των επόμενων ενοτήτων εστιάζονται περισσότερο στη λειτουργία της διεσπαρμένης παραγωγής με σταθερό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

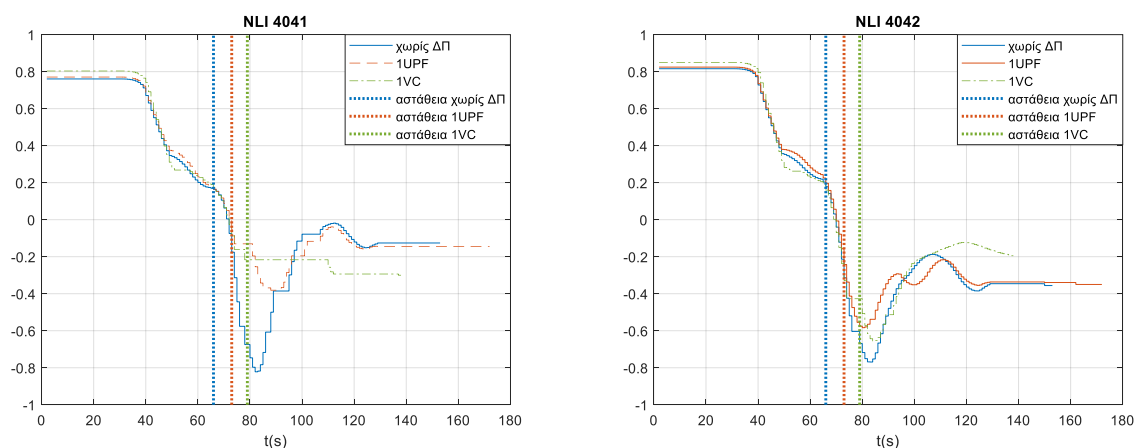
5.4 Ανίχνευση αστάθειας με τον δείκτη NLI

Για την ανίχνευση της αστάθειας τάσης των σεναρίων προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 5.2 και 5.3, εξετάζεται για λόγους πληρότητας και ο δείκτης NLI . Σημειώνεται ωστόσο ότι οι τιμές του NLI δεν έχουν υπολογιστεί με τον μετασχηματισμό STFT, διότι στο λογισμικό WPSTAB δεν

προσομοιώνονται οι βραχυπρόθεσμες δυναμικές ή ο θόρυβος μετρήσεων. Ως εκ τούτου, η υλοποίηση του NLI έχει γίνει με κινητό μέσο όρο των $N=8$ πιο πρόσφατων βραχυπρόθεσμων σημείων ισορροπίας. Η χρονική απόκριση των βραχυπρόθεσμων σημείων ισορροπίας περιγράφει τη μακροπρόθεσμη εξέλιξη κάθε ηλεκτρικού μεγέθους και ως εκ τούτου παρουσιάζει ομοιότητες με τη DC συνιστώσα του μετασχηματισμού Fourier που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.2. Αντίστοιχες εφαρμογές υπολογισμού του δείκτη NLI έχουν παρουσιαστεί στις εργασίες [VLM17] για το σύστημα IEEE Nordic και [LMV21] για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.

5.4.1 Συνδεσμολογία 1

Στα Σχήμα 5-7(a),(b) απεικονίζονται οι αποκρίσεις των δεικτών NLI στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042 για τη συνδεσμολογία 1 στα σενάρια χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, 1UPF και 1VC (βλ. πίνακα 5.5) Με βάση τον πίνακα 5.9 μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι NLI γίνονται αρνητικοί σε αρκετά παραπλήσιες χρονικές στιγμές και στα τρία σενάρια.



Σχήμα 5-7 NLI ζυγού 4041 στα σενάρια 0 (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή), 1UPF και 1VC (χωρίς σχήμα προστασίας)

Αντιπαραβάλλοντας τις χρονικές στιγμές συναγερμού της LIVES (Πίνακας 5.5) με αυτές του πίνακα 5.9 παρατηρείται ότι οι συναγερμοί από τους NLI δείκτες ενεργοποιούνται νωρίτερα από αυτούς της LIVES.

Πίνακας 5.9 Χρόνοι εκδήλωσης αστάθειας και ανίχνευσης αστάθειας με NLI στα σενάρια 0, 1UPF, 1VC (χωρίς σχήμα προστασίας)

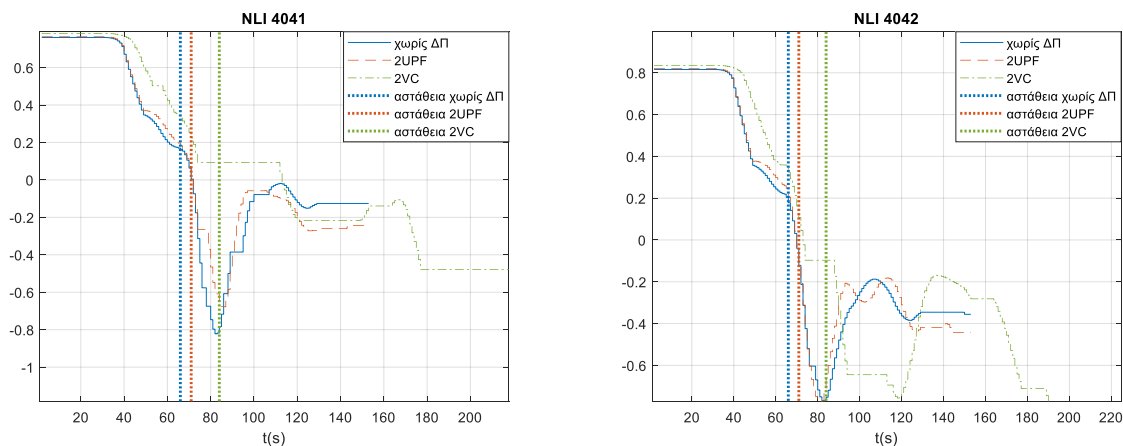
Συμβάν	Σενάριο		
	0	1UPF	1VC
Αστάθεια	66	73	79
$NLI_{4041} < 0$	72	73	72
$NLI_{4042} < 0$	70	71	70
Κατάρρευση	153	172	138

Στη σενάριο 1VC παρατηρείται ωστόσο ότι ο δείκτης NLI γίνεται αρνητικός νωρίτερα από την πραγματική έλευση της αστάθειας. Το γεγονός αυτό δεν είναι εν γένει επιθυμητό, αλλά είναι προτιμότερο από την περίπτωση που εμφανίζεται μεγάλη καθυστέρηση, όπως π.χ. γίνεται στην αντίστοιχη περίπτωση με τον πρώτο συναγερμό της LIVES στο $t=108s$.

5.4.2 Συνδεσμολογία 2

Στο Σχήμα 5-8 παρουσιάζονται οι αποκρίσεις των NLI στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042 για τα σενάρια της συνδεσμολογίας 2 χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, 2UPF και 2VC (βλ. Πίνακα 5.8), ενώ στον πίνακα 5.10 παρουσιάζονται οι χρόνοι εκδήλωσης της αστάθειας, οι χρόνοι ανίχνευσης της αστάθειας από

τους *NLI*, καθώς και οι χρόνοι κατάρρευσης του συστήματος. Όπως και στην περίπτωση της συνδεσμολογίας 1, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι *NLI* γίνονται αρνητικοί σε παραπλήσιες χρονικές στιγμές και στα τρία σενάρια, με εξαίρεση τον ζυγό 4041 στο σενάριο 1VC. Στην περίπτωση του σεναρίου 2VC παρατηρείται ότι ο δείκτης *NLI* του ζυγού 4041 καθυστερεί να γίνει αρνητικός, ενώ ο δείκτης του ζυγού 4042 γίνεται αρνητικός 10 δευτερόλεπτα νωρίτερα από την πραγματική εκδήλωση της αστάθειας. Το γεγονός αυτό δεν είναι εν γένει επιθυμητό, αλλά προτιμάται από την αργοπορημένη καθυστέρηση, καθώς δίνει μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο για τη δυνατότητα λήψης μέτρων αντιμετώπισης.



Σχήμα 5-8 *NLI* ζυγού 4041 στα σενάρια 0 (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή), 2UPF και 2VC (χωρίς σχήμα προστασίας)

Πίνακας 5.10 Χρόνοι εκδήλωσης και ανίχνευσης αστάθειας με τον *NLI* στα σενάρια 0, 2UPF, 2VC (χωρίς σχήμα προστασίας)

Συμβάν	Σενάριο		
	0	2UPF	2VC
Αστάθεια	66	71	84
$NLI_{4041} < 0$	72	72	113
$NLI_{4042} < 0$	70	70	74
Κατάρρευση	153	150	-

Με βάση τις αποκρίσεις των σχημάτων 5-7 και 5-8 διαπιστώνεται ότι ο δείκτης *NLI* είναι ικανός να ανιχνεύσει την αδυναμία εξυπηρέτησης της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή του συστήματος και μάλιστα πιο έγκαιρα από τη LIVES, αν και στην περίπτωση των σεναρίων 1VC και 2VC παρατηρήθηκε ότι ο δείκτης γίνεται αρνητικός πριν την πραγματική έλευση της αστάθειας. Σημειώνεται ότι η σήμανση συναγερμού πριν την πραγματική εκδήλωση της αστάθειας προτιμάται από την καθυστερημένη ανίχνευση που παρουσιάζεται στην περίπτωση της LIVES, διότι ο χρόνος για λήψη διορθωτικών μέτρων είναι περισσότερος. Η πρόωρη σήμανση οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγιστοποίηση της μεταφοράς ισχύος προς την κεντρική περιοχή προηγείται της εκδήλωσης αστάθειας (όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 2.4.1, Σχήμα 2-9). Σημειώνεται επίσης ότι η εφαρμογή του *NLI* στην παρούσα ενότητα έγινε με βάση την οιονεί στατική προσομοίωση, ενώ η εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο (ή με βάση την πλήρη χρονική προσομοίωση) θα συναντούσε μεγαλύτερες χρονικές καθυστερήσεις.

5.5 Αξιοποίηση διασπαρμένης παραγωγής για την αντιμετώπιση κατάρρευσης τάσης

Από την προηγηθείσα ανάλυση είναι εμφανές ότι η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην αστάθεια τάσης είναι μη αμελητέα τόσο σε επίπεδο εκδήλωσης όσο και σε επίπεδο ανίχνευσης. Η συγκεκριμένη διαπίστωση εγείρει περαιτέρω ερωτήματα αναφορικά με τη σχεδίαση και επίδοση συστημάτων προστασίας από κατάρρευση τάσης, όταν υπάρχει μη αμελητέα διείσδυση από διεσπαρμένη παραγωγή στο

δίκτυο διανομής. Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται ορισμένα σχήματα προστασίας από τη βιβλιογραφία και σχεδιάζεται ένα πρωτότυπο σχήμα το οποίο αξιοποιεί την επικουρική υπηρεσία στήριξης τάσης από διεσπαρμένη παραγωγή σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, σε συνάρτηση με την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ.

5.5.1 Προτεινόμενα σχήματα

Τα Σχήματα Προστασίας (ΣΠ) που αναφέρονται εδώ έχουν χαρακτήρα είτε τοπικό, είτε ευρείας περιοχής, και τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται παρακάτω:

- ✓ ΣΠ1: Τοπικό σχήμα προστασίας, με αξιοποίηση LIVES Alarm/Restore, χωρίς αξιοποίηση διεσπαρμένης παραγωγής

Στο ΣΠ1 αξιοποιείται αποκλειστικά η έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ μόλις ανιχνευτεί αστάθεια τάσης από τη LIVES σε έναν ζυγό φορτίου, όπως περιγράφεται στις ενότητες 2.1.1 και 2.1.2. Αμέσως μόλις ενεργοποιηθεί σήμα συναγερμού σε έναν υποσταθμό, ενεργοποιείται η έκτακτη λειτουργία στο τοπικό ΣΑΤΥΦ, με το τελευταίο να πραγματοποιεί αντίστροφες δράσεις, προς όφελος του συστήματος μεταφοράς. Η συγκεκριμένη διαδικασία υλοποιείται ανεξάρτητα σε όσους υποσταθμούς ενεργοποιηθεί σήμα συναγερμού από τη LIVES. Ο τερματισμός της αντίστροφης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ πραγματοποιείται με την ενεργοποίηση του σήματος LIVES-Restore, η οποία επίσης πραγματοποιείται αυτόνομα σε επίπεδο υποσταθμού, όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.2. Το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας μπορεί να θεωρηθεί ως το πλέον συντηρητικό σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς αξιοποιεί μονάχα την έκτακτη λειτουργία ΣΑΤΥΦ, η οποία μειώνει έμμεσα την κατανάλωση, χωρίς να αξιοποιεί τις δυνατότητες της διαθέσιμης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής.

- ✓ ΣΠ2: Τοπικό σχήμα, με αξιοποίηση LIVES Alarm/Restore αξιοποιώντας συνδυαστική λειτουργία διεσπαρμένης παραγωγής και ΣΑΤΥΦ

Το σχήμα προστασίας ΣΠ2 διαφοροποιείται ως προς το ΣΠ1 στο γεγονός ότι μετά από προκαθορισμένη καθυστέρηση $t_D=10s$ από την ενεργοποίηση του σήματος LIVES-Restore σε έναν ζυγό φορτίου, δίνεται εντολή παροχής αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή στα κατάντη του συγκεκριμένου υποσταθμού με σταθερό ρυθμό αύξησης. Ο ρυθμός αύξησης είναι τέτοιος ώστε να λαμβάνει υπόψιν τη δράση του ΣΑΤΥΦ, το οποίο έχει πλέον επιστρέψει σε κανονική λειτουργία μετά το σήμα LIVES-Restore. Ο ρυθμός παροχής αέργου ισχύος παρέχεται μέσω αύξησης της τάσης αναφοράς της τερματικής τάσης και τίθεται ίσος με $0,06 \text{ αμ} / \text{λεπτό}$. Ο συγκεκριμένος ρυθμός είναι παραπλήσιος με τον ρυθμό $\Delta r/\Delta T$ των δράσεων του ΣΑΤΥΦ, ο οποίος είναι της τάξης $0,01 \text{ αμ}/10s$.

- ✓ ΣΠ3: Σχήμα ευρείας περιοχής, με αξιοποίηση LIVES alarm και μέγιστης αέργου υποστήριξης από την διεσπαρμένη παραγωγή (σχήμα EMRS) [Σου19]

Στο ΣΠ3 επιχειρείται η μέγιστη αξιοποίηση της αέργου ικανότητας από τη διεσπαρμένη παραγωγή απευθείας με την ενεργοποίηση σήματος LIVES-Alarm. Όλες οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή του συστήματος δέχονται σήμα ενεργοποίησης μέγιστης παροχής αέργου ισχύος αμέσως μόλις ενεργοποιηθεί το πρώτο σήμα LIVES-Alarm στην κεντρική περιοχή, χωρίς προσαρμογή της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ ή την ενεργοποίηση έκτακτης λειτουργίας αυτών. Ο συναγερμός χρησιμεύει επομένως για ενεργοποίηση της έκτακτης επικουρικής υπηρεσίας χωρίς να αλλάζει τον τρόπο λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, τα οποία συνεχίζουν να δρουν προς όφελος της διανομής, επιχειρώντας να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης. Με άλλα λόγια, η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ συνεχίζεται όπως και πριν την ενεργοποίηση του συναγερμού και το σχήμα προστασίας δεν επιχειρεί σκόπιμη έμμεση αποκοπή φορτίου. Το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας ευρείας περιοχής μπορεί να θεωρηθεί ως το λιγότερο συντηρητικό από όλα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, καθώς επιχειρεί να αποκαταστήσει την ευστάθεια χωρίς να μειώσει το επίπεδο της νεκρής ζώνης των τάσεων διανομής σε κάποιο υποσταθμό.

- ✓ ΣΠ4: Σχήμα ευρείας περιοχής με συνδυασμό έκτακτης λειτουργίας EMRS και αντίστροφης λειτουργίας SATYΦ εάν η αστάθεια επανεμφανιστεί.

Το ΣΠ4 αποτελεί μία παραλλαγή του ΣΠ3. Η διαφορά έγκειται στο ότι το πρώτο σήμα LIVES-Alarm ενεργοποιεί μεν την έκτακτη λειτουργία (μέγιστης) παροχής αέργου ισχύος σε όλες τις διεσπαρμένες πηγές που βρίσκονται στην κεντρική περιοχή, αλλά στην περίπτωση που υπάρξει μεταγενέστερο σήμα LIVES-Alarm (κατά τη διάρκεια μέγιστης παροχής αέργων από τις διεσπαρμένες πηγές) σε κάποιο υποσταθμό, τότε ενεργοποιείται τοπικά η αντίστροφη λειτουργία SATYΦ μέχρις ότου αυξηθεί η τάση του ζυγού μεταφοράς και ενεργοποιηθεί σήμα LIVES-Restore, ενόσω οι διεσπαρμένες πηγές παρέχουν τη μέγιστη άεργο υποστήριξη. Το ΣΠ4 αποτελεί μία περισσότερο συντηρητική εκδοχή σε σχέση με το ΣΠ3, για την περίπτωση που η έμμεση αποκοπή φορτίου είναι απαραίτητη.

- ✓ ΣΠ5: Σχήμα ευρείας περιοχής με αξιοποίηση δείκτη NLI και συνδυαστική λειτουργία SATYΦ με άεργη υποστήριξη από διεσπαρμένη παραγωγή

Το νέο σχήμα προστασίας που παρουσιάζεται και εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει εμπνευστεί από την εργασία [OVC21] και έχει χαρακτήρα ευρείας περιοχής, καθώς αξιοποιούνται οι δείκτες NLI των συνοριακών ζυγών της κεντρικής περιοχής, προκειμένου να δοθεί εντολή παροχής αέργου ισχύος από όλη τη διεσπαρμένη παραγωγή της περιοχής. Είτε μετά την πάροδο t_1 δευτερολέπτων από τον πρώτο αρνητικό NLI , είτε μετά από t_2 δευτερόλεπτα ($t_2 < t_1$) από την ενεργοποίηση όλων των NLI που παρακολουθούν τη συγκεκριμένη περιοχή, προσαρμόζεται η νεκρή ζώνη όλων των υποσταθμών στην τρέχουσα τιμή που έχει η τοπική τάση διανομής και παράλληλα παγώνει η περαιτέρω προσπάθεια του SATYΦ για ανύψωση της τάσης διανομής. Παρά το πάγωμα της δράσης των SATYΦ προς την κατεύθυνση αύξησης της τάσης διανομής, επιτρέπονται δράσεις προς την κατεύθυνση μείωσης της τάσης διανομής, όταν αυτή τείνει να βγει εκτός της νεκρής ζώνης όντας υψηλότερη από το νέο άνω όριο. Την ίδια στιγμή που προσαρμόζεται η νεκρή ζώνη των SATYΦ δίνεται εντολή παροχής αέργου ισχύος από όλες τις μονάδες με μετατροπείς στην περιοχή με σταθερό ρυθμό 0,3αμ/λεπτό, ώστε να επαναφέρουν τα SATYΦ τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης, σε περίπτωση που αυτές τείνουν να φύγουν εκτός του άνω ορίου της νεκρής ζώνης. Η παροχή αέργου ισχύος σταματάει είτε όταν γίνουν θετικοί οι NLI δείκτες, είτε όταν εξαντληθούν τα περιθώρια αέργου παροχής από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής νωρίτερα.

Η επίδοση του κάθε σχήματος προστασίας αποτιμάται με τη συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου που επέφερε στη λήξη της προσομοίωσης. Η έμμεση αποκοπή ποσοτικοποιείται από τη σχέση:

$$\Delta P = P_o / V_o^\alpha (V_{min}^\alpha - V_{fin}^\alpha) \quad (5-1)$$

όπου P_o η αρχική κατανάλωση του φορτίου, V_o η τάση του φορτίου κατά την αρχικοποίηση, V_{min} το κάτω όριο της νεκρής ζώνης κατά την αρχικοποίηση, V_{fin} η τελική τιμή τάσης του φορτίου στην προσομοίωση και α ο εκθέτης της ενεργού κατανάλωσης του εκθετικού μοντέλου του φορτίου.

