



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

Βέλτιστη διαχείριση μετρήσεων για ενίσχυση
παρατηρησιμότητας και ακρίβειας σε εκτιμητές κατάστασης
συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με ελλιπή δεδομένα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεμιστοκλής Χ. Εύγκης

Αθήνα, Απρίλιος 2019



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

Βέλτιστη διαχείριση μετρήσεων για ενίσχυση
παρατηρησιμότητας και ακρίβειας σε εκτιμητές κατάστασης
συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με ελλιπή δεδομένα

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Θεμιστοκλής Χ. Ξύγκης

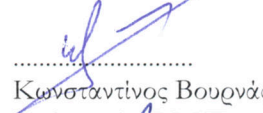
Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Ν. Κορρές

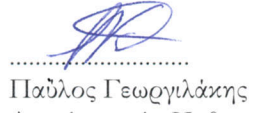
Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

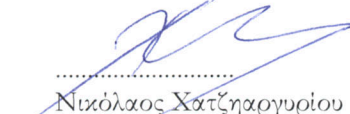
Παύλος Σ. Γεωργιλάκης


Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 22 Απριλίου 2019.

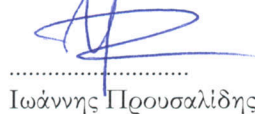

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

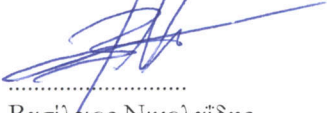

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

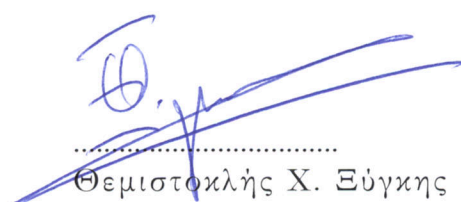

.....
Νικόλαος Χατζηγεωργίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


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


.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.


.....
Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Αθήνα, Απρίλιος 2019



Θεμιστοκλής Χ. Εύγκης

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

Copyright © Θεμιστοκλής Χ. Εύγκης, 2019.

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.

Στη Μέλπω και τον Γιάννη.

ΣΥΝΟΨΗ

Η ενίσχυση της εποπτείας και του ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί έναν από τους κύριους άξονες για τη μετάβαση στην εποχή των ευφυών δικτύων. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο ρόλος και η σημασία των εκτιμητών κατάστασης που λειτουργούν στα κέντρα ελέγχου ενέργειας αναβαθμίζονται συνεχώς. Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματεύεται μεθόδους και τεχνικές βέλτιστης διαχείρισης μετρήσεων στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που χαρακτηρίζονται από ελλιπή δεδομένα.

Αρχικά, εκπονείται μία βιβλιογραφική επισκόπηση σχετικά με την εξέλιξη των λειτουργιών της επεξεργασίας τοπολογίας, της ανάλυσης παρατηρησιμότητας και της εκτίμησης κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς και δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την ανάδειξη των κύριων σύγχρονων προκλήσεων και σχετικών προβλημάτων. Επίσης, περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο των τριών πεδίων και αναλύονται θεμελιώδεις σχετικές μέθοδοι, στοιχεία των οποίων χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του προτεινόμενου ερευνητικού έργου.

Κατόπιν, η μελέτη επικεντρώνεται στη διαχείριση ψευδομετρήσεων στα δίκτυα διανομής δεδομένης της έλλειψης επαρκούς αριθμού πραγματικών μετρητικών δεδομένων. Προτείνονται στοχευμένες τεχνικές για την υλοποίηση πλαισίων συνδυασμένης λειτουργίας διαφορετικών μεθόδων παραγωγής ψευδομετρήσεων φορτίου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης με βάση τη διαθεσιμότητα μετρητικών δεδομένων φορτίου. Επιπλέον, εξετάζεται μια μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας με χρήση ψευδομετρήσεων για τη μελέτη των καταστάσεων των διακοπτικών μέσων. Η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων προσεγγίσεων διερευνάται μέσω εκτενών προσομοιώσεων σε ένα πειραματικό και ένα πραγματικό δίκτυο διανομής.

Στη συνέχεια, η έρευνα εστιάζεται στη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με ελλιπή δεδομένα με σκοπό την ενίσχυση της παρατηρησιμότητας και της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασής τους. Προτείνονται τρεις καινοτόμες μέθοδοι, οι οποίες θεμελιώνονται στην πληροφορία του Fisher και διατυπώνονται ως προβλήματα βελτιστοποίησης με χρήση κυρτού και ημιορισμένου προγραμματισμού. Κριτήριο για την επίτευξη παρατηρησιμότητας είναι η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού εγκαταστάσεων μετρητικών μονάδων, ενώ, για τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης, αξιοποιούνται στατιστικά κριτήρια προερχόμενα από το βέλτιστο πειραματικό σχεδιασμό. Στις δυνατότητες των προτεινόμενων μεθόδων εμπίπτουν τόσο ο σχεδιασμός σύγχρονων μετρητικών υποδομών όσο και η βελτίωση υφιστάμενων μετρητικών συστημάτων. Οι μέθοδοι αξιολογούνται μέσω της εφαρμογής τους σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Εν κατακλείδι, οι προτεινόμενες προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν την έλλειψη μετρητικών δεδομένων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παρέχοντας ποιοτικές λύσεις για τη βέλτιστη διαχείριση μετρήσεων με γνώμονα την αποδοτική λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Ακρίβεια, βελτιστοποίηση, εκτίμηση κατάστασης, εκτίμηση φορτίου, ημιορισμένος προγραμματισμός, κυρτός προγραμματισμός, μετρήσεις, μετρητικές διατάξεις, παρατηρησιμότητα, ψευδομετρήσεις, πληροφορία του Fisher, βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός, μονάδες μέτρησης φασιθετών.

ABSTRACT

Reinforcing power system monitoring and control comprises one of the main axes for the transition to the era of smart grids. To this direction, the role and the importance of state estimators running in power control centers, are being constantly upgraded. The present PhD thesis elaborates on methods and techniques for the optimal management of measurements within the operational framework of weighted least squares state estimators for power systems characterized by incomplete data.

Initially, a literature survey with regard to the evolution of the functions of topology processing, observability analysis and state estimation in power transmission and distribution networks, is conducted in order to stress the main contemporary challenges and related problems. Moreover, the theoretical background for the three fields is described and fundamental related methods, elements of which are used for the development of the proposed research work, are analyzed.

Subsequently, the study concentrates on pseudomeasurement management in distribution networks given their lack of sufficient measurement data. Targeted techniques for the implementation of combined operational frameworks between different methods for pseudomeasurement generation and the state estimation algorithm depending on the availability of load measurement data, are proposed. Additionally, a topology processing method using pseudomeasurements for the study of switching devices statuses, is discussed. The effectiveness of the proposed approaches is investigated via extensive simulations on an experimental and a real distribution network.

In the sequel, the research focuses on the optimal selection of measurement units in power systems with incomplete data aimed at boosting their observability and state estimation accuracy. Three innovative methods founded on the Fisher information and formulated as optimization problems using convex and semidefinite programming, are suggested. The minimization of the number of measurement unit installations required is the criterion used for observability achievement, whereas statistical criteria originating from the optimal experimental design are leveraged for the maximization of state estimation accuracy. Both the design of modern metering infrastructure and the reinforcement of pre-existing measurement systems are feasible via the proposed methods. Their effectiveness is evaluated by means of their application to power systems coming from the international literature.

In conclusion, the approaches introduced counteract the lack of measurement data in power systems providing quality solutions for optimal measurement management in light of the efficient operation of state estimators.

KEYWORDS

Accuracy, convex programming, Fisher information, load estimation, measurement units, measurements, observability, optimal experimental design, optimization, phasor measurement units (PMUs), pseudomeasurements, semidefinite programming, state estimation.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ακαδημαϊκή πορεία του γράφοντος στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής ξεκίνησε από μία τυχαία ματιά στην προκήρυξη θέσεων υποψήφιων διδασκόντων της Σχολής για το ακαδημαϊκό έτος 2012–2013. Περισσότερο σαν έκφραση μίας εσωτερικής ανάγκης για επανεκκίνηση μετά από τη «νεκρή» περίοδο της στρατιωτικής θητείας παρά ως μία συνειδητή επιλογή για μελλοντική σταδιοδρομία. Ίσως, αυτή ήταν η αιτία – το ότι εισακτούστηκαν κάποια βαθύτερα θέλω, απολύτως συνυφασμένα με μία έμφυτη τάση για απόκτηση νέας γνώσης – που η αποδοχή μου στο πρόγραμμα διδακτορικών σπουδών υπό την επίβλεψη του κ. Γεωργίου Κορρέ αποδείχτηκε, εκ του αποτελέσματος, η ευνοϊκότερη έκβαση για τη μετέπειτα πορεία μου ως διπλωματούχου μηχανικού.

Αναφορικά με το αντικείμενο της διατριβής, τα κέντρα ελέγχου ενέργειας ανήκαν, ξεκάθαρα, στα επιστημονικά ενδιαφέροντα μου, ήδη, από την περίοδο των προπτυχιακών σπουδών, με κυριότερο ερέθισμα το ομώνυμο διδασκόμενο μάθημα. Κατόπιν, το μεταπτυχιακό δίπλωμα εξειδίκευσης «Συστήματα Αυτοματισμού» επέκτεινε τους ορίζοντες μου σε πεδία όπως τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και η βελτιστοποίηση συστημάτων, στα οποία δεν είχα επικεντρωθεί προπτυχιακά. Όταν, λοιπόν, προέκυψε η δυνατότητα εξειδίκευσης μέσω της εκπόνησης διδακτορικής έρευνας με αντικείμενο τους εκτιμητές κατάστασης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η τυχαία ματιά κατέληξε να εγείρει ένα ζωηρό ενδιαφέρον. Και αυτό γιατί τα ανωτέρω, επιμέρους πεδία συνδυάζονταν αρμονικά υπό το πρίσμα της προτεινόμενης διδακτορικής έρευνας.

Αφήνοντας κατά μέρος το υποκειμενικό στοιχείο, ο ρόλος των εκτιμητών κατάστασης στην επερχόμενη εποχή των ευφών δικτύων θεωρείται, αδιαμφισβήτητα, καθοριστικής σημασίας. Κυριότερες προκλήσεις σε ερευνητικό επίπεδο; Η ενίσχυση των επιμέρους λειτουργιών τους, οι οποίες θεμελιώθηκαν πριν από μισό αιώνα, ώστε να ανταποκρίνονται στις λειτουργικές προδιαγραφές των τεχνολογικά αναπτυσσόμενων ηλεκτρικών δικτύων και η αναβάθμιση των μετρητικών υποδομών, οι οποίες παρέχουν την «τροφή» τους, τα μετρητικά δεδομένα, με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητάς τους. Σε αυτό το γενικό πλαίσιο, κινήθηκε το σύνολο της ερευνητικής δραστηριότητάς μου κατά τη διάρκεια της εξαετίας 2013–2018. Το παρόν πόνημα αποτελεί μια διεξοδική προσπάθεια για την παρουσίαση των μεθόδων και των τεχνικών που αναπτύχθηκαν κατά την εκπόνηση της έρευνας, καθώς και την ανάλυση των σχετικών αποτελεσμάτων και συνεισφορών τους.

Για το τέλος, αφιερώνονται λίγες γραμμές για να απευθύνω ευχαριστίες σε ανθρώπους που συνέβαλαν στην εκπόνηση της διδακτορικής μου έρευνας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κ.κ. Κ. Βουρνά και Π. Γεωργιλάκη, οι οποίοι ως μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, επέδειξαν αδιάλειπτη προθυμία συνεργασίας και υποστήριξης καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επιπλέον, θερμές ευχαριστίες οφείλονται στους κ.κ. Ν. Χατζηαργυρίου, Ι. Προυσαλίδη, Σ. Παπαθανασίου και Β. Νικολαΐδη οι οποίοι με τίμησαν με συμμετοχή τους στις επιτροπές κρίσης της προτεινόμενης διατριβής. Η συνδρομή τους στην ποιοτική ενίσχυση του της διδακτορικής μου διατριβής υπήρξε πολύτιμη.

Όσον αφορά τους ανθρώπους που γνώρισα και συνεργάστηκα κατά τη διάρκεια αυτής της εξαετούς διαδρομής, οφείλω εγκάρδιες ευχαριστίες στον επίκουρο καθηγητή του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, κ. Ν. Μανουσάκη, ο οποίος, ως διδάκτωρ μηχανικός ΕΜΠ, συνέβαλε ουσιαστικά στην εκπόνηση του ερευνητικού μου έργου παρέχοντας πολύτιμες συμβουλές και

συμμετέχοντας στη συγγραφή επιστημονικών άρθρων και εργασιών μου. Επιπλέον, θα ήθελα να αναφερθώ στους συναδέλφους μου κ.κ. Β. Παπασπηλιωτόπουλο και Ν. Κουτσούκη, οι οποίοι αποτέλεσαν τους συνοδοιπόρους μου δεδομένου ότι εκπονήσαμε παράλληλα τη διδακτορική μας διατριβή. Η συμπαράσταση και η αλληλεγγύη τους τόσο ουσιαστικά, σε επίπεδο ερευνητικών συζητήσεων και υποχρεώσεων, όσο και ηθικά, σε εύκολες και δύσκολες στιγμές της διαδρομής, συγκρότησαν μία σχέση αγαστής συνεργασίας η οποία, πλέον, έχει αποδώσει ως παρακαταθήκη δεσμούς φιλίας. Επίσης, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» απευθύνω στον τομέαρχη της Διεύθυνσης Διαχείρισης Νησιών (ΔΕΔΔΗΕ) κ. Κ. Καούσια, ο οποίος, καθ' όλη τη διάρκεια της παράλληλης απασχόλησης μου στον τομέα ευθύνης του (2016–2018), επέδειξε απεριορίστη προθυμία να διευκολύνει τις ερευνητικές μου δραστηριότητες παρέχοντας μου ευελιξία σε θέματα ωραρίου και υποχρεώσεων.

Ευχαριστίες οφείλω στους γονείς μου, Χρήστο και Ουρανία, και στην αδελφή μου, Ευφροσύνη, για την στήριξη και, προπαντός, την ανοχή που επέδειξαν σε αναρίθμητες περιστάσεις κατά τις οποίες η επίπονη προσπάθεια του ερευνητικού έργου με κατέβαλε πνευματικά και ηθικά. Από καρδιάς ευχαριστώ και τη σύντροφό μου, Νάντια, για τις ατελείωτες ώρες κοινού διαβάσματος, τις προτροπές της και την αντοχή που μου προσέδωσε. Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω και στον φίλο μου, Βαγγέλη Ανυφαντή, διδάκτορα μηχανικό ΕΜΠ για τη διαρκή ηθική υποστήριξή του.

Τέλος, το μεγαλύτερο «ευχαριστώ», ως ελάχιστη ένδειξη αναγνώρισης του επιστημονικού μεγέθους του και ευγνωμοσύνης για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την καλοσύνη που επέδειξε απέναντι μου, οφείλω εκ βάθους καρδιάς στον επιβλέποντά μου κ. Γ. Κορρέ. Χωρίς την ανεξάντλητη έμπνευση, τις εύστοχες ιδέες και τις ακάματες παραινέσεις του, η διδακτορική έρευνα θα ήταν, κατά πάσα πιθανότητα, δυσχερέστερη, μα, κατά πάσα βεβαιότητα, λιγότερο φωτισμένη.

Θεμιστοκλής Χ. Ξύγκης

Αθήνα, Απρίλιος 2019

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----|
| ΣΥΝΟΨΗ | 7 |
| ABSTRACT | 9 |
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ..... | 11 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ..... | 17 |
| ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ | 19 |
| ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ | 21 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 25 |
| 1.1 Η Τρέχουσα Κατάσταση στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας..... | 25 |
| 1.2 Η Επίγνωση Κατάστασης στα ΣΗΕ | 29 |
| 1.3 Ο Ρόλος της Εκτίμησης Κατάστασης στην Εποπτεία των ΣΗΕ..... | 31 |
| 1.4 Αντικείμενο και Συνεισφορές της Διατριβής..... | 34 |
| 1.5 Διάρθρωση της Διατριβής | 36 |
| ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 39 |
| 2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 39 |
| 2.1.1 Η εκτίμηση κατάστασης και ο επεξεργαστής τοπολογίας στα ΣΗΕ | 39 |
| 2.1.2 Οι τρεις άξονες της εξέλιξης των εκτιμητών κατάστασης στα σύγχρονα ΣΗΕ..... | 41 |
| 2.1.3 Η εκτίμηση κατάστασης και ο επεξεργαστής τοπολογίας στα δίκτυα διανομής..... | 43 |
| 2.1.4 Η ανάλυση παρατηρησιμότητας | 47 |
| 2.2 Εκτίμηση Κατάστασης με τη Μέθοδο Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (Weighted Least Squares–WLS) | 49 |
| 2.2.1 Παραδοχές | 50 |
| 2.2.2 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation) | 50 |
| 2.2.3 Το στατικό μοντέλο WLS | 52 |
| 2.2.3.1 Το διάνυσμα των μη γραμμικών συνάρτησεων μετρήσεων, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ | 56 |
| 2.2.3.2 Ιδιότητες και σημασία της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ | 59 |
| 2.3 Ανάλυση Παρατηρησιμότητας..... | 61 |
| 2.3.1 Ορισμός της παρατηρησιμότητας..... | 61 |
| 2.3.2 Το μοντέλο μειωμένης τάξης (reduced model) | 63 |
| 2.3.2.1 Γενική μορφή Ιακωβιανής μήτρας για ανάλυση παρατηρησιμότητας..... | 63 |
| 2.3.2.2 Νησιδοποίηση συστήματος και είδη παρατηρησιμότητας..... | 63 |
| 2.3.2.3 Θεμελίωση του μοντέλου..... | 66 |
| 2.4 Επεξεργαστής Τοπολογίας..... | 67 |
| 2.4.1 Η κατάσταση των διακοπών και τα σφάλματα τοπολογίας | 67 |
| 2.4.2 Πιθανοτική μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας..... | 68 |
| 2.4.2.1 Μοντελοποίηση διακοπτικών μέσων..... | 68 |

| | | |
|--|--|-----|
| 2.4.2.2 | Θεμελίωση της πιθανοτικής μεθόδου | 70 |
| 2.4.2.3 | Το πρόβλημα του διαχωρισμού του δικτύου | 72 |
| ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ | | 75 |
| 3.1 | Οι Ψευδομετρήσεις στο Πλαίσιο της Εκτίμησης Κατάστασης των Δικτύων Διανομής | 75 |
| 3.2 | Μέθοδοι και Τεχνικές Παραγωγής Ψευδομετρήσεων | 78 |
| 3.2.1 | Εκτίμηση φορτίου..... | 79 |
| 3.2.2 | Επιμερισμός φορτίου | 80 |
| 3.2.3 | Πρόβλεψη φορτίου | 81 |
| 3.3 | Χρήση Δεδομένων από Έξυπνους Μετρητές στο Πλαίσιο της Εκτίμησης Κατάστασης στα Δίκτυα Διανομής | 82 |
| 3.4 | Παραγωγή Ψευδομετρήσεων βάσει της Χρονικής Διαθεσιμότητας Δεδομένων Φορτίου | 86 |
| 3.4.1 | Μέθοδος επιμερισμού φορτίου [159] | 87 |
| 3.4.2 | Μέθοδος βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] | 91 |
| 3.4.3 | Μέθοδος εκτίμησης φορτίου [169] | 93 |
| 3.5 | Προσομοίωση Εκτίμησης Κατάστασης σε Δίκτυα Διανομής με Χρήση Ψευδομετρήσεων | 96 |
| 3.5.1 | Γενική περιγραφή των προγραμμάτων προσομοίωσης..... | 97 |
| 3.5.2 | Εφαρμογή της μεθόδου επιμερισμού φορτίου [159] σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου | 98 |
| 3.5.2.1 | Το δίκτυο δοκιμών..... | 98 |
| 3.5.2.2 | Σχεδιασμός και υλοποίηση | 101 |
| 3.5.2.3 | Αποτελέσματα | 106 |
| 3.5.3 | Εφαρμογή της πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου | 112 |
| 3.5.3.1 | Σχεδιασμός και υλοποίηση | 112 |
| 3.5.3.2 | Αποτελέσματα | 114 |
| 3.5.4 | Εφαρμογή των μεθόδων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] και εκτίμησης φορτίου [169] σε μικροδίκτυο 17 κόμβων | 121 |
| 3.5.4.1 | Το δίκτυο δοκιμών..... | 121 |
| 3.5.4.2 | Σχεδιασμός και υλοποίηση | 122 |
| 3.5.4.3 | Αποτελέσματα | 127 |
| ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | | 133 |
| 4.1 | Βιβλιογραφική Ανασκόπηση..... | 133 |
| 4.1.1 | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα συστήματα μεταφοράς | 133 |
| 4.1.2 | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα δίκτυα διανομής..... | 141 |
| 4.2 | Το Πρόβλημα της Βέλτιστης Επιλογής Αισθητήρων σε Υποδομές Εποπτείας και Ελέγχου | 145 |
| 4.2.1 | Η πληροφορία του Fisher..... | 147 |
| 4.2.1.1 | Ιδιότητες μήτρας FIM..... | 147 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.1.2 Το αποτέλεσμα του Fisher (Fisher score) | 149 |
| 4.2.1.3 Το κάτω φράγμα Cramér-Rao | 149 |
| 4.2.2 Ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός..... | 151 |
| 4.2.2.1 Γενικές αρχές..... | 151 |
| 4.2.2.2 Θεμελίωση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D..... | 155 |
| 4.2.2.3 Θεμελίωση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M..... | 157 |
| 4.2.2.4 Επιλυσιμότητα των προβλημάτων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D και M..... | 158 |
| 4.3 Προτεινόμενες Μέθοδοι Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών μονάδων σε Δίκτυα Διανομής | 160 |
| 4.3.1 Μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής με χρήση του κριτηρίου D | 162 |
| 4.3.2 Μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής με χρήση του κριτηρίου M | 164 |
| 4.4 Προτεινόμενη Μέθοδος Βέλτιστης Επιλογής Μονάδων PMU σε Συστήματα Μεταφοράς.... | 165 |
| ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ | 169 |
| 5.1 Γενικό Πλαίσιο Εφαρμογής των Προτεινόμενων Μεθόδων | 169 |
| 5.1.1 Περιγραφή της υπολογιστικής διαδικασίας | 171 |
| 5.1.2 Σύντομη περιγραφή της εργαλειοθήκης YALMIP | 173 |
| 5.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών Μονάδων με Χρήση του Κριτηρίου D σε Δίκτυο Διανομής 136 Κόμβων | 175 |
| 5.2.1 Το δίκτυο δοκιμών | 175 |
| 5.2.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση | 176 |
| 5.2.3 Αποτελέσματα..... | 180 |
| 5.3 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μονάδων PMU σε Πρότυπα Συστήματα Μεταφοράς | 188 |
| 5.3.1 Τα συστήματα δοκιμών..... | 188 |
| 5.3.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση | 190 |
| 5.3.3 Αποτελέσματα..... | 192 |
| 5.4 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών Μονάδων με Χρήση του Κριτηρίου M σε Δίκτυα Διανομής 55 και 95 Κόμβων | 201 |
| 5.4.1 Εφαρμογή στο δίκτυο διανομής 55 κόμβων | 201 |
| 5.4.1.1 Το δίκτυο δοκιμών | 202 |
| 5.4.1.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση..... | 203 |
| 5.4.1.3 Αποτελέσματα..... | 205 |
| 5.4.2 Εφαρμογή στο δίκτυο διανομής 95 κόμβων | 211 |
| 5.4.2.1 Το δίκτυο δοκιμών | 211 |
| 5.4.2.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση..... | 212 |
| 5.4.2.3 Αποτελέσματα..... | 213 |

| | |
|--|-----|
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ | 221 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | 227 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β | 241 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 251 |
| ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ | 269 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 1.1: Οι κύριες μεταβολές στη δομή και τον τρόπο λειτουργίας μεταξύ των συμβατικών ΣΗΕ και των ευφυών δικτύων [11]..... | 26 |
| Σχήμα 1.2: Οι τρεις άξονες ανάπτυξης των ευφυών δικτύων. | 28 |
| Σχήμα 1.3: Διάγραμμα λειτουργίας ενός σύγχρονου εκτιμητή κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [21]..... | 33 |
| Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας κατανεμημένων εκτιμητών κατάστασης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [21]..... | 34 |
| Σχήμα 2.1: Τα χρονικά παράθυρα ανάκτησης μετρητικών δεδομένων, επεξεργασίας και ελέγχου στα συστήματα EMS [24]..... | 42 |
| Σχήμα 2.2: Επίλυση των κανονικών εξισώσεων με τη μέθοδο των εμπρός-πίσω αντικαταστάσεων..... | 55 |
| Σχήμα 2.3: Παράδειγμα διαχωρισμού ενός συστήματος σε παρατηρήσιμες νησίδες με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ροών ισχύος και χαρακτηρισμός των κόμβων, των κλάδων και των διαθέσιμων μετρήσεων..... | 64 |
| Σχήμα 2.4: Οι τρεις πιθανές καταστάσεις ενός διακοπτικού μέσου μεταξύ δυο τυχαίων κόμβων..... | 68 |
| Σχήμα 2.5: Μοντελοποίηση διακοπτικού μέσου τυχαίου κλάδου (α) και εισαγωγή εικονικού κόμβου για τη μελέτη της κατάστασης του (β)..... | 69 |
| Σχήμα 2.6: Μοντελοποίηση διακοπτικών μέσων κλάδων με γεννήτρια (α, β) και φορτίο (γ, δ)..... | 69 |
| Σχήμα 3.1: Η εξέλιξη της εγκατάστασης έξυπνων μετρητών σε καταναλωτές ΧΤ ανά γεωγραφική περιοχή και συνολικά, σε παγκόσμια κλίμακα [186]. | 83 |
| Σχήμα 3.2: Παράδειγμα διαχωρισμού ενός δικτύου διανομής σε υπόδεντρα με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ροών ισχύος. | 90 |
| Σχήμα 3.3: Το μονογραμμικό διάγραμμα της κύριας γραμμής διανομής P220 του υποσταθμού Γενναδίου. | 99 |
| Σχήμα 3.4: Το μονογραμμικό διάγραμμα της κύριας γραμμής διανομής P260 του υποσταθμού Γενναδίου. | 100 |
| Σχήμα 3.5: Ωριαίες κατανομές σφαλμάτων εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο του δικτύου δοκιμών για μια ολόκληρη εβδομάδα..... | 107 |
| Σχήμα 3.6: Μέση ωριαία διακύμανση του δείκτη EEI κατά την εβδομάδα της μελέτης..... | 108 |
| Σχήμα 3.7: Μέση ωριαία διακύμανση του δείκτη $Macc_V$ κατά την εβδομάδα της μελέτης..... | 108 |
| Σχήμα 3.8: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας 1 κατά την επιλεγμένη ημέρα..... | 109 |
| Σχήμα 3.9: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας 2 κατά την επιλεγμένη ημέρα..... | 110 |
| Σχήμα 3.10: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας απείρου κατά την επιλεγμένη ημέρα. | 110 |
| Σχήμα 3.11: Ωριαία διακύμανση των δεικτών PIP_{fl} , PIQ_{fl} , PIP_{inj} και PIQ_{inj} κατά την επιλεγμένη ημέρα..... | 111 |
| Σχήμα 3.12: Ωριαία διακύμανση των δεικτών $Mconu_J$, $Mconu_V$ και $Mconu_\delta$ κατά την επιλεγμένη ημέρα..... | 112 |
| Σχήμα 3.13: Το μικροδίκτυο 17 κόμβων το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως δίκτυο δοκιμών. | 122 |
| Σχήμα 3.14: Μέσες, ημερήσιες ακμπύλες προφίλ NLP ανά κλάση καταναλωτή βάσει πραγματικών δεδομένων φορτίου από το δίκτυο διανομής της Ιρλανδίας (όπου ΣΦ: συντελεστής φορτίου) [203]..... | 123 |
| Σχήμα 3.15: Το διάγραμμα ροής για την προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] και της εκτίμησης κατάστασης WLS..... | 126 |
| Σχήμα 3.16: Το διάγραμμα ροής για την προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169] και της εκτίμησης κατάστασης WLS..... | 127 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 3.17: Η επίδραση της καθυστερημένης διαθεσιμότητας των δεδομένων των έξυπνων μετρητών στην επίδοση της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169]..... | 128 |
| Σχήμα 3.18: Οι εκτιμώμενες καμπύλες φορτίου για τα προφίλ NLP1 και NLP5 οι οποίες προέκυψαν μέσω της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου σε σύγκριση με τις πραγματικές καμπύλες της ίδιας – τυχαία επιλεγμένης – ημέρας, της προηγούμενης (ομοειδούς) ημέρας και της ίδιας ημέρας κατά την προηγούμενη εβδομάδα..... | 129 |
| Σχήμα 3.19: Οι εκτιμώμενες καμπύλες φορτίου για τα προφίλ NLP1 και NLP5 οι οποίες προέκυψαν μέσω της μεθόδου εκτίμησης φορτίου σε σύγκριση με τις πραγματικές καμπύλες της ίδιας – τυχαία επιλεγμένης – ημέρας, της προηγούμενης (ομοειδούς) ημέρας και της ίδιας ημέρας κατά την προηγούμενη εβδομάδα..... | 129 |
| Σχήμα 3.20: Σύγκριση σφαλμάτων <i>RRMS</i> και <i>MAP</i> των δύο προτεινόμενων μεθόδων ανά εκτιμώμενο προφίλ NLP..... | 130 |
| Σχήμα 3.21: Ωριαίες κατανομές σφαλμάτων εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο του δικτύου δοκιμών για την τυχαία επιλεγμένη ημέρα της θερινής περιόδου..... | 131 |
| | |
| Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση βελτίωσης της ακρίβειας της εκτιμώμενης κατάστασης $\hat{x} \in \mathbb{R}^3$ μέσω της συρρίκνωσης του ελλειψοειδούς $\mathcal{E}_{\hat{x}}$ σε $\mathcal{E}_{\hat{x}}$ | 164 |
| | |
| Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας η οποία ακολουθείται για την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων. Με αστερίσκους επισημαίνονται οι επιμέρους διαφοροποιήσεις..... | 172 |
| Σχήμα 5.2: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 136 κόμβων..... | 176 |
| Σχήμα 5.3: Γραφική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων (“MU”) σε δίκτυα διανομής..... | 177 |
| Σχήμα 5.4: Διακύμανση των τιμών (α) του κριτηρίου Ψ_D και (β) του δείκτη $Mass_V$ ανά αριθμό εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων για τα σενάρια 4–7..... | 187 |
| Σχήμα 5.5: Τα μονογραμμικά διαγράμματα των πρότυπων συστημάτων μεταφοράς IEEE (α) 14 κόμβων και (β) 30 κόμβων..... | 189 |
| Σχήμα 5.6: Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος μεταφοράς IEEE 118 κόμβων..... | 189 |
| Σχήμα 5.7: Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος μεταφοράς IEEE 57 κόμβων..... | 190 |
| Σχήμα 5.8: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 55 κόμβων..... | 202 |
| Σχήμα 5.9: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 3..... | 209 |
| Σχήμα 5.10: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης γωνίας τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 3..... | 209 |
| Σχήμα 5.11: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 4..... | 210 |
| Σχήμα 5.12: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης γωνίας τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 4..... | 210 |
| Σχήμα 5.13: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 95 κόμβων..... | 211 |
| Σχήμα 5.14: Διερεύνηση αποτελεσμάτων διεξοδικής έρευνας με επισήμανση των παρεχόμενων λύσεων από την προτεινόμενη μέθοδο (κυκλωμένες με κόκκινο χρώμα)..... | 214 |
| Σχήμα 5.15: Διασπορές εκτιμώμενων μέτρων και γωνιών τάσης του υπό μελέτη δικτύου με δεδομένη την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή (α, β) και μετά την προσθήκη σε αυτήν των βέλτιστα επιλεγμένων μετρητικών μονάδων των σεναρίων 2 (γ, δ), 3 (ϵ, σ), 4 (ζ, η) και 5 (θ, ι)..... | 217 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές διαστημάτων εμπιστοσύνης ανά τύπο διαθέσιμης μέτρησης στα δίκτυα διανομής..... | 77 |
| Πίνακας 3.2: Απαιτούμενες προδιαγραφές και δεδομένα εισόδου για τις τρεις επιλεγμένες μεθόδους..... | 97 |
| Πίνακας 3.3: Διαθέσιμες μετρήσεις ενεργού ισχύος στο υπό μελέτη δίκτυο..... | 101 |
| Πίνακας 3.4: Μέγιστο μέσο απόλυτο σφάλμα και μέσα απόλυτα σφάλματα RPE ανά τύπο κόμβου και ημέρας..... | 107 |
| Πίνακας 3.5: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για το σενάριο 1..... | 114 |
| Πίνακας 3.6: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για τα σενάρια 2–6..... | 115 |
| Πίνακας 3.7: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για τα σενάρια 7–13..... | 116 |
| Πίνακας 3.8: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 1–3..... | 117 |
| Πίνακας 3.9: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 4–6..... | 118 |
| Πίνακας 3.10: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 7 και 8..... | 119 |
| Πίνακας 3.11: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 9 και 10..... | 120 |
| Πίνακας 3.12: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 11–13..... | 121 |
| Πίνακας 3.14: Μέσα, απόλυτα σφάλματα RPE ανά κόμβο για την επιλεγμένη ημέρα της θερινής περιόδου..... | 131 |
| | |
| Πίνακας 5.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές των προτεινόμενων μεθόδων..... | 170 |
| Πίνακας 5.2: Περιγραφή των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) των σεναρίων 1–3..... | 181 |
| Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (ιανονική γραφή) για το σενάριο 1..... | 182 |
| Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (ιανονική γραφή) για το σενάριο 2..... | 182 |
| Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (ιανονική γραφή) για το σενάριο 3..... | 183 |
| Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 4..... | 184 |
| Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 5..... | 184 |
| Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 6..... | 185 |
| Πίνακας 5.9: Το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) για το σενάριο 7..... | 186 |
| Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 7..... | 186 |
| Πίνακας 5.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και των εργασιών [227] και [288] για τα πρότυπα συστήματα IEEE 118 και 14 κόμβων, αντίστοιχα..... | 193 |
| Πίνακας 5.12: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων για τα πρότυπα συστήματα IEEE 30, 57 και 118 κόμβων..... | 194 |
| Πίνακας 5.13: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων για τα πρότυπο σύστημα IEEE 300 κόμβων..... | 195 |
| Πίνακας 5.14: Συγκρότηση των τεσσάρων σεναρίων εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου ανά σύστημα δοκιμών..... | 196 |
| Πίνακας 5.15: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα πρότυπα συστήματα IEEE 30, 57 και 118 κόμβων..... | 196 |
| Πίνακας 5.16: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα πρότυπο σύστημα IEEE 300 κόμβων..... | 197 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 5. 17: Χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας ανά σύστημα δοκιμών και σενάριο..... | 198 |
| Πίνακας 5.18: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των προεγκατεστημένων μονάδων PMU, και οι περιορισμοί για τα σενάρια 5–13..... | 198 |
| Πίνακας 5.19: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των προεγκατεστημένων μονάδων PMU, και οι περιορισμοί για τα σενάρια 14–19..... | 199 |
| Πίνακας 5. 20: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα σενάρια 5–19..... | 200 |
| Πίνακας 5.21: Ελάχιστος αριθμός εγκατεστημένων μονάδων PMU ανά θεωρούμενο σενάριο για το εκτεταμένο μοντέλο των 3120 κόμβων..... | 201 |
| Πίνακας 5.22: Τιμές σφάλματος <i>error</i> ανά προφίλ φορτίου..... | 205 |
| Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 1..... | 206 |
| Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 2..... | 207 |
| Πίνακας 5.25: Κατανομή προφίλ φορτίου ανά κόμβο για το σενάριο 4..... | 207 |
| Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 3..... | 208 |
| Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 4..... | 208 |
| Πίνακας 5.28: Περιγραφή των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) του σεναρίου 1..... | 214 |
| Πίνακας 5.29: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 2..... | 215 |
| Πίνακας 5.30: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 3..... | 216 |
| Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 4..... | 216 |
| Πίνακας 5.32: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 5..... | 216 |
| Πίνακας 5.33: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 6..... | 219 |
| Πίνακας 5.34: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 7..... | 220 |

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΠΕ – ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

ΚΕΕ – κέντρα ελέγχου ενέργειας

ΜΤ – μέση τάση

ΣΑΕ – συστήματα αυτομάτου ελέγχου

ΣΗΕ – συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

ΥΤ – υψηλή τάση

ΧΤ – χαμηλή τάση

AMI – advanced metering infrastructure

AMR – automated meter reading

DC – direct current

DMS – distribution management system

DSCADA – distribution supervisory control and data acquisition

EMS – energy management system

FASE – forecasting aided state estimation

FIM – Fisher information matrix

GPS – global positioning system

IED – intelligent electronic device

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

LAV – least absolute value

LMI – linear matrix inequality

NLP – normalized load profiles

PMU – phasor measurement unit

RTU – remote terminal unit

SCADA – supervisory control and data acquisition

WLS – weighted least squares

ΣΩΚΡΑΤΗΣ: Οὐκ ἄρ' ἂν εἴη ποτέ, ὦ Θεαίτητε, αἴσθησίς τε καὶ ἐπιστήμη ταυτόν.

ΘΕΑΙΤΗΤΟΣ: Οὐ φαίνεται, ὦ Σώκρατες. καὶ μάλιστα γε νῦν καταφανέστατον γέγονεν ἄλλο ὄν αἰσθήσεως ἐπιστήμη.

Μετάφραση:

ΣΩΚΡ. Δεν θα μπορούσε λοιπόν ποτέ να είναι, Θεαίτητε, η αίσθηση και η γνώση το ίδιο πράγμα.

ΘΕΑΙ. Δεν φαίνεται, Σωκράτη μου. Και τώρα πιο πολύ έγινε ολοφάνερο ότι άλλο είναι η γνώση και άλλο η αίσθηση.

Πλάτωνος Θεαίτητος, 186ε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιδιότητα της αυτεπίγνωσης (self-awareness) αποτελεί ικανή και αναγκαία συνθήκη προκειμένου ένα σύστημα να μπορεί να χαρακτηριστεί ως ευφρές. Η έννοια της αυτεπίγνωσης προϋποθέτει τη μέτρηση φυσικών μεγεθών και παραμέτρων μέσω αισθητήρων και την επεξεργασία τους μέσω των υπολογιστικών μονάδων του συστήματος προκειμένου να εξαχθεί μια εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασής του. Όπως γίνεται αντιληπτό, παράγοντες όπως η επιλογή των προς μέτρηση μεγεθών και παραμέτρων, η ακρίβεια των μετρήσεων, η ικανότητα των εσωτερικών διαδικασιών να φιλτράρουν τα μετρητικά δεδομένα, και η προσαρμοστικότητα των σχετικών υπολογιστικών εργαλείων για την εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος σε σχέση με τις ειδικές απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος, θεωρούνται καθοριστικοί για την ποιότητα της εκτιμώμενης κατάστασης και, συνεπακόλουθα, το επίπεδο της αυτεπίγνωσης του συστήματος. Η βελτιστοποίηση των ανωτέρω παραγόντων αποτελεί ένα γόνιμο πεδίο έρευνας με στόχο την επίτευξη ευφυΐας σε συστήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης.

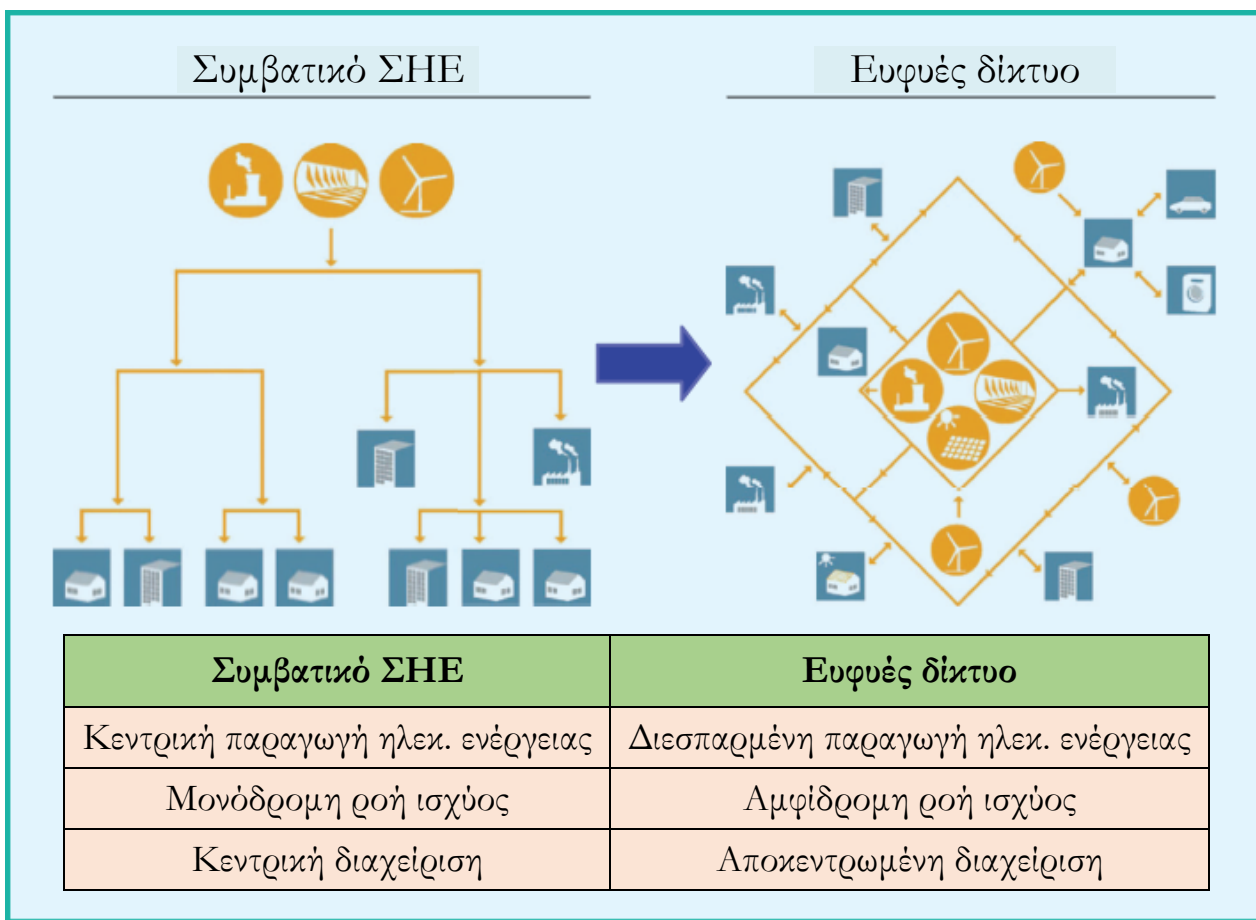
1.1 Η Τρέχουσα Κατάσταση στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ανάγκη για αειφόρο ενεργειακή ανάπτυξη και ενίσχυση της αποδοτικότητας στους τομείς της παραγωγής, μεταφοράς, διανομής και διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την εξοικονόμηση των ενεργειακών πόρων, έχουν θέσει τον εκσυγχρονισμό και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ΣΗΕ στο επίκεντρο της επιστημονικής έρευνας και των τεχνολογικών εξελίξεων σε παγκόσμιο επίπεδο [1]. Κοινό στόχο αποτελεί ο μετασχηματισμός των συμβατικών ΣΗΕ, τα οποία βασίζονται σε κεντρική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αυτοματισμούς για την εποπτεία και τον έλεγχο που περιορίζονται, σχεδόν αποκλειστικά, σε επίπεδο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σε αποκεντρωμένα και ευέλικτα συστήματα με διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και διεύρυνση της αυτοματοποίησης σε επίπεδο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την αποδοτική διαχείριση τόσο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διεσπαρμένες πηγές όσο και της κατανάλωσης σε επίπεδο ΜΤ και ΧΤ.

Με δεδομένη την πολύπλοκη δομή τους, η αναβάθμιση των δικτύων διανομής σε επίπεδο εποπτείας και ελέγχου αποτελεί μια απαιτητική διαδικασία, απώτερος στόχος της οποίας είναι η μετατροπή τους από παθητικά συστήματα, με αποκλειστικό ρόλο την εξυπηρέτηση της ζήτησης φορτίου, σε ενεργά συστήματα με διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και αυτοματισμούς στο πλαίσιο ενός ενοποιημένου ΣΗΕ στα πρότυπα του ευφυούς δικτύου (smart grid) [2], ενός όρου που αποκρυσταλλώθηκε για πρώτη φορά σε επίσημη μορφή με νόμο των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής το 2007 [3]. Στο Σχήμα 1.1. δίνονται συνοπτικά οι κύριες μεταβολές που περιλαμβάνει η μετεξέλιξη των σύγχρονων ΣΗΕ σε ευφυή δίκτυα. Η έννοια της «ευφυΐας» χρησιμοποιείται καταχρηστικά για να αποδώσει την ικανότητα επεξεργασίας πληροφοριών, λήψης απόφασης και απομακρυσμένου ελέγχου σε πραγματικό χρόνο μέσω της αξιοποίησης πληροφοριακών και τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών (information and communication technology) [4]. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ευφρές δίκτυο είναι ένας γενικός όρος που δύναται να αφορά πέραν από δίκτυα ηλεκτρισμού, και δίκτυα ύδρευσης, φυσικού αερίου κ.α.

Κεντρικός άξονας στην προσπάθεια αναβάθμισης των ΣΗΕ σε ευφυή δίκτυα είναι η επίτευξη αμφίδρομης ροής πληροφοριών από τα ΚΕΕ προς τους χρήστες – ηλεκτροπαραγωγούς και καταναλωτές – και

αντίστροφα, με χρήση προηγμένων τηλεπικοινωνιών [5]. Η χρησιμοποίηση αμφίδρομων διαύλων επικοινωνίας εξασφαλίζει τόσο τη μετάδοση μετρητικών δεδομένων και παραμέτρων από τους χρήστες ή άλλα σημεία ενδιαφέροντος προς τα ΚΕΕ όσο και την αποστολή εντολών από τα ΚΕΕ προς τους χρήστες. Με αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσεται ένα δίκτυο τηλεπικοινωνιών που προσομοιάζει με το περιφερικό νευρικό σύστημα ενός οργανισμού το οποίο μεταφέρει αισθητικά μηνύματα τόσο προς το κεντρικό νευρικό σύστημα όσο και από το κεντρικό νευρικό σύστημα προς την αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή προς τους μύες, τα όργανα και τους αδένες. Τέλος, το Διαδίκτυο (Internet) δύναται να συνεισφέρει πολύτιμες υπηρεσίες τόσο στην αποθήκευση και μετάδοση πληροφοριών, όσο και στην ενεργειακή διαχείριση σε επίπεδο καταναλωτών ΧΤ και ΜΤ, ενώ η εξελισσόμενη τεχνολογική τάση του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things), το οποίο συστηματοποιεί την αλληλεπίδραση συσκευών και διατάξεων με ενσωματωμένους αισθητήρες (sensors) και επενεργητές (actuators) σε τοπική κλίμακα, αναμένεται να συνδράμει στη δημιουργία νησίδων προηγμένης αυτοματοποίησης.



Σχήμα 1.1: Οι κύριες μεταβολές στη δομή και τον τρόπο λειτουργίας μεταξύ των συμβατικών ΣΗΕ και των ευφύων δικτύων [11].

Το ρόλο του κεντρικού νευρικού συστήματος, το οποίο θα διαχειρίζεται όλο τον όγκο των πληροφοριών και, ακολούθως, θα προβαίνει σε κατάλληλες εντολές ελέγχου, αναλαμβάνουν προηγμένα υπολογιστικά συστήματα και εργαλεία λογισμικού των ΚΕΕ που βασίζονται στην τεχνολογία πληροφοριών. Δεδομένου ότι η δημιουργία των ΚΕΕ ανάγεται στη δεκαετία του 1950, η κυριότερη πρόκληση που έχουν να αντιμετωπίσουν τα υπολογιστικά εργαλεία και οι συναφείς εφαρμογές των σύγχρονων ΚΕΕ σε αντιδιαστολή με τις προγενέστερες, είναι η αλματώδης επέκταση της γεωγραφικής κάλυψης των ηλεκτρικών δικτύων και, συνεπακόλουθα, η ραγδαία αύξηση των φορέων και των χρηστών που καλούνται

να διαχειριστούν, καθώς τα δίκτυα διανομής εντάσσονται με σταθερό ρυθμό σε καθιερωμένες απομακρυσμένης εποπτείας και ελέγχου.

Η εξυπηρέτηση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, των δημοσίων διαχειριστών, των ιδιωτικών παρόχων ηλεκτρισμού, των ανεξάρτητων παραγωγών, των μεγάλων καταναλωτών, των καταναλωτών ΧΤ κ.α. δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις ως προς την υπολογιστική ισχύ και την αξιοπιστία των εργαλείων ενός σύγχρονου ΚΕΕ ώστε αυτά να λειτουργούν με τρόπο [6]:

- αποκεντρωμένο, δηλαδή η συγκέντρωση και η επεξεργασία των δεδομένων να γίνεται ιεραρχικά και πολυεπίπεδα, ενώ κάποιες εφαρμογές να μπορούν να εκτελούνται σε ενδιάμεσα κέντρα διαχείρισης εκτός των ΚΕΕ,
- ενοποιημένο, ώστε τα επιμέρους συστήματα διαχείρισης της παραγωγής, μεταφοράς (συστήματα EMS), διανομής (συστήματα DMS), εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (όπως τα υφιστάμενα συστήματα SCADA) να συνεργάζονται άμεσα και αποδοτικά,
- ευέλικτο, έχοντας σπονδυλωτή δομή αποτελούμενη από διακριτές υπολογιστικές μονάδες που μπορούν να αφαιρούνται, να προστίθενται ή να αντικαθίστανται σύμφωνα με τις εκάστοτε λειτουργικές απαιτήσεις και να διατηρούν τη δυνατότητα περαιτέρω ανάπτυξης των υφιστάμενων εργαλείων,
- διαλειτουργικό, ώστε να μην υπάρχει καμία εξάρτηση από λογισμικό και υλικό συγκεκριμένης προέλευσης και να μπορεί να συνεργάζεται με τις πλατφόρμες διαχείρισης οποιουδήποτε προμηθευτή ηλεκτρισμού.

Η ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων μέτρησης και αυτοματισμών σε όλο εύρος των ΣΗΕ αποτελεί τον τρίτο άξονα για τη μετάβαση στα ευφυή δίκτυα ηλεκτρισμού. Ως προς τα συστήματα μεταφοράς, η εγκατάσταση αισθητήρων υψηλής μετρητικής ακρίβειας με προηγμένες δυνατότητες, όπως η συγχρονισμένη καταγραφή και προσπέλαση στην περίπτωση των μονάδων μέτρησης φασιθετών (μονάδες PMU) ή η εκτεταμένη λειτουργικότητα (μέτρηση, απομακρυσμένος έλεγχος, προστασία και εντοπισμός σφαλμάτων) υπό το γενικό χαρακτηρισμό ευφυείς ηλεκτρονικές διατάξεις (διατάξεις IED) παρέχει το απαραίτητο πλέγμα τερματικών μονάδων για την ανάπτυξη των συστημάτων επιτήρησης, προστασίας και ελέγχου ευρείας περιοχής (wide area monitoring, control and protection) [7]. Τα εν λόγω συστήματα αποσκοπούν στην ενσωμάτωση των επιμέρους συστημάτων SCADA των σταθμών παραγωγής και του συστήματος μεταφοράς και στην ενοποιημένη λειτουργία τους. Υπό αυτό το πρίσμα, οι διατάξεις IED αποτελούν τη μετεξέλιξη των απομακρυσμένων τερματικών μονάδων (μονάδες RTU), οι οποίες χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο των συστημάτων SCADA, και διαμορφώνουν την κυρίαρχη τάση που επιτάσσει τη χρησιμοποίηση συσκευών που συνδυάζουν τις λειτουργίες αισθητήρα και επενεργητή δρώντας ως φορείς κατανεμημένης ευφυΐας. Στο ίδιο πνεύμα, οι κλασικοί επενεργητές που χρησιμοποιούνται στους αυτοματισμούς – κατά κύριο λόγο οι διακοπτικά μέσα ζεύξης (αποζεύκτες, διακόπτες φορτίου και ισχύος) και προστασίας (διακόπτες οδηγούμενοι από ηλεκτρονόμους) – αναβαθμίζονται μέσω της δυνατότητας λήψης μετρήσεων.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας εικοσαετίας, στα δίκτυα διανομής έχουν τεθεί σε ευρεία χρήση μετρητικές συσκευές με δυνατότητα απομακρυσμένης προσπέλασης για την καταγραφή της ηλεκτρικής κατανάλωσης χρηστών ΜΤ και ΧΤ. Πρόκειται για τα συστήματα αυτόματης προσπέλασης μετρητών (συστήματα AMR) τα οποία υποστηρίζουν μονόδρομη ροή πληροφορίας από τους μετρητές προς τα ΚΕΕ [8]. Μετεξέλιξη αυτής της πρώιμης τεχνολογίας είναι οι προηγμένες μετρητικές υποδομές (συστήματα AMI) που βασίζουν τη λειτουργία τους σε κατανεμημένους έξυπνους μετρητές (smart meters), οι οποίοι, πλέον, εγκαθίστανται μαζικά σε καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ, και υποστηρίζουν την

αμφίδρομη ροή πληροφοριών από και προς τα ΚΕΕ σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο [9]. Συνεπώς, είναι σε θέση να υποστηρίζουν λειτουργίες απομακρυσμένου ελέγχου, ενσωματώνοντας στην ίδια μονάδα λειτουργίες επενεργητή σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνουν από τα ΚΕΕ. Συνολικά, τα συστήματα ΑΜΙ προσφέρουν τις πλέον ολοκληρωμένες υποδομές τηλεμετρίας και ελέγχου σε επίπεδο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και, από κοινού με τα προϋπάρχοντα συστήματα DSCADA, τα οποία εξυπηρετούν τα κατάντη τμήματα των δικτύων διανομής, εξασφαλίζουν, για πρώτη φορά, την επαρκή εποπτεία και τον έλεγχο των ΣΗΕ έως και τους τελικούς καταναλωτές.



Σχήμα 1.2: Οι τρεις άξονες ανάπτυξης των ευφύων δικτύων.

Έχοντας σκιαγραφήσει το ευρύτερο πλαίσιο των αλλαγών που υφίστανται τα ΣΗΕ, μπορεί κανείς με ασφάλεια να ισχυριστεί ότι το υποσύστημα των δικτύων διανομής περιλαμβάνει τις κυριότερες προκλήσεις για τη μετάβαση στην εποχή των ευφύων δικτύων. Η ριζική αλλαγή της λειτουργικής συμπεριφοράς τους από έναν παθητικό σε έναν ξεκάθαρα ενεργητικό ρόλο μέσω της διείσδυσης πηγών διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της ενεργού συμμετοχής των καταναλωτών στη διαχείριση ενέργειας, δημιούργησε πολλαπλές προκλήσεις ως προς τη χάραξη στρατηγικών για την προσαρμογή στα νέα δεδομένα των λεγόμενων ενεργών δικτύων διανομής (active distribution networks) [10]. Επιπλέον, η σταθερά αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, δεδομένης μιας κατάστασης κορεσμού ως προς τη δυνατότητα ανάπτυξης νέων κεντρικών μονάδων παραγωγής ενέργειας, πυροδοτεί την ανάπτυξη υποδομών και στρατηγικών για αποδοτικότερη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας στο επίπεδο της διανομής ηλεκτρισμού. Παράλληλα, εκκινώντας από το γεγονός ότι έχουν αποτελέσει διαχρονικά το πλέον δυσπρόσιτο τμήμα των ΣΗΕ ως προς το επίπεδο εποπτείας και ελέγχου τους, η αναβάθμιση των μετρητικών υποδομών – σε επίπεδο τόσο τερματικών μονάδων όσο και τηλεπικοινωνιών – για λόγους τιμολόγησης της κατανάλωσης, προσέφερε θεμελιώδη τεχνικά μέσα προς την κατεύθυνση του σχεδιασμού και της υλοποίησης των πρώτων ευφύων δικτύων. Όπως προαναφέρθηκε, οι υποδομές ΑΜΙ αποτελούν την 1^η γενιά μετρητικών συστημάτων τα οποία υποστηρίζουν την αμφίδρομη ροή πληροφοριών από και προς τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας και, αναμφίβολα, η υλοποίησή τους

σε ευρεία κλίμακα θα προσφέρει τις απαραίτητες υλικοτεχνικές πλατφόρμες για την ανάπτυξη των ευφυών δικτύων.

Σε μια προσπάθεια εμβάθυνσης σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση των ΣΗΕ, οι κυριότερες προκλήσεις που έχουν προκύψει στο πλαίσιο της μετεξέλιξής τους και δύνανται να αποτελέσουν πεδίο επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας σταχυολογούνται ως εξής:

- Η χρησιμοποίηση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας και διατάξεων πολλαπλών λειτουργιών στους διάφορους υποσταθμούς ενός ΣΗΕ εγείρει θέματα οικονομικότητας σχετικά με τη διαχείριση του εξοπλισμού. Για παράδειγμα, οι μονάδες PMU αποτελούν συσκευές αυξημένου κόστους, ενώ η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών συνεπάγεται την επένδυση υψηλών κεφαλαίων από τους διαχειριστές των δικτύων διανομής (distribution network operators) με μετακύλιση του κόστους στους καταναλωτές. Συνεπώς, η βελτιστοποίηση της ποσότητας και της κατανομής του εξοπλισμού είναι επιτακτική.
- Τα σημεία ενδιαφέροντος - σε κεντρικές μονάδες παραγωγής, υποσταθμούς, γραμμές μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστές, διεσπαρμένους παραγωγούς και καταναλωτές - με σκοπό την εποπτεία και την εκτέλεση τηλεχειρισμών σε πραγματικό χρόνο είναι εξαιρετικά πολυάριθμα με αποτέλεσμα οι τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις να βρίσκονται εκτός ορίων του τεχνολογικά εφικτού. Η βέλτιστη κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων επιτάσσει τόσο τον εντοπισμό των πλέον επίκαιρων σημείων του ΣΗΕ για την εγκατάσταση του τηλεπικοινωνιακού δικτύου όσο και τον καθορισμό της κατάλληλης δομής και τρόπου λειτουργίας του.
- Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των μονάδων μέτρησης και ελέγχου επιφέρει τη δημιουργία ενός τεράστιου όγκου δεδομένων τα οποία καλούνται να αποθηκεύσουν, να φιλτράρουν και να επεξεργαστούν και τα ΚΕΕ σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι και οι εφαρμογές των ΚΕΕ επιβαρύνονται σημαντικά και δημιουργείται η ανάγκη για αύξηση της χωρητικότητας των βάσεων δεδομένων. Η προσαρμογή των υπάρχοντων αλγορίθμων και υπάρχουσών εφαρμογών στην υπερεπάρχεια των δεδομένων, η διαμόρφωση αποτελεσματικών τεχνικών φιλτραρίσματος και νέων εργαλείων επεξεργασίας και μετα-ανάλυσης, και η αναδόμηση των μεθόδων αποθήκευσης πρόκειται να συντελέσουν στη μείωση του υπολογιστικού φόρτου των ΚΕΕ και να υποστηρίξουν την ταχύτητα στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την εκτέλεση αυτοματισμών.
- Μολονότι η μετάβαση προς τα ευφυή δίκτυα είναι η συνισταμένη όλων των αλλαγών που υφίστανται τα υπάρχοντα ΣΗΕ στο πλαίσιο του εκσυγχρονισμού τους, είναι αναπόφευκτο πως πρόκειται για μια διαδικασία πολλαπλών ταχυτήτων που συμβαδίζει με την οικονομική δυνατότητα και το τεχνολογικό επίπεδο κάθε χώρας. Στο πλαίσιο αυτής της διαδικασίας μετασχηματισμού, συναντώνται υβριδικές καταστάσεις με πολλά ΣΗΕ να αναβαθμίζονται σταδιακά, γεγονός που οδηγεί στην συνύπαρξη απαρχαιωμένων και εκσυγχρονισμένων τμημάτων εντός των κόλπων τους. Στον αντίποδα, εξακολουθούν να λειτουργούν ΣΗΕ με παραδοσιακά προβλήματα, όπως οι περιορισμένες δυνατότητες διείσδυσης παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ ή με ελλιπή εποπτεία των δικτύων διανομής, και οι προοπτικές αναβάθμισης τους διαφαίνονται φτωχές. Κατά συνέπεια, η επιστημονική έρευνα θα πρέπει να μην παύσει να μεριμνά για τμήματα ή ολόκληρα ΣΗΕ που υστερούν αναπτυξιακά.

1.2 Η Επίγνωση Κατάστασης στα ΣΗΕ

Την περίοδο που διανύουμε και περισσότερο από κάθε άλλη στο παρελθόν, είναι έντονη η αναγκαιότητα να μελετηθεί η λειτουργία και διαχείριση των ΣΗΕ υπό το πρίσμα των ΣΑΕ. Η επίτευξη κατανομημένης ευφυΐας, με την καταχρηστική έννοια του όρου που δόθηκε στην ενότητα 1.1, είναι η κυριότερη αιτία αυτής της αναγκαιότητας. Οι αυξανόμενες απαιτήσεις απομακρυσμένης εποπτείας και ελέγχου, που

καθυπαγορεύονται από τη διεσπαρμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξυπηρετούνται από τον σταδιακό εκσυγχρονισμό του εξοπλισμού ο οποίος αποτελείται από μονάδες αισθητήρων και επεξεργητών που υπόκεινται σε τηλεχειρισμό. Οι προηγμένες αυτές μονάδες, αν και, κατά κανόνα, δεν προβλέπεται να αυτενεργούν, θεωρούνται φορείς ευφυΐας [11].

Αντιμετωπίζοντας, λοιπόν, κάθε ΣΗΕ ως μια ενοποίηση επιμέρους υποσυστημάτων (π.χ. σύστημα μεταφοράς, δίκτυο διανομής, καταναλωτές), είναι θεμελιώδους σημασίας να κατανοηθεί ότι ένα ΣΗΕ δε μπορεί να λειτουργήσει σωστά, δηλαδή να ληφθούν οι σωστές αποφάσεις και να εκτελεστούν οι κατάλληλες ενέργειες ώστε η κατάσταση του να βρίσκεται εντός προκαθορισμένων ορίων, δεδομένων συγκεκριμένων ενδογενών και εξωγενών παραμέτρων, αν δεν εξασφαλίζεται σε επαρκή βαθμό η επίγνωση της κατάστασης του (situational awareness) κατά τη χρονική στιγμή της μελέτης του. Η κατάστασή του αποτιμάται με βάση τη μελέτη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του μεγεθών και ο βαθμός επάρκειάς της με αυστηρά μαθηματικά εργαλεία. Ως εκ τούτου, η έννοια της εποπτείας είναι άμεσα συνυφασμένη με την επίγνωση της κατάστασης ενός συστήματος.

Γενικά, η κατάσταση ενός ΣΗΕ μπορεί να καθοριστεί πλήρως σε μια δεδομένη χρονική στιγμή εάν είναι γνωστό το μοντέλο του συστήματος, δηλαδή η διάταξη όλων των κόμβων και των κλάδων που το αποτελούν και οι τιμές των σχετικών τους παραμέτρων, καθώς και οι φασιθέτες (phasors) τάσης σε κάθε κόμβο του. Σε αυτό το πλαίσιο, τρεις είναι οι πιθανές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να περιέλθει το ΣΗΕ σε σχέση με τα προκαθορισμένα όρια λειτουργίας του: η κανονική, η επείγουσα και η διορθωτική κατάσταση [12]. Όταν το ΣΗΕ λειτουργεί εντός ορίων, τότε βρίσκεται σε κανονική κατάσταση λειτουργίας. Αν, μάλιστα, καμία διαταραχή από μια λίστα ενδεχόμενων συμβάντων δε μπορεί να εκτρέψει το σύστημα εκτός κανονικής κατάστασης, η κατάστασή του χαρακτηρίζεται ως ασφαλής, ειδικότερα λέγεται επισφαλής. Σε περίπτωση ενός αναπάντεχου συμβάντος, η κατάσταση του ΣΗΕ μπορεί να τεθεί εκτός ορίων. Η κατάσταση αυτή χαρακτηρίζεται ως επείγουσα και χρήζει διορθωτικής δράσης. Τέλος, η κατάσταση που προκύπτει κατά την εφαρμογή των δράσεων αποκατάστασης έως ότου επιτευχθεί ξανά η κανονική λειτουργία, λέγεται διορθωτική κατάσταση.

Γενικά, μία υπολογιστική διαδικασία με στόχο την επίγνωση κατάστασης σε κατανεμημένα συστήματα εποπτείας και ελέγχου βασίζεται στις εξής τέσσερις αρχές [13]:

1. στην κωδικοποίηση των μετρητικών δεδομένων και πληροφοριών που έχουν συλλεχθεί σύμφωνα με τα στατικά και δυναμικά μοντέλα των χαρακτηριστικών μεγεθών της κατάστασης του συστήματος,
2. στην εισαγωγή της τυχαιότητας και τη χρησιμοποίηση της θεωρίας πιθανοτήτων στο πλαίσιο της διαδικασίας,
3. στη διαμόρφωση της διαδικασίας ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με την προϋπόθεση της διαθεσιμότητας πλεονασμού δεδομένων,
4. στη δυνατότητα αξιολόγησης των μετρητικών δεδομένων και προσαρμογής τους ανάλογα με την ποιότητα τους.

Σε αυτό το πλαίσιο, γίνεται αντιληπτό ότι η επίγνωση κατάστασης αναφορικά με τα ΣΗΕ είναι μια έννοια που συνδέεται άμεσα με τα ΚΕΕ, όπου γίνεται η συγκέντρωση, η επεξεργασία και η ανάλυση των μετρητικών δεδομένων που προέρχονται από τους κατανεμημένους αισθητήρες. Σημειώνεται ότι, στο πλαίσιο της συζήτησης σχετικά με τα ευφυή δίκτυα, έχει εισαχθεί και ο καινοφανής όρος της αυτεπίγνωσης, που χρησιμοποιείται ευρέως στα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και αποτελεί μια ιδιότητα των ευφύων συστημάτων.

Διαχρονικά, η γνώση της πραγματικής κατάστασης ενός ΣΗΕ, ή τμήματος αυτού, ήταν και είναι αδύνατη. Θεωρώντας, για παράδειγμα, ένα τμήμα του δικτύου διανομής που εξυπηρετείται από ένα τοπικό ΚΕΕ, η λειτουργία ενός καταναμημένου συστήματος μετρητικών μονάδων ώστε να είναι διαθέσιμα συγχρονισμένα μετρητικά δεδομένα στο ΚΕΕ προκειμένου να εξαχθεί η πραγματική του κατάσταση σε πραγματικό χρόνο, ήταν οικονομικά ασύμφορη και τεχνολογικά ανέφικτη. Σήμερα, μπορεί να υπάρχουν οι τεχνολογικές λύσεις για την ανάπτυξη τέτοιων υποδομών, ωστόσο μια σειρά από ενδογενείς παράγοντες, όπως τα σφάλματα και ο θόρυβος που αλλοιώνουν την ακρίβεια των δεδομένων κατά τη μέτρηση και τη μετάδοση τους, οι βλάβες των διαύλων τηλεπικοινωνίας και οι χρονικές καθυστερήσεις στη μετάδοση τους προς τα ΚΕΕ, αναδεικνύουν την εγγενή αδυναμία των τεχνικών μέσων. Παράλληλα, η τάση για ενοποιημένη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων ενός ΣΗΕ εντείνει ακόμη περισσότερο τις τεχνολογικές απαιτήσεις με στόχο την επίγνωση κατάστασης καθώς οι υποδομές εποπτείας διευρύνονται προκειμένου να καλύψουν περισσότερα σημεία ενδιαφέροντος και το χρονικό παράθυρο της λειτουργίας τους βγαίνει μειούμενο. Οι μονάδες μέτρησης και οι διαύλοι επικοινωνίας αυξάνονται μεν, οι ανάγκες για ακρίβεια ως προς τη μέτρηση, το συγχρονισμό και το χρόνο μετάδοσης των δεδομένων επιτείνονται, δε. Συνεπώς, διαμορφώνεται ένα γενικό πλαίσιο λειτουργίας που χαρακτηρίζεται από ελλιπή δεδομένα είτε ποσοτικά, σε καθαρά αριθμητικούς όρους, είτε ποιοτικά, σε σχέση με τις προδιαγραφές παραμέτρων όπως η ακρίβεια, ο συγχρονισμός, η χρονική καθυστέρηση κ.α.

1.3 Ο Ρόλος της Εκτίμησης Κατάστασης στην Εποπτεία των ΣΗΕ

Το 1970, οι Scheppe et al., έχοντας διαγνώσει την εγγενή αδυναμία των μετρητικών συστημάτων να συλλάβουν την πραγματική κατάσταση ενός ΣΗΕ, εισήγαγαν την εκτίμηση κατάστασης (state estimation) στη μελέτη των ΣΗΕ με απώτερο στόχο το βέλτιστο έλεγχο της λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο [14]. Το μαθηματικό μοντέλο που πρότειναν προέρχεται από τη θεωρία εκτίμησης, έναν κλάδο της στατιστικής με ευρεία εφαρμογή στη μελέτη των ΣΑΕ, και χρησιμοποιεί στοιχεία από τη θεωρία πιθανοτήτων. Το ζητούμενο της εκτίμησης κατάστασης είναι ο ορισμός της κατάστασης του συστήματος με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις από αυτό, με άλλα λόγια, η απόδοση τιμών στους φασιθέτες τάσης όλων των κόμβων του υπό μελέτη συστήματος, οι οποίοι αποτελούν, στη γενική περίπτωση, τις μεταβλητές κατάστασης του. Ο εκτιμητής κατάστασης (state estimator) έχει παγιωθεί ως η μοναδική υπολογιστική διαδικασία των ΚΕΕ που μπορεί να οδηγήσει στην – κατά το δυνατόν – πιστότερη αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης ενός δικτύου σε συνθήκες πραγματικού χρόνου.

Η χρησιμότητα της εκτίμησης κατάστασης συνηθίζεται να εξετάζεται σε αντιπαράβολή με αυτή της ανάλυσης ροών φορτίου (power flow analysis), η οποία αποτέλεσε το πρώτο υπολογιστικό εργαλείο, κατά τη δεκαετία του 1950, για την αποτύπωση της μόνιμης κατάστασης (steady state) ενός ΣΗΕ, που αντιστοιχεί σε ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας στο οποίο το ΣΗΕ παράγει, μεταφέρει και διανέμει τη ζητούμενη από την κατανάλωση στιγμιαία ισχύ [15]. Στο πλαίσιο της ανάλυσης ροών φορτίου, υπολογίζονται οι φασιθέτες τάσης όλων των κόμβων και οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος όλων των κλάδων του ΣΗΕ. Μολονότι η εκτίμηση κατάστασης και η ανάλυση ροών φορτίου βασίζονται υπολογιστικά στις τιμές των αυτών ηλεκτρικών μεγεθών, δηλαδή στην επίλυση των ίδιων μαθηματικών εξισώσεων, και αποδίδουν την κατάσταση του συστήματος χρησιμοποιώντας στατικά μοντέλα ανάλυσης, οι ποιοτικές διαφορές τους είναι πολύ σημαντικές. Γενικά, μέσω της ανάλυσης ροών φορτίου υπολογίζεται η λειτουργική κατάσταση του συστήματος για ένα στιγμιότυπο της μόνιμης κατάστασης που βασίζεται σε διαθέσιμες τιμές ηλεκτρικών μεγεθών [16], ενώ μέσω της εκτίμησης κατάστασης παρέχεται η πλέον πιθανή κατάσταση του συστήματος λαμβάνοντας τα διαθέσιμα δεδομένα ως μετρήσεις με τις αντίστοιχες ακρίβειές τους. Με άλλα λόγια, η εκτίμηση κατάστασης αποτελεί ένα υπολογιστικό εργαλείο

πραγματικού χρόνου για την επεξεργασία μετρήσεων, ενώ η ανάλυση ροών φορτίου είναι μια υπολογιστική διαδικασία η οποία είναι αδύνατο να λειτουργήσει αξιόπιστα σε συνθήκες πραγματικού χρόνου δεδομένου ότι ο εντοπισμός και το φιλτράρισμα των σφαλμάτων, τα οποία, ρεαλιστικά, φέρουν τα μετρητικά δεδομένα, είναι εκτός των δυνατοτήτων της.