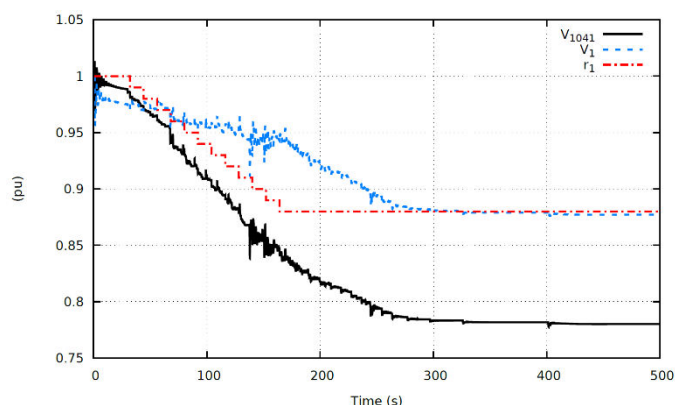
5.5.2 Αναγκαιότητα για έμμεση αποκοπή φορτίου

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται κατά πόσο είναι αναγκαία η έμμεση αποκοπή φορτίου δεδομένης της δυνατότητας αξιοποίησης της διεσπαρμένης παραγωγής με την αύξηση της αέργου παραγωγής τους. Τα αποτελέσματα της παρούσας ενότητας έχουν προκύψει από προσομοιώσεις του τροποποιημένου συστήματος Nordic στο λογισμικό RAMSES, για αξιολόγηση του δείκτη NLI .

Για τον σκοπό αυτό, επαναλαμβάνεται η προσομοίωση του σεναρίου 1UPF στο λογισμικό RAMSES, όπου πριν την αποσύνδεση της γραμμής 4032-4044 έχει προσομοιωθεί το βραχυκύκλωμα πλησίον του ζυγού 4032 τη χρονική στιγμή $t=1s$, ακολουθούμενο από εκκαθάριση μετά από 100ms. Η διαφορά στη συγκεκριμένη προσομοίωση έγκειται στο ότι αμέσως μετά την ανίχνευση της αστάθειας από τον δείκτη NLI , δίνεται εντολή σε όλες τις ισοδύναμες διεσπαρμένες πηγές της κεντρικής περιοχής να αυξήσουν την άεργο παραγωγή τους με σταθερό ρυθμό $\Delta Q/\Delta T = 0,3\alpha\mu/10s$, χωρίς να μεταβληθούν τα όρια της νεκρής ζώνης στους υποσταθμούς της περιοχής. Σημειώνεται, ότι το συγκεκριμένο σενάριο είναι περισσότερο αισιόδοξο ως

προς την αποφυγή κατάρρευσης σε σχέση με το 1VC που έχει ήδη εξεταστεί, διότι στην παρούσα περίπτωση η αύξηση της αέργου παραγωγής των διεσπαρμένων πηγών δίνεται ομοιόμορφα από όλους τους υποσταθμούς της κεντρικής περιοχής, εν αντιθέσει με το σενάριο 1VC, όπου αυτή δινόταν ανομοιόμορφα, με μόνο κριτήριο τη διατήρηση των τερματικών τάσεων των ισοδύναμων μονάδων με μετατροπείς.

Στο Σχήμα 5-9 παρουσιάζεται η απόκριση της τάσης μεταφοράς του ζυγού 1041, η αντίστοιχη τάση διανομής του ζυγού 1 και ο λόγος μετασχηματισμού r_1 . Τη συγκεκριμένη συμπεριφορά παρουσιάζουν οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς της κεντρικής περιοχής, γεγονός που συνεπάγεται ότι το σύστημα παραμένει σε μακροπρόθεσμη ισορροπία λόγω τερματισμού των ΣΑΤΥΦ, αλλά λειτουργεί ασταθώς παρά τη συνεισφορά αέργου παραγωγής από τις διεσπαρμένες πηγές. Η αστάθεια στο σύστημα είναι εμφανής από το ότι τα ΣΑΤΥΦ αδυνατούν να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης.



Σχήμα 5-9 Σενάριο 1UPF με άεργο υποστήριξη χωρίς μεταβολή νεκρής ζώνης

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι είναι αναγκαία η μείωση της κατανάλωσης στην κεντρική περιοχή για την αποκατάσταση αποδεκτού ευσταθούς σημείου λειτουργίας. Η έμμεση περικοπή της κατανάλωσης επιχειρείται μέσω μείωσης των ορίων νεκρής ζώνης στους ζυγούς φορτίου της κεντρικής περιοχής. Στις επόμενες ενότητες επαναλαμβάνονται οι προσομοιώσεις των προηγούμενων σεναρίων με εναλλακτικά σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης.

5.5.3 Επίδοση σχήματος ΣΠ1

Το πρώτο σχήμα προστασίας αξιοποιεί αποκλειστικά την έκτακτη λειτουργία ΣΑΤΥΦ μετά την τοπική αναγνώριση αστάθειας τάσης από τη LIVES, χωρίς να μεταβάλλει τη λειτουργία της διεσπαρμένης παραγωγής. Ως εκ τούτου, οι μονάδες με μετατροπείς είτε διατηρούν σταθερό συντελεστή ισχύος (μοναδιαίο), είτε σταθερή τερματική τάση.

Ο πίνακας 5.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων εφαρμογής του ΣΠ1 τόσο για τη συνδεσμολογία 1, όσο και για τη συνδεσμολογία 2.

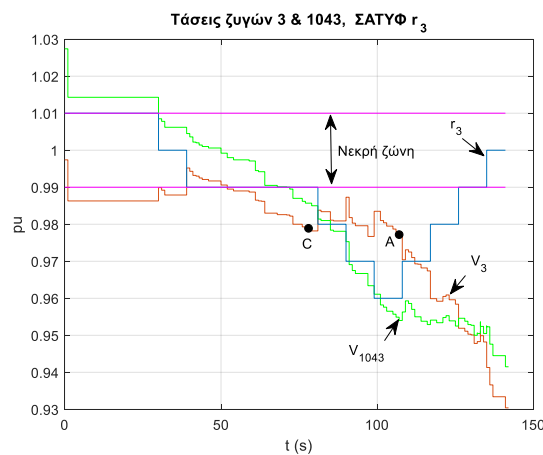
Πίνακας 5.11 Συνδεσμολογίες 1 & 2 με εφαρμογή ΣΠ1 (LIVES-Restore)

#	Αστάθεια (s)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Ζυγοί με LIVES-Restore	Κατάρρευση (s)
0	66	186.38	46,4,43,1	-
1UPF	73	159.57	43,4,1,42,46	-
1VC	79	-	-	142
2UPF	76	160.87	3,1,4,43	-
2VC	84	243.18	1,47,4,2,46,51	-

Η τέταρτη στήλη περιέχει τους ζυγούς στους οποίους έχει ενεργοποιηθεί το σήμα LIVES-Restore, και συνεπώς έχει υλοποιηθεί έμμεση αποκοπή φορτίου. Η τρίτη στήλη περιέχει το σύνολο του έμμεσα αποκοπόμενου φορτίου με βάση τη σχέση (5-1), ενώ στην τελευταία στήλη αναφέρεται εάν το σύστημα καταρρέει, ή ισορροπεί σε νέα μόνιμη κατάσταση.

Αναφορικά με την επίδοση του σχήματος προστασίας ΣΠ1 στην πρώτη συνδεσμολογία (σενάρια 1UPF και 1VC), αξίζει να σημειωθεί ότι αν και οι ζυγοί στους οποίους ενεργοποιείται συναγερμός είναι ίδιοι με αυτούς των σεναρίων 1UPF και 1VC χωρίς προστασία, η σειρά με την οποία ενεργοποιούνται τα σήματα LIVES-Restore δεν είναι κατ'ανάγκη η ίδια, λόγω των διαφορετικών ευαισθησιών των τάσεων του συστήματος. Η αποκοπή φορτίου του σεναρίου 1UPF είναι μικρότερη από την περίπτωση χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή, ενώ διαφέρουν και οι ζυγοί στους οποίους ενεργοποιούνται τα σήματα LIVES-Alarm και LIVES-Restore, πράγμα που έμμεσα δείχνει και την επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στη μακροπρόθεσμη δυναμική του συστήματος.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από τον πίνακα 5.11, το ΣΠ1 καταφέρνει να αποκαταστήσει την ευστάθεια στο σενάριο 1UPF, αλλά αποτυγχάνει στο σενάριο 1VC. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι η άεργος έγχυση από τη διεσπαρμένη παραγωγή (λειτουργία σταθερής τάσης) ενισχύει την κατανάλωση των φορτίων, η οποία με τη σειρά της δεν επιτρέπει στις τάσεις μεταφοράς να αυξηθούν, προκειμένου να ενεργοποιηθεί εγκαίρως σήμα LIVES-Restore (βλ. ενότητα 2.1.2). Στο Σχήμα 5-10 απεικονίζεται η απόκριση της τάσης του ζυγού 3, του αντίστοιχου λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ και της τάσης του ζυγού 1043, ενώ σημειώνεται ότι παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν οι τάσεις διανομής και μεταφοράς των περισσότερων ζυγών στην κεντρική περιοχή του συστήματος. Το σημείο C στο Σχήμα 5-10 υποδηλώνει την εκδήλωση της αστάθειας στο σύστημα, ενώ αντίστοιχα το σημείο A τη στιγμή ανίχνευσης της αστάθειας από τη LIVES.



Σχήμα 5-10 Σενάριο 1VC με ΣΠ1: Τάσεις ζυγών 3 και 1043, ΣΑΤΥΦ r_3

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 5-10, η δράση του ΣΑΤΥΦ, σε συνδυασμό με την έγχυση αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή, έχουν ως αποτέλεσμα τη διατήρηση ενός σχετικά υψηλού προφίλ τάσης και συνεπώς την καθυστερημένη ανίχνευση της αστάθειας τη χρονική στιγμή $t=108s$. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα από την αντίστροφη δράση του ΣΑΤΥΦ και της αέργου έγχυσης από τα πάρκα αλληλοαναιρούνται, με συνέπεια η τάση μεταφοράς να μην καταφέρνει να αυξηθεί προτού υπάρξει απώλεια βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και κατάρρευση στο σύστημα. Με άλλα λόγια, η μείωση της κατανάλωσης των φορτίων λόγω των αντίστροφων δράσεων των ΣΑΤΥΦ γίνεται με μικρότερο ρυθμό λόγω της άεργης παροχής από τη διεσπαρμένη παραγωγή, με αποτέλεσμα το σύστημα να μην ανακουφίζεται έγκαιρα.

Όσον αφορά τη συνδεσμολογία 2 της διεσπαρμένης παραγωγής, στο σενάριο 2UPF η μείωση του έμμεσα αποκοπτόμενου φορτίου είναι ελάχιστα μεγαλύτερη σε σχέση με του σεναρίου 1UPF. Αντιθέτως, στο σενάριο 2VC η έμμεση αποκοπή φορτίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη (243.18 MW) σε σχέση με τα σενάρια 1UPF και 2UPF. Το ανεπιθύμητο αυτό γεγονός συμβαίνει εξαιτίας της καθυστερημένης ανίχνευσης της αστάθειας ($t=100s$ βλ. πίνακα 5.8). Η καθυστερημένη λήψη διορθωτικών μέτρων οδηγεί σε ανάγκη λήψης δραστικότερων μέτρων στη συνέχεια [VCV98], καθώς ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου δρα για περισσότερη ώρα, αυξάνοντας την κατανάλωση και οδηγώντας το σύστημα σε όλο και πιο ασταθή λειτουργία, προτού ενεργοποιηθούν τα μέτρα προστασίας. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και από το γεγονός ότι έχουν ενεργοποιηθεί LIVES-Restore σήματα σε περισσότερους ζυγούς εν συγκρίσει με τα υπόλοιπα σενάρια. Σε κάθε περίπτωση, διαπιστώνεται ότι δεδομένης της αποσόβησης της κατάρρευσης του συστήματος τόσο στο σενάριο 2UPF όσο και στο 2VC, η συνδεσμολογία 2 (σύνδεση διεσπαρμένης

παραγωγής σε χωριστό μετασχηματιστή του ίδιου υποσταθμού) είναι ευνοϊκότερη για την ευστάθεια τάσης του συστήματος.

Τα παραπάνω αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι χρειάζεται συντονισμός μεταξύ των μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης και των επικουρικών υπηρεσιών από τη διεσπαρμένη παραγωγή, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός βαθμός ευρωστίας σε ένα σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης.

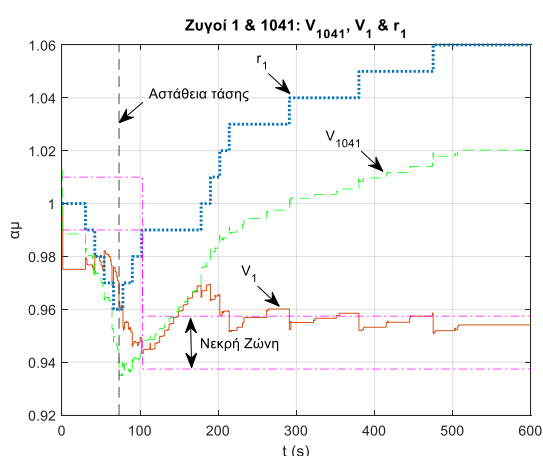
5.5.4 Επίδοση σχήματος ΣΠ2

Όπως γίνεται κατανοητό από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της ενότητας 5.5.3, η περίπτωση 1VC δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ούτε με το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας, καθώς η απώλεια του βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας συμβαίνει προτού ενεργοποιηθεί LIVES-Restore στο σύστημα. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η μη συντονισμένη έγχυση αέργου ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή, την καθιστά μη αξιοποιήσιμη ως προς την αποφυγή της κατάρρευσης. Η στιγμή της κατάρρευσης επέρχεται τη στιγμή $t=142s$ (βλ. πίνακα 5.11), δηλαδή ελαφρώς αργότερα από την περίπτωση 1VC χωρίς την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ ($t=138s$ πίνακας 5.5) αλλά δεν μπορεί να αποτραπεί, ενώ σε κάθε περίπτωση συμβαίνει νωρίτερα σε σχέση με τη λειτουργία μοναδιαίου συντελεστή ισχύος ($t=172s$ πίνακας 5.5). Προκύπτει συνεπώς το συμπέρασμα ότι η έγχυση αέργου ισχύος από διεσπαρμένες ΑΠΕ προτού το σύστημα μεταφοράς καταστεί ασταθές επιτείνει μεν την ευστάθεια του συστήματος, όμως διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την κατανάλωση και συνεπώς συνιστά πιο σφοδρή την ασταθή απόκριση του συστήματος όταν περάσει το όριο αστάθειας.

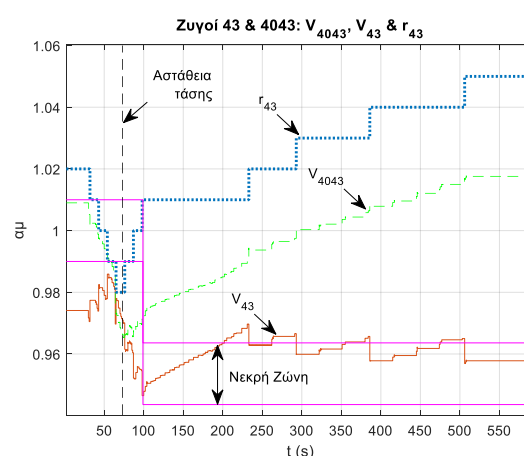
Ωστόσο είναι σκόπιμο να διερευνηθεί η αξιοποίηση της έκτακτης παροχής αέργου ισχύος στο σύστημα από τη διεσπαρμένη παραγωγή στην περίπτωση λειτουργίας μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Επαναλαμβάνεται ότι στο σχήμα ΣΠ2 μετά από $t_D=10s$ από την ενεργοποίηση του LIVES-Restore σήματος, δίνεται εντολή στη διεσπαρμένη παραγωγή που συνδέεται στον συγκεκριμένο υποσταθμό να αυξήσει την άεργο παραγωγή με σταθερό ρυθμό αύξησης 0,06 αμ/λεπτό. Στον πίνακα 5.12 παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του ΣΠ2 στο σενάριο 1UPF και αντιπαραβάλλονται με αυτά του σεναρίου 1UPF με εφαρμογή του ΣΠ1.

Πίνακας 5.12 Σενάριο 1UPF με ΣΠ1 και ΣΠ2

#	Σχήμα Προστασίας	Αστάθεια (s)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Ζυγοί	Κατάρρευση (s)
1UPF	ΣΠ1	73	159.57	43,4,1,42,46	-
1UPF	ΣΠ2	73	114.21	43, 4, 1,42,46	-

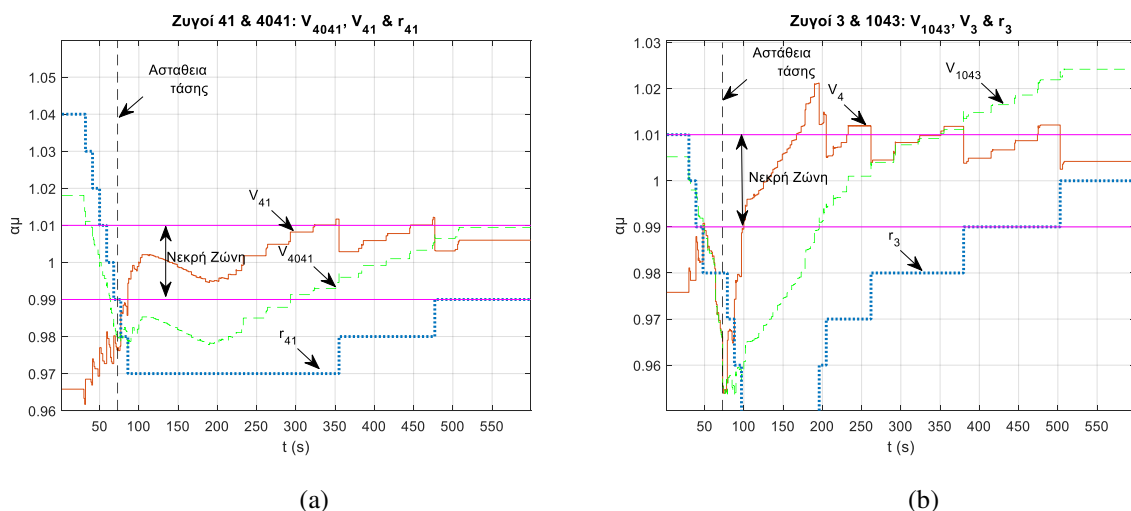


(a)



(b)

Σχήμα 5-11 Σενάριο 1UPF με ΣΠ2, ζυγοί με LIVES-Restore: (a) Τάσεις ζυγών 1, 1041 και ΣΑΤΥΦ, (b) Τάσεις ζυγών 43, 4043 και ΣΑΤΥΦ



Σχήμα 5-12 Σενάριο 1UPF με ΣΠ2, ζυγοί χωρίς LIVES-Restore: (a) Τάσεις ζυγών 41, 4041 και ΣΑΤΥΦ, (b) Τάσεις ζυγών 3, 1043 και ΣΑΤΥΦ

Από τον πίνακα 5.12 φαίνεται η μείωση του έμμεσα αποκοπτόμενου φορτίου με το ΣΠ2, λόγω της συνδυαστικής δράσης της διεσπαρμένης παραγωγής με τα ΣΑΤΥΦ (σχήματα 5-11(a) και (b)). Από τα σχήματα 5-11 και 5-12 μπορούν να παρατηρηθούν δύο βασικές φάσεις της απόκρισης, και πιο συγκεκριμένα η αρχική φάση της αντίστροφης δράσης των ΣΑΤΥΦ και η μετέπειτα φάση της έγχυσης αέργου ισχύος των διεσπαρμένων πηγών, ενόσω τα ΣΑΤΥΦ έχουν επιστρέψει σε κανονική λειτουργία.

Η πρώτη φάση εστιάζεται στο χρονικό διάστημα 80-100s, κατά το οποίο γίνεται η ανίχνευση της αστάθειας τάσης συνοδευόμενη από την αντίστροφη δράση των ΣΑΤΥΦ. Κατά το διάστημα αυτό, η αντίστροφη δράση των ΣΑΤΥΦ μειώνει την τάση διανομής των τοπικών ζυγών, γεγονός που αυξάνει εν τέλει την τάση μεταφοράς, προκειμένου να ενεργοποιηθεί το σήμα LIVES-Restore.

Παράλληλα, οι τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς της κεντρικής περιοχής χωρίς ενεργοποιημένους συναγερμούς (βλ. σχήματα 5-12(a) και (b)) αυξάνονται τόσο στη μεταφορά όσο και στη διανομή, αφενός λόγω των τοπικών δράσεων ΣΑΤΥΦ και αφετέρου λόγω της ανύψωσης τάσης από τις έμμεσες αποκοπές φορτίου στους ζυγούς που έχουν σημειωθεί συναγερμοί. Το γεγονός αυτό υπονοεί ότι η κατανάλωση στους ζυγούς χωρίς ενεργοποιημένους συναγερμούς αυξάνει σε σχέση με τα επίπεδα αμέσως μετά τη διαταραχή.

Κατά τη δεύτερη φάση, δηλαδή περίπου μετά το $t=110s$, παρατηρείται στα σχήματα 5-11(a),(b) μία σχεδόν σταθερής κλίσης ανύψωση στις τάσεις μεταφοράς και διανομής λόγω της έγχυσης αέργου ισχύος από τους μετατροπείς. Το γεγονός αυτό ωθεί τις τάσεις διανομής των ζυγών φορτίου της κεντρικής περιοχής στα άνω όρια της νεκρής ζώνης τους, πράγμα που αυξάνει και την κατανάλωση σε όλους τους ζυγούς στους οποίους παρατηρείται αυτό το φαινόμενο. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δράση των ΣΑΤΥΦ πρακτικά εμποδίζει την περαιτέρω αποκατάσταση της κατανάλωσης, καθώς διατηρεί τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης, καθώς αυτές επιχειρούν να τις υπερβούν λόγω έγχυσης αέργου ισχύος από τους μετατροπείς.

Η συντονισμένη δράση των ΣΑΤΥΦ και της διεσπαρμένης παραγωγής αντικατοπτρίζεται και από το γεγονός ότι τα ΣΑΤΥΦ επαναφέρουν έγκαιρα τις τάσεις εντός της νεκρής ζώνης, εξουδετερώνοντας αποτελεσματικά τον μηχανισμό αποκατάστασης της κατανάλωσης, ο οποίος αυτή τη φορά διεγείρεται από τη διεσπαρμένη παραγωγή και όχι από τα ΣΑΤΥΦ. Τα παραπάνω συνιστούν μία σημαντικά μικρότερη έμμεση αποκοπή φορτίου (βλ. Πίνακα 5.12), λόγω των υψηλότερων τάσεων διανομής του συστήματος, οι οποίες έχουν την τάση να ισορροπήσουν πλησίον του άνω ορίου της νεκρής ζώνης (βλ. σχήμα 5-11 και 5-12) στο τέλος της προσομοίωσης.

Σημειώνεται, ότι η επαναφορά της νεκρής ζώνης στα προ διαταραχής επίπεδα δεν ενδείκνυται εάν δεν έχουν προηγηθεί δράσεις ενίσχυσης του συστήματος από το κέντρο ελέγχου (π.χ. ένταξη νέων μονάδων). Αυτό διότι, τυχόν ανύψωση της νεκρής ζώνης συνεπάγεται και αύξηση της κατανάλωσης με απρόβλεπτες συνέπειες για τη λειτουργία του συστήματος, παρά το γεγονός ότι το σύστημα προστασίας θα συνεχίζει να επιτηρεί την ευστάθεια τάσης.

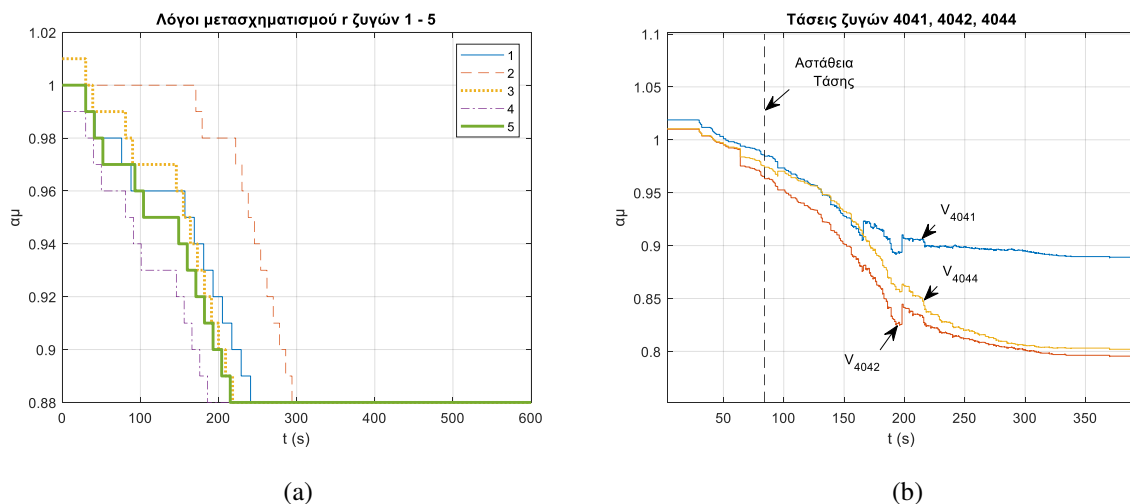
5.5.5 Επίδοση σχήματος ΣΠ3

Το ΣΠ3 εξετάζεται μόνο στη συνδεσμολογία 2, καθώς όπως θα δειχθεί από τα αποτελέσματα, το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας αποδεικνύεται το λιγότερο αποδοτικό και δεν μπορεί να καταστεί αξιόπιστο σε εφαρμογές όπου η διεσπαρμένη παραγωγή βρίσκεται σε μικρή ηλεκτρική απόσταση από τα φορτία (συνδεσμολογία 1). Θεωρώντας επίσης ότι οι μονάδες της διεσπαρμένης παραγωγής παρέχουν άεργο ισχύ και κατά την κανονική λειτουργία του συστήματος, εξετάζεται μόνο το σενάριο 2VC. Στον πίνακα 5.13 παρατίθενται συνοπτικά τα αποτελέσματα του ΣΠ3.

Πίνακας 5.13 Σενάριο 2VC με ΣΠ3 (μέγιστη άεργος παραγωγή)

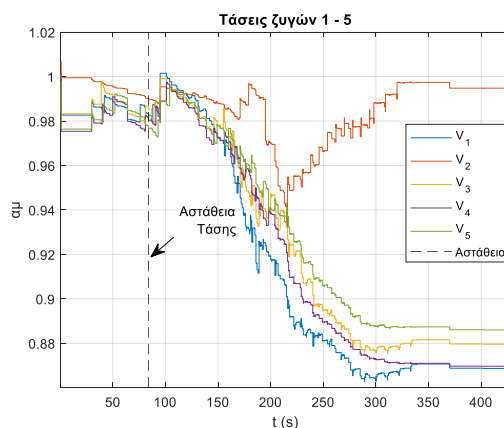
#	Αστάθεια (s)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Ζυγοί	Κατάρρευση (s)
2VC	84	590.53	1,3,4,5,42,43,46	-

Στην προκειμένη περίπτωση, δίνεται εντολή σε όλα τα πάρκα της κεντρικής περιοχής να παράξουν τη μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ μόλις ενεργοποιηθεί το πρώτο LIVES-Alarm σε υποσταθμό της κεντρικής περιοχής. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η κατάρρευση του συστήματος αποφεύγεται, όμως στην πράξη επαναλαμβάνεται το φαινόμενο του σεναρίου 2VC χωρίς σχήμα προστασίας (Πίνακας 5.8), ότι δηλαδή σταματάει ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου λόγω τερματισμού των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής (βλ. Σχήμα 5-13(a)), ενώ το σύστημα ισορροπεί σε μη αποδεκτό και ασταθές μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.



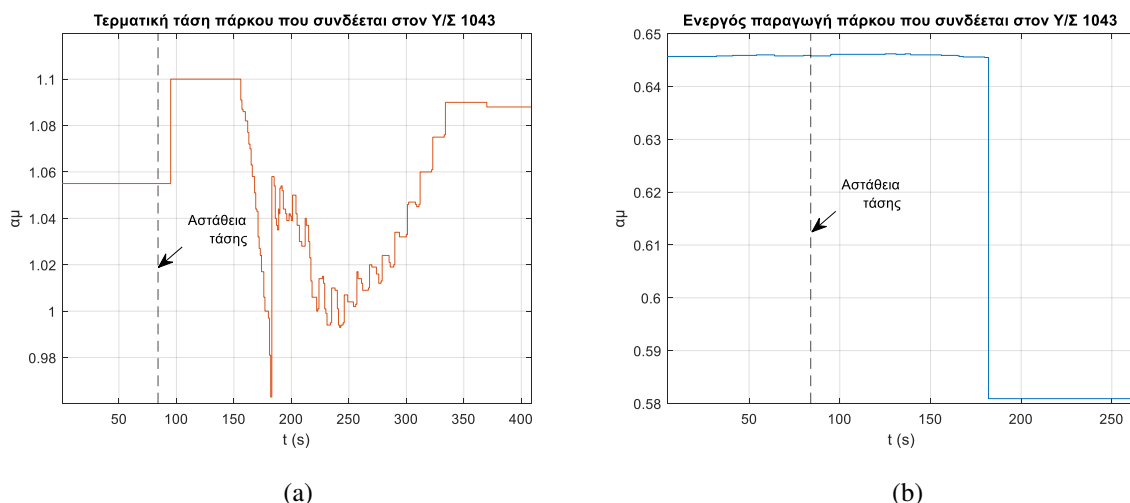
Σχήμα 5-13 Σενάριο 2VC με ΣΠ3: (a) Λόγοι μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ζυγών 1-5, (b) Τάσεις ζυγών 4041, 4042, 4044

Αν και το σχήμα προστασίας δεν αποσκοπεί σε έμμεση αποκοπή φορτίου, αυτή αποδεικνύεται αναπόφευκτη, καθώς οι τάσεις διανομής σε αρκετούς ζυγούς δεν επανέρχεται εντός νεκρής ζώνης (βλ. Σχήμα 5-14). Το συνολικό έμμεσα αποκοπτόμενο φορτίο ανέρχεται σε περίπου 590 MW, δεδομένου ότι οι τάσεις διανομής καταλήγουν σε ιδιαίτερα χαμηλές τιμές, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Σχήμα 5-14.



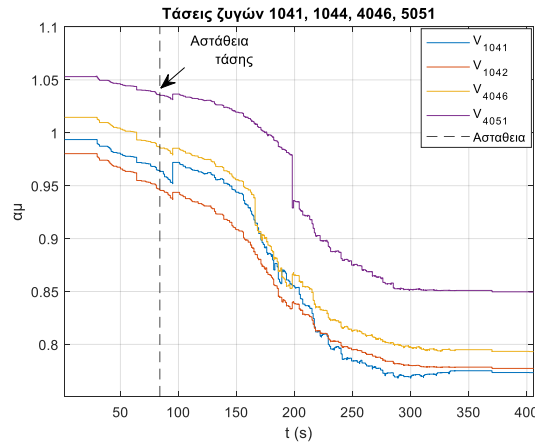
Σχήμα 5-14 Σενάριο 2VC με ΣΠ3: Τάσεις διανομής ζυγών 1-5

Στο Σχήμα 5-15(a) απεικονίζεται η τερματική τάση της ισοδύναμης διεσπαρμένης παραγωγής που συνδέεται στον ζυγό φορτίου 1043, ενώ στο σχήμα 5-15(b) η αντίστοιχη ενεργός παραγωγή. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι η τερματική τάση του ισοδύναμου πάρκου μεγιστοποιείται μετά την ανίχνευση αστάθειας τάσης (1.1 αμ), προκειμένου να παραχθεί η μέγιστη δυνατή άεργος ισχύς τηρουμένων των ορίων ρεύματος του ισοδύναμου μετατροπέα. Ωστόσο, η αύξηση της τερματικής τάσης κοντά στο $t=100s$ προκαλεί αύξηση των τάσεων διανομής στα φορτία (βλ. Σχήμα 5-14) με αποτέλεσμα την αύξηση της κατανάλωσης και τη σταδιακή μείωση των τάσεων μεταφοράς (βλ. Σχήμα 5-13(b)).



Σχήμα 5-15 Σενάριο 2VC ΣΠ3, ισοδύναμο πάρκο στον υποσταθμό 1043: (a) τερματική τάση, (b) ενεργός παραγωγή

Λίγο μετά το $t=150s$ μεγιστοποιείται το ρεύμα του μετατροπέα, με αποτέλεσμα τη μείωση της τερματικής τάσης V_t (βλ. σχήμα 5-15(a)) προκειμένου το ρεύμα να μην υπερβεί το μέγιστο επιτρεπτό όριο. Κοντά στο $t=180s$ και ενόσω οι τάσεις μεταφοράς στο σύστημα μειώνονται συνεχώς, ανιχνεύεται αδυναμία μεταφοράς της παραγόμενης ενεργού ισχύος P_s του ισοδύναμου μετατροπέα, με αποτέλεσμα την επιβολή μείωσης της παραγόμενης ενεργού ισχύος κατά 10% προς αποφυγή της αστάθειας. Η συγκεκριμένη δράση αυξάνει τα περιθώρια αέργου παραγωγής του μετατροπέα με αποτέλεσμα την ανύψωση της τερματικής τάσης V_t του μετατροπέα (Σχήμα 5-15(a)) καθώς και των τάσεων μεταφοράς (Σχήμα 5-13 (b) και Σχήμα 5-16). Ωστόσο, ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου λόγω δράσης των ΣΑΤΥΦ (Σχήμα 5-13 (a)) συνεχίζεται, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση των τάσεων στο σύστημα μέχρις ότου τα ΣΑΤΥΦ τερματίσουν τις διαθέσιμες λήψεις τους. Η συγκεκριμένη αλληλουχία γεγονότων (μείωση P_s λόγω αδυναμίας μεταφοράς ισχύος) συμβαίνει στους 9 από τα 11 ζυγούς με συνδεδεμένη ισοδύναμη διεσπαρμένη λόγω της ασταθούς λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα 5-16 Σενάριο 2VC ΣΠ3, τάσεις ζυγών μεταφοράς

Από την παραπάνω ανάλυση διαπιστώνεται ότι το ΣΠ3 δυσχεραίνει την απόκριση του συστήματος, όταν η διεσπαρμένη παραγωγή είναι συνδεδεμένη κοντά στα κέντρα κατανάλωσης, ενώ σημειώνεται ότι το φαινόμενο εντείνεται στην περίπτωση σύνδεσης διεσπαρμένης παραγωγής και φορτίων στον ίδιο μετασχηματιστή, λόγω ισχυρότερης σύζευξης της αέργου ισχύος από τα πάρκα και της κατανάλωσης των φορτίων.

Τονίζεται ωστόσο, ότι τα συμπεράσματα από την παρούσα ενότητα, δεν καθιστούν το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας απορριπτέο, καθώς όπως παρουσιάστηκε στην εργασία [Σου19], η ευστάθεια του συστήματος μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά από την εκμετάλλευση ενός παρόμοιας αρχιτεκτονικής σχήματος προστασίας, υπό την προϋπόθεση ότι οι μονάδες ΑΠΕ είναι απομακρυσμένες από τα κέντρα κατανάλωσης.

5.5.6 Επίδοση σχήματος ΣΠ4

Δεδομένων των αποτελεσμάτων του ΣΠ3 στο σενάριο 2VC, εξετάζεται στην παρούσα ενότητα το λιγότερο αισιόδοξο ΣΠ4, το οποίο αφενός εκμεταλλεύεται άμεσα την πλήρη δυνατότητα στήριξης του συστήματος μεταφοράς από τη διεσπαρμένη παραγωγή, αλλά θα προβαίνει σε έμμεση αποκοπή φορτίου εάν σημανθεί δεύτερο σήμα συναγερμού στην περιοχή που πλήττεται από φαινόμενα αστάθειας τάσης. Τονίζεται πως παρά το ότι το ΣΠ3 δεν προβαίνει σε έμμεση αποκοπή φορτίου, αυτή συνέβη επί της ουσίας, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.5.5, καθώς τα ΣΑΤΥΦ δεν μπορούσαν να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης.

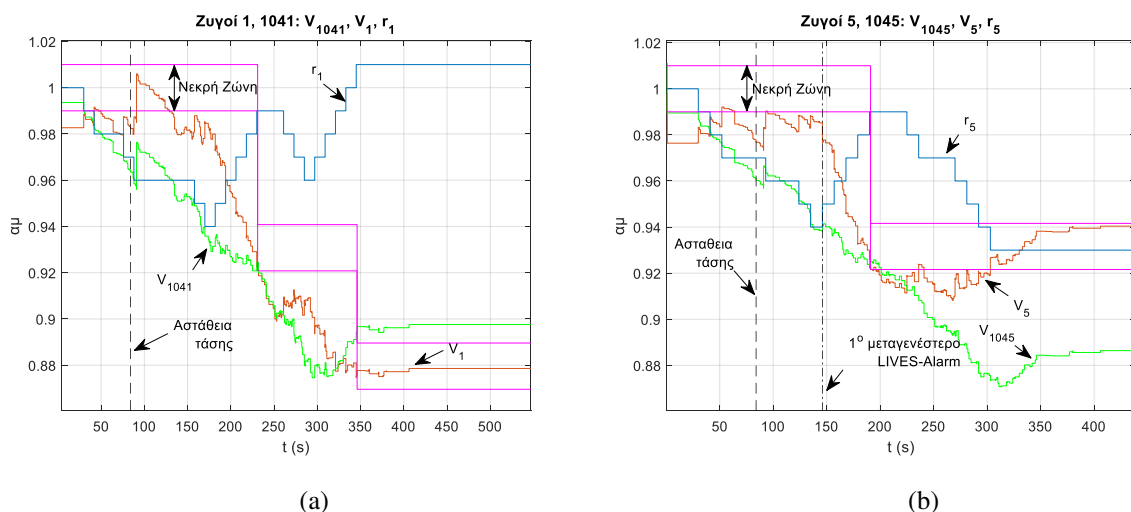
Στον πίνακα 5.14 παρατίθενται τα αποτελέσματα εφαρμογής του ΣΠ4 στο σενάριο 2VC. Σημειώνεται, ότι πριν την ανίχνευση της αστάθειας τάσης από τη LIVES, οι ισοδύναμες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής λειτουργούν σε σχήμα ελέγχου τάσης.

Πίνακας 5.14 Σενάριο 2VC με ΣΠ4 (EMRS & LIVES-Restore)

#	Αστάθεια (s)	1 ^{ος} συναγερμός LIVES (s)	Ενεργοποίηση EMRS (s)	1 ^ο μεταγενέστερο LIVES-Alarm (s)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Ζυγοί	Κατάρρευση
2VC	84	100	100	146	337.98	41,5,1,42,4,46,43,1	-

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.14, η έμμεση αποκοπή φορτίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του σεναρίου χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή (βλ. πίνακα 5.11) και αφορά περισσότερους υποσταθμούς, ωστόσο είναι επίσης σημαντικά μικρότερη από την αποκοπή 590MW της εφαρμογής του ΣΠ3 (Πίνακας 5.13). Ο κύριος λόγος για τον οποίο η έμμεση αποκοπή φορτίου είναι μεγαλύτερη αυτής του ΣΠ1 αφορά στην καθυστερημένη ενεργοποίηση του συναγερμού LIVES στο $t=100s$, για τους λόγους που εξηγήθηκαν στην ενότητα 5.3. Το γεγονός αυτό, λαμβάνοντας υπόψιν και τα αποτελέσματα του ΣΠ3, δείχνει ότι επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα όταν αξιοποιείται μόνο η έκτακτη λειτουργία ΣΑΤΥΦ, σε σχέση με όταν αυτή συνδυάζεται μη συντονισμένα με την έκτακτη λειτουργία της διεσπαρμένης παραγωγής.

Με άλλα λόγια, η δοκιμή του ΣΠ4 στο σενάριο 2VC καθιστά περισσότερο εμφανείς τις αδυναμίες που προκύπτουν στο σύστημα όταν δεν λειτουργούν συντονισμένα τα ΣΑΤΥΦ με τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, η ενεργοποίηση της έκτακτης λειτουργίας EMRS τη στιγμή $t=100s$ συντελεί στη διατήρηση υψηλών προφίλ τάσεων στη διανομή (βλ. σχήμα 5-17(a),(b)). Η αδυναμία έγκειται στο γεγονός ότι αποκρύπτεται με αυτόν τον τρόπο η αδυναμία των ΣΑΤΥΦ να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου να διαφαίνεται ευσταθής, ενώ στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει λόγω της έκτακτης παροχής αέργου ισχύος από τις διεσπαρμένες πηγές και της προσωρινής στήριξης των τάσεων από τις απομακρυσμένες συμβατικές μονάδες. Στο μεταξύ ωστόσο, ορισμένες εκ των διεσπαρμένων πηγών φτάνουν σε όριο ρεύματος, ενώ παράλληλα σε πολλές εκ των απομακρυσμένων συμβατικών μονάδων ενεργοποιούνται σταδιακά τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης, με αποτέλεσμα την αποδυνάμωση της μεταφορικής ικανότητας του συστήματος.