Πιο αναλυτικά, εν αντιθέσει με την ανάλυση ροών φορτίου, οι διαθέσιμες τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών αντιμετωπίζονται ως μετρήσεις στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης, οπότε, συσχετίζονται με συγκεκριμένα σφάλματα και μοντελοποιούνται ως τυχαίες μεταβλητές με διασπορές που εξαρτώνται από αυτά. Άμεση συνέπεια αυτού του μοντέλου είναι ότι ο εκτιμητής κατάστασης λειτουργεί ως φίλτρο των διαθέσιμων «κακτέρωστων» δεδομένων, καθώς είναι σε θέση να αξιολογεί την ποιότητά τους, να ανιχνεύει ποια από αυτά ενέχουν μεγάλα σφάλματα και να μειώνει το θόρυβο που τα αλλοιώνει. Η ανάλυση ροών φορτίου δεν έχει καμία από τις παραπάνω δυνατότητες, καθώς η μοντελοποίησή της δεν υποστηρίζει την αξιολόγηση των τιμών εισόδου στη διαδικασία και δεν εμφανίζει προσαρμοστικότητα ως προς αυτές. Τέλος, η εκτίμηση κατάστασης αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης του οποίου η επίλυση βασίζεται στη μελέτη ενός υπερχαθορισμένου συστήματος εξισώσεων (overdetermined system of equations), δηλαδή έχει σχεδιαστεί με στόχο τη διαχείριση περίσσειας δεδομένων, ενώ η ανάλυση ροών φορτίου συνίσταται στην εύρεση της μοναδικής λύσης σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, οπότε, η περίσσεια δεδομένων δεν είναι επιθυμητή.

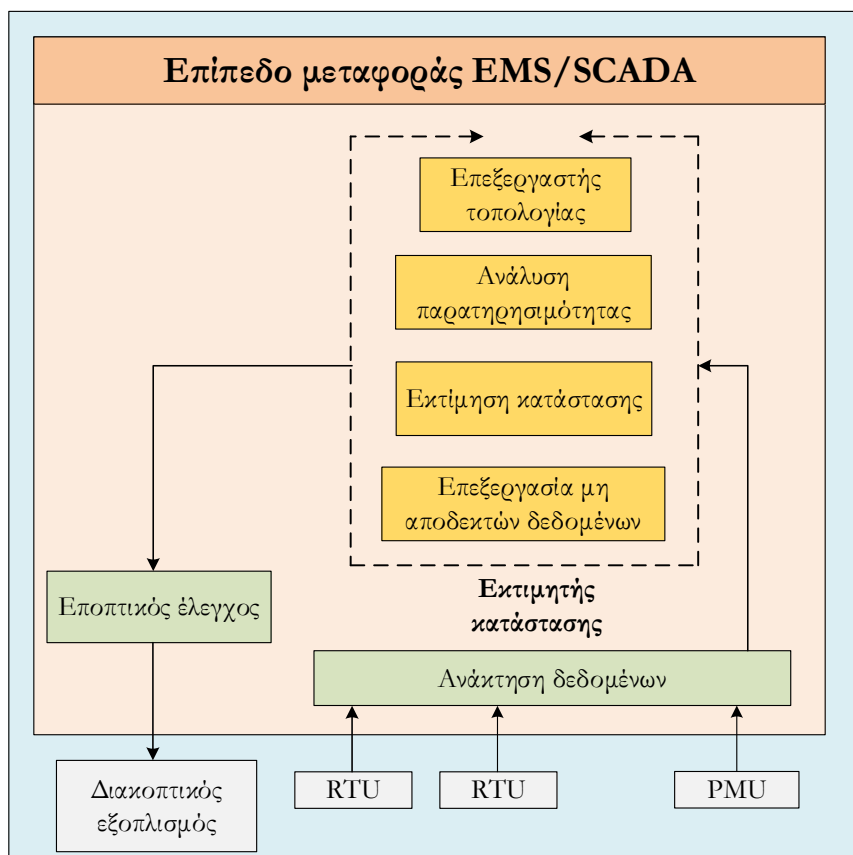
Ένας κλασικός εκτιμητής κατάστασης επιτελεί ένα σύνολο επιμέρους λειτουργιών με πυρήνα την εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Οι λειτουργίες αυτές διακρίνονται ανάλογα με την επεξεργασία ψηφιακών ή αναλογικών δεδομένων ως εξής [12], [17]:

1. Επεξεργαστής τοπολογίας, ο οποίος συγκεντρώνει και επεξεργάζεται τις πληροφορίες για την κατάσταση των διακοπτικών μέσω του συστήματος και, κατόπιν, εξάγει την τρέχουσα διαμόρφωση ή μοντέλο του συστήματος,
2. Ανάλυση παρατηρησιμότητας, κατά την οποία διαπιστώνεται αν είναι δυνατή ή όχι η επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης,
3. Εκτίμηση κατάστασης, κατά την οποία προσδιορίζεται η βέλτιστη δυνατή εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος,
4. Επεξεργασία μη αποδεκτών δεδομένων, κατά την οποία εντοπίζονται μετρητικά δεδομένα τα οποία ενέχουν μεγάλα σφάλματα και απορρίπτονται εφόσον δεν διαταράσσεται η περίσσεια των δεδομένων,
5. Επεξεργασία παραμέτρων και εντοπισμός δομικών σφαλμάτων, κατά την οποία εκτιμώνται παράμετροι του συστήματος και εντοπίζονται σφάλματα που αφορούν τη διαμόρφωση του συστήματος η οποία θεωρήθηκε αρχικά.

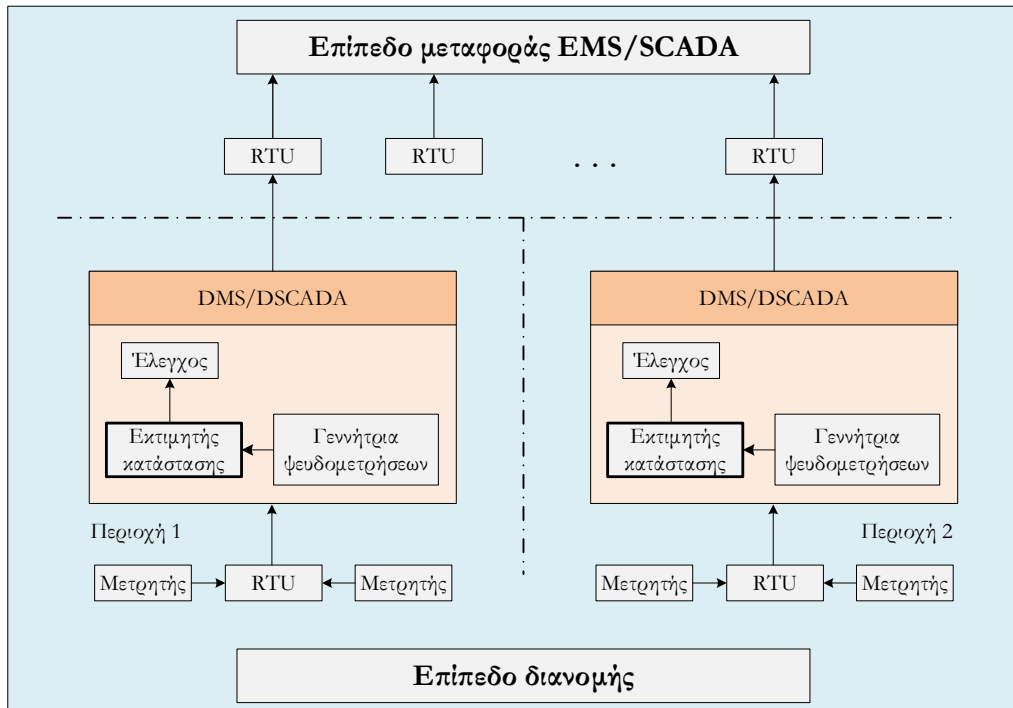
Οι εκτιμητές κατάστασης τέθηκαν σε λειτουργία στα ΚΕΕ ήδη από τη δεκαετία του 1970 με στόχο την ασφαλή λειτουργία των συστημάτων μεταφοράς με χρήση των μετρήσεων πραγματικού χρόνου που παραλαμβάνονταν από τις τερματικές μονάδες των συστημάτων SCADA [6]. Με την πάροδο των ετών, οι επιμέρους λειτουργίες εξελίχθηκαν ως προς τον υπολογιστικό τους πυρήνα και τους αλγόριθμους επίλυσης, ενώ προτάθηκαν και εναλλακτικές μέθοδοι για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης στο οποίο βασίζεται η λειτουργία της εκτίμησης κατάστασης. Διαχρονικά, τα κυριότερα προβλήματα που παρακώλυαν τη λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης ήταν η αδυναμία λήψης συγχρονισμένων μετρήσεων από τις κατανεμημένες τερματικές μονάδες και οι ελλιπείς μετρητικές υποδομές στα δίκτυα διανομής [18]. Απότοκο αυτών των ελλειμμάτων ήταν σε καθεστώς επαρκούς εποπτείας να βρίσκονται μόνο τα συστήματα μεταφοράς, με το θέμα του συγχρονισμού να αγνοείται χάρις στις αργά μεταβαλλόμενες συνθήκες των ΣΗΕ κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους. Τα δίκτυα διανομής

ήταν πρακτικά ανεπιτήρητα λόγω της έλλειψης μετρητικών δεδομένων η οποία καθιστούσε αδύνατη τη λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης. Η ανάγκη για την εποπτεία τους οδήγησε στη σταδιακή εισαγωγή ψευδομετρήσεων στο σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων ώστε να πληρούνται η συνθήκη επαρκούς περισσείας δεδομένων. Οι ψευδομετρήσεις αφορούν τιμές που δεν έχουν πραγματικά μετρηθεί, αλλά είναι προϊόντα πρόβλεψης ή επεξεργασίας ιστορικών δεδομένων [19].

Αναμφίβολα, η πρόοδος των μετρητικών υποδομών έχει συμβάλλει αποφασιστικά στη βελτίωση της λειτουργίας των εκτιμητών κατάστασης. Οι μονάδες PMU δρομολογούν την αναβάθμιση της απόδοσής τους καθώς προσφέρουν συγχρονισμένες μετρήσεις σε συνθήκες άμεσης λήψης επιπλέον των προϋπαρχουσών – μη συγχρονισμένων – συμβατικών μετρήσεων από τα συστήματα SCADA. Τα χρονικά παράθυρα λειτουργίας των εκτιμητών κατάστασης αναμένεται να μειωθούν σε τάξεις των λίγων δευτερολέπτων, ενώ η συμβολή τους στην εξασφάλιση της παρατηρησιμότητας και στη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης είναι σημαντική [20]. Επιπλέον, η εγκατάσταση μονάδων RTU σε κείρια σημεία των δικτύων διανομής και η σημαντική εξάπλωση των συστημάτων AMR, κατά την τελευταία εικοσαετία, επέτρεψε τη βελτίωση της ποιότητας των χρησιμοποιούμενων ψευδομετρήσεων, υπό τη μορφή των εκτιμήσεων της κατανάλωσης ενεργού και αέργου ισχύος σε κόμβους φορτίου του συστήματος [19]. Τέλος, η υλοποίηση υποδομών AMI και η εγκατάσταση μονάδων IED στα δίκτυα διανομής αναμένεται να αυξήσει τη διαθεσιμότητα των πραγματικών μετρήσεων που θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο ή με καθυστερήσεις λίγων λεπτών από τα κατά τόπους ΚΕΕ [21]. Στα Σχήματα 1.3 και 1.4 απεικονίζονται τα δομικά διαγράμματα των εκτιμητών κατάστασης στα συστήματα μεταφοράς και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα.



Σχήμα 1.3: Διάγραμμα λειτουργίας ενός σύγχρονου εκτιμητή κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [21].



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας κατακεντρωμένων εκτιμητών κατάστασης σε δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [21].

1.4 Αντικείμενο και Συνεισφορές της Διατριβής

Η διαθεσιμότητα και η ποιότητα των μετρητικών δεδομένων στο πλαίσιο της αναβάθμισης των σύγχρονων ΣΗΕ, με προέλευση είτε τα μετρητικά συστήματα σε καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ (συστήματα AMR και AMI) είτε τις κατακεντρωμένες μετρητικές μονάδες για την εποπτεία του συστήματος μεταφοράς (μονάδες RTU, IED και PMU), έχουν βελτιωθεί αλματωδώς [22]. Ως εκ τούτου, οι εκτιμητές κατάστασης, επιπλέον της επιτυχημένης εφαρμογής τους στα συστήματα μεταφοράς, αναδεικνύονται ως τα πλέον κατάλληλα εργαλεία για τη διαχείριση των ετερογενών μετρητικών δεδομένων τα οποία έχουν γίνει διαθέσιμα στα δίκτυα διανομής [23]. Παράλληλα, όπως επισημάνθηκε στην ενότητα 1.1, εξακολουθούν να λειτουργούν δίκτυα διανομής με ελλιπείς μετρητικές υποδομές με αποτέλεσμα η υλοποίηση εκτιμητών κατάστασης για την εποπτεία τους να συνιστά πεδίο ερευνητικού ενδιαφέροντος.

Συνοψίζοντας, τα σύνολα των μετρητικών δεδομένων που διατίθενται στους εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ χαρακτηρίζονται από ανομοιογένεια αναφορικά με την ακρίβεια, τη χρονική διαθεσιμότητα και τον συγχρονισμό τους. Επιπλέον, πέραν από την έλλειψη μετρητικών δεδομένων που εξακολουθεί να μαστίζει τα δίκτυα διανομής, ως ανεπαρκής χαρακτηρίζεται και η διαθεσιμότητα μετρήσεων από μονάδες PMU για τα συστήματα μεταφοράς. Τα ανωτέρω, γενικά χαρακτηριστικά πλήττουν το πληροφοριακό περιεχόμενο που φέρει το εκάστοτε μετρητικό σύνολο στους εκτιμητές κατάστασης, με αποτέλεσμα τα αντίστοιχα μετρητικά δεδομένα να μπορούν να χαρακτηρισθούν ως ελλιπή, είτε ποσοτικά είτε ποιοτικά. Για παράδειγμα, μετρήσεις που είναι διαθέσιμες με χρονική καθυστέρηση στα ΚΕΕ αντιμετωπίζονται ως δεδομένα μειωμένης ακρίβειας, ενώ η διαθεσιμότητα συγχρονισμένων μετρήσεων από μονάδες PMU, κατά κανόνα, δεν επαρκεί προκειμένου να εξασφαλίζεται η παρατηρησιμότητα ενός ΣΗΕ, με αποτέλεσμα να καθίσταται αναγκαία η συνδυαστική χρήση μετρητικών δεδομένων από συστήματα SCADA. Κατά συνέπεια, η λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης ΣΗΕ με ελλιπή δεδομένα αποτελεί τον κανόνα, παρά την εξαίρεση, κατά τη σύγχρονη περίοδο μετάβασης στην εποχή των ευφών δικτύων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διατριβή πραγματεύεται το ζήτημα της βέλτιστης διαχείρισης μετρήσεων στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς και δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Με γνώμονα τα τέσσερα σημεία που συζητήθηκαν στο τέλος της ενότητας 1.1, αντικείμενο της έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδων και τεχνικών βέλτιστης διαχείρισης μετρήσεων, οι οποίες συνιστούν τα δεδομένα εισόδου στους εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ, με στόχο την ενίσχυση της παρατηρησιμότητας και της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κατάστασης. Με το γενικό όρο «βέλτιστη διαχείριση» αποκρυσταλλώνεται η συνολική συμβολή των προτεινόμενων μεθόδων και τεχνικών οι οποίες κινούνται σε δύο βασικούς άξονες. Πρώτος άξονας είναι η βέλτιστη επιλογή μετρήσεων από ένα δυνητικά διαθέσιμο μετρητικό σύνολο με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού για την επίτευξη παρατηρησιμότητας και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Οι προτεινόμενες μέθοδοι υποστηρίζουν το σχεδιασμό σύγχρονων μετρητικών υποδομών και την ενίσχυση υφιστάμενων μετρητικών συστημάτων μέσω της εγκατάστασης νέων μετρητικών μονάδων. Δεύτερος άξονας είναι η διαχείριση ψευδομετρήσεων με στόχο την αξιόπιστη λειτουργία εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Οι προτεινόμενες τεχνικές εισάγουν πλαίσια συνδυασμένης λειτουργίας διαφορετικών μεθόδων παραγωγής ψευδομετρήσεων φορτίου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης με κριτήριο τη διαθεσιμότητα πραγματικών μετρήσεων φορτίου, καθώς και τη χρήση ψευδομετρήσεων για τη λειτουργία του επεξεργαστή τοπολογίας.

Οι κύριες συνεισφορές του ερευνητικού έργου που παρουσιάζεται αφορούν τις λειτουργίες του επεξεργαστή τοπολογίας, της ανάλυσης παρατηρησιμότητας και της εκτίμησης κατάστασης. Οι προτεινόμενες προσεγγίσεις παρουσιάζουν χαρακτηριστικά πρωτοτυπίας ως προς τα μεθοδολογικά εργαλεία, τη μαθηματική διατύπωση, την υλοποίηση και τις δυνατότητές τους. Πιο συγκεκριμένα, το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων προσεγγίζεται με χρήση του μεθοδολογικού εργαλείου της πληροφορίας του Fisher, ενώ τα προτεινόμενα μαθηματικά μοντέλα διατυπώνονται ως προβλήματα κυρτού και ημιορισμένου προγραμματισμού με χρήση αυστηρά δυαδικών μεταβλητών απόφασης. Επιπλέον, είναι δυνατό να αποδοθούν λύσεις που επιτυγχάνουν ταυτόχρονα τα κριτήρια της παρατηρησιμότητας και της μεγιστοποίησης της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης, μία δυνατότητα που μπορεί να χαρακτηριστεί καινοτόμος σε σύγκριση με τις προϋπάρχουσες σχετικές εργασίες. Όσον αφορά τις προτεινόμενες τεχνικές για τη λειτουργία εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής, λαμβάνουν το χαρακτηριστικό εφαρμοσμένης έρευνας δεδομένου ότι υποστηρίζουν συνδυαστικές υλοποιήσεις προϋπαρχουσών μεθόδων παραγωγής ψευδομετρήσεων με τη λειτουργία της εκτίμησης κατάστασης. Ακόμη, περιλαμβάνονται στοιχεία καινοτομίας καθώς, μεταξύ άλλων, προτείνεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης φορτίου, επεξεργασίας τοπολογίας και εκτίμησης κατάστασης, στοχευμένο για τα ελληνικά δίκτυα διανομής. Η προσομοίωση της υλοποίησής του για ένα πραγματικό δίκτυο (τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου) και με βάση πραγματικά μετρητικά δεδομένα αποτελεί μία πρωτότυπη εφαρμογή, η οποία μπορεί να αποτελέσει παράδειγμα για μελλοντικές υλοποιήσεις εκτιμητών κατάστασης σε δίκτυα διανομής στην Ελλάδα. Εν κατακλείδι, αξίζει να σημειωθεί ότι προσφέρονται λύσεις που αφορούν τόσο παραδοσιακά προβλήματα των ΣΗΕ, π.χ. το πρόβλημα της επίτευξης παρατηρησιμότητας, όσο και θέματα που έχουν προκύψει στο πλαίσιο της αναβάθμισης των σύγχρονων ΣΗΕ, όπως π.χ. η διαχείριση των δεδομένων από έξυπνους μετρητές. Κοινός παρονομαστής σε όλα τα επιμέρους θέματα είναι το χαρακτηριστικό των ελλιπών δεδομένων, όπως σκιαγραφήθηκε στην αρχή της ενότητας.

1.5 Διάρθρωση της Διατριβής

Η διατριβή έχει οργανωθεί σε πέντε κεφάλαια, επιπλέον της εισαγωγής.

Πιο αναλυτικά, στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις λειτουργίες του επεξεργαστή τοπολογίας, της ανάλυσης παρατηρησιμότητας και της εκτίμησης κατάστασης. Αρχικά, καταγράφεται η εξέλιξη της εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ σχετικά με τη μαθηματική μοντελοποίηση και τη μεθοδολογία επίλυσής της. Στη συνέχεια, εξετάζεται η έννοια της παρατηρησιμότητας στα ΣΗΕ και περιγράφεται μία σχετική μέθοδος, στοιχεία της οποίας χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Τέλος, μελετάται συνοπτικά η βιβλιογραφία σχετικά με τον επεξεργαστή τοπολογίας και διατυπώνεται μία σχετική μεθοδολογία η οποία βασίζεται στη χρήση ψευδομετρήσεων για τη μελέτη των καταστάσεων των διακοπτικών μέσων.

Στο Κεφάλαιο 3, εξετάζεται λεπτομερώς το θέμα της διαχείρισης ψευδομετρήσεων στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Αρχικά, περιγράφονται οι έννοιες της εκτίμησης, επιμερισμού και πρόβλεψης φορτίου, και παρατίθεται η συναφής βιβλιογραφία. Σε αυτό το πλαίσιο, αναλύονται εκτενώς τρεις σχετικές μέθοδοι παραγωγής ψευδομετρήσεων και, κατόπιν, προτείνονται αντίστοιχες τεχνικές για τη συνδυασμένη λειτουργία κάθε μεθόδου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων εκτενών προσομοιώσεων των προτεινόμενων πλαισίων συνδυασμένης λειτουργίας σε δίκτυα διανομής από τη διεθνή βιβλιογραφία, με στόχο την ανάλυση της επίδοσης της εκτίμησης κατάστασης όταν λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου ψευδομετρήσεις. Συμπεριλαμβάνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του εκτιμητή κατάστασης ο οποίος αναπτύχθηκε στοχευμένα για εγχώρια δίκτυα διανομής, σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου. Στο πλαίσιο του ανωτέρω εκτιμητή κατάστασης, αξιοποιήθηκε η μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας με χρήση ψευδομετρήσεων.

Στο Κεφάλαιο 4, μελετάται το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε συστήματα μεταφοράς και δίκτυα διανομής με στόχο την ενίσχυση παρατηρησιμότητας και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης. Κατ' αρχάς, γίνεται διεξοδική βιβλιογραφική έρευνα αναφορικά με σχετικές, προϋπάρχουσες εργασίες, αναλύοντας σε βάθος τη μεθοδολογία, τη μαθηματική τους θεμελίωση και τον τύπο των μετρητικών μονάδων που αφορούν. Κατόπιν, αναπτύσσονται τρεις πρωτότυπες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων οι οποίες θεμελιώνονται στην πληροφορία του Fisher και βασίζονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης σύμφωνα με τις αρχές του κυρτού προγραμματισμού (convex programming) και μιας υποκατηγορίας του, του ημιορισμένου προγραμματισμού (semidefinite programming). Οι δύο μέθοδοι στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης σε δίκτυα διανομής, ενώ η τρίτη μέθοδος αφορά την επιλογή του ελάχιστου αριθμού μονάδων PMU για την επίτευξη παρατηρησιμότητας σε συστήματα μεταφοράς.

Στο Κεφάλαιο 5, οι προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων εφαρμόζονται σε πρότυπα συστήματα μεταφοράς του ινστιτούτου IEEE και σε περιπτώσεις δικτύων διανομής από τη διεθνή βιβλιογραφία. Αρχικά, περιγράφεται το γενικό πλαίσιο εφαρμογής των τριών μεθόδων, το οποίο βασίζεται στην ίδια υπολογιστική διαδικασία δεδομένου ότι έχουν κοινή μεθοδολογική βάση. Στη συνέχεια, γίνεται διεξοδική ανάλυση των σεναρίων εφαρμογής κάθε μεθόδου, στόχος των οποίων είναι αφενός η επαλήθευση της απόδοσης βέλτιστων λύσεων και αφετέρου η επίδραση των βέλτιστα επιλεγμένων μετρητικών μονάδων στην ποιότητα της εκτίμησης κατάστασης, και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, αναλύονται διεξοδικά τα συμπεράσματα του ερευνητικού έργου και, ακολούθως, επιχειρείται η εμβάθυνση στη συμβολή της εκπονηθείσας διατριβής. Στο πλαίσιο αυτό, οι προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων συγκρίνονται με προϋπάρχουσες σχετικές εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΕΚΤΙΜΗΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι εκτιμητές κατάστασης επιτελούν έργο μεσάζοντα στη λειτουργία των ΚΕΕ καθώς αποτελούν την πύλη εισόδου για το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων του υπό μελέτη συστήματος/δίκτυου, ενώ στην έξοδο τους παρέχεται η εκτιμηθείσα κατάσταση του [24]. Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική παρουσίαση της εξέλιξης της εκτίμησης κατάστασης, του επεξεργαστή τοπολογίας και της ανάλυσης παρατηρησιμότητας, ενώ επισημαίνονται οι διαφορές που χαρακτηρίζουν την εφαρμογή τους στα συστήματα μεταφοράς σε σύγκριση με τα δίκτυα διανομής. Κατόπιν, παρουσιάζεται η εξέλιξη του μαθηματικού μοντέλου της εκτίμησης κατάστασης, με έμφαση στη μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (μέθοδος WLS). Επιπλέον, δίνεται το απαραίτητο υπόβαθρο για την κατανόηση της έννοιας της παρατηρησιμότητας και περιγράφεται μία σχετική μέθοδος από τη διεθνή βιβλιογραφία. Τέλος, παρουσιάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο για την επεξεργασία της τοπολογίας σε δίκτυα διανομής σύμφωνα με τις αρχές της γενικευμένης εκτίμησης κατάστασης (generalized state estimation).

2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1.1 Η εκτίμηση κατάστασης και ο επεξεργαστής τοπολογίας στα ΣΗΕ

Ο εκτιμητής κατάστασης έχει αποτελέσει αναπόσπαστη υπολογιστική και λειτουργική μονάδα των ΚΕΕ κατόπιν της εισαγωγής των ψηφιακών υπολογιστών με στόχο την ανάπτυξη των συστημάτων EMS στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Οι πρώτες προτάσεις για την εποπτεία των συστημάτων μεταφοράς με χρήση της θεωρίας εκτίμησης είχαν κάνει, ήδη, την εμφάνισή τους στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Από το 1970 και για τουλάχιστον τέσσερις δεκαετίες, το στατικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης, το οποίο είχε προταθεί από τους Schweppe et al. [14], αποτέλεσε το κύριο πεδίο μελέτης για την εκτίμηση κατάστασης στα συστήματα μεταφοράς, ενώ αποτέλεσε και τη βάση για την ανάπτυξή της στα δίκτυα διανομής κατά τη δεκαετία του 1990. Στο πλαίσιο του στατικού μοντέλου, το οποίο πρωτοδιατυπώθηκε το 1968 [25], εξαιρείται η παράμετρος του χρόνου από τη μελέτη της κατάστασης του συστήματος και, ουσιαστικά, η εκτίμηση αφορά σύνολα μετρήσεων σε μορφή στιγμιοτύπων (snapshots), εξαιτίας της έλλειψης συγχρονισμού και καθυστερήσεων στη μετάδοσή τους. Παράλληλα, δίνεται και μια συνοπτική περιγραφή ενός αντίστοιχου δυναμικού μοντέλου. Τέλος, η οργάνωση του στατικού μοντέλου ως προβλήματος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο WLS [26] αναδείχθηκε ως η πλέον δημοφιλής τεχνική για τη μελέτη της εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ.

Σημαντική συνεισφορά στην εξέλιξη του στατικού μοντέλου WLS αποτέλεσαν οι ερευνητικές εργασίες με επικεφαλής τον Monticelli σχετικά με την ανάπτυξη της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου (fast decoupled method) για την επίλυση του προβλήματος [27] και τη διατύπωση της γενικευμένης εκτίμησης κατάστασης, η οποία αντιμετωπίζει τις αναλογικές μετρήσεις, τις καταστάσεις των διακοπών και τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών ως ένα ενιαίο σύνολο αλληλεπιδρώντων μετρητικών δεδομένων [28]. Στο πλαίσιο της γενικευμένης εκτίμησης κατάστασης [17], [29], ενοποιήθηκε η επεξεργασία ψηφιακών και αναλογικών μετρητικών δεδομένων και, ουσιαστικά, ενσωματώθηκε η επεξεργασία της τοπολογίας με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται ο εντοπισμός μη αποδεκτών δεδομένων. Η

μεθοδολογία θεμελιώθηκε στη μοντελοποίηση τμημάτων του συστήματος/δικτύου σε επίπεδο φυσικής ζεύξης, δηλαδή αναφορικά με άγνωστες τιμές σύνθετων αντιστάσεων γραμμών ή καταστάσεις διακοπών οι οποίες θεωρούνται ως επιπλέον μεταβλητές κατάστασης.

Οι συγκριτικές μελέτες με επικεφαλής τον Wu σχετικά με την αριθμητική σταθερότητα (numerical stability), την υπολογιστική απόδοση (computational efficiency) και την πολυπλοκότητα υλοποίησης (implementation complexity) των μεθόδων επίλυσης του στατικού μοντέλου WLS, οι οποίες είχαν προταθεί κατά καιρούς, συνέβαλαν στην αντιμετώπιση του προβλήματος των μητρών κακής κατάστασης (ill-conditioned matrices) που προκύπτουν κατά την επίλυση του μοντέλου [30], [31]. Οι μητρες αυτές εμφανίζουν ιδιοτιμές με σχεδόν μηδενική τιμή, συνεπώς, η επίλυση του συστήματος εξισώσεων του μοντέλου καθίσταται δυσχερής. Οι μελέτες συμπεριέλαβαν τη μέθοδο των κανονικών εξισώσεων (normal equations), τη μέθοδο ορθογωνικής παραγοντοποίησης (orthogonal factorization), την υβριδική μέθοδο (hybrid method), τη χρήση περιορισμών ισότητας κατά την επίλυση των κανονικών εξισώσεων (normal equations with equality constraints) και τη μέθοδο της επαυξημένης μήτρας Hachtel (Hachtel's augmented matrix). Σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την επίλυση του στατικού μοντέλου WLS αποτελούν οι εικονικές μετρήσεις που αφορούν τους κόμβους με μηδενική έγχυση ισχύος (zero injection nodes) και οι μετρήσεις ρεύματος. Ο συνδυασμός των μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων με υψηλές τιμές αντίστοιχων συντελεστών στάθμισης αποτελούν μία από τις κυριότερες αιτίες εμφάνισης μητρών κακής κατάστασης. Η μοντελοποίηση των εικονικών αυτών μετρήσεων ως περιορισμών ισότητας κατά την επίλυση του μοντέλου [32] συνετέλεσαν στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος. Επίσης, η εισαγωγή μετρήσεων μέτρου ρεύματος, με κυριότερα παραδείγματα τις εργασίες [33], [34], αποτελεί αξιοσημείωτη συνεισφορά στην εξέλιξη του στατικού μοντέλου WLS, καθώς χρήζουν ειδικής μεταχείρισης σε σχέση με τις υπόλοιπες μετρήσεις. Τέλος, η ενσωμάτωση περιορισμών με ανισότητες στο μοντέλο [35] συνέβαλε στη συμμόρφωση με υφιστάμενους περιορισμούς λειτουργίας του συστήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των εκτιμητών κατάστασης είναι η ευρωστία (robustness) αναφορικά με σύνολα μετρήσεων οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις ως προς τις επιμέρους ακρίβειές τους, και περιπτώσεις αποκλινοσών τιμών (outliers) οι οποίες εμπεριέχουν μη αποδεκτά σφάλματα. Η εκτίμηση κατάστασης WLS – όπως θα αναφέρεται από εδώ και στο εξής – έχει εγγενή αδυναμία ως προς τη διαχείριση τέτοιου είδους δεδομένων (μη αποδεκτά δεδομένα – bad data) [17], με αποτέλεσμα να έχουν προταθεί αρκετές παραλλαγές για τη μέθοδο επίλυσής του υπό τέτοιες συνθήκες [36], [37]. Με γνώμονα την εξασφάλιση ευρωστίας, έχουν αναπτυχθεί αρκετές εναλλακτικές μοντελοποιήσεις του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης, με κυριότερες την εκτίμηση ελάχιστης απόλυτης τιμής (least absolute value estimation), τους μη τετραγωνικούς εκτιμητές (nonquadratic estimators) και την εκτίμηση ελαχίστου διάμεσου τετραγώνων (least median of squares estimator), που αξιολογούνται απολογιστικά στην εργασία [17]. Συνδυαστικά με οποιαδήποτε μέθοδο εκτίμησης κατάστασης [17], μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στατιστική μέθοδος των προβολών (projection statistics) η οποία προτάθηκε ως μέσο υποστήριξης της ευρωστίας εκτιμητών κατάστασης στα ΣΗΕ μέσω της ταυτοποίησης των σημείων υψηλής επίδρασης (leverage points) σε ένα μετρητικό σύνολο, δηλαδή των σημείων τα οποία στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων αντιστοιχούν σε αποκλίνουσες τιμές μετρήσεων [38]. Σημείο αναφοράς σχετικά με τη ευρωστία των εκτιμητών κατάστασης αποτελούν οι μελέτες του Huber [39] που συστηματοποίησαν τη γενικευμένη εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation) με στόχο την ελαχιστοποίηση της γενικής συνάρτησης Huber. Ο αντίστοιχος γενικευμένος εκτιμητής (Huber M-estimator) συνεισέφερε στην εφαρμογή γενικευμένων μοντέλων εκτιμητών στα ΣΗΕ [12], [38], [40]–[42].

Παράλληλα με την ανάπτυξη του στατικού μοντέλου WLS, σε μικρότερο βαθμό μελετήθηκαν και δυναμικά μοντέλα εκτίμησης κατάστασης, με το μοντέλο των Debs και Larson να θέτει τις θεμελιώδεις αρχές των δυναμικών μοντέλων [43]. Οι μελέτες μπορούν να διακριθούν ανάλογα με αν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή της κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος τις διακριτές χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ανανεώνεται το σύνολο των μετρητικών δεδομένων (τμηματικά ή εξολοκλήρου), οπότε γίνεται λόγος για πρόβλεψη κατάστασης (state forecasting), ή όχι, οπότε αναφέρεται ο όρος παρακολούθηση κατάστασης (state tracking) [44]. Κεντρική ιδέα είναι η χρήση προβλέψεων μετρήσεων και μεταβλητών κατάστασης ώστε με αναδρομικό τρόπο να προβλέπεται η κατάσταση του συστήματος ή να αναπληρώνονται μετρήσεις οι τιμές των οποίων δεν έχουν ανανεωθεί, σε ένα ενιαίο πλαίσιο που αναφέρεται ως εκτίμηση κατάστασης ενισχυόμενη από πρόβλεψη (forecasting aided state estimation). Η πρόβλεψη κατάστασης αποτύπωσε τη δυναμική συμπεριφορά των συστημάτων μέσω κατάλληλων μοντέλων μετάβασης κατάστασης και χρήσης φίλτρων Kalman (Kalman filtering) [45], [46] χωρίς, όμως, να θεωρείται ξεκάθαρα δυναμική μοντελοποίηση καθώς οι θεωρούμενες χρονικές μεταβάσεις είναι πιο αργές σε σχέση με τις πραγματικές μεταβατικές συνθήκες ενός ΣΗΕ. Παραδείγματα ξεκάθαρων δυναμικών μοντέλων αποτελούν οι εργασίες [47]–[49] που βασίστηκαν στη μεθοδολογία των φίλτρων Kalman. Οι απολογιστικές μελέτες [50] και [51] αποτελούν σημεία αναφοράς σχετικά με την εξέλιξη των δυναμικών μοντέλων και της πρόβλεψης κατάστασης, αντίστοιχα.

Αναφορικά με τον επεξεργαστή τοπολογίας, οι βασικές αρχές για την εξαγωγή του μοντέλου του συστήματος σε πραγματικό χρόνο μελετήθηκαν συγκεντρωτικά από τους Bose και Clements στην εργασία [52], όπου συστηματοποιήθηκε η παρακολούθηση τοπολογίας (topology tracking) βάσει τηλεμετρούμενων καταστάσεων διακοπών και του υφιστάμενου μοντέλου του συστήματος (διάταξη κόμβων, κλάδων και διακοπών). Έχουν προταθεί πολλές μέθοδοι για την ανίχνευση σφαλμάτων στο πλαίσιο αυτοτελούς επεξεργασίας τοπολογίας πριν από την εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης [53]–[55]. Επίσης, προσπάθειες να μοντελοποιηθεί η επεξεργασία της τοπολογίας σύμφωνα με τη μέθοδο WLS είχαν ξεκινήσει πριν από τη θεμελίωση της γενικευμένης εκτίμησης κατάστασης [56], [57]. Σε συνέχεια των μελετών του Monticelli, έχουν προταθεί μεθοδολογίες που υποστηρίζουν την συνεκτίμηση της τοπολογίας και της κατάστασης του συστήματος με χρήση των εκτιμητών WLS [58] και LAV [59].

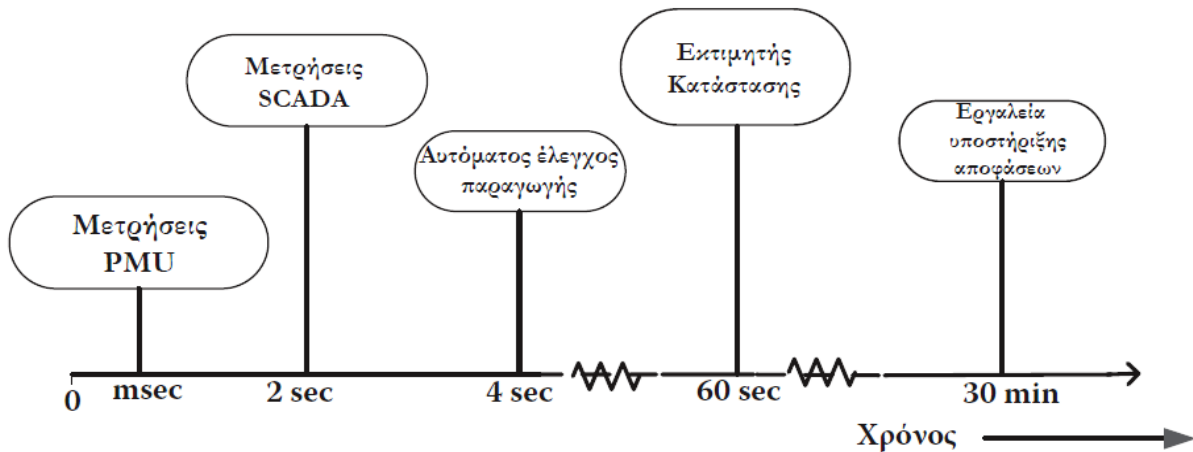
2.1.2 Οι τρεις άξονες της εξέλιξης των εκτιμητών κατάστασης στα σύγχρονα ΣΗΕ

Με βάση την τρέχουσα κατάσταση στα ΣΗΕ και τις αλλαγές που υφίστανται, όπως αυτές σκιαγραφήθηκαν στην ενότητα 1.1, οι κινητήριες μοχλοί της εξέλιξης των εκτιμητών κατάστασης άπτονται στην ανάπτυξη ιεραρχικών εκτιμητών κατάστασης με στόχο τον επιμερισμό του υπολογιστικού φόρτου που συνεπάγεται η εποπτεία ευρείων περιοχών των ΣΗΕ, στη βέλτιστη ένταξη των μονάδων PMU στο πλαίσιο λειτουργίας των εκτιμητών κατάστασης δεδομένου ότι έρχονται να συγχωνευτούν σε μετρητικές υποδομές όπου μεγάλο μερίδιο κατέχουν τα συστήματα SCADA, και στον αναβαθμισμένο ρόλο της εκτίμησης κατάστασης στα δίκτυα διανομής (distribution system state estimation) με την ευκαιρία της εξέλιξης των μετρητικών υποδομών που τα εξυπηρετούν και της ανάπτυξης των συστημάτων DMS.

Οι ιεραρχικοί εκτιμητές κατάστασης αποτελούν μια ιδέα που ανάγεται στα τέλη της δεκαετίας του 1970 οπότε προτάθηκε μια διεπίπεδη δομή εκτιμητή κατάστασης με τις επιμέρους εκτιμήσεις των υποσυστημάτων να χρησιμοποιούνται, σε δεύτερο επίπεδο, από ένα καθολικό εκτιμητή της κατάστασης του ΣΗΕ (global state estimator) [60]. Σύμφωνα με την ταξινόμηση των Gómez-Expósito et al. [61], όλες οι μέθοδοι που βασίζονται στην αποσύνθεση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης ενός

ΣΗΕ σε επιμέρους υποπεριοχές του ανήκουν στην εκτίμηση κατάστασης πολλαπλών περιοχών (multi-area state estimation). Η ανάγκη για την εξαγωγή μιας καθολικής εκτίμησης με βάση τις τοπικές εκτιμήσεις οδήγησε την έρευνα στην ανάπτυξη μεθόδων ιεραρχικού τύπου, με γεωγραφικά κατανομημένη (distributed) ή παράλληλη (parallel) επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων από κάθε υποπεριοχή [62]–[64]. Σχετικά με την πλήρως αποκεντρωμένη (decentralized) λειτουργία του εκτιμητή κατάστασης, όπου δεν υπάρχει καθολικός εκτιμητής και οι τοπικοί εκτιμητές αλληλεπιδρούν μόνο σε επίπεδο γειτνίασης, έχουν δημοσιευτεί σχετικές μελέτες με προτεινόμενα μοντέλα που υποστηρίζουν την εξαγωγή καθολικής εκτίμησης [65], [66]. Τέλος, ένα πρότυπο λειτουργίας πολυεπίπεδης εκτίμησης κατάστασης στο πλαίσιο της ανάπτυξης των ευφρών δικτύων, που φτάνει έως τους υποσταθμούς διανομής των ΣΗΕ, δίνεται στη μελέτη [23].

Ο δεύτερος άξονας, που ουσιαστικά αναβαθμίζει την απόδοση των εκτιμητών κατάστασης, είναι η ανάπτυξη υποδομών με μονάδες PMU στα συστήματα μεταφοράς. Πρόκειται για μονάδες με δυνατότητες μέτρησης του φασιθέτη τάσης του κόμβου στον οποίο εγκαθίστανται αλλά και των φασιθετών ρεύματος στους κλάδους που πρόσκεινται στον κόμβο. Οι μονάδες PMU παρέχουν μετρήσεις με χρονοσφραγίδα (time-stamped) καθώς υπόκεινται σε συγχρονισμό σύμφωνα με το σύστημα παγκόσμιας στιγματοθέτησης (σύστημα GPS), ενώ ο ρυθμός δειγματοληψίας για τη λήψη μέτρησης είναι ταχύτερος σε σχέση με τις μετρητικές μονάδες του συστήματος SCADA. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται η δραστική αλλαγή που επέρχεται στο χρονικό πλαίσιο λειτουργίας των συστημάτων EMS μέσω της εισαγωγής των μονάδων PMU. Οι μελέτες των Phadke et al. αποτέλεσαν ορόσημο για τη θεμελίωση της χρήσης μετρήσεων φασιθετών [67], [68] και, ακολούθως, των μονάδων μέτρησης φασιθετών [69], [70] με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των εκτιμητών κατάστασης στα ΣΗΕ.



Σχήμα 2.1: Τα χρονικά παράθυρα ανάκτησης μετρητικών δεδομένων, επεξεργασίας και ελέγχου στα συστήματα EMS [24].

Κύρια ζητήματα που εγείρονται κατά την χρήση μετρήσεων των μονάδων PMU από τους εκτιμητές κατάστασης είναι η αντιμετώπιση των μετρήσεων γωνίας τάσης (voltage phase angle) και ο βέλτιστος συνδυασμός τους με τις προϋπάρχουσες, συμβατικές μετρήσεις SCADA, καθώς οι μετρήσεις φασιθετών μοντελοποιούνται γραμμικά σε καρτεσιανή μορφή ως προς τις μεταβλητές κατάστασης εν αντιθέσει με τις συμβατικές μετρήσεις [71]. Λύσεις σε σχετικά προβλήματα προτείνονται στις μελέτες [72], όπου η εκτίμηση κατάστασης διεξάγεται χωρίς τη χρήση πραγματικού ή εικονικού ζυγού ταλάντωσης, στις εργασίες [71], [73], όπου προτείνονται εκτιμητές κατάστασης δύο βημάτων σε καρτεσιανή μορφή, οι οποίοι βελτιώνουν την εκτίμηση του πρώτου βήματος μέσω της χρήσης μετρήσεων από μονάδες PMU

κατά το δεύτερο βήμα, και στην εργασία [74], όπου η εκτίμηση κατάστασης διεξάγεται σε ένα στάδιο με χρήση καρτεσιανών και πολικών συντεταγμένων, εναλλάξ.

Η εισαγωγή μετρήσεων από μονάδες PMU στην εκτίμηση κατάστασης WLS αποτελεί την πιο διαδεδομένη υλοποίηση που συναντάται στη βιβλιογραφία [71], [73], [74]. Επιπλέον, μια μεθοδολογία συνδυασμού συμβατικών μετρήσεων και συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών στο πλαίσιο ενός υβριδικού μοντέλου εκτίμησης κατάστασης WLS προτείνεται στην εργασία [75], ενώ μια μέθοδος ποσοτικοποίησης της αβεβαιότητας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης WLS περιγράφεται στην εργασία [76].

Αναφορικά με την εκτίμηση κατάστασης πολλαπλών περιοχών, οι δυνατότητες των μονάδων PMU διευκολύνουν την υλοποίηση εκτιμητών κατάστασης με στόχο την κάλυψη ευρειών περιοχών σε πραγματικό χρόνο. Ένας ιεραρχικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης που παρέχει μια καθολική εκτίμηση για όλο το σύστημα με βάση τις τοπικές εκτιμήσεις των επιμέρους υποπεριοχών, τις συνοριακές μετρήσεις αυτών και περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών, προτείνεται στην εργασία [77]. Ένας κατανομημένος, ιεραρχικός εκτιμητής κατάστασης, που χρησιμοποιεί μετρήσεις από μονάδες PMU και καθορίζει το ζυγό αναφοράς ανά υποπεριοχή ώστε να φτάσει σε καθολική εκτίμηση, παρουσιάζεται στην εργασία [78]. Τέλος, ο εκτιμητής κατάστασης πολλαπλών περιοχών που περιγράφεται στη μελέτη [79] συνδυάζει γραμμική και μη-γραμμική εκτίμηση κατάστασης αναλόγως αν επαρκούν ή όχι οι μετρήσεις από μονάδες PMU για να είναι παρατηρήσιμη η αντίστοιχη υποπεριοχή, και εμφανίζει πλεονεκτήματα ως προς τον εντοπισμό τοπολογικών σφαλμάτων.

2.1.3 Η εκτίμηση κατάστασης και ο επεξεργαστής τοπολογίας στα δίκτυα διανομής

Ο τρίτος άξονας της εξέλιξης των εκτιμητών κατάστασης αφορά την αναβάθμιση του ρόλου τους στα δίκτυα διανομής. Διαχρονικά, η εποπτεία των δικτύων διανομής δεν ήταν αναγκαία συνθήκη για τη λειτουργία τους δεδομένου του παθητικού χαρακτήρα τους. Έτσι, η ανάγκη για την ανάπτυξη μετρητικών υποδομών σε αυτά δεν δημιουργήθηκε με γνώμονα την παρατηρησιμότητα και τη δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασής τους, αλλά για λόγους μέτρησης και τιμολόγησης της κατανάλωσης. Παρ' όλα αυτά, κατά την τελευταία δεκαετία, η χρονική σύμπτωση της σταδιακής μετατροπής των δικτύων διανομής σε ενεργά δίκτυα και της επέκτασης των μετρητικών υποδομών, που τα εξυπηρετούν, δρα ως καταλύτης για την παγίωση της χρήσης των εκτιμητών κατάστασης προκειμένου να επιτυγχάνεται έγκαιρη και αξιόπιστη εποπτεία της κατάστασης των δικτύων διανομής από τα συστήματα DMS [80]. Η δυναμική συμπεριφορά των ενεργών δικτύων επιβάλλει την ανάπτυξη εποπτικών και διαγνωστικών εργαλείων και οι αναπτυσσόμενες υποδομές τη διευκολύνουν μέσω της παροχής ποιοτικών μετρητικών δεδομένων.

Γενικά, η εφαρμογή της εκτίμησης κατάστασης στα δίκτυα διανομής εμφανίζει ιδιαιτερότητες που δε συναντώνται στα συστήματα μεταφοράς. Έχει γίνει, ήδη, λόγος για την αρνητική επίδραση των μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων στην επίλυση του προβλήματος στα ΣΗΕ. Ωστόσο, στα δίκτυα διανομής συναντώνται περαιτέρω προβλήματα. Κατ' αρχάς, η μοντελοποίηση των δικτύων διανομής αποδίδει πολύ συχνά μήτρες κακής κατάστασης συνεπεία της ακτινικής – κατά κύριο λόγο – δομής τους και της μεγάλης έκτασης τους. Επιπλέον, οι γραμμές διανομής εμφανίζουν υψηλό λόγο ωμικής αντίστασης προς επαγωγική αντίδραση σε αντίθεση με τις γραμμές μεταφοράς. Ο συνδυασμός αυτών των δύο παραγόντων επιφέρει πρόσθετα προβλήματα σύγκλισης των αλγόριθμων επαναληπτικής επίλυσης των εξισώσεων ρών φορτίου, με αποτέλεσμα να είναι αναγκαία η προσαρμογή των εκτιμητών κατάστασης που προϋπήρχαν στα συστήματα μεταφοράς, στις ειδικές απαιτήσεις των δικτύων διανομής [81]. Παράλληλα, η εκτεταμένη χρήση ψευδομετρήσεων οξύνει την ετερογένεια του συνόλου των διαθέσιμων

μετρητικών δεδομένων ως προς την ακρίβειά τους επιδεινώνοντας την, ήδη, κακή κατάσταση των μητρών που δομούνται κατά την επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης. Τέλος, μεγάλο μερίδιο των περιορισμένων, διαθέσιμων μετρήσεων πραγματικού χρόνου αντιστοιχεί σε μέτρα ρεύματος γραμμών διανομής ή μετασχηματιστών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την προσαρμογή του μαθηματικού μοντέλου της εκτίμησης κατάστασης.

Πέραν του υπολογιστικού μέρους, η βασική διαφορά σε σχέση με τα συστήματα μεταφοράς έγκειται στην ασύμμετρη δομή και, επομένως, στην ανισομερή φόρτιση των φάσεων των γραμμών διανομής. Η μοντελοποίηση των συστημάτων μεταφοράς γίνεται με δεδομένη τη δομική συμμετρία και την ισομερή φόρτιση των φάσεων των γραμμών μεταφοράς. Έτσι, η εκτίμηση κατάστασης αφορά ένα φασική τάση ανά κόμβο του υπό μελέτη συστήματος. Η συνθήκη αυτή δεν ισχύει στα δίκτυα διανομής, άρα, η χρήση ισοδύναμου μονοφασικού μοντέλου, με την παραδοχή συμμετρικής φόρτισης, για το δίκτυο είναι αποδεκτή μόνο υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις που άπτονται της φύσης του προβλήματος που μελετάται.

Όσον αφορά το ζήτημα του ελλείμματος μετρήσεων, υπάρχουν τρεις πρακτικές για την αντιμετώπισή του, καθεμία από τις οποίες επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο την επίδοση των εκτιμητών κατάστασης. Πρακτικά, σε δίκτυα ακτινικής δομής με χαμηλή περίσσεια μετρητικών δεδομένων, η παρατηρησιμότητα, η οποία είναι προϋπόθεση για την επίλυση της εκτίμησης κατάστασης, εξασφαλίζεται μόνο εάν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος σε κάθε κόμβο. Η έγχυση ισχύος είναι το πλέον εύκολο μοντελοποιήσιμο είδος μέτρησης, συνεπώς, χρησιμοποιείται κατά κόρον ως ψευδομέτρηση. Σε πρώτο πλάνο, βρίσκεται η τεχνική του επιμερισμού φορτίου (load allocation) που βασίζεται στην ακτινική δομή των δικτύων διανομής προκειμένου να επιμερίσει μια μετρηθείσα ποσότητα φορτίου στα κατάντη τμήματα σε σχέση με το σημείο μέτρησης. Ένας ακριβής επιμερισμός των διαθέσιμων μετρήσεων ισχύος οδηγεί σε ποιοτική εκτίμηση κατάστασης. Η δεύτερη λύση είναι η χρήση μεθόδων εκτίμησης (πρόβλεψης) φορτίου, που λειτουργούν ανεξάρτητα από τον εκτιμητή κατάστασης και, ουσιαστικά, παρέχουν εκτιμήσεις (προγνώσεις) κατανάλωσης ισχύος ακόμη και χωρίς να διατίθενται σχετικές μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Σημαντικό πρόβλημα, ωστόσο, αποτελεί η στάθμιση των εκτιμήσεων φορτίου προτού εισαχθούν στη διαδικασία της εκτίμησης κατάστασης. Τέλος, χρησιμοποιείται και η λύση της χρήσης αποτελεσμάτων από την ανάλυση ροών φορτίου, τα οποία προσαρμόζονται με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ισχύος και, κατόπιν, εισάγονται στην εκτίμηση κατάστασης. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η απουσία βοηθητικών προγνωστικών εργαλείων ενέχει τον κίνδυνο αλλοίωσης της πραγματικής κατάστασης του δικτύου.

Επιπλέον των ανωτέρω, η μεγάλη έκταση και η ασυμμετρία που χαρακτηρίζει τα δίκτυα διανομής έχουν αποτελέσει τους κύριους λόγους για τη συχνή εκδήλωση σφαλμάτων με επακόλουθο τις αλλαγές στην κατάσταση των διακοπτικών μέσων του δικτύου. Επιπλέον, η λειτουργία των ενεργών δικτύων διανομής επιτάσσει τις συχνές τοπολογικές αλλαγές στο δίκτυο για λόγους διαχείρισης της διεσπαρμένης παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος, ενώ η ευμετάβλητη λειτουργία των μη κατανεμόμενων μονάδων ΑΠΕ αυξάνει τις πιθανότητες εκδήλωσης σφαλμάτων και δυσλειτουργιών. Σε αυτό το σύνθετο πλαίσιο, ο ρόλος του επεξεργαστή τοπολογίας αποκτά βαρύνουσα σημασία προκειμένου να μπορεί να αποτυπωθεί το πραγματικό μοντέλο του δικτύου και να εντοπιστούν ασυμβατότητες μεταξύ αναλογικών και ψηφιακών δεδομένων, απόρροια σφαλμένων ή μη συγχρονισμένων μετρήσεων.

Όπως προαναφέρθηκε, η εκτίμηση κατάστασης στα δίκτυα διανομής άρχισε να συγκεντρώνει το ενδιαφέρον της επιστημονικής έρευνας στα μέσα της δεκαετίας του 1990, οπότε και αναπτύσσονται οι πρώτες σχετικές μεθοδολογίες με χρήση είτε στοιχείων από την ανάλυση ροών φορτίου με βάση τις

όποιες διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις [82] είτε του στατικού μοντέλου WLS με βάση πραγματικές μετρήσεις μέτρου ρεύματος και ψευδομετρήσεις φορτίου σε τριφασικά μοντέλα δικτύων [83]–[85]. Παρ' όλα αυτά, έως σήμερα, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός εταιριών διαχείρισης ηλεκτρικών δικτύων έχει εφαρμόσει την εκτίμηση κατάστασης για την εποπτεία δικτύων διανομής σε πραγματικό χρόνο, αν και τα αποτελέσματα αυτών των προσπαθειών είναι ιδιαιτέρως ικανοποιητικά [86].

Ως προς την στατική μοντελοποίηση του προβλήματος, η εκτίμηση κατάστασης WLS αποτελεί την πλέον δημοφιλή επιλογή που συναντάται στην πράξη. Το σημαντικότερο στοιχείο διαφοροποίησης μεταξύ των επιμέρους μεθόδων είναι ο καθορισμός των μεταβλητών κατάστασης: μια σειρά μελετών βασίζεται στη θεώρηση των μέτρων και των γωνιών των τάσεων των κόμβων ως μεταβλητές κατάστασης σε πολική [83], [87], [88] ή καρτεσιανή μορφή [85], ενώ, σε εξίσου σημαντικές μελέτες, τα μέτρα και οι γωνίες των ηλεκτρικών ρευμάτων που διαρρέουν τις κύριες γραμμές διανομής (feeders) αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης σε καρτεσιανή [89], πολική [90] ή σε αμφοτέρως τις μορφές [91]. Μια διερεύνηση των μεθόδων οι οποίες βασίστηκαν σε τριφασική μοντελοποίηση WLS πραγματοποιείται στην εργασία [92], όπου συμπεραίνεται ότι, κατά βάση, οι δύο θεωρήσεις οδηγούν σε αποτελέσματα παρόμοιας ακρίβειας, ενώ, εάν συμπεριληφθεί η τάση του ζυγού αναφοράς του δικτύου στις ρευματικές μεταβλητές κατάστασης, ενισχύεται η ακρίβεια των εκτιμήσεων. Τέλος, περαιτέρω εμβάθυνση στη λειτουργία της εκτίμησης κατάστασης WLS επιχειρείται στην εργασία [93] μέσω της διερεύνησης της συσχέτισης πραγματικών μετρήσεων και ψευδομετρήσεων, καθώς και της επίδρασης της στην αποδοτικότητα της διαδικασίας.

Σημαντική συνεισφορά στα δίκτυα διανομής συνιστούν μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης που έχουν βασιστεί στο μαθηματικό μοντέλο της ανάλυσης ροών φορτίου σε ακτινικά δίκτυα και τον επιμερισμό φορτίου, όπως προαναφέρθηκε. Οι Ghosh et al. [94], βασιζόμενοι σε μια πιθανοτική μοντελοποίηση των ηλεκτρικών μεγεθών, προβαίνουν σε κατανομή φορτίου ανά κόμβο με βάση λίγες διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις και, κατόπιν, με τη μέθοδο σάρωσης πίσω-εμπρός (backward-forward sweep) επανυπολογίζουν τις μεταβλητές κατάστασης μέχρι την τήρηση συγκεκριμένων ορίων σύγκλισης. Η λογική του καθορισμού των φορτίων ανά κόμβο με βάση τις υπάρχουσες μετρήσεις και την επαναληπτική επίλυση των εξισώσεων ροής ισχύος ακολουθείται και στις μελέτες [82] και [95]. Μολονότι οι μέθοδοι αυτού του τύπου εμφανίζουν ιδιαίτερη χρησιμότητα για δίκτυα με λίγες πραγματικές μετρήσεις με απτά αποτελέσματα εφαρμογής [96], θεωρούνται ακατάλληλες για τον χειρισμό περισσειας μετρήσεων διαφορετικής ακρίβειας.

Το δίπολο των ανωτέρω μοντέλων έχει σχεδόν μονοπωλήσει το ερευνητικό ενδιαφέρον αναφορικά με τα δίκτυα διανομής. Η χρήση άλλων μοντέλων με εφαρμογή στα συστήματα μεταφοράς, όπως η εκτίμηση κατάστασης LAV και ο γενικευμένος εκτιμητής Huber διερευνήθηκε σε αντιπαράβολή με την εκτίμηση κατάστασης WLS στη μελέτη [97] θεωρώντας το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του δικτύου, τις τάσεις των κόμβων ως μεταβλητές κατάστασης και σφάλματα μετρήσεων που ακολουθούν την κανονική κατανομή (normal distribution). Η μελέτη κατέδειξε ως μόνη κατάλληλη μέθοδο για εφαρμογή στα δίκτυα διανομής την εκτίμηση κατάστασης WLS η οποία αξιολογείται ως αμερόληπτη (unbiased) και συνεπής (consistent), ενώ πλεονεκτεί και ως προς την ποιότητα των εκτιμήσεων που παρέχει. Εκκινώντας από διατυπώσεις σύμφωνες με το μοντέλο WLS, η μελέτη [98] συστηματοποιεί το πρόβλημα βάσει της μεθόδου σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization) θεωρώντας μετρήσεις μέτρου τάσης και ρεύματος και ως μεταβλητές καταστάσεις τις καταναλώσεις φορτίου και τις εγχύσεις της διεσπαρμένης παραγωγής, ενώ στη μελέτη [99] προτείνεται ένα παραλλαγμένο πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων με μη γραμμικούς περιορισμούς, που χρησιμοποιεί εκ των προτέρων διαθέσιμες πληροφορίες για τις

μεταβλητές κατάσταση, με στόχο την εποπτεία της διεσπαρμένης παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, ο επιμερισμός φορτίου και η επίλυση του μοντέλου WLS με χρήση ασαφούς λογικής (fuzzy logic) που προτείνεται στην εργασία [100], εμφανίζει το πλεονέκτημα της δυνατότητας εφαρμογής σε ακτινικά και μη δίκτυα.

Πλήρως ανεξάρτητες από το μοντέλο WLS είναι οι εκτιμητές που περιγράφονται στις μελέτες [101] και [102]. Η ταυτόχρονη επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης και της ανάλυσης ροών φορτίου στο πλαίσιο ενός ενοποιημένου εκτιμητή ασαφούς λογικής προάγεται ως μια αποτελεσματική λύση στη μελέτη [101]. Στο πλαίσιο της μεθόδου [102], δομείται ένας εκτιμητής κατάστασης στο πρότυπο των δικτύων Bayes (Bayesian networks) και χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος διάδοσης εμπιστοσύνης (propagation belief algorithm) προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, ενώ ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι φασιθέτες τάσης και ρεύματος (ροής ή έγχυσης).

Αναμενόμενα, πεδίο περαιτέρω έρευνας έχει αποτελέσει και η ενίσχυση της ευρωστίας των εκτιμητών κατάστασης των δικτύων διανομής. Ένας εύρωστος αλγόριθμος τριφασικής εκτίμησης κατάστασης βασιζόμενος στην επαναληπτική μέθοδο σάρωσης πίσω-μπρος περιγράφεται και αξιολογείται θετικά ως προς τη διαχείριση μη αποδεκτών δεδομένων στην εργασία [103]. Εύρωστες υλοποιήσεις της εκτίμησης κατάστασης WLS όπου γίνεται χρήση συναρτήσεων υπολογισμού βαρών ανά μέτρηση (weight function) επαναληπτικά με στόχο την αντιμετώπιση μη αποδεκτών δεδομένων περιγράφονται στις εργασίες [104]–[106]. Επιπρόσθετα, στις εργασίες [104] και [106] προτείνονται αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης με ανατροφοδότηση – η, μεν, από έναν αλγόριθμο μηχανικής εκμάθησης (machine learning) και η, δε, με χρήση νευρωνικών δικτύων – με στόχο την ποιοτική αναβάθμιση των ψευδομετρήσεων φορτίου που βρίσκονται σε διαδικασία συνεχούς επανυπολογισμού με βάση τις εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης. Αξιοσημείωτο είναι ότι και οι τρεις εργασίες αφορούν μοντέλα δικτύων με ισομερή φόρτιση ανά φάση, γεγονός που οφείλεται στη συλλειτουργία της εκτίμησης κατάστασης με μεθόδους εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου (load estimation/forecasting), οι οποίες δεν παρέχουν εκτιμήσεις φορτίου ανά φάση, αλλά συνολικά.

Όπως και στα συστήματα μεταφοράς, η μελέτη μοντέλων πρόβλεψης κατάστασης ή ξειάθρα δυναμικών μοντέλων αναπτύχθηκε σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με το στατικό μοντέλο. Πέραν των μεθοδολογιών που προαναφέρθηκαν και θεωρούνται ως γενικού σκοπού για τα ΣΗΕ [49], [51], αναφέρονται οι σχετικές εργασίες [107] και [108] που εξειδικεύουν τη μελέτη των δυναμικών μοντέλων στα δίκτυα διανομής με χρήση εκτεταμένου και χωρίς καθοδήγηση φίλτρου Kalman (extended/unscented Kalman filter), αντίστοιχα, συντελώντας στη μείωση του υπολογιστικού φόρτου που συνεπάγεται η επίλυση του προβλήματος. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τη σκοπιά της εκτίμησης κατάστασης FASE παρουσιάζει η εργασία [100], όπου, παρόλο που το προτεινόμενο μοντέλο είναι στατικό, ο σχετικός αλγόριθμος προβλέπει σε πραγματικό χρόνο τις μεταβολές του φορτίου και επανεκτιμά, αναλόγως, τις μεταβλητές κατάστασης. Τέλος, στην εργασία [109] προτείνεται μια παραλλαγή του φίλτρου Kalman χωρίς καθοδήγηση για την εκτίμηση κατάστασης σε ακτινικά δίκτυα διανομής και αξιολογείται θετικά αναφορικά με την ακρίβεια των εκτιμήσεων που παρέχει, ενώ συνδέεται με ελαφρώς αυξημένους υπολογιστικούς χρόνους.

Με την εδραίωση του ενεργού χαρακτήρα των δικτύων διανομής, η ανάγκη για εκτιμητές κατάστασης με ταχεία απόκριση στο έντονα διαδραστικό περιβάλλον των συστημάτων DMS κατηύθυνε την επιστημονική έρευνα σε ιεραρχικά, κατανεμημένα και δυναμικά μοντέλα εκτιμητών κατάστασης που περιλαμβάνουν τη χρήση μονάδων PMU. Πέραν από αρκετές προαναφερθείσες εργασίες, άξονας των

οποίων ήταν η αναβάθμιση των εκτιμητών κατάστασης σε σχέση με τις απαιτήσεις των ενεργών δικτύων διανομής [23], [91], [102], [108], [116], σημαντικές συνεισφορές στον τομέα της εκτίμησης κατάστασης πολλαπλών περιοχών περιλαμβάνονται στις εργασίες [110]–[112], οι οποίες βασίζονται στο στατικό μοντέλο WLS. Οι εργασίες [111] και [112] προτείνουν ιεραρχικούς εκτιμητές δύο σταδίων που ανταποκρίνονται σε προδιαγραφές εποπτείας πραγματικού χρόνου χρησιμοποιώντας με βέλτιστο τρόπο τις διαθέσιμες μετρητικές υποδομές. Στην εργασία [113] προτείνεται μια ψευδοδυναμική μέθοδος βασισμένη σε φίλτρο Kalman, το οποίο επικεντρώνεται στο σενάριο της διαθεσιμότητας μετρήσεων από μονάδες PMU στο πλαίσιο των ενεργών δικτύων διανομής, ενώ η επίδοσή του συγκρίνεται με την εκτίμηση κατάστασης WLS σε μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο δικτύου, παρέχοντας θετικά αποτελέσματα. Στην εργασία [104], η χρήση μετρήσεων από μονάδες PMU και έξυπνους μετρητές συστηματοποιείται στο πλαίσιο ενός στατικού, γραμμικού, μη επαναληπτικού εκτιμητή κατάστασης με βάση το στατικό μοντέλο WLS και μιγαδικές μεταβλητές κατάστασης, λειτουργώντας για τριφασικά και μονοφασικά ισοδύναμα μοντέλα δικτύων. Σε σχεδιασμό υπολογιστικών εργαλείων με πυρήνα την εκτίμηση κατάστασης στο πλαίσιο προηγμένων συστημάτων DMS προβαίνουν οι μελέτες [115] και [116]. Στη, μεν, πρώτη προτείνεται ένα μοντέλο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης κατάστασης με χρήση νευρωνικών δικτύων επί των διαθέσιμων δεδομένων από υποδομές AMI προκειμένου, σε συνδυασμό με την εκτίμηση της διεσπαρμένης παραγωγής, να προβλεφθεί η φόρτιση του δικτύου, ενώ η αξιολόγησή της γίνεται σε μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο δικτύου. Στη, δε, δεύτερη χρησιμοποιείται ένα δυναμικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης προκειμένου το πραγματικό μοντέλο του δικτύου να είναι διαθέσιμο ανά δέκατο του δευτερολέπτου με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του σε επίπεδο τόσο χειρισμών όσο και διαχείρισης της κατανάλωσης. Αμφότερες οι μέθοδοι εφαρμόζονται με κατανεμημένο τρόπο.

Άλλη μια αναγκαιότητα που επιτείνεται στο πλαίσιο των ενεργών δικτύων διανομής είναι η αναβάθμιση του επεξεργαστή τοπολογίας, καθώς οι τοπολογικές αλλαγές που υφίσταται ένα δίκτυο με έντονο το στοιχείο της διεσπαρμένης παραγωγής και αναβαθμισμένους αυτοματισμούς διανομής (distribution automation) είναι εξαιρετικά συχνότερες και αμεσότερες σε σχέση με το παρελθόν. Πρωτότυπες μεθόδους σχετικά με την επεξεργασία τοπολογίας στα δίκτυα διανομής, οι οποίες ξεφεύγουν από την κλασική προσέγγιση με τη χρήση του στατικού μοντέλου WLS, προσφέρουν οι εργασίες [117] και [118], που βασίζονται στις αρχές της ασαφούς λογικής και του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού, αντιστοίχως. Οι εργασίες [119] και [120] εξετάζουν το ζήτημα μέσω πιθανοτικών προσεγγίσεων και βρίσκουν την πλέον πιθανή τοπολογία του δικτύου με βάση έναν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Οι προσεγγίσεις των μελετών [121] και [122] είναι σύμφωνες με τις αρχές της γενικευμένης εκτίμησης κατάστασης και, εκκινώντας από διατυπώσεις WLS, εντοπίζουν εσφαλμένες αναλογικές και ψηφιακές μετρήσεις προκειμένου να εξαχθεί το πραγματικό μοντέλο του δικτύου. Τέλος, μια μεθοδολογία αυτόνομης εκτίμησης κατάστασης, η οποία βασίζεται στη λειτουργία προηγμένων μετρητικών συσκευών προκειμένου να εξάγει το πραγματικό μοντέλο του δικτύου σε πραγματικό χρόνο δεδομένων ταχέων αλλαγών στην τοπολογία του, παρουσιάζεται στην εργασία [123].

2.1.4 Η ανάλυση παρατηρησιμότητας

Η έννοια της παρατηρησιμότητας στα ΣΗΕ (power system observability) είναι ταυτόσημη με την αντίστοιχη χρήση της στα ΣΑΕ: δηλώνει τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η κατάσταση του συστήματος δεδομένου ενός συνόλου διαθέσιμων μετρητικών δεδομένων. Η ανάλυση παρατηρησιμότητας αποτελεί μια διαδικασία δια της οποίας εξακριβώνεται αν το υπό μελέτη σύστημα είναι παρατηρήσιμο, και, σε περίπτωση που δεν είναι, ταυτοποιούνται οι παρατηρήσιμες νησίδες του (observable islands). Εύλογα, από τη στιγμή που εξετάζεται αν πληρούνται ή όχι η ελάχιστη θεωρούμενη συνθήκη παρατηρησιμότητας,

η ανάλυση παρατηρησιμότητας προηγείται της εκτίμησης κατάστασης κατά τη συμβατική λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης [29]. Πολλές και ετερογενείς μέθοδοι έχουν προταθεί για την ανάλυση παρατηρησιμότητας στα συστήματα μεταφοράς ήδη από τη δεκαετία του 1970, ενώ συνεχίζονται έως και σήμερα, παρ' όλη την αλματώδη αύξηση της διαθεσιμότητας πραγματικών μετρήσεων, με εστίαση στα δίκτυα διανομής. Γενικά, η εξακριβωση της παρατηρησιμότητας αποτελεί ένα απαιτητικό πρόβλημα και η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων ακόμη και στο ίδιο, υπό μελέτη σύστημα μπορεί να αποδώσει διαφορετικά αποτελέσματα. Είναι δυνατόν να διακριθούν δύο κατηγορίες μεθόδων ανάλυσης παρατηρησιμότητας σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία: οι τοπολογικές (topological) και οι αριθμητικές (numerical) μέθοδοι [12]. Η τοπολογική διερεύνηση της παρατηρησιμότητας προηγήθηκε χρονικά της αριθμητικής, ενώ, σε βάθος χρόνου, οι αριθμητικές μέθοδοι συγκέντρωσαν περισσότερο το ενδιαφέρον των ερευνητών.