Σχήμα 5-17 Σενάριο 2VC ΣΠ4, τάσεις μεταφοράς, διανομής, ΣΑΤΥΦ: (α) Ζυγός φορτίου 1, (β) Ζυγός φορτίου 5

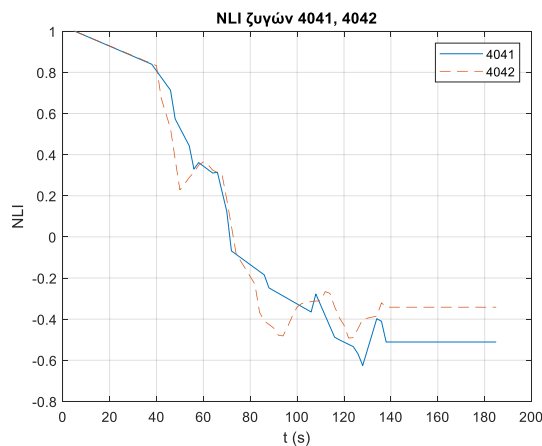
Συνεπώς, η διατήρηση υψηλών προφίλ τάσεων στη διανομή παρεμποδίζει τη LIVES να αναγνωρίσει τοπική αστάθεια τάσης και διατηρεί σε υψηλά επίπεδα την κατανάλωση της κεντρικής περιοχής, ενώ παράλληλα το σύστημα παραγωγής αποδυναμώνεται, διότι μειώνονται τα περιθώρια αέργου παραγωγής. Στη συνέχεια, η σταδιακή ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης αφενός και η λειτουργία όλο και περισσότερων διεσπαρμένων πηγών υπό όριο ρεύματος αποδυναμώνουν απότομα το σύστημα με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεταγενέστερων σημάτων συναγερμού σε πολλούς υποσταθμούς της κεντρικής περιοχής. Το πρώτο μεταγενέστερο σήμα συναγερμού ενεργοποιείται στο $t=146s$, όταν δηλαδή ήδη έχουν ενεργοποιηθεί τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης έξι συμβατικών μονάδων και τριών ισοδύναμων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής, συντελώντας σε πολύ μικρότερα περιθώρια άεργης υποστήριξης του συστήματος. Εκείνη τη χρονική στιγμή το σύστημα βρίσκεται σε πολύ δυσμενέστερη κατάσταση σε σχέση με τη στιγμή ενεργοποίησης της EMRS στο $t=100s$, γεγονός που οδηγεί στην αναγκαιότητα για έμμεση περικοπή μεγαλύτερης ποσότητας φορτίων. Είναι χαρακτηριστική η απόκριση της τάσης διανομής του ζυγού 1 (Σχήμα 5-17(a)), στην οποία παρά το πρώτο σήμα LIVES-Restore στο $t=230s$, το ΣΑΤΥΦ καθίσταται ξανά ασταθές στο $t=300s$ με αποτέλεσμα την επιβολή δεύτερης μείωσης της νεκρής ζώνης.

5.5.7 Επίδοση σχήματος ΣΠ5

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η επίδοση του σχήματος ΣΠ5 στο σενάριο 1UPF. Υπενθυμίζεται ότι το ΣΠ5 εκμεταλλεύεται τους δείκτες *NLI*, που υπολογίζονται στους συνοριακούς ζυγούς 4041 και 4042 (ο 4044 παύει να είναι συνοριακός λόγω απώλειας γραμμής 4032-4044) και έχει εμπνευστεί από την εργασία [OVC21].

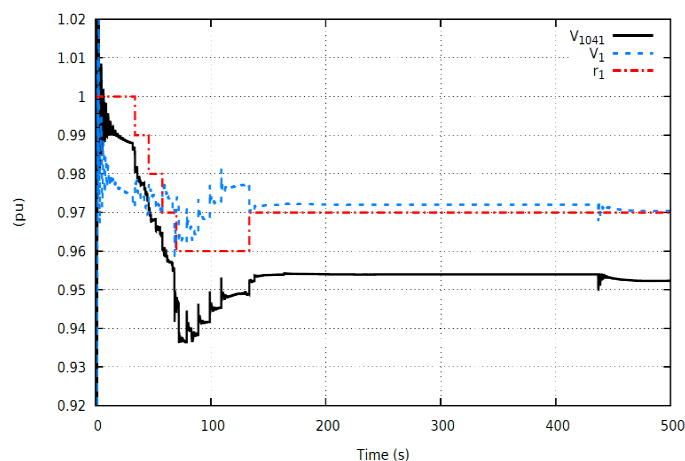
Το σενάριο 1UPF εξετάστηκε στο λογισμικό RAMSES για την αξιολόγηση του δείκτη *NLI* στην ανίχνευση της αστάθειας με παρουσία βραχυπρόθεσμων δυναμικών. Η διαφορά στην προσομοίωση της διαταραχής, σε σχέση με αυτήν της ενότητας 5.4.1, έγκειται στο ότι προσομοιώθηκε και το στερεό τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό 4032, το οποίο εκκαθαρίστηκε μετά από 100ms με ταυτόχρονο άνοιγμα της

γραμμής 4032-4044. Στο σχήμα 5-18 απεικονίζεται η απόκριση των NLI στους ζυγούς 4041 και 4042 κατά την προσομοίωση του σεναρίου 1UPF χωρίς μέτρα αντιμετώπισης, όπου και παρατηρείται ότι οι δείκτες NLI ανιχνεύουν το ίδιο έγκαιρα την αστάθεια όπως και η LIVES (βλ. πίνακα 5.6), καθώς γίνονται αρνητικοί τις στιγμές 69s(73s) και 70s(74s) αντίστοιχα, ενώ ο πρώτος συναγερμός από τη LIVES ενεργοποιείται τη στιγμή 76s. Οι αντίστοιχοι χρόνοι στην οιονεί στατική προσομοίωση ήταν (βλ. πίνακα 5.9) 73s και 71s αντίστοιχα.



Σχήμα 5-18 Σεσάριο 1UPF χωρίς σχήμα προστασίας: NLI ζυγών 4041, 4042

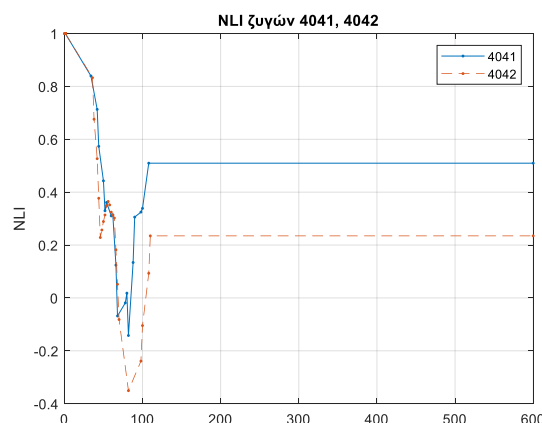
Με βάση την απόκριση του NLI στους ζυγούς 4041 και 4042 (σχήμα 5-18), η προσομοίωση επαναλαμβάνεται εφαρμόζοντας το ΣΠ5. Μετά από μία προκαθορισμένη καθυστέρηση $\tau_2=5$ δευτερολέπτων από την ενεργοποίηση των δύο NLI των συνοριακών ζυγών άφιξης κεντρικής περιοχής, προσαρμόζεται η νεκρή ζώνη των ΣΑΤΥΦ στην τιμή της τάσης διανομής κατά την τρέχουσα χρονική στιγμή και παγώνει η περαιτέρω προσπάθεια των ΣΑΤΥΦ της κεντρικής περιοχής για ανύψωση των τάσεων διανομής. Ταυτόχρονα δίνεται εντολή ώστε όλες οι ισοδύναμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής της κεντρικής περιοχής να αυξήσουν την άεργο παραγωγή τους με σταθερό ρυθμό $\Delta Q/\Delta T=0.3$ αμ/λεπτό. Η αύξηση της αέργου παραγωγής από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής της κεντρικής περιοχής συνεχίζεται μέχρις ότου είτε γίνουν ξανά θετικοί οι NLI δείκτες, είτε αυτές εξαντληθούν νωρίτερα. Στο σχήμα 5-19 παρουσιάζεται η απόκριση στον ζυγό φορτίου 1, όπου μπορεί να παρατηρηθεί η ανύψωση των τάσεων μεταφοράς και διανομής μέχρι περίπου τα 120s, γεγονός που αποκαθιστά ξανά τους δείκτες NLI (Σχήμα 5-20) σε θετικές τιμές.



(a)

(b)

Σχήμα 5-19 Σεσάριο 1UPF ΣΠ5: Απόκριση τάσεων και ΣΑΤΥΦ



Σχήμα 5-20 Σενάριο 1UPF ΣΠ5: Απόκριση *NLI*

Στον πίνακα 5.15 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του σεναρίου 1UPF με εφαρμογή του ΣΠ5 και αντιπαραβάλλονται με αυτά του σεναρίου 0 (χωρίς διεσπαρμένη παραγωγή). Είναι εμφανές ότι η συνολική αποκοπή φορτίου είναι σημαντικά μικρότερη σε σχέση με τα προηγούμενα σχήματα προστασίας. Η κύρια εξήγηση βασίζεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας δεν υλοποιεί αντίστροφη δράση στα ΣΑΤΥΦ, αλλά αντιθέτως προσαρμόζει την νεκρή ζώνη στην τρέχουσα τιμή κατά τη στιγμή που γίνονται αρνητικοί οι δύο *NLI*. Όπως δείχτηκε από τα σενάρια των προηγούμενων ενοτήτων, η αντίστροφη λειτουργία ΣΑΤΥΦ τείνει να μειώσει την τοπική τάση διανομής, υλοποιώντας έμμεση αποκοπή φορτίου, πράγμα το οποίο στην προκειμένη περίπτωση αποφεύγεται.

Πίνακας 5.15 Συνδεσμολογία 1 με εφαρμογή ΣΠ5 (*NLI* και άεργος αντιστάθμιση)

#	Αστάθεια (s)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Κατάρρευση (s)
0	66	186.38	153
1UPF	73	99.95	-

Στην περίπτωση που αξιοποιείται η αντίστροφη δράση των ΣΑΤΥΦ, η τάση διανομής τείνει να μειωθεί περαιτέρω σε σύγκριση με την τιμή που είχε κατά τη σήμανση του συναγερμού, δηλαδή αμέσως πριν από την πρώτη αντίστροφη δράση του ΣΑΤΥΦ. Σημειώνεται, ότι η παραπάνω παρατήρηση δεν ισχύει κατ'ανάγκη στη γενική περίπτωση, καθώς είναι δυνατόν οι αντίστροφες δράσεις από γειτονικά ΣΑΤΥΦ να ανακουφίζουν το σύστημα μεταφοράς και συνεπώς να υπερκαλύπτουν τη δράση του τοπικού ΣΑΤΥΦ. Ωστόσο, στη συνήθη περίπτωση, η αντίστροφη δράση ΣΑΤΥΦ τείνει να μειώσει την τάση διανομής που ελέγχει και ως εκ τούτου να αυξήσει την έμμεση αποκοπή φορτίου. Στην προκειμένη περίπτωση επομένως, δεδομένου ότι η νεκρή ζώνη προσαρμόζεται στην τιμή που είχε η τάση διανομής κατά τη στιγμή του συναγερμού, συμπεραίνεται ότι αυτή βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα από αυτά που θα βρισκόταν εάν εφαρμόζοταν επιπρόσθετα και αντίστροφη λειτουργία ΣΑΤΥΦ.

Ένας δεύτερος λόγος για τον οποίο επιτυγχάνεται μικρότερη αποκοπή φορτίου σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα προστασίας, αποτελεί το γεγονός της συντονισμένης παροχής αέργου ισχύος από τις ισοδύναμες πηγές διεσπαρμένης παραγωγής. Στην περίπτωση ενός αμιγώς τοπικού σχήματος (π.χ. ΣΠ2), μέρος της έκτακτης αέργου παροχής στο σύστημα μεταφοράς από μία ισοδύναμη πηγή διεσπαρμένης παραγωγής ενδέχεται να αξιοποιείται λιγότερο αποδοτικά εξαιτίας της ταυτόχρονης δράσης ΣΑΤΥΦ από υποσταθμούς της ίδιας περιοχής, στους οποίους δεν έχει ενεργοποιηθεί κανονικό σήμα συναγερμού (δηλαδή ζυγοί χωρίς σήμα LIVES-Restore, βλ. σχήμα 5-12).

Η συντονισμένη παροχή αέργου ισχύος από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα και το ταυτόχρονο πάγωμα των ΣΑΤΥΦ για προσπάθεια επαναφοράς των τάσεων διανομής εντός της νεκρής ζώνης, συνιστά καλύτερο βαθμό αξιοποίησης της αέργου παραγωγής των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής από το σύστημα μεταφοράς.

5.5.8 Σύγκριση σχημάτων προστασίας για σενάριο 1UPF

Σε αυτή την ενότητα γίνονται συγκρίσεις ορισμένων από τα σχήματα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες και αναφέρονται στην ίδια περίπτωση 1UPF. Τα σχήματα προστασίας που συγκρίνονται, διαφοροποιούνται σε βασικά χαρακτηριστικά όπως π.χ. εάν είναι τοπικά ή ευρείας περιοχής και εάν αξιοποιούν τη διεσπαρμένη παραγωγή. Όλα τα σχήματα χαρακτηρίζονται από προσαρμοστικότητα και σκοπός τους είναι να ελαχιστοποιούν, κατά το δυνατόν, την αρνητική επίπτωση στους καταναλωτές. Μέσα από τη σύγκριση, καθίσταται σαφές ποιοι παράγοντες είναι περισσότερο κρίσιμοι και πως αυτοί μπορούν να αξιοποιηθούν στον μέγιστο βαθμό, με σκοπό την κατά το δυνατόν πιο αξιόπιστη και λιγότερο παρεμβατική δράση στο σύστημα.

Για τους παραπάνω λόγους, τα εξεταζόμενα εναλλακτικά σχήματα προστασίας δεν προβαίνουν σε άμεση αποκοπή φορτίου, παρά μόνο σε έμμεση, η οποία βασίζεται σε μείωση της νεκρής ζώνης στους υποσταθμούς διανομής και σε αξιοποίηση αέργου παραγωγής στο σύστημα μεταφοράς από τη διεσπαρμένη παραγωγή στο δίκτυο διανομής. Σημειώνεται, ότι τα σχήματα ΣΠ3 και ΣΠ4 δεν αξιολογούνται περαιτέρω, καθώς τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στις ενότητες 5.5.5 και 5.5.6 έδειξαν ότι δεν ενδείκνυνται για εφαρμογή σε διεσπαρμένη παραγωγή που συνδέεται σε δίκτυα διανομής σε κοντινή ηλεκτρική απόσταση με τα κέντρα κατανάλωσης.

Η βάση των συγκρίσεων αποτυπώνεται στο έμμεσα αποκοπτόμενο φορτίο όπως ορίστηκε στη σχέση (5-1), καθώς και στο περιθώριο αέργου υποστήριξης q_r της διεσπαρμένης παραγωγής, το οποίο ορίζεται στην ακόλουθη σχέση ως ο λόγος του διαθέσιμου ρεύματος μετατροπέα ως προς ονομαστικό:

$$q_r = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^{max} - I_i)}{\sum_i I_i^{max}} \quad (5-2)$$

όπου N είναι το πλήθος των μετατροπέων, I_i το εγχεόμενο στο δίκτυο ρεύμα από τον i -στό ισοδύναμο μετατροπέα διεσπαρμένης παραγωγής μετά την επίτευξη νέου μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και I_i^{max} το μέγιστο ρεύμα του i -στού ισοδύναμου μετατροπέα, με βάση τα δεδομένα του πίνακα 5.3.

5.5.8.1 Παράμετροι λειτουργίας συγκρινόμενων σχημάτων προστασίας

Στον πίνακα 5.16 παρατίθενται συνοπτικά τα κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συγκρινόμενων σχημάτων προστασίας, ενώ στον πίνακα 5.17 περιλαμβάνονται οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, στον πίνακα 5.16 η στήλη «Συναγερμός» αναφέρεται στον τρόπο ενεργοποίησης κάθε σχήματος προστασίας (από τοπικό σήμα ή ευρείας περιοχής), η στήλη «Έλεγχος» στις δράσεις με τις οποίες αντιμετωπίζεται η αστάθεια τάσης από το κάθε σχήμα και η στήλη «Επαναφορά» στον τρόπο με τον οποίο αρχικοποιείται το κάθε σχήμα.

Πίνακας 5.16 Κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά συγκρινόμενων σχημάτων προστασίας

Σχήμα Προστασίας	Συναγερμός	Έλεγχος	Επαναφορά
ΣΠ1	Τοπικός	❖ Αντίστροφη δράση ΣΑΤΥΦ ❖ Προσαρμογή νεκρής ζώνης	❖ $\Delta V_r > 0$
ΣΠ2	Τοπικός	❖ Αντίστροφη δράση ΣΑΤΥΦ ❖ Προσαρμογή νεκρής ζώνης ❖ Αεργος υποστήριξη (ράμπα) διεσπαρμένων πηγών	❖ $\Delta V_r > 0$ για αντίστροφη δράση ΣΑΤΥΦ ❖ I_{max} για ράμπα αέργου υποστήριξης
ΣΠ5	Τοπικός/Ευρείας περιοχής	❖ Προσαρμογή νεκρής ζώνης ❖ Αεργος υποστήριξη (ράμπα) διεσπαρμένων πηγών	❖ $NLI > 0$ για $\Delta t = \tau_3$

Ο πίνακας 5.17 περιλαμβάνει τις παραμέτρους των σχημάτων προστασίας. Περιλαμβάνονται οι καθυστερήσεις δράσης των ΣΑΤΥΦ T_d , οι οποίες υπενθυμίζεται ότι κυμαίνονται μεταξύ 8 και 10s για την

αποφυγή ταυτοχρονισμού δράσεων των ΣΑΤΥΦ. Περιλαμβάνονται επίσης οι μέγιστες επιτρεπτές θερματικές τάσεις των ισοδύναμων μετατροπών V_t^{max} , ο ρυθμός αύξησης της θερματικής τάσης $\Delta V_{t,ref}$ για το ΣΠ2 και ο αντίστοιχος ρυθμός αύξησης της επιθυμητής τιμής αέργου ισχύος ΔQ στο σχήμα ΣΠ5. Τέλος, με τ_1 συμβολίζεται ο χρόνος που πρέπει να παρέλθει από τη μετάβαση ενός μόνο NLI σε αρνητική τιμή προκειμένου να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης, τ_2 η αντίστοιχη καθυστέρηση εάν γίνουν αρνητικοί τουλάχιστον δύο δείκτες NLI , ενώ με τ_3 συμβολίζεται η χρονική καθυστέρηση που πρέπει να παρέλθει αφότου γίνουν ξανά θετικοί όλοι οι NLI , ώστε να αρχικοποιηθεί το σχήμα προστασίας ΣΠ5.

Πίνακας 5.17 Παράμετροι συγκρινόμενων σχημάτων προστασίας

Τοπικά σχήματα προστασίας			Σχήματα προστασίας ευρείας περιοχής			
ΣΠ1 / ΣΠ2			ΣΠ5			
T_d	V_t^{max}	$\Delta V_{t,ref}$	τ_1	τ_2	τ_3	$\Delta Q/\Delta T$
(s)	(αμ)	(αμ/λεπτό)	(s)	(s)	(s)	(αμ/10s)
8-10	1.1	0.06	10	5	5	0.05

5.5.8.2 Αποτελέσματα σύγκρισης

Στον Πίνακα 5.18 καταγράφονται οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ενεργοποιούνται οι συναγερμοί στο σενάριο 1UPF (Πίνακας 5.18 για ΣΠ1/2 και Πίνακας 5.19 για ΣΠ5). Ανάλογα με το εκάστοτε σχήμα προστασίας, εφαρμόζονται οι αντίστοιχες διορθωτικές κινήσεις που αναφέρθηκαν στην ενότητα 5.5.1 λαμβάνοντας υπόψιν τις τιμές των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στον πίνακα 5.17.

Πίνακας 5.18 Χρονικές στιγμές ενεργοποίησης συναγερμών LIVES και τιμές τάσεων ζυγών μεταφοράς

$t(s)$	Ζυγός διανομής συναγερμού LIVES	Τάση μεταφοράς κατά τον συναγερμό (αμ)	LIVES-Restore (s)
76	43	$V_{4043} = 0.9654$	99
78	1	$V_{1041} = 0.9328$	103
80	4	$V_{1044} = 0.9267$	101
80	46	$V_{4046} = 0.9712$	105
82	42	$V_{4042} = 0.9464$	103

Πίνακας 5.19 Χρονικές στιγμές ενεργοποίησης NLI και τάσεις ζυγών μεταφοράς κατά την ενεργοποίηση

Ζυγός	$t_{NLI,4041}$	$t_{NLI,4042}$
4042	0.9573	0.9563
4043	0.9693	0.9678
4046	0.9787	0.9772
1041	0.9464	0.9370
1043	0.9675	0.9553
1044	0.9370	0.9336
1045	0.9509	0.9481

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι τάσεις σε όλους τους ζυγούς μεταφοράς είναι σχετικά κοντά τόσο κατά τις στιγμές ενεργοποίησης συναγερμού από τους δείκτες NLI όσο και κατά τη στιγμή των συναγερμών της LIVES σε σχέση με τους συναγερμούς LIVES-Alarms, πράγμα αναμενόμενο λόγω των παραπλήσιων στιγμών που ενεργοποιούνται οι συναγερμοί από τη LIVES και τον NLI . Δεδομένου ότι οι δείκτες NLI ενεργοποιούνται ελαφρώς νωρίτερα από τη LIVES, αναμένεται και μικρότερη έμμεση αποκοπή φορτίου, καθώς θα είναι υψηλότερες και οι αντίστοιχες τάσεις στη διανομή.

Στον πίνακα 5.20 παρουσιάζονται οι τελικές τάσεις διανομής στις προσομοιώσεις του σεναρίου 1UPF με τα σχήματα προστασίας ΣΠ1 και ΣΠ2 αντίστοιχα. Είναι εμφανές ότι η βελτίωση του προφίλ των τάσεων στη

διανομή λόγω της αύξησης της αέργου παραγωγής των διεσπαρμένων πηγών παίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση του έμμεσα αποκοπτόμενου φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν και η αλληλουχία των σημάτων συναγερμού είναι ίδια με την προσομοίωση IUPF χωρίς εφαρμογή σχήματος προστασίας (Πίνακας 5.6), δεν εμφανίζονται συναγερμοί στους ζυγούς 5 και 3, καθώς τα μέτρα αντιμετώπισης (αντίστροφες δράσεις ΣΑΤΥΦ) που έχουν ήδη εφαρμοστεί στους προηγούμενους υποσταθμούς ανακουφίζουν το σύστημα.

Πίνακας 5.20 Σχήματα προστασίας ΣΠ1 και ΣΠ2

Ζυγός	Τελική τιμή V_d ΣΠ1	Τελική τιμή V_d ΣΠ2
43	0.9483	0.9578
1	0.9444	0.9541
4	0.953	0.965
46	0.9548	0.9723
42	0.9382	0.9472

Στον πίνακα 5.21 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από την σύγκριση των τριών σχημάτων προστασίας. Στην τέταρτη στήλη περιλαμβάνεται το αρχικό περιθώριο αέργου παραγωγής των ισοδύναμων μονάδων με μετατροπείς, όπου και μπορεί να παρατηρηθεί ότι όλες οι διεσπαρμένες πηγές είναι ήδη αρκετά φορτισμένες, λόγω της ενεργού παραγωγής τους (Πίνακας 5.3)

Πίνακας 5.21 Συγκριτικά αποτελέσματα σχημάτων προστασίας

ΣΠ	Συνολική αέργος έγχυση (MVAr)	Συνολική έμμεση αποκοπή (MW)	Αρχικό αέργο περιθώριο q_r (%)	Τελικό αέργο περιθώριο q_r (%)
1	-	159.57		11.16
2	266.82	114.21	11.59	7.56
5	217.62	99.95		11.01

Όπως αναμενόταν, το περιθώριο q_r στο ΣΠ1 δεν αναμένεται να αποκλίνει ιδιαίτερα από το περιθώριο αέργου παραγωγής προ της διαταραχής, διότι η αέργος παραγωγή των διεσπαρμένων πηγών παραμένει μηδενική. Η όποια απόκλιση υπάρχει, δικαιολογείται από τη μεταβολή της τερματικής τάσης V_t των ισοδύναμων πηγών με μετατροπείς, η οποία συνεπάγεται μεταβολή του ρεύματος ώστε να παραμείνει σταθερή η ενεργός παραγωγή και συνεπώς μείωση του αέργου περιθωρίου q_r .

Στην περίπτωση εφαρμογής του σχήματος ΣΠ5 (ενότητα 5.5.7), η συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου προκύπτει ίση με 99,95 MW, ενώ η τιμή του q_r προκύπτει ίση με 11.01%, γεγονός που δείχνει ότι η συντονισμένη αύξηση της αέργου παραγωγής προς το σύστημα επαναφέρει την ευστάθεια στο σύστημα με αισθητά μικρότερη έγχυση αέργου ισχύος εν συγκρίσει με το αέργο περιθώριο που προκύπτει από την εφαρμογή του ΣΠ2.

Η μικρότερη αποκοπή φορτίου του ΣΠ5 αποδίδεται αφενός στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας δεν υλοποιεί περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης μέσω αντίστροφης δράσης των ΣΑΤΥΦ, πέρα από την προσαρμογή της νεκρής ζώνης κατά τη στιγμή του συναγερμού, καθώς και από το γεγονός ότι οι ισοδύναμες διεσπαρμένες πηγές παρέχουν συντονισμένα αέργο ισχύ στο σύστημα ενόσω ο μηχανισμός αποκατάστασης της κατανάλωσης από τα ΣΑΤΥΦ έχει παγώσει. Καθίσταται συνεπώς σαφές ότι τα σχήματα ΣΠ1 και ΣΠ2 είναι περισσότερο συντηρητικά του σχήματος ΣΠ5.

Τα παραπάνω δικαιολογούν το γεγονός ότι με περίπου 50MVAr λιγότερη συνολική αέργο παραγωγή (Πίνακας 5.21), το ΣΠ5 καταφέρνει επιτυχάνει λιγότερη έμμεση αποκοπή φορτίου από το ΣΠ2. Το γεγονός αυτό φανερώνει την ανωτερότητα μίας συντονισμένης αύξησης της αέργου παραγωγής από μία περιοχή που πλήττεται από αστάθεια τάσης προς το σύστημα μεταφοράς, εν αντιθέσει με όταν αυτή συμβαίνει αυτόνομα σε τοπικό επίπεδο. Στον πίνακα 5.22 παρουσιάζονται οι τελικές τάσεις μεταφοράς που προκύπτουν από την εφαρμογή του εκάστοτε σχήματος προστασίας στο σενάριο IUPF.

Πίνακας 5.22 Συγκριτικά αποτελέσματα σχημάτων προστασίας

Ζυγός	ΣΠ1	ΣΠ2	ΣΠ5
1041	0.9478	1.0202	0.9524
1042	0.9928	1.0078	0.9990
1043	0.9645	1.0242	0.9678
1044	0.9404	0.988	0.9349
1045	0.9518	0.9939	0.9513
4041	0.9859	1.0094	0.9751
4042	0.9642	1.0073	0.9495
4043	0.9728	1.0176	0.9641
4046	0.9803	1.0238	0.9730
4047	1.0175	1.0492	1.011
4051	1.0297	1.0534	1.031

Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι συντονισμένη λήψη διορθωτικών μέτρων σε μια περιοχή που πλήττεται από φαινόμενα αστάθειας τάσης είναι αποδοτικότερη από την ανεξάρτητη λήψη μέτρων σε τοπικό επίπεδο, καθώς ο ετεροχρονισμός των δράσεων απομειώνει την επίδραση που έχει στο σύστημα η αύξηση της αέργου παραγωγής από τις διεσπαρμένες πηγές (π.χ. κανονική λειτουργία ΣΑΤΥΦ σε γειτονικούς υποσταθμούς). Το σημαντικότερο μειονέκτημα ωστόσο του σχήματος ΣΠ5 είναι η πολυπλοκότητα υλοποίησης σε επίπεδο εξοπλισμού, καθώς απαιτούνται συστήματα επικοινωνιών για τον συντονισμό των μέτρων αντιμετώπισης.

5.6 Συμπεράσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν αποτελέσματα διερεύνησης για την επίδραση της ένταξης διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο MT μέσω μετατροπών ισχύος σε σημεία πλησίον των φορτίων στην εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης. Οι δοκιμές διεξήχθησαν στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic [TF15] στο οποίο ενσωματώθηκαν συγκεντρωτικά μοντέλα ισοδύναμων διεσπαρμένων πηγών και εξετάστηκαν δύο συνδεσμολογίες της διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα. Κατά τη συνδεσμολογία 1 η διεσπαρμένη παραγωγή θεωρήθηκε συνδεδεμένη στον ίδιο μετασχηματιστή και δίκτυο διανομής με την κατανάλωση, ενώ στη συνδεσμολογία 2 η σύνδεση θεωρήθηκε στον ίδιο υποσταθμό, αλλά σε ξεχωριστό μετασχηματιστή ισχύος και δίκτυο διανομής.

Η συνδεσμολογία 1 κατέδειξε ότι η σύζευξη της άεργης υποστήριξης από τις ανανεώσιμες πηγές με την κατανάλωση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ανίχνευση της αστάθειας, παρότι ενισχύεται γενικά το περιθώριο ευστάθειας τάσης. Κάτι τέτοιο παρατηρήθηκε στα σενάρια στα οποία οι διεσπαρμένες πηγές λειτουργούν με έλεγχο σταθερής τερματικής τάσης, όπου η μέθοδος LIVES αντιμετώπισε αδυναμία έγκαιρης ανίχνευσης της αστάθειας, εν αντιθέσει με τον δείκτη *NLI*, ο οποίος με βάση τα αποτελέσματα της ενότητας 5.4 έδειξε ότι μπορεί να ανιχνεύσει και στη συγκεκριμένη περίπτωση την αστάθεια. Σημειώνεται ότι το συμπέρασμα της αύξησης του περιθωρίου ευστάθειας τάσης λόγω ένταξης διεσπαρμένης παραγωγής στη διανομή έρχεται σε αντιδιαστολή με τα αποτελέσματα της αναφοράς [HPR21]. Το γεγονός αυτό όμως δικαιολογείται από το ότι στην εργασία [HPR21] έχει αντικατασταθεί τμήμα της συμβατικής παραγωγής με μονάδες ΑΠΕ, πράγμα που καθιστά το σύστημα παραγωγής πιο αδύναμο εκ των πραγμάτων, λόγω μειωμένων περιθωρίων αέργου παραγωγής που έχουν οι πηγές μετατροπών ισχύος σε σχέση με τις σύγχρονες μηχανές που αντικαθιστούν. Στην παρούσα εργασία το σύστημα συμβατικής παραγωγής παραμένει αμετάβλητο και εξετάζεται ένα σενάριο στο οποίο το αρχικό συνολικό φορτίο στο επίπεδο της μεταφοράς είναι πανομοιότυπο με της αναφοράς [TF15], αλλά η συνολική κατανάλωση έχει αυξηθεί λόγω ενσωμάτωσης επιπλέον διεσπαρμένης παραγωγής στο σύστημα. Συνεπώς, δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων, καθώς τα συστήματα συμβατικής παραγωγής είναι ανόμοια.

Αναφορικά με τη συνδεσμολογία 1 (διεσπαρμένη παραγωγή και φορτία στον ίδιο μετασχηματιστή διανομής) προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εκμετάλλευση των επικουρικών υπηρεσιών από πηγές συνδεδεμένες στη διανομή είναι προτιμότερο να έχει τον χαρακτήρα της έκτακτης λειτουργίας, δηλαδή να ενεργοποιείται κατόπιν αναγνώρισης της ασταθούς λειτουργίας του συστήματος, ειδάλλως υπάρχει ο κίνδυνος διατήρησης των τάσεων του συστήματος σε ονομαστικά επίπεδα, επιφορτίζοντας το σύστημα και συμβάλλοντας στη μείωση των περιθωρίων αέργου παραγωγής από το σύστημα παραγωγής. Εάν στην προκειμένη περίπτωση επέλθει αστάθεια τάσης, τότε θα απαιτούνται δραστικότερα μέτρα για την αποκατάσταση της ευστάθειας [VCV98].

Η συνδεσμολογία 2 (διεσπαρμένη παραγωγή και φορτία στον ίδιο υποσταθμό, αλλά σε διαφορετικό μετασχηματιστή) εξασφαλίζει αποδοτικότερη αξιοποίηση των επικουρικών υπηρεσιών στήριξης τάσης από τις διεσπαρμένες πηγές, καθώς η σύνθετη αντίσταση των δύο μετασχηματιστών στον ίδιο υποσταθμό εξασφαλίζει ότι η επιπρόσθετη άεργος παραγωγή από τις μονάδες με μετατροπείς αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό από το σύστημα μεταφοράς σε σχέση με τη συνδεσμολογία 1 και επηρεάζει λιγότερο την τοπική κατανάλωση των φορτίων.

Σε κάθε περίπτωση, η αστάθεια τάσης καθυστερεί να εκδηλωθεί σε σχέση με το σενάριο της αναφοράς [TF15], γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερα περιθώρια ευστάθειας του συστήματος, ωστόσο η κατάρρευση τάσης δεν συμβαίνει κατ'ανάγκη αργότερα, καθώς η συνολική επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής εξαρτάται από το σχήμα ελέγχου της (σταθερός συντελεστής ισχύς / σταθερή τάση). Για παράδειγμα, η διατήρηση των τάσεων σε υψηλότερα επίπεδα λόγω της λειτουργίας σταθερής τάσης των μετατροπέων φορτίζει περισσότερο το σύστημα μεταφοράς με αποτέλεσμα την ταχύτερη εξάντληση των περιθωρίων αέργου παραγωγής των συμβατικών σταθμών και κατά συνέπεια την γρηγορότερη κατάρρευση του συστήματος.

Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι πολύτιμα ως προς την προσέγγιση του σχεδιασμού ενός σχήματος προστασίας από αστάθεια τάσης, το οποίο αποσκοπεί στην εκμετάλλευση της διεσπαρμένης παραγωγής και αποφεύγει την άμεση αποκοπή φορτίου. Ως εκ τούτου, εξετάστηκαν εναλλακτικά σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης, τα οποία βασίζονται σε διαφορετική αρχιτεκτονική (τοπικά/ευρείας περιοχής) τόσο ως προς την ανίχνευση της αστάθειας τάσης (LIVES / NLI) όσο και ως προς τις διορθωτικές δράσεις, οι οποίες θεωρείται ότι εφαρμόζονται είτε αυτόνομα σε τοπικό επίπεδο, είτε σε συντονισμό βάσει σημάτων συναγερμού ευρείας περιοχής.

Εξετάστηκε επίσης η επίδραση που έχει ο ρυθμός παροχής της αέργου ισχύος στο σύστημα σε συνάρτηση με την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ και διαπιστώνεται ότι είναι εξαιρετικά σημαντικό η παροχή αέργου ισχύος από τις διεσπαρμένες πηγές να πραγματοποιείται με παραπλήσιο ρυθμό με αυτόν των δράσεων των ΣΑΤΥΦ. Υπό αυτή την προϋπόθεση είναι δυνατή η εξουδετέρωση του μηχανισμού αποκατάστασης της κατανάλωσης κατά τη φάση της αποκατάστασης του συστήματος. Τονίζεται, ότι στην προκειμένη περίπτωση παροχής αέργου ισχύος από διεσπαρμένες πηγές στη διανομή προς το σύστημα μεταφοράς κατά τη φάση αποκατάστασης του συστήματος, ο μηχανισμός αποκατάστασης της κατανάλωσης οφείλεται στη διεσπαρμένη παραγωγή, ενώ τα ΣΑΤΥΦ τον αναχαιτίζουν επαναφέροντας τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης, αρκεί ο ρυθμός παροχής της αέργου ισχύος από τις διεσπαρμένες πηγές στη διανομή να είναι παραπλήσιος του ρυθμού δράσεων των ΣΑΤΥΦ. Για τον λόγο αυτό κατέστη σαφές ότι η αύξηση της αέργου παραγωγής της διεσπαρμένης παραγωγής στη διανομή επιτυγχάνει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα όταν αυτή δεν μεγιστοποιείται σε ένα διακριτό βήμα (π.χ. μέθοδος EMRS) αλλά παρέχεται με σταδιακή αύξηση, επιτρέποντας στα ΣΑΤΥΦ να μεταβάλλουν τον λόγο μετασχηματισμού τους προκειμένου να περιορίζουν την αύξηση της κατανάλωσης. Τονίζεται και πάλι ότι το συγκεκριμένο συμπέρασμα αφορά την περίπτωση όπου η διεσπαρμένες πηγές βρίσκονται κοντά στα κέντρα κατανάλωσης και ιδανικά σε δίκτυα διανομής. Στην περίπτωση που η διεσπαρμένη παραγωγή είναι απομακρυσμένη από τα κέντρα κατανάλωσης, τότε έχειδειχθεί στην εργασία [Σου19] ότι η άμεση παροχή της μέγιστης δυνατής αέργου ισχύος επιτυγχάνει επιθυμητά αποτελέσματα, αυξάνοντας σημαντικά τις δυνατότητες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο σύστημα.

Από τις συγκρίσεις που διενεργήθηκαν στα σχήματα προστασίας που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, διαπιστώθηκε επίσης ότι η ομοιόμορφη και συντονισμένη παροχή αέργου ισχύος από τις διεσπαρμένες πηγές μίας περιοχής που πλήττεται από αστάθεια τάσης επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από την αυτόνομη παροχή σε τοπικό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι η συντονισμένη παροχή αέργου

ισχύος στο σύστημα αποκλείει την πιθανότητα εμφάνισης αλληλεξουδετέρωσης ανάμεσα στην άεργο υποστήριξη του συστήματος από τους μετατροπείς και στον μηχανισμό αποκατάστασης του φορτίου από τα ΣΑΤΥΦ, ο οποίος ενδέχεται να δρα σε υποσταθμούς όπου δεν έχουν ενεργοποιηθεί σήματα συναγερμού. Διαφορά στην έμμεση αποκοπή φορτίου φαίνεται επίσης ότι κάνει η έκτακτη λειτουργία ΣΑΤΥΦ, καταδεικνύοντας ότι η συμπερίληψή της στα μέτρα αντιμετώπιση ενός σχήματος προστασίας από κατάρρευση εξαρτάται από την απόφαση σχετικά με το πόσο συντηρητικό θα πρέπει να είναι το σχήμα προστασίας. Κάτι τέτοιο εξαρτάται φυσικά και από τα διαθέσιμα περιθώρια αέργου παραγωγής των διεσπαρμένων πηγών και συνεπώς από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε διασυνδεδεμένου συστήματος. Τα περιθώρια διαμορφώνονται τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού όσο και λειτουργίας, καθώς εξαρτώνται τόσο από το εκάστοτε σημείο λειτουργίας των μετατροπών ισχύος, όσο και από τον βαθμό υπερδιαστασιολόγησής τους που μπορεί να επιβάλλεται από τους διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς και διανομής, με σκοπό την επίτευξη του επιθυμητού βαθμού ασφαλείας του συστήματος.

Περαιτέρω διερεύνηση στις μεθόδους ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη, δεδομένης της επίδρασης των διεσπαρμένων πηγών στη δυναμική απόκριση των συστημάτων και στο προφίλ των τάσεων του συστήματος.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

6.1 Συμπεράσματα και συμβολή της διατριβής

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής διενεργήθηκε έρευνα που εστιάζει στη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης συστημάτων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα αναλύθηκαν τα παρακάτω θέματα:

- Ανάπτυξη και υλοποίηση μεθόδων ανίχνευσης αστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο βασιζόμενων σε μετρήσεις.
- Ανάπτυξη και υλοποίηση μεθόδου υπολογισμού του περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε πραγματικό χρόνο βάσει τοπικών μετρήσεων.
- Διερεύνηση της επίδρασης των απωλειών συστήματος στην ανίχνευση αστάθειας τάσης.
- Μελέτη επίδρασης διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης.
- Σχεδιασμός και σύγκριση σχημάτων προστασίας από κατάρρευση τάσης με αξιοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής.

Τα κυριότερα συμπεράσματα και η συγκεκριμένη συμβολή της διατριβής σε καθένα από τα παραπάνω θέματα αναλύεται στη συνέχεια.