Οι μελέτες των Clements et al. απέδωσαν τις πρώτες τοπολογικές μεθόδους με χρήση στοιχείων από τη θεωρία γράφων (graph theory) [124]–[126]. Η δυνατότητα σχηματισμού ενός συνδετικού δέντρου (spanning tree) πλήρους βαθμού, το οποίο συμπεριλαμβάνει, δηλαδή, όλους τους κόμβους του υπό μελέτη συστήματος, διατυπώθηκε ως η αναγκαία και ικανή συνθήκη για την παρατηρησιμότητά του και σχετικοί αλγόριθμοι προτάθηκαν γι' αυτόν τον σκοπό. Σε παρόμοιο μοτίβο κινείται η μέθοδος [127] όπου προτείνεται μια μέθοδος για τον καθορισμό συνδετικού δένδρου με βάση το αποζευγμένο μοντέλο μετρήσεων. Με γνώμονα την πολυπλοκότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου, μια απλούστερη μέθοδος για τον σχηματισμό του συνδετικού δένδρου, καθώς και για τον καθορισμό των παρατηρήσιμων νησίδων ενός συστήματος δίνεται στην εργασία [128]. Αρκετά μεταγενέστερη και, σε γενικές γραμμές, η χρονικά τελευταία, αξιόλογη τοπολογική μέθοδος αναπτύσσεται στην εργασία [129], όπου γίνεται ξεκάθαρη η προσπάθεια να μειωθεί η πολυπλοκότητα των προτεινόμενων αλγοριθμικών βημάτων.

Σχεδόν μια δεκαετία αργότερα από την αρχική ιδέα της τοπολογικής παρατηρησιμότητας, οι Monticelli και Wu θεμελίωσαν την αριθμητική διερεύνηση της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος χρησιμοποιώντας το απλουστευμένο γραμμικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης, το οποίο λαμβάνει υπόψη μόνο τις μετρήσεις ενεργού ισχύος και μελετά ως μεταβλητές κατάστασης μόνο τις γωνίες των τάσεων των κόμβων (DC state estimation) [130], [131]. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι επαναληπτικός και προβλέπει υπολογισμούς επί της παραγοντοποιημένης μήτρας κέρδους (gain matrix) του υπό μελέτη συστήματος, καθώς και τοπολογική επεξεργασία του ανά βήμα εκτέλεσης με τελικό αποτέλεσμα την εξαγωγή των παρατηρήσιμων νησίδων που το αποτελούν. Σε παρόμοια λογική ενός επαναληπτικού αλγόριθμου κινείται η εργασία [132], όπου χρησιμοποιείται το στατικό μοντέλο WLS με περιορισμούς ισότητας και οι υπολογισμοί αφορούν την παραγοντοποιημένη επαυξημένη μήτρα που προκύπτει. Υβριδικοί αλγόριθμοι που εξάγουν το μοντέλο μειωμένης τάξης (reduced model) της τοπολογίας του υπό μελέτη συστήματος με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ρών ισχύος και, ακολούθως, επεξεργάζονται την αντίστοιχη μήτρα λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους οριακούς ζυγούς και τις διαθέσιμες μετρήσεις εγχύσεων ισχύος των επιμέρους παρατηρήσιμων νησίδων, προτείνονται στις εργασίες [133] και [134]. Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες μεθόδους, στην εργασία [135] προτείνεται ένας μη επαναληπτικός αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται σε αριθμητική επεξεργασία των αντίστροφων τριγωνικών παραγόντων της μήτρας κέρδους, καθώς και μια τεχνική τοποθέτησης μετρήσεων για την εκπλήρωση της παρατηρησιμότητας. Επιπλέον συνεισφορά εντοπίζεται στην εργασία [136] όπου προτείνεται η αριθμητική επεξεργασία της Ιακωβιανής μήτρας (Jacobian matrix) στο πλαίσιο ενός επαναληπτικού αλγόριθμου. Τέλος, ένας μη επαναληπτικός αλγόριθμος που επεξεργάζεται αριθμητικά τη μήτρα Gram (Gram matrix), η οποία προκύπτει από την Ιακωβιανή μήτρα μειωμένης τάξης του υπό μελέτη

συστήματος, παρουσιάζεται στην εργασία [137] προκειμένου να επιλεγεί ο ελάχιστος αριθμός μετρήσεων για την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητάς του.

Με τη σταδιακή εγκατάσταση μονάδων μέτρησης φασιθετών στα συστήματα μεταφοράς, ερευνήθηκε επισταμένα η συμβολή τους ως προς την επίτευξη παρατηρησιμότητας. Με βάση τα πρώτα θετικά δείγματα γραφής από την υλοποίηση τεχνολογίας PMU [138], αναπτύχθηκαν τεχνικές ανάλυσης παρατηρησιμότητας επικεντρωμένες στη χρήση μετρήσεων από μονάδες PMU [139]–[141], οι οποίες υπόκεινται σε γραμμική μοντελοποίηση εκ φύσεως και εξαλείφουν την ανάγκη ύπαρξης γωνίας αναφοράς ανά παρατηρήσιμη νησίδα. Ένα επιπλέον ενδιαφέρον στοιχείο στην εργασία [139] είναι η χρήση μιας αριθμητικής μεθόδου χωρίς πράξεις κινητής υποδιαστολής και, συνεπώς, η αποφυγή σφαλμάτων στρογγυλοποίησης που δυσχεραίνουν την ανάλυση παρατηρησιμότητας. Εξάλλου, στην εργασία [142] εισάγεται η μελέτη της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος σύμφωνα με τις υπάρχουσες μονάδες PMU: αρχικά, ορίζονται με αυστηρό τρόπο οι μεταβλητές κατάστασης που είναι παρατηρήσιμες βάσει μετρήσεων των μονάδων PMU και, εν συνεχεία, οι μη παρατηρήσιμες μεταβλητές κατάστασης εκτιμώνται βάσει των διαθέσιμων συμβατικών μετρήσεων.

Αναφορικά με τα δίκτυα διανομής, σημειώνεται ότι δεν υπάρχει περιορισμός σχετικά με την εφαρμοσιμότητα των ανωτέρω μεθόδων σε αυτά. Πάντως, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν λίγες εργασίες που εξειδικεύουν τις μελέτες τους στην ανάλυση παρατηρησιμότητας σε δίκτυα διανομής με δεδομένη την ένδεια ως προς τη διαθεσιμότητα πραγματικών μετρήσεων. Στην αναφορά [143] παρουσιάζεται μια μέθοδος που εκμεταλλεύεται την ακτινική δομή των δικτύων διανομής ώστε να παράγει τις απαραίτητες ψευδομετρήσεις με βάση περιορισμένες μετρήσεις ροών ισχύος προκειμένου το υπό μελέτη δίκτυο να καταστεί παρατηρήσιμο. Μια αποτελεσματική αριθμητική μέθοδος με βάση το αποζευγμένο μοντέλο προτείνεται στην εργασία [144] κατά τα πρότυπα των αλγόριθμων που έχουν εφαρμοστεί στα συστήματα μεταφοράς. Ωστόσο, κατά την κατάρτιση των εξισώσεων ροής ισχύος, δεν αμελείται ο λόγος της ωμικής αντίστασης προς την επαγωγική αντίδραση των γραμμών διανομής. Το ζήτημα της χρήσης πληθώρας ψευδομετρήσεων στα δίκτυα διανομής για την επίτευξη παρατηρησιμότητας μελετάται στην εργασία [145], όπου προτείνεται μια πιθανοτική μέθοδος που εκτιμά την κατάσταση παρατηρησιμότητας του δικτύου σε συνάρτηση με την ανακρίβεια των χρησιμοποιούμενων ψευδομετρήσεων. Τέλος, στην εργασία [146] παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής δύο προγενέστερων μεθόδων σε πρότυπα δίκτυα διανομής: η αριθμητική μέθοδος [135] εκτιμά την κατάσταση παρατηρησιμότητας και υποδεικνύει τις απαραίτητες μετρήσεις για την αποκατάσταση σε πολύ συντομότερο χρόνο σε σχέση με την τοπολογική μέθοδο [129], όντας κατάλληλη για λειτουργία πραγματικού χρόνου.

2.2 Εκτίμηση Κατάστασης με τη Μέθοδο Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (Weighted Least Squares–WLS)

Με βάση την ανασκόπηση της ενότητας 2.1, το στατικό μοντέλο WLS έχει αναδειχθεί ως η πιο δημοφιλής επιλογή για την επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ. Η επάρκεια της μελέτης του προβλήματος σύμφωνα με τη στατική θεώρηση και το απλοποιημένο μονοφασικό μοντέλο του συστήματος βασίζεται σε ένα σύνολο παραδοχών. Η θεμελίωση της μεθόδου WLS βασίζεται στις αρχές της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας.

2.2.1 Παραδοχές

Κατ' αρχάς, η αδυναμία λήψης συγχρονισμένων δεδομένων από όλες τις μετρητικές μονάδες του υπό μελέτη συστήματος εγείρει ζητήματα αξιοπιστίας του στατικού μοντέλου, καθώς η χρονική συνάφεια του δείγματος των μετρήσεων περιορίζεται. Επομένως, γίνεται παραδεκτό ότι οι αργά μεταβαλλόμενες συνθήκες των ΣΗΕ κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τους δικαιολογούν ένα όριο ανοχής για τη χρονική απόκλιση που σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα των επιμέρους πραγματικών μετρήσεων κατά την εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης.

Ως προς τη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου και των επιμέρους στοιχείων που το αποτελούν (γραμμές, εγκάρσια στοιχεία, μετασχηματιστές, φορτία και γεννήτριες), γίνεται η παραδοχή ότι τα υπό μελέτη ΣΗΕ λειτουργούν στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας και υπάρχει συμμετρία δομής και φόρτισης ανάμεσα στις τρεις φάσεις. Με άλλα λόγια, όλες οι γραμμές και τα εγκάρσια στοιχεία θεωρούνται συμμετρικά ως προς τις ανά φάση τιμές τους, ενώ όλες οι εγχύσεις, οι ροές ισχύος και, άρα, τα φορτία του συστήματος θεωρούνται σε τριφασική συμμετρία. Αυτές οι παραδοχές δικαιολογούν τη χρήση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος θετικής ακολουθίας για τη μοντελοποίηση του συστήματος και απλοποιούν σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική περιγραφή της εκτίμησης κατάστασης, μολονότι η ισχύς τους δεν είναι εξασφαλισμένη συλλήβδην. Η μοντελοποίηση των στοιχείων του συστήματος δίνεται στο τμήμα 1 του Παραρτήματος Α.

2.2.2 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (maximum likelihood estimation)

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας αποτελεί μία γενική τεχνική κατασκευής εκτιμητή για μία άγνωστη διανυσματική (βαθμωτή) παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$ ($\boldsymbol{\theta}$). Η μέθοδος είχε χρησιμοποιηθεί ήδη από τους Pierre-Simon de Laplace και Carl Friedrich Gauss, προτού θεμελιωθεί ως γενική μέθοδος εκτίμησης και μελετηθούν οι ιδιότητές της από τον Ronald Fisher σε σειρά εργασιών του κατά το πρώτο τρίτο του 20^{ου} αιώνα. Αποτελεί ιδιαίτερα εύχρηστη μέθοδο η οποία, αν και δεν έχει καθαρά μαθηματική αιτιολόγηση, μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλών ειδών προβλήματα εκτίμησης παρέχοντας πολύ χρήσιμους εκτιμητές και, επίσης, να ερμηνευτεί διαισθητικά με απλό τρόπο. Γενικά, είναι ασφαλής ο ισχυρισμός ότι αποτελεί την πλέον γνωστή και χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης σε γενικές ή ειδικές εφαρμογές [147].

Θεωρείται ένα πείραμα το οποίο βασίζεται στις παρατηρήσεις (ή μετρήσεις) ενός τυχαίου δείγματος μεγεθών ενός συστήματος προκειμένου να εκτιμηθεί μια άγνωστη παράμετρος του, έστω $\boldsymbol{\theta} \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^k$. Το δείγμα του πειράματος μοντελοποιείται ως ένα σύνολο m ανεξάρτητων, τυχαίων μεταβλητών (τ.μ.) $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)^T$ οι οποίες ακολουθούν όμοιες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) $f_{Z_i}(z_i | \boldsymbol{\theta}), i = 1, \dots, m$ που εξαρτώνται από την άγνωστη παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$. Τέλος, έστω $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ η παρατηρηθείσα τιμή (ή, απλά, παρατήρηση) του δείγματος \mathbf{Z} . Η αρχή της μέγιστης πιθανοφάνειας αποδίδει ως εκτίμηση της παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$ την τιμή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z}) \in \Theta$ η οποία μεγιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης της παρατήρησης \mathbf{z} ως προς $\boldsymbol{\theta}$. Σε αυτό το πλαίσιο, η εκτίμηση βασίζεται στην αποτίμηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας της παρατήρησης \mathbf{z} η οποία ταυτίζεται με την κοινή σ.π.π. που ακολουθεί το δείγμα \mathbf{Z} υπολογιζόμενη ως προς \mathbf{z} . Συνεπώς, προκύπτει μια συνάρτηση ως προς την άγνωστη παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$ που δίνεται ως εξής:

$$L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) = f_{\mathbf{Z}}(\mathbf{z}; \boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^m f_{Z_i}(z_i; \boldsymbol{\theta}) = f_{Z_1}(z_1; \boldsymbol{\theta}) \cdots f_{Z_m}(z_m; \boldsymbol{\theta}) \quad (2.1)$$

Στόχος, λοιπόν, είναι η εύρεση της τιμής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ που μεγιστοποιεί την $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$. Με βάση αυτό το ζητούμενο, παρακάτω δίνονται οι ορισμοί της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ και του εκτιμητή μέγιστης πιθανοφάνειας $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ [147]:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z}) = \arg \max_{\boldsymbol{\theta} \in \Theta} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \quad (2.2\alpha)$$

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z}) : L(\mathbf{Z} | \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \max\{L(\mathbf{Z} | \boldsymbol{\theta}), \boldsymbol{\theta} \in \Theta\} \quad (2.2\beta)$$

Επισημαίνεται ότι δεν πρέπει να συγχέονται οι δύο συμβολισμοί: η εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ αποτελεί μια πραγματική τιμή της παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$ δεδομένης της παρατήρησης \mathbf{z} , ενώ ο εκτιμητής μέγιστης πιθανοφάνειας $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ συνιστά μια στατιστική συνάρτηση των τ.μ. του δείγματος \mathbf{Z} η οποία αποδίδει την τιμή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ για $\mathbf{Z} = \mathbf{z}$. Άρα, ο εκτιμητής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ – όπως και κάθε εκτιμητρια συνάρτηση – εξαρτάται αποκλειστικά από τις παρατηρηθείσες τιμές $z_i, i = 1, \dots, m$.

Δεδομένου ότι για την εύρεση του μεγίστου απαιτείται η παραγωγή της $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$, αποτελεί κοινή πρακτική, αντί αυτής, να μεγιστοποιείται ο νεπέριος λογάριθμος (Naperian logarithm) $\ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$ χάριν ευκολίας. Συνεπώς, η τελική μορφή της συνάρτησης πιθανοφάνειας που χρησιμοποιείται κατά τους υπολογισμούς είναι:

$$\ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) = \ln \left(\prod_{i=1}^m f_{Z_i}(z_i; \boldsymbol{\theta}) \right) = \sum_{i=1}^m \ln f_{Z_i}(z_i; \boldsymbol{\theta}) \quad (2.3)$$

Με τον καθορισμό της κατανομής που ακολουθούν οι τ.μ. του δείγματος \mathbf{Z} είναι δυνατόν να εξαχθεί σε κλειστή μορφή η έκφραση της συνθήκης μεγιστοποίησης της $\ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$.

Στη συνέχεια, η μελέτη συγκεκριμενοποιείται στην περίπτωση των ΣΗΕ. Έστω ένα σύνολο μετρητικών δεδομένων \mathbf{z} για ένα δείγμα ηλεκτρικών μεγεθών \mathbf{Z} , το οποίο αποτελείται από τάσεις, ρεύματα και ισχύες.

Σύμφωνα με τη θεωρία μετρήσεων, το i -οστό ηλεκτρικό μέγεθος Z_i μπορεί να μοντελοποιηθεί ως τ.μ. που ακολουθεί την κανονική ή Γκαουσιανή κατανομή (Gaussian distribution) με σ.π.π. της μορφής:

$$f_{Z_i}(z_i; \boldsymbol{\mu}_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}, i = 1, \dots, m \quad (2.4)$$

όπου z_i μια τυχαία μέτρηση του μεγέθους Z_i , $\boldsymbol{\mu}_i = \mathbb{E}[Z_i]$ είναι η μέση (αναμενόμενη) τιμή του μεγέθους Z_i , $\sigma_i^2 = \mathbb{E}[(Z_i - \mathbb{E}[Z_i])^2]$ είναι η αντίστοιχη διασπορά και $\mathbb{E}[\cdot]$ είναι ο τελεστής μέσης τιμής. Συμβολικά, $Z_i \sim \mathcal{N}(\boldsymbol{\mu}_i, \sigma_i^2)$.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σύνολο μετρήσεων \mathbf{z} είναι μεμονωμένο και αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο της μόνιμης κατάστασης ενός ΣΗΕ, η εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας αφορά την εύρεση των αγνώστων αναμενόμενων τιμών $\boldsymbol{\mu}_i, i = 1, \dots, m$. Εφόσον οι τελευταίες μοντελοποιηθούν ως μη

γραμμικές συναρτήσεις του διανύσματος των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος \mathbf{x} σύμφωνα με τις εξισώσεις εγχύσεων και ροών ισχύος που περιγράφουν τη λειτουργία του, τότε το πρόβλημα ανάγεται στην εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος.

Αρχικά, η σχέση (2.3), δεδομένης της (2.4), διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\mu}) &= \ln\left(\prod_{i=1}^m f_{Z_i}(z_i; \mu_i)\right) = \sum_{i=1}^m \ln\left(\frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z_i - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}\right) \\ &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 - \frac{m}{2} \ln 2\pi - \sum_{i=1}^m \ln \sigma_i \end{aligned} \quad (2.5)$$

όπου $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m)^T \in \mathbb{R}^m$.

Η μεγιστοποίηση της $\ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\mu})$ ως προς $\boldsymbol{\mu}$ πληροῦται μέσω της ελαχιστοποίησης του πρώτου όρου της τελικής έκφρασης της σχέσης (2.5), δηλαδή:

$$\max \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\mu}) \Leftrightarrow \min \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 \quad (2.6)$$

Συνεπώς, διαμορφώνεται ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αποτελεί μια μορφή του μοντέλου WLS, καθώς προβλέπει την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των σταθμισμένων τετραγώνων των διαφορών $r_i = z_i - \mu_i$, $i = 1, \dots, m$.

Εκφράζοντας την i -οστή αναμενόμενη τιμή μ_i ως μη γραμμική συνάρτηση του διανύσματος κατάστασης του συστήματος $h_i(\mathbf{x})$, τότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνει την τελική του μορφή:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2 \\ \text{s.t. } z_i = h_i(\mathbf{x}) + r_i, i = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (2.7)$$

όπου ως $W_{ii} = 1/\sigma_i^2$ θεωρείται ο συντελεστής στάθμισης (ή βάρους) της i -οστής μέτρησης z_i και r_i είναι η απόκλιση μεταξύ της πραγματικής τιμής της μέτρησης, z_i και της αναμενόμενης τιμής της, $\mu_i = h_i(\mathbf{x})$.

2.2.3 Το στατικό μοντέλο WLS

Έστω ένα σύστημα n κόμβων για το οποίο διατίθεται ένα στιγμιότυπο m μετρητικών δεδομένων $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$. Η κατάσταση του συστήματος ορίζεται από $2n - 1$ μεταβλητές, οι οποίες περιλαμβάνουν τις τάσεις κατά μέτρο και γωνία όλων των κόμβων, πλην της γωνίας του ζυγού ταλάντωσης του συστήματος που λαμβάνεται ως αναφορά και ίση με μια γνωστή τιμή (συνήθως τη μηδενική). Ο ζυγός ταλάντωσης είναι μοναδικός σε κάθε σύστημα και η εγχεόμενη σε αυτόν μιγαδική ισχύς δεν υπόκειται σε περιορισμούς κατά την επίλυση της ροής ισχύος [148]. Αν $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{2n-1})^T$

το διάνυσμα της πραγματικής κατάστασης και $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = (h_1(\mathbf{x}), h_2(\mathbf{x}), \dots, h_m(\mathbf{x}))^T$ το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών ως προς \mathbf{x} , το στατικό μοντέλο WLS για το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης θεμελιώνεται με βάση το παρακάτω σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων:

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(\mathbf{x}) \\ h_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ h_m(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (2.8)$$

όπου $\mathbf{e} = (e_1, e_2, \dots, e_m)^T$ είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων μεταξύ των πραγματικών και των αναμενομένων τιμών. Μέσω του διανύσματος \mathbf{e} μοντελοποιούνται, κατά κύριο λόγο, τα σφάλματα των μετρητικών οργάνων που καταγράφουν τα μεγέθη, ενώ μπορεί να συμπεριλαμβάνονται και τα σφάλματα κατά τη μετάδοση των δεδομένων καθώς και ο θόρυβος που υπεισέρχεται. Σχετικά με το διάνυσμα \mathbf{e} , γίνονται οι εξής υποθέσεις:

1. Η μέση τιμή των σφαλμάτων $e_i, i = 1, \dots, m$ είναι μηδέν, ήτοι $E[e_i] = 0, i = 1, \dots, m$.
2. Τα σφάλματα θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, οπότε ισχύει: $E[e_i e_j] = 0, \forall i \neq j$. Συνεπώς, η μήτρα συνδιακύμανσης είναι $\text{cov}[\mathbf{e}] = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\}$, όπου σ_i^2 είναι η διασπορά του i -οστού σφάλματος.
3. Τα σφάλματα $e_i, i = 1, \dots, m$ ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Οι ανωτέρω υποθέσεις βρίσκονται σε πλήρη αντιστοιχία με τη θεώρηση των μετρήσεων ως ανεξάρτητες τ.μ. στο πλαίσιο της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας και την περιγραφή του προβλήματος σύμφωνα με την εξίσωση (2.7). Έτσι, χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.8), διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση του στατικού μοντέλου WLS σύμφωνα με τη σχέση (2.7) ως εξής:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m W_{ii} (z_i - h_i(\mathbf{x}))^2 = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{W} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (2.9)$$

όπου $\mathbf{W} = \text{diag}\{\sigma_1^{-2}, \dots, \sigma_m^{-2}\}$ η μήτρα των συντελεστών στάθμισης.

Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της $J(\mathbf{x})$ ανάγεται στην εκπλήρωση της συνθήκης πρώτης τάξης, η οποία προκύπτει από το μηδενισμό της πρώτης παραγώγου της $J(\mathbf{x})$, έστω $g(\mathbf{x})$, ως εξής:

$$g(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}} J(\mathbf{x}) = 0 \Rightarrow -\mathbf{H}^T(\mathbf{x})\mathbf{W}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] = 0 \quad (2.10)$$

όπου το σύμβολο $\nabla_{\mathbf{x}}[\cdot]$ αναπαριστά το τελεστή κλίσης (gradient) ως προς \mathbf{x} και $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ είναι η Ιακωβιανή μήτρα του προβλήματος. Η μήτρα $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ είναι η μήτρα των παραγώγων πρώτης τάξης του διανύσματος $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ ως προς \mathbf{x} , είναι αραιή και έχει την ακόλουθη δομή:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1(\mathbf{x})}{\partial x_{2n-1}} \\ \frac{\partial h_2(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2(\mathbf{x})}{\partial x_{2n-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m(\mathbf{x})}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m(\mathbf{x})}{\partial x_{2n-1}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Η μη γραμμική σχέση (2.10) δεν επιδέχεται αναλυτική αλλά προσεγγιστική επίλυση. Σε αυτό το πλαίσιο, η $g(\mathbf{x})$ αναπτύσσεται σε σειρά Taylor γύρω από ένα τυχαίο σημείο \mathbf{x}^k . Με αγνόηση όλων των όρων μετά από αυτόν της πρώτης τάξης, προκύπτει η εξής έκφραση:

$$g(\mathbf{x}) \approx g(\mathbf{x}^k) + (\mathbf{x} - \mathbf{x}^k)\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = 0 \quad (2.12)$$

όπου $\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = \left. \frac{\partial g(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}\mathbf{H}(\mathbf{x}^k)$ είναι η λεγόμενη μήτρα κέρδους του προβλήματος με διαστάσεις $(2n-1) \times (2n-1)$.

Απότοκο της σχέσης (2.12) είναι η προσεγγιστική επίλυση του προβλήματος μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Gauss-Newton που βασίζεται στο γραμμικοποιημένο σύστημα:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}^{k+1} &= \mathbf{x}^k - [\mathbf{G}(\mathbf{x}^k)]^{-1} g(\mathbf{x}^k) \Rightarrow \\ \mathbf{x}^{k+1} &= \mathbf{x}^k + [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}\mathbf{H}(\mathbf{x}^k)]^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)] \end{aligned} \quad (2.13)$$

όπου k είναι ο αύξων αριθμός της επανάληψης, \mathbf{x}^k είναι το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης και $\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)$ είναι το διάνυσμα των υπολοίπων των μετρήσεων (measurement residuals) μετά από την k -οστή επανάληψη.

Κατά τη θεμελίωση του στατικού μοντέλου WLS στην εργασία [14], το διάνυσμα \mathbf{r} αναφέρεται, επίσης, ως όρος διόρθωσης και το γινόμενο $[\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}\mathbf{H}(\mathbf{x}^k)]^{-1} \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}$ ως κέρδος, καθώς η μαθηματική έκφραση είναι όμοια με αυτή ενός ΣΑΕ με ανατροφοδότηση (κλειστού βρόχου) που ρυθμίζει την απόκρισή του ώστε να προσεγγίζει μία επιθυμητή τιμή. Εν προκειμένω, αποδεικνύεται ότι η επαναληπτική επίλυση της σχέσης (2.13) προσεγγίζει την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας, $\hat{\mathbf{x}}$ του διανύσματος \mathbf{x} , ή ισοδύναμα [149]:

$$\hat{\mathbf{x}} = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathbf{x}^k \quad (2.14)$$

Ασφαλώς, η επαναληπτική επίλυση συνεχίζεται έως ότου να πληρούται ένας κριτήριο σύγκλισης μεταξύ των διαδοχικών εκτιμήσεων \mathbf{x}^k και \mathbf{x}^{k+1} .

Όπως φαίνεται, η σχέση (2.13) προϋποθέτει την αντιστροφή της μήτρας κέρδους, η οποία θεωρείται υπολογιστικά ασύμφορη και αποφεύγεται δεδομένου ότι η μήτρα $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ είναι αραιή, θετικά ορισμένη και

συμμετρική, εφόσον το υπό μελέτη σύστημα είναι παρατηρήσιμο – ιδιότητες που θα αναλυθούν στη συνέχεια. Έτσι, προτιμάται η επαναληπτική επίλυση της ακόλουθης έκφρασης:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k)\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k)\mathbf{W}\left[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)\right] \quad (2.15)$$

όπου $\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^{k+1} - \mathbf{x}^k$.

Το γραμμικοποιημένο σύστημα (2.15) περιλαμβάνει τις λεγόμενες «κανονικές εξισώσεις» που περιγράφουν το στατικό μοντέλο WLS. Επιλύεται, δε, μέσω επαναληπτικού αλγόριθμου που βασίζεται σε εμπρός-πίσω αντικαταστάσεις (forward-backward substitutions), καθώς η μήτρα $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ παραγοντοποιείται ως γινόμενο δύο τριγωνικών πινάκων. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της μεθόδου Cholesky, η οποία αποτελεί την πλέον δημοφιλή επιλογή, στοχευμένη για θετικά ορισμένες μήτρες, μπορεί να υπολογιστεί μία κάτω τριγωνική μήτρα \mathbf{L} τέτοια ώστε $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \mathbf{L}\mathbf{L}^T$. Έτσι, συμβολίζοντας το δεξί μέλος της (2.15) με \mathbf{t}^k , η επίλυση της (2.15) ανάγεται στη μορφή:

$$\mathbf{L}\mathbf{L}^T\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{t}^k \Rightarrow \begin{cases} \mathbf{L}^T\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{u} & (\alpha) \\ \mathbf{L}\mathbf{u} = \mathbf{t}^k & (\beta) \end{cases} \quad (2.16)$$

όπου γίνεται η ανάθεση (α) με την εισαγωγή του βοηθητικού διανύσματος \mathbf{u} , κατόπιν υπολογίζεται το \mathbf{u} μέσω της σχέσης (β) με αντικαταστάσεις προς τα εμπρός και, τέλος, υπολογίζεται η διαφορά $\Delta\mathbf{x}^{k+1}$ με αντικαταστάσεις προς τα πίσω με βάση τη σχέση (α). Στο Σχήμα 2.2, απεικονίζεται η δομή των γραμμικών συστημάτων (α) και (β), καθώς και ο τρόπος επίλυσής τους.

Υπολογισμός \mathbf{u} :

$$\begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ L_{21} & L_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ L_{2n-2,1} & L_{2n-2,2} & \dots & L_{2n-2,2n-2} & 0 \\ L_{2n-1,1} & L_{2n-1,2} & \dots & L_{2n-1,2n-2} & L_{2n-1,2n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{2n-2} \\ u_{2n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{2n-2} \\ t_{2n-1} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} u_1 = \frac{L_{11}}{t_1} \\ \downarrow \end{matrix}$$

Υπολογισμός $\Delta\mathbf{x}^{k+1}$:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{21} & \dots & L_{2n-2,1} & L_{2n-1,1} \\ 0 & L_{22} & \dots & L_{2n-2,2} & L_{2n-1,2} \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & L_{2n-2,2n-2} & L_{2n-1,2n-2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & L_{2n-1,2n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_{2n-2} \\ \Delta x_{2n-1} \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{2n-2} \\ u_{2n-1} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \Delta x_{2n-1} = \frac{L_{2n-1,2n-1}}{u_{2n-1}} \end{matrix}$$

Σχήμα 2.2: Επίλυση των κανονικών εξισώσεων με τη μέθοδο των εμπρός-πίσω αντικαταστάσεων.

Κατά την εκκίνηση του αλγόριθμου, τίθεται $k = 0$ και θεωρείται ένα διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x}^0 ως αρχικό σημείο για την πρώτη ανακίνηση. Κατά τη συνηθέστερη περίπτωση, ως \mathbf{x}^0 λαμβάνεται το διάνυσμα κατάστασης με όλα τα μέτρα τάσης μοναδιαία (σε ανά μονάδα τιμές) και τις αντίστοιχες γωνίες

μηδενικές (σε ακτίνια). Η κατάσταση αυτή αναφέρεται με τον όρο “flat voltage profile”. Συνοπτικά, ο επαναληπτικός αλγόριθμος περιλαμβάνει τα κάτωθι βήματα:

- 1) Αρχικοποίηση δείκτη k και διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}^0 . Εκκίνηση επαναλήψεων.
- 2) Υπολογισμός της μήτρας $\mathbf{H}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$.
- 3) Υπολογισμός της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$.
- 4) Υπολογισμός του δεξιού μέλους \mathbf{t}^k .
- 5) Παραγοντοποίηση της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$ και διαδοχική επίλυση των (2.14 β) και (2.14 α).
- 6) Έλεγχος για σύγκλιση βάσει της συνθήκης $\|\Delta\mathbf{x}^{k+1}\|_{\infty} = \max|\Delta\mathbf{x}^{k+1}| < \varepsilon$ όπου ε το κατώφλι για τη μέγιστη απόκλιση μεταξύ \mathbf{x}^k και \mathbf{x}^{k+1} .
- 7) Αν δεν πληρούνται η ανισότητα στο βήμα 6, $\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta\mathbf{x}^{k+1}$ και $k = k + 1$. Αλλιώς, τερματισμός.

Κατά την k – οστή ανακύκλωση του αλγόριθμου εκτελούνται κατά σειρά οι εξής πράξεις:

1. υπολογισμός της συνάρτησης μετρήσεων $\mathbf{h}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$
2. υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας $\mathbf{H}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$
3. δημιουργία της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$
4. υπολογισμός του δεξιού μέλους \mathbf{t}^k
5. παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})\big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^k}$
6. επίλυση των κανονικών εξισώσεων (2.14) με εμπρός-πίσω αντικαταστάσεις.

2.2.3.1 Το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων μετρήσεων, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$

Η διατύπωση των βαθμωτών συναρτήσεων μέτρησεων $h_i(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, m$, που συγκροτούν το διάνυσμα $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, εξαρτάται από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων για την έκφραση του διανύσματος \mathbf{x} . Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας, επιλέχθηκε οι μιγαδικές τάσεις των κόμβων να εκφραστούν εν είδει φασιθετών, δηλαδή στη μορφή $\tilde{V} = V\angle\delta$ με άμεση συνέπεια την υιοθέτηση των πολικών συντεταγμένων. Κατά συνέπεια, η κατάσταση του συστήματος ορίζεται από τις ακόλουθες μεταβλητές:

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{2n-1})^T = (\delta_2, \dots, \delta_n, V_1, \dots, V_n)^T \in \mathbb{R}^{2n-1} \quad (2.17)$$

Με βάση τη σχέση (2.8), διακρίνονται τρεις συνήθεις κατηγορίες συμβατικών μετρήσεων που απαρτίζουν, εν γένει, το διάνυσμα $\mathbf{h}(\mathbf{x})$: μετρήσεις ροών ισχύος, εγχύσεων ισχύος και μέτρων τάσης. Ονομάζονται, δε, συμβατικές γιατί αποτελούν τους συνηθέστερους τύπους μετρητικών δεδομένων στα ΣΗΕ και έρχονται σε αντιπαράβολή με τις μετρήσεις συγχρονισμένων φασιθετών που έγιναν ευρέως διαθέσιμες κατά την τελευταία δεκαετία μέσω των μονάδων PMU.

Πιο αναλυτικά, οι συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνουν τις εξής εξισώσεις:

1. Έστω ότι διατίθενται m_{fl} μετρήσεις ρών ισχύος. Τότε, το διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{z}_{fl} \in \mathbb{R}^{m_{fl}}$ περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{z}_{fl} = \mathbf{h}_{fl}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}_{fl} \quad (2.18)$$

όπου $\mathbf{h}_{fl}(\mathbf{x})$ το αντίστοιχο διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων μετρήσεων και \mathbf{e}_{fl} το διάνυσμα των σφαλμάτων. Θεωρώντας ότι η l -οστή μέτρηση του διανύσματος αφορά τη ροή ισχύος μεταξύ των κόμβων i και j , η αντίστοιχη συνάρτηση μέτρησης $h_{fl,l}(\mathbf{x})$ μπορεί να περιγραφεί από τις εξής εξισώσεις:

$$h_{fl,l}(\mathbf{x}) \begin{cases} P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sij}) - V_i V_j \alpha_{ij}, \text{ για ροή ενεργού ισχύος} \\ Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sij}) - V_i V_j \beta_{ij}, \text{ για ροή αέργου ισχύος} \end{cases} \quad (2.19)$$

όπου V_i, V_j τα μέτρα τάσης των κόμβων, g_{ij}, g_{sij} οι ωμικές αγωγιμότητες σειράς και προς γη (εγκάρσιες) του κλάδου $i-j$ αντιστοίχως, b_{ij}, b_{sij} οι αντίστοιχες επαγωγικές αγωγιμότητες και οι όροι $\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$ και $\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$ όπου δ_i, δ_j τις γωνίες τάσης των κόμβων. Ο κλάδος $i-j$ έχει μοντελοποιηθεί σύμφωνα με το ισοδύναμο μοντέλο π. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί για την εξαγωγή των εξισώσεων (2.19) δίνονται στο Παράρτημα Α.

2. Έστω ότι διατίθενται m_{inj} μετρήσεις εγχύσεων ισχύος με το διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{z}_{inj} \in \mathbb{R}^{m_{inj}}$ να δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathbf{z}_{inj} = \mathbf{h}_{inj}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}_{inj} \quad (2.20)$$

όπου $\mathbf{h}_{inj}(\mathbf{x})$ το αντίστοιχο διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων μετρήσεων και \mathbf{e}_{inj} το διάνυσμα των σφαλμάτων. Έστω ότι η l -οστή μέτρηση του διανύσματος αφορά την έγχυση ισχύος στον κόμβο i , ο οποίος διασυνδέεται με ένα υποσύνολο κόμβων του συστήματος, $A(i)$. Η αντίστοιχη συνάρτηση μέτρησης $h_{inj,l}(\mathbf{x})$ μπορεί να περιγραφεί από τις εξής εξισώσεις:

$$h_{inj,l}(\mathbf{x}) \begin{cases} P_i = V_i^2 \sum_{k \in A(i)} (g_{ik} + g_{sik}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \alpha_{ik}, \text{ για έγχυση ενεργού ισχύος} \\ Q_i = -V_i^2 \sum_{k \in A(i)} (b_{ik} + b_{sik}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \beta_{ik}, \text{ για έγχυση αέργου ισχύος} \end{cases} \quad (2.21)$$

όπου g_i, b_i η ωμική και η επαγωγική αγωγιμότητα του εγκάρσιου στοιχείου που γειώνει τον κόμβο i αντιστοίχως, και V_k το μέτρο τάσης του k -οστού κόμβου του υποσυνόλου $A(i)$. Τα μεγέθη

g_{ik} , g_{sik} , α_{ik} και β_{ik} ορίζονται όπως ανωτέρω και αφορούν τον κλάδο $i - k$. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί για την εξαγωγή της (2.21) δίνονται στο Παράρτημα Α.

3. Έστω ότι διατίθενται m_v μετρήσεις μέτρων τάσης με το διάνυσμα μετρήσεων $\mathbf{z}_v \in \mathbb{R}^{m_v}$ να δίνεται από την εξής σχέση:

$$\mathbf{z}_v = \mathbf{h}_v(\mathbf{x}) + \mathbf{e}_v \quad (2.22)$$

όπου $\mathbf{h}_v(\mathbf{x})$ το αντίστοιχο διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων μετρήσεων και \mathbf{e}_v το διάνυσμα των σφαλμάτων. Αν η l -οστή μέτρηση του διανύσματος αφορά τον κόμβο i , τότε η συνάρτηση μέτρησης $h_{v,l}(\mathbf{x})$ ταυτίζεται με το μέτρο τάσης V_i , που συνιστά και μεταβλητή κατάστασης του συστήματος:

$$h_{v,l}(\mathbf{x}) = V_i \quad (2.23)$$

Σημειώνεται ότι, στο Παράρτημα Α, περιγράφονται αναλυτικά και οι εξισώσεις που αντιστοιχούν στις μετρήσεις μέτρων ρεύματος και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών για λόγους πληρότητας.

Επιπλέον των ανωτέρω εξισώσεων, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη μια απλοποιητική προσέγγιση του στατικού μοντέλου WLS, η οποία αποκαλείται μοντέλο DC (από τα αρχικά της έκφρασης “direct current”) [12]. Σύμφωνα με το προσεγγιστικό αυτό μοντέλο, όλα τα μέτρα τάσης λαμβάνονται ως γνωστά με μοναδιαία τιμή, με συνέπεια το διάνυσμα κατάστασης να περιλαμβάνει μόνο τις γωνίες τάσης των κόμβων, δηλαδή $\mathbf{x} = \boldsymbol{\delta} = (\delta_2, \dots, \delta_n)^T$. Επίσης, οι διαφορές των γωνιών τάσης δύο γειτονικών κόμβων θεωρούνται πολύ μικρές με συνέπεια οι τριγωνομετρικοί όροι να προσεγγίζονται με χρήση γραμμικών σχέσεων. Επιπλέον, παραλείπονται όλα τα εγκάρσια στοιχεία και οι ωμικές αντιστάσεις του υπό μελέτη συστήματος, παραδοχή που συνάδει με τα χαρακτηριστικά των συστημάτων μεταφοράς για τα οποία ισχύει $R/X \ll 1$, όπου R και X η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση σειράς ενός κλάδου, αντιστοίχως. Υπό αυτές τις συνθήκες λειτουργίας, εξετάζονται μόνον οι μετρήσεις που αφορούν ροές και εγχύσεις ενεργού ισχύος. Οι απλοποιημένοι τύποι για τις συναρτήσεις μέτρησης ροής ισχύος στον κλάδο $i - j$, $h_{fl}^{DC}(\mathbf{x})$, και έγχυσης ισχύος στον κόμβο i , $h_{inj}^{DC}(\mathbf{x})$, δίνονται ως ακολούθως [12]:

$$h_{fl}^{DC}(\mathbf{x}) = P_{ij} \approx \frac{\delta_i - \delta_j}{X_{ij}} \quad (2.24)$$

$$h_{inj}^{DC}(\mathbf{x}) = P_i \approx \sum_{k \in A(i)} P_{ik} \quad (2.25)$$

όπου P_{ik} η ροή ενεργού ισχύος μεταξύ των κόμβων i και k .

Βάσει των σχέσεων (2.24) και (2.25), το μοντέλο DC είναι γραμμικό, ιδιότητα που απλουστεύει τη μελέτη του συστήματος, ενώ, παράλληλα, παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τον τύπο και τη θέση των διαθέσιμων μετρήσεων. Εξάλλου, η παρατηρησιμότητα ενός ΣΗΕ είναι ανεξάρτητη από τις τιμές των παραμέτρων των κλάδων, καθώς και από την κατάσταση του ΣΗΕ [140]. Κατά συνέπεια, αναδεικνύεται η χρησιμότητά του μοντέλου DC για την ανάλυση παρατηρησιμότητας, καθώς και για την ανάπτυξη αλγόριθμων βέλτιστης επιλογής μετρήσεων στα ΣΗΕ.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, γίνεται χρήση των εξισώσεων (2.19), (2.21) και (2.23)–(2.24) για την ανάπτυξη των προτεινόμενων αλγόριθμων.

Θεωρώντας ως \mathbf{P}_{inj} και \mathbf{Q}_{inj} τα διανύσματα των μη γραμμικών συναρτήσεων που αντιστοιχούν στις m_{inj} μετρήσεις εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος, αντιστοίχως, \mathbf{P}_{fl} και \mathbf{Q}_{fl} τα αντίστοιχα διανύσματα για τις m_{fl} ροές ενεργού και αέργου ισχύος, αντιστοίχως, και \mathbf{V}_m το διάνυσμα των m_v μετρήσεων μέτρων τάσης, η Ιακωβιανή μήτρα $\mathbf{H}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times (2n-1)}$ λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{P}_{fl}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{fl}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{fl}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{fl}}{\partial \mathbf{V}} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{V}_m}{\partial \mathbf{V}} \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

όπου $\boldsymbol{\delta} = (\delta_2, \dots, \delta_n)^T$, $\mathbf{V} = (V_1, \dots, V_n)^T$ και $m_{inj} + m_{fl} + m_v = m$.

Οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων των μετρήσεων που εμπλέκονται στη σχέση (2.26) παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Επιπλέον, δίνονται και οι μερικές παράγωγοι που αντιστοιχούν στις μετρήσεις μέτρων ρεύματος και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών για λόγους πληρότητας.

2.2.3.2 Ιδιότητες και σημασία της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$

Η μήτρα κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ αποτελεί τη σημαντικότερη δομή του στατικού μοντέλου WLS αλλά και του απλοποιημένου μοντέλου DC, καθώς:

1. στη μελέτη της βασίζονται οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης παρατηρησιμότητας,
2. χαρακτηρίζεται ως μήτρα καλής κατάστασης με συνέπεια η παραγοντοποίηση της να αποτελεί μια αναγκαία και κρίσιμη υπολογιστική διαδικασία για την ορθή επίλυση της εκτίμησης κατάστασης,
3. ποσοτικοποιεί την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κατάστασης και
4. περιέχει όλες τις σχετικές πληροφορίες για τον τύπο, τη θέση και την ακρίβεια των διαθέσιμων μετρήσεων.

Το σημείο (α) αναλύεται στην επόμενη ενότητα, συνεπώς, η παρούσα ανάλυση ξεκινά από το σημείο (β). Η παραγοντοποίηση της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ είναι αναγκαία, καθώς αποτελεί εγγενώς μία μήτρα καλής κατάστασης, δηλαδή χαρακτηρίζεται από υψηλό δείκτη κατάστασης (condition number) ο οποίος, εν προκειμένω, ορίζεται ως $\kappa(\mathbf{G}(\mathbf{x})) \triangleq \|\mathbf{G}(\mathbf{x})\| \|\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{x})\| = \lambda_{\max} / \lambda_{\min}$, όπου λ_{\max} , λ_{\min} είναι η μέγιστη και η ελάχιστη ιδιοτιμή της μήτρας κέρδους, αντιστοίχως. Ο αριθμός $\kappa(\mathbf{G}(\mathbf{x}))$ αποτελεί μέτρο της

ιδιομορφίας (singularity) της μήτρας κέρδους και όσο αυξάνεται, τόσο πιο επισφαλής καθίσταται η αντιστρεψιμότητά της. Με δεδομένη την παρακάτω έκφραση της μήτρας κέρδους:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \mathbf{G}_i(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \left[\mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) \cdot w_{ii} \cdot \mathbf{H}_i(\mathbf{x}) \right] = \sum_{i=1}^m \left[\mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) \cdot \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \mathbf{H}_i(\mathbf{x}) \right] \quad (2.27)$$

όπου $\mathbf{G}_i(\mathbf{x})$ είναι η i -οστή συνιστώσα της μήτρας κέρδους, $\mathbf{H}_i(\mathbf{x})$ είναι i -οστή γραμμή της Ιακωβιανής μήτρας και w_{ii} ο συντελεστής στάθμισης της i -οστής μέτρησης, γίνεται προφανές ότι η συνύπαρξη μετρήσεων με μεγάλες διακυμάνσεις ως προς την ακρίβειά τους στο σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων προσδίδει ακραίες τιμές (αρνητικές και θετικές, υψηλής κατ'απόλυτο τιμής) στα στοιχεία της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ και, συνεπώς, αναφέρεται ως η κύρια αιτία της, εν γένει, κακής κατάστασης της [31]. Μια άλλη αιτία αυτής της εγγενούς ιδιότητας είναι η συχνή εμφάνιση γραμμών-κλάδων με χαμηλή εν σειρά σύνθετη αντίσταση [32]. Κατά συνέπεια, η επίλυση των κανονικών εξισώσεων στη μορφή (2.15) είναι προτιμητέα σε σχέση με τη μορφή (2.13), όπως έχει ήδη προαναφερθεί.

Η παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους έχει αποτελέσει πεδίο εκτενούς μελέτης, όπως εκτέθηκε στην υποενότητα 2.1.1, καθώς είναι λιγότερο αραιή σε σχέση με την Ιακωβιανή μήτρα, με συνέπεια η εξαγωγή των παραγόντων της να γίνεται με τρόπο ώστε να διατηρούνται, κατά το μέγιστο δυνατό, αραιοί. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω γραμμοπράξεων (elementary row operations) που αποδίδουν γραμμοϊσοδύναμες (row equivalent) μορφές της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ πριν από την παραγοντοποίηση και κατάλληλων αλγόριθμων κατά τη διαδικασία αυτής [12]. Συγκεκριμένα, για τη μέθοδο Cholesky, η αραιότητα της μήτρας \mathbf{L} διατηρείται μέσω του αλγόριθμου ελαχίστου βαθμού ή Tinney-2 (minimum degree or Tinney-2 ordering) από όνομα του εισηγητή της [150]. Η αραιότητα της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ πλήττεται, κατά κύριο λόγο, από την παρουσία πολλών μετρήσεων έγχυσης ισχύος, καθώς κατά τον υπολογισμό της βάσει της σχέσης (2.27) εισάγουν πολλά μη μηδενικά στοιχεία σε θέσεις της μήτρας που σχετίζονται με τον κόμβο που μετρείται, πράγμα που δε συμβαίνει για τους άλλους τύπους μετρήσεων [12].

Εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα της μήτρας $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ είναι ότι η αντίστροφη της, $\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{x})$, ταυτίζεται με την μήτρα συνδιακύμανσης (covariance matrix) του στατικού μοντέλου WLS. Δεδομένου ότι το στατικό μοντέλο WLS αποδίδει έναν αμερόληπτο εκτιμητή (unbiased estimator) του διάνυσματος κατάστασης \mathbf{x} , ισχύει $\mathbf{E}[\hat{\mathbf{x}}] = \mathbf{x}$ ή, περιφραστικά, ότι η μέση τιμή των εκτιμήσεων κατάστασης του στατικού μοντέλου WLS που θα προέκυπταν για διαφορετικές εκδοχές, από άποψη τιμών, του ιδίου συνόλου διαθέσιμων μετρήσεων είναι ίση με την πραγματική κατάσταση του συστήματος [14]. Επιπλέον, επιλύοντας την εξίσωση (2.10), αφού έχει γραμμικοποιηθεί το διάνυσμα $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ στην περιοχή της εκτίμησης $\hat{\mathbf{x}}$, αποδεικνύεται ότι η μήτρα συνδιακύμανσης, έστω $\mathbf{C}(\hat{\mathbf{x}})$, ισούται με:

$$\mathbf{C}(\hat{\mathbf{x}}) = \text{cov}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{E} \left[(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) \right] = \left[\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}) \mathbf{W} \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) \right]^{-1} = \mathbf{G}^{-1}(\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.28)$$

όπου $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ είναι το σφάλμα της εκτίμησης του διάνυσματος κατάστασης. Σημειώνεται ότι, αφού βασίζεται σε γραμμική προσέγγιση, η έκφραση (2.28) είναι προσεγγιστική και λογίζεται ως έγκυρη για μικρά σφάλματα [14].

Συνεπώς, τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας $\mathbf{G}^{-1}(\hat{\mathbf{x}})$ ταυτίζονται με τις διασπορές των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης, δηλαδή $\sigma_{\hat{x}_i} = [\mathbf{G}^{-1}(\hat{\mathbf{x}})]_{ii}$, όπου \hat{x}_i είναι η εκτίμηση της i -οστής μεταβλητής κατάστασης. Έτσι, η μήτρα κέρδους του στατικού μοντέλου WLS συνιστά ένα μέτρο της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης. Στο Κεφάλαιο 4, όπου η ακρίβεια του στατικού μοντέλου WLS αναλύεται στο πλαίσιο της πληροφορίας του Fisher (Fisher Information), αποδεικνύεται ότι η μήτρα $\mathbf{C}(\hat{\mathbf{x}})$ ποσοτικοποιεί τις ελάχιστες δυνατές διασπορές με τις οποίες μπορούν να εκτιμηθούν οι μεταβλητές κατάστασης για ένα δεδομένο σύνολο διαθέσιμων μετρήσεων.

Τέλος, το πληροφοριακό περιεχόμενο της μήτρας κέρδους είναι επαρκές προκειμένου να υπάρχει πλήρης γνώση σχετικά με τις διαθέσιμες μετρήσεις σε ένα υπό μελέτη σύστημα. Αποδεικνύεται ότι, στο πλαίσιο του μοντέλου DC, η Ιακωβιανή μήτρα και, άρα, η μήτρα κέρδους ενός συστήματος εκφράζονται συναρτησίως της μήτρας πρόσπτωσης του, η οποία κωδικοποιεί τον τρόπο διασύνδεσης κλάδων και κόμβων. Έτσι, σε πολυάριθμες μελέτες, όπως οι [125], [130] και [151], η i -οστή γραμμή της Ιακωβιανής μήτρας στο πλαίσιο του μοντέλου DC κωδικοποιεί με μονοσήμαντο τρόπο τον τύπο και τα τοπολογικά χαρακτηριστικά της i -οστής μέτρησης. Επιπλέον, βάσει της σχέσης (2.27), για τον υπολογισμό της $\mathbf{G}_i(\mathbf{x})$ που αντιστοιχεί στην i -οστή μέτρηση, υπεισέρχεται και η ακρίβεια της μέσω του συντελεστή στάθμισης w_{ii} . Κατά συνέπεια, η μήτρα κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$ ως άθροισμα των επιμέρους $\mathbf{G}_i(\mathbf{x}), i = 1, \dots, m$ περιέχει το σύνολο των σχετικών πληροφοριών. Η ιδιότητα αυτή την καθιστά πολύτιμο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση σχεδίασης μετρητικών υποδομών στα ΣΗΕ.

2.3 Ανάλυση Παρατηρησιμότητας

Με βάση την ανασκόπηση στην υποενότητα 2.1.4, οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης παρατηρησιμότητας έχουν πλέον μονοπωλήσει το ενδιαφέρον των σχετικής ερευνητικής δραστηριότητας. Στην παρούσα ενότητα, αφού αναλυθεί η έννοια της παρατηρησιμότητας και διατυπωθούν οι αντίστοιχες συνθήκες εκπλήρωσής της, θα περιγραφεί αναλυτικά η αριθμητική μέθοδος που πρωτοδημοσιεύτηκε στην αναφορά [133] και στην οποία βασίστηκε η ανάπτυξη μέρους των προτεινόμενων αλγόριθμων του παρόντος πονήματος.

2.3.1 Ορισμός της παρατηρησιμότητας

Όπως προαναφέρθηκε, ένα σύστημα θεωρείται παρατηρήσιμο όταν, δεδομένου ενός συνόλου διαθέσιμων μετρήσεων, μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης, εν προκειμένω το γραμμικοποιημένο σύστημα (2.16). Γενικά, τα αριθμητικά μοντέλα ανάλυσης παρατηρησιμότητας αποτελούν τη μαθηματική έκφραση των αντίστοιχων τοπολογικών προσεγγίσεων, χωρίς, όμως, να μπορεί να εξασφαλιστεί η ισοδυναμία τους. Σύμφωνα με την τεχνική έκθεση του ινστιτούτου IEEE [152], διακρίνονται δύο είδη παρατηρησιμότητας. Η τοπολογική παρατηρησιμότητα εξακριβώνεται μέσω της θεωρίας γράφων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι του πραγματικού μοντέλου του υπό μελέτη συστήματος και οι συντελεστές στάθμισης των μετρήσεων, ενώ δεν περιλαμβάνονται αριθμητικές πράξεις κινήτης υποδιαστολής. Αντιθέτως, η αριθμητική παρατηρησιμότητα εξακριβώνεται μέσω αριθμητικών υπολογισμών σχετικών με την τριγωνοποίηση της μήτρας κέρδους ή της Ιακωβιανής μήτρας του υπό μελέτη συστήματος.

Η παρατηρησιμότητα στα ΣΗΕ ορίζεται με αυστηρό τρόπο στο πλαίσιο τόσο της τοπολογικής όσο και της αριθμητικής εκδοχής της [12], [29]. Έτσι, σύμφωνα με την τοπολογική προσέγγιση, ένα σύστημα καλείται παρατηρήσιμο όταν μπορεί να σχηματιστεί ένα επικάλυπτον δέντρο (spanning tree) αποτελούμενο από κλάδους του συστήματος για τους οποίους διατίθενται μετρήσεις ροής ισχύος, το οποίο να είναι πλήρους βαθμού, δηλαδή να περιλαμβάνει όλους τους κόμβους του συστήματος. Αν δεν μπορεί να εκπληρωθεί αυτή η συνθήκη, το σύστημα θεωρείται μη παρατηρήσιμο και διαχωρίζεται σε παρατηρήσιμες νησίδες, που μπορεί να εκφυλίζονται ακόμη και σε απομονωμένους κόμβους.

Σύμφωνα με την αριθμητική προσέγγιση, ένα σύστημα είναι παρατηρήσιμο όταν η Ιακωβιανή του μήτρα είναι πλήρους βαθμού (full rank) ή, ισοδύναμα, η μήτρα κέρδους του είναι πλήρους βαθμού (ή, ισοδύναμα, αντιστρέψιμη), δεδομένου ότι το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} ορίζεται όπως στην υποενότητα 2.2.3. Ο βαθμός (rank) μίας μήτρας ορίζεται ως η διάσταση του διανυσματικού χώρου που μπορεί να παραχθεί από τα διανύσματα-στήλες της, δηλαδή ισούται με τον αριθμό των γραμμικώς ανεξάρτητων στηλών της (αποδεικνύεται ότι είναι ίσος με τον αντίστοιχο αριθμό των γραμμών της). Κατά συνέπεια, για μια Ιακωβιανή μήτρα πλήρους βαθμού, ισχύει ότι $\text{rank}\{\mathbf{H}(\mathbf{x})\} = \min\{m, 2n - 1\}$, δηλαδή ο βαθμός της μήτρας είναι ίσος με τη μικρότερη εκ των δύο διαστάσεων της. Για υπερκαθορισμένα (overdetermined) συστήματα κανονικών εξισώσεων, όπου ο αριθμός των μετρήσεων m είναι μεγαλύτερος του αριθμού των μεταβλητών κατάστασης, η συνθήκη πλήρους βαθμού είναι $\text{rank}\{\mathbf{H}(\mathbf{x})\} = 2n - 1$. Ισοδύναμα, πληροúται η εξής συνθήκη:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (2.29)$$

όπου $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{2n-1})^T \in \mathbb{R}^{2n-1}$.

Γενικά, η αντιστρεψιμότητα της μήτρας κέρδους αποτελεί την πιο συνηθισμένη συνθήκη για τον έλεγχο της κατάστασης παρατηρησιμότητας ενός συστήματος.

Ο Monticelli [130] έδωσε μια πρακτική ερμηνεία της έννοιας της παρατηρησιμότητας: αν κάθε ροή ισχύος σε ένα σύστημα μπορεί να αποτιμηθεί μέσω των διαθέσιμων μετρήσεων, τότε το σύστημα καλείται παρατηρήσιμο. Ισοδύναμα, όταν όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις είναι μηδενικής τιμής, τότε κι όλες οι ροές ισχύος θα είναι μηδενικές. Στο πλαίσιο του αριθμητικού μοντέλου του, το οποίο βασίστηκε στο μοντέλο DC, διετύπωσε τους εξής σχετικούς αυστηρούς ορισμούς:

- Ένα σύστημα καλείται παρατηρήσιμο όταν πληρούνται ταυτόχρονα οι συνθήκες $\mathbf{H}_\delta \boldsymbol{\delta}_\alpha = \mathbf{0}$ και $\mathbf{A}^T \boldsymbol{\delta}_\alpha = \mathbf{0}$, όπου \mathbf{H}_δ η Ιακωβιανή μήτρα του μοντέλου DC που περιλαμβάνει αποκλειστικά τις συναρτήσεις μετρήσεων (2.24) και (2.25), \mathbf{A} η μήτρα πρόπτωσης του συστήματος και $\boldsymbol{\delta}_\alpha = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n)^T$ το επαυξημένο διάνυσμα κατάστασης χωρίς να έχει θεωρηθεί γωνία αναφοράς.
- Κάθε διάνυσμα κατάστασης $\boldsymbol{\delta}_\alpha^*$ για το οποίο ισχύουν $\mathbf{H}_\delta \boldsymbol{\delta}_\alpha^* = \mathbf{0}$ και $\mathbf{A}^T \boldsymbol{\delta}_\alpha^* \neq \mathbf{0}$, καλείται μη παρατηρήσιμη κατάσταση.
- Θεωρώντας τη μη παρατηρήσιμη κατάσταση $\boldsymbol{\delta}_\alpha^*$, κάθε μη μηδενική ροή ισχύος $\delta_i^* \neq 0$ που προκύπτει από τον υπολογισμό του διανύσματος ροών ισχύος του συστήματος $\mathbf{P}_{\delta,fl} = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\delta}_\alpha^*$, χαρακτηρίζει τον αντίστοιχο κλάδο ως μη παρατηρήσιμο.

Στο πλαίσιο του παρόντος πονήματος, όλες οι μελέτες ανάλυσης παρατηρησιμότητας στηρίχθηκαν στην αριθμητική μέθοδο που δημοσιεύτηκε στην αναφορά [133]. Ακολούθως, δίνεται μια αναλυτική περιγραφή της εν λόγω μεθόδου με βάση την αναφορά [153].

2.3.2 Το μοντέλο μειωμένης τάξης (reduced model)

Στο πλαίσιο του μοντέλου μειωμένης τάξης, χρησιμοποιείται ένα μικρότερο σύστημα σε σύγκριση με το αρχικό, θεωρώντας το ίδιο σύνολο διαθέσιμων μετρήσεων. Η θεμελίωσή του βασίζεται σε κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, ενώ οι εξισώσεις που το περιγράφουν προέρχονται από τη συνθήκη (2.29).

2.3.2.1 Γενική μορφή Ιακωβιανής μήτρας για ανάλυση παρατηρησιμότητας

Για τις μελέτες ανάλυσης παρατηρησιμότητας, η Ιακωβιανή μήτρα μπορεί να λάβει την απλοποιημένη μορφή (2.30). Για την εξαγωγή της, θεωρείται το “flat voltage profile”, ενώ αγνοούνται, μόνο, τα εγκάρσια στοιχεία του υπό μελέτη συστήματος. Επιπλέον, θεωρείται δεδομένη η ύπαρξη τουλάχιστον μιας μέτρησης μέτρου τάσης. Όπως φαίνεται, κάθε τύπος μέτρησης έχει μη μηδενικές τιμές σε συγκεκριμένες θέσεις της γραμμής στην οποία αντιστοιχεί, ενώ οι μετρήσεις εγχύσεων συνεισφέρουν τις λιγότερο αραιές γραμμές κατά τη δόμηση της μήτρας.

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \cdots & \delta_i & \cdots & \delta_j & \cdots & \delta_k & \cdots & \cdots & V_i & \cdots & V_j & \cdots & V_k & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & -b_{ij} & \cdots & b_{ij} & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & g_{ij} & \cdots & -g_{ij} & \cdots & 0 & \cdots & P_{ij} \\ \cdots & -(b_{ij} + b_{ik} + \cdots) & \cdots & b_{ij} & \cdots & b_{ik} & \cdots & \cdots & (g_{ij} + g_{ik} + \cdots) & \cdots & -g_{ij} & \cdots & -g_{ik} & \cdots & P_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & -g_{ij} & \cdots & g_{ij} & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & -b_{ij} & \cdots & b_{ij} & \cdots & 0 & \cdots & Q_{ij} \\ \cdots & -(g_{ij} + g_{ik} + \cdots) & \cdots & g_{ij} & \cdots & g_{ik} & \cdots & \cdots & -(b_{ij} + b_{ik} + \cdots) & \cdots & b_{ij} & \cdots & b_{ik} & \cdots & Q_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & & & & & 1 & & & & & & V_i \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

2.3.2.2 Νησιδοποίηση συστήματος και είδη παρατηρησιμότητας

Αρχικά, το υπό μελέτη σύστημα χωρίζεται σε r υποσυστήματα καθένα από τα οποία περιλαμβάνει n_i

κόμβους ώστε $\sum_{i=1}^r n_i = n$. Το i -οστό υποσύστημα θεωρείται ότι σχηματίζει μία παρατηρήσιμη

νησίδα $P - \delta$, όταν το υποσύνολο των μετρήσεων ενεργού ισχύος που περιλαμβάνει, καθιστά δυνατή την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης των γωνιών των κόμβων του, έστω $\hat{\delta}_i$, διαστάσεων

$(n_i - 1) \times 1$, με δεδομένη μια γωνία αναφοράς τοπικού κόμβου. Αντίστοιχα, το i -οστό υποσύστημα

θεωρείται ότι σχηματίζει μία παρατηρήσιμη νησίδα $Q - V$, όταν το υποσύνολο των μετρήσεων αέργου

ισχύος που περιλαμβάνει με την προσθήκη μίας μέτρησης μέτρου τάσης, καθιστούν δυνατή την εκτίμηση

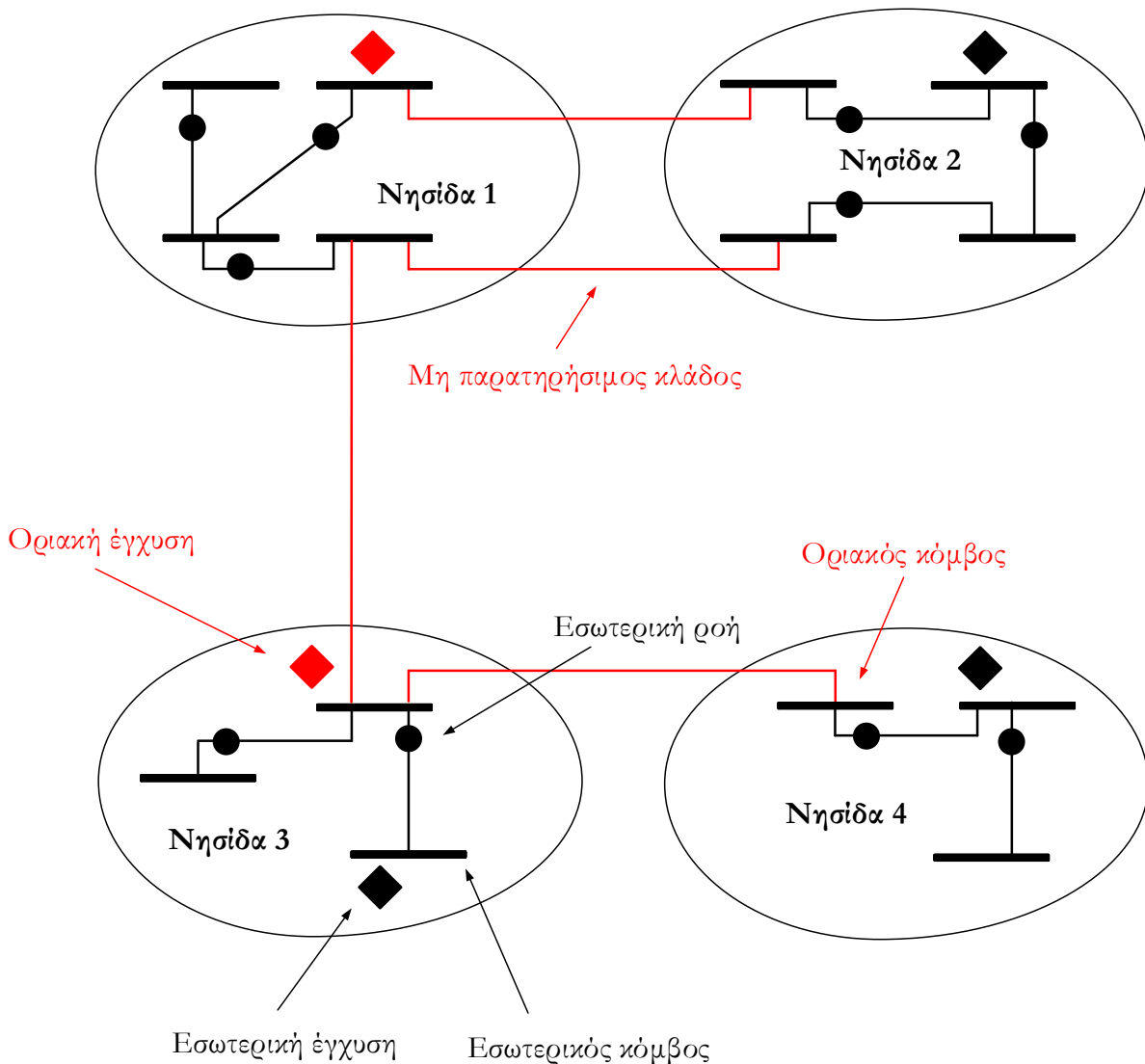
των μέτρων τάσης των κόμβων του, έστω \hat{V}_i , διαστάσεων $n_i \times 1$, με δεδομένη την επιλογή ενός τοπικού

κόμβου αναφοράς. Τέλος, το ίδιο υποσύστημα θεωρείται ότι σχηματίζει μία πλήρως παρατηρήσιμη

νησίδα, όταν το σύνολο των μετρήσεων ενεργού και αέργου ισχύος που περιλαμβάνει με την προσθήκη

μίας μέτρησης τάσης, καθιστούν δυνατή την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης $\hat{x}_i = [\hat{V}_i^T, \hat{\delta}_i^T]^T$, διαστάσεων $(2n_i - 1) \times 1$, ως προς έναν τοπικό κόμβο αναφοράς.

Ακολουθώντας τις βασικές αρχές της τοπολογικής παρατηρησιμότητας, στο Σχήμα 2.3, απεικονίζεται ένα παράδειγμα διαχωρισμού ενός συστήματος σε τέσσερις μη επικαλυπτόμενες παρατηρήσιμες νησίδες με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ροών ισχύος. Έτσι, κάθε κλάδος για τον οποίο δε διατίθεται μέτρηση ροής, καλείται μη παρατηρήσιμος. Οι κόμβοι καλούνται οριακοί, σε περίπτωση που πρόσκεινται τουλάχιστον σε έναν μη παρατηρήσιμο κλάδο, ειδήλλως λέγονται εσωτερικοί. Με αντίστοιχο τρόπο, χαρακτηρίζονται οι μετρήσεις εγχύσεων και ροών ισχύος.



Σχήμα 2.3: Παράδειγμα διαχωρισμού ενός συστήματος σε παρατηρήσιμες νησίδες με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ροών ισχύος και χαρακτηρισμός των κόμβων, των κλάδων και των διαθέσιμων μετρήσεων.

Για την εξαγωγή του μοντέλου μειωμένης τάξης του συστήματος, μεσολαβεί ένα στάδιο συγχώνευσης των νησίδων βάσει ροών, όπως αυτές του Σχήματος 2.3. Για τη συγχώνευση, αν και όπου είναι εφικτή, χρησιμοποιούνται καταλλήλως οι διαθέσιμες μετρήσεις οριακών εγχύσεων. Αποτέλεσμά της είναι ο

σχηματισμός «υπερκόμβων» (supernodes), δηλαδή παρατηρήσιμων νησίδων με βάση τις μετρήσεις ροών ισχύος. Έτσι, οι νησίδες ροών 1 και 2 συγχωνεύονται σε έναν υπερκόμβο λόγω της οριακής έγχυσης.

Έχοντας συγκροτήσει όλους τους υπερκόμβους-υποσυστήματα, το σύστημα των εξισώσεων (2.8) για την ανωτέρω μοντελοποίηση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_1 &= \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_1) + \mathbf{e}_1 \\ &\vdots \\ \mathbf{z}_i &= \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{e}_i \\ &\vdots \\ \mathbf{z}_r &= \mathbf{h}_r(\mathbf{x}_r) + \mathbf{e}_r \\ \mathbf{z}_c &= \mathbf{h}_c(\mathbf{x}_c) + \mathbf{e}_c \end{aligned} \quad (2.31)$$

όπου \mathbf{x}_i , \mathbf{z}_i , \mathbf{h}_i και \mathbf{e}_i είναι τα διανύσματα κατάστασης, μετρήσεων, συναρτήσεων των μετρήσεων και θορύβου που περιγράφουν το i -οστό υποσύστημα, αντιστοίχως. Επιπλέον, το διάνυσμα \mathbf{z}_c περιλαμβάνει τις τιμές όλων των οριακών μετρήσεων όπου \mathbf{h}_c και \mathbf{e}_c είναι τα αντίστοιχα διανύσματα συναρτήσεων και θορύβου, ενώ \mathbf{x}_c είναι το διάνυσμα κατάστασης που περιλαμβάνει τα μέτρα και τις γωνίες των οριακών κόμβων.