6.1.1 Ανίχνευση αστάθειας τάσης από μετρήσεις πραγματικού χρόνου

Όπως αναπτύχθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο της διατριβής, οι μέθοδοι ανίχνευσης αστάθειας τάσης που βασίζονται στην προσαρμογή σύνθετων αντιστάσεων (σύνθετη αντίσταση φορτίου ίση με τη σύνθετη αντίσταση της πηγής) πάσχουν από το γεγονός ότι σε ενδιάμεσους ζυγούς του συστήματος μεταφοράς οι μετρούμενες σύνθετες αντιστάσεις δεν είναι αυτές που προβλέπει το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα η ισότητα των μετρούμενων αντιστάσεων να μην αντιστοιχεί στις πραγματικές συνθήκες εμφάνισης αστάθειας τάσεως.

Αντίθετα, όπως έδειξε η διατριβή στα κεφάλαια 2 και 3, οι δείκτες *NLI* και *RLI* δίνουν ακριβή αποτελέσματα ακόμη και από ενδιάμεσο ζυγό σε ένα ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες, ενώ σε δίκτυο με απώλειες και σε βροχοειδές δίκτυο η επίδοση των δεικτών *NLI/RLI* είναι άκρως ικανοποιητική. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα φάνηκε στο κεφάλαιο 4 για το βροχοειδές σύστημα δοκιμών IEEE Nordic και στην εργασία [LMV21] για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.

Στο συγκεκριμένο ζήτημα, η συμβολή της διατριβής έγκειται στα εξής:

- ✓ Αναπτύχθηκε υλοποίηση του τοπικού δείκτη *NLI*, μέσω της χρήσης συναρτήσεων φίλτρου από το πεδίο χρόνου-συχνότητας (STFT). Η χρήση του φίλτρου STFT αποδεικνύεται καταλληλότερη από τον κινητό μέσο όρο προηγούμενων δημοσιεύσεων, καθώς η ανάλυση στο πεδίο χρόνου-συχνότητας είναι ικανή να φιλτράρει τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα, ώστε το φιλτραρισμένο σήμα να μπορεί να αποτυπώσει πιο αποδοτικά τη μακροπρόθεσμη πορεία του μετρούμενου σήματος.
- ✓ Αναπτύχθηκε αλγόριθμος για τον υπολογισμό του δείκτη *RLI* από ηλεκτρονόμο γραμμής μεταφοράς, ο οποίος για τον μετριασμό της επίδρασης των βραχυπρόθεσμων δυναμικών στην ανίχνευση αστάθειας τάσης, βασίζεται επίσης στη χρήση φίλτρου STFT. Ο δείκτης ακολουθεί παρόμοια φιλοσοφία με τον δείκτη *NLI* αλλά διαθέτει λιγότερη πληροφορία για την εξαγωγή συμπερασμάτων, χωρίς αυτό ωστόσο να μειώνει την αξιοπιστία του.
- ✓ Διενεργήθηκαν εκτενείς προσομοιώσεις με χρήση λογισμικού που συμπεριλαμβάνει τις βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες δυναμικές ΣΗΕ και υλοποιήθηκαν οι αλγόριθμοι υπολογισμού των δεικτών αστάθειας τάσης *NLI/RLI* σε προσομοιώσεις με βραχυπρόθεσμες δυναμικές και θόρυβο μετρήσεων βάσει του προτύπου [IEE11].
- ✓ Προσομοιώθηκε και αξιολογήθηκε η δυνατότητα του δείκτη *RLI* για αποφυγή ανεπιθύμητης αποσύνδεσης γραμμής μεταφοράς από ενεργοποίηση του στοιχείου της τρίτης ζώνης προστασίας του ηλεκτρονόμου αποστάσεως κατά τη διάρκεια εξέλιξης φαινομένων αστάθειας τάσης.

6.1.2 Επίδραση απωλειών στην επίδοση των δεικτών *NLI/RLI*

Με βάση τα αποτελέσματα της διερεύνησης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, οι ωμικές απώλειες του δικτύου καθυστερούν την ανίχνευση αστάθειας τάσης με χρήση των μεθόδων *NLI/RLI*, επειδή η μετρούμενη ισχύς σε ενδιάμεσο ζυγό εμπεριέχει και τις ωμικές απώλειες του κατάντη δικτύου που συνεχίζουν να αυξάνουν και μετά το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος προς το φορτίο.

Στη διατριβή έγινε λεπτομερής διερεύνηση του φαινομένου σε ακτινικό σύστημα, στο οποίο οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ζυγό απομακρυσμένο από το φορτίο. Η διερεύνηση έδειξε ότι σε ακτινικό σύστημα η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του φορτίου προηγείται της μέγιστης ισχύος που διέρχεται από τον ζυγό μετρήσεων ανεξάρτητα από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου. Αποδείχτηκε επίσης ότι η φαινόμενη από τον ζυγό μετρήσεων ωμική αγωγιμότητα συνεχίζει να αυξάνει πέραν του σημείου μεγιστοποίησης της κατανάλωσης του φορτίου, γεγονός που εξασφαλίζει ότι οι δείκτες *NLI* και *RLI* θα συνεχίζουν να επιτηρούν την ευστάθεια τάσης, ακόμη και όταν αυτή έχει ήδη εμφανιστεί στον ζυγό φορτίου. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι οι δείκτες *NLI/RLI* καθυστερούν να ανιχνεύσουν με ακρίβεια την αστάθεια τάσης παρουσία των απωλειών, αλλά με δεδομένο ότι σε βροχοειδή συστήματα η αλλαγή προσήμου των δεικτών αστάθειας δεν αναφέρεται στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος, αλλά στη νωρίτερα εμφανιζόμενη μεγιστοποίηση της μεταφερόμενης ισχύος προς την αδύναμη περιοχή, η επίδραση της καθυστέρησης στην ανίχνευση της αστάθειας είναι μικρότερη.

6.1.3 Αναγνώριση κατάντη δικτύου

Το σφάλμα που εισάγεται από τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου που βρίσκεται στα κατάντη του ζυγού μετρήσεων στην εκτίμηση της αστάθειας τάσεως από τους δείκτες *NLI/RLI* αλλά και τους αλγορίθμους αναγνώρισης προσαρμογής σύνθετων αντιστάσεων, θα μπορούσε να διορθωθεί αν ήταν δυνατή η αναγνώριση του δικτύου στα κατάντη του ζυγού μετρήσεων.

Στη διατριβή διατυπώθηκε αναλυτικά το πρόβλημα και αποδείχτηκε ότι δεν υπάρχει μοναδική λύση στο πρόβλημα της αναγνώρισης των παραμέτρων του κατάντη δικτύου. Ωστόσο δείχτηκε ότι εάν υποθεθεί η γνώση (ή εκτιμηθεί με επαρκή ακρίβεια) του λόγου $\lambda = R/X$ του κατάντη δικτύου τότε είναι δυνατή η εκτίμηση του δικτύου σε περίπτωση που αυτό είναι ακτινικό και το φορτίο διατηρεί σταθερό συντελεστή ισχύος με ή και χωρίς αντιστάθμιση. Αναπτύχθηκε μία μέθοδος βασιζόμενη σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου για την ανίχνευση των παραμέτρων του κατάντη παθητικού δικτύου και στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας [Σεκ19] εκτελέστηκαν προσομοιώσεις σε ακτινικό δίκτυο με φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος με και χωρίς αντιστάθμιση. Αποδείχτηκε επίσης ότι οι γεωμετρικοί τόποι της μετρούμενης σύνθετης αντίστασης Z από τον ενδιάμεσο ζυγό στο επίπεδο αντίστασης/αντίδρασης RX στην περίπτωση φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος χωρίς αντιστάθμιση είναι ευθεία από την οποία μπορεί να εκτιμηθεί ακριβώς ο συντελεστής ισχύος του φορτίου με την εν λόγω μέθοδο, ενώ στην περίπτωση του φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος και σταθερής αέργου αντιστάθμισης αποδεικνύεται ότι ο αντίστοιχος γεωμετρικός τόπος είναι κύκλος από τον οποίο μπορούν να εκτιμηθούν το κέντρο και η ακτίνα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι στη μεν περίπτωση του φορτίου χωρίς αντιστάθμιση είναι δυνατή η εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου αλλά και του συντελεστή ισχύος του φορτίου, ενώ στη δε περίπτωση του αντισταθμισμένου φορτίου με σταθερή αντιστάθμιση είναι δυνατή η εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου και της χωρητικότητας του πυκνωτή, ενώ διαπιστώνεται ότι το σφάλμα εκτίμησης της ωμικής αντίστασης R του κατάντη δικτύου αυξάνει αντίστοιχα με το σφάλμα της εκτίμησης του λόγου λ .

6.1.4 Υπολογισμός περιθωρίου ευστάθειας

Στη διατριβή αναπτύχθηκε μία τοπική μέθοδος που βασίζεται αποκλειστικά σε συγχρονισμένες μετρήσεις από PMU για την εκτίμηση του περιθωρίου ευστάθειας τάσης σε ένα σύστημα μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η εύκολη υλοποίηση, με αποτέλεσμα αυτή να μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη απαιτώντας μόνο τοπικά σήματα ενός υποσταθμού, την ύπαρξη ενός PMU, και την αξιοποίηση του δείκτη αστάθειας *NLI*.

Ο υπολογισμός της εκτίμησης του περιθωρίου γίνεται με χρήση πολωνύμων παρεμβολής σε συνδυασμό με τη χρονική εξέλιξη του δείκτη *NLI*. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος χαράσσει στον χώρο φαινόμενης από τον ζυγό ωμικής αγωγιμότητας/ενεργού ισχύος GP ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού όταν ο δείκτης *NLI*

παρουσιάζει καθοδική πορεία για διαδοχικές χρονικές στιγμές. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τόσο στο ακτινικό, όσο και στο βροχοειδές σύστημα Nordic είναι ενθαρρυντικά καθώς δείχνουν την προσαρμοστικότητα της μεθόδου σε ευσταθείς και ασταθείς αποκρίσεις του συστήματος, όπως και την ακρίβειά της σε επίπεδο διαθέσιμων MW.

Δεδομένης της εφαρμογής της σε τοπικό επίπεδο, και συνεπώς της έλλειψης πληροφορίας μοντέλου συστήματος, η μέθοδος υπολογίζει το περιθώριο ευστάθειας όταν το σύστημα ήδη βρίσκεται σε σημείο λειτουργίας κοντά στην αστάθεια, με αποτέλεσμα το μικρό χρονικό διάστημα για τη λήψη χειροκίνητων μέτρων αντιμετώπισης της αστάθειας.

6.1.5 Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής σε εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης

Στα πλαίσια της διατριβής, μελετήθηκε η επίδραση της διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση και ανίχνευση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης. Η διεσπαρμένη παραγωγή θεωρήθηκε ότι είναι εγκατεστημένη στη MT σε μικρή ηλεκτρική απόσταση από τα κέντρα κατανάλωσης, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή της στη συμπεριφορά της κατανάλωσης, ενώ αναπαραστάθηκε από συγκεντρωτικά ισοδύναμα μοντέλα πηγών με μετατροπείς ισχύος, τα δεδομένα των οποίων πάρθηκαν από πραγματικά πάρκα του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος και τροποποιήθηκαν καταλλήλως ώστε να προσαρμοστούν στα μεγέθη ισχύος του συστήματος δοκιμών.

Οι προσομοιώσεις έγιναν στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic, το οποίο τροποποιήθηκε καταλλήλως προκειμένου το αρχικό σημείο λειτουργίας A που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 να μείνει πανομοιότυπο κατόπιν της ενσωμάτωσης της διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτό. Εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές συνδεσμολογίες για τα ισοδύναμα μοντέλα πηγών με μετατροπείς (κοινός και μη κοινός μετασχηματιστής στον υποσταθμό), καθώς και δύο σχήματα λειτουργίας (έλεγχος σταθερού συντελεστή ισχύος και έλεγχος τάσης) προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση των διεσπαρμένων πηγών στην κατανάλωση του συστήματος, όταν το σύστημα λειτουργεί σε αυξημένα επίπεδα φόρτισης.

Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με οιονεί στατική προσέγγιση στο λογισμικό WPSTAB διαπιστώθηκε ότι η διεσπαρμένη παραγωγή αυξάνει τα περιθώρια ευστάθειας τάσης ανεξάρτητα από τον τρόπο συνδεσμολογίας και το σχήμα λειτουργίας, όμως μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ανίχνευση της αστάθειας τάσης και να επισπεύσει την κατάρρευση όταν συνδέεται στο ίδιο δίκτυο διανομής με την κατανάλωση και λειτουργεί με έλεγχο σταθερής τάσης. Στην περίπτωση που η διεσπαρμένη παραγωγή συνδέεται στον ίδιο μεν υποσταθμό με τα φορτία αλλά σε διαφορετικούς μετασχηματιστές διαπιστώθηκε ότι τα περιθώρια βελτίωσης της ευστάθειας τάσης του συστήματος είναι μεγαλύτερα και εξαρτώνται λιγότερο από το σχήμα λειτουργίας των μετατροπέων (σταθερός συντελεστής ισχύος / σταθερή τερματική τάση). Κατ'επέκταση, η στήριξη τάσης από τις διεσπαρμένες πηγές στο δίκτυο διανομής αυξάνει μεν τα περιθώρια ευστάθειας του συστήματος, αλλά μπορεί να συμβάλλει στην αδυναμία ανίχνευσης αστάθειας τάσης και στην επίσπευση της κατάρρευσης του συστήματος.

6.1.6 Σχήματα προστασίας με αξιοποίηση διεσπαρμένων πηγών

Με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη της επίδρασης της διεσπαρμένης παραγωγής στην εκδήλωση και ανίχνευση αστάθειας τάσης, η διατριβή σχεδιάζει και αξιολογεί διαφορετικής φιλοσοφίας σχήματα προστασίας από αστάθεια τάσης με και χωρίς την αξιοποίηση διεσπαρμένων πηγών, με σκοπό την εύρεση κατάλληλου συγκεκριασμού για την αποκατάσταση της ευστάθειας του συστήματος και τον μετριασμό των επιπλοκών στους καταναλωτές.

Για τον σκοπό αυτό σχεδιάζονται και προσομοιώνονται στο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic εναλλακτικά σχήματα προστασίας από κατάρρευση τάσης, που αξιοποιούν τις δυνατότητες της διεσπαρμένης παραγωγής, σε συνδυασμό και με την έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Τα εξεταζόμενα σχήματα προστασίας συγκρίνονται μεταξύ τους με σκοπό την ανάδειξη των κυριότερων πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων, καθώς και τη θέσπιση κατευθυντηρίων γραμμών σχετικά με την προσέγγιση σχεδίασης σχημάτων προστασίας συστήματος από κατάρρευση τάσης με ήπια μέτρα αντιμετώπισης.

Από τις προσομοιώσεις που έγιναν στο τροποποιημένο σύστημα δοκιμών IEEE Nordic με οιονεί στατική προσέγγιση στο λογισμικό WPSTAB, διαπιστώνεται ότι με κατάλληλη αξιοποίηση των διεσπαρμένων πηγών

μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση του έμμεσα αποκοπτόμενου φορτίου, αρκεί αυτή να συντονίζεται κατάλληλα με έκτακτη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Παράλληλα διαπιστώνεται ότι η αξιοποίηση της αέργου παραγωγής από τη διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί να αποκρύψει την αδυναμία των ΣΑΤΥΦ να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής εντός νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα την επίσπευση της εξάντλησης των αέργων περιθωρίων του συστήματος και την καθυστέρηση λήψης μέτρων αντιμετώπισης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει ότι η αξιοποίηση των επικουρικών υπηρεσιών από τη διεσπαρμένη παραγωγή για λόγους στήριξης τάσης του συστήματος μεταφοράς είναι προτιμότερο να γίνεται μόνο σε έκτακτες συνθήκες λειτουργίας, ειδάλλως μπορεί να καθυστερήσει σημαντικά την τοπική ανίχνευση της αστάθειας τάσης και να προκαλέσει επίσπευση της κατάρρευσης στο σύστημα.

6.2 Προοπτικές συνέχισης της έρευνας

Όπως φάνηκε από τα παραπάνω, πολλά από τα θέματα στα οποία συνέβαλε η διατριβή είναι είτε νέα, είτε ακόμη ανοιχτά θέματα έρευνας. Οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα σε κάθε μία από αυτές αναφέρονται στη συνέχεια:

6.2.1 Ανίχνευση αστάθειας τάσης

Οι μέθοδοι *NLI/RLI* είναι πλέον ώριμες για εφαρμογή και το ζητούμενο είναι να γίνουν δοκιμές σε πραγματικό σύστημα. Στην παρούσα φάση υπάρχει ήδη δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την εφαρμογή του δείκτη *RLI* και αναζητείται πεδίο πειραματικής εφαρμογής σε ηλεκτρονόμο αποστάσεως. Η δυσκολία ωστόσο που προκύπτει από την πραγματική εφαρμογή και αξιοποίηση των μεθόδων ανίχνευσης *NLI/RLI* έγκειται στο ότι η ανίχνευση αστάθειας σε πραγματικό χρόνο δεν αναμένεται να δώσει αποτέλεσμα παρά μόνο όταν πράγματι το σύστημα βρεθεί σε αστάθεια. Ωστόσο η ύπαρξη πρακτικών ηλεκτρονόμων ή PMU που θα ανιχνεύουν την αστάθεια και θα στέλνουν αμέσως σήμα συναγερμού στο κέντρο ελέγχου για άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων θα καθιστούσε τη λειτουργία του ΣΗΕ πολύ πιο ασφαλή.

6.2.2 Αναγνώριση παραμέτρων κατάντη δικτύου

Επί του συγκεκριμένου θέματος, περαιτέρω έρευνας χρήζει η περίπτωση αναγνώρισης των παραμέτρων του κατάντη δικτύου, όταν αυτό εμπεριέχει και ενεργά στοιχεία (πηγές). Στην περίπτωση αυτή, ενδιαφέρον παρουσιάζει ο υπολογισμός ενός δικτύου Thévenin στα κατάντη του ζυγού μετρήσεων, ώστε να συμπεριληφθεί η διεσπαρμένη παραγωγή. Αντίστοιχες προσπάθειες έχουν αναφερθεί στην εργασία [SDG14], χωρίς όμως αποτελέσματα από εφαρμογή σε ρεαλιστικό σύστημα. Επίσης, περαιτέρω έρευνα απαιτείται για το πως οι μετρήσεις σε βροχοειδές δίκτυο μπορούν να χρησιμεύσουν για την αναγνώριση προσεγγιστικού ακτινικού κατάντη δικτύου.

6.2.3 Υπολογισμός περιθωρίου ευστάθειας

Στα πλαίσια συνέχισης της έρευνας προς την κατεύθυνση ανάπτυξης τοπικών μεθόδων εκτίμησης του περιθωρίου ευστάθειας τάσης βάσει μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, ενδιαφέρον χρήζει η δοκιμή εναλλακτικών τεχνικών για την εκτίμηση του περιθωρίου που θα βασίζονται π.χ. σε τεχνικές παλινδρόμησης, με σκοπό την πιο έγκαιρη εκτίμηση του περιθωρίου αλλά και την βελτίωση της ακρίβειας αυτού, ώστε η χρονική εξέλιξη του εκτιμώμενου περιθωρίου να βαίνει μονότονα προς το πραγματικό μέγιστο που επιτυγχάνει το σύστημα.