Η Ιακωβιανή μήτρα για το σύστημα των εξισώσεων (2.31) λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_2 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{H}_r \\ \hline & & & \mathbf{H}_c \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

όπου \mathbf{H}_i είναι η Ιακωβιανή μήτρα του i -οστού υποσυστήματος και \mathbf{H}_c είναι η Ιακωβιανή μήτρα η οποία δομείται αποκλειστικά από όλες τις μετρήσεις μέτρων τάσης, τις μετρήσεις ροών ισχύος σε κλάδους-γραμμές διασύνδεσης (tie-lines) μεταξύ των νησίδων και τις μετρήσεις εγχύσεων ισχύος σε οριακούς κόμβους.

Κατά συνέπεια, η συνθήκη (2.29), δεδομένης της μορφής (2.32), διαμορφώνεται ως εξής:

$$\mathbf{H}_i \boldsymbol{\lambda}_i = \mathbf{0}, \quad i = 1, \dots, r \quad (2.33)$$

$$\mathbf{H}_c \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0} \quad (2.34)$$

όπου $\boldsymbol{\lambda}_i$ είναι το i -οστό στοιχείο του διανύσματος $\boldsymbol{\lambda} = (\boldsymbol{\lambda}_1^T, \boldsymbol{\lambda}_2^T, \dots, \boldsymbol{\lambda}_r^T)^T$ που αφορά το σύνολο των μη επικαλυπτόμενων υποσυστημάτων.

Η i -οστή εξίσωση του συστήματος (2.33) μπορεί να παράσχει μία από τις παρακάτω λύσεις σχετικά με την παρατηρησιμότητα του i -οστού υποσυστήματος:

$$\begin{aligned}
\text{Για το } P - \delta \text{ πρόβλημα: } \boldsymbol{\lambda}_i &= \mu_i \mathbf{1}_{n_i \times 1} \text{ με } \mu_i \in \mathbb{R} \\
\text{Για το } Q - V \text{ πρόβλημα: } \boldsymbol{\lambda}_i &= \nu_i \mathbf{1}_{n_i \times 1} \text{ με } \nu_i \in \mathbb{R} \\
\text{Για το πλήρες πρόβλημα: } \boldsymbol{\lambda}_i &= \begin{bmatrix} \mu_i \mathbf{1}_{n_i \times 1} \\ \nu_i \mathbf{1}_{n_i \times 1} \end{bmatrix} \text{ με } \mu_i, \nu_i \in \mathbb{R}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

2.3.2.3 Θεμελίωση του μοντέλου

Για την ανάλυση της παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη συστήματος, εισάγεται μια μήτρα, έστω \mathbf{K} , με τόσες γραμμές όσες έχει η μήτρα \mathbf{H}_c . Αναφορικά με τον αριθμό των στηλών της, θεωρούνται είτε $r-1$, είτε r ή $2n-1$ στήλες αναλόγως αν μελετάται το $P-\delta$, το $Q-V$ ή το πλήρες πρόβλημα, αντίστοιχα. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, έστω ότι η γωνία αναφοράς του συστήματος περιλαμβάνεται στο 1ο υποσύστημα, οπότε, $\mu_1 = 0$. Συμβολίζοντας τη j -οστή στήλη της μήτρας \mathbf{H}_c με $\mathbf{H}_{c,j}$, κάθε στήλη της μήτρας \mathbf{K} θα υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
\text{Για το } P - \delta \text{ πρόβλημα: } \mathbf{K}_{i-1} &= \sum_{j \in M_c(i)} \mathbf{H}_{c,j}, \quad i = 2, \dots, r \\
\text{Για το } Q - V \text{ πρόβλημα: } \mathbf{K}_i &= \sum_{j \in N_c(i)} \mathbf{H}_{c,j}, \quad i = 1, \dots, r \\
\text{Για το πλήρες πρόβλημα: } &\begin{cases} \mathbf{K}_{i-1} = \sum_{j \in M_c(i)} \mathbf{H}_{c,j}, \quad i = 2, \dots, r \\ \mathbf{K}_i = \sum_{j \in N_c(i)} \mathbf{H}_{c,j}, \quad i = 1, \dots, r \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

όπου $M_c(i)$ και $N_c(i)$ είναι τα υποσύνολα των στηλών της μήτρας \mathbf{H}_c που αντιστοιχούν στις γωνίες και τα μέτρα των τάσεων των κόμβων του i -οστού υποσυστήματος, αντίστοιχως.

Δεδομένων των λύσεων που διατυπώνονται στις σχέσεις (2.35), η εξίσωση (2.34), με χρήση της μήτρας \mathbf{K} , μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{0} \tag{2.37}$$

όπου το διάνυσμα \mathbf{y} ορίζεται ανάλογα με το είδος του προβλήματος ως εξής:

$$\begin{aligned}
\text{Για το } P - \delta \text{ πρόβλημα: } \mathbf{y} &= (\mu_2, \mu_3, \dots, \mu_r)^T \\
\text{Για το } Q - V \text{ πρόβλημα: } \mathbf{y} &= (\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_r)^T \\
\text{Για το πλήρες πρόβλημα: } \mathbf{y} &= (\mu_2, \mu_3, \dots, \mu_r, \nu_1, \nu_2, \dots, \nu_r)^T
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Βάσει της σχέσης (2.37), η μήτρα \mathbf{K} μπορεί να θεωρηθεί ως η Ιακωβιανή μήτρα του μοντέλου μειωμένης τάξης του υπό μελέτη συστήματος για το αυτό σύνολο μετρήσεων. Όπως προαναφέρθηκε, κάθε υποσύστημα αποτελεί έναν υπερκόμβο, ενώ κάθε κλάδος διασύνδεσης μεταξύ αυτών αποτελεί κλάδο του ελαττωμένου μοντέλου. Οι μετρήσεις του μειωμένου μοντέλου προκύπτουν από μετασχηματισμό των διαθέσιμων μετρήσεων ως εξής:

- Οι μετρήσεις μέτρων τάσης στους κόμβους ενός υποσυστήματος μετασχηματίζονται σε μία ισοδύναμη μέτρηση μέτρου τάσης του υπερκόμβου.

- Οι μετρήσεις ροών σε διασυνδεδετικούς κλάδους μετασχηματίζονται σε μετρήσεις ροών ισχύος κλάδων του ελαττωμένου μοντέλου.
- Η μέτρηση εγχύσεων σε οριακό κόμβο του i -οστού υποσυστήματος-υπερκόμβου μετασχηματίζεται σε μέτρηση του αθροίσματος των ροών των κλάδων του ελαττωμένου μοντέλου μεταξύ του συγκεκριμένου υπερκόμβου και των γειτονικών του υπερκόμβων, με τους οποίους διασυνδέεται μέσω του οριακού κόμβου.

Αποδεικνύεται ότι εάν η Ιακωβιανή μήτρα \mathbf{H} είναι πλήρους βαθμού, τότε και η αντίστοιχη Ιακωβιανή μήτρα \mathbf{K} είναι, επίσης, πλήρους βαθμού και αντιστρόφως. Επίσης, το έλλειμμα βαθμού (rank deficiency ή nullity) της μήτρας \mathbf{H} είναι ίσο με το έλλειμμα βαθμού της μήτρας \mathbf{K} .

Συνεπώς, η ανάλυση παρατηρησιμότητας με το μοντέλο μειωμένης τάξης ανάγεται σε αριθμητική μελέτη της μήτρας \mathbf{K} και το πρόβλημα μπορεί να εξεταστεί είτε στις επιμέρους ($P - \delta$ και $Q - V$) είτε στην πλήρη μορφή του.

2.4 Επεξεργαστής Τοπολογίας

Όπως αναφέρθηκε στις υποενότητες 2.1.1 και 2.1.3, ο επεξεργαστής τοπολογίας αποτελεί μια διαδικασία μεγάλης σημασίας τόσο σε επίπεδο υποσταθμού στα συστήματα μεταφοράς όσο και στα δίκτυα διανομής με έντονο το στοιχείο της διεσπαρμένης παραγωγής. Στην παρούσα ενότητα, αφού αναφερθούν κάποια στοιχεία σχετικά με την έννοια του επεξεργαστή τοπολογίας και την επίδραση των σφαλμάτων τοπολογίας στην εκτίμηση κατάστασης, θα αναλυθεί μια σχετική πιθανοτική μέθοδος, η οποία πρωτοδημοσιεύτηκε στην αναφορά [58] με εφαρμογή στα συστήματα μεταφοράς και αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη σχετικού αλγόριθμου με στόχο την εφαρμογή του και σε επίπεδο διανομής.

2.4.1 Η κατάσταση των διακοπών και τα σφάλματα τοπολογίας

Ο επεξεργαστής τοπολογίας δικτύου (network topology processor) αποτελεί μια βασική υπολογιστική διαδικασία σε επίπεδο υποσταθμών μεταφοράς, κατά την οποία το δικτυακό μοντέλο ζυγών-διακοπτικών μέσων (bus section/switch model) μετατρέπεται στο μοντέλο κόμβων-κλάδων (node/branch model) με επακόλουθο στόχο την ανάλυση παρατηρησιμότητας και την εκτίμηση κατάστασης. Η ορθή μετατροπή προϋποθέτει ότι οι καταγραφείσες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων είναι σωστές, συμπεριλαμβανομένων διακοπών ισχύος (circuit breakers), απομόνωσης (isolators) και διασύνδεσης (bus-tie switches). Τυχόν σφάλματα ως προς την κατάσταση των διακοπών, δηλαδή σε δεδομένα λογικής τιμής (1 – κλειστός διακόπτης, 0 – ανοικτός διακόπτης), οδηγούν σε εσφαλμένη εικόνα για την πραγματική τοπολογία ή μοντέλο του συστήματος/δικτύου, με συνέπεια οι διαδικασίες που έπονται να είναι αδύνατο να εκτελεστούν σωστά. Μεθοδολογίες που δεν περιλαμβάνουν μοντελοποίηση των διακοπτικών μέσων, όπως στις αναφορές [54] ή [154], δεν είναι εξίσου αποτελεσματικές ως προς τον εντοπισμό εσφαλμένων λογικών δεδομένων (logical bad data) όπως στην περίπτωση των αναλογικών δεδομένων. Αυτό το στοιχείο συνιστά ένα σημαντικό μειονέκτημα, καθώς τα τοπολογικά σφάλματα επιδρούν ιδιαίτερα αρνητικά στον υπολογισμό των υπολοίπων (residuals) των μετρήσεων, πολύ εντονότερα σε σύγκριση με τυχόν σφάλματα στις παραμέτρους του συστήματος, π.χ. σε στοιχεία γραμμών. Συνεπώς, αξιόπιστες αναλογικές μετρήσεις μπορεί να εληφθούν ως εσφαλμένες και να απορριφθούν, ενώ μπορεί να παρατηρηθούν και προβλήματα σύγκλισης του αλγόριθμου επίλυσης της εκτίμησης κατάστασης. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία θεωρείται μεροληπτική και τα αποτελέσματα μη αποδεκτά.

Στα σύγχρονα δίκτυα διανομής, οι χειρισμοί επαναδιαμόρφωσης είναι πολύ συχνοί με συνέπεια η γνώση της κατάστασης πολλών διακοπών να είναι ουσιαστικά επισφαλής. Παράλληλα, η χαμηλή διαθεσιμότητα τηλεμετρούμενων αναλογικών δεδομένων κλιμακώνει ακόμη περισσότερο την αβεβαιότητα στην επεξεργασία τοπολογίας τους. Έτσι, μια κατάλληλη πρακτική είναι η υπόθεση μίας αρχικής τοπολογίας για την εκκίνηση της εκτίμησης κατάστασης σε ένα υπό μελέτη δίκτυο και, κατόπιν, η ταυτοποίηση τυχόν αλλαγών στην τοπολογία κατά την εκτέλεση της διαδικασίας [117]. Σε αυτό το πλαίσιο, η γενικευμένη εκτίμηση κατάστασης αποτελεί μια απόλυτα ταιριαστή λύση για τη μοντελοποίηση γεννητριών, γραμμών, φορτίων και διεσπαρμένων μονάδων που τίθενται εκτός ή εντός δικτύου με μεγάλη συχνότητα [155], [156], [58].

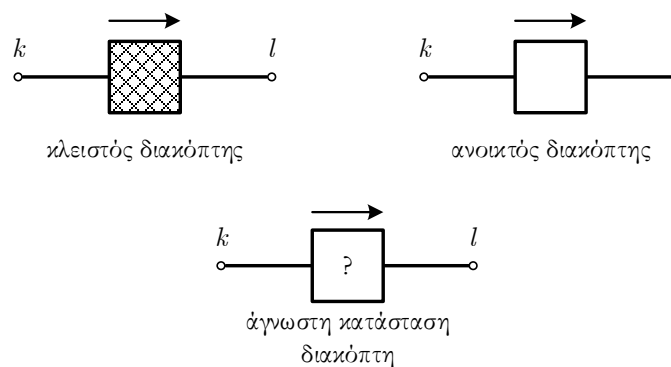
Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αναπτύχθηκε μια παραλλαγή της πιθανοτικής μεθόδου [58] για την ταυτοποίηση της πραγματικής τοπολογίας δικτύων διανομής. Η μέθοδος περιγράφεται αναλυτικά με βάση την αναφορά [157] και, επιπλέον, διευκρινίζεται το ζήτημα της εφαρμοσιμότητας της στα δίκτυα διανομής.

2.4.2 Πιθανοτική μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας

Κεντρική ιδέα της μεθόδου είναι η επαύξηση του διανύσματος κατάστασης ώστε να περιλαμβάνει τις καταστάσεις και τις ροές ισχύος των διακοπτικών μέσων και η εισαγωγή σχετικών «χαλαρών» λειτουργικών περιορισμών, μέσω των οποίων μοντελοποιούνται οι πρόσθετες μεταβλητές κατάστασης ως τ.μ. με τις αντίστοιχες, θεωρούμενες αβεβαιότητες τους. Συνεπώς, πρόκειται για μια μέθοδο συνεκτίμησης των λογικών και των αναλογικών μεταβλητών κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος. Η ταυτοποίηση εσφαλμένων καταστάσεων διακοπτικών μέσων και, ακολούθως, η διόρθωσή τους γίνεται μέσω της εξέτασης των υπολοίπων των διαθέσιμων μετρήσεων. Τέλος, η προσέγγιση εξαλείφει την ανάγκη για επαναληπτικές εκτελέσεις του αλγόριθμου επίλυσης κατά την εκκίνηση των οποίων ήταν αναγκαία η υπόθεση διαφορετικής αρχικής τοπολογίας για το υπό μελέτη σύστημα.

2.4.2.1 Μοντελοποίηση διακοπτικών μέσων

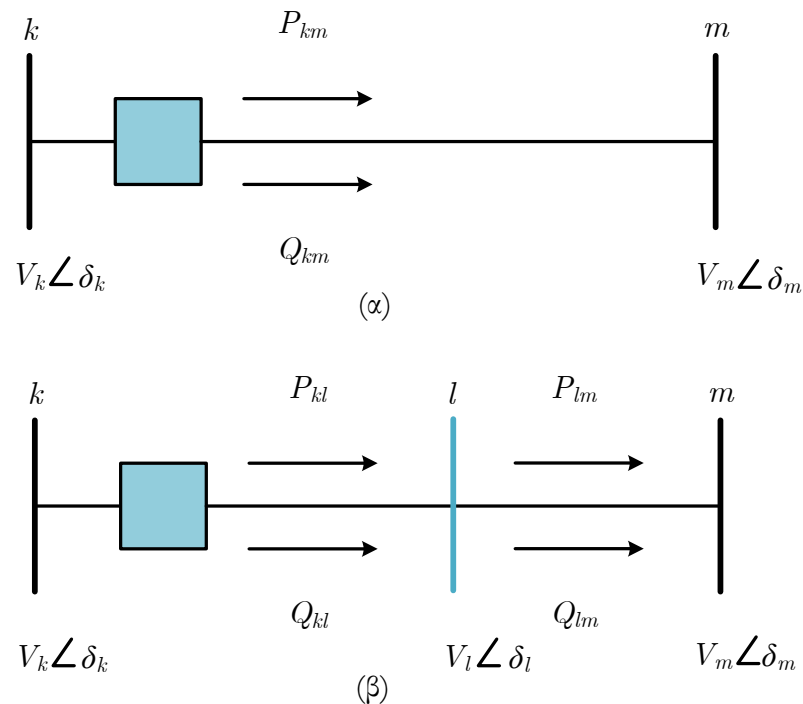
Ένα διακοπτικό μέσο που μεσολαβεί μεταξύ δυο κόμβων, έστω k και l , μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι είτε ανοικτό, είτε κλειστό ή ότι η κατάστασή του είναι άγνωστη και δεν μπορεί να ταυτοποιηθεί με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Οι τρεις πιθανές καταστάσεις ενός διακοπτικού μέσου μεταξύ δυο τυχαίων κόμβων.

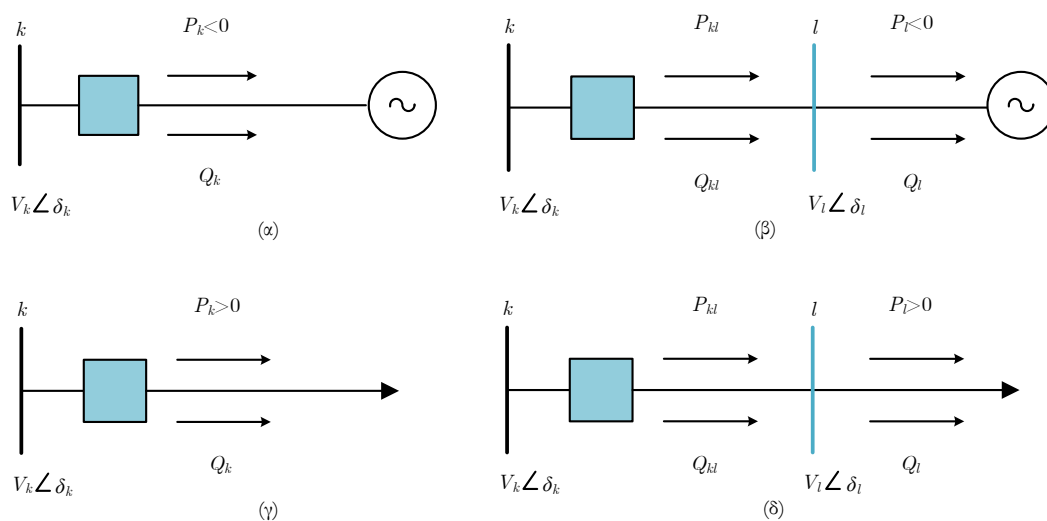
Με στόχο να διαπιστωθεί η κατάσταση λειτουργίας ενός τυχαίου κλάδου, έστω $k - m$, η μέθοδος προβλέπει την ανάθεση ενός διακοπτικού μέσου στον κλάδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 (α). Κατόπιν,

εισάγεται ένας εικονικός, ενδιάμεσος κόμβος μηδενικής έγχυσης ισχύος, έστω l , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 (β), και ο οποίος εξυπηρετεί τη μελέτη της ροής ισχύος δια του κλάδου $k - m$.



Σχήμα 2.5: Μοντελοποίηση διακοπτικού μέσου τυχαίου κλάδου (α) και εισαγωγή εικονικού κόμβου για τη μελέτη της κατάστασης του (β).

Με όμοιο τρόπο, μοντελοποιούνται τα διακοπτικά μέσα που αντιστοιχούν σε τερματικούς κλάδους που συνδέουν στο υπό μελέτη σύστημα κόμβους γεννητριών και φορτίων (βλέπε Παράρτημα Α). Εισάγονται ενδιάμεσοι κόμβοι μηδενικής έγχυσης με στόχο να μελετηθεί η ροής ισχύος δια των τερματικών κλάδων, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.6 (β) και (δ) για τις περιπτώσεις γεννήτριας και φορτίου, αντιστοίχως.



Σχήμα 2.6: Μοντελοποίηση διακοπτικών μέσων κλάδων με γεννήτρια (α,β) και φορτίο (γ, δ).

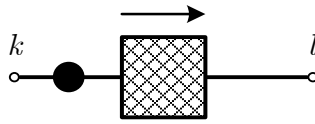
2.4.2.2 Θεμελίωση της πιθανοτικής μεθόδου

Με βάση τη μοντελοποίηση της υποενότητας 2.4.2.1, το διάνυσμα κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος επαυξάνεται εισάγοντας το μέτρο V_l και τη γωνία δ_l του εικονικού κόμβου l , καθώς και την κατάσταση του αντίστοιχου διακοπτή $k-l$, έστω s_{kl} , η οποία μοντελοποιείται ως μία συνεχής τ.μ. με διάστημα τιμών $S = [0,1]$. Έτσι, η κατάσταση s_{kl} προσεγγίζεται πιθανοτικά και οι σχετικές λύσεις που προκύπτουν ποσοτικοποιούν τη σχετιζόμενη με αυτήν αβεβαιότητα.

Συνολικά, με το διακοπτικό μέσο $k-l$, σχετίζονται οι εξής μετρήσεις:

1) Αναλογικές μετρήσεις

1. Ροή ενεργού και αέργου ισχύος:

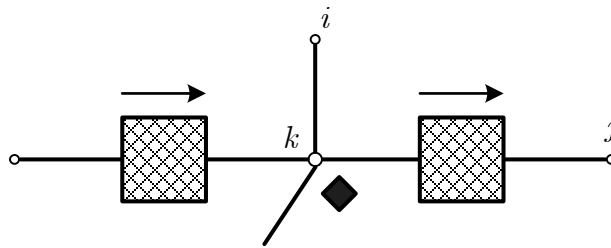


$$P_{kl}^{meas} = P_{kl} + e_{P_{kl}} \quad (2.39)$$

$$Q_{kl}^{meas} = Q_{kl} + e_{Q_{kl}} \quad (2.40)$$

όπου P_{kl}^{meas} (Q_{kl}^{meas}) είναι η μετρούμενη ή υποτιθέμενη τιμή ροής ενεργού (αέργου) ισχύος, P_{kl} (Q_{kl}) είναι η προς εκτίμηση τιμή της ροής και $e_{P_{kl}}$ ($e_{Q_{kl}}$) είναι το σφάλμα της μέτρησης.

2. Έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος:



$$P_k^{meas} = \sum_{i \in L_k} P_{ki}(V_k, V_i, \delta_k, \delta_i) + \sum_{j \in B_k} P_{kj} + e_{P_k} \quad (2.41)$$

$$Q_k^{meas} = \sum_{i \in L_k} Q_{ki}(V_k, V_i, \delta_k, \delta_i) + \sum_{j \in B_k} Q_{kj} + e_{Q_k} \quad (2.42)$$

όπου P_k^{meas} (Q_k^{meas}) είναι η μετρούμενη ή υποτιθέμενη τιμή έγχυσης ενεργού (αέργου) ισχύος, η τιμή P_{ki} (Q_{ki}) υπολογίζεται με βάση τη σχέση (2.19) και αφορά τις ροές ενεργού (αέργου) ισχύος προς το υποσύνολο των γειτονικών κόμβων L_k οι οποίοι συνδέονται με τον κόμβο k μέσω κλάδων χωρίς διακοπτικά μέσα, P_{kj} (Q_{kj}) είναι οι αντίστοιχες ροές ενεργού (αέργου) ισχύος προς γειτονικούς κόμβους που συνδέονται μέσω διακοπτικού μέσου με τον κόμβο k και συγκροτούν το υποσύνολο

B_k και e_{P_k} (e_{Q_k}) είναι το σφάλμα της μέτρησης. Οι ροές P_{kj} και Q_{kj} ορίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (2.39) και (2.40).

2) Λογικά δεδομένα

Ως λογικά δεδομένα, όπου διατίθενται ως μετρήσεις, λαμβάνονται οι καταστάσεις των διακοπτικών μέσων. Υποθέτοντας ότι είναι διαθέσιμη μέτρηση της κατάστασης του διακόπτη $k-l$, αυτή μοντελοποιείται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$s_{kl}^{meas} = s_{kl} + e_{s_{kl}} \quad (2.43)$$

όπου s_{kl}^{meas} είναι η μετρούμενη τιμή η οποία είναι μηδενική για ανοικτό διακόπτη και μοναδιαία για κλειστό, s_{kl} η εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης του διακόπτη και $e_{s_{kl}}$ το αντίστοιχο σφάλμα.

3) Ψευδομετρήσεις – Περιορισμοί

Ανεξαρτήτως αν διατίθεται η σχέση (2.43), θεωρούνται επίσης τέσσερις χαλαροί περιορισμοί οι οποίοι εισάγονται εν είδει ψευδομετρήσεων, που εμπλέκουν αναλογικά και λογικά δεδομένα, στο διάνυσμα των διαθέσιμων μετρήσεων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι οι εξής:

$$0 = s_{kl} \delta_{kl} + e_{s_{kl} \delta_{kl}}, \quad 0 = s_{kl} V_{kl} + e_{s_{kl} V_{kl}} \quad (2.44)$$

$$0 = (1 - s_{kl}) P_{kl} + e_{(1-s_{kl}) P_{kl}}, \quad 0 = (1 - s_{kl}) Q_{kl} + e_{(1-s_{kl}) Q_{kl}} \quad (2.45)$$

όπου $\delta_{kl} = \delta_k - \delta_l$ και $V_{kl} = V_k - V_l$, δηλαδή η διαφορά γωνίας και η πτώση τάσης στα άκρα του διακοπτικού μέσου, αντίστοιχα.

Οι ανωτέρω σχέσεις αποτυπώνουν απλές αρχές: σύμφωνα με τη σχέση (2.44), η εκτιμώμενη πτώση τάσης και η αντίστοιχη διαφορά γωνιών στα άκρα του είναι μηδενικές σε περίπτωση που $\hat{s}_{kl} = 1$, δηλαδή ο διακόπτης εκτιμάται ότι είναι κλειστός. Αντίθετα, όταν $\hat{s}_{kl} = 0$, δηλαδή ο διακόπτης εκτιμάται ότι είναι ανοιχτός σύμφωνα με τη σχέση (2.45), οι εκτιμώμενες ροές ισχύος είναι μηδενικές.

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, για το διακοπτικό μέσο $k-l$, εισάγονται τουλάχιστον τρεις επιπλέον μεταβλητές κατάστασης, ήτοι η κατάσταση s_{kl} , το μέτρο V_l και η γωνία δ_l της τάσης του εικονικού κόμβου. Για την ταυτοποίηση της τιμής της μεταβλητής s_{kl} , θεωρείται μια τιμή κατωφλίου $\varepsilon_s \ll 1$ (π.χ. $\varepsilon_s = 10^{-4}$): αν $s_{kl} \leq \varepsilon_s$ ($s_{kl} \geq 1 - \varepsilon_s$), το διακοπτικό μέσο εκτιμάται ότι είναι κλειστό (ανοιχτό) με πιθανότητα ίση με $1 - \varepsilon_s$. Αν ισχύει $\varepsilon_s \leq s_{kl} \leq 1 - \varepsilon_s$, τότε η κατάσταση εκτιμάται ως αβέβαιη, γεγονός που οφείλεται σε σφάλματα στο μοντέλο του δικτύου ή σε εσφαλμένα μετρητικά δεδομένα. Με την υπόθεση ότι διατίθεται περίσσεια μετρήσεων στην περιοχή του συγκεκριμένου διακοπτικού μέσου, η ορθή κατάστασή του ταυτοποιείται μέσω ελέγχου των υπολοίπων των μετρήσεων μετά από το πέρας της εκτίμησης κατάστασης, για τα οποία καθορίζεται, επίσης, μια οριακή τιμή εντοπισμού. Έτσι, μπορούν να εξεταστούν δύο είδη σφαλμάτων τοπολογίας: ο αποκλεισμός ενός κλάδου από το μοντέλο του δικτύου, επειδή ο αντίστοιχος διακόπτης μετρήθηκε εσφαλμένα ως ανοιχτός και, αντιθέτως, η συμπερίληψη στο μοντέλο του δικτύου ενός κλάδου του οποίου ο διακόπτης μετρήθηκε εσφαλμένα ως κλειστός.

Μολονότι προτείνεται η επίλυση του στατικού μοντέλου WLS με επαυξημένο το διάνυσμα κατάστασης, η μέθοδος δεν επιφέρει μεγάλη αύξηση του υπολογιστικού φόρτου ακόμη και για εκτεταμένα δίκτυα διανομής με χιλιάδες κόμβους, καθώς ο αριθμός των διακοπτικών μέσων που παρουσιάζουν ιδιαίτερο

ενδιαφέρον (π.χ. σε μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής) ή κρισιμότητα (π.χ. επαναδιαμόρφωση του δικτύου) και, άρα, χρειάζεται να μοντελοποιηθούν, δεν είναι μεγάλος. Παράλληλα, η εισαγωγή της παραμέτρου της αβεβαιότητας αποτελεί ένα ταιριαστό στοιχείο για τη μελέτη της τοπολογίας των ενεργών δικτύων διανομής η οποία υφίσταται ταχείες και αδιάκοπες αλλαγές. Τέλος, η εξεύρεση λύσης στο πλαίσιο μιας εκτέλεσης του αλγόριθμου WLS αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα από άποψη οικονομίας χρόνου και κόπου.

2.4.2.3 Το πρόβλημα του διαχωρισμού του δικτύου

Κατά τη μελέτη της επεξεργασίας τοπολογίας είναι πιθανό να ενσκήψει ζήτημα νησιδοποίησης του υπό μελέτη δικτύου. Αναλόγως με τον αριθμό των διακοπτικών μέσων με αβέβαιη κατάσταση, ενδέχεται να προκύψει ένα σύνολο από μη διασυνδεδεμένες νησίδες οι οποίες είναι αποκομμένες από το δίκτυο και για καθεμιά από αυτές πρέπει να θεωρηθεί μια γωνία αναφοράς. Προφανώς, όταν ο αριθμός των μη διασυνδεδεμένων νησίδων δεν είναι δεδομένος εκ των προτέρων, το ίδιο ισχύει και για τον αριθμό των γωνιών αναφοράς που πρέπει να εισαχθούν.

Για τη διευθέτηση αυτού του ζητήματος, μπορεί να διατυπωθεί το πρόβλημα του διαχωρισμού του δικτύου (network splitting), δηλαδή το πρόβλημα του υπολογισμού των μεταβλητών κατάστασης όλων των μη διασυνδεδεμένων νησίδων οι οποίες εμφανίζονται στο σύστημα και δε μπορούν να ταυτοποιηθούν στο πλαίσιο των συμβατικών εκτιμητών κατάστασης. Αυτό συμβαίνει διότι η λειτουργία τους βασίζεται στη θεώρηση μιας εκ των προτέρων γνωστής τοπολογίας για το μοντέλο του δικτύου που είτε αποτελεί μια μοναδική, ενιαία νησίδα είτε αποτελείται από έναν προκαθορισμένο αριθμό νησίδων, ο οποίος προκύπτει κατά την ανάλυση παρατηρησιμότητας με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις. Αντιθέτως, λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα ως προς την κατάσταση διακοπών, είναι δεδομένο πως ο πραγματικός αριθμός των μη διασυνδεδεμένων νησίδων στο δίκτυο μπορεί να είναι διαφορετικός (μεγαλύτερος ή μικρότερος) από τον αρχικώς θεωρούμενο. Κατά συνέπεια, το δίκτυο καθίσταται αυτομάτως μη παρατηρήσιμο.

Στο πλαίσιο της πιθανοτικής μεθόδου που περιγράφηκε, είναι δυνατό να ενταχθεί η τεχνική του διαχωρισμού δικτύου μέσω της εισαγωγής επιπλέον δύο περιορισμών. Έστω ότι το υπό μελέτη δίκτυο διαχωρίζεται σε ένα σύνολο νησίδων εξαιτίας του διακοπτικού μέσου $k-l$ το οποίο αναφέρεται ως ανοικτό. Έστω ότι η νησίδα S_1 περιέχει την, αρχικώς θεωρούμενη ως καθολική γωνία, αναφοράς. Τότε, για την i -οστή νησίδα S_i εισάγονται οι εξής περιορισμοί εν είδει ψευδομετρήσεων:

$$0 = \prod_{k \in S_i, l \in S_{j \neq i}} (1 - s_{kl}) \delta_{ref,i} + e_{ref,i} \quad (2.46)$$

$$0 = \delta_{ref,i} + e_{ref,i} \quad (2.47)$$

όπου το διακοπτικό μέσο $k-l$ θεωρείται ότι διασυνδέει τη νησίδα S_i , στην οποία ανήκει ο κόμβος k , με γειτονική νησίδα (ή νησίδες) $S_{j \neq i}$, στην οποία ανήκει ο κόμβος l , $\delta_{ref,i}$ είναι η γωνία τάσης ενός αυθαίρετα επιλεγμένου κόμβου αναφοράς για τη νησίδα S_i και $e_{ref,i}$ το αντίστοιχο σφάλμα.

Μέσω των εξισώσεων (2.46) και (2.47), το υπό μελέτη δίκτυο καθίσταται παρατηρήσιμο με συνέπεια να μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα κατάστασης του. Πιο αναλυτικά, σε περίπτωση που το διακοπτικό μέσο $k-l$ μετρηθεί ή υποθεθεί ως ανοικτό και, μετά από την επίλυση, επιβεβαιωθεί αυτή η κατάσταση,

δηλαδή ισχύει $s_{kl} = 0$, συνεπάγεται ότι $\delta_{ref,i} = 0$, γεγονός που σημαίνει ότι η νησίδα S_i είναι πράγματι μη διασυνδεδεμένη με το δίκτυο και οι μεταβλητές κατάστασής της εκτιμώνται με βάση τον τοπικό κόμβο αναφοράς. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν τελικά, μετά από την επίλυση, προκύψει ότι $s_{kl} = 1$, η εξίσωση (2.46) αποτελεί μια ταυτότητα και δεν έχει καμία επίδραση στην μεταβλητή $\delta_{ref,i}$. Έτσι, η νησίδα S_i είναι διασυνδεδεμένη με το υπόλοιπο δίκτυο, παύει να θεωρείται ως τέτοια και η συγκεκριμένη ψευδομέτρηση ουσιαστικά εξαλείφεται με χρήση κατάλληλης στάθμισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ

Ανέκαθεν, η εκτίμηση κατάστασης στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούσε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό πεδίο μελέτης και έρευνας καθώς η περίσσεια πραγματικών μετρήσεων, που συνιστά μια αναγκαία προϋπόθεση για την επίτευξη της παρατηρησιμότητας και την αξιόπιστη επίλυση του προβλήματος, δεν υφίστατο [86]. Η χρήση ψευδομετρήσεων φορτίου είναι η πλέον συνηθισμένη πρακτική προκειμένου ένα δίκτυο να καταστεί παρατηρήσιμο παρά την ανεπαρκή διαθεσιμότητα πραγματικών μετρήσεων, ενώ το επίπεδο της ακρίβειάς τους επιδρά καταλυτικά στην ποιότητα της παρεχόμενης εκτίμησης. Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύονται οι έννοιες του επιμερισμού, της πρόβλεψης και της εκτίμησης φορτίου, οι οποίες έχουν, ήδη, αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2. Κατόπιν, η μελέτη εξειδικεύεται σε μεθόδους που βασίζονται στη διαχείριση μετρητικών δεδομένων και καταγραφών από έξυπνους μετρητές των οποίων η μαζική εγκατάσταση σε καταναλωτές ΧΤ ή ΜΤ είναι σε διαρκή εξέλιξη, παγκοσμίως. Προκειμένου να διερευνηθεί η συνδυαστική λειτουργία τέτοιων μεθόδων με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης, στο τελευταίο τμήμα του κεφαλαίου περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα τριών σχετικών μεθόδων της διεθνούς βιβλιογραφίας και προτείνονται αντίστοιχα πλαίσια για την εφαρμογή τους στο στατικό μοντέλο WLS. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των προτεινόμενων πλαισίων για την εκτίμηση κατάστασης τμήματος του δικτύου διανομής της Ρόδου καθώς και ενός μικροδικτύου 17 κόμβων, ενώ κρίθηκε κατάλληλο να παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα της εφαρμογής της πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας, η οποία αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2, στο ανωτέρω δίκτυο της Ρόδου σε παρένθετη ενότητα, καθώς περιλαμβάνει τη χρήση ψευδομετρήσεων άλλου τύπου.

3.1 Οι Ψευδομετρήσεις στο Πλαίσιο της Εκτίμησης Κατάστασης των Δικτύων Διανομής

Στα δίκτυα διανομής, η ένδεια πραγματικών μετρήσεων είναι τόσο μεγάλη που καθιστά την εκτίμηση της πραγματικής κατάστασής τους μια δυσχερή διαδικασία, καθώς η παρατηρησιμότητά τους δεν μπορεί να εξασφαλιστεί. Οι βασικές αιτίες αυτής της ανεπάρκειας εστιάζονται στην πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα των δικτύων διανομής σε σχέση με τα συστήματα μεταφοράς. Τα σημεία ενδιαφέροντος είναι ασυγκρίτως περισσότερα. Για παράδειγμα, αρκεί να συγκρίνει κανείς τον αριθμό των μετασχηματιστών τάσης που μεσολαβούν κατά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μια πόλη με τον αντίστοιχο αριθμό μετασχηματιστών που διανέμουν την ενέργεια σε όλες τις περιοχές της πόλης. Επιπλέον, οι ελλιπείς μετρητικές υποδομές στα δίκτυα διανομής είχαν ως αποτέλεσμα τη διαθεσιμότητα περιορισμένων μετρήσεων τάσης και ισχύος σε πραγματικό χρόνο, ακόμη και για τις αναχωρήσεις κύριων γραμμών διανομής και τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ με άμεση συνέπεια ολόκληρες περιοχές να κινδυνεύουν να καταστούν πρακτικά ανεπιτήρητες [94]. Η κατάσταση αυτή εξακολουθεί να ισχύει στα ΣΗΕ χωρών όπου η αναβάθμιση του εξοπλισμού εξελίσσεται πιο αργά, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της Ελλάδας. Αλλά και σε περιπτώσεις ΣΗΕ όπου λειτουργούν συστήματα AMR ή AMI, οι δυσκολίες στη λήψη συγχρονισμένων μετρήσεων φορτίου καθώς και στην υποστήριξη του μεγάλου τηλεπικοινωνιακού φόρτου καθιστούν την επιτήρηση των δικτύων διανομής σε πραγματικό χρόνο

δισεπίτευκτη [158]. Συνεπώς, η μεγάλη δυσαναλογία μεταξύ του αριθμού των πραγματικών μετρήσεων, που αποτελούν τις μεταβλητές εισόδου του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης, και του αριθμού των μεταβλητών κατάστασης, σε συνδυασμό με τις ελλείψεις στις υποδομές και τον εξοπλισμό τους, δυσχεραίνουν την εκτίμηση κατάστασης των δικτύων διανομής [21].

Η λύση για το έλλειμμα δεδομένων προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάσταση δικτύων διανομής έρχεται με την εισαγωγή ψευδομετρήσεων, όπως έχει προαναφερθεί στα Κεφάλαια 1 και 2. Σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει το ινστιτούτο IEEE [19], οι ψευδομετρήσεις αποτελούν εκτιμήσεις τιμών έγχυσης ισχύος, οι οποίες υποκαθιστούν ελλιπείς πραγματικές μετρήσεις με στόχο την επίτευξη της παρατηρησιμότητας για το δίκτυο. Βασίζονται είτε σε προβλέψεις φορτίου είτε σε προγράμματα παραγωγής διεσπαρμένων μονάδων, ενώ τους ανατίθενται χαμηλές τιμές συντελεστών στάθμισης κατά την επίλυση του στατικού μοντέλου WLS, καθώς αντιμετωπίζονται ως μετρήσεις μειωμένης ακρίβειας. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να τονιστεί ότι η έννοια της ψευδομέτρησης στα ΣΗΕ είναι ευρύτερη του ανωτέρω ορισμού και περιγράφει κάθε εκτίμηση, πρόβλεψη ή τεχνητή τιμή μεγέθους που χρησιμοποιείται με στόχο την εξασφάλιση της παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη συστήματος, όπως π.χ. οι ψευδομετρήσεις που αναφέρονται στην υποενότητα 2.4.2.

Ως επί το πλείστον, οι ψευδομετρήσεις αφορούν εκτιμήσεις μεγεθών φορτίου σε πραγματικό χρόνο, όπως π.χ. της ζήτησης ισχύος σε επίπεδο μετασχηματιστών διανομής, δηλ. ΜΤ/ΧΤ [159]. Η καταγραφή της κατανάλωσης, για λόγους τιμολόγησης κυρίως, καθιστά γενικά ευκολότερη την παραγωγή τέτοιου τύπου ψευδομετρήσεων. Έτσι, οι ψευδομετρήσεις φορτίου παράγονται με βάση πρωτογενείς πληροφορίες, όπως ιστορικά δεδομένα (π.χ. από βάσεις δεδομένων με μηνιαίες καταναλώσεις πελατών ΧΤ ή αιχμές ζήτησης σε επίπεδο μετασχηματιστών και υποσταθμών), τη δομή και τα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη δικτύου (π.χ. την, συνήθη, ακτινική τοπολογία και τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος των μετασχηματιστών) και δεδομένα καταναλώσεων πραγματικού ή σχεδόν πραγματικού χρόνου από συστήματα ΑΜΙ ή ΑΜΡ [160]. Τα συστήματα GIS (geographical information system) και CIS (customer information system) μπορούν να παράσχουν, επίσης, χρήσιμα πρωτογενή δεδομένα.

Κατά τη συνηθέστερη περίπτωση, τα, περιορισμένα σε αριθμό, διαθέσιμα δεδομένα πραγματικού χρόνου σε ένα δίκτυο διανομής προέρχονται από μονάδες RTU που είναι εγκατεστημένες στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και συλλέγονται από το σύστημα SCADA που υποστηρίζει το σύστημα DMS [160]. Οι μετρήσεις πραγματικού χρόνου περιλαμβάνουν μέτρα τάσης στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ, ροές ενεργού και άεργου ισχύος ή μέτρα ρεύματος στις αναχωρήσεις των κύριων γραμμών, και μέτρα τάσης και εγχύσεις ενεργού και άεργου ισχύος σε κόμβους όπου συνδέονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Πέραν αυτών, το μεγαλύτερο μερίδιο επί του συνόλου των διαθέσιμων δεδομένων κατέχουν οι ψευδομετρήσεις, ενώ περιλαμβάνονται, σε πολύ μικρότερο αριθμό, και μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων, οι οποίες αποτελούν, επίσης, εικονικά δεδομένα και όχι πραγματικές μετρήσεις [161]. Στον Πίνακα 3.1, δίνονται κάποιες τυπικές τιμές για τα διαστήματα εμπιστοσύνης ανά τύπο διαθέσιμης μέτρησης, θεωρώντας ότι κάθε μέτρηση συνιστά μια τ.μ. κανονικής κατανομής και το διάστημα αντιστοιχεί σε εμπιστοσύνη ποσοστού 95%. Όπως διαπιστώνεται, το διάστημα εμπιστοσύνης για τις ψευδομετρήσεις είναι πενταπλάσιο σε τιμές ανά μονάδα (α.μ.) από το αμέσως μικρότερο το οποίο αντιστοιχεί σε μέτρηση μέτρου ρεύματος. Αξιοσημείωτα μικρό σε απόλυτες τιμές είναι το διάστημα εμπιστοσύνης για τις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων.

Όσον αφορά την επίδραση των ψευδομετρήσεων στο στατικό μοντέλο WLS, έχει επιβεβαιωθεί η επιρροή τους στη σύγκλιση του αλγόριθμου επίλυσης όσο και την ακρίβεια των παρεχόμενων αποτελεσμάτων. Ως ένα από τα ειδικά χαρακτηριστικά των δικτύων διανομής που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 2.1.3., η

εκτεταμένη χρήση ψευδομετρήσεων, γενικά, επιδεινώνει το πρόβλημα της κακής κατάστασης της μήτρας κέρδους όπως αυτό περιγράφηκε στην υποενότητα 2.2.3.2, επιφέροντας αριθμητική αστάθεια στη διαδικασία επίλυσης των κανονικών εξισώσεων [161]. Πιο αναλυτικά, οι ψευδομετρήσεις συνεισφέρουν στο μεγάλο μερίδιο των μετρήσεων εγχύσεων ισχύος στα συνολικώς διαθέσιμα δεδομένα με αποτέλεσμα ο δείκτης κατάστασης της μήτρας κέρδους να επιδεινώνεται (αυξάνεται) [12], [162]. Επιπλέον, πρόκειται για έναν τύπο μετρήσεων που χαρακτηρίζεται κατεξοχήν από χαμηλούς συντελεστές στάθμισης λόγω της ανακρίβειας που ενέχει. Η συνύπαρξή τους με πραγματικές μετρήσεις υψηλής ακρίβειας και μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων, οι οποίες αποκαλούνται και τέλειες (perfect) καθώς σταθμίζονται με το υψηλότερο δυνατό επίπεδο ακρίβειας, έχει διαπιστωθεί ότι εντείνει ακόμη περισσότερο το πρόβλημα της κακής κατάστασης της μήτρας κέρδους [161], [163] και, συνεπώς, ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα σύγκλισης στον αλγόριθμο [84]. Οι κυριότερες λύσεις που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση των ανωτέρω ζητημάτων περιλαμβάνουν τροποποιήσεις του στατικού μοντέλου WLS είτε με χρήση περιορισμών ισότητας για τη μοντελοποίηση των μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων σύμφωνα με τη μέθοδο Lagrange [161]–[163] είτε με τον επανυπολογισμό των συντελεστών στάθμισης όλων των μετρήσεων σε κάθε ανακύκλωση του αλγόριθμου επίλυσης με στόχο την ανάσχεση της επίδρασης των μεγάλων σφαλμάτων που ενέχουν οι ψευδομετρήσεις (iteratively reweighted WLS) [105], [164].

Πίνακας 3.1: Τυπικές τιμές διαστημάτων εμπιστοσύνης ανά τύπο διαθέσιμης μέτρησης στα δίκτυα διανομής.

| Τύπος μέτρησης | Διάστημα εμπιστοσύνης |
|--|-------------------------------|
| Ψευδομέτρηση φορτίου | 0,10 x εκτιμώμενη τιμή (α.μ.) |
| Έγχυση ισχύος από γεννήτρια εντός του Υ/Σ | 0,01 x εκτιμώμενη τιμή (α.μ.) |
| Ροή ισχύος σε αναχώρηση κύριας γραμμής εντός του Υ/Σ | 0,01 x εκτιμώμενη τιμή (α.μ.) |
| Τηλεμετρούμενο μέτρο ρεύματος (από μονάδα RTU) | 0,02 x εκτιμώμενη τιμή (α.μ.) |
| Τηλεμετρούμενο μέτρο τάσης (από μονάδα RTU) | 0,01 x εκτιμώμενη τιμή (α.μ.) |
| Μέτρηση μηδενικής έγχυσης | 0,01 x kW/kVAR |

Λόγω του μεγάλου αριθμού και της χαμηλής ακριβειάς τους, η χρήση των ψευδομετρήσεων επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης αυξάνοντας το συνολικό σφάλμα της εκτίμησης [165]. Κλειδί για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος αποτελεί ο σωστός καθορισμός των συντελεστών στάθμισής τους, μια διαδικασία που αναφέρεται ως ιδιαίτερα σημαντική [160]. Έχουν προταθεί πολλές σχετικές τεχνικές, κοινή βάση των οποίων είναι η θεώρηση διαφορετικών τιμών συντελεστών μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και ψευδομετρήσεων. Στις αναφορές [83] και [89] χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές συντελεστών ανά τύπο μέτρησης, ενώ στην αναφορά [97] προτείνεται ο υπολογισμός της διασποράς κάθε μέτρησης βάσει τύπου που εμπλέκει το αντίστοιχο μέγιστο επί τοις εκατό σφάλμα από την αναμενόμενη (μέση) τιμή της. Στην εργασία [84], σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό των συντελεστών στάθμισης των ψευδομετρήσεων πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ακρίβεια της μεθόδου ή τεχνικής μέσω της οποίας παρήχθησαν, ενώ, στη σχετική συζήτηση κατόπιν της δημοσίευσής της, αναφέρεται ότι είναι απαραίτητο, σε περίπτωση που υπάρχουν διαβαθμίσεις ως προς την ακρίβεια των ψευδομετρήσεων, να χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συντελεστές ανά ψευδομέτρηση. Επιπλέον, στην ενίσχυση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης συντελεί και ο επαναληπτικός υπολογισμός των συντελεστών ανά ανακύκλωση του αλγόριθμου επίλυσης του στατικού μοντέλου WLS

[105]. Τέλος, στην αναφορά [166] διερευνάται η συσχέτιση μεταξύ των μετρητικών δεδομένων στα δίκτυα διανομής μέσω της μελέτης της πλήρους μήτρας συνδιακύμανσης των μετρήσεων, χωρίς δηλαδή να θεωρούνται μόνο διαγώνια στοιχεία. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι, λαμβάνοντας υπόψη τις συσχετίσεις μεταξύ των επιμέρους ψευδομετρήσεων για τη δόμηση και τον υπολογισμό της μήτρας των συντελεστών σάθμισης, η ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης βελτιώνεται αισθητά.

3.2 Μέθοδοι και Τεχνικές Παραγωγής Ψευδομετρήσεων

Στη διεθνή βιβλιογραφία, απαντώνται τρεις βασικές έννοιες στο πλαίσιο των μεθοδολογιών για την παραγωγή ψευδομετρήσεων φορτίου: πρόκειται για τον επιμερισμό, την πρόβλεψη και την εκτίμηση φορτίου. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα όρια μεταξύ των τριών εννοιών καθίστανται δυσδιάκριτα με την έννοια της εκτίμησης φορτίου να χρησιμοποιείται συλλήβδην για κάθε σχετική μέθοδο ή τεχνική. Παρ'όλα αυτά, μπορεί να γίνει σαφής καθορισμός των εννοιών μετά από ενδελεχή μελέτη του ερευνητικού αυτού πεδίου του οποίου τα θεμέλια τέθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990 με τις εργασίες [94] και [159]. Στο πλαίσιο αυτών των εργασιών, προτείνονται τεχνικές μοντελοποίησης φορτίου (load modeling) και χρησιμοποιούνται στοιχεία από τη θεωρία πιθανοτήτων και τη στατιστική με στόχο την εξαγωγή αξιόπιστων ψευδομετρήσεων και των τυπικών αποκλίσεων τους σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Με τον όρο μοντελοποίηση φορτίου αποδίδεται γενικά κάθε μεθοδολογία που περιγράφει τη χρονική ή χωρική μεταβολή της ζήτησης φορτίου συναρτήσει μιας ή πολλών παραμέτρων με χρήση είτε αυστηρών μαθηματικών μοντέλων είτε εμπειρικών τύπων. Συνεπώς, πρόκειται για μια διευρυμένη έννοια η οποία, ουσιαστικά, αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία κάθε μεθόδου ή τεχνικής παραγωγής ψευδομετρήσεων. Για παράδειγμα, στην αναφορά [159] προτείνεται μια εμπειρική τεχνική επιμερισμού φορτίου για τη μοντελοποίηση της διακύμανσης του φορτίου σε κάθε κόμβο ενός δικτύου, ενώ η μέθοδος επιμερισμού φορτίου [162] βασίζεται σε μια αυστηρή μαθηματική μοντελοποίηση υπό τη μορφή ενός εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων.

Η διάκριση μεταξύ πρόβλεψης και εκτίμησης φορτίου μπορεί να διερευνηθεί με βάση τη μοντελοποίηση φορτίου που προτείνεται από τις σχετικές μεθόδους και τεχνικές. Κατ' αρχάς, ως εκτίμηση φορτίου μπορεί να οριστεί κάθε προσεγγιστικός υπολογισμός μιας πραγματικής τιμής φορτίου είτε σε πραγματικό είτε σε μελλοντικό χρόνο. Στη δεύτερη περίπτωση, η εκτίμηση φορτίου λαμβάνει τον χαρακτήρα της πρόβλεψης φορτίου: πρόκειται για μια κατηγορία μεθόδων που στηρίζεται αποκλειστικά σε μαθηματικά εργαλεία τα οποία, στη συντριπτική πλειονότητά τους, υπάγονται στην ανάλυση χρονοσειρών (time series) και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks). Ουσιαστικά λοιπόν, οι μέθοδοι πρόβλεψης φορτίου αποτελούν εφαρμογές των ανωτέρω μαθηματικών εργαλείων στη μοντελοποίηση της χρονικής διακύμανσης της ζήτησης φορτίου. Αντιθέτως, η εκτίμηση φορτίου περιλαμβάνει εμπειρικά και αυστηρά μαθηματικά μοντέλα, τα οποία μελετούν τόσο τη χρονική όσο και τη χωρική διακύμανση της ζήτησης φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής. Επιπλέον, κριτήριο διάκρισης αποτελεί και το χρονικό εύρος που καλύπτεται: οι μέθοδοι εκτίμησης φορτίου εστιάζουν κατά κανόνα στη διακύμανση του φορτίου εντός ωριαίου χρονικού διαστήματος, ενώ το χρονικό εύρος για τις μεθόδους πρόβλεψης καλύπτει από αρκετές ώρες έως μία ημέρα. Σημειώνεται ότι, με δεδομένη την απαίτηση για τη λειτουργία εκτιμητών κατάστασης σε πραγματικό χρόνο και με υψηλό ρυθμό ανανέωσης αποτελεσμάτων στα δίκτυα διανομής, είναι απαραίτητη η παραγωγή ψευδομετρήσεων με υψηλή συχνότητα (π.χ. ανά πεντάλεπτο ή τέταρτο) με συνέπεια το χρονικό εύρος της εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου να περιορίζεται σημαντικά προκειμένου να μην φθίνει η ποιότητα και να μην μειώνεται η χρονική διακριτότητα των παραγόμενων ψευδομετρήσεων.

Στη συνέχεια, γίνεται μια συνοπτική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις μεθόδους εκτίμησης, επιμερισμού και πρόβλεψης φορτίου. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε με βάση τις σαφείς διαφορές μεταξύ εκτίμησης και πρόβλεψης φορτίου, οι οποίες αναλύθηκαν παραπάνω, και το γεγονός ότι ο επιμερισμός φορτίου αποτελεί μια τεχνική εκτίμησης φορτίου με ειδικά χαρακτηριστικά που στοχεύει αποκλειστικά σε δίκτυα διανομής με ακτινική δομή.

3.2.1 Εκτίμηση φορτίου

Μια μέθοδος εκτίμησης φορτίου απαιτείται να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις φορτίου σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο ώστε να επιλύεται απρόσκοπτα το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης του υπό μελέτη δικτύου, να λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις της ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας χωρίς να περιορίζεται στη μελέτη αιχμών φορτίου και να δίνει ένα μέτρο της αβεβαιότητας των εκτιμήσεων της ώστε να βελτιστοποιείται η επίλυση του στατικού μοντέλου WLS. Όπως προαναφέρθηκε, η εκτίμηση φορτίου αποτελεί μια ευρεία έννοια στο πλαίσιο της οποίας απαντάται μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων ως προς τη μοντελοποίηση φορτίου που χρησιμοποιούν. Στην παρούσα ενότητα, γίνεται μια ανασκόπηση των πιο αξιόλογων σχετικών μεθόδων πλην αυτών που εφαρμόζουν την τεχνική επιμερισμού φορτίου, οι οποίες θα μελετηθούν στην επόμενη υποενότητα.

Μια συστηματική μέθοδος εκτίμησης φορτίου που εφαρμόζεται σε τριφασικά μοντέλα δικτύων διανομής με ασύμμετρη φόρτιση, πρωτοδημοσιεύτηκε στην αναφορά [167] και βελτιώθηκε στην αναφορά [168]. Το υπό μελέτη δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες και η εκτίμηση φορτίου ανά κόμβο γίνεται με βάση τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις της ζώνης στην οποία ανήκει, μια αρχική εκτίμηση του φορτίου του και την ακρίβειά της όπως προκύπτει από ιστορικά δεδομένα. Στη βελτιωμένη εκδοχή της, η μέθοδος βασίζεται σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης της σταθμισμένης νόρμας απείρου (infinity norm) της διαφοράς μεταξύ του διανύσματος μετρήσεων, πραγματικών και μη, και του διανύσματος μη γραμμικών συναρτήσεων, το οποίο περιλαμβάνει περιορισμούς για τη μοντελοποίηση των ορίων λειτουργίας και φόρτισης του δικτύου. Σε όλες τις εκφράσεις υπεισέρχεται ένα διάνυσμα παραμέτρων φορτίου που ουσιαστικά διορθώνει τις αρχικές εκτιμήσεις σε κάθε ανακύκλωση του αλγόριθμου. Στην εργασία [169], προτείνεται ένας εμπειρικός αλγόριθμος τριών βημάτων για την εκτίμηση του φορτίου ενός μετασχηματιστή διανομής σε πραγματικό χρόνο με βάση ένα απλό μοντέλο χρονοσειράς. Προϋποτίθεται η διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίου σχεδόν πραγματικού χρόνου ανά καταναλωτή, ενώ γίνεται χρήση και ιστορικών δεδομένων. Οι εκτιμήσεις φορτίου ανά καταναλωτή αθροίζονται ώστε να προκύψει η εκτίμηση σε επίπεδο μετασχηματιστή, πράξη που προϋποθέτει τη γνώση όλων των διασυνδέσεων καταναλωτών ανά μετασχηματιστή. Με τις ίδιες περίπου προϋποθέσεις λειτουργεί και η μέθοδος εκτίμησης φορτίου που παρουσιάζεται στην εργασία [170]. Στο πλαίσιο του προτεινόμενου γραμμικού μοντέλου ανάλυσης ροών φορτίου, εισάγονται περιορισμοί με παράγοντες διόρθωσης των αρχικών εκτιμήσεων φορτίου ανά μετασχηματιστή MT/XT, οι οποίες βασίζονται σε ιστορικά δεδομένα, και βελτιώνονται κατά τις ανακυκλώσεις του επαναληπτικού αλγόριθμου επίλυσης. Η μέθοδος είναι ευέλικτη αναφορικά με την τοπολογία του υπό μελέτη δικτύου, ακτινικού ή μη, και τη διαθεσιμότητα τηλεμετρούμενων δεδομένων πραγματικού χρόνου ανά κύρια γραμμή. Στην αναφορά [171] προτείνεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος εκτίμησης φορτίου σε πραγματικό χρόνο ο οποίος περιλαμβάνει τη διαδοχική επίλυση του στατικού μοντέλου WLS και του προβλήματος ροών φορτίου με χρήση τηλεμετρούμενων δεδομένων ενεργού/άεργου ροής ισχύος και μέτρου ρεύματος, καθώς και βραχυπρόθεσμων προβλέψεων φορτίου. Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση τριφασικών μοντέλων δικτύων με ασύμμετρη φόρτιση ανά φάση. Σε παρόμοια λογική κινείται και η προτεινόμενη μέθοδος στην αναφορά [172] η οποία βασίζεται σε έναν αλγόριθμο ανάλυσης ροών φορτίου: οι αρχικές εκτιμήσεις

φορτίου ανά μετασχηματιστή διανομής με βάση ιστορικά στοιχεία εισάγονται στον αλγόριθμο και, κατόπιν, βελτιώνονται σύμφωνα με τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε ακτινικά δίκτυα και λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω μεθοδολογίες που βασίζονται σε επαναληπτικούς αλγόριθμους για την εξαγωγή εκτιμήσεων φορτίου, μια σειρά από εργασίες, με κυριότερες τις [173]–[175], εστιάζουν στη μοντελοποίηση της διακύμανσης φορτίου ανά κόμβο με χρήση στατιστικών εργαλείων που επεξεργάζονται τόσο ιστορικά δεδομένα καταναλώσεων όσο και τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις. Οι εργασίες [173] και [174] αναδεικνύουν τη μέθοδο της συσχέτισης μεταξύ πραγματικών μετρήσεων και ψευδομετρήσεων και τη μοντελοποίηση της διακύμανσης του φορτίου με χρήση μείγματος Gaussian κατανομών (Gaussian mixture model) ως των πλέον αξιόπιστων επιλογών για την παραγωγή ψευδομετρήσεων φορτίου. Σημαντικό πλεονέκτημα και των δύο αυτών προσεγγίσεων είναι το γεγονός ότι παρέχουν μέτρα ακριβείας των ψευδομετρήσεων που παράγουν. Πιο σύνθετη είναι η προτεινόμενη μέθοδος στην αναφορά [175] η οποία στηρίζεται σε ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την παραγωγή ψευδομετρήσεων φορτίου με χρήση των διαθέσιμων πραγματικών μετρήσεων. Για την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιούνται τυπικές καμπύλες φορτίου και δεδομένα από ανάλυση ροών φορτίου και η διασπορά των παραγόμενων ψευδομετρήσεων προσεγγίζεται μέσω μείγματος Gaussian κατανομών.

3.2.2 Επιμερισμός φορτίου

Με τον όρο επιμερισμός φορτίου δηλώνεται μια τεχνική εκτίμησης φορτίου για ακτινικά δίκτυα διανομής, η οποία βασίζεται κατά κανόνα σε εμπειρικά μοντέλα. Η κεντρική ιδέα εφαρμογής της είναι ο επιμερισμός μιας μετρηθείσας τιμής ισχύος (ροής ή έγχυσης) ή ρεύματος στους κόμβους του δικτύου που βρίσκονται στα κατάντη τμήματα ως προς το σημείο της μέτρησης. Συνήθως, τα σημεία μέτρησης βρίσκονται στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και, πιο συγκεκριμένα, αφορούν την έγχυση ισχύος στον κόμβο του υποσταθμού ή τις ροές ισχύος στις αναχωρήσεις των κύριων γραμμών διανομής του υποσταθμού. Συναντάται μια ευρεία κατηγορία από σχετικές μεθοδολογίες που χρησιμοποιούν είτε εμπειρικά είτε αυστηρά μαθηματικά μοντέλα. Επιπλέον, μεγάλη ποικιλία εμφανίζεται και ως προς τα χρησιμοποιούμενα δεδομένα: καταγραφές κατανάλωσης από συστήματα AMR, δεδομένα από τιμολόγια καταναλωτών, ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστών, αριθμητική και γεωγραφική κατανομή των καταναλωτών ανά κατηγορία (π.χ. οικιακοί, εμπορικοί, βιομηχανικοί) κ.α.

Η τεχνική του επιμερισμού φορτίου πρωτοδημοσιεύτηκε στην αναφορά [159], στην οποία προτείνονται τρεις εμπειρικοί τύποι για τον επιμερισμό φορτίου σε ένα κόμβο i : οι δύο τύποι είναι στατικοί και ως βάση υπολογισμού έχουν την ονομαστική φαινόμενη ισχύ του αντίστοιχου μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ και τα ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης για τον κόμβο. Ο τρίτος τύπος, ο οποίος χρησιμοποιεί στοιχεία στατιστικής, εισάγει την παράμετρο του χρόνου στους υπολογισμούς μέσω ενός κανονικοποιημένου συντελεστή ημερησίας διακύμανσης φορτίου ανά κατηγορία καταναλωτή, οπότε η εκτίμηση φορτίου για τον κόμβο προκύπτει με άθροιση των επιμέρους εκτιμήσεων. Επιπλέον, υπολογίζεται η διασπορά τόσο των επιμέρους όσο και της συνολικής εκτίμησης φορτίου. Στη συγκριτική μελέτη [176], αξιολογείται η επίδοση τριών, παραπλήσιων με τους ανωτέρω, τρόπων επιμερισμού φορτίου σε ένα δίκτυο διανομής που διαθέτει σύστημα AMI, με αποτέλεσμα το φορτίο του 99% των καταναλωτών να καταγράφεται σε πραγματικό χρόνο. Έχοντας ως αναφορά την εκτιμηθείσα κατάσταση βάσει των δεδομένων από το σύστημα AMI, ο επιμερισμός με βάση τα ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης.

Εξίσου αξιόλογες είναι μέθοδοι επιμερισμού φορτίου οι οποίες αντιμετωπίζουν το θέμα ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στην αναφορά [162], προτείνεται ένας εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων με στόχο την ελαχιστοποίηση των διαφορών μεταξύ μετρούμενων και εκτιμώμενων τιμών ροής ισχύος στην αναχώρηση μιας κύριας γραμμής διανομής σε πραγματικό χρόνο. Οι εκτιμώμενες τιμές προκύπτουν ως άθροισμα των εκτιμήσεων φορτίου για όλους τους καταναλωτές οι οποίοι τροφοδοτούνται από τους μετασχηματιστές διανομής της εν λόγω κύριας γραμμής. Για τη μοντελοποίηση της ζήτησης φορτίου σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιούνται τυπικές καμπύλες φορτίου και συντελεστές χρησιμοποίησης (utilization factors) για κάθε κατηγορία καταναλωτών. Σημειώνεται ότι στην αναφορά [177], είχε δημοσιευτεί η αρχική σύλληψη της μεθόδου στην οποία ο εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων αναφέρεται σε διαφορές μέτρων ρεύματος στην αναχώρηση μιας κύριας γραμμής διανομής. Στην εργασία [178], ο επιμερισμός φορτίου διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, στο πλαίσιο του οποίου οι εκτιμήσεις των εγχύσεων στους κόμβους φορτίου, οι οποίες προκύπτουν από την εκτίμηση κατάστασης WLS, διορθώνονται μέσω της βέλτιστης κατανομής των υπολοίπων των πραγματικών μετρήσεων σε αυτούς. Η επίλυση του προβλήματος γίνεται με χρήση επαναληπτικού αλγόριθμου. Τέλος, μια πιο εξεζητημένη λύση προτείνεται στην αναφορά [100], όπου αρχικά πραγματοποιείται ένας χονδρικός επιμερισμός φορτίου μέσω μιας διαδικασίας ασφούς λογικής, η οποία επεξεργάζεται πραγματικές μετρήσεις, ονομαστικά στοιχεία μετασχηματιστών διανομής και ιστορικά δεδομένα καταναλώσεων. Οι τιμές που προκύπτουν βελτιώνονται κατά την επεξεργασία τους από τον προτεινόμενο εκτιμητή κατάστασης ασφούς λογικής ώστε οι τελικές εκτιμήσεις να είναι σε ποσοτική συμφωνία με τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις.

3.2.3 Πρόβλεψη φορτίου

Η πρόβλεψη φορτίου ως έννοια έχει ξεκάθαρα προγνωστικό χαρακτήρα, πράγμα που σημαίνει ότι αφορά αποκλειστικά την εκτίμηση τιμών φορτίου σε μελλοντικό χρόνο. Με αυτό το σκοπό, καθίσταται απαραίτητη η μελέτη ενός συνόλου από παραμέτρους, όπως η ώρα, η ημέρα και η εποχή της πρόβλεψης, ο καιρός, οι τρέχουσες οικονομικές συνθήκες και τυχαία γεγονότα [179]. Όπως εξηγήθηκε στην αρχή της παρούσας ενότητας, μόνο η πρόβλεψη φορτίου σε βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, δηλαδή σε εύρος περίπου μιας ημέρας [179], βρίσκει εφαρμογή στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Σημειώνεται, βεβαίως, ότι η πρόβλεψη φορτίου στα δίκτυα διανομής, εκτός από εργαλείο της εκτίμησης κατάστασης, είναι χρήσιμη και για την οικονομική κατανομή φορτίου, τη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ή την ανάπτυξη του δικτύου, τη μελέτη αιχμών ζήτησης κ.α. Στο πλαίσιο αυτών των διαδικασιών, εφαρμόζεται κυρίως η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου.

Το ενδιαφέρον για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου στα δίκτυα διανομής συνέπεσε χρονικά με τις πρώτες εργασίες σχετικά με την εκτίμηση κατάστασης στα δίκτυα διανομής, όπως στην αναφορά [83]. Μια μέθοδος βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο υπολογιστικών διαδικασιών πραγματικού χρόνου, όπως οι εκτιμητές κατάστασης, προτάθηκε στην αναφορά [180]. Η μέθοδος βασίζεται σε ένα απλό μοντέλο ανάλυσης χρονοσειρών, στο πλαίσιο του οποίου η διακύμανση του φορτίου αναλύεται σε τέσσερις συνιστώσες: εξαρτώμενη από τον καιρό, ανεξάρτητη από τον καιρό, ντετερμινιστική και στοχαστική συνιστώσα. Οι παράμετροι του μοντέλου υπολογίζονται μέσω ενός εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων με χρήση ιστορικών δεδομένων κατανάλωσης και καιρού. Στη μεταγενέστερη εργασία [181], αναπτύχθηκε μια παρόμοια μέθοδος πρόβλεψης φορτίου σε επίπεδο μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ, η οποία βασίζεται στην ανάλυση χρονοσειρών και αξιοποιεί δεδομένα από σύστημα AMR. Η χρονική διακύμανση του φορτίου αναλύεται σε δυο ντετερμινιστικές συνιστώσες, με στόχο τη μοντελοποίηση τόσο της γενικής τάσης όσο και της

κυκλικότητάς (περιοδικότητάς) της, και μια στοχαστική συνιστώσα. Οι παράμετροι του μοντέλου της γενικής τάσης υπολογίζονται με μία μέθοδο βασισμένη στην ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) βάσει των δεδομένων AMR και της θερμοκρασίας κατά την ώρα των καταγραφών, ενώ για το μοντέλο της περιοδικότητας χρησιμοποιήθηκε φασματική ανάλυση των καταγεγραμμένων καμπυλών φορτίου.

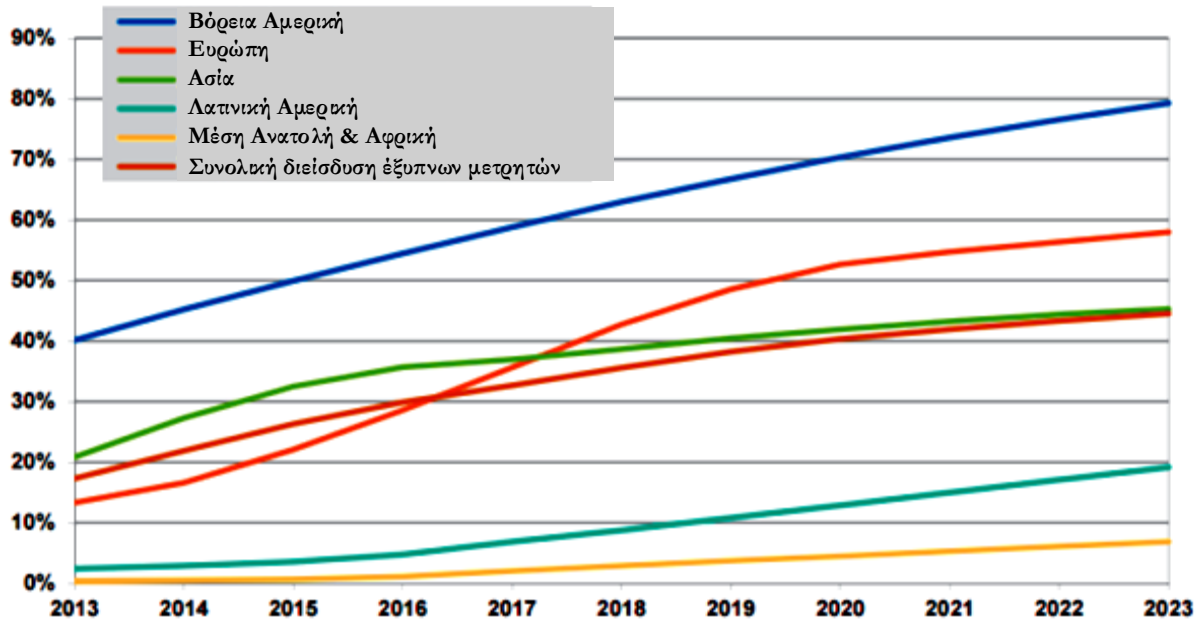
Εξίσου σημαντικός αναδεικνύεται ο ρόλος της πρόβλεψης φορτίου και για την εκτίμηση κατάστασης των ενεργών δικτύων διανομής. Στην αναφορά [182], παρουσιάζεται ένα μοντέλο πρόβλεψης φορτίου βασισμένο στην ανάλυση παλινδρόμησης, το οποίο λαμβάνει υπόψη δεδομένα κατανάλωσης έως και μία εβδομάδα πριν από την ημέρα εκτίμησης, τη θερμοκρασία και τη διάρκεια του ημερήσιου, φυσικού φωτισμού. Προϋπόθεση λειτουργίας του η διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίων από μετρητές XT. Η πρόβλεψη φορτίου μπορεί να γίνει σε επίπεδο υποσταθμού YT/MT, μετασχηματιστή MT/XT ή καταναλωτή, ενώ τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση κατάστασης του δικτύου με τη μέθοδο σάρωσης πίσω-εμπρός. Μια διαφορετική προσέγγιση ως προς την αξιοποίηση των προβλέψεων φορτίου προτείνεται στην εργασία [183]. Το σύνολο των προβλεπόμενων εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος στους κόμβους του δικτύου παρέχεται ως είσοδος σε ένα μοντέλο ανάλυσης ροών φορτίου από το οποίο προκύπτουν αντίστοιχες προβλέψεις για τις τιμές όλων των ηλεκτρικών μεγεθών του δικτύου, μετρούμενων ή μη. Κατόπιν, ένας γραμμικός εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ προβλεπόμενων και μετρούμενων τιμών για όσα μεγέθη μετριοούνται και παρέχει μια νέα, βελτιωμένη εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης του δικτύου.