6.2.4 Επίδραση διεσπαρμένης παραγωγής στην ευστάθεια τάσης

Στο συγκεκριμένο ζήτημα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναλυτικότερη μοντελοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής σε επίπεδο δικτύου διανομής, προκειμένου να μελετηθούν λεπτομερέστερα οι επιπτώσεις από διαφορετικά σχήματα ελέγχου της διεσπαρμένης παραγωγής (έλεγχος τάσης/έλεγχος συντελεστή ισχύος) στο σύστημα μεταφοράς και συγκεκριμένα τόσο στην εκδήλωση της αστάθειας τάσης όσο και στην ανίχνευσή της από τοπικές μεθόδους. Προς την κατεύθυνση αυτή, ενδιαφέρον εμφανίζει η ανάπτυξη ευφών σχημάτων λειτουργίας διεσπαρμένης παραγωγής που αφενός θα προσδίδουν περισσότερη ασφάλεια στο σύστημα μεταφοράς χωρίς να παραβιάζονται λειτουργικοί περιορισμοί στη διανομή, και αφετέρου θα μπορούν να συνδράμουν στην αποκατάσταση της ευστάθειας τάσης στο σύστημα μεταφοράς στα πλαίσια ενός κεντρικού ή αποκεντρωμένου συστήματος προστασίας από κατάρρευση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [AFV14] P. Aristidou, D. Fabozzi, T. Van Cutsem, “Dynamic Simulation of Large-Scale Power Systems Using a Parallel Schur-Complement-Based Decomposition Method”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 10, pp. 2561 – 2570, October 2014. DOI: [10.1109/TPDS.2013.252](https://doi.org/10.1109/TPDS.2013.252)
- [AL96] P. M. Andersson, B. K. LeReverend, “Industry Experience with Special Protection Schemes”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1166 - 1179, August 1996. DOI: [10.1109/59.535588](https://doi.org/10.1109/59.535588)
- [AM15] S. M. Abdelkader, D. J. Morrow, “Online Thévenin Equivalent Determination Considering System Side Changes and Measurement Errors”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2716 – 2725, September 2015.
- [AR77] J. B. Allen, L. R. Rabiner, “A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 65, no. 11, pp. 1558 – 1564, November 1977.
- [ARF09] T. Amraee, A. M. Ranjbar, R. Feuillet, B. Mozafari. “System protection scheme for mitigation of cascaded voltage collapses.” *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 3, pp. 242 – 256, March 2009. DOI: [10.1049/iet-gtd:20080313](https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20080313)
- [ARM16] X. Ancheng, L. Ruihuang, L. Mingkai, J. Chow, B. Tianshu, Y. Ting, P. Tianjiao, “On-line voltage stability index based on the voltage equation of transmission lines”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3441 – 3448, November 2016, DOI: [10.1049/iet-gtd.2015.1544](https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.1544)
- [AV18] V. S. N. Arava, L. Vanfretti, "A Method to Estimate Power System Voltage Stability Margins Using Time-Series From Dynamic Simulations With Sequential Load Perturbations," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 43622-43632, 2018. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2862427](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2862427)
- [AVV15] P. Aristidou, G. Valverde, T. Van Cutsem, "Contribution of Distribution Network Control to Voltage Stability: A Case Study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 106-116, Jan. 2017. DOI: [10.1109/TSG.2015.2474815](https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2474815)
- [BBN13] C. Bai, M. Begovic, R. Nuqui, D. Sobajic and Y. Song, “On Voltage Stability Monitoring with Voltage Instability Predictors”, in *Proc. Bulk Power Systems Dynamics and Control – IX*, Rethymnon, Crete, Greece, August 25-30 2013.
- [BD99] W. Boyce, R. DiPrima, “Στοιχειώδεις διαφορικές εξισώσεις και προβλήματα συνοριακών τιμών”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ, 1999.
- [BDD93] M. M. Begovic, P. M. Djuric, S. Dunlap, A. G. Phadke, “Frequency Tracking in Power Networks in the Presence of Harmonics”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, pp. 480 – 486, April 1993.
- [BF04] R. L. Burden, J. D. Faires, “*Numerical Analysis*”, 8th Edition, Brooks/Cole, Cengage Learning, 2005.
- [BG06] M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu, “*Signal Processing of Power Quality Disturbances*”, IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, 2006.
- [BHV18] A. Bidadfar, H. Hooshyar, L. Vanfretti, “Dynamic Thévenin equivalent and reduced network models for PMU-based power system voltage stability analysis,” *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 16, pp. 126-135, December 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.07.002>
- [BK96] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις ΕΜΠ, 1996.

- [BVC18] H. S. Bidgoli, T. Van Cutsem, "Combined Local and Centralized Voltage Control in Active Distribution Networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1374-1384, March 2018. DOI: [10.1109/TPWRS.2017.2716407](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2716407)
- [Che99] C. Chen, "*Linear System Theory and Design*", Oxford University Press, 1999.
- [Chu48] R. V. Churchill, "*Introduction to complex variables and applications*", McGraw-Hill, NY, 1948
- [CIG93] CIGRÉ Task Force 38.02.10, "*Modeling of Voltage Collapse Including Dynamic Phenomena*", CIGRÉ, 1993.
- [CJ04] S. Chakrabarti, B. Jeyasurya, "On-line Voltage Stability Monitoring Using Artificial Neural Network," in *Proc. 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (IEEE Cat. No.04EX819)*, 2004, pp. 71-75, Halifax, NS. DOI: [10.1109/LESCPE.2004.1356271](https://doi.org/10.1109/LESCPE.2004.1356271)
- [CMH20] H. Cai, H. Ma, D. J. Hill, "A Data-Based Learning and Control Method for Long-Term Voltage Stability," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 3203-3212, July 2020. DOI: [10.1109/TPWRS.2020.2967434](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2967434)
- [CP119] A. Chandra, A. K. Pradhan, "Online voltage stability and load margin assessment using wide area measurements", *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 108, pp. 392-401, June 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.01.021>
- [CP219] A. Chandra, A. K. Pradhan, "Online Voltage Stability Assessment using Wide Area Measurements", in *Proc. of 2019 8th International Conference on Power Systems (ICPS)*, Jaipur, India, December 2019. DOI: [10.1109/ICPS48983.2019.9067663](https://doi.org/10.1109/ICPS48983.2019.9067663)
- [CRG15] Y. Chen, M. Rice, K. Glaesemann, Z. Huang, "Sub-second state estimation implementation and its evaluation with real data", in *Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, USA, July 2015. DOI: [10.1109/PESGM.2015.7285996](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7285996)
- [CSQ96] C. A. Canizares, A. C. Z. de Souza, V. H. Quintana, "Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1441 – 1450, August 1996. DOI: [10.1109/59.535685](https://doi.org/10.1109/59.535685)
- [CT07] S. Corsi, G. N. Taranto, "Voltage instability - the different shapes of the "Nose", in *Proc. 2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability*, Charleston, SC, 19-24 August 2007.
- [CT08] S. Corsi, G. N. Taranto, "A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, August 2008.
- [DP10] I. Dobson, M. Parashar, "A cutset area concept for phasor monitoring", in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Providence, RI, USA, July 2010.
- [DSV09] R. Diao, K. Sun, V. Vittal, R. J. O'Keefe, M. E. Richardson, N. Bhatt, D. Stradford, S. K. Sarawgi, "Decision Tree-Based Online Voltage Security Assessment Using PMU Measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 2, pp. 832 – 839, April 2009.
- [ENE12] A. Ellis, R. Nelson, E. Von Engeln, R. Walling, J. MacDowell, L. Casey, E. Seymour, W. Peter, C. Barker, B. Kirby, J. R. Williams, "Review of existing reactive power requirements for variable generation," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-7. DOI: [10.1109/PESGM.2012.6345555](https://doi.org/10.1109/PESGM.2012.6345555)
- [FC78] L. H. Fink, K. Carlsen, "Power/Energy: Operating under stress and strain", *IEEE Spectrum*, vol. 15, no. 3, pp. 48-53, March 1978.
- [FLQ15] Y. Fan, S. Liu, L. Qin, H. Li, H. Qiu, "A Novel Online Estimation Scheme for Static Voltage Stability Margin Based on Relationships Exploration in a Large Data Set", *IEEE Transac-*

- tions on Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1380 – 1393, May 2015. DOI: [10.1109/TPWRS.2014.2349531](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2349531)
- [FLZ17] Y. Fan, X. Li, P. Zhang, “Real-Time Static Voltage Stability Assessment in Large-Scale Power Systems Based on Maximum-Relevance Minimum-Redundancy Ensemble Approach”, *IEEE Open Access*, vol. 5, pp. 27281 – 27291, October 2017. DOI: [10.1109/ACCESS.2017.2758819](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2758819)
- [FOC90] N. Flatabo, R. Ognedal, T. Carlsen, “Voltage stability condition in a power transmission system calculated by sensitivity methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1286 – 1293, November 1990. DOI: [10.1109/59.99379](https://doi.org/10.1109/59.99379)
- [GH82] A. A. Girgis, F. M. Ham, “A New FFT-Based Digital Frequency Relay for Load Shedding”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 2, pp. 433 – 439, February 1982.
- [GM07] B. Genet, J. Maun, “Voltage-Stability Monitoring Using Wide-Area Measurement Systems”, in *Proc. IEEE 2007 PowerTech*, pp. 1712–1717, Lausanne, Switzerland, July 2007.
- [Gri12] S. Grijalva, “Individual Branch and Path Necessary Conditions for Saddle-Node Bifurcation Voltage Collapse”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 12 – 19, February 2012.
- [GVC09a] M. Glavic, T. Van Cutsem, “Wide-Area Detection of Voltage Instability From Synchronized Phasor Measurements. Part I: Principle”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1408 – 1416, August 2009.
- [GVC09b] M. Glavic, T. Van Cutsem, “Wide-Area Detection of Voltage Instability From Synchronized Phasor Measurements. Part II: Simulation Results”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1417 - 1425, August 2009.
- [GVC11] M. Glavic, T. Van Cutsem, “A short survey of methods for voltage instability detection,” in *Proc. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, Michigan, July 24-28 2011.
- [GS97] F. Gubina, B. Strmcnik, “A simple approach to voltage stability assessment in radial networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 3, August 1997
- [Haq03] M. H. Haque, “On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits”, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, no. 1, pp. 107 - 112, Jan. 2003.
- [HET20] H. Hagmar, R. Eriksson, L. A. Tuan, “Fast dynamic voltage security margin estimation: concept and development”, *IET Smart Grid*, vol. 3, no. 4, April 2020.
- [HMR21] N. Hatziaargyriou, J. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Cañizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, A. Stankovic, T. Van Cutsem, V. Vittal, C. Vournas, “Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended”, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 4, pp. 3271-3281, July 2021. DOI: [10.1109/TPWRS.2020.3041774](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3041774)
- [HP06] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, "Third zone revisited," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 23-29, January 2006. DOI: [10.1109/TPWRD.2005.860244](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.860244)
- [HPR21] E. Heusinger, J. Porst, A. Raab, M. Luther, S. Samaan, "Impact of Inverter-Based Generation on Voltage Stability in a Modified Nordic Test System," in *Proc. 2021 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)*, 2021, pp. 1-5, DOI: [10.1109/KPEC51835.2021.9446224](https://doi.org/10.1109/KPEC51835.2021.9446224)
- [HSD16] F. Hu, K. Sun, A. Del Rosso, E. Farantatos, N. Bhatt, “Measurement-Based Real-Time Voltage Stability Monitoring for Load Areas”, *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 2787 - 2798, vol. 31, no. 4, July 2016.

- [HSS17] F. Hu, K. Sun, D. Shi, Z. Wang, "Measurement-based voltage stability assessment for load areas addressing n-1 contingencies", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 15, pp. 3731 – 3738, November 2017.
- [HTC18] H. Hagmar, L. Ahn Tuan, O. Carlson, R. Eriksson, "A Survey of Voltage Stability Indicators Based on Local Synchronized Phasor Measurements," in *Proc. 2018 North American Power Symposium*, Fargo, ND, USA, September 2018. DOI: [10.1109/NAPS.2018.8600607](https://doi.org/10.1109/NAPS.2018.8600607)
- [HTC19] H. Hagmar, L. A. Tuan, O. Carlson, R. Eriksson, "Integration Aspects of Full Converter Wind Turbines and the Impact on Long-term Voltage Stability," *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2019, pp. 1-5. DOI: [10.1109/PESGM40551.2019.8973939](https://doi.org/10.1109/PESGM40551.2019.8973939)
- [HVC94] N. D. Hatziargyriou, T. Van Cutsem, (Editors), "Indices predicting voltage collapse including dynamic phenomena," *Technical Report TF 38-02-11*, CIGRE, 1994.
- [IEE11] IEEE STD C37.118.1-2011. *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*. IEEE, 2011, pp. 1–61.
- [ISM15] S.R. Islam, D. Sutanto, K. M. Muttaqi, "Coordinated Decentralized Emergency Voltage and Reactive Power Control to Prevent Long-Term Voltage Instability in a Power System", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 5, September 2015. DOI: [10.1109/TPWRS.2014.2369502](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2369502).
- [JSV00] D. E. Julian, R. P. Schulz, K. T. Vu, W. H. Quaintance, N. B. Bhatt, D. Novosel, "Quantifying Proximity To Voltage Collapse Using The Voltage Instability Predictor (VIP)", in *Proc. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 16-20 July 2000.
- [JV21] P. M. Joshi, H. K. Verma, "Synchrophasor measurement applications and optimal PMU placement: A review," *Electric Power Systems Research*, vol. 199, October 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107428>
- [Kar01] D. Karlsson (convener), "System protection schemes in power networks", *CIGRE Task Force 38.02.19*, June 2001.
- [KG86] P. Kessel, H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of a Power System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 1, no. 3, pp. 346 – 354, July 1986, DOI: [10.1109/TPWRD.1986.4308013](https://doi.org/10.1109/TPWRD.1986.4308013)
- [KHZ19] I. Kuzle, N. Holjevac, N. Zhang, C. Kang, "Guest editorial introduction to the special issue on 'advanced power system and smart integration of renewables'", *Electric Power Systems Research*, vol. 199, October 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107460>
- [KKO99] P. Kokotovic, H. Khalil, J. O'Riley, "*Singular Perturbation Methods in Control: Analysis and Design*", Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999.
- [KPA04] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definition and classification of power system stability", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions.
- [Kra92] P. Kraniuskas, "*Transforms in Signals and Systems*", Addison-Wesley Publishers Ltd., 1992.
- [KST06] S. Kamalasadan, A. K. Srivastava, D. Thukaram, "Novel algorithm for online voltage stability assessment based on feed forward neural network," in *Proc. 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2006, Montreal, QC. DOI: [10.1109/PES.2006.1709621](https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709621)
- [Kun81] P. Kundur, "A survey of utility experience with power plant response during partial load rejection and system disturbances", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 5, 1991.
- [Kun94] P. Kundur, "*Power System Stability and Control*", McGraw-Hill, New York, 1994.
- [KWH14] N. Kashyap, S. Werner, Y. Huang, T. Riihonen, "Power System State Estimation Under Incomplete PMU Observability—A Reduced-Order Approach," in *IEEE Journal of Selected*

- Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 6, pp. 1051-1062, December 2014. DOI: [10.1109/JSTSP.2014.2333712](https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2333712)
- [LA17] S. Li, V. Ajjarapu, "Real-time monitoring of long-term voltage stability via convolutional neural network," in *Proc. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2017, pp. 1-5, Chicago, IL, USA, July 2017. DOI: [10.1109/PESGM.2017.8274406](https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274406)
 - [LAD18] S. Li, V. Ajjarapu, M. Djukanovic, "Adaptive Online Monitoring of Voltage Stability Margin via Local Regression," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 701-713, Jan. 2018. DOI: [10.1109/TPWRS.2017.2698065](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2698065)
 - [LBV04] D. Lefebvre, S. Bernard, T. Van Cutsem, "Undervoltage load shedding scheme for the Hydro-Quebec system," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Denver (USA), pp. 1619-1624, June 2004. DOI: [10.1109/PES.2004.1373145](https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373145)
 - [LC14] J-H. Liu, C-C. Chu, "Wide-Area Measurement-Based Voltage Stability Indicators by Modified Coupled Single-Port Models," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 2, pp. 756 – 764, March 2014. DOI: [10.1109/TPWRS.2013.2284475](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2284475)
 - [LCS15] Z. Liu, Z. Chen, H. Sun, Y. Hu, "Multi agent system based wide area protection and control scheme against cascading events", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp.1651-1662, 2015
 - [LCX10] W. Li, T. Chen, W. Xu, "On impedance matching and maximum power transfer," in *Electric Power Systems Research*, vol. 80, pp. 1082 – 1088, September 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.01.015>
 - [Lia78] T. E. D. Liacco, "Power/Energy: System Security: the computer's role", *IEEE Spectrum*, vol. 15, no. 6, pp. 43-50, June 1978.
 - [LKZ07] M. Larsson, P. Korba, and M. Zima, "Implementation and applications of wide area monitoring systems", in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Tampa, FL, June 2007, DOI: [10.1109/PES.2007.385444](https://doi.org/10.1109/PES.2007.385444)
 - [LMV11] C. Lambrou, P. Mandoulidis, C. D. Vournas, "Local voltage instability monitoring and protection in the presence of self-restoring loads and two-level LTCs", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, Michigan, 24-28 July 2011.
 - [LMV21] C. Lambrou, P. Mandoulidis, C. D. Vournas,, "Validation of Voltage Instability Detection and Control Using a Real Power System Incident", *Energies* 14, no. 21: 7165. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217165>
 - [LR97] T. Lobos, J. Rezmer, "Real-time determination of power system frequency", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 4, pp. 877 – 881, August 1997.
 - [LRB03] M. Larsson, C. Rehtanz, J. Bertsch, "Real-Time Voltage Stability Assessment of Transmission Corridors", in *Proc. 5th IFAC Symposium on Power Plants and Power Systems Control 2003*, Seoul, South Korea, September 2003.
 - [LSA92] P. -A. Löf, T. Smed, G. Andersson, D. J. Hill, "Fast calculation of voltage stability index", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, February 1992, DOI: [10.1109/59.141687](https://doi.org/10.1109/59.141687).
 - [LVT15] J. Lavenius, L. Vanfretti, G. N. Taranto, "Performance assessment of PMU-based estimation Methods of Thevenin Equivalents for real-time voltage stability monitoring," in *Proc. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 2015, pp. 1977-1982. DOI: [10.1109/EEEIC.2015.7165477](https://doi.org/10.1109/EEEIC.2015.7165477)
 - [LZV16] X. Liu, X. Zhang, V. Venkatasubramanian, "Distributed Voltage Security Monitoring in Large Power Systems Using Synchrophasors", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 982 – 991, March 2016.

- [MA17] A. Ramapuram-Matavalam, V. Ajjarapu, "Validation of the sensitivity based Thévenin Index on large systems", in *Proc. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IL, USA, July 2017. DOI: [10.1109/PESGM.2017.8274422](https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274422)
- [MAj17] A. Ramapuram-Matavalam, V. Ajjarapu, "Sensitivity based Thévenin index with systematic inclusion of reactive power limits", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 1, pp. 932 – 942, May 2017. DOI: [10.1109/TPWRS.2017.2701811](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2701811)
- [MB03] B. Milosevic, M. Begovic, "Voltage-stability protection and control using a wide-area network of phasor measurements", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 121-127, February 2003.
- [MDH18] F. Milano, F. Dörfler, G. Hug, D. J. Hill, G. Verbic, "Foundations and Challenges of Low-Inertia Systems (Invited Paper)," in *Proc. 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, 2018, pp. 1-25. DOI: [10.23919/PSCC.2018.8450880](https://doi.org/10.23919/PSCC.2018.8450880)
- [MIC87] J. Medanić, M. Ilić-Spong, J. Christensen, "Discrete models of slow voltage dynamics for under load tap-changing transformer coordination", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 873 – 880, November 1987.
- [MJY98] A. Mohamed, G. B. Jasmon, S. Yusoff, "A static voltage collapse indicator using line stability factors", *Journal of Industrial Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 73-85, 1998.
- [MLV11] P. Mandoulidis, C. Lambrou, C. D. Vournas, "Effect of load restoration on an integrated autonomous protection system against voltage instability", 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011.
- [MR02] I. Musirin, T. K. A. Rahman, "Novel Fast Voltage Stability Index (FVSI) for Voltage Stability Analysis in Power Transmission Systems", in *Proc. of 2002 Student Conference on Research and Development*, Shah Alam, Malaysia, July 2002, DOI: [10.1109/SCORED.2002.1033108](https://doi.org/10.1109/SCORED.2002.1033108)
- [MRL01] Y-H Moon, H-S Ryu, J-G Lee, B. Kim, "Uniqueness of static voltage stability analysis in power systems," in *Proc. 2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, pp. 1536-1541, Vancouver, Canada, July 2001. DOI: [10.1109/PESS.2001.970305](https://doi.org/10.1109/PESS.2001.970305)
- [Nik16] V. C. Nikolaidis, "Emergency Zone 3 Modification as a Local Response-Driven Protection Measure against System Collapse", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2114 – 2122, 2016.
- [NMB08] D. Novosel, V. Madani, B. Bhargava, K. Vu, J. Cole, "Dawn of the Grid Synchronization: Benefits, Practical Applications, and Deployment Strategies for Wide Area Monitoring, Protection, and Control," *IEEE Power and Energy Magazine*, pp. 49-60, January/February 2008.
- [NMV18] V. C. Nikolaidis, P. Mandoulidis, C. D. Vournas, "Combining Transmission Line Protection with Voltage Stability Monitoring", in *Proc. Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin June 2018.
- [NSS14] V. C. Nikolaidis, A. S. Safigianni, N. Savvopoulos, C. D. Vournas, "Adjusting Third Zone Distance Protection to Avoid Voltage Collapse", in *Proc. PSCC 2014 - 18th Power Systems Computation Conference*, Wroclaw, Poland, 18-22 August 2014.
- [OCL17] L. D. P. Ospina, A. F. Correa, G. Lammert, "Implementation and validation of the Nordic test system in DIGSILENT PowerFactory", in *Proc. 2017 IEEE Manchester Powertech*, Manchester, June 2017.
- [OSB99] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, "Discrete-Time Signal Processing", 2nd Edition, Prentice-Hall Signal Processing Series, 1999.
- [OVC20] L. D. P. Ospina, T. Van Cutsem, "Power factor improvement by active distribution networks during voltage emergency situations", *Electric Power Systems Research*, vol. 189, December 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106771>