3.3 Χρήση Δεδομένων από Έξυπνους Μετρητές στο Πλαίσιο της Εκτίμησης Κατάστασης στα Δίκτυα Διανομής

Οι έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν αναμφίβολα τις πιο σημαντικές μονάδες εξοπλισμού στο πλαίσιο της ανάπτυξης συστημάτων εποπτείας και ελέγχου των δικτύων διανομής με ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών με στόχο τη βέλτιστη διαχείρισή τους [184]. Επιπλέον, αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο μερίδιο επί του συνόλου της επένδυσης που απαιτείται για την αναβάθμιση των δικτύων διανομής. Πιο συγκεκριμένα, οι δεσμεύσεις εμπορικής εξάπλωσης των έξυπνων συστημάτων μέτρησης στην Ευρωπαϊκή Ένωση αντιστοιχούν σε ένα ποσό ύψους περίπου 45 δισεκατομμυρίων ευρώ με στόχο την εγκατάσταση, μέχρι το 2020, σχεδόν 200 εκατομμυρίων έξυπνων μετρητών, ένας αριθμός που αντιστοιχεί σε ποσοστό περίπου 72 % του συνόλου των ευρωπαϊκών καταναλωτών [185]. Σύμφωνα με την πηγή [186], αυτός ο αριθμός κρίνεται ρεαλιστικά μη εφικτός. Ο αντίστοιχος αριθμός αναφορικά με τη Βόρεια Αμερική εκτιμάται ότι θα ξεπεράσει τους 100 εκατομμύρια έξυπνους μετρητές. Στο Σχήμα 3.1, απεικονίζονται τα ποσοστά διείσδυσης εγκατεστημένων έξυπνων μετρητών σε καταναλωτές XT ανά γεωγραφική περιοχή και συνολικά, σε παγκόσμιο επίπεδο.

Σύμφωνα με τον ορισμό που χρησιμοποιείται από την επιτροπή εργασίας της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (EU Commission task force) για τα ευφυή δίκτυα [9], ως έξυπνος μετρητής θεωρείται κάθε μετρητική διάταξη με εκτεταμένη λειτουργικότητα, η οποία του εξασφαλίζει τη δυνατότητα να συλλέγει και να αποστέλλει δεδομένα μέσω ενός συστήματος AMI σε ένα κέντρο διαχείρισης δεδομένων. Η εκτεταμένη λειτουργικότητα περιλαμβάνει για παράδειγμα τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου φορτίου και δυναμικής τιμολόγησης, ενώ διατίθεται διεπαφή για τον καταναλωτή ώστε να μπορεί να επιτηρεί την ενεργειακή χρήση του. Επιπλέον, ένα έξυπνο σύστημα μέτρησης (smart metering system) περιλαμβάνει τις υποδομές AMI, τους έξυπνους μετρητές, τους συγκεντρωτές δεδομένων, το κέντρο διαχείρισης καθώς και όλες τις διατάξεις, τα υποσυστήματα και τις διεπαφές που απαιτούνται για την ανταλλαγή

πληροφοριών μεταξύ των συμμετεχόντων μερών στην αγορά ενέργειας. Ένας γενικότερος ορισμός δίνεται στην ευρωπαϊκή οδηγία για την ενεργειακή απόδοση (2012/27/ΕΕ): ως έξυπνο σύστημα μέτρησης ορίζεται ένα ηλεκτρονικό σύστημα το οποίο μπορεί να μετρά την κατανάλωση ενέργειας, παρέχοντας περισσότερες πληροφορίες σε σχέση με έναν συμβατικό μετρητή και μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα χρησιμοποιώντας μια μορφή ηλεκτρονικών επικοινωνιών [185].



Σχήμα 3.1: Η εξέλιξη της εγκατάστασης έξυπνων μετρητών σε καταναλωτές ΧΤ ανά γεωγραφική περιοχή και συνολικά, σε παγκόσμια κλίμακα [186].

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς, καθίσταται προφανές ότι η έννοια του έξυπνου μετρητή είναι πλέον συνυφασμένη με τα συστήματα ΑΜΙ. Όπως έχει, ήδη, αναφερθεί στο Κεφάλαιο 1, τα συστήματα ΑΜΙ αποτελούν μετεξέλιξη των συστημάτων ΑΜΡ και η ανάπτυξή τους σηματοδοτεί την έλευση των ευφυών δικτύων. Στο πλαίσιο των συστημάτων ΑΜΙ, οι έξυπνοι μετρητές, εν αντιθέσει με τις παθητικές μετρητικές μονάδες των συστημάτων ΑΜΡ για τιμολογιακούς σκοπούς, χαρακτηρίζονται από εκτεταμένη λειτουργικότητα, η οποία εξασφαλίζει την υποστήριξη διαδικασιών πραγματικού χρόνου, όπως οι εκτιμητές κατάστασης, μέσω της παροχής μετρήσεων κατανάλωσης σε χρονική κλίμακα δεκαπεντάλεπτου (σπανίως λιγότερο) ή περισσότερο [86]. Παρ' όλα αυτά, στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται εργασίες οι οποίες μετέρχονται εσφαλμένα την έννοια του έξυπνου μετρητή χωρίς σαφή διάκριση των ανωτέρω χαρακτηριστικών. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, ως έξυπνοι μετρητές θεωρούνται αποκλειστικά οι μονάδες εκτεταμένης λειτουργικότητας σύμφωνα με τις προδιαγραφές των συστημάτων ΑΜΙ.

Η συνεισφορά της χρήσης δεδομένων κατανάλωσης τα οποία προέρχονται από συστήματα ΑΜΡ ή ΑΜΙ, στην αξιόπιστη και ακριβή λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής έχει βρεθεί στο επίκεντρο του ερευνητικού ενδιαφέροντος κατά την τελευταία δεκαετία. Αδιαμφισβήτητο συμπέρασμα είναι ότι η εγκατάσταση έξυπνων συστημάτων μέτρησης, τα οποία περιλαμβάνουν έξυπνους μετρητές τόσο σε καταναλωτές ΧΤ όσο και σε μετασχηματιστές ΜΤ/ΧΤ, βελτιώνουν την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης [86], ενώ και η χρήση δεδομένων ΑΜΡ έχει επιβεβαιωμένα θετική συμβολή στην εκτίμηση κατάστασης για ενεργά δίκτυα διανομής [187]. Σε αυτό το ερευνητικό πλαίσιο, ένα άκρως σημαντικό ζήτημα είναι η δυνατότητα ή μη της απευθείας παροχής δεδομένων φορτίου – ακόμη και πραγματικού

χρόνου – στους εκτιμητές κατάστασης. Σε γενικές γραμμές, τέσσερα είναι τα χαρακτηριστικά των δεδομένων φορτίου που καθορίζουν την ανωτέρω δυνατότητα: η χρονική διαθεσιμότητα, ο συγχρονισμός, τα σφάλματα επικοινωνίας και τα υπολογιστικά σφάλματα. Προφανώς, στην περίπτωση μιας μετρητικής υποδομής τόσο προηγμένης όπου το σύνολο των δεδομένων φορτίου θα ήταν άμεσα διαθέσιμο στο αντίστοιχο ΚΕΕ, συγχρονισμένο και με ποσοτικοποιημένες τις επιμέρους ακριβείες τους, αυτά θα παρέχονταν αυτομάτως, χωρίς καμία προεργασία ως πραγματικές μετρήσεις στον εκτιμητή κατάσταση. Στην πραγματικότητα, όμως, καμία από τις προϋποθέσεις αυτές δεν ισχύει με αποτέλεσμα η προεπεξεργασία των δεδομένων φορτίου πριν από την παροχή τους ως ψευδομετρήσεις στους εκτιμητές κατάσταση, να είναι αναγκαία. Η χρήση μεθόδων εκτίμησης φορτίου για αυτό το σκοπό αποτελεί μια αποτελεσματική πρακτική χωρίς, όμως, να μονοπωλεί το ερευνητικό ενδιαφέρον.

Στην κατηγορία των εργασιών που δεν χρησιμοποιούν κάποια μέθοδο εκτίμησης φορτίου ανήκουν οι αναφορές [160], [188]–[191], οι οποίες αφορούν αποκλειστικά δεδομένα από έξυπνους μετρητές. Στην αναφορά [188], αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της χρονικής καθυστέρησης των δεδομένων φορτίου από έξυπνους μετρητές. Αν και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ανά δεκαπεντάλεπτο και συγχρονισμένα, θεωρούνται καθυστερήσεις έως και δώδεκα ωρών στη διαθεσιμότητα των δεδομένων στο ΚΕΕ – γεγονός που βρίσκεται εκτός προδιαγραφών συστημάτων AMI. Έτσι, για την εκτίμηση κατάσταση WLS σε πραγματικό χρόνο προτείνεται η χρήση των δεδομένων φορτίου κατά το ίδιο χρονικό διάστημα από την προηγούμενη ημέρα μαζί με τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις από τις αναχωρήσεις των κύριων γραμμών διανομής και τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Σημειώνεται ότι αμελείται η συνεισφορά των αθροιστικών σφαλμάτων (aggregation errors), τα οποία προκύπτουν κατά την άθροιση των φορτίων των επιμέρους καταναλωτών προκειμένου να εξαχθεί το φορτίο του μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ που τους τροφοδοτεί, στην ακρίβεια των τελικών τιμών φορτίου. Αντιθέτως, στην αναφορά [189], δεν θεωρούνται καθυστερήσεις στη διαθεσιμότητα των δεδομένων από έξυπνους μετρητές, αλλά μελετάται το ζήτημα της ακριβείας τους και τυχόν σφαλμάτων επικοινωνίας. Η ακρίβεια των παρεχόμενων δεδομένων φορτίου στην εκτίμηση κατάσταση WLS συνδέεται με την κλάση ακριβείας των έξυπνων μετρητών του εμπορίου, ενώ σε περίπτωση απώλειας δεδομένων γίνεται χρήση ψευδομετρήσεων με βάση την καταγεγραμμένη κατανάλωση κατά το ίδιο χρονικό διάστημα από την ίδια ημέρα της προηγούμενης εβδομάδας. Και σε αυτή την αναφορά, αμελούνται τυχόν αθροιστικά σφάλματα.

Αν και οι υλοποιήσεις των εργασιών [188] και [189] είναι απλές και τα αποτελέσματά τους, υπό συνθήκες, ιδιαίτερω ικανοποιητικά, έχουν προταθεί πιο σύνθετες μέθοδοι με στόχο τη βέλτιστη ενσωμάτωση δεδομένων από έξυπνους μετρητές στους εκτιμητές κατάσταση. Ένα σοβαρό πρόβλημα είναι ότι οι καθυστερήσεις στη διαθεσιμότητα των δεδομένων από έξυπνους μετρητές στα ΚΕΕ, μεταξύ άλλων, έχουν ως αποτέλεσμα ο ρυθμός ανανέωσής τους να είναι πολύ χαμηλότερος σε σχέση με τις μετρήσεις SCADA. Στην αναφορά [160], προτείνεται μία διαδικασία εκτίμησης κατάσταση WLS σε δυο χρονικές κλίμακες: εκτελείται σύμφωνα με το ρυθμό ανανέωσης των «γρήγορων» μετρήσεων, αλλά λαμβάνει υπόψη και τις «αργές» μετρήσεις ώστε να παράγει ενδιάμεσες, εικονικές τιμές κατά τα χρονικά διαστήματα που αυτές δεν ανανεώνονται. Στο πλαίσιο της εργασίας [190], αντιμετωπίζεται ο ελλιπής συγχρονισμός των δεδομένων από έξυπνους μετρητές: δεδομένου ότι οι έξυπνοι μετρητές μεταδίδουν ανά δεκαπεντάλεπτο, όποια ποσότητα φορτίου δεν ανανεώνεται στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα, τίθεται, αυτομάτως, ίση με την αμέσως προηγούμενη μετρηθείσα τιμή και η ακρίβεια με την οποία παρέχεται στην εκτίμηση κατάσταση WLS επιβαρύνεται με ποινή ανάλογη της χρονικής καθυστέρησης ως προς τη στιγμή του συγχρονισμού. Πρόκειται για μια πολύ αποτελεσματική μέθοδο φιλτραρίσματος των δεδομένων με βάση το βαθμό συγχρονισμού τους, η οποία βελτιώνει αισθητά την ακρίβεια των παρεχόμενων εκτιμήσεων. Στην αναφορά [191], μελετάται η επίδραση των αθροιστικών σφαλμάτων στην

εκτίμηση κατάστασης WLS, με την υπόθεση ότι δεν υπάρχει πρόσβαση στα δεδομένα των επιμέρους καταναλωτών παρά μόνο στις τελικές ψευδομετρήσεις φορτίου σε επίπεδο μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ. Διαπιστώνεται ότι τα σφάλματα επηρεάζουν αρνητικά την ακρίβεια των εκτιμήσεων των γωνιών τάσης των κόμβων και, ακολούθως, προκρίνονται λύσεις όπως η συμπερίληψη των συσχετίσεων μεταξύ των ψευδομετρήσεων φορτίου στο μοντέλο WLS, η εκτίμηση των απωλειών ενέργειας μετά από τους μετασχηματιστές διανομής και η αναβάθμιση του μετρητικού εξοπλισμού. Τέλος, στην αναφορά [192] επιχειρείται μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση στο πλαίσιο ενός συστήματος AMI που καλύπτει ένα πειραματικό μικροδίκτυο: οι έξυπνοι μετρητές μεταδίδουν μετρήσεις ρεύματος (ενεργό και άεργη συνιστώσα) και τάσης από κάθε καταναλωτή, ανά δεκάλεπτο προς στο ΚΕΕ, όπου μία μέθοδος γραμμικής εκτίμησης κατάστασης παρέχει εκτιμήσεις ανά φάση. Αξιοσημείωτο είναι ότι κάθε καταναλωτής συνιστά ένα κόμβο του μικροδικτύου.

Στον αντίποδα, στην κατηγορία των εργασιών που χρησιμοποιούν μεθόδους εκτίμησης φορτίου για την προεπεξεργασία δεδομένων φορτίου ανήκουν οι αναφορές [104], [105] και [164], οι οποίες αφορούν τη διαχείριση δεδομένων από έξυπνους μετρητές, και οι αναφορές [169], [182] και [194], οι οποίες περιλαμβάνουν τη χρήση δεδομένων από συστήματα AMR. Στην εργασία [104], εφόσον διαπιστώνεται μεγαλύτερη χρονική καθυστέρηση από ένα προκαθορισμένο όριο ως προς τη διαθεσιμότητα δεδομένων από έξυπνους μετρητές, προτείνεται μια διαδικασία μηχανικής εκμάθησης, η οποία χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα φορτίου βάσει καταγραφών των έξυπνων μετρητών, προκειμένου να παραγάγει ψευδομετρήσεις σε επίπεδο μετασχηματιστών διανομής. Σε παρόμοια λογική κινείται η αναφορά [164], όπου η αναπλήρωση των δεδομένων γίνεται μέσω εκτίμησης φορτίου, η οποία βασίζεται σε έναν αλγόριθμο συσταδοποίησης k-μέσων (k-means clustering). Με αυτόν τον τρόπο, καθορίζονται k διαφορετικά προφίλ φορτίου σε επίπεδο μετασχηματιστή ΜΤ/ΧΤ με βάση τα ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης και επιλέγεται το πιο αντιπροσωπευτικό για τον κόμβο στον οποίο εμφανίζεται η έλλειψη των δεδομένων. Τέλος, στην αναφορά [105], τυχόν ελλιπή δεδομένα από έξυπνους μετρητές εξαιτίας σφαλμάτων επικοινωνίας αναπληρώνονται μέσω εκτιμήσεων φορτίου που παράγονται από ένα μοντέλο ανάλυσης χρονοσειρών.

Αναφορικά με τα δεδομένα από συστήματα AMR, οι μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις προκειμένου να γίνουν διαθέσιμα στα ΚΕΕ καθιστούν απαραίτητη τη χρήση κάποιας μεθόδου εκτίμησης φορτίου, όπως η μέθοδος της αναφοράς [169]. Εξίσου αποτελεσματικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος πρόβλεψης φορτίου της αναφοράς [182] σε περίπτωση που, σε πραγματικό χρόνο, τα πιο πρόσφατα δεδομένα φορτίου είναι αυτά της προηγούμενης ημέρας. Ουσιαστικά, η μέθοδος, αν και λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, δρα προβλεπτικά υπό την έννοια ότι χρησιμοποιεί παρελθοντικά δεδομένα φορτίου. Στην εργασία [193] αξιολογούνται τέσσερις τεχνικές επιμερισμού φορτίου ανά φάση οι οποίες βασίζονται στη στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων φορτίου AMR. Έτσι, ο επιμερισμός γίνεται με βάση την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας (σε kWh) ανά μετασχηματιστή, παρομοίως τη μηνιαία κατανάλωση (σε kWh), τα ονομαστικά μεγέθη των μετασχηματιστών (σε kVA) και τη ζήτηση ενεργού ισχύος (σε kW) θεωρώντας σταθερό συντελεστή ισχύος. Ο επιμερισμός με βάση τη μηνιαία κατανάλωση ενέργειας αποδεικνύεται πιο αποτελεσματικός για την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος στην εργασία [194] αποτελεί μια βελτίωση της εργασίας [169], καθώς προβλέπεται και η χρήση ενός πιο εξελιγμένου μοντέλου ανάλυσης χρονοσειρών με στόχο την εκτίμηση φορτίου σε επίπεδο καταναλωτή.

Απολογιστικά, η χρήση μεθόδων εκτίμησης και πρόβλεψης φορτίου εξασφαλίζει την παραγωγή ψευδομετρήσεων σε πραγματικό χρόνο ανεξαρτήτως της χρονικής διαθεσιμότητας δεδομένων φορτίου

και του επιπέδου συγχρονισμού όσων από αυτά αντλούνται σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, είναι εύκολο να ποσοτικοποιηθεί η ακρίβεια των ψευδομετρήσεων μέσω της σύγκρισής τους με τις πραγματικές μετρήσεις. Τέλος, πολύ σημαντική συνεισφορά είναι η ευελιξία που διαθέτουν αρκετές μέθοδοι, όπως οι προτεινόμενες στις αναφορές [182] και [194], να προβαίνουν σε εκτίμηση και πρόβλεψη φορτίου τόσο σε επίπεδο καταναλωτή όσο και σε μετασχηματιστή διανομής. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτή η αποφυγή των αθροιστικών σφαλμάτων που προκύπτουν όταν η επεξεργασία των δεδομένων φορτίου γίνεται πρωτογενώς σε επίπεδο καταναλωτή. Στην αναφορά [182], προκύπτει ένα σχετικό συμπέρασμα, καθώς η πρόβλεψη φορτίου απευθείας σε επίπεδο μετασχηματιστή διανομής αποδίδει πιο ακριβείς ψευδομετρήσεις σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν από την άθροιση των προβλέψεων ανά καταναλωτή.

3.4 Παραγωγή Ψευδομετρήσεων βάσει της Χρονικής Διαθεσιμότητας Δεδομένων Φορτίου

Σύμφωνα με την ανάλυση στις ενότητες 3.3 και 3.4, η επιλογή του τρόπου παραγωγής ψευδομετρήσεων στα δίκτυα διανομής βασίζεται στη χρονική διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίου από τους καταναλωτές και τους μετασχηματιστές διανομής. Για τη μελέτη ενός δικτύου διανομής, τρία είναι τα πιθανά ενδεχόμενα που πρέπει να εξεταστούν αναφορικά με αυτό το χαρακτηριστικό:

- i. Δεν υπάρχει σύστημα AMI ή AMR. Συνεπώς, δε διατίθενται δεδομένα φορτίου από καταναλωτές και μετασχηματιστές διανομής παρά μόνο υπό τη μορφή ιστορικών δεδομένων με βάση καταγραφές για τιμολογιακούς σκοπούς. Τα μόνα διαθέσιμα δεδομένα φορτίου, σε πραγματικό χρόνο, προέρχονται από τις αναχωρήσεις των κυρίων γραμμών διανομής του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ.
- ii. Υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα AMR ή έξυπνο σύστημα μέτρησης με προδιαγραφές κατώτερες των συστημάτων AMI. Διατίθενται δεδομένα φορτίου από καταναλωτές ή μετασχηματιστές διανομής στο αντίστοιχο ΚΕΕ, αλλά με χρονική καθυστέρηση που μπορεί να φτάσει έως και μία ημέρα.
- iii. Υπάρχει πλήρως λειτουργικό σύστημα AMI με αποτέλεσμα να διατίθενται δεδομένα φορτίου από έξυπνους μετρητές, εγκατεστημένους σε καταναλωτές ή/και μετασχηματιστές διανομής, σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, δηλαδή με καθυστέρηση που δεν υπερβαίνει τη μία ώρα.

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης στα δίκτυα διανομής μέσω της κατάλληλης επιλογής του τρόπου παραγωγής ψευδομετρήσεων με κριτήριο τη χρονική διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίου σε αυτά. Σε αντιστοιχία, λοιπόν, με τον ανωτέρω διαχωρισμό, προτείνονται τρεις μέθοδοι της διεθνούς βιβλιογραφίας για την παραγωγή ψευδομετρήσεων – μία για κάθε κατηγορία δικτύου. Πρόκειται για :

- i. την κλασική μέθοδο επιμερισμού φορτίου της αναφοράς [159],
- ii. τη μέθοδο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου της αναφοράς [182] και
- iii. τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου βάσει μετρήσεων σχεδόν πραγματικού χρόνου της αναφοράς [169].

Και οι τρεις μέθοδοι βασίζονται σε απλά μαθηματικά μοντέλα, δεν απαιτούν αυξημένους υπολογισμούς και παραμετροποιούνται εύκολα ώστε να είναι εφικτή η εφαρμογή τους σε διαφορετικά δίκτυα διανομής. Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά και οι τρεις μέθοδοι. Στο πλαίσιο της περιγραφής των μεθόδων [182] και [169], συνοψίζονται οι βασικές αρχές της μοντελοποίησης φορτίου με χρήση της ανάλυσης χρονοσειρών και της ανάλυσης παλινδρόμησης.

3.4.1 Μέθοδος επιμερισμού φορτίου [159]

Η εργασία [159] αποτελεί σημείο αναφοράς στις μεθόδους και τεχνικές επιμερισμού φορτίου σε ακτινικά δίκτυα διανομής. Ουσιαστικά, βελτιώνει προγενέστερες εμπειρικές τεχνικές επιμερισμού φορτίου με άξονα τις εξής καινοτομίες:

- Εντάσσεται στο μοντέλο η εξάρτηση των εκτιμήσεων φορτίου από τον ακριβή χρόνο (συνήθως ώρα) – κατά τη διάρκεια της μέρας – στον οποίο αυτές αντιστοιχούν (time-of-day dependency). Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη επικεντρώνεται στη διακύμανση του φορτίου μέσα σε μια ημέρα και δεν περιορίζεται στην επεξεργασία φορτίου μόνο σε όρους αιχμών (load peaks).
- Το πρόβλημα του επιμερισμού φορτίου μελετάται υπό το πρίσμα της θεωρίας πιθανοτήτων και ποσοτικοποιείται η αβεβαιότητα των εκτιμήσεων. Κάθε άγνωστη ποσότητα φορτίου θεωρείται μια τ.μ. με μέση τιμή την εκτίμηση που προκύπτει από τον επιμερισμό φορτίου και τυπική απόκλιση η οποία υπολογίζεται με βάση ιστορικά δεδομένα φορτίου.
- Εξίσου σημαντικό είναι ότι λαμβάνονται υπόψη και οι κλάσεις των καταναλωτών, οι οποίοι τροφοδοτούνται από το υπό μελέτη δίκτυο. Κάθε κλάση καταναλωτών εμφανίζει χαρακτηριστικές ημερήσιες καμπύλες φορτίου, ενώ η ζήτηση μεταβάλλεται διαφορετικά συναρτήσει της θερμοκρασίας, της εποχής και της ημέρας της εκτίμησης.

Στο πλαίσιο της εργασίας, αναφέρεται αρχικώς η συνηθέστερη τεχνική επιμερισμού φορτίου η οποία βασίζεται στη γνώση της ονομαστικής ικανότητας – συνήθως της ονομαστικής φαινομένης ισχύος – των μετασχηματιστών διανομής σε μια κύρια γραμμή διανομής. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, έστω ότι είναι διαθέσιμη μια πραγματική μέτρηση ροής ενεργού ισχύος στην αναχώρηση της κύριας γραμμής η οποία αναπαρίσταται από τον κόμβο k . Ο επιμερισμός φορτίου στον κόμβο l , ο οποίος αποτελεί φύλλο του δέντρου με ρίζα τον κόμβο k , γίνεται μέσω του λόγου της ονομαστικής ισχύος του μετασχηματιστή που εξυπηρετεί τον κόμβο l προς το άθροισμα των ονομαστικών ισχύων όλων των μετασχηματιστών διανομής της εν λόγω κύριας γραμμής. Έτσι, η σχέση επιμερισμού λαμβάνει την εξής μορφή:

$$P_l^{est} = P_{k,fl} \frac{kVA_l}{\sum_{i=1}^N kVA_i} \quad (3.1)$$

όπου P_l^{est} είναι η επιμεριζόμενη ενεργός ισχύς στον κόμβο l , $P_{k,fl}$ είναι η μέτρηση ροής ενεργού ισχύος δια του κόμβου k , kVA_l είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του μετασχηματιστή στον κόμβο l και N το σύνολο των μετασχηματιστών διανομής και, συνεπώς, των κόμβων της κύριας γραμμής.

Ο επιμερισμός του φορτίου βάσει της ονομαστικής ικανότητας των μετασχηματιστών αποτελεί μια στατική τεχνική και στερείται μιας βάσης πραγματικών δεδομένων φορτίου, έστω και ιστορικών. Μια παραλλαγή της σχέσης (3.1) επιτυγχάνεται μέσω της εισαγωγής μιας παραμέτρου που ποσοτικοποιεί το μέσο φορτίο ανά μετασχηματιστή διανομής. Γι' αυτό το σκοπό, είναι απαραίτητη η παροχή στοιχείων κατανάλωσης από λογαριασμούς και καταγραφές από μετρητές καταναλωτών. Προς αυτή την κατεύθυνση, υπολογίζεται ο δείκτης της μέσης ημερήσιας ζήτησης καταναλωτή (average daily customer demand – ADC) ως εξής :

$$ADC = \frac{\text{καταγεγραμμένη κατανάλωση (kWh)}}{\text{διάστημα χρέωσης (ημέρες)}} \quad (3.2)$$

Με την υπόθεση ότι ο δείκτης αυτός προσεγγίζει την πραγματική ζήτηση πιο αποτελεσματικά από την ονομαστική ικανότητα των μετασχηματιστών, η σχέση (3.1) τροποποιείται ως εξής:

$$P_l^{est} = P_{k,fl} \frac{ADC_l}{\sum_{i=1}^N ADC_i} \quad (3.3)$$

όπου ADC_l είναι η μέση ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για τους καταναλωτές που εξυπηρετούνται από το μετασχηματιστή διανομής του κόμβου l .

Σημειώνεται ότι, για την εξαγωγή του δείκτη ADC_l , απαιτείται να είναι πλήρως γνωστή η συνδεσιμότητα των καταναλωτών ώστε οι συνεισφορές τους να υπολογίζονται μόνο μια φορά και αυστηρά για το μετασχηματιστή που τους τροφοδοτεί.

Λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.1) και (3.3), η προτεινόμενη τεχνική επιμερισμού φορτίου εντάσσεται στο μαθηματικό μοντέλο τη χρονική διακύμανση του φορτίου μέσα στην ημέρα. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση καμπυλών φορτίου καθίσταται απαραίτητη και, εφόσον αυτές βασίζονται σε στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων φορτίου, η μελέτη διεξάγεται υπό το πρίσμα της θεωρίας πιθανοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, εισάγεται ο συντελεστής μοντελοποίησης φορτίου LMF (load modeling factor), ο οποίος λαμβάνει τιμές από κανονικοποιημένες ημερήσιες καμπύλες φορτίου για κάθε κλάση καταναλωτών. Οι καμπύλες φορτίου προέρχονται από τη στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων και αναπαριστούν τη μέση διακύμανση φορτίου συναρτήσει της εποχής, της ημέρας της εβδομάδας και της θερμοκρασίας, ενώ παρέχεται και η σχετική τυπική απόκλιση. Η κανονικοποίηση γίνεται ως προς την αιχμή φορτίου των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η τιμή $E[LMF_{j,t}]$ είναι ίση με τη μέση τιμή φορτίου (ενεργού ισχύος) ενός καταναλωτή της κλάσης j κατά το χρόνο t , ο οποίος ορίζεται από την εποχή, την ημέρα και την ώρα της εκτίμησης, και συνοδεύεται από την αντίστοιχη τυπική απόκλιση.

Κατά συνέπεια, η σχέση επιμερισμού (3.3) τροποποιείται ως εξής:

$$P_{l,j,t}^{est} = P_{k,fl,t} \frac{E[LMF_{j,t}]ADC_{l,j}}{\sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^C (E[LMF_{j,t}]ADC_{i,j}) \right\}} \quad (3.4)$$

όπου $P_{l,j,t}^{est}$ είναι το φορτίο που επιμερίζεται στους καταναλωτές της κλάσης j οι οποίοι τροφοδοτούνται μέσω του κόμβου l κατά το χρόνο t , $P_{k,fl,t}$ η πραγματική μέτρηση ροής ισχύος δια του κόμβου k κατά το χρόνο t , οι δείκτες $ADC_{l,j}$ και $ADC_{i,j}$ αφορούν τους καταναλωτές της κλάσης j που τροφοδοτούνται μέσω των κόμβου l και i , αντίστοιχα, και C είναι ο αριθμός των κλάσεων.

Το γινόμενο $E[LMF_{j,t}]ADC_{i,j}$ παρέχει μια εκτίμηση της ζήτησης ισχύος των καταναλωτών του κόμβου i , οι οποίοι ανήκουν στην κλάση j κατά το χρόνο t . Συνεπώς, ο επιμερισμός φορτίου συνολικά για τον κόμβο l υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{l,t}^{est} = \sum_{j=1}^C P_{l,j,t}^{est} \quad (3.5)$$

Η σχέση (3.4) βελτιώνεται περαιτέρω μέσω της εισαγωγής ενός όρου απωλειών ισχύος κατά τη διανομή της από την κύρια γραμμή στον αντίστοιχο μετασχηματιστή διανομής. Ακολούθως, δίνεται η τελική σχέση όπου όλες οι εκτιμήσεις δίνονται υπό τη μορφή μέσης (αναμενόμενης) τιμής:

$$P_{l,j,t}^{est} = \left(E[P_{k,fl,t}] - E[P_{k,loss,t}] \right) \frac{E[LMF_{j,t}]ADC_{l,j}}{\sum_{i=1}^N \left\{ \sum_{j=1}^C (E[LMF_{j,t}]ADC_{i,j}) \right\}} \quad (3.6)$$

όπου $P_{k,loss,t}$ είναι οι απώλειες ενεργού ισχύος κατά τη διανομή από τον κόμβο k στον κόμβο l .

Με την παραδοχή ότι η εκτίμηση του φορτίου μιας κλάσης είναι τόσο ακριβής όσο ο συντελεστής LMF που της αντιστοιχεί, με άλλα λόγια, όσο η ημερήσια καμπύλη φορτίου της, η τυπική απόκλιση της εκτίμησης $P_{l,j,t}^{est}$ μπορεί να υπολογιστεί μέσω της απλής αναλογικής σχέσης:

$$\sigma[P_{l,j,t}^{est}] = \frac{\sigma[LMF_{j,t}]}{E[LMF_{j,t}]} P_{l,j,t}^{est} \quad (3.7)$$

όπου $\sigma[\cdot]$ είναι η τυπική απόκλιση των μεγεθών.

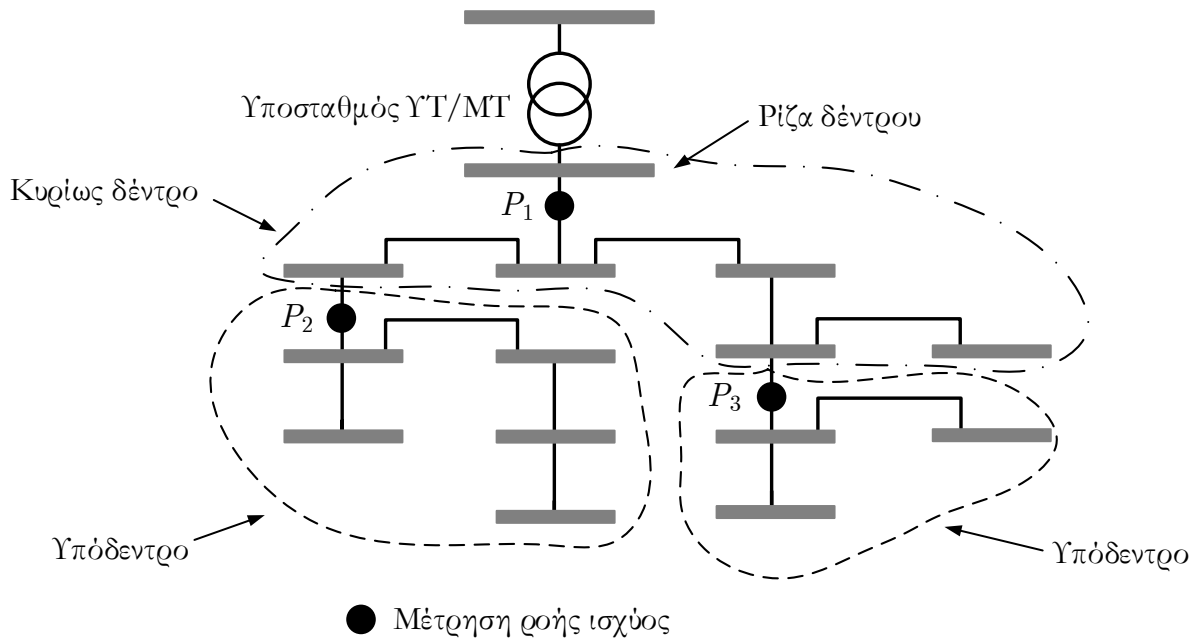
Έτσι, η διασπορά της εκτίμησης της $P_{l,t}^{est}$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma^2[P_{l,t}^{est}] = \sum_{j=1}^C \sigma^2[P_{l,j,t}^{est}] + \text{όροι συνδιακύμανσης} \quad (3.8)$$

όπου $\sigma^2[\cdot]$ είναι η διασπορά των μεγεθών.

Από τις σχέσεις (3.7) και (3.8), γίνεται κατανοητό ότι χρησιμοποιούνται απλοποιημένοι τύποι, καθώς κρίνεται ότι επαρκούν για να προσεγγίσουν την αβεβαιότητα των παρεχόμενων εκτιμήσεων φορτίου.

Με βάση υπολογισμού τις σχέσεις (3.5)–(3.8), προτείνεται ένας αλγόριθμος επιμερισμού φορτίου για ακτινικά δίκτυα διανομής. Κάθε ακτινικό δίκτυο θεωρείται ένα δέντρο με ρίζα τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Με την υπόθεση ότι υπάρχουν m πραγματικές μετρήσεις ρών ισχύος σε ένα δίκτυο, τότε αυτό χωρίζεται σε ένα κυρίως δέντρο με ρίζα στον κόμβο του υποσταθμού και $m - 1$ υπόδεντρα των οποίων οι ρίζες είναι οι κόμβοι όπου διατίθενται οι επιπλέον μετρήσεις.



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα διαχωρισμού ενός δικτύου διανομής σε υπόδεντρα με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις ροών ισχύος.

Ο αλγόριθμος ακολουθείται για το κυρίως δέντρο και κάθε υπόδεντρο ξεχωριστά. Γι' αυτό το λόγο, η κάθε μέτρηση τροποποιείται ώστε να αποτελέσει την ποσότητα που θα επιμεριστεί στα φύλλα του δέντρου/υποδέντρου της. Στο Σχήμα 3.2, απεικονίζεται ένα ακτινικό δίκτυο διανομής ως παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου. Με δεδομένες τις μετρήσεις ροών ενεργού ισχύος P_1 , P_2 και P_3 , οι ποσότητες φορτίου που θα επιμεριστούν στο πλαίσιο του αλγόριθμου είναι:

- για τα υπόδεντρα που αντιστοιχούν στις μετρήσεις P_2 και P_3 , οι ποσότητες $P'_2 = P_2$ και $P'_3 = P_3$
- για το κυρίως δέντρο με ρίζα τον κόμβο του υποσταθμού η ποσότητα $P'_1 = P_1 - P_2 - P_3$.

Με βάση τις σχέσεις (3.5)–(3.6), ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Το υπό μελέτη δίκτυο διαχωρίζεται σε ένα κυρίως δέντρο και υπόδεντρα των οποίων οι ρίζες αντιστοιχούν στα σημεία των διαθέσιμων μετρήσεων ροών ισχύος, δηλαδή στους κόμβους όπου προσέρχονται οι μετρούμενες ροές.
2. Για κάθε (υπό)δέντρο, η ποσότητα φορτίου που πρόκειται να επιμεριστεί στα φύλλα του υπολογίζεται αφαιρώντας από τη μέτρηση ροής στη ρίζα του οποιαδήποτε άλλη μέτρηση ροής υπάρχει στα κατάντη τμήματα αυτής. Επιπλέον, γίνεται μια αρχική υπόθεση απωλειών διανομής.
3. Για κάθε (υπο)δέντρο, αφαιρούνται οι απώλειες από τις μετρούμενες ροές.
4. Για κάθε κόμβο, ταυτοποιούνται οι κλάσεις των καταναλωτών και η κατανομή τους σε αυτές. Επίσης, υπολογίζονται οι αντίστοιχοι δείκτες ADC με βάση τις ιστορικά καταγεγραμμένες καταναλώσεις.
5. Για κάθε κόμβο σε κάθε (υπο)δέντρο, υπολογίζονται οι παράγοντες LMF ανά κλάση φορτίου από βάσεις δεδομένων για μοντελοποίηση φορτίου. Με χρήση των σχέσεων (3.6) και (3.5), εκτιμάται η αναμενόμενη τιμή φορτίου (ενεργού ισχύος) στον υπό μελέτη κόμβο. Επιπλέον, θεωρώντας ένα συντελεστή ισχύος (power factor) ανά κλάση καταναλωτών – είτε σταθερό είτε χρονικά μεταβαλλόμενο – εκτιμάται η αντίστοιχη άεργος ισχύς.
6. Υπολογίζονται οι τιμές της τυπικής απόκλισης και διασποράς για κάθε εκτίμηση φορτίου με χρήση των σχέσεων (3.7) και (3.8). Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχες τιμές για τις εκτιμήσεις αέργου ισχύος

αναμένεται να είναι μεγαλύτερες καθώς για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκαν προσεγγιστικοί συντελεστές ισχύος κατά το βήμα 5.

7. Επιλύεται το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης για το δίκτυο με χρήση των εκτιμήσεων φορτίου και των αντίστοιχων διασπορών ως ψευδομετρήσεις. Προκύπτουν νέες τιμές για τις απώλειες διανομής. Αν δεν ικανοποιούν κάποιο προκαθορισμένο κριτήριο σύγκλισης, τα βήματα 3–7 επαναλαμβάνονται.

Ως γενικό συμπέρασμα, επισημαίνεται η έντονη εξάρτηση της ακρίβειας της προτεινόμενης μεθόδου επιμερισμού φορτίου από τους παράγοντες LMF και, επακόλουθα, από τις τυπικές, ημερήσιες καμπύλες φορτίου που χρησιμοποιούνται. Όσο αυξάνεται η ακρίβειά τους, τόσο ενισχύεται η αξιοπιστία των εκτιμήσεων της μεθόδου για διαφορετικές ώρες μέσα στην ημέρα. Παρ' όλα αυτά, σε πολλά δίκτυα διανομής δεν υπάρχουν οι απαραίτητες βάσεις δεδομένων για τη μοντελοποίηση φορτίου και την εξαγωγή του παράγοντα LMF . Σε αυτές τις περιπτώσεις, μονόδρομο αποτελεί η χρήση είτε της σχέσης (3.1) είτε της σχέσης (3.3) στο πλαίσιο μιας παραλλαγμένης εκδοχής του ανωτέρω αλγόριθμου, όπου τα βήματα 4–6 θα έχουν τροποποιηθεί καταλλήλως.

Η προτεινόμενη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο των εκτιμητών κατάστασης οι οποίοι αναπτύχθηκαν στις αναφορές [88] και [195]. Στην τελευταία, μάλιστα, έχει γίνει μια τροποποίηση της σχέσης (3.6) ώστε να λαμβάνεται υπόψη η εγχρόμη ισχύς σε κάθε κόμβο του δικτύου όπου συνδέονται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

3.4.2 Μέθοδος βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182]

Η προτεινόμενη μέθοδος στην αναφορά [182] αποτελεί μια στοχευμένη προσπάθεια για την αξιοποίηση δεδομένων φορτίου τα οποία διατίθενται στα ΚΕΕ με χρονική καθυστέρηση μιας ημέρας. Η κατάσταση αυτή συναντάται ευρέως στα συστήματα AMR ή σε έξυπνα συστήματα μέτρησης χωρίς δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, μία πρακτική που χρησιμοποιείται κατά κόρον είναι τα δεδομένα φορτίου του διαστήματος 00:00 π.μ. έως 12:00 μ.μ. μιας ημέρας να αποστέλλονται σταδιακά στο υπάρχον ΚΕΕ μέχρι τα μεσάνυχτα της ίδιας ημέρας, ενώ τα δεδομένα του διαστήματος 12:00 μ.μ. έως 23:59 μέχρι το μεσημέρι της επόμενης ημέρας [188]. Η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει δύο χρήσιμα χαρακτηριστικά :

- Δεδομένου ότι τα πιο πρόσφατα, διαθέσιμα δεδομένα φορτίου σε πραγματικό χρόνο είναι αυτά της προηγούμενης ημέρας, το προτεινόμενο μοντέλο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης μπορεί να λειτουργήσει ως διαδικασία πραγματικού χρόνου: χρησιμοποιώντας χθεσινά δεδομένα φορτίου και σημερινά δεδομένα θερμοκρασίας ουσιαστικά εκτιμά το φορτίο πραγματικού χρόνου.
- Η προτεινόμενη μέθοδος είναι αρκετά ευέλικτη ώστε να χρησιμοποιείται σε επίπεδο καταναλωτή, μετασχηματιστή διανομής ή υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας σε καθεμία περίπτωση.

Η μέθοδος βασίζεται σε ένα απλό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης με εξωγενείς μεταβλητές (autoregressive exogenous model – ARX model) το οποίο χρησιμοποιείται σε δεδομένα χρονοσειρών φορτίου με στόχο τη δημιουργία προβλέψεων. Το μοντέλο ARX είναι δυναμικό, δηλαδή κάθε πρόβλεψη φορτίου εξαρτάται από δεδομένα φορτίου παρελθόντος χρόνου, και, επιπλέον, χρησιμοποιεί εξωγενείς μεταβλητές όπως τη θερμοκρασία, τη διάρκεια ημερήσιου φωτισμού κ.α.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφική έρευνα της αναφοράς [179], η πολλαπλή παλινδρόμηση αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο μοντελοποίησης της διακύμανσης φορτίου. Μελετάται η απόκριση μίας

εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή του φορτίου, ως γραμμικό αποτέλεσμα της δράσης πολλών ανεξάρτητων μεταβλητών μέσω της δημιουργίας της εξίσωσης πολλαπλής παλινδρόμησης της οποίας η γενική έκφραση είναι:

$$Y_t = \mathbf{a}_t \mathbf{u}_t + e_t \quad (3.9)$$

όπου Y_t είναι η τιμή φορτίου σε χρόνο t , \mathbf{a}_t είναι το διάνυσμα των συντελεστών της παλινδρόμησης (regression coefficients), \mathbf{u}_t είναι το διάνυσμα των ανεξάρτητων μεταβλητών, όπως ο χρόνος, η θερμοκρασία, υγρασία, η ένταση του φωτός, ο τύπος της ημέρας κ.α., και ο όρος e_t αντιστοιχεί στο σφάλμα του μοντέλου.

Ζητούμενο είναι ο υπολογισμός των μερικών συντελεστών του μοντέλου, ο οποίος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων σε διαθέσιμα δεδομένα χρονοσειρών φορτίου, θερμοκρασίας, υγρασίας κ.τ.λ.

Γενικά, το ανωτέρω μοντέλο είναι κατάλληλο για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη ή εκτίμηση ωριαίων τιμών φορτίου σε επίπεδο υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ ή κύριας γραμμής διανομής. Όπως επισημαίνεται στην αναφορά [182], όμως, για τις περιπτώσεις καταναλωτών ή μετασχηματιστών διανομής είναι απαραίτητο να συμπεριληφθούν στο διάνυσμα \mathbf{u}_t παρελθοντικά δεδομένα της χρονοσειράς φορτίου. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο καθίσταται πιο στιβαρό έναντι της τυχαιότητας που χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά μεμονωμένων καταναλωτών και, επακόλουθα, τη φόρτιση των μετασχηματιστών ΜΤ/ΧΤ. Παράλληλα, σημειώνεται ότι αμιγή μοντέλα αυτοπαλινδρόμησης, τα οποία για να εκτιμήσουν το φορτίο Y_t χρησιμοποιούν αποκλειστικά παρελθοντικά δεδομένα της ίδιας χρονοσειράς Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots , είναι ανεπαρκή. Αυτό συμβαίνει διότι, δεδομένης της μη διαθεσιμότητας τρεχουσών μετρήσεων φορτίου μέσα στην ημέρα, τα μοντέλα προκειμένου να εκτιμήσουν το φορτίο σε πραγματικό χρόνο, βασίζονται σε δικές τους εκτιμήσεις από προηγούμενες ώρες. Έτσι, μειώνεται δραματικά η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους.

Με βάση το ανωτέρω σκεπτικό, προτείνεται ένα υβριδικό μοντέλο ARX το οποίο συνδυάζει στοιχεία από τις μεθόδους πολλαπλής παλινδρόμησης και αυτοπαλινδρόμησης, καθώς το διάνυσμα \mathbf{u}_t απαρτίζεται τόσο από παρελθοντικά δεδομένα φορτίου όσο και από εξωγενείς μεταβλητές πραγματικού ή σχεδόν πραγματικού χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, με την υπόθεση ότι ο χρόνος t αντιστοιχεί σε ώρες, το μοντέλο περιγράφεται από την εξής γραμμική σχέση:

$$Y_t^{est} = \mathbf{a}\mathbf{u} + \mathbf{b}\mathbf{Y}_{past} + c + e_t \quad (3.10)$$

όπου:

- Y_t^{est} είναι η εκτίμηση φορτίου σε μονάδες ενέργειας π.χ. kWh την ώρα t ,
- $\mathbf{a} = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6)$ είναι το διάνυσμα των συντελεστών των εξωγενών μεταβλητών,
- $\mathbf{u} = (T_t, T_{t-1}, T_{t-2}, DL, WD, WE)^T$ είναι το διάνυσμα των εξωγενών μεταβλητών, όπου T_t, T_{t-1} και T_{t-2} είναι οι τιμές θερμοκρασίας την ώρα t και τις δυο προηγούμενες ώρες, αντιστοίχως, DL είναι η διάρκεια ημερήσιου φωτισμού σε ώρες και WD (WE) είναι μια δυαδική μεταβλητή η οποία

λαμβάνει μοναδιαία τιμή όταν η τρέχουσα ημέρα είναι εργάσιμη (αργία) ή μηδενική σε διαφορετική περίπτωση,

- ο $\mathbf{b} = (b_1, b_2)$ είναι το διάνυσμα των συντελεστών των παρελθοντικών δεδομένων,
- ο $\mathbf{Y}_{past} = (Y_{t-24}, Y_{t-168})^T$ είναι οι καταγεγραμμένες καταναλώσεις ενέργειας την ώρα t κατά την προηγούμενη ομοειδή ημέρα (εργάσιμη ή αργία) και κατά την ίδια ημέρα της προηγούμενης εβδομάδος, αντιστοίχως,
- ο c είναι ο σταθερός όρος και
- ο e_t είναι το σφάλμα του μοντέλου.

Οι συντελεστές του μοντέλου a_i , $i = 1, \dots, 6$ και b_1 , b_2 υπολογίζονται με τη συνήθη μέθοδο εκτίμησης ελαχίστων τετραγώνων (ordinary least squares estimation), δηλαδή τα δεδομένα εισόδου στον εκτιμητή δεν σταθμίζονται. Ο υπολογισμός αυτός αποτελεί σημείο κλειδί για την αξιόπιστη λειτουργία της μεθόδου. Στο πλαίσιο της εργασίας [182], ο υπολογισμός βασίστηκε σε δεδομένα ετήσιων χρονοσειρών φορτίου και θερμοκρασίας από ένα ολόκληρο έτος. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την επιλογή παίζει η μεταβλητή DL η οποία, ειδικά για τις σκανδιναβικές χώρες όπου εφαρμόστηκε η μέθοδος, παρουσιάζει ακραίες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους.

Καταληκτικά, αξιοσημείωτο είναι το χαρακτηριστικό ότι οι εκτιμήσεις γίνονται σε μονάδες ενέργειας εφόσον εφαρμόζονται σε δεδομένα καταναλώσεων. Η μετατροπή σε μονάδες ισχύος προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως ψευδομετρήσεις, μπορεί να γίνει με εύκολο τρόπο: π.χ. για ωριαία διαστήματα, η κατανάλωση ενέργειας σε kWh ταυτίζεται ως προς την τιμή με τη μέση ωριαία ισχύ, ενώ η μέση ισχύς για διαστήματα τετάρτου είναι ίση με το τετραπλάσιο της κατανάλωσης σε kWh για το διάστημα αυτό. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζεται η διασπορά ή άλλο μέτρο της ακρίβειας των εκτιμήσεων. Τέλος, τα μικρά σφάλματα κατά τη σύγκριση μεταξύ των εκτιμήσεων φορτίου σε επίπεδο μετασχηματιστή διανομής οι οποίες προκύπτουν είτε από την άθροιση των εκτιμήσεων ανά επιμέρους καταναλωτή είτε από την απ' ευθείας εφαρμογή της μεθόδου σε δεδομένα φορτίου του μετασχηματιστή, επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των ψευδομετρήσεων φορτίου που δύναται να παράσχει.

3.4.3 Μέθοδος εκτίμησης φορτίου [169]

Η μέθοδος που προτείνεται στην αναφορά [169] βασίζεται στη χρήση δεδομένων φορτίου σχεδόν πραγματικού χρόνου. Κατά τη θεμελίωση του μοντέλου, αναφέρεται ότι λειτουργεί στο πλαίσιο προηγμένων συστημάτων AMR με δυνατότητα μαζικής μετάδοσης δεδομένων φορτίου από τους καταναλωτές προς τα τοπικά κέντρα συγκέντρωσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένου ότι η εργασία προηγείται χρονικά (2001) της εισαγωγής του όρου AMI, είναι ασφαλές να θεωρηθεί ότι με αυτή την περιγραφή ουσιαστικά προδιαγράφεται η τεχνολογία AMI. Συνεπώς, με βάση τα σημερινά δεδομένα, η μέθοδος είναι υλοποιήσιμη αποκλειστικά σε δίκτυα διανομής στα οποία υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα AMI.

Σε αδρές γραμμές, η μέθοδος εμφανίζει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν σημείο αναφοράς στη σχετική βιβλιογραφία:

- Πρόκειται για μια μέθοδο εκτίμησης φορτίου πραγματικού χρόνου, η οποία λειτουργεί πλήρως ανεξάρτητα από υπολογιστικές διαδικασίες όπως η ανάλυση ρών φορτίου και η εκτίμηση

κατάστασης. Επιπλέον, οι εκτιμήσεις φορτίου εισάγονται ως ψευδομετρήσεις στην εκτίμηση κατάστασης χωρίς να εξετάζεται η συσχέτιση τους με άλλες διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις.

- Στηρίζεται αποκλειστικά στη χρήση δεδομένων καταναλώσεων: μια μείξη από μετρήσεις σχεδόν πραγματικού χρόνου και ιστορικά δεδομένα εν είδει καμπυλών φορτίου. Δεν χρησιμοποιούνται εξωγενείς μεταβλητές ή ονομαστικά μεγέθη. Επιπλέον, η χρονική διακριτότητα των εκτιμήσεων είναι ίση με αυτή των καμπυλών φορτίου με συνέπεια να μπορεί να καθοριστεί ως ένα βαθμό με κατάλληλη επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων.
- Το προτεινόμενο μοντέλο και ο σχετικός αλγόριθμος χαρακτηρίζονται από απλότητα και περιλαμβάνουν λίγους υπολογισμούς με αποτέλεσμα η υλοποίηση της μεθόδου σε πραγματικό χρόνο να είναι εφικτή. Επίσης, η εκτίμηση φορτίου μπορεί να γίνει είτε σε επίπεδο καταναλωτή ή απ' ευθείας σε επίπεδο μετασχηματιστή διανομής.

Η κεντρική σχέση της μεθόδου βασίζεται σε ένα απλό, εμπειρικό μοντέλο ανάλυσης χρονοσειρών, το οποίο χρησιμοποιεί δεδομένα φορτίου της τρέχουσας ημέρας και της προηγούμενης ομοειδούς ημέρας (εργάσιμη ή αργία). Επίσης, προβλέπεται κατάλληλη επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων για την εξαγωγή των καμπυλών φορτίου, ενώ η τελική εκτίμηση προκύπτει μέσω παρεμβολής (interpolation) των τιμών των καμπυλών στα αποτελέσματα του μοντέλου ανάλυσης χρονοσειρών. Ο πλήρης αλγόριθμος περιλαμβάνει συνολικά τα εξής τρία βήματα:

1. Εξαγωγή τυπικών, ημερησίων καμπυλών ζήτησης ανά κλάση καταναλωτών.
2. Εκτίμηση φορτίου ανά καταναλωτή.
3. Εκτίμηση φορτίου μετασχηματιστή διανομής.

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό ενός περιορισμένου αριθμού επιλεγμένων μετρητών, των οποίων οι καταγραφές πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των τυπικών ημερησίων καμπυλών ζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτό να γίνεται προσπέλαση των καταγραφών των μετρητών – κατανάλωση σε kWh και πληροφορίες σχετικά με τυχόν διακοπές – ανά τακτά, πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα η χρονική διακριτότητα των δεδομένων να μπορεί να φτάσει έως και λίγα λεπτά, π.χ. 5 λεπτά. Έτσι, οι καμπύλες ζήτησης που θα προκύψουν θα έχουν την αυτή χρονική διακριτότητα, ένα στοιχείο το οποίο αξιοποιείται κατά το δεύτερο βήμα.

Ως προς το καθαρά τεχνικό κομμάτι, προτείνεται η κατ' απαίτηση (on demand) προσπέλαση των επιλεγμένων μετρητών μέσω των αμφίδρομων διαύλων επικοινωνίας του συστήματος AMI ανά σταθερά χρονικά διαστήματα μέσα στην ημέρα. Οι μετρητές έχουν επιλεγεί ώστε να αντιπροσωπεύουν τρεις κύριες κλάσεις καταναλωτών, δηλαδή τους οικιακούς, τους εμπορικούς και τους βιομηχανικούς καταναλωτών. Με την προϋπόθεση ότι τηρείται ένα σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ της προσπέλασης των μετρητών, έστω Δt , είναι δυνατό να προσεγγιστεί η μέση ισχύς ενός καταναλωτή τη χρονική στιγμή t από της εξής σχέση:

$$P_t \approx \frac{kWh_t - kWh_{t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (3.11)$$

όπου P_t είναι η μέση ισχύς σε χρόνο t , kWh_t ($kWh_{t-\Delta t}$) είναι η καταγεγραμμένη κατανάλωση ενέργειας τη χρονική στιγμή t ($t-1$) και Δt είναι το σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο διαδοχικών προσπελάσεων.

Όσο μειώνεται η τιμή του Δt , τόσο πιο ακριβής γίνεται η προσέγγιση της στιγμιαίας ισχύος κατά τη χρονική στιγμή t με βάση τον τύπο (3.11). Με την προσπέλαση περιορισμένων σε αριθμό μετρητών, το

διάστημα Δt μπορεί να λάβει ικανοποιητικά χαμηλή τιμή ώστε να ενισχυθεί η ακρίβεια στον υπολογισμό της ισχύος για επιλεγμένους καταναλωτές και να αυξηθεί η χρονική διακριτότητα των τιμών.

Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία αυτή καθημερινά, δημιουργείται μια βάση ιστορικών δεδομένων ανά κλάση καταναλωτών η οποία χρησιμοποιείται για την εξαγωγή τυπικών ημερήσιων καμπύλων φορτίου της κλάσης είτε για εργάσιμη ημέρα είτε για αργία σε τρεις ετήσιες περιόδους: χειμώνα, καλοκαίρι, άνοιξη/φθινόπωρο. Συνολικά, εξάγονται 18 τυπικές, ημερήσιες καμπύλες φορτίου. Κάθε καμπύλη είναι κανονικοποιημένη, δηλαδή η αιχμή της έχει μοναδιαία τιμή, και είναι αντιπροσωπευτική της μέσης διακύμανσης της ζήτησης ισχύος μιας κλάσης καταναλωτών για μια συγκεκριμένη ημέρα σε μια από τις τρεις ανωτέρω περιόδους.

Το δεύτερο βήμα αφορά την εκτίμηση φορτίου ανά καταναλωτή σε πραγματικό χρόνο. Γι' αυτό το σκοπό, πρώτο μέλημα είναι να ελεγχθεί η κατάσταση σύνδεσης του καταναλωτή που εκτιμάται. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αξιοποιεί τα στοιχεία που λαμβάνει από τους μετρητές ώστε να καταγράφει σε ποιους καταναλωτές υπάρχει διακοπή της ηλεκτροδότησης με βάση τις διαθέσιμες αναφορές σφαλμάτων.

Όταν αναφέρεται διακοπή της ηλεκτροδότησης, ο καταναλωτής μπαίνει σε μια λίστα ελέγχου και ξεκινά μια διαδικασία επαναλαμβανόμενων προσπελάσεων στον αντίστοιχο μετρητή σε μικρό χρονικό διάστημα ώστε να επιβεβαιωθεί η διακοπή. Αν, κατ' αυτή τη διαδικασία, τελικά προκύψουν μη μηδενικές καταναλώσεις με αυξανόμενη τιμή, συμπεραίνεται ότι η τροφοδοσία αποκαταστάθηκε ή η πληροφορία διακοπής ήταν εσφαλμένη και ο καταναλωτής βγαίνει εκτός λίστας. Στη περίπτωση που η εσφαλμένη πληροφορία οφείλεται σε τηλεπικοινωνιακή δυσλειτουργία, επιβαρύνεται η αξιοπιστία των παρεχόμενων εκτιμήσεων φορτίου. Ο εντοπισμός των εσφαλμένων δεδομένων εξασφαλίζεται από τη στιγμή που οι εκτιμήσεις φορτίου εισάγονται ως ψευδομετρήσεις στον εκτιμητή κατάσταση του δικτύου.

Σε περίπτωση, λοιπόν, που επιβεβαιωθεί διακοπή της ηλεκτροδότησης, τίθεται αυτομάτως $P_t^{est} = 0$, δηλαδή η εκτίμηση φορτίου του καταναλωτή τη χρονική στιγμή t μηδενίζεται. Αν δεν διαπιστωθεί ή δεν επιβεβαιωθεί διακοπή, τότε ακολουθείται η εξής υπολογιστική διαδικασία:

1. Δεδομένου ότι η αποστολή δεδομένων φορτίου από τους μετρητές πραγματοποιείται N φορές την ημέρα – σαφώς αραιότερα συγκριτικά με το πρώτο βήμα αφού πλέον η διαδικασία αφορά το σύνολο των εγγραπτεστημένων μετρητών – το εικοσιτετράωρο χωρίζεται σε N χρονικά διαστήματα. Έστω ότι η χρονική στιγμή t ανήκει στο i -οστό χρονικό διάστημα ($1 \leq i \leq N$). Τότε, η κατανάλωση ενέργειας σε kWh για το i -οστό χρονικό διάστημα μπορεί να εκτιμηθεί με βάση τον εξής τύπο:

$$kWh_{i, today} = \frac{kWh_{i-1, today}}{kWh_{i-1, day_before}} kWh_{i, day_before} \quad (3.12)$$

όπου ο δείκτης $i-1$ συμβολίζει το αμέσως προηγούμενο χρονικό διάστημα (του οποίου τα δεδομένα φορτίου είναι διαθέσιμα), *today* είναι ο δείκτης για την τρέχουσα ημέρα και *day_before* ο δείκτης για την προηγούμενη ομοειδή ημέρα.

2. Προκειμένου να εκτιμηθεί το φορτίο τη χρονική στιγμή t , αξιοποιείται η αυξημένη χρονική διακριτότητα των ιστορικών δεδομένων φορτίου. Έτσι, δεδομένου ότι δεν διατίθενται δεδομένα φορτίου σχεδόν πραγματικού χρόνου για ενδιάμεσους χρόνους εντός των N χρονικών διαστημάτων, γίνεται παρεμβολή των τιμών από τις καμπύλες φορτίου του πρώτου βήματος στην εκτίμηση $kWh_{i, today}$ με βάση τον ακόλουθο τύπο:

$$P_t^{est} \approx \frac{kWh_{i,today}}{E_i} P_t^{curve} \quad (3.13)$$

όπου P_t^{est} είναι η τελική εκτίμηση φορτίου του καταναλωτή σε μονάδες ισχύος, P_t^{curve} είναι η κανονικοποιημένη τιμή ισχύος της τυπικής ημερήσιας καμπύλης φορτίου που αντιστοιχεί στην κλάση του καταναλωτή για τη συγκεκριμένη ημέρα της εκτίμησης κατά τη χρονική στιγμή t και E_i είναι η τιμή της κατανάλωσης ενέργειας κατά το χρονικό διάστημα i η οποία προκύπτει από την ολοκλήρωση του αντίστοιχου τμήματος της ανωτέρω καμπύλης φορτίου.

- Κατά το τρίτο και τελευταίο βήμα του προτεινόμενου αλγόριθμου, γίνεται η άθροιση των εκτιμήσεων φορτίου των επιμέρους καταναλωτών προκειμένου να προκύψει η εκτίμηση σε επίπεδο μετασχηματιστή. Γι' αυτό το σκοπό, είναι απαραίτητη η γνώση της διασύνδεσης όλων των καταναλωτών ανά μετασχηματιστή διανομής. Πρέπει να τονιστεί ότι οι εκτιμήσεις φορτίου σε επίπεδο μετασχηματιστών αποτελούν μια μέση τιμή για το i -οστό χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι τα δεδομένα φορτίου σχεδόν πραγματικού χρόνου δεν είναι εν γένει συγχρονισμένα, αλλά μπορεί να αποστέλλονται από τους μετρητές οποτεδήποτε μέσα σε αυτό το διάστημα.

Όπως προαναφέρθηκε, η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και απ' ευθείας σε επίπεδο μετασχηματιστή. Σε αυτή την υλοποίηση, προφανώς κάθε τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου του πρώτου βήματος αφορά ένα μετασχηματιστή διανομής. Αυτή η υλοποίηση προτείνεται και στην αναφορά [194] των ιδίων ερευνητών, όπου το μοντέλο (3.21) αντικαθίσταται με ένα πιο πολύπλοκο μοντέλο ανάλυσης χρονοσειρών.

Συμπερασματικά, στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, επιτυγχάνεται ένας αποδοτικός τρόπος διαχείρισης των δεδομένων φορτίου που διατίθενται στα συστήματα AMI. Η μέθοδος περιλαμβάνει επεξεργασία μεγάλου όγκου ιστορικών δεδομένων σε μη πραγματικό χρόνο, ενώ χρησιμοποιεί τις δυο πολύ απλές σχέσεις (3.12) και (3.13) για την εκτίμηση φορτίου σε πραγματικό χρόνο ελαχιστοποιώντας τον σχετικό υπολογιστικό φόρτο. Πολύ σημαντικό είναι και το πλεονέκτημα της αυξημένης χρονικής διακριτότητας των τυπικών καμπυλών φορτίου καθώς και η δυνατότητα εφαρμογής της απ' ευθείας σε επίπεδο μετασχηματιστή διανομής. Τέλος, αν και η μέθοδος προτείνεται για την παροχή ψευδομετρήσεων σε εκτιμητές κατάστασης, δεν υπολογίζεται η διασπορά ή κάποιο άλλο μέτρο της ακρίβειας των εκτιμήσεων.

3.5 Προσομοίωση Εκτίμησης Κατάστασης σε Δίκτυα Διανομής με Χρήση Ψευδομετρήσεων

Προκειμένου να επαληθευτεί η εφαρμοσιμότητα και να αξιολογηθεί η απόδοση των τριών μεθόδων οι οποίες αναλύθηκαν στην ενότητα 3.4, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε η προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας καθεμιάς μεθόδου ξεχωριστά με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS. Στον Πίνακα 3.2, δίνονται συγκριτικά τα χαρακτηριστικά κάθε μεθόδου τα οποία ελήφθησαν υπόψη για το σχεδιασμό και την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Όπως διαπιστώνεται, η κύρια διαφορά έγκειται στα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου: η μέθοδος επιμερισμού φορτίου αξιοποιεί μετρήσεις εγχύσεων ή/και ροών ισχύος, οι οποίες διατίθενται γενικά στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης, εν αντιθέσει με τις υπόλοιπες δύο οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ώστε να αξιοποιούν δεδομένα φορτίου από καταναλωτές.

Πίνακας 3.2: Απαιτούμενες προδιαγραφές και δεδομένα εισόδου για τις τρεις επιλεγμένες μεθόδους.

| Μέθοδος | Είδος δικτύου | Μετρητικές υποδομές | Απαιτούμενα δεδομένα | | |
|--|------------------|---------------------|-------------------------|---------|---------|
| | | | Μετρήσεις εγχύσεων/ροών | Φορτίου | Καιρικά |
| Επιμερισμού φορτίου [159] | Ακτινικό | SCADA | Ναι | Όχι | Όχι |
| Βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] | Χωρίς περιορισμό | AMR | Όχι | Ναι | Ναι |
| Εκτίμησης φορτίου [169] | Χωρίς περιορισμό | AMI | Όχι | Ναι | Όχι |

Η μέθοδος επιμερισμού φορτίου είναι κατάλληλη ώστε να εφαρμοστεί σε εγχώρια δίκτυα διανομής εξαιτίας της, κατά κανόνα, ακτινικής δομής τους και της διαθεσιμότητας μετρήσεων από υποδομές SCADA. Αντιθέτως, οι μέθοδοι βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης και εκτίμησης φορτίου είναι αδύνατο να εφαρμοστούν σε περιπτώσεις εγχώριων δικτύων διανομής εξαιτίας της έλλειψης σε υποδομές AMI και AMR. Μάλιστα, εφόσον βασίζονται και οι δύο στην επεξεργασία δεδομένων φορτίου, έχει λογική βάση να συγκριθούν άμεσα ως προς κοινούς δείκτες επίδοσης. Σε αυτό το πλαίσιο, οι προσομοιώσεις οργανώθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να δοθούν απαντήσεις στα παρακάτω ερωτήματα:

1. Μπορεί η μέθοδος επιμερισμού φορτίου [159] να συνδράμει μέσω της παροχής ψευδομετρήσεων στην αξιόπιστη και ακριβή εκτίμηση κατάστασης WLS για τα εγχώρια δίκτυα διανομής;
2. Μπορούν οι μέθοδοι βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] και εκτίμησης φορτίου [169] να συνδράμουν μέσω της παροχής ψευδομετρήσεων στην αξιόπιστη και ακριβή εκτίμηση κατάστασης WLS για δίκτυα διανομής όπου είναι εγκατεστημένες μετρητικές υποδομές AMI ή AMR;
3. Ποια είναι τα συμπεράσματα της σύγκρισης των μεθόδων του ερωτήματος 2 σε περίπτωση που αυτές εφαρμοστούν στο ίδιο δίκτυο δοκιμών και με βάση τα ίδια δεδομένα φορτίου;

Επιπλέον των τριών ανωτέρω μεθόδων, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε η προσομοίωση της πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας, η οποία αναλύθηκε στην υποενότητα 2.4.2. Στο πλαίσιο της μεθόδου, γίνεται χρήση ψευδομετρήσεων οι οποίες βασίζονται σε μετρήσεις λογικών δεδομένων, άρα, η προσομοίωσή της στην παρούσα ενότητα κρίθηκε ευάρεστη. Στόχος είναι, μέσω της παρουσίας των σχετικών αποτελεσμάτων να απαντηθεί το παρακάτω ερώτημα:

4. Μπορεί η πιθανοτική μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας να εκτιμήσει αξιόπιστα και σε πραγματικό χρόνο το μοντέλο δικτύων διανομής με αυξημένη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ, τα οποία υφίστανται συχνές και ταχείες τοπολογικές αλλαγές;

3.5.1 Γενική περιγραφή των προγραμμάτων προσομοίωσης

Τα προγράμματα προσομοίωσης αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB [196]. Για την υλοποίησή τους χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από το πακέτο αρχείων MATLAB (m-files) ανοιχτού κώδικα, MATPOWER, του οποίου αντικείμενο είναι η προσομοίωση της λειτουργίας ΣΗΕ σε μόνιμη κατάσταση και η επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, μεταξύ των οποίων η ανάλυση ροών φορτίου, η βέλτιστη ανάλυση ροών φορτίου και η εκτίμηση κατάστασης [197]. Επιπλέον των ανωτέρω στοιχείων, παρακάτω συνοψίζονται οι συνεισφορές οι οποίες ολοκληρώθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής:

1. Όλα τα αρχεία συναρτήσεων (functions) του πακέτου MATPOWER τα οποία σχετίζονται με την εκτίμηση κατάστασης τροποποιήθηκαν ώστε να είναι λειτουργικά για κάθε σύστημα/δίκτυο δοκιμών. Το μοντέλο και οι διαθέσιμες μετρήσεις του συστήματος/δικτύου παρέχονται ως αρχεία εισόδου τύπου sys και ses σύμφωνα με την πρότυπη μορφή PVI (έκδοση 23) [198] και μετατρέπονται σε αρχεία τύπου mpc, τα οποία είναι η αντίστοιχη, εσωτερική μορφή του λογισμικού MATLAB.
2. Οι αλγόριθμοι επίλυσης των μεθόδων επιμερισμού [159], βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης [182] και εκτίμησης φορτίου [169] υλοποιήθηκαν εκ του μηδενός σε ανεξάρτητα αρχεία συναρτήσεων.
3. Η συνδυασμένη λειτουργία καθεμίας μεθόδου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS οργανώθηκε σε τρία ανεξάρτητα προγράμματα μικροεντολών και συναρτήσεων (scripts), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αυτόνομες εφαρμογές (standalone applications) υπό τη μορφή εκτελέσιμων αρχείων εκτός περιβάλλοντος του λογισμικού MATLAB.

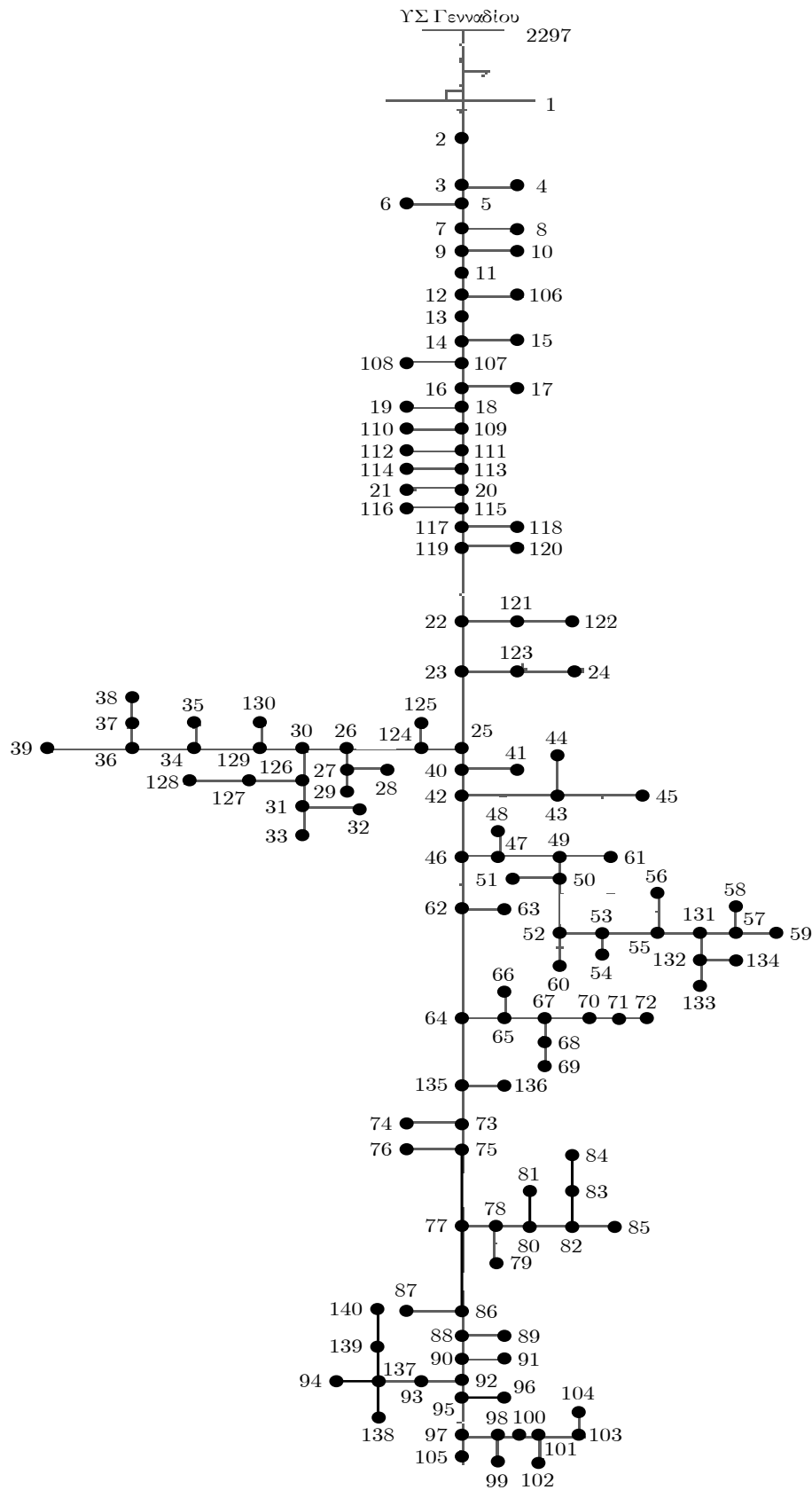
3.5.2 Εφαρμογή της μεθόδου επιμερισμού φορτίου [159] σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου

Στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του αλγόριθμου της μεθόδου επιμερισμού φορτίου [159] σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου. Στη συνέχεια, με γνώμονα το 1^ο ερώτημα που τέθηκε στην εισαγωγή της ενότητας, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος προσομοίωσης της.

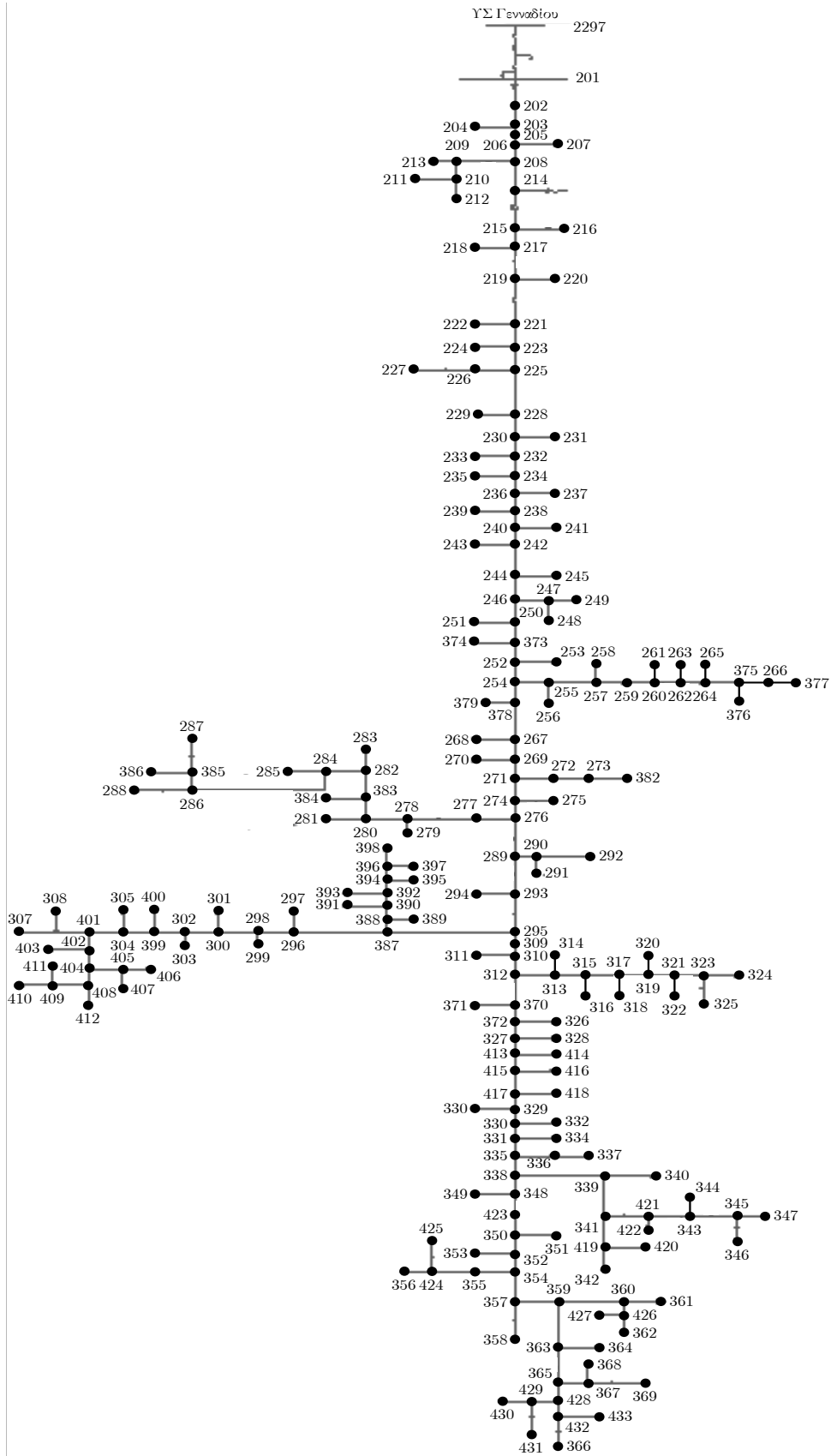
3.5.2.1 Το δίκτυο δοκιμών

Το δίκτυο δοκιμών αποτελείται από δύο κύριες γραμμές διανομής σε επίπεδο τάσης 20 kV, οι οποίες εκκινούν από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ Γενναδίου. Τα μονογραμμικά διαγράμματα των δύο κύριων γραμμών διανομής απεικονίζονται ξεχωριστά στα Σχήματα 3.3 και 3.4 και βασίζονται σε στοιχεία του Διαχειριστή Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.) από το έτος 2013. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κόμβων και των κλάδων του δικτύου παρατίθενται στην αναφορά [199]. Όπως διαπιστώνεται, το συνολικό δίκτυο δοκιμών αποτελείται από 374 κόμβους και έχει ακτινική δομή, γεγονός που καλύπτει την προδιαγραφή για την εφαρμογή της μεθόδου βάσει του Πίνακα 3.2. Επιπλέον, υπάρχουν εγκατεστημένες μονάδες ΑΠΕ, οι οποίες απαρτίζονται από 2 αιολικά πάρκα και 52 φωτοβολταϊκά πάρκα.

Σημειώνεται ότι δεν λαμβάνεται υπόψη η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων του δικτύου και, για τους σκοπούς της μελέτης, θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του δικτύου. Άρα, τα χαρακτηριστικά μεγέθη του, όπως οι σύνθετες αντιστάσεις των κλάδων και οι εγχύσεις των κόμβων, λαμβάνουν μία ισοδύναμη τιμή. Αυτή η παραδοχή δεν επηρεάζει την αξιολόγηση της μεθόδου επιμερισμού η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συνολικού – και όχι του ανά φάση – φορτίου των μετασχηματιστών διανομής.



Σχήμα 3.3: Το μονογραμμικό διάγραμμα της κύριας γραμμής διανομής P220 του υποσταθμού Γενναδίου.



Σχήμα 3.4: Το μονογραμμικό διάγραμμα της κύριας γραμμής διανομής P260 του υποσταθμού Γενναδίου.

3.5.2.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Σε πρώτο πλάνο για το σχεδιασμό της προσομοίωσης βρίσκεται η προϋπόθεση διαθεσιμότητας μετρήσεων εγχύσεων ή/και ροών ισχύος σύμφωνα με τον Πίνακα 3.2. Μαζί με το δίκτυο δοκιμών, ο ΔΕΔΔΗΕ παρείχε ωριαίες μετρήσεις ροών ενεργού και άεργου ισχύος από τον υποσταθμό Γεναδίου προς τις κύριες γραμμές διανομής καθώς και ωριαίες τιμές εγχύσεων ενεργού ισχύος από τα δύο αιολικά πάρκα, τα οποία ήταν εγκατεστημένα στο υπό μελέτη δίκτυο κατά το έτος 2012. Όλες αυτές οι μετρήσεις είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία του δικτύου. Αντιθέτως, δεν ήταν διαθέσιμα δεδομένα έγχυσης ενεργού ισχύος από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά πάρκα, γεγονός που δημιουργεί πρόβλημα για την εφαρμογή της μεθόδου. Προκειμένου αυτό να ξεπεραστεί, χρησιμοποιήθηκαν τυπικές καμπύλες εποχικής διακύμανσης της παραγωγής ισχύος από φωτοβολταϊκά συστήματα σε συνδυασμό με τυπικές καμπύλες κατανομής της ενδοημερησίας παραγωγής τους. Δεδομένου ότι οι καμπύλες ήταν κανονικοποιημένες, προσαρμόστηκαν στην εγκατεστημένη ισχύ κάθε φωτοβολταϊκού πάρκου με στόχο να αντληθούν ωριαίες τιμές εγχύσεων ενεργού ισχύος για το σύνολο αυτών. Συνεπώς, για την υλοποίηση του σχετικού αλγόριθμου σε ωριαία βάση θεωρείται ότι διατίθενται οι μετρήσεις ροών και εγχύσεων ενεργού ισχύος οι οποίες φαίνονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Διαθέσιμες μετρήσεις ενεργού ισχύος στο υπό μελέτη δίκτυο.

| Τύπος μετρήσεων | Διαθέσιμες μετρήσεις ενεργού ισχύος |
|-----------------|--|
| Ροές | $P_{2297-1}, P_{2297-201}$ |
| Εγχύσεις | $P_{106}, P_{108}, P_{112}, P_{114}, P_{118}, P_{120}, P_{121}, P_{122}, P_{123}, P_{125}, P_{127}, P_{128}, P_{130}, P_{133}, P_{134}, P_{136}, P_{138}, P_{139}, P_{140}, P_{287}, P_{311}, P_{326}, P_{340}, P_{361}, P_{362}, P_{374}, P_{376}, P_{377}, P_{380}, P_{381}, P_{382}, P_{384}, P_{386}, P_{391}, P_{393}, P_{395}, P_{397}, P_{398}, P_{400}, P_{403}, P_{406}, P_{407}, P_{410}, P_{412}, P_{414}, P_{416}, P_{420}, P_{422}, P_{423}, P_{425}, P_{427}, P_{430}, P_{431}, P_{433}$ |

Επιπλέον, σημαντικά στοιχεία για την υλοποίηση του αλγόριθμου της μεθόδου είναι τα εξής:

- Δε διατίθενται δεδομένα καταγεγραμμένων καταναλώσεων για τον υπολογισμό του δείκτη ADC με αποτέλεσμα να μη μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση επιμερισμού (3.2). Αναγκαστικά, λοιπόν, χρησιμοποιείται η σχέση επιμερισμού (3.1).
- Παρατηρώντας τα Σχήματα 3.3 και 3.4, διαπιστώνεται ότι οι μετρούμενες ροές αφορούν τους κλάδους των αναχωρήσεων των κύριων γραμμών και οι μετρούμενες εγχύσεις αφορούν τελικούς κόμβους του δικτύου. Άρα, όλα τα υπόδεντρα που σχηματίζονται με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις εγχύσεων ισχύος περιλαμβάνουν μόνο έναν κόμβο, τη ρίζα τους.

Τα παραπάνω στοιχεία τροποποιούν σημαντικά τον αλγόριθμο. Η χρήση της σχέσης (3.1) οδηγεί στη συγχώνευση των βημάτων 4 και 5, ενώ για το βήμα 6 πρέπει να προταθεί μία εναλλακτική επιλογή αντί των σχέσεων (3.7) και (3.8). Επιπλέον, ο εκφυλισμός όλων των υπόδεντρων σε ισάριθμους κόμβους-ρίζες συνεπάγεται τον επιμερισμό μιας μόνο τιμής φορτίου με βάση τη γενική ιδέα ότι η συνολική ζήτηση φορτίου στο δίκτυο προκύπτει αθροίζοντας την παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ στη συνολικά εισερχόμενη ροή ισχύος από το σύστημα μεταφοράς σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{dem} = P_{flow,in} + P_{DG} \quad (3.14)$$

όπου P_{dem} είναι η συνολική ζήτηση φορτίου, $P_{flow,in}$ είναι το άθροισμα των εισερχόμενων ροών ενεργού ισχύος από τον υποσταθμό στις δύο κύριες γραμμές του δικτύου δοκιμών και P_{DG} είναι το άθροισμα των εγχύσεων ενεργού ισχύος όλων των μονάδων ΑΠΕ του δικτύου.

Η τιμή του φορτίου η οποία υπολογίζεται από τη σχέση (3.14), επιμερίζεται στους 137 κόμβους οι οποίοι τροφοδοτούν φορτία σύμφωνα με τη σχέση (3.1). Αφού προκύψουν οι εκτιμήσεις φορτίου ανά κόμβο, θεωρείται ένα σταθερός συντελεστής ισχύος – δεδομένου ότι δεν υπάρχουν στοιχεία για κλάσεις καταναλωτών και την κατανομή τους ανά μετασχηματιστή διανομής – ίσος με 0.9 και οι αντίστοιχες εκτιμήσεις για την καταναλισκόμενη άεργο ισχύ ανά κόμβο υπολογίζονται ως εξής:

$$Q_l^{est} = \frac{\sqrt{1 - PF^2}}{PF} P_l^{est} \quad (3.15)$$

όπου Q_l^{est} η εκτίμηση της άεργου ισχύος για τον κόμβο l , P_l^{est} η εκτίμηση ενεργού ισχύος (φορτίου) και PF είναι ο συντελεστής ισχύος, ο οποίος χαρακτηρίζει τη φόρτιση του αντίστοιχου μετασχηματιστή και τίθεται ίσος με 0.9.

Στο τελικό βήμα της μεθόδου – προτού οι εκτιμήσεις εισαχθούν ως ψευδομετρήσεις στην εκτίμηση κατάστασης – πρέπει να προσεγγιστούν οι τιμές της διασποράς τους. Ακολουθώντας το μοντέλο των ενοτήτων 2.2.2 και 2.2.3, η εκτίμηση P_l^{est} θεωρείται τ.μ. που ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_l η οποία ταυτίζεται με την πραγματική τιμή του φορτίου, έστω P_l^{act} , και διασπορά σ_l . Έτσι, η τυχαία εκτίμηση P_l^{est} περιλαμβάνεται με πιθανότητα ίση με 99,7% στο εύρος $\pm 3\sigma_l$ περί τη μέση τιμή μ_l . Συνεπώς, μια προσέγγιση της διασποράς μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με την εξής σχέση [97]:

$$\sigma_l = \frac{\mu_l \times error}{300} = \frac{P_l^{act} \times error}{300} \quad (3.16)$$

όπου $error$ είναι το μέγιστο επί τοις εκατό σφάλμα περί τη μέση τιμή μ_l και εξαρτάται από την ακρίβεια της μεθόδου. Για την προτεινόμενη μέθοδο, το μέγιστο σφάλμα $error$ τίθεται ίσο με 30%.

Έχοντας υλοποιήσει τον αλγόριθμο της μεθόδου επιμερισμού φορτίου, σχεδιάζεται η προσομοίωση της εκτίμησης κατάστασης WLS. Αρχικά, καθορίζεται το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων. Επιπλέον των 2 ζευγών ροών ενεργού και άεργου ισχύος και των 54 εγχύσεων ενεργού ισχύος από τις μονάδες ΑΠΕ, θεωρούνται διαθέσιμα τα μέτρα τάσης του ζυγού αναφοράς (2297) και των 54 κόμβων παραγωγής. Διευκρινίζεται ότι, κατά την πραγματική λειτουργία, μέτρα τάσης διατίθενται σε πραγματικό χρόνο μόνο για το ζυγό αναφοράς και τους 2 κόμβους των αιολικών πάρκων. Αναφορικά με τις εγχύσεις άεργου ισχύος, για τους 52 κόμβους των φωτοβολταϊκών πάρκων θεωρείται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος, μια παραδοχή πολύ κοντά στην πραγματική λειτουργία τους, ενώ για τους 2 κόμβους των αιολικών πάρκων θεωρείται συντελεστής ισχύος ίσος με 0.95. Τέλος, περιλαμβάνονται 180 ζεύγη εικονικών εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος για τους κόμβους μηδενικής έγχυσης και 2 ζεύγη εγχύσεων ενεργού και άεργου ισχύος για τους κόμβους όπου είναι συνδεδεμένοι πυκνωτές. Συνολικά, λοιπόν, διατίθενται οι εξής μετρήσεις:

- 55 μετρήσεις μέτρου τάσης στο ζυγό αναφοράς και στους κόμβους παραγωγής
- 2 ζεύγη μετρήσεων ροών ενεργού και αέργου ισχύος στις αναχωρήσεις των κύριων γραμμών
- 54 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από κόμβους παραγωγής
- 137 ζεύγη ψευδομετρήσεων από κόμβους φορτίου
- 180 ζεύγη εικονικών μετρήσεων από κόμβους μηδενικής έγχυσης
- 2 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από κόμβους που φέρουν πυκνωτές.

Έτσι, ο λόγος των διαθέσιμων μετρήσεων m προς τον αριθμό των μεταβλητών κατάστασης $2n - 1$

είναι $r = \frac{m}{2n - 1} = \frac{805}{747} = 1,07$. Πρόκειται για μια χαμηλή τιμή με αποτέλεσμα η ικανότητα της

εκτίμησης κατάστασης WLS ως προς το φιλτράρισμα των σφαλμάτων των μετρήσεων να είναι περιορισμένη.

Ο αλγόριθμος της εκτίμησης κατάστασης εκτελείται σε ωριαία βάση σύμφωνα με τις διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις. Προκειμένου να παραχθεί ένα ρεαλιστικό, ωριαίο στιγμιότυπο μετρήσεων για το υπό μελέτη δίκτυο και, κυρίως, για όσα μεγέθη δε διατέθηκαν καθόλου μετρητικά δεδομένα από το ΔΕΔΔΗΕ, όπως π.χ. τα μέτρα τάσης, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου για το δίκτυο θεωρώντας ως δεδομένες τις ωριαίες μετρήσεις των ροών και των εγχύσεων των κόμβων παραγωγής, ενώ η φόρτιση των μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται μεταξύ 80% και 90% της ονομαστικής ικανότητάς τους για τους κόμβους φορτίου. Έτσι, λαμβάνοντας σταθερό συντελεστή ισχύος $PF = 0,9$, η φόρτισή τους θεωρείται ίση με:

$$P_l^{ass} = \frac{MVA_l \times LP_l \times PF}{100} \quad (3.17)$$

$$Q_l^{ass} = \frac{MVA_l \times LP_l \times \sqrt{1 - PF^2}}{100} \quad (3.18)$$

όπου P_l^{ass} και Q_l^{ass} αντιστοιχούν στην υποτιθέμενη φόρτιση του μετασχηματιστή του κόμβου l ,

MVA_l είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του και LP_l το επί τοις εκατό ποσοστό φόρτισής του.

Όλες οι τιμές οι οποίες προκύπτουν από την ανάλυση ροών φορτίου θεωρούνται ως οι πραγματικές τιμές των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών. Προκειμένου να προσομοιωθούν τα σφάλματα τα οποία ενέχουν οι μετρήσεις κατά την πραγματική λειτουργία του συστήματος, προστίθεται θόρυβος, ο οποίος ακολουθεί την κανονική κατανομή. Έτσι, για την i -οστή μέτρηση χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$z_i^{meas} = z_i^{true} + randn_i \times \sigma_i \quad (3.19)$$

όπου z_i^{meas} είναι η μετρούμενη τιμή του ηλεκτρικού μεγέθους, z_i^{true} είναι η πραγματική τιμή του (όπως προέκυψε από την ανάλυση ροών φορτίου), $randn_i$ είναι ένα τυχαίος αριθμός ο οποίος προκύπτει από μια γεννήτρια τιμών κανονικής κατανομής και σ_i είναι η αντίστοιχη διασπορά η οποία υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.16).

Για τη χρήση της σχέσης (3.16), θεωρούνται διαφορετικές τιμές σφάλματος $error$ ανά τύπο μέτρησης. Μετρήσεις οι οποίες διατίθενται σε πραγματικό χρόνο κατά την πραγματική λειτουργία του δικτύου,

δηλαδή τα μέτρα τάσης (μολονότι στο πλαίσιο της παρούσας υλοποίησης δεν ήταν διαθέσιμα), οι μετρήσεις ροών στις κύριες γραμμές και εγχύσεων στους κόμβους των αιολικών πάρκων και των πυκνωτών, συνδέονται με χαμηλές τιμές σφάλματος: 1% για τα μέτρα τάσης και 3% για τις μετρήσεις ροών και εγχύσεων. Πολύ μικρές τιμές σφάλματος της τάξης του 0.01% αποδίδονται στις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων. Για τις μετρήσεις εγχύσεων ισχύος και τα μέτρα τάσης στους κόμβους των φωτοβολταϊκών πάρκων θεωρείται ένα σφάλμα της τάξης του 10%. Τέλος, οι ψευδομετρήσεις οι οποίες προέρχονται από τη μέθοδο επιμερισμού φορτίου παρέχονται στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης χωρίς την προσθήκη θορύβου, καθώς είναι προϊόντα υπολογιστικής διαδικασίας που εκτελείται στο ΚΕΕ και δεν υπόκεινται σε σφάλματα μέτρησης ή μετάδοσης.

Αναφορικά με την υλοποίηση της προσομοίωσης της συνδυασμένης λειτουργίας του επιμερισμού φορτίου και της εκτίμησης κατάστασης, επελέγησαν τα δεδομένα μιας ολόκληρης εβδομάδας του Ιουλίου 2013 προκειμένου η προσομοίωση να γίνεται σε ωριαία βάση, καθημερινά. Ο Ιούλιος, όπως όλοι οι θερινοί μήνες, χαρακτηρίζεται από υψηλή φόρτιση των ΣΗΕ σε τουριστικές περιοχές. Έχει αποδειχθεί ότι τα μέγιστα σφάλματα κατά την εκτίμηση κατάστασης WLS σε δίκτυα διανομής εμφανίζονται σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης [200].

Ως βασικός δείκτης για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS χρησιμοποιείται το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα (relative percentage error - RPE), το οποίο ποσοτικοποιεί το επί τοις εκατό σφάλμα κάθε εκτίμησης μέτρου τάσης κόμβου. Υπολογίζεται ως δείκτης διάνυσμα, καθώς περιλαμβάνει τα σφάλματα για κάθε έναν από τους 374 κόμβους του δικτύου σύμφωνα με τη σχέση:

$$RPE = \frac{V^{meas} - \hat{V}}{V^{meas}} 100\% \quad (3.20)$$

όπου V^{meas} είναι το διάνυσμα των μετρούμενων τιμών του μέτρου τάσης των κόμβων και \hat{V} το αντίστοιχο διάνυσμα εκτιμώμενων τιμών.

Επιπλέον του δείκτη **RPE**, είναι αναγκαία η χρήση δεικτών, οι οποίοι ποσοτικοποιούν τις αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων που συγκροτούν το διάνυσμα \mathbf{z} , και των εκτιμήσεων αυτών, οι οποίες συγκροτούν το διάνυσμα $\hat{\mathbf{z}}$. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να επιτευχθεί μια πιο διεξοδική ματιά στην ακρίβεια των ψευδομετρήσεων και την επίδραση που έχει η εκτεταμένη χρήση τους στην εκτίμηση κατάστασης. Ένα ευρύ σύνολο δεικτών διατίθεται στην αναφορά [201], όπου αναφέρονται ως βασικοί δείκτες απόδοσης (key performance indicators – KPI) και αναλύουν πολύπλευρα την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης.

Πιο αναλυτικά, θεωρώντας ένα δίκτυο δοκιμών που αποτελείται από n κόμβους και b κλάδους, οι δείκτες KPI υπολογίζονται για κάθε ποσότητα που περιλαμβάνεται στο διάνυσμα μετρήσεων \mathbf{z} και ορίζονται με βάση νόρμες διαφορών μεταξύ των:

- πραγματικών τιμών, οι οποίες για τις ανάγκες της προσομοίωσης προέρχονται από την ανάλυση ροών φορτίου,
- των μετρήσεων, οι οποίες υπολογίζονται βάσει της σχέσης (3.19), ή ψευδομετρήσεων, που προκύπτουν από τη μέθοδο επιμερισμού φορτίου και
- των αντίστοιχων εκτιμήσεων, οι οποίες προκύπτουν από την εκτίμηση κατάστασης.

Συνεπώς, θεωρώντας τους συμβολισμούς z_i^{true} , z_i^{meas} και \hat{z}_i για την πραγματική, μετρούμενη και εκτιμώμενη τιμή της i -οστής ηλεκτρικής ποσότητας, ορίζονται οι εξής δείκτες KPIs:

1. Δείκτες αξιολόγησης της ακριβείας της εκτίμησης ροών ενεργού (P_{fl}) και αέργου (Q_{fl}) ισχύος:

$$\text{Νόρμα 1} \quad \sum_{i=1}^b |P_{fl,i}^{true} - \hat{P}_{fl,i}|, \sum_{i=1}^b |Q_{fl,i}^{true} - \hat{Q}_{fl,i}| \quad (3.21\alpha)$$

$$\text{Νόρμα 2 ή Ευκλείδεια νόρμα} \quad \sum_{i=1}^b (P_{fl,i}^{true} - \hat{P}_{fl,i})^2, \sum_{i=1}^b (Q_{fl,i}^{true} - \hat{Q}_{fl,i})^2 \quad (3.21\beta)$$

$$\text{Νόρμα απείρου} \quad \max_{i=1,\dots,b} |P_{fl,i}^{true} - \hat{P}_{fl,i}|, \max_{i=1,\dots,b} |Q_{fl,i}^{true} - \hat{Q}_{fl,i}| \quad (3.21\gamma)$$

2. Δείκτες αξιολόγησης της ακριβείας της εκτίμησης εγχύσεων ενεργού (P_{inj}) και αέργου (Q_{inj}) ισχύος:

$$\text{Νόρμα 1} \quad \sum_{i=1}^n |P_{inj,i}^{true} - \hat{P}_{inj,i}|, \sum_{i=1}^n |Q_{inj,i}^{true} - \hat{Q}_{inj,i}| \quad (3.22\alpha)$$

$$\text{Νόρμα 2 ή Ευκλείδεια νόρμα} \quad \sum_{i=1}^n (P_{inj,i}^{true} - \hat{P}_{inj,i})^2, \sum_{i=1}^n (Q_{inj,i}^{true} - \hat{Q}_{inj,i})^2 \quad (3.22\beta)$$

$$\text{Νόρμα απείρου} \quad \max_{i=1,\dots,n} |P_{inj,i}^{true} - \hat{P}_{inj,i}|, \max_{i=1,\dots,n} |Q_{inj,i}^{true} - \hat{Q}_{inj,i}| \quad (3.22\gamma)$$

3. Δείκτες αξιολόγησης της ικανότητας της εκτίμησης κατάστασης WLS να διακρίνει με ακρίβεια τις πραγματικές τιμές των ροών και των εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος:

$$PIP_{fl} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{fl,i}^{true} - \hat{P}_{fl,i})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{fl,i}^{true} - P_{fl,i}^{meas})^2}, PIQ_{fl} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{fl,i}^{true} - \hat{Q}_{fl,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{fl,i}^{true} - Q_{fl,i}^{meas})^2} \quad (3.23\alpha)$$

$$PIP_{inj} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{inj,i}^{true} - \hat{P}_{inj,i})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{inj,i}^{true} - P_{inj,i}^{meas})^2}, PIQ_{inj} = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{inj,i}^{true} - \hat{Q}_{inj,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{inj,i}^{true} - Q_{inj,i}^{meas})^2} \quad (3.23\beta)$$

Όσο μικρότερες της μονάδας είναι οι τιμές των δεικτών, τόσο πιο ενισχυμένη είναι η ικανότητα αυτή: η εκτιμώμενη τιμή είναι εγγύτερα στην πραγματική σε σχέση με τη μετρούμενη.

4. Δείκτες αξιολόγησης της συνολικής ακριβείας της εκτίμησης κατάστασης WLS:

- i. Ο δείκτης $MacC_V$ ποσοτικοποιεί το συνολικό σφάλμα στην εκτίμηση τόσο του μέτρου όσο και της γωνίας της τάσης:

$$MacC_V = \|\tilde{\mathbf{V}}_{error}\|^2 = \left(\sum_{i=1}^n |\tilde{V}_i^{true} - \hat{V}_i|^2 \right)^{1/2} \quad (3.24)$$

όπου $\tilde{\mathbf{V}}_{error}$ είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων εκτίμησης των φασιθετών των τάσεων των κόμβων και \tilde{V}_i^{true} (\hat{V}_i) είναι η πραγματική (εκτιμώμενη) τιμή του φασιθέτη της τάσης του κόμβου i .

- ii. Ο δείκτης $E EI$ (error estimation index – EEI) ποσοτικοποιεί το σύνολο των κανονικοποιημένων υπολοίπων:

$$E EI = \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i^{true} - \hat{z}_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3.25)$$

5. Δείκτες αξιολόγησης της επίδοσης της εκτίμησης κατάστασης WLS:

Μέσω των εν λόγω δεικτών, αξιολογείται η ικανότητα του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης να συγκλίνει σε μια ευσταθή λύση σε λογικό, προβλεπόμενο χρόνο προκειμένου αυτή να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πραγματικό χρόνο από άλλες εφαρμογές των ΚΕΕ. Πιο αναλυτικά:

- i. Ο δείκτης $Mconv_J$ αποτιμά τη σχετική μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος WLS, όπως ορίστηκε στη σχέση (2.9), κατά την τελευταία ανακύκλωση του αλγόριθμου:

$$Mconv_J = \left| 1 - \frac{J^{k_{term}}}{J^{k_{term}-1}} \right| \quad (3.26)$$

όπου k_{term} είναι ο αύξων αριθμός της τελευταίας ανακύκλωσης πριν από τη σύγκλιση.

- ii. Οι δείκτες $Mconv_V$ και $Mconv_\delta$ αποτιμούν τη μέγιστη μεταβολή μέτρου και γωνίας τάσης, αντιστοίχως, τα οποία παρατηρούνται ανά τους κόμβους του δικτύου κατά την τελευταία ανακύκλωση του αλγόριθμου:

$$Mconv_V = \max_{i \in n} \left| 1 - \frac{V_i^{k_{term}}}{V_i^{k_{term}-1}} \right| \quad (3.27\alpha)$$

$$Mconv_\delta = \max_{i \in n} \left| \delta_i^{k_{term}} - \delta_i^{k_{term}-1} \right| \quad (3.27\beta)$$

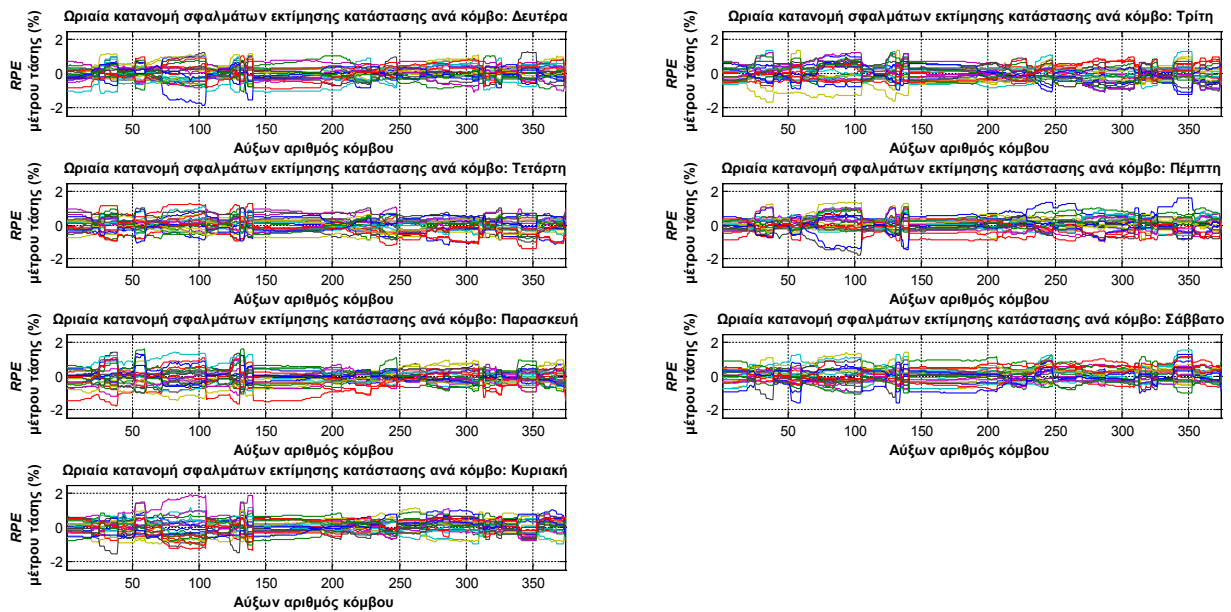
Όπως παρατηρείται, ο δείκτης $Mconv_\delta$ αποτιμά απόλυτες διαφορές με στόχο να αποτραπεί η διαίρεση με μηδενική γωνία σε περίπτωση που ο κόμβος με τη μεγαλύτερη μεταβολή είναι ο ζυγός αναφοράς.

3.5.2.3 Αποτελέσματα

Για τις ανάγκες της επίδειξης των αποτελεσμάτων, οι κόμβοι έλαβαν συνεχή αρίθμηση σύμφωνα με την πραγματική τους αρίθμηση σε αύξουσα σειρά. Δεδομένου ότι η εκτίμηση κατάστασης εκτελείται σε ωριαία βάση για μια ολόκληρη εβδομάδα, ο δείκτης **RPE** για κάθε ημέρα λαμβάνει $24 \times 374 = 8976$ τιμές, οι οποίες μπορούν να οργανωθούν σε 24 καμπύλες των 374 τιμών η καθεμιά. Έτσι, καθεμία καμπύλη αναπαριστά τη διακύμανση του δείκτη **RPE** ανά κόμβο για μια συγκεκριμένη ώρα. Τα διαγράμματα κάθε ημέρας απεικονίζονται συνολικά στο Σχήμα 3.5.

Όπως φαίνεται, τα σφάλματα κυμαίνονται στο εύρος τιμών ± 2 . Τα μεγαλύτερα σφάλματα παρατηρούνται για την Παρασκευή και το σαββατοκύριακο, καθώς το εύρος των καμπυλών περί τον οριζόντιο άξονα είναι πλατύτερο. Σε κάθε περίπτωση, τα διαγράμματα είναι αρκετά συνοπτικά, συνεπώς, είναι απαραίτητη περαιτέρω στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Προς αυτή την κατεύθυνση,

στον Πίνακα 3.4, παρουσιάζονται οι μέσες απόλυτες τιμές του δείκτη **RPE** για τους ακόλουθους τύπους κόμβων: φορτίου (PQ), φωτοβολταϊκών (photovoltaics – PV), αιολικών πάρκων (wind farms – WF), μηδενικής έγχυσης (ZI), πυκνωτών (capacitor banks – CB) και του ζυγού αναφοράς (slack bus – SB).



Σχήμα 3.5: Ωριαίες κατανομές σφαλμάτων εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο του δικτύου δοκιμών για μια ολόκληρη εβδομάδα.

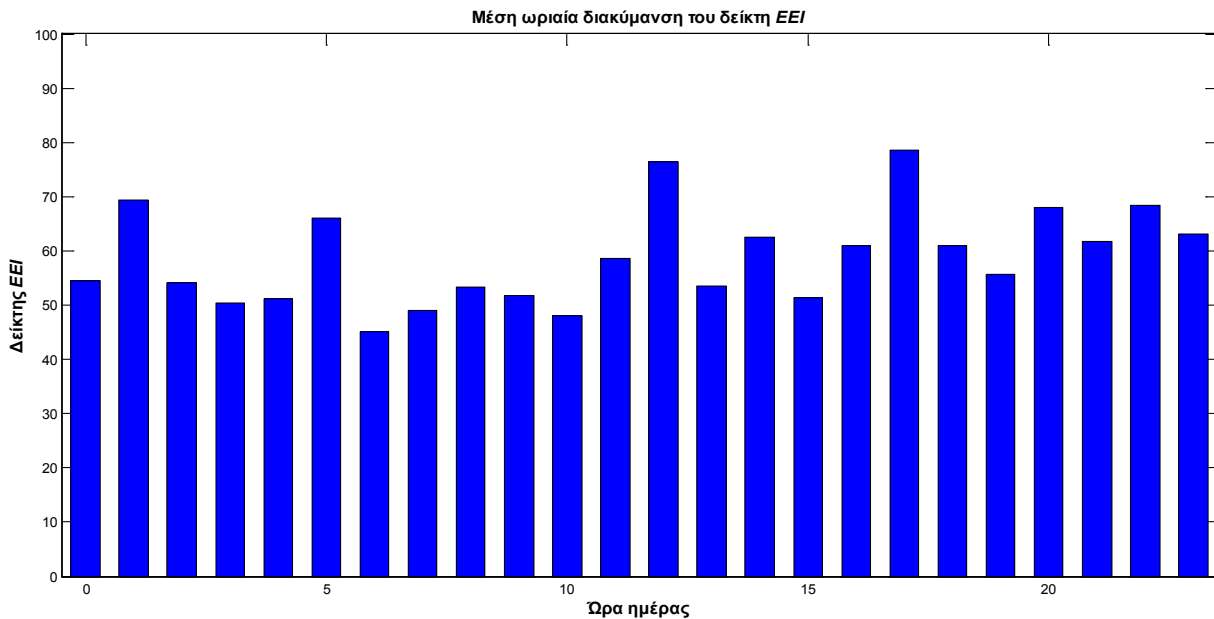
Πίνακας 3.4: Μέγιστο μέσο απόλυτο σφάλμα και μέσα απόλυτα σφάλματα **RPE** ανά τύπο κόμβου και ημέρας.

| Ημέρα | Μέγιστο μέσο σφάλμα RPE (Α/Α κόμβου) | Μέσα σφάλματα RPE ανά τύπο κόμβου | | | | | |
|-----------|---|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | PQ | PV | WF | ZI | CP | SB |
| Δευτέρα | 0.5782 (140) | 0.3304 | 0.3325 | 0.2233 | 0.3207 | 0.2897 | 0.3084 |
| Τρίτη | 0.5891 (140) | 0.3741 | 0.3861 | 0.2603 | 0.3376 | 0.3253 | 0.3562 |
| Τετάρτη | 0.5292 (38) | 0.3354 | 0.3557 | 0.2205 | 0.3358 | 0.3306 | 0.3538 |
| Πέμπτη | 0.6367 (103) | 0.3568 | 0.3536 | 0.3001 | 0.3427 | 0.3061 | 0.3178 |
| Παρασκευή | 0.6526 (38) | 0.3625 | 0.3576 | 0.3152 | 0.3417 | 0.3333 | 0.3575 |
| Σάββατο | 0.5910 (286) | 0.3572 | 0.3650 | 0.2789 | 0.3387 | 0.3393 | 0.3366 |
| Κυριακή | 0.5950 (139) | 0.3362 | 0.3478 | 0.2036 | 0.3251 | 0.2509 | 0.2529 |

Τα αποτελέσματα στον Πίνακα 3.4 δηλώνουν ότι οι εκτιμήσεις μέτρων τάσης είναι πιο ακριβείς για τους κόμβους μηδενικής έγχυσης, των αιολικών πάρκων και των πυκνωτών. Αντιθέτως, υψηλότερες τιμές σφαλμάτων παρατηρούνται για τους κόμβους φορτίου και των φωτοβολταϊκών πάρκων. Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι αναμενόμενες, καθώς οι μετρήσεις από τα αιολικά πάρκα και τους κόμβους πυκνωτών αντιμετωπίζονται ως δεδομένα πραγματικού χρόνου και έχουν λάβει μικρότερες διασπορές σε σύγκριση

με τις ψευδομετρήσεις φορτίου και τις μετρήσεις από τα φωτοβολταϊκά πάρκα, οι οποίες δεν είναι διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο. Τα σφάλματα για τους κόμβους μηδενικής έγχυσης και το ζυγό αναφοράς εμφανίζουν μια ενδιάμεση συμπεριφορά.

Οι δείκτες EEI και $Mass_v$ λαμβάνουν συνολικά $24 \times 7 = 168$ τιμές για όλη την εβδομάδα. Προκειμένου τα διαγράμματα να γίνουν περιεκτικά, απεικονίζονται οι μέσες ωριαίες διακυμάνσεις των δεικτών EEI και $Mass_v$ κατά την εβδομάδα μελέτης στα Σχήματα 3.6 και 3.7, αντιστοίχως.



Σχήμα 3.6: Μέση ωριαία διακύμανση του δείκτη EEI κατά την εβδομάδα της μελέτης.



Σχήμα 3.7: Μέση ωριαία διακύμανση του δείκτη $Mass_v$ κατά την εβδομάδα της μελέτης.

Οι μέσες ωριαίες διακυμάνσεις του δείκτη EEI , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 35 και 80. Σύμφωνα με τη σχέση ορισμού (3.25), η τιμή του δείκτη εξαρτάται από τον αριθμό των

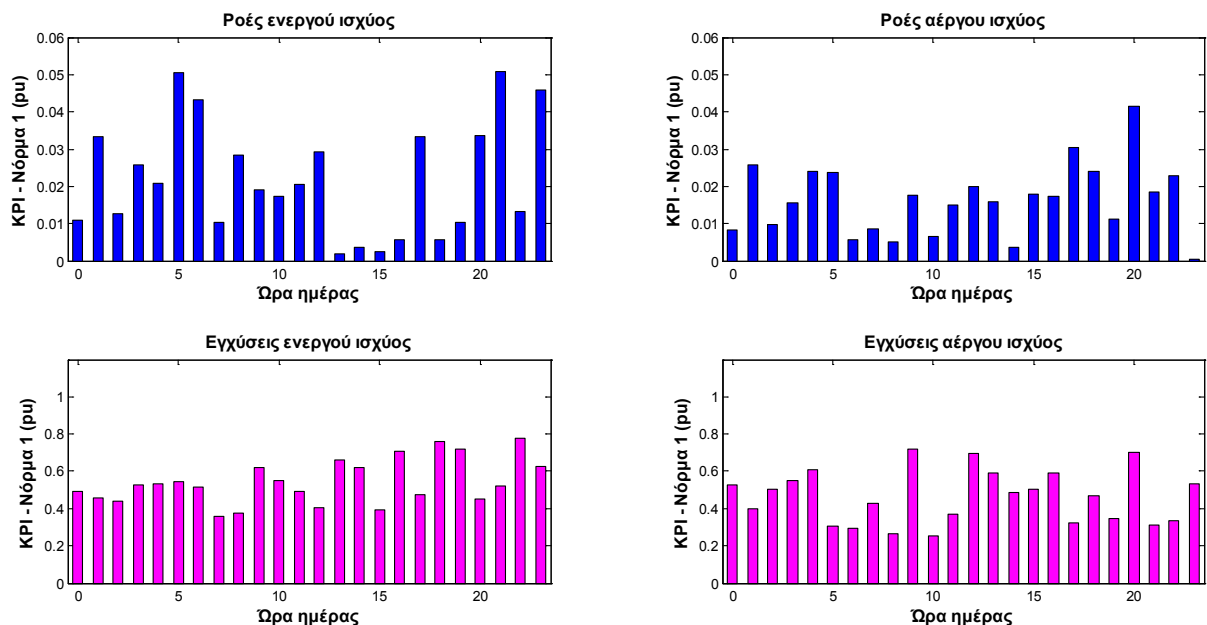
μετρήσεων και το εύρος τιμών των τυπικών τους αποκλίσεων. Δεδομένου ότι όλες οι μετρήσεις μοντελοποιούνται σύμφωνα με τη σχέση (3.19), η μέγιστη τιμή (κατώφλι) για το δείκτη EEI μπορεί να προσεγγιστεί με βάση τα επιμέρους εύρη $\pm 3\sigma_i$, $i = 1, \dots, 807$ ως εξής:

$$EEI_{\max} = \sum_{i=1}^{807} \left(\frac{\pm 3\sigma_i}{\sigma_i} \right)^2 = 9 \times 807 = 7263. \text{ Είναι ξεκάθαρο ότι οι μέσες ωριαίες διακυμάνσεις του}$$

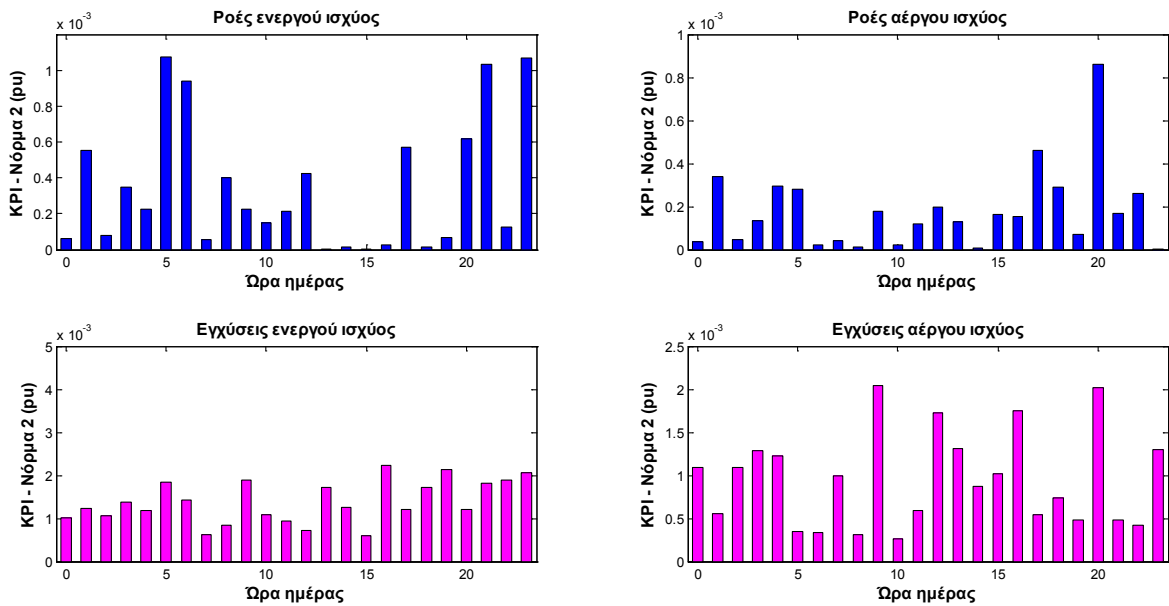
δείκτη είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με αυτή την τιμή κατωφλίου, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει την αποδοτικότητα της προτεινόμενης υλοποίησης με δεδομένα τα μέγιστα σφάλματα που θεωρήθηκαν ανά τύπο μέτρησης.

Αναφορικά με το δείκτη $Mass_V$, παρατηρείται ότι οι μέσες ωριαίες διακυμάνσεις του στο Σχήμα 3.7 κυμαίνονται μεταξύ 0,03 και 0,14 p.u. Οι τιμές αυτές είναι ικανοποιητικές δεδομένων των πολλών ψευδομετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

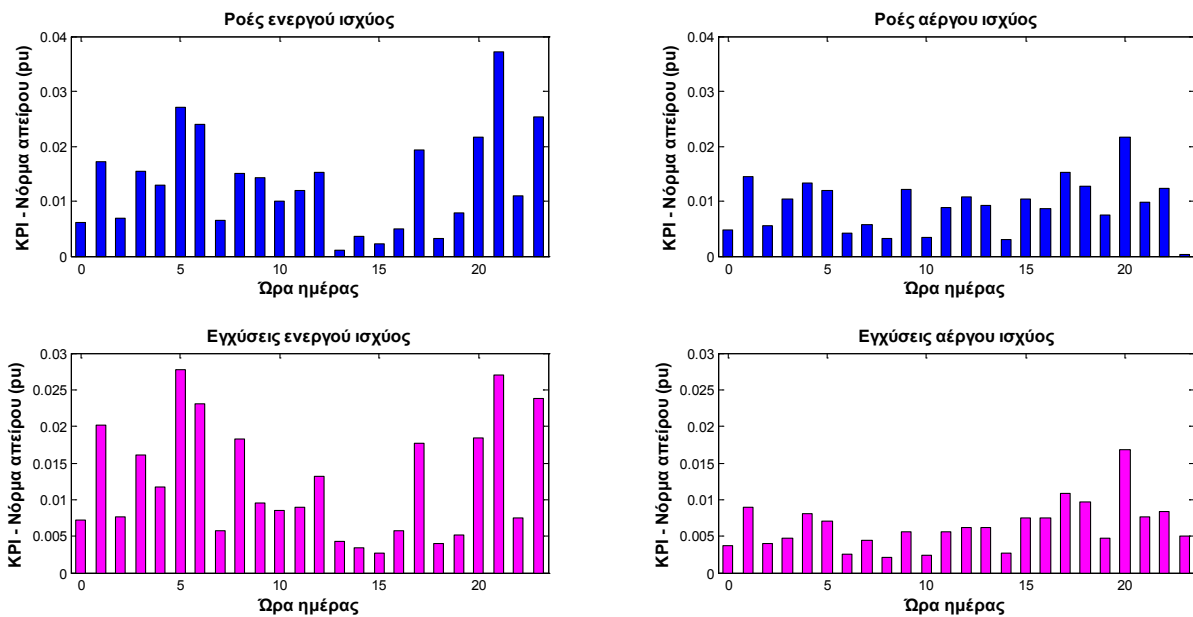
Για τους υπόλοιπους δείκτες KPI, επελέγη μια τυχαία ημέρα της εβδομάδας της μελέτης και αναπαραστάθηκε η ωριαία διακύμανση τους μέσα σε αυτή την ημέρα. Στα Σχήματα 3.8–3.10, απεικονίζεται η ωριαία διακύμανση των δεικτών KPI της νόρμας 1, της νόρμας 2 και της νόρμας απείρου, αντιστοίχως. Κάθε σχήμα περιλαμβάνει τέσσερα διαγράμματα: ροές και εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος. Με όμοιο τρόπο, παρουσιάζεται η ωριαία διακύμανση των δεικτών PIP_{ij} , PIQ_{ij} , PIP_{inj} και PIQ_{inj} στα τέσσερα διαγράμματα του Σχήματος 3.11.



Σχήμα 3.8: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας 1 κατά την επιλεγμένη ημέρα.



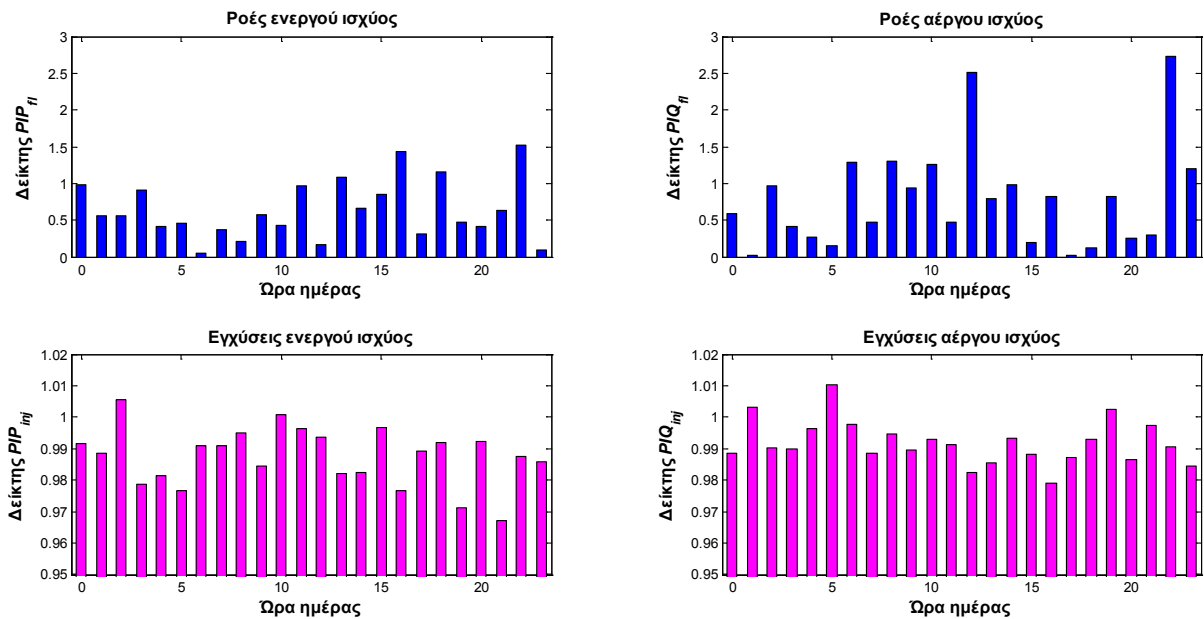
Σχήμα 3.9: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας 2 κατά την επιλεγμένη ημέρα.



Σχήμα 3.10: Ωριαία διακύμανση του δείκτη KPI της νόρμας απείρου κατά την επιλεγμένη ημέρα.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.9 και 3.10, συμπεραίνεται ότι οι δείκτες KPI των νορμών 1 και 2 λαμβάνουν υψηλότερες τιμές για τις μετρήσεις εγχύσεων σε σχέση με τις μετρήσεις ροών. Γενικά, η ωριαία διακύμανση των δεικτών KPI που αντιστοιχούν σε μετρήσεις ροών είναι περίπου παρόμοια και στα τρία σχήματα και οι τιμές που λαμβάνουν είναι σχετικά μικρές. Αντιθέτως, για τις μετρήσεις εγχύσεων, οι τιμές του δείκτη KPI της νόρμας 1 είναι πολύ μεγαλύτερες, τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους, σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για τις μετρήσεις ροών, ενώ είναι τουλάχιστο διπλάσιες όσον αφορά το δείκτη KPI νόρμας 2. Αναφορικά με το δείκτη KPI της νόρμας απείρου, αν συγκριθούν οι τιμές του με τις αντίστοιχες του δείκτη KPI της νόρμας 1, παρατηρείται ότι, ενώ για τις μετρήσεις ροών λαμβάνει σχεδόν ίδιες τιμές, για τις μετρήσεις εγχύσεων είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μικρότερες. Αυτή η παρατήρηση είναι αναμενόμενη θεωρητικά, καθώς οι μετρήσεις ροών (ενεργών ή άεργων) είναι μόλις 2, ενώ οι μετρήσεις είναι 374. Έτσι, τα μέγιστα σφάλματα, τα οποία ποσοτικοποιούνται μέσω της νόρμας απείρου,

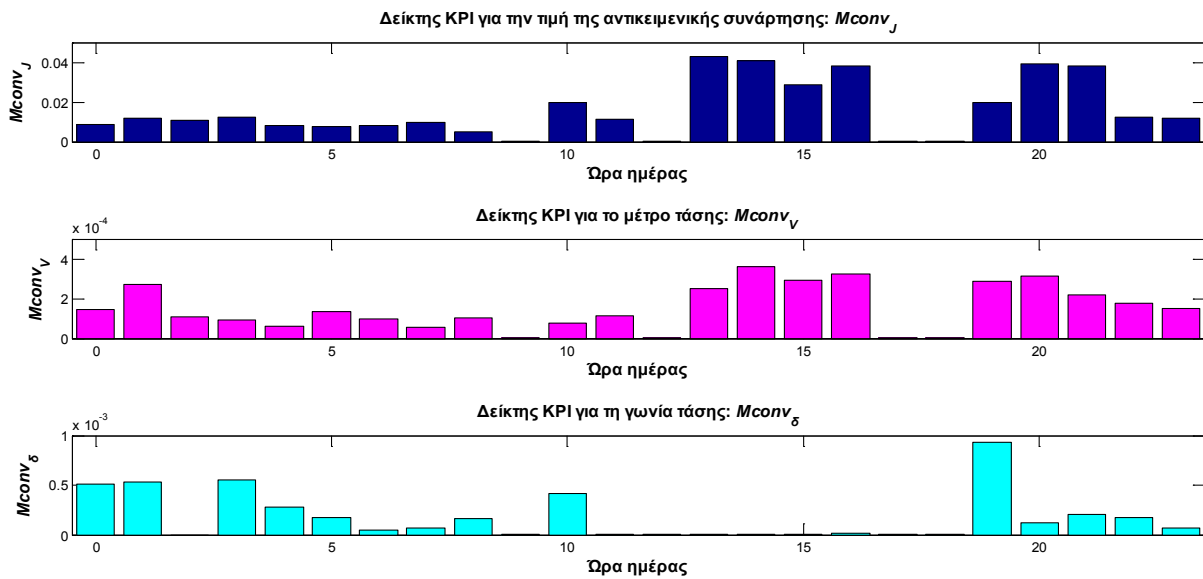
για τις μετρήσεις ροών και εγχύσεων λαμβάνουν σχετικά παραπλήσιες τιμές, περίπου στο 0,01 ρ.μ. κατά μέσο όρο.



Σχήμα 3.11: Ωριαία διακύμανση των δεικτών PIP_{fl} , PIQ_{fl} , PIP_{inj} και PIQ_{inj} κατά την επιλεγμένη ημέρα.

Στο Σχήμα 3.11, παρατηρείται ότι η ωριαία διακύμανση των δεικτών PIP_{inj} και PIQ_{inj} βρίσκεται, εκτός ελαχίστων περιπτώσεων, κάτω από τη μονάδα, γεγονός που επιβεβαιώνει την ικανότητα της εκτίμησης κατάστασης WLS να διακρίνει με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική από τη μετρούμενη τιμή των ποσοτήτων έγχυσης. Αντιθέτως, οι αντίστοιχοι δείκτες για τις ροές PIP_{fl} και PIQ_{fl} δεν λαμβάνουν τόσο ικανοποιητικές τιμές: σχεδόν το 10% επί του συνόλου των τιμών είναι μεγαλύτερο της μονάδας.

Τέλος, οι τρεις δείκτες KPI οι οποίοι αποτιμούν τις επιδόσεις σύγκλισης του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης παρουσιάζονται στα τρία διαγράμματα του Σχήματος 3.12. Παρατηρείται ότι οι δείκτες $Mconu_v$ και $Mconu_j$ έχουν παρόμοια διακύμανση ανά ωριαία εκτέλεση του αλγόριθμου. Ο δείκτης $Mconu_g$ τείνει στην ίδια διακύμανση σχεδόν στο 50% επί του συνόλου των ωριαίων εκτελέσεων. Γενικά, και οι τρεις δείκτες λαμβάνουν σχετικά χαμηλές τιμές, όπως είναι επιθυμητό. Ένα πιο ειδικό συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί από την παρατήρηση των διαγραμμάτων $Mconu_v$ και $Mconu_g$: οι τιμές του πρώτου δείκτη σημαίνουν ότι ο λόγος μεταξύ των δύο τελευταίων εκτιμώμενων μέτρων τάσης για όλους τους κόμβους είναι σχεδόν μοναδιαίος, ενώ οι τιμές του δεύτερου δείχνουν ότι ακρίβεια της τάξης τρίτου δεκαδικού ψηφίου έχει, ήδη, επιτευχθεί πριν από την τελευταία ανακύκλωση του αλγόριθμου.



Σχήμα 3.12: Ωριαία διακύμανση των δεικτών $Mcon_{V_j}$, $Mcon_V$ και $Mcon_{\delta}$ κατά την επιλεγμένη ημέρα.

3.5.3 Εφαρμογή της πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου

Στο πλαίσιο της διαχείρισης μετρητικών δεδομένων στα δίκτυα διανομής καθώς και της χρήσης ψευδομετρήσεων, είναι ενδιαφέρον να αξιολογηθεί η εφαρμογή της πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας η οποία, όπως αναλύθηκε λεπτομερώς στην υποενότητα 2.4.2., χρησιμοποιεί μετρήσεις λογικών δεδομένων και βασίζεται στην εισαγωγή ψευδομετρήσεων στο δίκτυο μετρήσεων. Έτσι, στην παρούσα ενότητα, περιγράφεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της προσομοίωσης της εφαρμογής της μεθόδου στο δίκτυο δοκιμών της υποενότητας 3.5.2.1 και, ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του προγράμματος προσομοίωσης της για διάφορα σενάρια τοπολογίας προκειμένου να απαντηθεί το 4^ο ερώτημα που τέθηκε στην εισαγωγή της ενότητας.

3.5.3.1 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Ο σχεδιασμός των προσομοιώσεων βασίζεται στην κατάστρωση σεναρίων αναφορικά με διαφορετικούς τύπους τοπολογικών αλλαγών. Τα σενάρια περιλαμβάνουν συγκεκριμένα διακοπτικά μέσα, τα οποία εμφανίζουν αυξημένη κρισιμότητα, όπως π.χ. όσα αντιστοιχούν σε κλάδους σύνδεσης των αιολικών και των φωτοβολταϊκών πάρκων με το υπόλοιπο δίκτυο. Στο πλαίσιο αυτών των σεναρίων, ως τηλεμετρούμενες θεωρούνται μόνον οι καταστάσεις των διακοπτικών μέσων, τα οποία αντιστοιχούν σε αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, ενώ όλες οι υπόλοιπες καταστάσεις θεωρούνται ως μη τηλεμετρούμενες. Στην περίπτωση των δεύτερων, γίνεται απλά υπόθεση για την αρχική τιμή τους.

Κάθε σενάριο μπορεί να περιλαμβάνει τη μελέτη είτε ενός είτε πολλών διακοπών με αποτέλεσμα να εισάγονται είτε ένας είτε πολλοί, ίσου αριθμού με τους διακόπτες, εικονικοί κόμβοι σύμφωνα με τη μοντελοποίηση της πιθανοτικής μεθόδου η οποία δόθηκε στην υποενότητα 2.4.2.1. Επίσης, σημαντική παράμετρο για τη διαμόρφωση των επιμέρους σεναρίων αποτελεί η παρουσία ή μη εσφαλμένων αναλογικών δεδομένων στο δίκτυο μετρήσεων, καθώς η συνύπαρξή τους με εσφαλμένα λογικά δεδομένα καθιστά την εξεύρεση της πραγματικής τοπολογίας του υπό μελέτη δικτύου ακόμη πιο

απαιτητική. Προς αυτή την κατεύθυνση, τα μισά περίπου σενάρια περιλαμβάνουν τουλάχιστον μια αναλογική μέτρηση, η οποία ενέχει χονδροειδές σφάλμα.

Αναφορικά με την υλοποίηση της προσομοίωσης, θεωρείται μια διαδικασία όμοια με αυτή της υποενότητας 3.5.2.2. Επομένως, θεωρούνται διαθέσιμες οι ίδιες μετρήσεις ως προς τον τύπο, τον αριθμό και την ακρίβειά τους, συμπεριλαμβανομένων και των ψευδομετρήσεων φορτίου, οι οποίες προκύπτουν μέσω της μεθόδου επιμερισμού [159]. Επίσης, χρησιμοποιούνται με όμοιο τρόπο οι τύποι (3.16)–(3.19) για να εξαχθούν οι απαραίτητες τιμές για την εκτίμηση κατάστασης. Ωστόσο, υπάρχουν και τροποποιήσεις, καθώς πλέον συνεκτιμάται και η τοπολογία του δικτύου. Έτσι, στο διάνυσμα μετρήσεων εισάγονται επιπλέον μετρήσεις: οι καταστάσεις των υπό μελέτη διακοπών σύμφωνα με τη σχέση (2.43) και οι αντίστοιχες ψευδομετρήσεις σύμφωνα με τις σχέσεις (2.44) και (2.45). Για όλες αυτές τις μετρήσεις αυτές, θεωρείται μέγιστο σφάλμα ίσο με 0,5 %. Τέλος, το διάνυσμα κατάστασης επαυξάνεται με την εισαγωγή τριών μεταβλητών κατάστασης ανά διακοπτικό μέσο, δηλαδή της κατάστασής του, του μέτρου και της γωνίας των τάσης του αντίστοιχου εικονικού κόμβου, ενώ, στο πλαίσιο της παρούσας υλοποίησης, ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται επιπλέον οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος που διέρχονται μέσω των κλάδων των διακοπών. Ακολουθώντας τους συμβολισμούς της υποενότητας 2.4.2.2, για παράδειγμα, για το διακοπτικό μέσο $k-l$, στο διάνυσμα κατάστασης εισάγονται η κατάσταση του διακόπτη s_{kl} , το μέτρο V_l και η γωνία δ_l της τάσης του εικονικού κόμβου l και το ζεύγος ροών P_{kl} και Q_{kl} , δηλαδή συνολικά πέντε νέες μεταβλητές κατάστασης.

Κομβικό στοιχείο αποτελεί και η προσομοίωση των εσφαλμένων αναλογικών δεδομένων: σε περίπτωση που είναι επιθυμητό η i -οστή μέτρηση να ενέχει χονδροειδές σφάλμα, αντί της σχέσης (3.19) χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$z_i^{meas} = z_i^{true} + d_i \sigma_i \quad (3.28)$$

όπου $d_i (> 3)$ είναι ο πολλαπλασιαστής ο οποίος προσδίδει το σφάλμα στη μέτρηση, ενώ όλα τα υπόλοιπα μεγέθη ορίζονται όπως στη σχέση (3.19).

Σε περίπτωση ύπαρξης εσφαλμένων λογικών ή/και αναλογικών δεδομένων, η ταυτοποίηση και η διόρθωσή τους γίνεται μέσω της εξέτασης των κανονικοποιημένων υπολοίπων των μετρήσεων [12]. Ο υπολογισμός τους γίνεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\hat{\mathbf{r}}_N = \left[\text{diag} \mathbf{\Sigma}_r \right]^{-1/2} \hat{\mathbf{r}} \quad (3.29)$$

όπου $\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$ είναι το διάνυσμα των υπολοίπων των μετρήσεων μετά από την τελευταία ανακύκλωση της εκτίμησης κατάστασης και $\mathbf{\Sigma}_r = \text{cov}(\mathbf{r})$ είναι ο πίνακας συνδιακύμανσης των υπολοίπων.

Προκειμένου να ταυτοποιηθούν τυχόν σφάλματα τοπολογίας, όπως ορίστηκαν στην υποενότητα 2.4.2.2, αρχικά τίθεται μια οριακή τιμή ίση με $\left| \hat{r}_N \right|_{\max} = 3$ και, ακολούθως, εντοπίζεται η μέτρηση με το μέγιστο κανονικοποιημένο υπόλοιπο, έστω $\max_{i=1, \dots, m} \left| \hat{r}_{N,i} \right|$, μετά από το πέρας της τελευταίας ανακύκλωσης. Αν αυτή η τιμή $\max_{i=1, \dots, m} \left| \hat{r}_{N,i} \right| > \left| \hat{r}_N \right|_{\max}$, τότε ακολουθεί διορθωτική διαδικασία μέσω της αφαίρεσης της εν λόγω μέτρησης – εξ' ου και είναι απαραίτητη η διάθεση περίσσειας μετρήσεων – και επανεκτέλεσης του

αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης. Διευκρινίζεται ότι αφαίρεση δεν προβλέπεται μόνο στη περίπτωση της μέτρησης κατάστασης διακόπτη σύμφωνα με τη σχέση (2.43) ώστε να μη διακινδυνεύεται η παρατηρησιμότητα του δικτύου. Αντί αφαίρεσης, η τιμή της εν λόγω μέτρησης απλώς διορθώνεται με βάση την πραγματική κατάσταση του διακόπτη. Αν και μετά από το πέρας της επανεκτέλεσης, εντοπιστεί μέτρηση τέτοια ώστε $\max_{i=1, \dots, m-1} |\hat{r}_{N,i}| > |\hat{r}_{N, \max}|$, τότε ακολουθείται η ίδια διορθωτική διαδικασία κ.ο.κ. Ο κύκλος των επανεκτελέσεων παύει όταν δεν βρεθεί μέγιστο κανονικοποιημένο υπόλοιπο ανώτερο της τιμής $|\hat{r}_{N, \max}|$ και, τότε, προκύπτει η τελική, εκτιμώμενη τοπολογία του δικτύου.