- [OVC21] L. D. P. Ospina, T. Van Cutsem, "Emergency Support of Transmission Voltages by Active Distribution Networks: A Non-Intrusive Scheme," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 3887-3896, Sept. 2021. DOI: [10.1109/TPWRS.2020.3027949](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3027949)
- [Pal92] M. K. Pal, "Voltage stability conditions considering load characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 243 - 249, February 1992, DOI: [10.1109/59.141710](https://doi.org/10.1109/59.141710)
- [PC14] M. A. Pai, D. Chatterjee, "Computer Techniques in Power System Analysis", McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2014.
- [PGG20] M. Paolone, C.T. Gaunt, X. Guillaud, M. Liserre, S. Meliopoulos, A. Monti, T. Van Cutsem, V. Vittal, C. Vournas. "Fundamentals of Power Systems Modelling in the Presence of Converter-Interfaced Generation", *Electric Power Systems Research*, vol. 189, December 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106811>
- [Pha02] A. Phadke, "Synchronized phasor measurements ~ a historical overview", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, October 2002.
- [Pha93] A. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems", *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10 – 15, April 1993.
- [PKK98] D. Popovic, D. Kukolj, F. Kulic, "Monitoring and assessment of voltage stability margins using artificial neural networks with a reduced input set," *IEE Proceedings Generation Transmission Distribution*, vol. 145, no. 4, pp. 355–362, July 1998.
- [PMG20] M. Paolone, A. Monti, T. Gaunt, T. Van Cutsem, X. Guillaud, V. Vittal, M. Liserre, C. Vournas, S. Meliopoulos, "Fundamentals of Power Systems Modelling in the Presence of Converter-Interfaced Generation", *Electric Power Systems Research*, vol. 189, December 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106811>
- [Pra87] V. Pratt, "Direct least-squares fitting of algebraic surfaces", *Computer Graphics*, vol. 21, pp. 145 – 152, 1987.
- [PRO14] S. Perez-Londono, L. F. Rodriguez, G. Olivar, "A Simplified Voltage Stability Index (SVSI)", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 806-813, December 2014. DOI: [10.1016/j.ijepes.2014.06.044](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.044)
- [Psd15] IEEE Power & Energy Society, Power System Dynamic Performance Committee, "Benchmark systems for voltage stability, Nordic test system.", [Online]. Available: <https://cmte.ieee.org/pes-psdp/489-2/>
- [PSV20] G. Prionistis, T. Souxes, C. Vournas, "Voltage Stability Support Offered by Active Distribution Networks", *Electric Power Systems Research*, vol. 190, January 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106728>
- [PWX13] I. R. Pordanjani, Y. Wang, W. Xu, "Identification of critical components for voltage stability assessment using channel components transform", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol.4, no. 2, June 2013.
- [QUJ00] W. H. Quaintance, K. Uhlen, D. E. Julian, J. O. Gjerde, K. T. Vu, L. K. Vormedal, "Raising Energy Transfer in Corridors Constrained by Voltage Instability – Statnett Case", in *Proc. 2000 Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, WA, 16-20 July 2000.
- [RB01] C. Rehtanz, J. Bertsch, "A new wide area protection system," in *Proc. 2001 IEEE Porto Power Tech* (Cat. No.01EX502), pp. 6 pp. vol.4, Porto, Portugal, September 2001.
- [RB02] C. Rehtanz, J. Bertsch, "Wide Area Measurement and Protection System for Emergency Voltage Stability Control", *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, USA, January 2002.
- [RH07] S. Rapuano, F. J. Harris, "An introduction to FFT and time domain windows", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 10, no. 6, pp. 32 – 44, December 2007.

- [RKS20] S. M. H. Rizvi, P. Kundu, A. K. Srivastava, “Hybrid voltage stability and security assessment using synchrophasors with consideration of generator Q-limits”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 133, issue 19, pp. 4042-4051.
- [RS07] P.A. Ruiz, P.W. Sauer, “Voltage and Reactive Power Estimation for Contingency Analysis Using Sensitivities”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, issue 2, May 2007.
- [RWH13] L. Robitzky, T. Weckesser, U. Häger, C. Rehtanz, T. Van Cutsem, “Agent-based identification and control of voltage emergency situations”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 6, March 2018.
- [Sav09] S. C. Savulescu (Editor), “*Real-time stability assessment in modern power system control centers*”, IEEE press Wiley & Sons, 2009.
- [Sav14] S. C. Savulescu (Editor), “*Real-Time Stability in Power Systems. Techniques for Early Detection of the Risk of Blackout*”, 2nd Edition, Power Electronics and Power Systems, Springer, 2014.
- [SDG14] P. W. Sauer, A. D. Dominguez-Garcia, “Data Driven Dynamic Security Assessment”, in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-2, MD, USA, July 2014. DOI: [10.1109/PESGM.2014.6938848](https://doi.org/10.1109/PESGM.2014.6938848)
- [SLA09] H. Song, B. Lee, V. Ajjarapu, “Control strategies against voltage collapse considering undesired relay operations”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 3, no.2, pp. 164-172, 2009.
- [SPV20] T. Souxes, A. Parasidis, C. D. Vournas, “Stabilizing Controls for Wind Generators Participating in Transmission V/Q Support”, in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 5, September 2020.
- [SSS12] R. Sodhi, S. C. Srivastava, S. N. Singh, “A Simple Scheme for Wide Area Detection of Impending Voltage Instability”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 818 - 827, June 2012. DOI: [10.1109/TSG.2011.2180936](https://doi.org/10.1109/TSG.2011.2180936)
- [Str09] G. Strang, “*Introduction to Linear Algebra, 4th Edition*”, Wellesley – Cambridge Press, 2009.
- [SV17] T. Souxes, C. Vournas, “System Stability Issues Involving Distributed Sources under Adverse Network Conditions”, in *Proc. 2917 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control – X (IREP), Porto, 2017*, pp. 1-9, [Online]. Available: <http://irep2017.inesctec.pt/conference-papers/conference-papers/paper28r6j4hmgc.pdf>
- [SVG06] I. Smon, G. Verbic, F. Gubina, “Local voltage-stability index using Tellegen's Theorem”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, August 2006.
- [Tay92] C. W. Taylor, “Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability,” in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, No. 2, pp. 480-488, April 1992.
- [Tay94] C. W. Taylor, “*Power System Voltage Stability*”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [Ter11] V. Terzija et al., "Wide-Area Monitoring, Protection, and Control of Future Electric Power Networks," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, Jan. 2011, DOI: [10.1109/JPROC.2010.2060450](https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2060450).
- [TF07] IEEE Power System Dynamic Performance Committee, Task Force on “*Blackout Experience Mitigation and Role of New Technologies*”, PES-TR12, 2007.
- [TF15] T. Van Cutsem (Chair), “Test Systems for Voltage Stability Analysis and Security Assessment”, *PES Technical Report, PES-TR19, IEEE/PES Task Force*, Power System Dynamic Performance Committee, August 2015.
- [TR20] N. Hatziaargyriou, J. Milanović, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C.A. Canizares, I. Erlich, D. Hill, & I. Hiskens, I. Kamwa, B.C. Pal, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, A.M. Stankovic, T. Van Cutsem, V. Vittal, C. Vournas, Costas. (2020). Stability Definitions and Characterization of

Dynamic Behavior in Systems with High Penetration of Power Electronic Interfaced Technologies.

- [TF17] N. Hatziaargyriou (chair), "Contribution to Bulk System Control and Stability by Distributed Energy Resources connected at Distribution Network", *IEEE PES Technical Report PES-TR22*, January 2017.
- [TF21] S. Nuthalapati (chair), "Real-time Contingency Analysis", *IEEE PES Technical Report PES-TR85*, February 2021.
- [TT88] A. Tiranuchit, R. J. Thomas, "A posturing strategy against voltage instabilities in electric power systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 87 – 93, February 1988, DOI: [10.1109/59.43177](https://doi.org/10.1109/59.43177)
- [Vaa14] E. Vaahedi, "*Practical Power System Operation*", IEEE Press Series on Power Engineering, John Wiley & Sons, 2014.
- [VAS17] C. Vournas, I. Anagnostopoulos, T. Souxes, "Transmission support using Wind Farm controls during voltage stability emergencies", *Control Engineering Practice*, vol. 59, pp. 100-110, February 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.11.007>
- [VBN99] K. Vu, M. M. Begovic, D. Novosel, M. M. Saha, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, August 1999.
- [VC00] T. Van Cutsem, "Voltage instability: phenomena, countermeasures, and analysis methods," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 208-227, February 2000. DOI: [10.1109/5.823999](https://doi.org/10.1109/5.823999)
- [VCV96] T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 146-154, February 1996.
- [VCV07] T. Van Cutsem and C. D. Vournas, "Emergency Voltage Stability Controls: an Overview," in *Proc. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1-10, doi: 10.1109/PES.2007.386089.
- [VCV08] T. Van Cutsem, C. Vournas, "*Voltage Stability of Electric Power Systems*", Springer, 2008.
- [VG04] G. Verbic, F. Gubina, "A new concept of voltage-collapse protection based on local phasors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, April 2004.
- [VLA15] C. Vournas, C. Lambrou, I. Anagnostopoulos, G. Christoforidis, J. Kabouris, "Distributed reactive support and voltage stability limits: The example of Peloponnese in the Hellenic Inter-connected System," in *Proc. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1-5, Denver, CO, USA. DOI: [10.1109/PESGM.2015.7286603](https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286603)
- [VLK15] C. D. Vournas, C. Lambrou, M. Kanatas, "Application of local autonomous protection against voltage instability to IEEE test system", *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 3300-3308, vol. 31, no. 4, July 2016. DOI: [10.1109/TPWRS.2015.2489764](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2489764)
- [VLG10] C. D. Vournas, C. Lambrou, M. Glavic, T. Van Cutsem, "An integrated autonomous protection system against voltage instability based on Load Tap Changers", in *Proc. 2010 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - VIII*, Rio de Janeiro, Brazil, 1-6 Aug. 2010.
- [VLL11] V. Venkatasubramanian, X. Liu, G. Liu, Q. Zhang, M. Sherwood, "Overview of Wide-Area Stability Monitoring Algorithms in Power Systems using Synchrophasors", in *Proc. 2011 American Control Conference*, San Francisco, USA, July 2011.
- [VLM17] C. D. Vournas, C. Lambrou, P. Mandoulidis, "Voltage Stability Monitoring from a Transmission Bus PMU", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 3266-3274, July 2017.
- [VM01] C. D. Vournas, G. A. Manos, "Emergency tap-blocking to prevent voltage collapse," *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)*, 2001, pp. 5 pp. vol.2, DOI: [10.1109/PTC.2001.964741](https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964741)

- [VMM99] T. Van Cutsem, C. Moisse, R. Mailhot, "Determination of secure operating limits with respect to voltage collapse", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 327-335, February 1999.
- [Vou94] C. D. Vournas, "On the modelling of collapse in dynamical systems," in *Proc. Bulk Power System Voltage Phenomena III*, Davos, Switzerland, August 1994.
- [Vou15] C. Vournas, "Maximum Power Transfer in the Presence of Network Resistance", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, September 2015.
- [VS07] C. D. Vournas, N. G. Sakellariadis, "Tracking maximum loadability conditions in power systems", in *Proc. 2007 iREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability*, Charleston, SC, 19-24 August 2007.
- [VSA15] IEEE Power & Energy Society Power System Dynamic Performance, Committee. "Benchmark Systems". [Online]. Available: <http://sites.ieee.org/pes-psdp/489-2/>.
- [VSC08] C. Vournas, N. Sakellariadis, G. Christoforidis, J. Kabouris, T. Van Cutsem, "Investigation of a Local Indicator of Voltage Emergency in the Hellenic Interconnected System", 16th Power System Computation Conference (PSCC), Glasgow, UK, July 2008.
- [VVC08] C. D. Vournas, T. Van Cutsem, "Local Identification of Voltage Emergency Situations", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, August 2008.
- [VVC10] C. D. Vournas, T. Van Cutsem, "Real-Time Stability in Power Systems. Techniques for Early Detection of the Risk of Blackout", S. C. Savulescu, Ed., Chapters 9 – 10, 2nd Edition, Springer, 2014.
- [VVC13] G. Valverde, T. Van Cutsem, "Control of dispersed generation to regulate distribution and support transmission voltages," in *Proc. 2013 IEEE Grenoble Conference*, 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2013.6652119.
- [VWP93] T. Van Cutsem, L. Wehenkel, M. Pavella, B. Heilbronn, M. Goubin, "Decision tree approaches to voltage security assessment", *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 140, no. 3, pp. 189 - 198, May 1993. DOI: [10.1049/ip-c.1993.0029](https://doi.org/10.1049/ip-c.1993.0029)
- [WAI15] S. Winternheimer, M. Ames, M. Igel, "The challenge to replace synchronous generators by inverter based distributed generation systems", in *Proc. 2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Aachen 2015.
- [WH01] L. Warland, A. T. Holen, "A voltage instability predictor using local area measurements (VIP++)", in *Proc. 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, September 2001.
- [WH02] L. Warland, A. T. Holen, "Estimation of Distance to Voltage Collapse: Testing and Algorithm Based on Local Measurements", in *Proc. 14th Power System Computation Conference*, Sevilla, Spain, January 2002.
- [WPL11] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, T. Chen, E. Vaahedi, J. Gurney, "Voltage Stability Monitoring Based on the Concept of Coupled Single-Port Circuit", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2154–2163, November 2011: DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2154366
- [WPV17] T. Weckesser, L. Papangelis, C. D. Vournas, T. Van Cutsem, "Local identification of voltage instability from load tap changer response", *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 9, pp. 95-103, March 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2017.01.001>
- [WWL13] Y. Wang, C. Wang, F. Lin, W. Li, L. Y. Wang, J. Zhao, "Incorporating Generator Equivalent Model Into Voltage Stability Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4857-4866, November 2013. DOI: [10.1109/TPWRS.2013.2273501](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2273501)

- [XA18] C. Xu, A. Abur, "A Fast and Robust Linear State Estimator for Very Large Scale Interconnected Power Grids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4975 – 4982, September 2018. DOI: [10.1109/TSG.2017.2676348](https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2676348)
- [YL14] H. Yuan, F. Li, "A comparative study of measurement-based Thévenin equivalents identification methods," in Proc. *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, 2014, pp. 1-6, Pullman, WA, September 2014. DOI: [10.1109/NAPS.2014.6965369](https://doi.org/10.1109/NAPS.2014.6965369)
- [YL15] H. Yuan, F. Li, "Hybrid voltage stability assessment (VSA) for N – 1 contingency", *Electric Power Systems Research*, vol. 122, pp. 65-75, May 2015, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eprsr.2014.12.022>
- [YLC18] H. Yuan, F. Li, H. Cui, X. Lu, D. Shi, Z. Wang, "A measurement-based VSI for voltage dependent loads using angle difference between tangent lines of load and PV curves", *Electric Power Systems Research*, vol. 160, pp. 13-16, July 2018.
- [ZAR10] D. Q. Zhou, U. D. Annakkage, A. D. Rajapakse, "Online Monitoring of Voltage Stability Margin Using an Artificial Neural Network," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1566-1574, Aug. 2010. DOI: [10.1109/TPWRS.2009.2038059](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2038059)
- [ZG14] M. Zerva, M. Geidl, "Contribution of active distribution grids to the coordinated voltage control of the swiss transmission system," in Proc. *2014 Power Systems Computation Conference*, 2014, pp. 1-8, DOI: [10.1109/PSCC.2014.7038467](https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038467)
- [Zha19] J. Zhao (Chair). "Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies and Future Work", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 3188 – 3198, July 2019. DOI: [10.1109/TPWRS.2019.2894769](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2894769)
- [Zha21] J. Zhao (Chair). "Roles of Dynamic State Estimation in Power System Modeling, Monitoring and Operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 36, no. 3, pp. 2462 – 2472, May 2021, DOI: [10.1109/TPWRS.2020.3028047](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3028047)
- [ZSL18] X. Zhang, D. Shi, X. Lu, Z. Yi, Q. Zhang, Z. Wang, "Sensitivity Based Thévenin Index for Voltage Stability Assessment Considering N-1 Contingency", in Proc. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Portland, OR, USA, August 2018. DOI: [10.1109/PESGM.2018.8586554](https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586554)
- [Bou04] K. Βουρνάς, "Ευστάθεια Μονίμου Καταστάσεως", Εκδόσεις ΕΜΠ, 2004.
- [Bou99] K. Βουρνάς (Επιστημονικός Υπεύθυνος). Ερευνητικό Έργο: "Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσης – Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα", Τεχνική Έκθεση, ΕΜΠ, Αθήνα 1999.
- [Kar05] Μ. Ε. Καρυστιανός, "Βελτιστοποίηση Ορίων Μεταφοράς Ισχύος σε Συνθήκες Ασφάλειας Τάσης". Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2005.
- [Λαμ17] Χ. Λάμπρου, "Σχεδίαση Συστημάτων Ανίχνευσης Αστάθειας Τάσεως και Προστασίας από Κατάρρευση", Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2017.
- [Μαν98] Γ. Μάνος, "Ανάλυση φαινομένων κατάρρευσης τάσεως σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 1998.
- [Σακ10] Ν. Σακελλαρίδης, "Εφαρμογές Μη Γραμμικής Δυναμικής στην Ανάλυση Ευστάθειας Τάσης", Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2010.
- [Σεκ19] Κ. Σεκλός, "Προσεγγιστική Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου για Αναγνώριση Ευστάθειας Τάσης", Διπλωματική Εργασία. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2019.

- [Σου19] Θ. Σουξέζ, “Αξιοποίηση μετατροπέων Αιολικών Πάρκων για τη βελτίωση της Ευστάθειας Τάσεως ΣΗΕ”, Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, ΕΜΠ, Αθήνα 2019.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Σε περιοδικά

- P. Mandoulidis, T. Souxes, C. Vournas, “Impact of converter interfaced generators on power system long-term voltage stability monitoring and control”, *Electrical Power Systems Research*, vol. 199, October 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107438>
- C. D. Vournas, C. Lambrou, P. Mandoulidis, “Voltage Stability Monitoring From a Transmission Bus PMU”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 3266-3274, July 2017. DOI: [10.1109/TPWRS.2016.2629495](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2629495)
- P. Mandoulidis, C. D. Vournas, “A PMU-based real-time estimation of voltage stability and margin”, *Electric Power Systems Research*, vol. 178, January 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106008>
- C. Lambrou, P. Mandoulidis, C. Vournas, “Validation of Voltage Instability Detection and Control using a Real Power System Incident”, *MDPI Energies Special Issue "Advancements in Wide-Area Protection and Stability Control"*. Διαθέσιμο on-line: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/21/7165/pdf>

Σε διεθνή συνέδρια

- C. D. Vournas, P. Mandoulidis, “On-Line Voltage Stability Monitoring”, in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits & Systems (ISCAS)*, Florence May 2018.
- V. C. Nikolaidis, P. Mandoulidis, C. D. Vournas, “Combining Transmission Line Protection with Voltage Stability Monitoring”, in *Proc. Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Dublin June 2018.
- T. Souxes, P. Mandoulidis, C. Vournas, “Loss-of-Equilibrium Power System Instability Induced by Converter Operation”, in *Proc. 2021 IEEE Madrid PowerTech*, Madrid, Spain, July 2021. DOI: [10.1109/PowerTech46648.2021.9494991](https://doi.org/10.1109/PowerTech46648.2021.9494991)

Παλαιότερες δημοσιεύσεις

- P. Mandoulidis, C. Lambrou, C. D. Vournas, “Effect of load restoration on an integrated autonomous protection system against voltage instability”, in *Proc. 2011 IEEE Trondheim PowerTech*, Trondheim, Norway, 19-23 June 2011.
- C. Lambrou, P. Mandoulidis, C. D. Vournas, “Local voltage instability monitoring and protection in the presence of self-restoring loads and two-level LTCs”, in *Proc. 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, Michigan, 24-28 July 2011.

Διπλώματα ευρεσιτεχνίας

- Hellenic Industrial Property Organisation: C. D. Vournas, P. Mandoulidis, V. C. Nikolaidis, “A method to promptly identify voltage instability using transmission line protection relays”, Athens, April 2019.