3.5.3.2 Αποτελέσματα

Το σύνολο των σεναρίων παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.5–3.7, όπου απεικονίζονται οι πραγματικές καταστάσεις των υπό μελέτη διακοπτικών μέσων σε αντιπαράβολή με τις αντίστοιχες μετρούμενες (σε περίπτωση που αντιστοιχούν αιολικά ή φωτοβολταϊκά πάρκα) ή υποτιθέμενες (σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση) και εκτιμώμενες καταστάσεις. Στα σενάκια 1–7 εξετάζονται περιπτώσεις πολλαπλών τοπολογικών αλλαγών στις οποίες εμπλέκονται οι διακόπτες των κόμβων φορτίου 110 και 320 και των κόμβων παραγωγής 121, 140 και 380. Έτσι, εισάγονται στο δίκτυο 5 εικονικοί κόμβοι, με τιμές 3000 έως 3004, και μελετώνται οι ακόλουθες καταστάσεις πέντε διακοπτικών μέσων: $s_{110-3003}$, $s_{121-3001}$, $s_{140-3002}$, $s_{320-3004}$ και $s_{380-3000}$. Ένας κλειστός διακόπτης δηλώνεται με κατάσταση 1, ενώ ένας ανοικτός με κατάσταση 0. Για τα ανωτέρω σενάκια, θεωρείται ότι δεν υπάρχουν εσφαλμένα δεδομένα στο σύνολο των αναλογικών μετρήσεων. Αντιθέτως, για τα υπόλοιπα 5 σενάκια θεωρείται η ύπαρξη σφαλμάτων. Στο σενάριο 8, προστίθεται χονδροειδές σφάλμα της τάξης 40σ στην ψευδομέτρηση φορτίου για την κατανάλωση ενεργού ισχύος στον κόμβο 3003 (P_{3003}). Στο σενάριο 9, προστίθενται σφάλματα της τάξης των 12σ και 18σ και στις δύο ψευδομετρήσεις φορτίου (P_{3003} και Q_{3003}) του κόμβου 3003, ενώ, στο σενάριο 10, οι αντίστοιχες τιμές σφαλμάτων είναι 10σ και 6σ για τον ίδιο κόμβο. Τέλος, στα σενάκια 11–13 εξετάζεται η τοπολογική αλλαγή εξαιτίας της σύνδεσης/αποσύνδεσης του κλάδου 111–113 της κύριας γραμμής διανομής P200. Έτσι, εισάγεται ο εικονικός κόμβος 3005 και μελετάται η κατάσταση του διακοπτικού μέσου $s_{111-3005}$.

Πίνακας 3.5: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για το σενάριο 1.

| A/A σεναρίου | Διακοπτικό μέσο | Πραγματική κατάσταση | Μετρούμενη/υποτιθέμενη κατάσταση | Εκτιμώμενη κατάσταση |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 1 | $s_{110-3003}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 1 | 0.9999999 |
| | $s_{320-3004}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |

Πίνακας 3.6: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για τα σενάρια 2–6.

| A/A σεναρίου | Διακοπτικό μέσο | Πραγματική κατάσταση | Μετρούμενη/υποτιθέμενη κατάσταση | Εκτιμώμενη κατάσταση |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 2 | $s_{110-3003}$ | 0 | 0 | 0.0042700 |
| | $s_{121-3001}$ | 0 | 0 | 0.0042700 |
| | $s_{140-3002}$ | 0 | 0 | 0.0042700 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0042700 |
| | $s_{380-3000}$ | 0 | 0 | 0.0042700 |
| 3 | $s_{110-3003}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{320-3004}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 0.9999810 |
| 4 | $s_{110-3003}$ | 1 | 1 | 0.9999987 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 0 | 0.9999980 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{320-3004}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 0 | 0.9999980 |
| 5 | $s_{110-3003}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0004170 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 0.9999690 |
| 6 | $s_{110-3003}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 0 | 1 | 0.0000184 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0004376 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 0.9999870 |

Πίνακας 3.7: Οι πραγματικές, μετρούμενες/υποτιθέμενες και εκτιμώμενες καταστάσεις των διακοπτικών μέσων για τα σενάρια 7–13.

| Α/Α σεναρίου | Διακοπτικό μέσο | Πραγματική κατάσταση | Μετρούμενη/υποτιθέμενη κατάσταση | Εκτιμώμενη κατάσταση |
|-----------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| 7 | $s_{110-3003}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 0 | 0.9999184 |
| | $s_{140-3002}$ | 0 | 1 | 0.0000132 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0004376 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 0.9999870 |
| 8 | $s_{110-3003}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 0 | 0 | 0.0000005 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0001740 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| 9 | $s_{110-3003}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 0 | 0 | 0.0000005 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0001740 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| 10 | $s_{110-3003}$ | 1 | 0 | 1.0000000 |
| | $s_{121-3001}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| | $s_{140-3002}$ | 1 | 0 | 0.9999976 |
| | $s_{320-3004}$ | 0 | 0 | 0.0000089 |
| | $s_{380-3000}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| 11 | $s_{111-3005}$ | 1 | 1 | 1.0000000 |
| 12 | $s_{111-3005}$ | 1 | 0 | 0.9997080 |
| 13 | $s_{111-3005}$ | 0 | 1 | 0.0000500 |

Όπως διαπιστώνεται, η προτεινόμενη μέθοδος προβαίνει σε ορθή εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης των διακοπών σε όλα τα σενάρια. Έτσι, συμπεριλαμβάνει στο μοντέλο του δικτύου όσους διακόπτες μετρήθηκαν ή υποτέθηκαν εσφαλμένα ως ανοικτοί, όπως συμβαίνει, ενδεικτικά, για το διακόπτη $s_{110-3003}$ στο σενάριο 10, ενώ αποκλείει από το μοντέλο του δικτύου όσους διακόπτες μετρήθηκαν ή υποτέθηκαν

εσφαλμένα ως κλειστοί, όπως π.χ. ο διακόπτης $s_{140-3002}$ σενάριο 7.

Ο έλεγχος των κανονικοποιημένων υπολοίπων των μετρήσεων ανά σενάριο και οι διορθωτικές διαδικασίες σε όσα σενάρια εντοπίστηκαν εσφαλμένα δεδομένα, απεικονίζονται στους Πίνακες 3.8–3.12. Ειδικότερα, στην τελευταία στήλη καταγράφονται οι μετρούμενες/υποτιθέμενες καταστάσεις των υπό μελέτη διακοπών ανά σενάριο. Δίπλα, παρουσιάζονται οι 3 μετρήσεις, αναλογικών ή λογικών μεγεθών, με τις μεγαλύτερες τιμές κανονικοποιημένων υπολοίπων και με έντονη γραφή τονίζονται όσες υπερβαίνουν το όριο $\left| \hat{r}_{N,i} \right|_{\max}$. Διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει επιτυχείς εκτιμήσεις της πραγματικής τοπολογίας του δικτύου για όλα τα σενάρια, ανεξαρτήτως της ύπαρξης ή μη σφαλμάτων στην αρχικώς υποθεθείσα τοπολογία του δικτύου και χονδροειδών σφαλμάτων σε αναλογικές μετρήσεις. Ο μέγιστος αριθμός επανειτελέσεων παρατηρείται για το σενάριο 10 όπου εντοπίζονται 4 εσφαλμένα δεδομένα (2 λογικά και 2 αναλογικά). Αξίζει να σημειωθεί, αν και δεν παρουσιάζονται στους πίνακες, ότι οι εκτιμώμενες καταστάσεις του διακόπτη $\hat{s}_{110-3003}$ στα σενάρια 9 και 10 είναι αβέβαιες κατά την πρώτη εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης, καθώς λαμβάνουν τιμές γύρω στο 0.5. Ωστόσο, οι ορθές καταστάσεις του διακόπτη εκτιμώνται σωστά μετά από την τελευταία επανειτέλεση του αλγόριθμου. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σενάριο 12, όπου ο κλάδος 111–113 υποτίθεται αρχικά ως εκτός λειτουργίας με συνέπεια το δίκτυο να διαχωρίζεται σε δύο μη διασυνδεδεμένες νησίδες και η Ιακωβιανή μήτρα για το συνολικό δίκτυο να γίνεται μη αντιστρέψιμη. Σύμφωνα με την ανάλυση της υποενότητας 2.4.2.3, εισάγονται δύο ψευδομετρήσεις των μορφών (2.46) και (2.47), εν προκειμένω $0 = (1 - s_{111-3005})\delta_{112}$ και ως γωνία αναφοράς για τη δεύτερη νησίδα επιλέγεται αυτή του κόμβου 112.

Πίνακας 3.8: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 1–3.

| Α/Α σεναρίου | Α/Α εκτέλεσης | Μέτρηση | $\max \left \hat{r}_{N,i} \right $ | Κατάσταση ανά διακοπτικό μέσο | | | | | |
|-----------------|------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| | | | | $s_{110-3003}$ | $s_{121-3001}$ | $s_{140-3002}$ | $s_{320-3004}$ | $s_{380-3000}$ | |
| 1 | 1 | P_{357} | 2.8346867 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| | | Q_{416} | 2.6021712 | | | | | | |
| | | Q_{102} | 2.5638857 | | | | | | |
| 2 | 1 | Q_{54} | 2.5300879 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| | | Q_{232} | 2.2691149 | | | | | | |
| | | Q_{80} | 2.1177385 | | | | | | |
| 3 | 1 | $s_{121-3001}$ | 50.0000000 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| | | Q_{125} | 2.7612610 | | | | | | |
| | | P_{36} | 2.6551977 | | | | | | |
| | 2 | 2 | Q_{432} | 2.6752228 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Q_{408} | 2.0081600 | | | | | |
| | | | Q_{412} | 1.9969794 | | | | | |

Πίνακας 3.9: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 4–6.

| Α/Α σεναρίου | Α/Α εκτέλεσης | Μέτρηση | $\max \hat{r}_{N,i} $ | Κατάσταση ανά διακοπτικό μέσο | | | | |
|-----------------|------------------|----------------|------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | $s_{110-3003}$ | $s_{121-3001}$ | $s_{140-3002}$ | $s_{320-3004}$ | $s_{380-3000}$ |
| 4 | 1 | $s_{121-3001}$ | 50.5200000 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | | $s_{380-3000}$ | 50.0199999 | | | | | |
| | | Q_{430} | 2.7612859 | | | | | |
| | 2 | $s_{380-3000}$ | 49.9999999 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| | | Q_{430} | 2.5310128 | | | | | |
| | | Q_{410} | 2.0531465 | | | | | |
| | 3 | Q_{430} | 2.0230509 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | P_{430} | 1.6513273 | | | | | |
| | | P_{382} | 1.6373424 | | | | | |
| 5 | 1 | $s_{110-3003}$ | 50.6570000 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | P_{112} | 2.0042713 | | | | | |
| | | P_{18} | 1.9203360 | | | | | |
| | 2 | P_{114} | 1.7654282 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | Q_{32} | 1.4301449 | | | | | |
| | | Q_{363} | 1.3755285 | | | | | |
| 6 | 1 | $s_{110-3003}$ | 54.0000186 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | $s_{121-3001}$ | 50.9860921 | | | | | |
| | | Q_{314} | 2.6496588 | | | | | |
| | 2 | $s_{121-3001}$ | 49.9998989 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | Q_{314} | 2.4992126 | | | | | |
| | | Q_{70} | 2.1130723 | | | | | |
| | 3 | Q_{314} | 1.9357252 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | | P_{331} | 1.7063631 | | | | | |
| | | Q_{285} | 1.2495267 | | | | | |

Πίνακας 3.10: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 7 και 8.

| Α/Α σεναρίου | Α/Α εκτέλεσης | Μέτρηση | $\max \hat{r}_{N,i} $ | Κατάσταση ανά διακοπτικό μέσο | | | | |
|-----------------|------------------|----------------|------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | $s_{110-3003}$ | $s_{121-3001}$ | $s_{140-3002}$ | $s_{320-3004}$ | $s_{380-3000}$ |
| 7 | 1 | $s_{140-3002}$ | 50.6950000 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | | $s_{121-3001}$ | 50.1720000 | | | | | |
| | | $s_{110-3003}$ | 50.0990000 | | | | | |
| | 2 | $s_{121-3001}$ | 50.5340000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | | $s_{110-3003}$ | 49.9980000 | | | | | |
| | | Q_{310} | 2.6954336 | | | | | |
| | 3 | $s_{110-3003}$ | 50.1640000 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | P_{28} | 2.1786122 | | | | | |
| | | Q_{314} | 2.0645192 | | | | | |
| | 4 | Q_{314} | 1.8706431 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | P_{311} | 1.5382432 | | | | | |
| | | Q_{363} | 1.3755285 | | | | | |
| 8 | 1 | $P_{110-3003}$ | 49.984390 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | Q_{320} | 2.8796522 | | | | | |
| | | P_{32} | 2.0192643 | | | | | |
| | 2 | P_{332} | 1.8653279 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | P_{32} | 1.8426943 | | | | | |
| | | Q_{318} | 1.2856112 | | | | | |

Πίνακας 3.11: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 9 και 10.

| A/A σεναρίου | A/A εκτέλεσης | Μέτρηση | $\max \hat{r}_{N,i} $ | Κατάσταση ανά διακοπτικό μέσο | | | | |
|-----------------|------------------|----------------|------------------------|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | $s_{110-3003}$ | $s_{121-3001}$ | $s_{140-3002}$ | $s_{320-3004}$ | $s_{380-3000}$ |
| 9 | 1 | $s_{110-3003}$ | 52.6869419 | | | | | |
| | | $P_{110-3003}$ | 17.8692114 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | $Q_{110-3003}$ | 12.1948572 | | | | | |
| | 2 | $P_{110-3003}$ | 16.9592432 | | | | | |
| | | $Q_{110-3003}$ | 14.4856997 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | P_{46} | 2.2565125 | | | | | |
| | 3 | $Q_{110-3003}$ | 15.9242638 | | | | | |
| | | Q_{310} | 2.8956487 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | P_{46} | 2.3419148 | | | | | |
| | 4 | Q_{310} | 2.6456932 | | | | | |
| | | P_{46} | 1.9569423 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | Q_{224} | 1.6459691 | | | | | |
| 10 | 1 | $s_{110-3003}$ | 56.2830000 | | | | | |
| | | $s_{140-3002}$ | 52.9260000 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | $Q_{110-3003}$ | 27.9188492 | | | | | |
| | 2 | $s_{140-3002}$ | 49.9998000 | | | | | |
| | | $Q_{110-3003}$ | 22.6834517 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | | $P_{110-3003}$ | 20.0065311 | | | | | |
| | 3 | $Q_{110-3003}$ | 12.5961924 | | | | | |
| | | $P_{110-3003}$ | 9.8720618 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | Q_{320} | 1.9607600 | | | | | |
| | 4 | $P_{110-3003}$ | 10.9825641 | | | | | |
| | | Q_{280} | 1.9672683 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | Q_{320} | 1.9019603 | | | | | |
| | 5 | Q_{320} | 1.9272790 | | | | | |
| | | P_{114} | 1.9160936 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | | Q_{280} | 1.1145891 | | | | | |

Πίνακας 3.12: Έλεγχος κανονικοποιημένων υπολοίπων και διορθώσεις για τα σενάρια 11–13.

| Α/Α σεναρίου | Α/Α εκτέλεσης | Μέτρηση | $\max \hat{r}_{N,i} $ | Κατάσταση διακοπτικού μέσου |
|-----------------|------------------|----------------|------------------------|--------------------------------|
| | | | | $s_{111-3005}$ |
| 11 | 1 | Q_{375} | 2.9352446 | 1 |
| | | Q_{406} | 2.5721460 | |
| | | Q_{295} | 2.1036809 | |
| 12 | 1 | $s_{111-3005}$ | 49.9997216 | 0 |
| | | Q_{405} | 2.6886924 | |
| | | Q_{369} | 2.5187516 | |
| | 2 | Q_{405} | 2.2361544 | 1 |
| | | Q_{359} | 1.9738494 | |
| | | Q_{369} | 1.8113372 | |
| 13 | 1 | $s_{111-3005}$ | 51.0066494 | 1 |
| | | P_{139} | 2.8621559 | |
| | | P_{214} | 2.6611891 | |
| | 2 | Q_{408} | 2.4431672 | 0 |
| | | Q_{329} | 2.0173849 | |
| | | P_{139} | 1.8476614 | |

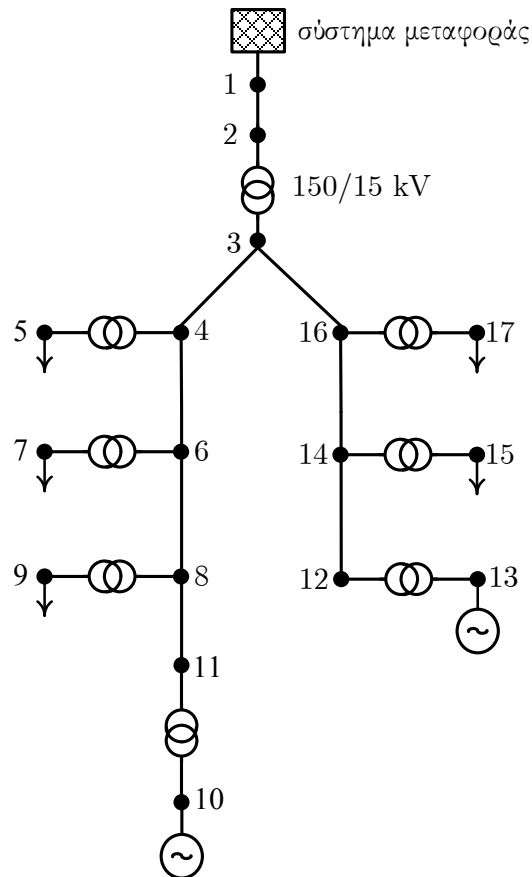
3.5.4 Εφαρμογή των μεθόδων βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] και εκτίμησης φορτίου [169] σε μικροδίκτυο 17 κόμβων

Στην παρούσα ενότητα, αναλύεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της προσομοίωσης της εφαρμογής των μεθόδων των αναφορών [182] και [169] σε μικροδίκτυο από τη διεθνή βιβλιογραφία. Κατόπιν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτέλεσης των σχετικών προγραμμάτων προσομοίωσης προκειμένου να διερευνηθούν τα ερωτήματα 2 και 3 τα οποία τέθηκαν στην εισαγωγή της ενότητας.

3.5.4.1 Το δίκτυο δοκιμών

Το δίκτυο δοκιμών αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοχή του πειραματικού δικτύου του οποίου η αυθεντική δομή περιγράφεται στην αναφορά [202]. Το αρχικό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 5 μικροδίκτυα, μειώθηκε ώστε να περιλαμβάνει μόνο 2 εξ' αυτών, τα οποία μειώθηκαν περαιτέρω ώστε τελικά να συγκροτούνται από δύο κύριες γραμμές διανομής και, συνολικά, 17 κόμβους. Το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου δοκιμών, το οποίο χάριν απλότητας εφεξής θα θεωρείται ως ένα ενιαίο μικροδίκτυο, απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13. Όπως διαπιστώνεται, έχει ακτινική δομή και περιλαμβάνει 2 κόμβους με εγκατεστημένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής.

Έχοντας τη δομή και τα χαρακτηριστικά ενός μικροδικτύου (με κυριότερα το περιορισμένο μέγεθος και τις μικρές μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής), το προτεινόμενο δίκτυο μπορεί να αποτελέσει πεδίο εφαρμογής τεχνολογιών AMR και AMI. Εξάλλου, η επιτήρηση και ο απομακρυσμένος έλεγχος φορτίων αποτελούν, επίσης, βασικό χαρακτηριστικό ενός μικροδικτύου. Διευκρινίζεται ότι, όπως στην περίπτωση του δικτύου δοκιμών της υποενότητας 3.5.2, δεν λαμβάνεται υπόψη η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων του μικροδικτύου και, για τους σκοπούς της μελέτης, θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του. Δεδομένου ότι οι προς εξέταση μέθοδοι θα αξιολογηθούν ως προς την εκτίμηση του συνολικού – και όχι του ανά φάση – φορτίου των μετασχηματιστών διανομής, η ανωτέρω θεώρηση αναμένεται ότι δεν θα επηρεάσει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.



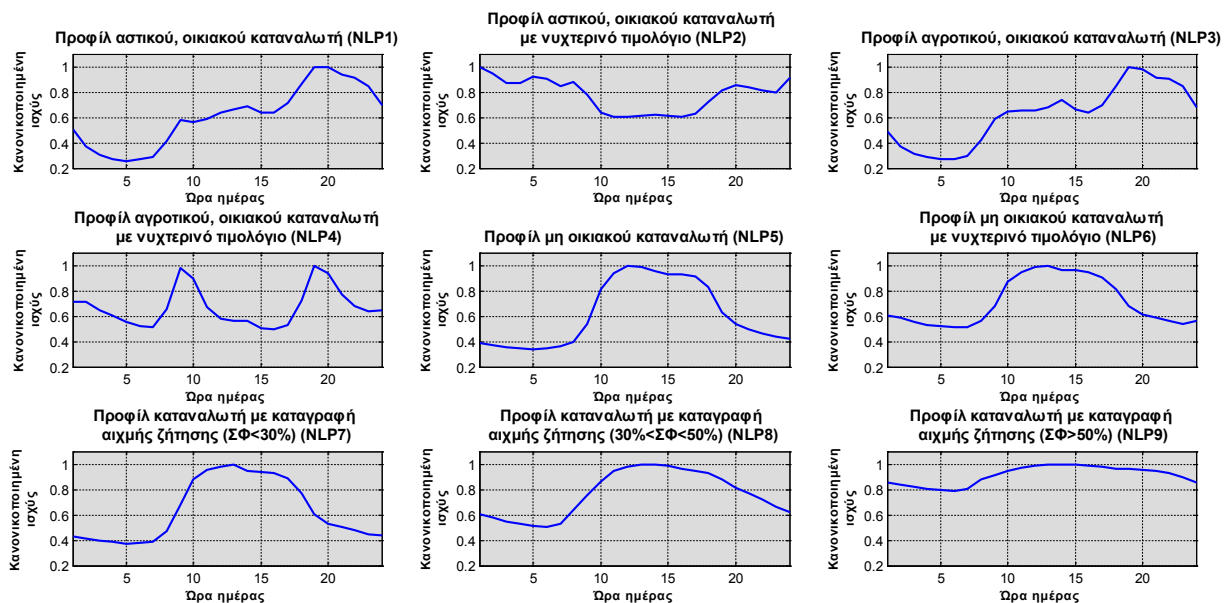
Σχήμα 3.13: Το μικροδίκτυο 17 κόμβων το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως δίκτυο δοκιμών.

3.5.4.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Προτεραιότητα για το σχεδιασμό και την υλοποίηση των προγραμμάτων προσομοίωσης για τις δύο προτεινόμενες μεθόδους αποτελεί, με βάση τις προδιαγραφές του Πίνακα 3.2, η διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίου από καταναλωτές. Παρ' όλα αυτά, είναι γνωστό ότι υφίστανται αυστηροί περιορισμοί ως προς την κοινοποίηση καταγραφών από μετρητές αυτόματης προσπέλασης ή έξυπνους μετρητές λόγω των πολιτικών προστασίας των ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων. Ως εκ τούτου, δεν είναι γενικά εφικτή η πρόσβαση σε πραγματικά δεδομένα φορτίου από δίκτυα διανομής όπου υπάρχουν εγκατεστημένα συστήματα AMR ή AMI.

Εφόσον, λοιπόν, είναι αδύνατη η ταυτόχρονη γνώση της δομής και των χαρακτηριστικών ενός δικτύου διανομής καθώς και δεδομένων φορτίου από αυτό, η πιο απλή και αποδοτική λύση είναι η

χρησιμοποίηση ανώνυμων δεδομένων φορτίου από κάποια διαδικτυακή βάση δεδομένων και, κατόπιν, η προσαρμογή τους στα χαρακτηριστικά του προτεινόμενου δικτύου δοκιμών. Προς αυτή την κατεύθυνση, αξιοποιήθηκαν τυπικά προφίλ φορτίου (standard load profiles) από το δίκτυο διανομής της Ιρλανδίας, τα οποία αντλήθηκαν από τη διαδικτυακή βάση δεδομένων [203]. Πρόκειται για 9 τυπικά προφίλ φορτίου καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη κλάση καταναλωτών. Τα εν λόγω προφίλ προήλθαν από την επεξεργασία πραγματικών δεδομένων φορτίου τα οποία καταγράφηκαν από ψηφιακούς μετρητές οι οποίοι έχουν εγκατασταθεί σε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα καταναλωτών ΧΤ της Ιρλανδίας. Συνοπτικά, οι, ανά τέταρτο της ώρας, καταγραφές των μετρητών συλλέγονται και κατόπιν επεξεργασίας τους εξάγονται τα τυπικά προφίλ φορτίου της επόμενης χρονιάς. Στη συνέχεια, τα προφίλ κανονικοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε το ετήσιο άθροισμα των ανά τέταρτο τιμών φορτίου να είναι ίσο με τη μονάδα και προκύπτουν τα αντίστοιχα κανονικοποιημένα προφίλ φορτίου (normalized load profiles) [203]. Οι δύο προτεινόμενες μέθοδοι αξιολογήθηκαν ως προς την εκτίμηση δεδομένων φορτίου από το έτος 2013, τα οποία βασίστηκαν σε καταγραφές του έτους 2012. Στο Σχήμα 3.14, απεικονίζονται οι μέσες, ημερήσιες καμπύλες για τα 9 προφίλ NLP και οι κλάσεις των καταναλωτών στις οποίες αυτά αντιστοιχούν για το έτος 2013.



Σχήμα 3.14: Μέσες, ημερήσιες καμπύλες προφίλ NLP ανά κλάση καταναλωτή βάσει πραγματικών δεδομένων φορτίου από το δίκτυο διανομής της Ιρλανδίας (όπου ΣΦ: συντελεστής φορτίου) [203].

Όπως διαπιστώνεται, τα προφίλ NLP καλύπτουν τις βασικές κλάσεις καταναλωτών: πέραν των οικιακών προφίλ NLP1–NLP4, τα προφίλ NLP5 και NLP6 αναφέρονται σε κλάσεις εμπορικών καταναλωτών, ενώ τα προφίλ NLP7–NLP9 αντιστοιχούν σε μεγάλους καταναλωτές, είτε βιομηχανικούς είτε εμπορικούς, των οποίων ο συντελεστής φορτίου καταγράφεται για τιμολογιακούς σκοπούς. Δεδομένου ότι και οι δύο προτεινόμενες μέθοδοι λειτουργούν σε επίπεδο καταναλωτή ΧΤ, η επίδοσή τους μπορεί να αξιολογηθεί μέσω της απ' ευθείας εφαρμογής τους σε δεδομένα φορτίου των κλάσεων καταναλωτών του Σχήματος 3.14.

Σε αυτό το σημείο, δεν πρέπει να αμεληθεί ότι προδιαγραφή για την εφαρμογή της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] αποτελεί και η διαθεσιμότητα καιριών δεδομένων: πρόκειται για τη διακύμανση θερμοκρασίας μέσα στην ημέρα και τη διάρκεια του ημερήσιου φωτισμού ανά ημέρα. Όλα τα σχετικά στοιχεία για το έτος 2013 αντλήθηκαν μέσα από τη διαδικτυακή τοποθεσία

της Ιρλανδικής μετεωρολογικής υπηρεσίας [204]. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για τον υπολογισμό των συντελεστών a_i , $i = 1, \dots, 6$ και b_1 , b_2 του μοντέλου (3.10), στο οποίο βασίζεται η μέθοδος, χρησιμοποιήθηκαν προφίλ NLP και καιρικά δεδομένα για τα έτη 2012 και 2013. Με παρόμοια λογική, για την εξαγωγή των καμπυλών μέσης ισχύος μέσω της σχέσης (3.11), οι οποίες αξιοποιούνται στο πλαίσιο της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169], χρησιμοποιήθηκαν προφίλ NLP των ετών 2012 και 2013. Με αυτό τον τρόπο, αναμένεται η ενίσχυση της αξιοπιστίας των παρεχόμενων αποτελεσμάτων και από τις δύο μεθόδους.

Όπως αναφέρθηκε στις υποενότητες 3.4.2 και 3.4.3, και οι δύο μέθοδοι δέχονται ως είσοδο δεδομένα φορτίου σε μονάδες ενέργειας αλλά, εν τέλει, παρέχουν εκτιμήσεις φορτίου σε μονάδες ισχύος. Γενικά, οι ψηφιακοί μετρητές, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων μετρητών και των μετρητών AMR, καταγράφουν τις στιγμιαίες τιμές τάσης και ρεύματος και υπολογίζουν τη στιγμιαία ισχύ με απλό πολλαπλασιασμό. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, π.χ. ένα τέταρτο ή μια ώρα, υπολογίζεται προσεγγιστικά με την ολοκλήρωση της μέσης ισχύος στον αντίστοιχο χρόνο. Συνεπώς, σε περίπτωση εκτίμησης φορτίου σε ωριαία βάση, η εκτιμώμενη τιμή της (μέσης) ισχύος ισούται με την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας. Για λόγους απλοποίησης της παρούσας μελέτης, λοιπόν, αν και τα προφίλ NLP έχουν χρονική διακριτικότητα τετάρτου, οι μέθοδοι θα εφαρμοστούν για την εκτίμηση ωριαίων τιμών.

Για την αξιολόγηση και τη σύγκριση των δύο μεθόδων, χρησιμοποιούνται δύο δείκτες επίδοσης. Θεωρώντας ένα πλήθος p πραγματικών τιμών φορτίου, έστω $P_{i,act}$, $i = 1, \dots, p$, και τις αντίστοιχες εκτιμήσεις τους, έστω $P_{i,est}$, $i = 1, \dots, p$, ως μέτρα ακρίβειας των εκτιμήσεων ορίζονται το σχετικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα (relative root mean square error – *RRMSE*) το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (P_{i,act} - P_{i,est})^2}{\sum_{i=1}^p P_{i,act}^2}} \quad (3.30)$$

και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (mean absolute percentage error – *MAPE*)

$$MAPE = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left| \frac{P_{i,act} - P_{i,est}}{P_{i,act}} \right| \quad (3.31)$$

Σε δεύτερο στάδιο, οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται σε επίπεδο μετασχηματιστών διανομής και οι εκτιμώμενες τιμές από αυτές εισάγονται ως ψευδομετρήσεις στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Καθεμία μέθοδος εφαρμόζεται ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό των διασπορών των ψευδομετρήσεων, ακολουθείται η θεώρηση της υποενότητας 3.5.2.2 και βάση υπολογισμού είναι η σχέση (3.16). Το μέγιστο σφάλμα (*error*) ανέρχεται στο 5%. Η επιλογή αυτής της τιμής θα εξηγηθεί στην επόμενη υποενότητα.

Όσον αφορά το σχεδιασμό της προσομοίωσης της εκτίμησης κατάστασης, πρωτίστως καθορίζεται το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων. Τα μέτρα τάσης στο ζυγό αναφοράς (κόμβος 1) και τους 2 κόμβους παραγωγής (κόμβοι 10 και 13) θεωρούνται μετρήσεις πραγματικού χρόνου και συνδέονται με μέγιστο σφάλμα (*error*) $\pm 0.2\%$. Διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο θεωρούνται και οι μετρήσεις εγχύσεων ισχύος

στο ζυγό αναφοράς και στους κόμβους παραγωγής, καθώς και τα ζεύγη ροών ενεργού και αέργου ισχύος στους κλάδους 4–3 και 16–3 και συνδέονται με μέγιστο σφάλμα 1%. Επιπλέον, διατίθενται 9 ζεύγη εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος ως εικονικές μετρήσεις από τους κόμβους μηδενικής έγχυσης με μέγιστο σφάλμα 0.01%. Τέλος, για τους 5 κόμβους φορτίου, δηλαδή τους κόμβους 5, 7, 9, 15 και 17, θεωρείται η διαθεσιμότητα ψευδομετρήσεων οι οποίες προέρχονται από την εφαρμογή είτε της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου είτε της μεθόδου εκτίμησης φορτίου.

Συνολικά, λοιπόν, θεωρείται ότι διατίθενται οι εξής μετρήσεις:

- 3 μετρήσεις μέτρων τάσης στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής
- 2 ζεύγη μετρήσεων ροών ενεργού και αέργου ισχύος στους κλάδο 4–3 και 16–3
- 3 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από το ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής
- 5 ζεύγη ψευδομετρήσεων από κόμβους φορτίου
- 9 ζεύγη εικονικών μετρήσεων από κόμβους μηδενικής έγχυσης.

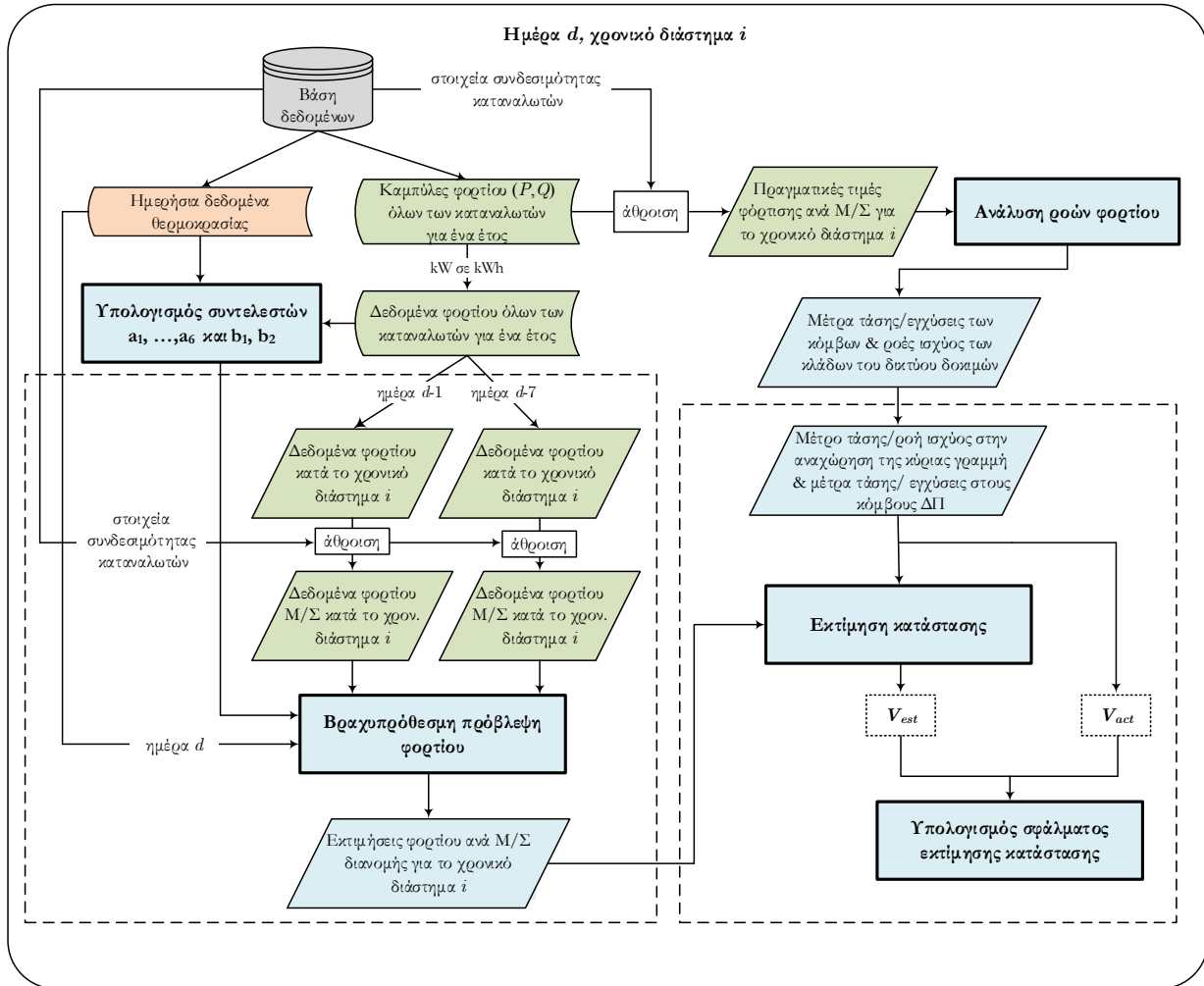
Η περίσσεια των μετρήσεων ποσοτικοποιείται από το λόγο είναι $r = \frac{m}{2n-1} = \frac{41}{33} = 1,24$.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος που χρησιμοποιήθηκαν τα προφίλ NLP προκειμένου να παραχθούν τεχνητά, ετήσια δεδομένα φορτίου για το δίκτυο δοκιμών. Υπολογίστηκαν 3 γραμμικοί συνδυασμοί των προφίλ NLP1, NLP2, NLP5, NLP6 και NLP7 στα οποία είχε υπερτεθεί τυχαίος θόρυβος, κανονικοποιήθηκαν εκ νέου και προσαρμόστηκαν με βάση τις ονομαστικές ικανότητες των μετασχηματιστών διανομής των κόμβων 5, 7 και 9. Με όμοιο τρόπο έγινε επεξεργασία των προφίλ NLP3, NLP4, NLP8 και NLP9 και τα 2 προφίλ που προέκυψαν αποδόθηκαν στους κόμβους 15 και 17. Με αυτή την τεχνική, τα προφίλ διατηρούν την ενδοημερήσια διακύμανσή τους και ρυθμίζονται μόνο οι αιχμές τους με βάση τις ονομαστικές ικανότητες των μετασχηματιστών. Έτσι, κάθε κόμβος φορτίου αποκτά τις δικές του ημερήσιες καμπύλες φορτίου για ένα ολόκληρο έτος. Μάλιστα, με την υλοποίηση των παραπάνω συνδυασμών εξασφαλίζεται ο διαχωρισμός των αστικών από τους αγροτικούς καταναλωτές.

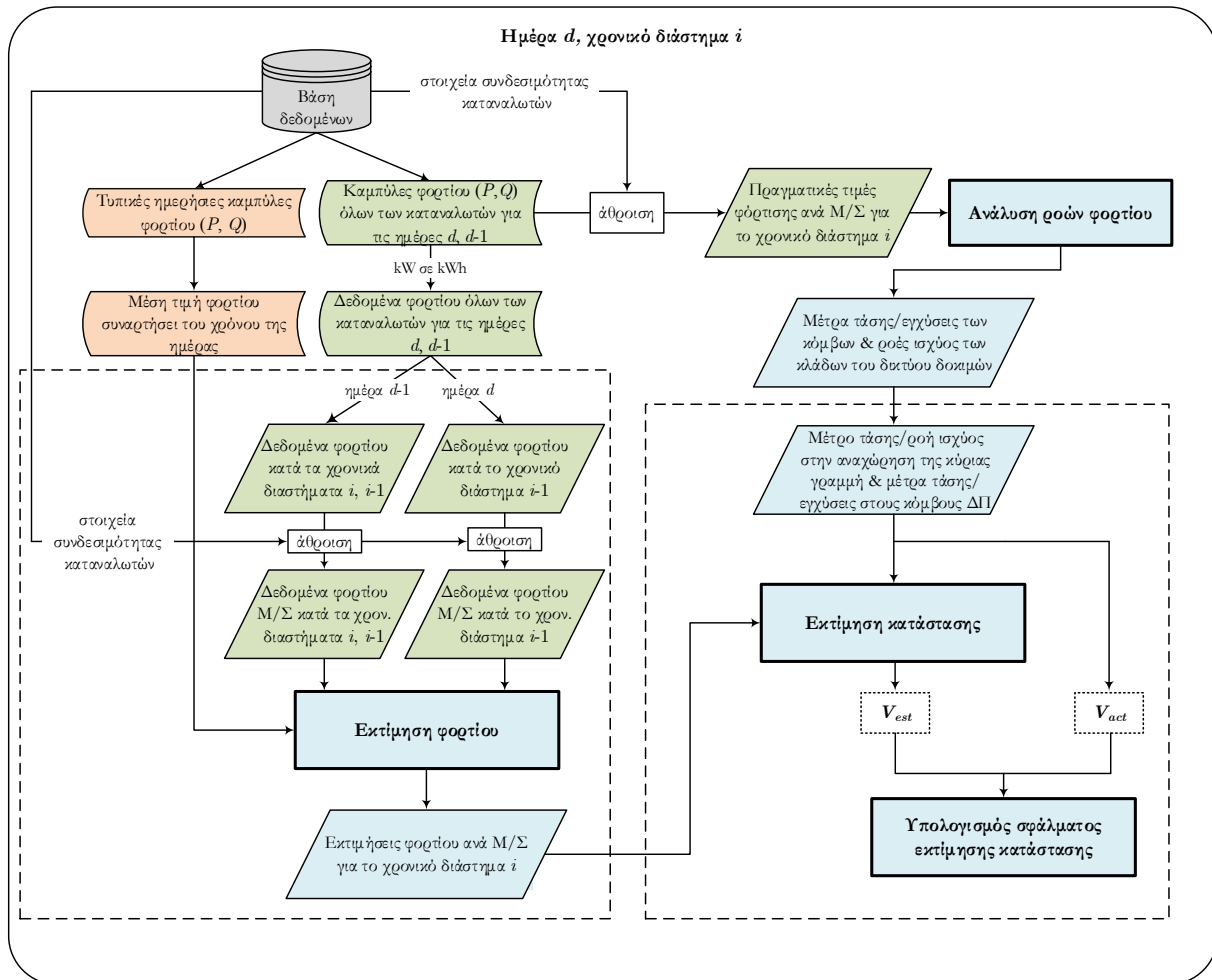
Στο Σχήμα 3.15 περιγράφεται λεπτομερώς υπό τη μορφή διαγράμματος ροής η προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Το αντίστοιχο διάγραμμα ροής για τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου δίνεται στο Σχήμα 3.16. Όπως διακρίνεται, τα προφίλ φορτίου NLP από τη βάση δεδομένων χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των πραγματικών, προς εκτίμηση ημερήσιων δεδομένων φορτίου για τη συγκεκριμένη ημέρα που έχει επιλεγεί, έστω την ημέρα d . Κατά το i -οστό διάστημα, το οποίο είναι αυστηρά ωριαίο για τις ανάγκες των προσομοιώσεων, οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν τα εν λόγω φορτία και, κατόπιν, αυτά παρέχονται ως ψευδομετρήσεις φορτίου στην εκτίμηση κατάστασης WLS προκειμένου να εκτιμηθούν οι τάσεις όλων των κόμβων κατά μέτρο και γωνία.

Αναφορικά με την εξαγωγή των πραγματικών και των μετρούμενων τιμών των υπόλοιπων μεγεθών, των οποίων θεωρείται ότι διατίθενται οι μετρήσεις, ακολουθείται ακριβώς η ίδια τεχνική με αυτή της υποενότητας 3.5.2.2. Με την υπόθεση ενός σταθερού συντελεστή ισχύος $PF = 0,9$, τα δεδομένα φορτίου εμπλουτίζονται και με τις καταναλώσεις αέργου ισχύος. Αυτά τα ζεύγη καταναλώσεων ενεργού και αέργου ισχύος χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των πραγματικών τιμών των μεγεθών μέσω της ανάλυσης ροών φορτίου. Παρομοίως, οι μετρούμενες τιμές των μεγεθών προκύπτουν με χρήση της σχέσης (3.19) θεωρώντας τα μέγιστα σφάλματα ανά τύπο μέτρησης τα οποία προαναφέρθηκαν.

Όπως και στην υποενότητα 3.5.2.2, επιλέγεται η θερινή περίοδος για την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Πιο συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις διεξάγονται για μία ολόκληρη ημέρα του Ιουλίου, σε ωριαία βάση. Το σχετικό ποσοστιαίο σφάλμα **RPE** χρησιμοποιείται και πάλι ως δείκτης ακρίβειας της εκτίμησης των μέτρων τάσης των κόμβων του δικτύου δοκιμών.



Σχήμα 3.15: Το διάγραμμα ροής για την προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου [182] και της εκτίμησης κατάστασης WLS.



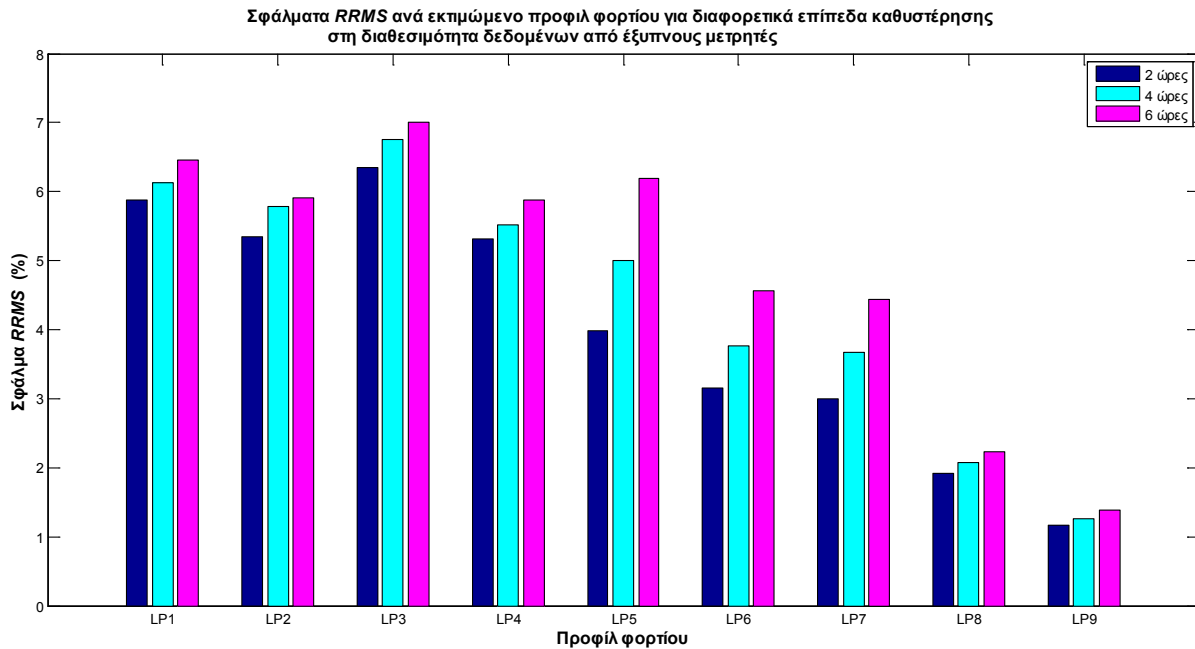
Σχήμα 3.16: Το διάγραμμα ροής για την προσομοίωση της συνδυασμένης λειτουργίας της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169] και της εκτίμησης κατάστασης WLS.

3.5.4.3 Αποτελέσματα

Σε πρώτο στάδιο αξιολογούνται και οι δύο μέθοδοι ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της εφαρμογής τους στα προφίλ NLP. Ουσιαστικά, δηλαδή, οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε προφίλ μεμονωμένων καταναλωτών. Τα πρώτα αποτελέσματα αφορούν αποκλειστικά τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου. Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της καθυστερημένης διαθεσιμότητας των δεδομένων των έξυπνων μετρητών στα ΚΕΕ όπου, υπό συνθήκες πραγματικής λειτουργίας, εκτελείται η μέθοδος, θεωρήθηκαν τρία σενάρια καθυστέρησης: 2, 4 και 6 ωρών. Με άλλα λόγια, για την εκτίμηση φορτίου κατά το i -οστό διάστημα, τα πιο πρόσφατα δεδομένα φορτίου είναι πριν από 2, 4 και 6 ώρες, αντιστοίχως. Έτσι, η εκτίμηση φορτίου μπορεί να διεξάγεται σε ωριαία βάση, αλλά στους υπολογισμούς της σχέσης (3.12) και, πιο συγκεκριμένα, στη μεταβλητή $kWh_{i-1, today}$ χρησιμοποιείται η τιμή του πιο

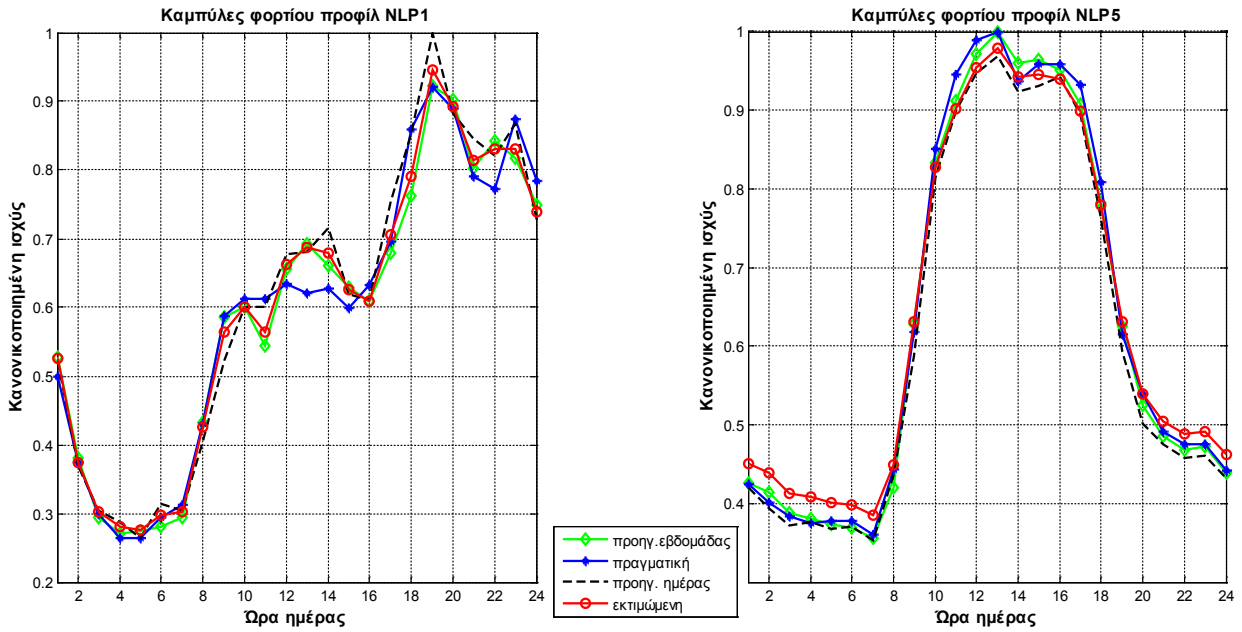
πρόσφατου, διαθέσιμου φορτίου. Στο Σχήμα 3.17, παρουσιάζονται τα σφάλματα $RRMS$ για καθένα επίπεδο καθυστέρησης, όπως προέκυψαν μετά από εφαρμογή της μεθόδου και στα 9 προφίλ NLP για τέσσερις ξεχωριστές εβδομάδες, μία για κάθε εποχή τους έτους. Όπως αναμένεται, τα σφάλματα αυξάνουν και για τα 9 προφίλ NLP καθώς αυξάνεται η χρονική καθυστέρηση. Αξιοσημείωτο εύρημα αποτελούν η περιορισμένη κλιμάκωση των σφαλμάτων για κάποια προφίλ όπως τα NLP2, NLP8 και NLP9. Η πιο πιθανή εξήγηση είναι ότι τα προφίλ αυτά εμφανίζουν μειωμένες διακυμάνσεις σε σύγκριση

με τη μέση καμπύλη φορτίου τους με αποτέλεσμα η καθυστερημένη διαθεσιμότητα δεδομένων φορτίου για αυτά να μην επιδρά τόσο αρνητικά στην εκτίμηση τους. Για παράδειγμα, τα προφίλ NLP8 και NLP9 αντιστοιχούν σε μεγάλους καταναλωτές των οποίων η δραστηριότητα προφανώς παρουσιάζει κανονικότητα σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια της ημέρας.

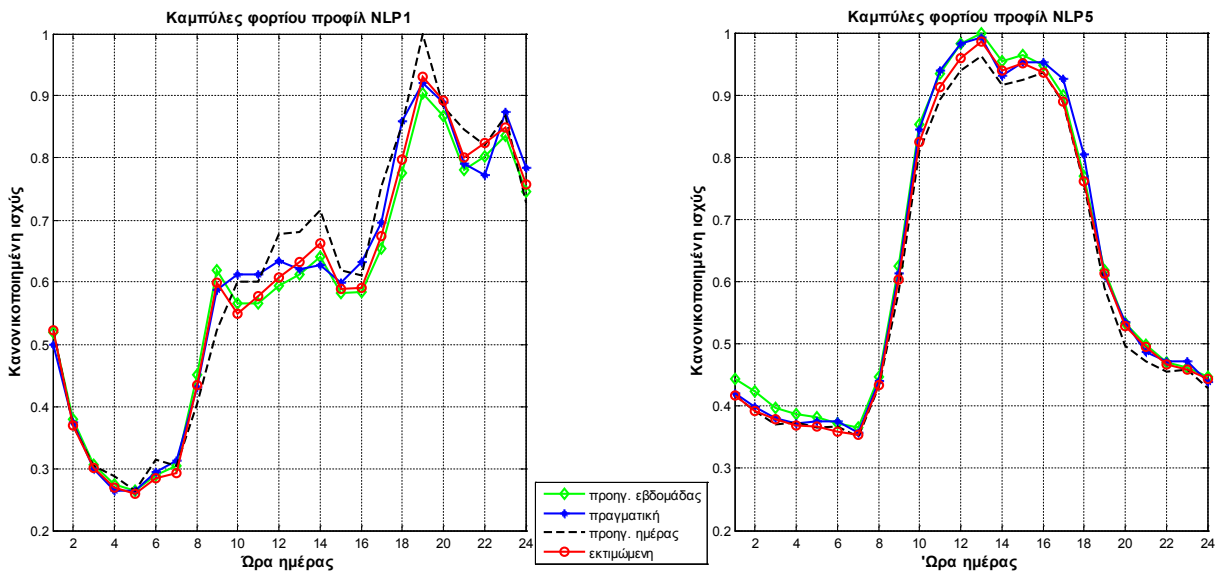


Σχήμα 3.17: Η επίδραση της καθυστερημένης διαθεσιμότητας των δεδομένων των έξυπνων μετρητών στην επίδοση της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169].

Στη συνέχεια, και οι δύο μέθοδοι συγκρίθηκαν ευθέως ως προς την ακριβεία τους μέσω της εφαρμογής τους στο σύνολο των ετησίων δεδομένων φορτίου των 9 προφίλ NLP. Το Σχήμα 3.18 αφορά τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου στα προφίλ NLP1 και NLP5 για μία ημέρα και απεικονίζει τέσσερις ημερήσιες καμπύλες φορτίου: την εκτιμώμενη καμπύλη, την πραγματική καμπύλη της ίδιας ημέρας και τις πραγματικές καμπύλες της προηγούμενης (ομοειδούς) ημέρας και της ίδιας ημέρας κατά την προηγούμενη εβδομάδα. Σε πλήρη αντιστοιχία είναι τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.19 και αφορούν τη μέθοδο της εκτίμησης φορτίου. Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι οι εκτιμώμενες καμπύλες και των δύο μεθόδων βρίσκονται πολύ κοντά στις πραγματικές και, μάλιστα, εγγύτερα σε σύγκριση με τις πραγματικές καμπύλες της προηγούμενης ημέρας και εβδομάδας, αντίστοιχα. Επιπλέον, με προσεκτική παρατήρηση διαπιστώνεται ότι η μέθοδος εκτίμησης φορτίου παρέχει καλύτερες εκτιμήσεις των πραγματικών τιμών σε σχέση με τη μέθοδο βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου. Το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και γενικεύεται μέσω του Σχήματος 3.20.



Σχήμα 3.18: Οι εκτιμώμενες καμπύλες φορτίου για τα προφίλ NLP1 και NLP5 οι οποίες προέκυψαν μέσω της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου σε σύγκριση με τις πραγματικές καμπύλες της ίδιας – τυχαία επιλεγμένης – ημέρας, της προηγούμενης (ομοειδούς) ημέρας και της ίδιας ημέρας κατά την προηγούμενη εβδομάδα.

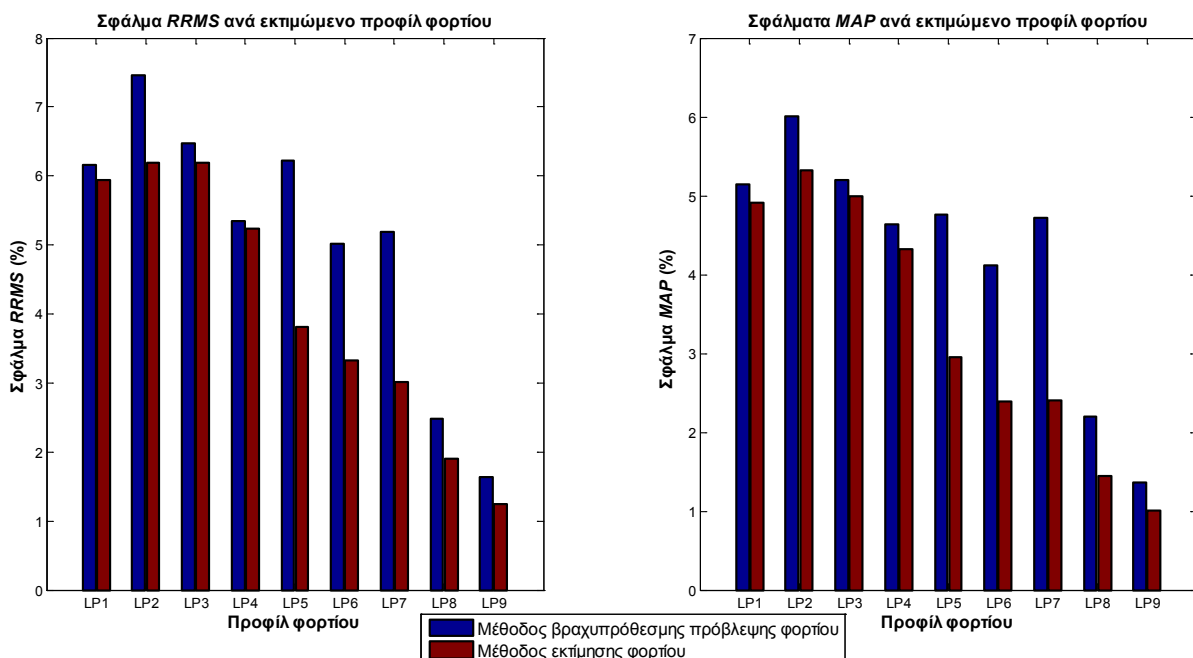


Σχήμα 3.19: Οι εκτιμώμενες καμπύλες φορτίου για τα προφίλ NLP1 και NLP5 οι οποίες προέκυψαν μέσω της μεθόδου εκτίμησης φορτίου σε σύγκριση με τις πραγματικές καμπύλες της ίδιας – τυχαία επιλεγμένης – ημέρας, της προηγούμενης (ομοειδούς) ημέρας και της ίδιας ημέρας κατά την προηγούμενη εβδομάδα.

Στο Σχήμα 3.20, απεικονίζονται σε ραβδογράμματα οι επιδόσεις των δύο προτεινόμενων μεθόδων με βάση τα σφάλματα $RRMS$ και MAP των παρεχόμενων εκτιμήσεων. Όπως είναι αναμενόμενο, η μέθοδος εκτίμησης φορτίου είναι πιο ακριβής ως προς την εκτίμηση όλων των προφίλ NLP σε σύγκριση με τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου. Πιο αναλυτικά, τα σφάλματα και των δύο μεθόδων κυμαίνονται στο εύρος 1% έως 8%. Παρ' όλο που για κάποια προφίλ φορτίου, όπως τα NLP2, NLP5–

NLP7, οι διαφορές ως προς τα σφάλματα είναι μεγάλες και ευνοϊκές προς τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου, για τα προφίλ NLP1, NLP3 και NLP4 οι διαφορές είναι οριακές. Αυτό συμβαίνει διότι τα εν λόγω προφίλ ανήκουν σε κλάσεις οικιακών καταναλωτών των οποίων τα φορτία εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα καιρικά δεδομένα. Ως εκ τούτου, μολονότι η μέθοδος βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου δεν χρησιμοποιεί δεδομένα φορτίου σχεδόν πραγματικού χρόνου, η αξιοποίηση δεδομένων θερμοκρασίας και ημερήσιου φυσικού φωτισμού συμβάλλει στη βελτιωμένη επίδοσή της για τα οικιακά προφίλ.

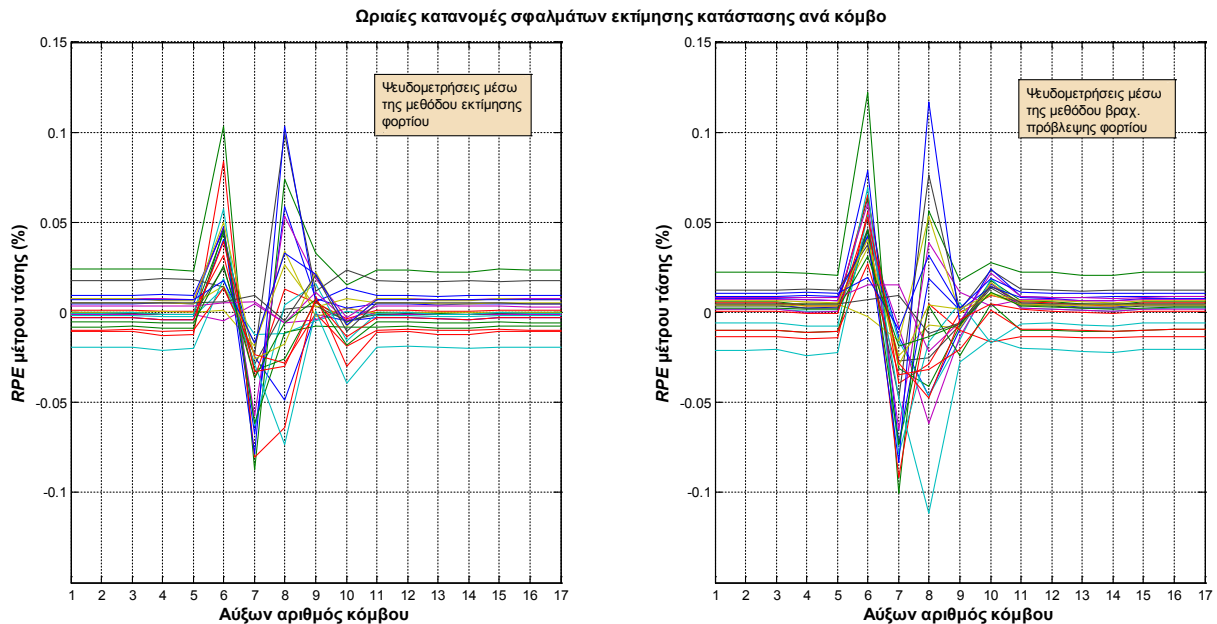
Από το Σχήμα 3.20, παρατηρείται ότι, και για τα δύο είδη σφαλμάτων, οι τιμές που αφορούν τα προφίλ NLP6–NLP8 είναι μικρότερες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για τα υπόλοιπα προφίλ. Η εξήγηση η οποία δόθηκε στην περίπτωση του Σχήματος 3.17, ταιριάζει και στο εν λόγω εύρημα. Αυτά τα προφίλ ανήκουν σε μεγάλους καταναλωτές, βιομηχανικούς ή εμπορικούς, με αποτέλεσμα η διακύμανσή τους ως προς τις μέσες τιμές να είναι μικρή, καθώς η κατανάλωση φορτίου τους, όπως ο κλιματισμός, ο φωτισμός και η παραγωγική διαδικασία, είναι σε μεγάλο βαθμό χρονικά προγραμματισμένη. Συνεπώς, πρόκειται για τις πιο εύκολα προβλέψιμες κλάσεις καταναλωτών με τα αντίστοιχα σφάλματα των δύο μεθόδων να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα.



Σχήμα 3.20: Σύγκριση σφαλμάτων *RRMS* και *MAP* των δύο προτεινόμενων μεθόδων ανά εκτιμώμενο προφίλ NLP.

Σε δεύτερο στάδιο, αξιολογούνται και συγκρίνονται οι δύο μέθοδοι ως προς την παροχή ψευδομετρήσεων στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS. Σε αυτό το πλαίσιο, όπως προαναφέρθηκε, τα μέγιστα σφάλματα για τον υπολογισμό των διασπορών των ψευδομετρήσεων και των δύο μεθόδων ρυθμίστηκαν σε επίπεδο $\pm 5\%$ λαμβάνοντας υπόψη τις επιδόσεις τους όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.20. Διευκρινίζεται ότι αυτή η ρύθμιση είναι μια καθαρά προσεγγιστική λύση. Η εκτίμηση κατάστασης διεξάγεται για μία τυχαία ημέρα του Ιουλίου, σε ωριαία βάση. Έτσι, ο δείκτης *RPE* λαμβάνει $24 \times 17 = 408$ τιμές, οι οποίες οργανώνονται σε 17 καμπύλες καθεμία από τις οποίες αναπαριστά τη διακύμανση του δείκτη *RPE* ανά κόμβο για μια συγκεκριμένη ώρα. Τα σχετικά αποτελέσματα απεικονίζονται στο Σχήμα 3.21.

Εύκολα διαπιστώνεται ότι τα σφάλματα είναι πολύ χαμηλά, κυμαινόμενα στο εύρος $\pm 0.15\%$. Επιπλέον, η χρήση ψευδομετρήσεων της μεθόδου βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης φορτίου αυξάνει τα σφάλματα της εκτίμησης κατάστασης σε σύγκριση με τις αντίστοιχες της μεθόδου εκτίμησης φορτίου. Προκειμένου να αναλυθούν περαιτέρω τα εν λόγω αποτελέσματα, υπολογίστηκαν οι μέσες, απόλυτες τιμές του δείκτη *RPE* ανά κόμβο για την ημέρα της εκτίμησης κατάστασης και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.



Σχήμα 3.21: Ωριαίες κατανομές σφαλμάτων εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο του δικτύου δοκιμών για την τυχαία επιλεγμένη ημέρα της θερινής περιόδου.

Πίνακας 3.13: Μέσα, απόλυτα σφάλματα *RPE* ανά κόμβο για την επιλεγμένη ημέρα της θερινής περιόδου.

| A/A κόμβου | Μέθοδος βραχ. πρόβλεψης φορτίου | Μέθοδος εκτίμησης φορτίου | A/A κόμβου | Μέθοδος βραχ. πρόβλεψης φορτίου | Μέθοδος εκτίμησης φορτίου |
|------------|---------------------------------|---------------------------|------------|---------------------------------|---------------------------|
| 1 | 0.0076 | 0.0065 | 10 | 0.0144 | 0.0109 |
| 2 | 0.0076 | 0.0065 | 11 | 0.0080 | 0.0065 |
| 3 | 0.0077 | 0.0065 | 12 | 0.0075 | 0.0064 |
| 4 | 0.0075 | 0.0071 | 13 | 0.0072 | 0.0065 |
| 5 | 0.0072 | 0.0067 | 14 | 0.0072 | 0.0067 |
| 6 | 0.0459 | 0.0332 | 15 | 0.0075 | 0.0065 |
| 7 | 0.0408 | 0.0364 | 16 | 0.0076 | 0.0065 |
| 8 | 0.0381 | 0.0348 | 17 | 0.0077 | 0.0065 |
| 9 | 0.0089 | 0.0095 | | | |

Όπως παρατηρείται, τα μέτρα τάσης όλων των κόμβων εκτιμώνται ακριβέστερα μέσω της χρήσης των ψευδομετρήσεων της μεθόδου εκτίμησης φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα για τους κόμβους 6, 7, 8 και 10 είναι σαφώς υψηλότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα των υπολοίπων κόμβων. Και οι τέσσερις αυτοί κόμβοι ανήκουν στην κύρια γραμμή στα αριστερά του Σχήματος 3.13., γεγονός το

οποίο μπορεί να εξηγήσει το παραπάνω εύρημα. Η εν λόγω κύρια γραμμή τροφοδοτεί τρεις κόμβους φορτίου εν αντιθέσει με τη δεύτερη κύρια γραμμή – στα δεξιά του Σχήματος 3.13 – η οποία τροφοδοτεί δύο κόμβους φορτίου. Ως εκ τούτου, την εκτίμηση των τάσεων των κόμβων της πρώτης επηρεάζει αρνητικά η υψηλή διασπορά τριών ζευγών ψευδομετρήσεων, η οποία είναι σαφώς δυσμενέστερη σε σύγκριση την υψηλή διασπορά δύο ζευγών ψευδομετρήσεων που επηρεάζει την εκτίμηση των τάσεων της δεύτερης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού νέων και της αναβάθμισης υφιστάμενων μετρητικών υποδομών μέσω της εγκατάστασης νέων μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ συνιστά ένα πρόβλημα πολύπλευρης σημασίας το οποίο εξελίσσεται συνεχώς κατά τις τελευταίες δεκαετίες, καθώς, πέραν από καθιερωμένους στόχους όπως η επίτευξη παρατηρησιμότητας και η ευρωστία ενάντια σε απώλεια μετρητικών δεδομένων [12], [29], έχει έρθει στο προσκήνιο και η ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης [205], [86]. Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά, γίνεται μια λεπτομερής επισκόπηση των μεθόδων βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ μέσω της μελέτης της σχετικής βιβλιογραφίας. Έμφαση δίνεται στις μεθοδολογίες οι οποίες αφορούν στην τοποθέτηση μονάδων PMU σε συστήματα μεταφοράς, καθώς και στη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης των δικτύων διανομής. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής αισθητήρων σε υποδομές εποπτείας και ελέγχου. Ως κύρια μεθοδολογικά εργαλεία για τη μελέτη του προβλήματος αναδεικνύονται η πληροφορία του Fisher και ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός (optimal experimental design), των οποίων το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο περιγράφεται διεξοδικά. Ακολούθως, η μελέτη επικεντρώνεται σε δύο επιλεγμένα κριτήρια του βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού, ενώ διατυπώνεται και μία συνθήκη επίτευξης παρατηρησιμότητας με χρήση θετικά ορισμένων μητρώων. Τέλος, αναλύονται οι προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ, οι οποίες βασίζονται στη μοντελοποίηση των ανωτέρω κριτηρίων σύμφωνα με τις αρχές του κυρτού προγραμματισμού και, μιας υποκατηγορίας του, του ημιορισμένου προγραμματισμού.

4.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

4.1.1 Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα συστήματα μεταφοράς

Γενικά, η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ συνίσταται στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τον ελάχιστο αριθμό των μετρητικών μονάδων που πρέπει να εγκατασταθούν, καθώς και τη θέση τοποθέτησης (κόμβος ή κλάδος), το είδος (μέτρο/γωνία τάσης, μέτρο/γωνία ρεύματος, έγχυση/ροή ισχύος) και την ακρίβεια των μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών για καθεμία από αυτές, ούτως ώστε να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος συμβιβασμός αναφορικά με αντικρουόμενα κριτήρια, όπως η ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης, η επίτευξη παρατηρησιμότητας, η ευρωστία της ενάντια σε σφάλματα ή απώλειες μετρητικών δεδομένων, οι αλλαγές τοπολογίας και η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους της συνολικής εγκατάστασης, είτε αυτή αφορά το σχεδιασμό μιας νέας είτε στην επέκταση μιας υφιστάμενης μετρητικής υποδομής [151].

Ένα βασικό πλαίσιο για τη στοχευμένη τοποθέτηση μετρήσεων με στόχο τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης είχε ήδη συμπεριληφθεί στην εισήγηση του στατικού μοντέλου WLS από τους Scheppe et al. [14], όπου προτείνονται σύνολα μετρήσεων τα οποία ελαχιστοποιούν τη διασπορά των εκτιμώμενων μέτρων και γωνιών τάσης. Η ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης αποτελεί τη βάση του βέλτιστου σχεδιασμού μετρητικών συστημάτων και στην εργασία [206]: αρχικά θεωρείται το πλήρες σύνολο όλων των δυνατών μετρήσεων ως διαθέσιμο και, κατόπιν, ελαττώνεται σταδιακά μέσω της απόρριψης μετρήσεων με στόχο το τελικό σύνολο να ελαχιστοποιεί το σταθμισμένο άθροισμα των

τετραγώνων των διασπορών των επιθυμητών ηλεκτρικών μεγεθών του υπό μελέτη συστήματος. Επίσης, μία επέκταση της μεθόδου της εργασίας [206] προτείνεται στην αναφορά [207] με στόχο την ενίσχυση της ευρωστίας της εκτίμησης κατάστασης ενάντια σε απώλεια πλεοναζουσών μετρήσεων ή την ύπαρξη εσφαλμένων δεδομένων στις διαθέσιμες μετρήσεις μέσω της ελαχιστοποίησης της ευαισθησίας του συνολικού σφάλματος εκτίμησης. Αρκετά αργότερα, στην αναφορά [208], προτείνεται μια ευρετική (heuristic) μέθοδος βαθμιαίας τοποθέτησης επιπλέον μετρήσεων σε μία υφιστάμενη μετρητική υποδομή με γνώμονα τη μείωση των διασπορών των εκτιμώμενων τάσεων στους κόμβους εκείνους οι οποίοι εκτιμώνται με τις χειρότερες ακρίβειες. Τέλος, η εργασία [209] είναι η πρώτη χρονικά που επικεντρώνεται στη βέλτιστη επιλογή μονάδων RTU για το σχεδιασμό μετρητικών υποδομών. Με βάση το κριτήριο βελτιστοποίησης της αναφοράς [206], ένα αρχικώς θεωρούμενο σύνολο RTU απομειώνεται μέσω ενός αλγόριθμου ακολουθιακής απαλοιφής (sequential elimination) μονάδων RTU έως ότου παραβιαστεί η συνθήκη παρατηρησιμότητας ή κάποια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου του δείκτη ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης.

Εξαιρουμένων των ανωτέρω εργασιών (και ελάχιστων επιπλέον), το σύνολο σχεδόν της σχετικής διεθνούς βιβλιογραφίας επικεντρώνεται στη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων με στόχο την επίτευξη παρατηρησιμότητας και την ευρωστία ενάντια σε παράγοντες όπως η απώλεια μετρήσεων, τα εσφαλμένα δεδομένα και οι αλλαγές στην τοπολογία του υπό μελέτη συστήματος. Οι πρωτοπόρες εργασίες [126] και [131] έθεσαν από νωρίς στο ερευνητικό επίκεντρο το ζήτημα της εξασφάλισης της παρατηρησιμότητας. Στην αναφορά [126] περιγράφεται ένας ενιαίος αλγόριθμος για την ανάλυση της τοπολογικής παρατηρησιμότητας και την επιλογή μετρήσεων με στόχο την επίτευξή της, ενώ στην αναφορά [131] χρησιμοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος ο οποίος βασίζεται στην αριθμητική επίλυση του μοντέλου DC προκειμένου να καταστήσει ένα σύστημα παρατηρήσιμο μέσω της ακολουθιακής προσθήκης (sequential addition) μετρήσεων – μία ανά ανακύκλωση – στο προϋπάρχον μετρητικό σύνολο το οποίο δεν εξασφάλιζε την παρατηρησιμότητα του συστήματος. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφική μελέτη [151], η σχετική έρευνα ήταν ακόμη σε πρώιμο στάδιο κατά το 1990. Με σημεία αναφοράς τις παραπάνω μεθόδους, έχει δημοσιευτεί πληθώρα από μεταγενέστερες εργασίες, μερικές από τις οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Στην αναφορά [210], προτείνεται μια συστηματική, αριθμητική διαδικασία για την επιλογή μετρήσεων οι οποίες μπορούν να ενισχύσουν την ευρωστία της εκτίμησης κατάστασης ενάντια σε ενδεχόμενες απώλειες μετρήσεων ή διακοπές λειτουργίας κλάδων. Κατόπιν, η βέλτιστη λύση, από πλευράς οικονομικού κόστους, για κάθε ενδεχόμενο προκύπτει με χρήση γραμμικού προγραμματισμού. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί είτε για το σχεδιασμό νέων είτε για την αναβάθμιση υφιστάμενων μετρητικών υποδομών. Μια αριθμητική μέθοδος για την εύρεση του ελάχιστου αριθμού μετρήσεων των οποίων η προσθήκη καθιστά παρατηρήσιμο ένα σύστημα το οποίο αποτελείται, αρχικά, από επιμέρους παρατηρήσιμες νησίδες, προτείνεται και στην αναφορά [211], με αξιοσημείωτη διαφορά ότι, στο πλαίσιο της, οι επιλεγμένες μετρήσεις τοποθετούνται ταυτόχρονα και όχι βαθμιαία. Τέλος, μια ευέλικτη αριθμητική μέθοδος ανάλυσης παρατηρησιμότητας περιγράφεται στην αναφορά [212] έχοντας τη δυνατότητα να υποδεικνύει ποιες υπάρχουσες μετρήσεις πρέπει να αντικατασταθούν ή ποιες νέες πρέπει να προστεθούν στο ήδη διαθέσιμο σύνολο μετρήσεων προκειμένου να αποκατασταθεί η παρατηρησιμότητα του υπό μελέτη συστήματος.

Αρκετές είναι οι εργασίες οι οποίες εξειδικεύονται στη βέλτιστη επιλογή μονάδων RTU με κυριότερη πρακτική τη μοντελοποίησή τους ως επιμέρους διαθέσιμα σύνολα μετρήσεων σε επίπεδο υποσταθμών. Αρχικά, οι εργασίες [213] και [214] στοχεύουν στην εξασφάλιση παρατηρησιμότητας και την ευρωστία

της εκτίμησης κατάστασης ενάντια σε απώλεια τυχαίας μονάδας RTU. Στην εργασία [213], προτείνεται ο βέλτιστος σχεδιασμός μετρητικών υποδομών με μονάδες RTUs στο πλαίσιο ενός γραμμικού εκτιμητή κατάστασης μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας βαθμιαίας αφαίρεσης μονάδων εκκινώντας από το πλήρες (όλοι οι κόμβοι τηλεμετρούνται) και καταλήγοντας στο ελάχιστο μετρητικό σύνολο. Αντιθέτως, η προτεινόμενη μέθοδος της αναφοράς [214] είναι αριθμητική και επιτρέπει τόσο το σχεδιασμό όσο και την ενίσχυση υφιστάμενων υποδομών με μονάδες RTU. Η τοποθέτηση γίνεται σε τρία στάδια και με βαθμιαία προσθήκη μονάδων ώστε το υπό μελέτη σύστημα να γίνει, αν δεν είναι εξαρχής, παρατηρήσιμο και, κατόπιν, να ενισχυθεί η ευρωστία του με περίσσεια μετρήσεων. Επιπλέον, στην αναφορά [215] προτείνεται μια στρατηγική τοποθέτησης μονάδων RTU με στόχο την ευρωστία ενάντια σε απώλεια μετρήσεων στο πλαίσιο ενός γενετικού αλγόριθμου για το βέλτιστο σχεδιασμό ή την ενίσχυση μετρητικών υποδομών με έμφαση στη διατήρηση της ικανότητας του εκτιμητή κατάστασης να εντοπίζει εσφαλμένα δεδομένα. Μια ακόμη σχετική μέθοδος περιγράφεται στην εργασία [216]: βασίζεται σε ένα γενετικό αλγόριθμο για τη ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης η οποία περιλαμβάνει το οικονομικό κόστος των μονάδων RTU, οι οποίες θα συγκροτήσουν την υπό σχεδιασμό μετρητική υποδομή, και εξασφαλίζει ταυτόχρονα την επίλυση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης για διάφορα σενάρια τοπολογικών αλλαγών στο υπό μελέτη σύστημα. Τέλος, με χρήση παρόμοιων αντικειμενικών συναρτήσεων με αυτές της αναφοράς [216], αλλά με στόχο την επίτευξη παρατηρησιμότητας και την ευρωστία ενάντια σε πιθανή απώλεια μονάδας RTU, προτείνονται οι μεθοδολογίες βέλτιστου σχεδιασμού μετρητικών υποδομών στις αναφορές [217] και [218], στις οποίες η επίλυση του προβλήματος γίνεται με χρήση απλού ευρετικού αλγόριθμου και αλγόριθμου αποικίας μυρμηγκιών (ant colony optimization), αντιστοίχως.

Οι ίδιες τάσεις έχουν παρατηρηθεί και για τις μεθόδους βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών, των οποίων η έρευνα αναπτύχθηκε μεταγενέστερα και κορυφώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία, οπότε και δρομολογήθηκε η σταδιακή εγκατάστασή τους στα συστήματα μεταφοράς. Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU (optimal PMU placement) έγκειται, κατά βάση, στην εύρεση του ελάχιστου αριθμού και των σημείων εγκατάστασης μονάδων PMU σε ένα σύστημα προκειμένου αυτό να καταστεί παρατηρήσιμο [219]. Έτσι, ως βασικό κριτήριο της βελτιστοποίησης αναδεικνύεται και πάλι η εξασφάλιση της παρατηρησιμότητας του συστήματος με τη μικρότερη δυνατή οικονομική δαπάνη δεδομένου του υψηλού κόστους των εν λόγω μετρητικών μονάδων.

Η πρώτη σχετική μέθοδος προτείνεται στην αναφορά [220], όπου περιγράφεται ένας αλγόριθμος δυϊκής αναζήτησης προκειμένου να βρεθεί ο ελάχιστος αριθμός εγκαταστάσεων μονάδων PMU για τον οποίο μηδενίζεται ο αριθμός των κόμβων που περιέχει η μικρότερη μη παρατηρήσιμη νησίδα του υπό μελέτη συστήματος, μια συνθήκη η οποία ισοδυναμεί με την επίτευξη τοπολογικής παρατηρησιμότητας. Για την διευκόλυνση του αλγόριθμου, θεωρείται μια αρχική τοποθέτηση μονάδων PMU μέσω μιας διαδικασίας βασισμένης στη θεωρία γράφων. Παράλληλα, συμπεραίνεται ότι, για την επίτευξη παρατηρησιμότητας, αρκεί η εγκατάσταση μονάδων PMU περίπου στο $1/3$ με $1/4$ των κόμβων του υπό μελέτη συστήματος. Αρκετά μεταγενέστερη είναι η αμέσως επόμενη, χρονικά, εργασία [221], όπου εισάγεται ο όρος «βάθος μη παρατηρησιμότητας» (“depth of unobservability”) με σκοπό τη διευκόλυνση της σταδιακής εγκατάστασης μονάδων PMU σε ένα σύστημα μέσω της ικανοποίησης ενός επιθυμητού βάθους μη παρατηρησιμότητας (π.χ. βάθος 1 ισοδυναμεί με μία μη παρατηρήσιμη νησίδα η οποία περιλαμβάνει έναν κόμβο). Χρησιμοποιείται μια μέθοδος βασισμένη στη θεωρία γράφων, η οποία αξιοποιεί το σχηματισμό συνδετικών δέντρων και περιορίζει την απόσταση μεταξύ παρατηρήσιμων και μη παρατηρήσιμων κόμβων εξασφαλίζοντας, με αυτόν τον τρόπο, τη χωρικά ομοιόμορφη κατανομή των

μονάδων PMU στο σύστημα. Έτσι, ο αριθμός των απαιτούμενων μονάδων PMU μειώνεται περαιτέρω σε σύγκριση με τον αντίστοιχο αριθμό για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας.

Επιπλέον, συναντάται ένας μεγάλος αριθμός εργασιών στις οποίες το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών διατυπώνεται με χρήση πρόσθετων περιορισμών αναφορικά με την επίδραση των κόμβων μηδενικής έγχυσης, την επίδραση των προϋπαρχουσών συμβατικών μετρήσεων, ενδεχόμενη απώλεια μίας ή περισσότερων μονάδων PMU και ενδεχόμενη διακοπή λειτουργίας ενός κλάδου [219]. Πολλές από τις σχετικές εργασίες μελετούν συνδυασμούς των ανωτέρω περιορισμών. Για παράδειγμα, συνδυαστικά μελετώνται οι επιδράσεις των κόμβων μηδενικής έγχυσης και των συμβατικών μετρήσεων, οι οποίες ταυτίζονται, εν πολλοίς, με τα μετρητικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από τα συστήματα SCADA. Η εργασία [222] συνιστά μια κλασική μελέτη για την επίτευξη παρατηρησιμότητας μέσω της εγκατάστασης του ελάχιστου αριθμού μονάδων PMU σε ένα σύστημα όπου διατίθενται μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων και συμβατικές μετρήσεις εγχύσεων και ροών ισχύος. Η μέθοδος βασίζεται στον ακέραιο προγραμματισμό (integer programming) και οι περιορισμοί εκφράζονται υπό τη μορφή μιας διανυσματικής συνάρτησης της οποίας κάθε στοιχείο αντιστοιχεί σε έναν κόμβο του υπό μελέτη συστήματος: εκφράζεται συναρτήσει συνεχών μεταβλητών οι οποίες συμβολίζουν την ύπαρξη (τιμή 1) ή μη (τιμή 0) συναφών μετρήσεων, συμβατικών ή PMUs, και λαμβάνει μοναδιαία (μηδενική) τιμή όταν ο κόμβος (δεν) είναι παρατηρήσιμος. Στο ίδιο πλαίσιο κινείται και η εργασία [223], όπου χρησιμοποιούνται εναλλακτικές διατυπώσεις του προβλήματος με βάση τον ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (integer linear programming) προκειμένου να εξασφαλιστεί η ατελής ή πλήρης παρατηρησιμότητα του υπό μελέτη συστήματος (κατά τα πρότυπα της αναφοράς [221]) παρουσία ή μη μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων και συμβατικών μετρήσεων. Όλες οι διατυπώσεις βασίζονται σε περιορισμούς γραμμικής μορφής. Η επίδραση των κόμβων μηδενικής έγχυσης στη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU λαμβάνεται υπόψη και στην αναφορά [224]. Εξετάζονται τρία εναλλακτικά πλαίσια βελτιστοποίησης τα οποία βασίζονται σε διαφορετικές υλοποιήσεις μιας αριθμητικής μεθόδου ανάλυσης παρατηρησιμότητας σε συνδυασμό με τη μετα-ευρετική (meta-heuristic) τεχνική αναζήτησης Tabu (Tabu search). Οι θέσεις εγκατάστασης μονάδων PMU αρχικοποιούνται αυθαίρετα για την εκκίνηση των αλγόριθμων και, μάλιστα, κόμβοι μηδενικής έγχυσης συμπεριλαμβάνονται μόνο στα δύο ει των τριών πλαισίων. Συμπεραίνεται ότι ο ελάχιστος αριθμός μονάδων PMUs που αποδίδει κάθε πλαίσιο, εξαρτάται από την αντίστοιχη αρχικοποίηση.

Η θεώρηση των κόμβων μηδενικής έγχυσης ή/και των συμβατικών μετρήσεων στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU αποτελεί βασικό στοιχείο και για την ανάπτυξη μεθόδων οι οποίες επικεντρώνονται στην ευρωστία ενάντια σε ενδεχόμενη απώλεια μονάδας (ή μονάδων) PMU [225]–[228] ή ενδεχόμενη διακοπή λειτουργίας κλάδου [225]–[229], στην ενίσχυση της ικανότητας του εκτιμητή κατάστασης να ανιχνεύει εσφαλμένα δεδομένα [230] και στη διερεύνηση της επίδρασης του περιορισμένου αριθμού καναλιών (PMU channels) μέτρησης ανά μονάδα PMU [231]. Η εργασία [225] προβαίνει σε βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU σε πολλαπλά στάδια μελετώντας σε κάθε ένα από αυτά δύο δείκτες διερεύνησης της παρατηρησιμότητας – για κάθε κόμβο ξεχωριστά και για το υπό μελέτη σύστημα συνολικά – και μοντελοποιώντας τις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων ως γραμμικούς περιορισμούς. Αποδεικνύεται ότι το τελικό σύνολο-λύση είναι βέλτιστο και ταυτίζεται με αυτό που θα προέκυπτε σε περίπτωση ταυτόχρονης εγκατάστασης όλων των μονάδων PMU. Παρόμοια μοντελοποίηση, σύμφωνη με τις αρχές του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, χρησιμοποιείται και στην αναφορά [226], όπου ως κύριες συνεισφορές αναφέρονται η δυνατότητα επίλυσης του προβλήματος σε περίπτωση ταυτόχρονης απώλειας μετρήσεων και διακοπής λειτουργίας κλάδων και η θεώρηση επιπλέον περιορισμών οι οποίοι σχετίζονται με τη δέσμευση τηλεπικοινωνιακών πόρων για την

εγκατάσταση μονάδων PMU. Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες μεθόδους, στην εργασία [227] το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU μοντελοποιείται στο πλαίσιο του ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (integer quadratic programming), καθώς βασίζεται στην ελαχιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης τετραγωνικής μορφής υποκείμενης σε γραμμικούς περιορισμούς. Στόχος είναι τόσο η επίτευξη τοπολογικής παρατηρησιμότητας με τον ελάχιστο αριθμό εγκαταστάσεων μονάδων PMU όσο και η μεγιστοποίηση της περίσσειας των μετρήσεων. Τέλος, η κύρια συνεισφορά της αναφοράς [228] έγκειται στη χρήση ενός αλγόριθμου σμήνους σωματιδίων – προσαρμοσμένου για προβλήματα βελτιστοποίησης με δυαδικές μεταβλητές (binary particle swarm optimization algorithm) – για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU.

Αξιοσημείωτη είναι η προτεινόμενη μέθοδος διεξοδικής έρευνας (exhaustive search) στο πλαίσιο της εργασίας [229], καθώς αυτή η κλάση μεθόδων εγγυάται την εύρεση ολικού βέλτιστου (global optimum) για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος με δεδομένους τους περιορισμούς που έχουν τεθεί. Έτσι, τα αποτελέσματά της για διάφορα πρότυπα ΣΗΕ μπορούν να αποτελέσουν σημεία αναφοράς για τη σχετική έρευνα. Περιγράφεται, λοιπόν, ένας αλγόριθμος δυαδικής διεξοδικής έρευνας ο οποίος αποδίδει τον ελάχιστο αριθμό εγκαταστάσεων μονάδων PMU για την εξασφάλιση της τοπολογικής παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη συστήματος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας αλλά και σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας ενός κλάδου, παρουσία ή μη μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων. Τέλος, αν προκύψουν πολλαπλά σύνολα λύσεων, προτείνεται ένας απλός αλγόριθμος για την εύρεση του βέλτιστου με κριτήριο την παρεχόμενη περίσσεια μετρήσεων.

Οι εργασίες [230] και [231] βασίζονται στο μαθηματικό μοντέλο της αναφοράς [222] με ουσιαστικές διαφορές μόνο ως προς τη διατύπωση των περιορισμών. Στο πλαίσιο της πρώτης εργασίας, η παρατηρησιμότητα του συστήματος θεωρείται δεδομένη και η μελέτη αφορά τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU, αλλά και συμβατικών μετρήσεων, προκειμένου να είναι ανιχνεύσιμη οποιαδήποτε μέτρηση επιβαρύνεται με εσφαλμένα δεδομένα και, δευτερευόντως, να εξασφαλίζεται η επιθυμητή, τοπική περίσσεια μετρήσεων σε ευάλωτα τμήματα του υπό μελέτη συστήματος. Εξίσου ενδιαφέρον είναι το θέμα της δεύτερης εργασίας όπου διερευνάται η επίδραση των περιορισμένων καναλιών μέτρησης που διαθέτει κάθε μονάδα PMU στην επίτευξη παρατηρησιμότητας, καθώς, εξαιτίας αυτού του περιορισμού, μπορεί να μετρά τους φασιθέτες ρεύματος μόνο για ένα υποσύνολο των κλάδων που πρόσκεινται στον κόμβο όπου είναι εγκατεστημένη. Μάλιστα, συμπεραίνεται ότι η χρησιμοποίηση μονάδων PMU που διαθέτουν πάνω από τέσσερα κανάλια μέτρησης δεν συντελεί στη μείωση του αριθμού των εγκατεστημένων μονάδων, άρα, και του συνολικού κόστους για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας, ανεξάρτητα από το μέγεθος του υπό μελέτη συστήματος.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αναφορές [232]–[234]. Στην αναφορά [232], το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU εξετάζεται υπό το πρίσμα της θεωρίας της πληροφορίας (information theory) με στόχο την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς των ΣΗΕ, γι' αυτό και στην προτεινόμενη μέθοδο υπεισέρχεται και η παράμετρος του χρόνου. Ο ελάχιστος αριθμός και οι θέσεις εγκατάστασης μονάδων PMU καθορίζονται με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του πληροφοριακού περιεχομένου των σημάτων (μετρήσεων) που αυτές καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο σε συνθήκες κανονικής ή έκτακτης λειτουργίας. Έτσι, με βάση υπολογισμών ένα στατιστικό μέτρο της πληροφοριακής εντροπίας (information entropy) του συνόλου των διαθέσιμων σημάτων, κριτήριο για την επίλυση του προβλήματος συνιστά η μεγιστοποίηση της συνολικής απόκρισης των μονάδων και, ταυτόχρονα, η ελαχιστοποίηση της συσχέτισης μεταξύ των σημάτων τους, η οποία ισοδυναμεί με την εξάλειψη πλεονάζοντος πληροφοριακού περιεχομένου. Οι μεταβλητές ενδιαφέροντος για την αποτίμηση

της απόκρισης των εγκατεστημένων μονάδων PMU είναι το μέτρο και η γωνία τάσης, καθώς και η συχνότητα. Ως συμπέρασμα της εργασίας, αναφέρεται ότι ένας άπληστος αλγόριθμος (greedy algorithm) ο οποίος προβλέπει την ακολουθιακή προσθήκη μιας μονάδας PMU ανά βήμα με στόχο τη μέγιστη πληροφοριακή προσθήκη στο ήδη υπάρχον σύνολο εγκατεστημένων μονάδων είναι η πιο αποδοτική, υπολογιστικά, επιλογή για την επίλυση του προβλήματος, ενώ σημειώνεται, επίσης, ότι για την επίτευξη παρατηρησιμότητας ή στατιστικής περισσειας δεδομένων ενδέχεται να χρειάζεται εγκατάσταση επιπλέον μονάδων PMU σε σύγκριση με τις προτεινόμενες.

Μια μεθοδολογία βάσει ακολουθιακών αλγορίθμων ακολουθεί η εργασία [233], η οποία επικεντρώνεται σε ενδεχόμενη απώλεια μιας μέτρησης ή διακοπή λειτουργίας ενός κλάδου. Ως κριτήριο για τη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU θεωρείται ο ελάχιστος δείκτης κατάστασης της κανονικοποιημένης Ιακωβιανής μήτρας για την εκπλήρωση αριθμητικής παρατηρησιμότητας. Μέσω ενός αλγορίθμου ακολουθιακής απαλοιφής, το σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων απομειώνεται μέχρι το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης να γίνει οριακά καθορισμένο, δηλαδή οι αριθμοί των διαθέσιμων μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης να είναι ίσοι. Κατόπιν, για κάθε ενδεχόμενη απώλεια, επιλέγονται οι απαραίτητες μετρήσεις για τη διατήρηση της παρατηρησιμότητας του συστήματος με τη χρήση ενός αλγορίθμου ακολουθιακής προσθήκης. Τέλος, τα βέλτιστα σημεία εγκατάστασης των μονάδων PMU επιλέγονται μέσω γραμμικού προγραμματισμού και, ακολούθως, ο αριθμός τους ελαχιστοποιείται με χρήση ενός ευρετικού αλγορίθμου.

Αναφορικά με την εργασία [234], το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU προσεγγίζεται από πρακτική σκοπιά· δεδομένου ότι οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι στους υποσταθμούς υψηλής και υπερψηλής τάσης (ΥΤ, ΥΥΤ) μπορούν με μικρές τροποποιήσεις να λειτουργούν και ως μονάδες PMU, θεωρείται ότι οι σχετικές δαπάνες αφορούν, στο μεγαλύτερο μέρος τους, στο κόστος εγκατάστασης παρά αγοράς συσκευών PMU. Συνεπώς, το ζητούμενο είναι η εύρεση του ελάχιστου αριθμού υποσταθμών ΥΥΤ ή ΥΤ στους ζυγούς των οποίων απαιτείται να εγκατασταθούν μονάδες PMU για την επίτευξη παρατηρησιμότητας. Η ιδέα αυτή υλοποιείται στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων χρησιμοποιώντας δυαδικές μεταβλητές, ενώ το πρόβλημα υπόκειται και σε περιορισμούς όπως η απ' ευθείας καταγραφή κρίσιμων μετρήσεων, δηλαδή εκείνων των οποίων η απώλεια καθιστά το υπό μελέτη σύστημα μη παρατηρήσιμο [19], ο αποκλεισμός υποψηφιοτήτων υποσταθμών εξαιτίας δυσχερούς τηλεπικοινωνιακής υλοποίησης και η υποχρέωση κάθε ζυγός ενός επιλεγμένου υποσταθμού να φέρει μονάδα PMU.

Όπως και στην περίπτωση των μεθόδων βέλτιστης επιλογής συμβατικών μετρήσεων και μονάδων RTU στα συστήματα μεταφοράς, η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης έρχεται σε δεύτερο πλάνο στο πλαίσιο της αντίστοιχης έρευνας για τις μονάδες PMU. Εξάλλου, ο σχεδιασμός σύγχρονων μετρητικών συστημάτων με χρήση μονάδων PMU εγγυάται, εκ των πραγμάτων, την υψηλή ποιότητα της εκτίμησης κατάστασης, ενώ η περίσσεια και η ακρίβεια των διαθέσιμων συμβατικών μετρήσεων σε υφιστάμενες μετρητικές υποδομές SCADA βρίσκονται σε ικανοποιητικά υψηλό επίπεδο ακόμη και πριν από πιθανή εγκατάσταση μονάδων PMU. Η κύρια διαφορά αυτής της κατηγορίας μεθόδων σε σύγκριση με τις προαναφερόμενες είναι ότι, κατά κανόνα, δεν αποτελεί κριτήριο της βελτιστοποίησης η ελαχιστοποίηση των εγκαταστάσεων μονάδων PMU. Μια από τις πρώτες σχετικές εργασίες είναι η αναφορά [235], όπου περιγράφεται ένας απλός, ευρετικός αλγόριθμος για τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU με στόχο τη μείωση των διασπορών των σφαλμάτων της εκτίμησης κατάστασης και την ενίσχυση της τοπικής περισσειας των μετρητικών δεδομένων. Ο αλγόριθμος βασίζεται στον καταρτισμό λιστών των διαθέσιμων μετρήσεων σε κατάταξη αύξουσας τοπικής περισσειας

και των κόμβων σε κατάταξη αύξουσας διασποράς των σφαλμάτων των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασής τους. Η συνεκτίμηση των δύο λιστών οδηγεί στην επιλογή της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης μονάδας PMU. Σε συνέχεια της ανωτέρω εργασίας, προτείνεται ελαφρώς τροποποιημένος ο ίδιος ευρετικός αλγόριθμος ο οποίος εφαρμόζεται στο πλαίσιο του, επίσης, προτεινόμενου καταναμημένου εκτιμητή κατάστασης στην αναφορά [78]. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος ουσιαστικά καθορίζει το ζυγό αναφοράς σε κάθε υποσύστημα του καταναμημένου εκτιμητή κατάστασης και τοποθετεί μία μονάδα PMU σε αυτόν.

Με την εργασία [236], έρχεται στο προσκήνιο, για πρώτη φορά, η χρήση του βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού ως θεμέλιου για τη διατύπωση του προβλήματος της βέλτιστης επιλογής μονάδων μέτρησης φασιθετών με αποκλειστικό στόχο τη μεγιστοποίηση της ακριβείας της εκτίμησης κατάστασης. Ως κριτήρια χρησιμοποιούνται τρεις διαφορετικοί στατιστικοί δείκτες οι οποίοι υπολογίζονται με βάση τη μήτρα συνδιακύμανσης του στατικού μοντέλου WLS, $\mathbf{C}(\mathbf{x})$: πρόκειται για τα κριτήρια A, D και E για τα οποία θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια. Για τους σκοπούς της μελέτης, χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο DC. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος, το οποίο ανήκει στη συνδυαστική βελτιστοποίηση (combinatorial optimization), κρίνεται ασύμφορη η ακριβής επίλυσή του, δηλαδή η εύρεση της βέλτιστης (optimal) λύσης, και, συνεπώς, αναπτύσσεται ένας άπληστος αλγόριθμος ο οποίος αποδίδει μη βέλτιστες (suboptimal), μεν, ποιοτικές, δε, λύσεις. Η ποιότητα των παρεχόμενων λύσεων είναι, συνήθως, εγγυημένη τουλάχιστον για τα κριτήρια A και D, καθώς, δεδομένων κατάλληλων παραδοχών οι οποίες ισχύουν για τυπικά ΣΗΕ, οι αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις ανήκουν στην οικογένεια των υπομετρικών συνολοσυναρτήσεων (submodular set functions), δηλαδή η αύξηση της τιμής τους που προκαλείται λόγω της προσθήκης μιας διακριτής μονάδας στο σύνολο εισόδου τους βαίνει μειούμενη καθώς το μέγεθος του συνόλου αυξάνεται. Μάλιστα, αναφέρεται ότι, στην περίπτωση του κριτηρίου A, ο προτεινόμενος αλγόριθμος φθάνει τουλάχιστο στο 63% της βέλτιστης μείωσης της διασποράς του συνολικού σφάλματος της εκτίμησης κατάστασης η οποία μπορεί να επιτευχθεί για ένα δεδομένο αριθμό εγκαταστάσεων μονάδων PMU. Τέλος, υποστηρίζεται, χωρίς ανάγκη επανυπολογισμών, η βαθμιαία επέκταση του συνόλου των εγκατεστημένων μονάδων PMU μέσω της προσθήκης μιας μονάδας ανά αλγοριθμική εκτέλεση, καθώς το σύνολο-λύση για k εγκαταστάσεις μονάδων PMU είναι γνήσιο υποσύνολο της λύσης για αριθμό $k + 1$.

Με την ίδια θεωρητική θεμελίωση, αλλά με εντελώς διαφορετική προσέγγιση ως προς τις τελικές διατυπώσεις του προβλήματος ανά κριτήριο και τις αντίστοιχες μεθόδους επίλυσης, εξετάζει τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU με κριτήριο την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης η αναφορά [237]. Έτσι, το πρόβλημα διατυπώνεται στη γενική του μορφή μέσω της ελαχιστοποίησης μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία διαφοροποιείται αναλόγως του κριτηρίου που χρησιμοποιείται (A, D, E και M), υποκείμενης σε γραμμικό περιορισμό σύμφωνα με έναν προκαθορισμένο αριθμό εγκαταστάσεων μονάδων PMU και με χρήση δυαδικών μεταβλητών, καθεμιά από τις οποίες σηματοδοτεί την εγκατάσταση (τιμή 1) ή μη (τιμή 0) μιας, υποψήφιας προς τοποθέτηση, μονάδας PMU. Προκειμένου να διευκολυνθεί η επίλυση του προβλήματος, γίνεται χαλάρωση (relaxation) του αυστηρού περιορισμού της δυαδικότητας των μεταβλητών, οι οποίες μετατρέπονται σε συνεχείς με διάστημα τιμών $[0, 1]$. Έτσι, προκύπτει ένα, λιγότερο πολύπλοκο, πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού το οποίο, όμως, οδηγεί σε μη βέλτιστες λύσεις. Με βάση τη χαλαρή διατύπωση του γενικού προβλήματος, η μελέτη εξειδικεύεται στα επιμέρους κριτήρια: τα κριτήρια A, E και M μετατρέπονται σε προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού, καθώς οι αντίστοιχες αντικειμενικές συναρτήσεις αποκτούν γραμμική μορφή και οι περιορισμοί εκφράζονται υπό τη μορφή γραμμικών ανισοτήτων μητρών (linear matrix

inequality – LMI), ενώ το κριτήριο D επιλύεται ως σύνηθες πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού. Για τη επίλυση των τεσσάρων προβλημάτων, πέραν από καθιερωμένα λογισμικά επίλυσης (solvers), χρησιμοποιείται ένας απλός, επαναληπτικός αλγόριθμος με βάση το κριτήριο της πρώτης παραγώγου (first-order condition). Δεν πρέπει να παραλειφθεί ότι, εφόσον οι μεταβλητές λαμβάνουν συνεχείς τιμές, είναι πιθανό να μην υποδεικνύεται ξεκάθαρα η βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU. Γι' αυτό το λόγο, υιοθετείται η εξής απλή λύση: για επιλογή k μονάδων PMU, οι k πρώτες μεταβλητές σε φθίνουσα σειρά τιμών λαμβάνουν μοναδιαία τιμή και οι αντίστοιχες μονάδες PMU επιλέγονται για εγκατάσταση. Τέλος, η συμπερίληψη των μετρήσεων φασιθετών ρεύματος κλάδων, τις οποίες προσφέρουν οι μονάδες PMU, στη μελέτη της μεγιστοποίησης της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης συνιστά αξιόλογη βελτίωση σε σχέση με την εργασία [236], όπου η επίδραση τους αγνοείται.

Όπως στις αναφορές [236] και [237], η παρατηρησιμότητα θεωρείται εξασφαλισμένη με βάση τις προϋπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις και στην αναφορά [238], της οποίας η κύρια συνεισφορά έγκειται στη διερεύνηση της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU στο πλαίσιο ενός υβριδικού εκτιμητή κατάστασης, ο οποίος χρησιμοποιεί τόσο συμβατικές όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις όπως π.χ. στις σχετικές εργασίες [71], [138], [140]. Πρόκειται για ένα μη γραμμικό εκτιμητή κατάστασης στο πλαίσιο του οποίου οι μετρήσεις φασιθετών ρεύματος μετατρέπονται σε ψευδομετρήσεις ροών ισχύος και οι μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων λαμβάνουν τη μορφή περιορισμών. Η βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού με δυαδικές μεταβλητές το οποίο επιλύεται μέσω ενός επαναληπτικού ευρετικού αλγόριθμου. Σε κάθε ανακύκλωση, εγκαθίσταται μια μονάδα PMU στον κόμβο ο οποίος υπολογίζεται ότι εμφανίζει τη μέγιστη συνολική διασπορά σφάλματος εκτίμησης κατάστασης, η οποία υπολογίζεται ως το άθροισμα των διασπορών του ίδιου του κόμβου και των γειτονικών σε αυτόν κόμβων, χωρίς να αγνοείται η συνδιακύμανση των μεταβλητών κατάστασης των κόμβων. Ο αλγόριθμος τερματίζεται όταν η διασπορά του συνολικού σφάλματος της εκτίμησης κατάστασης δεν υπερβαίνει μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου.

Τέλος, η εργασία [239] εμβαθύνει στην ανάλυση της μήτρας συνδιακύμανσης του στατικού μοντέλου WLS με στόχο την ανάπτυξη ενός ευρετικού αλγόριθμου για τη βέλτιστη επιλογή ενός προκαθορισμένου αριθμού μονάδων PMU με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της μέσης διασποράς των σφαλμάτων εκτίμησης των μεταβλητών κατάστασης σε ένα, εξαρχής παρατηρήσιμο, σύστημα. Η μέθοδος θεμελιώνεται στη μελέτη του ελλειψοειδούς εμπιστοσύνης του σφάλματος εκτίμησης κατάστασης (confidence ellipsoid of state estimation error), το οποίο, για $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, είναι ένα n – διάστατο ελλειψοειδές με κέντρο την εκάστοτε εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}$ του διανύσματος \mathbf{x} και περιλαμβάνει το σφάλμα $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ με ένα επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης (η έννοια θα μελετηθεί εκτενώς σε επόμενη υποενότητα). Με κριτήριο βελτιστοποίησης την ελαχιστοποίηση του όγκου του ελλειψοειδούς, του οποίου η τιμή είναι άνω φραγμένη από τη μέγιστη ιδιοτιμή της μήτρας συνδιακύμανσης, ποσοτικοποιείται η επίδραση του σφάλματος εκτίμησης κάθε μεταβλητής κατάστασης ξεχωριστά στη μέγιστη ιδιοτιμή μέσω της χρήσης των λεγόμενων συντελεστών συμμετοχής (participation factors), ενώ διερευνάται και η συνεισφορά των μη διαγώνιων στοιχείων της μήτρας συνδιακύμανσης. Έτσι, σε κάθε ανακύκλωσή του, ο ευρετικός αλγόριθμος ουσιαστικά εντοπίζει τον κόμβο που σχετίζεται με τον υψηλότερο συντελεστή συμμετοχής αναφορικά με τη μέγιστη ιδιοτιμή και τοποθετεί μια μονάδα PMU σε αυτόν. Οι ανακυκλώσεις τερματίζονται όταν εγκατασταθεί ο προκαθορισμένος αριθμός μονάδων PMU.

4.1.2 Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα δίκτυα διανομής

Η προσέγγιση του προβλήματος στην περίπτωση των δικτύων διανομής είναι εντελώς διαφορετική, υπό την έννοια της ιεράρχησης των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 2, είναι πρακτικά αδύνατο ένα τυπικό δίκτυο διανομής να καταστεί παρατηρήσιμο με βάση την αποκλειστική χρήση μετρήσεων πραγματικού ή σχεδόν πραγματικού χρόνου, καθώς, έτσι, θα απαιτείτο εγκατάσταση μετρητικών μονάδων σε έναν τεράστιο αριθμό κόμβων. Η επίτευξη της παρατηρησιμότητας επαφίεται στη χρήση ψευδομετρήσεων, με αποτέλεσμα η πρώτη να μην αποτελεί κριτήριο προτεραιότητας για την επίλυση του προβλήματος. Δεδομένου, μάλιστα, ότι η εκτίμηση κατάστασης σε ένα δίκτυο διανομής, κατά τη συνηθέστερη περίπτωση, περιλαμβάνει τη χρήση περιορισμένου αριθμού πραγματικών μετρήσεων, η τοποθέτηση των τελευταίων με βέλτιστο τρόπο, λαμβάνοντας υπόψη και τις προϋπάρχουσες ψευδομετρήσεις και εικονικές μετρήσεις, αποκτά μείζονα σημασία αναφορικά με τη βελτίωση της ποιότητας της εκτίμησης κατάστασης [240]. Από τη μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας, επιβεβαιώνεται ότι η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης συνιστά το βασικό κριτήριο για τη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στα δίκτυα διανομής. Αξίζει να επισημανθεί ότι, εν αντιθέσει με τα συστήματα μεταφοράς όπου η επιλογή μετρητικών μονάδων συνδέεται ευθέως με τις μονάδες RTU και PMU, στα δίκτυα διανομής το πρόβλημα ανάγεται, στην πλειονότητα των εργασιών, στη βέλτιστη επιλογή μετρήσεων ή μετρητών, ενός γενικού όρου που ισοδυναμεί με το σύνολο μετρήσεων που καταγράφει μία μετρητική μονάδα.

Σχεδόν ταυτόχρονα δημοσιεύτηκαν οι δύο πρώτες σχετικές εργασίες [87] και [241]. Στην πρώτη εργασία, η ακρίβεια του προτεινόμενου τριφασικού μοντέλου εκτίμησης κατάστασης ενισχύεται μέσω της σταδιακής προσθήκης μετρήσεων ροών ενεργού και αέργου ισχύος στο υπό μελέτη δίκτυο χωρίς κάποια καθορισμένη αλγοριθμική διαδικασία, ενώ η προσθήκη μετρήσεων μέτρων τάσης στο τελικό σενάριο προσομοίωσης αναδεικνύεται ως μια σαφώς πιο οικονομική λύση η οποία μειώνει περισσότερο τις διασπορές των σφαλμάτων εκτίμησης των μέτρων τάσεων των κόμβων και, ταυτόχρονα, διατηρεί καλό επίπεδο ακρίβειας ως προς την εκτίμηση των διαθέσιμων μετρήσεων. Η δεύτερη εργασία επικεντρώνεται εξ' ολοκλήρου στην επιλογή μετρήσεων σε τριφασικά μοντέλα κύριων γραμμών διανομής, προτείνοντας μια ευρετική μέθοδο η οποία βασίζεται σε κανόνες (rule-based method). Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η παραδοχή ότι δεν είναι εξίσου σημαντικά όλα τα προς εκτίμηση ηλεκτρικά μεγέθη ενός δικτύου, άρα, οι αντίστοιχες ακρίβειες εκτίμησής τους μπορούν να ιεραρχηθούν αναλόγως. Για παράδειγμα, η ακριβής εκτίμηση του φορτίου ενός κόμβου δεν είναι εξίσου σημαντική με μια αντίστοιχα καλή εκτίμηση της ροής ισχύος διαμέσου ενός διακοπτικού μέσου. Με αυτό το σκεπτικό, για το σχεδιασμό της μετρητικής υποδομής προέχει η εγκατάσταση μετρητών στον κεντρικό διακόπτη της κύριας γραμμής διανομής και τις θέσεις των μέσων προστασίας (π.χ. ασφάλειες). Σε επόμενο στάδιο, εγκαθίστανται μετρητές φορτίου με τέτοιο τρόπο ώστε η μετρητική υποδομή να διαχωρίζει το δίκτυο σε επιμέρους ζώνες, ίσου συνολικού φορτίου η καθεμία. Επιπλέον μετρητές τοποθετούνται σε διακόπτες γραμμών διασύνδεσης, οι οποίοι είναι κανονικά ανοιχτοί (normally open tie-line switches) και των οποίων ο χειρισμός επιφέρει τοπολογικές αλλαγές στο δίκτυο. Τέλος, το σύνολο των μετρήσεων, το οποίο έχει προκύψει, απομειώνεται με κριτήριο την τήρηση ενός προκαθορισμένου ορίου για το άθροισμα των διασπορών των σφαλμάτων εκτίμησης των διαθέσιμων μετρήσεων.

Στην οικογένεια των ευρετικών μεθόδων ανήκουν και οι προτάσεις των μεταγενέστερων αναφορών [89], [242] και [243]. Πιο συγκεκριμένα, η αναφορά [89], κατά το πρότυπο της εργασίας [87], περιλαμβάνει τη στοχευμένη τοποθέτηση μετρήσεων κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου τριφασικού μοντέλου εκτίμησης κατάστασης σε πρότυπα δίκτυα διανομής προκειμένου να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στην

ποιότητα των αποτελεσμάτων. Δεδομένου ότι ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται τα μέτρα και οι γωνίες των ρευμάτων των κλάδων, συμπεραίνεται ότι η ακρίβεια των παρεχόμενων εκτιμήσεων – τόσο των μεταβλητών κατάστασης όσο και των διαθέσιμων μετρήσεων – ενισχύεται όταν: 1) οι μετρήσεις ρευμάτων και ροών ισχύος τοποθετούνται στα ανάντη τμήματα και, ειδικότερα, στην κορυφή της κύριας γραμμής διανομής του υπό μελέτη δικτύου, 2) οι μετρήσεις μέτρων τάσης τοποθετούνται στα κατάντη τμήματα του και 3) οι μετρητές είναι χωρικά διεσπαρμένοι σε όλη την έκταση του. Αντιθέτως, η ευρετική τεχνική της εργασίας [242] στοχεύει αποκλειστικά στην επιλογή ενός προκαθορισμένου αριθμού μετρήσεων μέτρων τάσης προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι διακυμάνσεις των εκτιμώμενων μέτρων τάσης όσων κόμβων δε φέρουν μετρητικό εξοπλισμό σε δίκτυα με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Με την υπόθεση μιας αρχικής μετρητικής υποδομής, ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει μια αλληλουχία εκτελέσεων ανάλυσης ροών φορτίου θεωρώντας σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τα φορτία των κόμβων ανά εκτέλεση προκειμένου να εντοπίσει τους κόμβους οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις μέτρου τάσης και να επανατοποθετήσει κατάλληλα μετρήσεις ώστε αυτές οι διακυμάνσεις να ελαχιστοποιηθούν. Με αυτό τον τρόπο, περιορίζεται η πιθανότητα εκδήλωσης υπερβάσεων ορίων τάσης και μπορεί να αυξηθεί η διεσπαρμένη παραγωγή. Με τον ίδιο ακριβώς στόχο, στην αναφορά [243] πραγματοποιείται μια εκτενής διερεύνηση για τον τρόπο με τον οποίον επιδρούν στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης οι θέσεις και οι ακρίβειες μετρήσεων μέτρων τάσης, ροών ενεργού ισχύος και ψευδομετρήσεων οι οποίες προστίθενται σε μία υφιστάμενη μετρητική υποδομή. Αναδεικνύοντας τα μέτρα τάσης των κόμβων ως τις πιο σημαντικές υπό εκτίμηση μεταβλητές, η εμπειρική αυτή μελέτη υπογραμμίζει τη σημασία να επιλεγούν βέλτιστα οι θέσεις και οι ακρίβειες των μετρήσεων μέτρων τάσης, ενώ επισημαίνεται η ευνοϊκή επίδραση των μετρήσεων ροών ενεργού ισχύος όταν τοποθετούνται ψηλά στην κύρια γραμμή διανομής και της ακρίβειας των ψευδομετρήσεων – με άλλα λόγια, της μεθόδου εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου που χρησιμοποιείται – σε συνθήκες υψηλής φόρτισης του υπό μελέτη δικτύου.

Με σημείο καμπής την αναφορά [240], οι περισσότερες μεταγενέστερες εργασίες τείνουν σε πιο συστηματικές προσεγγίσεις του προβλήματος, παγιωμένες σε αυστηρά μαθηματικά εργαλεία. Σε αντιδιαστολή με τις εργασίες [242] και [243], η μέθοδος της αναφοράς [240] επιδιώκει την ελαχιστοποίηση των διασπορών των σφαλμάτων εκτίμησης τόσο των μέτρων όσο και των γωνιών τάσης των κόμβων του υπό μελέτη δικτύου. Η μέθοδος βασίζεται στη συσχέτιση της ελαχιστοποίησης του όγκου του ελλειψοειδούς εκτίμησης με έναν πιθανοτικό δείκτη (probability index) αναφορικά με τη δέσμευση όλα τα σχετικά σφάλματα εκτίμησης των μέτρων και των γωνιών τάσης των κόμβων να μην υπερβαίνουν κάποιες προκαθορισμένες τιμές κατωφλίου. Οι τιμές αυτές ρυθμίζονται μέσω της εφαρμογής σειράς προσομοιώσεων Monte Carlo προκειμένου να εξαχθούν οι μέσες τιμές των σχετικών σφαλμάτων εκτίμησης κατάστασης. Ο δείκτης βελτιώνεται σταδιακά μέσω ενός αλγόριθμου ακολουθιακής προσθήκης μετρήσεων, ο οποίος τοποθετεί μετρήσεις μέτρων τάσης με γνώμονα τη μελέτη των δισδιάστατων ελλειψοειδών τα οποία ποσοτικοποιούν τόσο την ακρίβεια με την οποία εκτιμώνται οι φασιθέτες των τάσεων των κόμβων όσο και την επίδραση της τοποθέτησης μιας μέτρησης στον αντίστοιχο κόμβο όσον αφορά τη συνολική ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει και την τοποθέτηση μετρήσεων ζευγών ροών ενεργού και αέργου ισχύος με όμοιο τρόπο, ούτως ώστε να βελτιωθεί η εκτίμηση των γωνιών τάσης των κόμβων όπου παρατηρείται δυσκολία μείωσης των αντίστοιχων σχετικών σφαλμάτων. Ουσιαστικά, σε κάθε ανακύκλωση, τοποθετείται μια μέτρηση στον κόμβο ή/και στον κλάδο που εμφανίζει το μέγιστο εμβαδό ελλειψοειδούς έως ότου δεν παρατηρείται καμία υπέρβαση κατά την αποτίμηση του πιθανοτικού δείκτη. Διευκρινίζεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος συνιστά περισσότερο μια μελέτη εφικτότητας (feasibility study) παρά βελτιστοποίησης, ενώ η τιμή του

πιθανοτικού δείκτη δεν υπολογίζεται ευθέως παρά μόνον εκτιμάται. Άρα, οι παρεχόμενες λύσεις είναι μη βέλτιστες.

Βελτίωση της προαναφερθείσας μεθόδου επιτυγχάνεται στο πλαίσιο της αναφοράς [244], όπου διατυπώνεται ένα πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης (stochastic optimization) με βάση τη μελέτη του ίδιου πιθανοτικού δείκτη ο οποίος, πλέον, υπολογίζεται ευθέως. Η προτεινόμενη προσέγγιση υποστηρίζει την ταυτόχρονη τοποθέτηση ενός προκαθορισμένου αριθμού μετρητών με στόχο τη μεγιστοποίηση του δείκτη, ο οποίος ισούται με την ελάχιστη από τις επιμέρους πιθανότητες τα σχετικά σφάλματα εκτίμησης των μεταβλητών κατάστασης των κόμβων να είναι μικρότερα από κάποια, κοινά προκαθορισμένα όρια. Τα όρια αυτά καθορίζονται και πάλι μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Το ανωτέρω πρόβλημα επιλύεται προσεγγιστικά μέσω ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης διατακτικής διαχωρισιμότητας (ordinal optimization), στο πλαίσιο του οποίου ο χώρος αναζήτησης λύσεων απομειώνεται και η αρχική αποτίμηση των υποψήφιων συνόλων-λύσεων βασίζεται σε μία τροποποιημένη, απλούστερη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης με στόχο τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου. Ωστόσο, δε σημειώνεται σημαντική έκπτωση ως προς την ποιότητα των αποτελεσμάτων, αφού σε τελικό στάδιο η αποτίμηση των συνόλων-λύσεων γίνεται με βάση την επακριβή αντικειμενική συνάρτηση. Οι παρεχόμενες λύσεις εξακολουθούν να είναι μη βέλτιστες, αλλά, σε κάθε περίπτωση, είναι ανώτερες ποιοτικά από τις αντίστοιχες της αναφοράς [240], καθώς πληρούνται τα ίδια επίπεδα ακριβείας με την επιλογή μικρότερου αριθμού μετρητών.

Με παρόμοιο τρόπο τίθεται το πρόβλημα και στην αναφορά [245], όπου καθορίζεται ο ελάχιστος αριθμός μετρητικών μονάδων πολλαπλών καναλιών – όρος που υπαινίσσεται τη χρήση μονάδων PMU – για την εξασφάλιση κάποιων προκαθορισμένων ορίων ακριβείας της εκτίμησης κατάστασης κατά τα πρότυπα της αναφοράς [206]. Το πρόβλημα επιλύεται με χρήση ενός αλγόριθμου δυναμικού προγραμματισμού (dynamic programming) στο πλαίσιο του οποίου εγχαθίστανται βήμα-βήμα νέοι μετρητές έως την εκπλήρωση των ορίων ακριβείας. Κατόπιν, η μετρητική υποδομή, που προέκυψε από τον αλγόριθμο, αξιολογείται μέσω εκτενών προσομοιώσεων Monte Carlo για ένα ευρύ σύνολο λειτουργικών καταστάσεων του υπό μελέτη δικτύου λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που χαρακτηρίζουν τις ψευδομετρήσεις φορτίου, τις μετρητικές μονάδες και τις παραμέτρους των γραμμών διανομής, καθώς και την παρουσία μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Αν τα όρια ακριβείας τηρούνται σε κάθε περίπτωση, η λύση στο πρόβλημα θεωρείται βέλτιστη.

Η μέθοδος της εργασίας [245] συστηματοποιείται περαιτέρω στην αναφορά [246]. Το πρόβλημα συγκεκριμενοποιείται στη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU και έξυπνων μετρητών. Ελαχιστοποιείται μια γραμμική αντικειμενική συνάρτηση η οποία είναι το άθροισμα του κόστους των υπό τοποθέτηση μετρητικών μονάδων και των επιμέρους συνολικών σχετικών σφαλμάτων εκτίμησης των μέτρων και των γωνιών τάσης των κόμβων για διαφορετικές τοπολογίες του υπό μελέτη δικτύου, ενώ υπόκειται σε περιορισμούς αναφορικά με τις μέγιστες αποδεκτές τιμές των σχετικών σφαλμάτων. Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος, ενώ προβλέπεται και πάλι η διεξαγωγή προσομοιώσεων Monte Carlo για την εξαγωγή των ορίων ακριβείας προκειμένου αυτά να πληρούνται σε περίπτωση τοπολογικών αλλαγών, καθώς και αβεβαιοτήτων παρόμοιας φύσης με αυτές της αναφοράς [245]. Βελτιώσεις των αναφορών [245] και [246] συνιστούν οι εργασίες των ίδιων συγγραφέων [247] και [248], αντιστοίχως. Στην εργασία [247], δίνεται έμφαση στην ευρωστία των συνόλων-λύσεων ενάντια σε ενδεχόμενη ανακρίβεια μίας μέτρησης, π.χ. εξαιτίας σφάλματος μετάδοσης ή δυσλειτουργίας μίας μετρητικής μονάδας, ενώ, στην εργασία [248], ενάντια σε ενδεχόμενη απώλεια μίας μετρητικής μονάδας.

Σε προσομοιώσεις Monte Carlo βασίζεται και η πιθανοτική τεχνική επιλογής μετρήσεων στο πλαίσιο της αναφοράς [249]. Αποσκοπεί στην εύρεση του ελάχιστου αριθμού τηλεμετρούμενων σημείων σύνδεσης ΜΤ στο υπό μελέτη δίκτυο (MV points of connection), δηλαδή, πρακτικά, των κόμβων που φέρουν μετασχηματιστή διανομής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν, με σειρά προτεραιότητας, οι διασπορές των σφαλμάτων εκτίμησης των φασιθετών της πτώσης τάσης επί των κλάδων και των διαθέσιμων ροών ισχύος. Οι μετρήσεις προστίθενται ακολουθιακά κατά ομάδες στο πλαίσιο ενός απλού αλγόριθμου, ο οποίος περιλαμβάνει προσομοιώσεις Monte Carlo για την διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων λειτουργίας του και τερματίζεται όταν τα επιθυμητά όρια ακρίβειας ικανοποιηθούν. Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η αναφορά [250], όπου, εκκινώντας από το κριτήριο της αναφοράς [206], διατυπώνεται ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού με χρήση ακέραιων μεταβλητών προκειμένου να τοποθετηθεί βέλτιστα ο μέγιστος επιτρεπτός, βάσει προκαθορισμένου κόστους, αριθμός μετρητικών μονάδων – χρησιμοποιείται ο όρος αισθητήρες – προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το ίχνος (trace) της αντιστρόφου της μήτρας συνδιακύμανσης των εκτιμήσεων όλων των διαθέσιμων μετρήσεων. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της διατύπωσής του, το πρόβλημα επιλύεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους: με την εφαρμογή δύο διαφορετικών άπληστων αλγόριθμων στο αρχικό πρόβλημα και μέσω της τροποποίησής του σε πρόβλημα ημιορισμένου προγραμματισμού.

Αξιόλογη είναι η συμβολή της εργασίας [199], η οποία μελετά το πρόβλημα υπό το πρίσμα της πληροφορίας του Fisher – προς τιμήν του Ronald Fisher ο οποίος διατύπωσε τις αρχές της – καθώς συνιστά ένα στατιστικό εργαλείο για τη μελέτη της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας. Έτσι, το σύνθημα πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής ενός προκαθορισμένου αριθμού μετρητικών μονάδων (μονάδων PMU ή μετρήσεων μέτρων τάσης) με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της συνολικής διασποράς του σφάλματος εκτίμησης κατάστασης λαμβάνει μια διατύπωση γενικής μορφής: ελαχιστοποιείται το ίχνος της αντιστρόφου της μήτρας πληροφορίας του Fisher (Fisher information matrix) η οποία ποσοτικοποιεί το πληροφοριακό περιεχόμενο που φέρει το σύνολο των παρατηρήσεων ενός πειράματος (διαθέσιμων μετρήσεων) με στόχο την εκτίμηση των αγνώστων παραμέτρων (μεταβλητών κατάστασης) ενός συστήματος (δικτύου διανομής). Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται η μεγιστοποίηση μιας υπομετρικής συνολοσυνάρτησης η οποία ισούται με τη μείωση που υφίσταται το ίχνος της αντιστρόφου της μήτρας πληροφορίας του Fisher της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής λόγω της προσθήκης των επιπλέον μετρητικών μονάδων, των οποίων ο αριθμός υπόκειται σε περιορισμό. Όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη ενότητα, η μήτρα πληροφορίας του Fisher ταυτίζεται με τη μήτρα κέρδους του στατιστικού μοντέλου WLS. Το πρόβλημα, στην αρχική του μορφή, επιλύεται με τη χρήση ενός άπληστου αλγόριθμου. Κατόπιν, τροποποιείται προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη και τοπολογικές αλλαγές του υπό μελέτη δικτύου και επιλύεται με τη χρήση ενός αλγόριθμου υπομετρικής βελτιστοποίησης (submodular optimization). Σε κάθε περίπτωση, τα παρεχόμενα σύνολα-λύσεις είναι μη-βέλτιστα με εγγυημένα, ωστόσο, απόσταση από τα αντίστοιχα βέλτιστα.

Μια διαφορετική προσέγγιση η οποία περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των διαθέσιμων μετρήσεων και των σφαλμάτων εκτίμησης κατάστασης ως ισοδύναμων στοιχείων κυκλώματος (εγκάρσιων ή εν σειρά αγωγιμότητων), προτείνεται στην αναφορά [251]. Αρχικά, αντί της μήτρας συνδιακύμανσης $\mathbf{C}(\mathbf{x})$, της οποίας η συμπεριληψη στη διατύπωση του προβλήματος δυσχεραίνει την επίλυσή του, στην προτεινόμενη διατύπωση περιλαμβάνεται αποκλειστικά η μήτρα κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$. Στη συνέχεια, τα σφάλματα εκτίμησης κατάστασης περιγράφονται ως αντιστάσεις προς γη, ενώ οι μετρήσεις μέτρων τάσης, ρεύματος και ροών ισχύος αποδεικνύεται ότι μπορούν να αναπαρασταθούν ως εγκάρσιες και εν σειρά αγωγιμότητες, αντιστοίχως. Σε αυτό πλαίσιο, το μη γραμμικό πρόβλημα βέλτιστης προσθήκης μετρητικών μονάδων (εν προκειμένω, μετρήσεων μέτρων τάσης και ρεύματος) μετατρέπεται σε ένα

γραμμικό πρόβλημα επέκτασης του μοντέλου του υπό μελέτη δικτύου και επιλύεται στο πλαίσιο του μεικτού αέριου προγραμματισμού (mixed integer linear programming), καθώς επιβάλλονται περιορισμοί αναφορικά με τον αριθμό και το κόστος των υπό εγκατάσταση μετρητικών μονάδων. Η μέθοδος αναφέρεται ότι επιτυγχάνει την εύρεση ολικού βέλτιστου.

Τέλος, αξιολογία επιμέρους χαρακτηριστικά εμφανίζουν οι αναφορές [252]–[254]. Στην αναφορά [252], το σύνολο όλων των πιθανών συνδυασμών των υπό τοποθέτηση μετρητών φιλτράρεται μέσω της ανάλυσης της μήτρας κέρδους σε ιδιάζουσες τιμές (singular-value factorization): αποδεικνύεται ότι όσο μικρότερη είναι η μέγιστη ιδιάζουσα τιμή της μήτρας κέρδους, τόσο μικρότερα είναι τα υπόλοιπα των μετρήσεων ανά ανακύκλωση και ακριβέστερη είναι η σύγκλιση της εκτίμησης κατάστασης. Έτσι, προάγονται μόνο οι συνδυασμοί εκείνοι που αποδίδουν τις μήτρες κέρδους με τις μικρότερες μέγιστες ιδιοτιμές. Μία πολυκριτηριακή προσέγγιση του προβλήματος προτείνεται στην αναφορά [253], όπου εφαρμόζεται η διαδικασία της αναλυτικής ιεράρχησης (analytical hierarchy process) για τη βέλτιστη επιλογή μονάδων εξοπλισμού με δυνατότητα τηλεμέτρησης λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης, το κόστος του εξοπλισμού, την ευστάθεια τάσης, την αξιοπιστία της παροχής και τις απώλειες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μονάδες μπορεί να συμπεριλαμβάνονται διακοπτικά μέσα, ρυθμιστές τάσης, διατάξεις πυκνωτών κ.α. Τέλος, μια πολύπλευρη διερεύνηση της επίδρασης της τοποθέτησης μετρήσεων σε όλες τις επιμέρους λειτουργίες ενός εκτιμητή κατάστασης για δίκτυα διανομής, διεξάγεται στο πλαίσιο της αναφοράς [254], ενώ διατυπώνονται και κάποιοι ευρετικοί κανόνες για την επιλογή μετρήσεων με στόχο την ενίσχυση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης και της ικανότητας του εκτιμητή κατάστασης να εντοπίζει εσφαλμένα δεδομένα.

4.2 Το Πρόβλημα της Βέλτιστης Επιλογής Αισθητήρων σε Υποδομές Εποπτείας και Ελέγχου

Η βέλτιστη επιλογή αισθητήρων (optimal sensor selection) στο πλαίσιο του σχεδιασμού υποδομών εποπτείας και ελέγχου αποτελεί ένα κλασικό πρόβλημα της θεωρίας εκτίμησης με εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και τεχνολογικών πεδίων [255]–[257]. Μολονότι οι πρώτες μέθοδοι για την επίλυση του δημοσιεύτηκαν κατά τη δεκαετία του 1970, η σχετική έρευνα διατηρεί τη δυναμική της καθώς οι απαιτήσεις για την ποιότητα εκτίμησης της κατάστασης και των παραμέτρων των εποπτευόμενων συστημάτων και για τους πόρους που δεσμεύονται (ενέργεια, υπολογιστική ισχύς, εύρος ζώνης συχνοτήτων) με στόχο την πρόσβαση σε μετρητικά δεδομένα πραγματικού χρόνου, βαίνουν αυξανόμενες. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες παρέχουν πληροφορίες υπό τη μορφή μετρητικών δεδομένων, το πρόβλημα ουσιαστικά έγκειται στη μεγιστοποίηση του πληροφοριακού περιεχομένου των μετρήσεων αυτών υπό περιορισμούς αναφορικά με την ποσότητα των δεσμευόμενων πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, η λήψη αποφάσεων για τη χωρική κατανομή των αισθητήρων αποτελεί την κύρια διαδικασία καθορισμού των απαραίτητων πόρων. Συνεπώς, η βέλτιστη επιλογή αισθητήρων συνίσταται στην επιλογή του ελάχιστου ή ενός προκαθορισμένου αριθμού αισθητήρων σε χωρικό σχηματισμό τέτοιο ώστε να πληροúται το κριτήριο της μεγιστοποίησης της πληροφορίας.

Γενικά, αναλόγως με τον τρόπο μοντελοποίησης των φυσικών του χαρακτηριστικών, ένα σύστημα μπορεί να μελετηθεί με βάση το μοντέλο διανεμημένων παραμέτρων (distributed parameter systems) ή το μοντέλο συγκεντρωμένων παραμέτρων (lumped parameter systems) [256], [257]. Στην περίπτωση του πρώτου, ο χώρος κατάστασής θεωρείται απειροδιάστατος (infinite-dimensional state space) με αποτέλεσμα οι παράμετροι και, κατ' επέκταση, οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος να μοντελοποιούνται ως μεγέθη με ομοιόμορφη κατανομή, επιπλέον του χρόνου, και στο χώρο. Αντιθέτως,

στην περίπτωση του δεύτερου, ο χώρος κατάστασης θεωρείται πεπερασμένος και χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο μοντέλο σύμφωνα με το οποίο το σύστημα απαρτίζεται από ένα σύνολο διακριτών μονάδων, οι οποίες αποτελούν συγκεντρωμένα στοιχεία-φορείς των χαρακτηριστικών μεγεθών του, σε συγκεκριμένο χωρικό σχηματισμό. Για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων όπως η βέλτιστη επιλογή ενός πεπερασμένου αριθμού στατικών αισθητήρων, η αναπαράσταση ενός συστήματος μέσω του απλοποιημένου μοντέλου κρίνεται αναγκαία καθώς η χρήση του μοντέλου διανεμημένων παραμέτρων, συνήθως, επιφέρει ασύμφορη πολυπλοκότητα δυσχεραίνοντας περισσότερο παρά ωφελώντας την επίλυση του προβλήματος.

Όσον αφορά τα ΣΗΕ, χρησιμοποιούνται και τα δύο είδη μοντελοποίησης με κριτήριο το μέγεθος του υπό μελέτη συστήματος. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιείται το απλοποιημένο μοντέλο γραμμής μεσαίου μήκους, το οποίο περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α. Η εγκυρότητα του μοντέλου ισχύει με ικανοποιητική ακρίβεια για μήκος γραμμής έως 240 km [258]. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μελέτη του προβλήματος κρίνεται σκόπιμο να περιοριστεί σε συστήματα συγκεντρωμένων παραμέτρων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι αναφορές [255] και [259]–[264] προσφέρουν τα απαραίτητα κίνητρα και τις κατευθύνσεις για τη μεταφορά και επίλυση του προβλήματος στο πεδίο των ΣΗΕ. Διευκρινίζεται ότι, στις προαναφερθείσες αναφορές, το πρόβλημα μελετάται είτε για στατικά είτε για δυναμικά συστήματα. Προφανώς, η εφαρμογή χρήσιμων μεθοδολογικών εργαλείων και συμπερασμάτων στην περίπτωση του στατικού μοντέλου εκτίμησης κατάστασης WLS είναι απολύτως εφικτή και πραγματοποιείται στο παρόν κεφάλαιο κατόπιν των απαραίτητων μαθηματικών αποδείξεων.

Αναφορικά με τη στατιστική ανάλυση των μετρητικών δεδομένων από αισθητήρες, η πληροφορία του Fisher χρησιμοποιείται ως θεωρητική βάση στις αναφορές [256], [257], [259] και [260]. Στο πλαίσιο της ανάπτυξης των προτεινόμενων μεθόδων στις εργασίες [259] και [260], δίνεται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο για τη συσχέτιση θεμελιωδών στατιστικών εννοιών όπως η μήτρα πληροφορίας του Fisher και το κάτω φράγμα Cramér-Rao (Cramér-Rao lower bound) με το ελλειψοειδές εμπιστοσύνης του σφάλματος εκτίμησης κατάστασης συστημάτων που περιγράφονται από μη γραμμικά μοντέλα μετρήσεων, όπως το στατικό μοντέλο WLS στη σχέση (2.8). Επιπλέον, στις αναφορές [256] και [257], θεμελιώνεται μαθηματικά η εφαρμογή των κριτηρίων του βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού στη μήτρα πληροφορίας του Fisher η οποία χρησιμοποιείται ως στατιστικό μέτρο πληροφορίας για τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης. Τέλος, αξιολογείται η ιδιότητα της μήτρας πληροφορίας του Fisher η οποία είναι πάντα θετικά ημιορισμένη (positive semidefinite matrix) προκειμένου οι περιορισμοί των επιμέρους προβλημάτων βέλτιστης επιλογής αισθητήρων να εκφραστούν ως γραμμικές ανισότητες μητρών [256], [257]. Μάλιστα, όπως αναφέρεται και στην εργασία [255], η εκπλήρωση της αυστηρής συνθήκης ανισότητας, δηλαδή η μήτρα να είναι θετικά ορισμένη (positive definite matrix), ισοδυναμεί με την εξασφάλιση της παρατηρησιμότητας του εποπτευόμενου συστήματος.

Όσον αφορά τη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος, στην αναφορά [255], το πρόβλημα μελετάται πολύπλευρα (παρατηρησιμότητα, ακρίβεια, αξιοπιστία, ευρωστία) στην κλασική του μορφή υπό το πρίσμα του μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (mixed integer non-linear programming – MINLP) και, κατόπιν, μετατρέπεται σε πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού με χρήση γραμμικών ανισοτήτων μητρών και χαλάρωση των ακέραιων μεταβλητών του. Θεμελιώδους σημασίας είναι η συνεισφορά της εργασίας των Joshi και Boyd [261], όπου το πρόβλημα μελετάται υπό το πρίσμα του βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού. Τα χαρακτηριστικά στατιστικά μεγέθη που ορίζουν το ελλειψοειδές εκτίμησης χρησιμοποιούνται ως κριτήρια βελτιστοποίησης για τη διατύπωση επιμέρους προβλημάτων κυρτού και ημιορισμένου προγραμματισμού τα οποία βασίζονται στη χαλάρωση των

ακέραιων μεταβλητών. Στα μαθηματικά μοντέλα της εργασίας [261] βασίζονται και οι αναφορές [262] και [263]. Στην αναφορά [262], προτείνονται δύο διαφορετικές αλγοριθμικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος κυρτού προγραμματισμού αποδίδοντας βέλτιστες και μη βέλτιστες λύσεις, αντιστοίχως. Δύο ευρετικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος προτείνονται και στην αναφορά [263] με στόχο τη βέλτιστη επιλογή αισθητήρων με καταναμημένο τρόπο, δηλαδή θεωρώντας την ύπαρξη κόμβων-ηγέτων (leader nodes) για τη διαχείριση των αισθητήρων (άρα, και των μετρητικών δεδομένων) στα επιμέρους τμήματα του συστήματος. Τέλος, ουσιαστική είναι η συμβολή της εργασίας [264], όπου το πρόβλημα διατυπώνεται υπό το πρίσμα του μεικτού ακέραιου ημιορισμένου προγραμματισμού (mixed integer semidefinite programming – MISDP). Και εδώ, για την επίλυσή του προβλήματος, πραγματοποιείται χαλάρωση των ακέραιων μεταβλητών και επιστρατεύεται ένας άπληστος αλγόριθμος χωρίς, ωστόσο, να είναι εγγυημένη η παροχή βέλτιστων λύσεων.

Με βάση την ανωτέρω ανάλυση, διαμορφώνονται τρεις βασικοί άξονες για τη μαθηματική θεμελίωση, τη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επιλογής αισθητήρων στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης συστημάτων: η πληροφορία του Fisher, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός, ο κυρτός και, ειδικότερα, ο ημιορισμένος προγραμματισμός. Στη συνέχεια της ενότητας, δίνεται το απαραίτητο μαθηματικό υπόβαθρο και αναλύονται οι βασικές αρχές των τριών αυτών αξόνων. Παράλληλα, θεμελιώνονται τα μαθηματικά μοντέλα για την εφαρμογή των επιμέρους μεθοδολογιών στην περίπτωση της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ με στόχο την εξασφάλιση παρατηρησιμότητας και τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης.

4.2.1 Η πληροφορία του Fisher

Όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 4.1.2, η πληροφορία του Fisher είναι μία θεμελιακή στατιστική έννοια η οποία είναι αλληλένδετη με την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα «χαρακτηριστικό» της κοινής σ.π.π. [147], η οποία ταυτίζεται με τη συνάρτηση πιθανοφάνειας σύμφωνα με τη γενική σχέση (2.3) της υποενότητας 2.2.2. Υπόβαθρο της παρούσας ανάλυσης, κατά συνέπεια, συνιστούν οι σχέσεις (2.1)–(2.3). Το πρόβλημα μελετάται θεωρώντας ότι $\boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_k)^T \in \Theta \subseteq \mathbb{R}^k$ είναι μια διανυσματική παράμετρος ή, ισοδύναμα, ότι ορίζονται k άγνωστες παράμετροι του υπό μελέτη συστήματος. Η πληροφορία του Fisher (ή το μέτρο της πληροφορίας του Fisher [147]) η οποία περιέχεται στο δείγμα \mathbf{Z} για την άγνωστη παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$ ποσοτικοποιείται μέσω της ακόλουθης μήτρας:

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) \triangleq E_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right) = \int \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right) L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z} \quad (4.1)$$

όπου $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) \in \mathbb{R}^{k \times k}$ είναι η μήτρα πληροφορίας του Fisher (η οποία σε περίπτωση μονοπαραμετρικού προβλήματος εκφυλίζεται στον αριθμό πληροφορίας του Fisher). Εφεξής, για λόγους συντομίας, θα χρησιμοποιείται ο όρος «μήτρα FIM» εκ των αρχικών γραμμάτων των λέξεων της αγγλικής ορολογίας. Η μήτρα FIM, λοιπόν, αποτελεί ένα μέτρο του πληροφοριακού περιεχομένου το οποίο ενέχει το τυχαίο δείγμα \mathbf{Z} αναφορικά με την υπό εκτίμηση διανυσματική παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$.

4.2.1.1 Ιδιότητες μήτρας FIM

Με την υπόθεση ορισμένων συνθηκών κανονικότητας (regularity conditions), μπορούν να αποδειχθούν οι εξής ισοδύναμες μορφές της μήτρας FIM [147]:

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \text{cov} \left[\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right] \quad (4.2)$$

Επιπλέον, αποδεικνύεται εύκολα ότι το ij -οστό στοιχείο της μήτρας υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbb{F}_{ij}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \right] = -\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\partial^2 \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] \quad (4.3)$$

όπου θ_i (θ_j) είναι η i -οστή (j -οστή) παράμετρος του υπό μελέτη συστήματος.

Οι εν λόγω συνθήκες και η αναλυτική απόδειξη των ανωτέρω μορφών δίνεται στο Παράρτημα Β. Όπως φαίνεται από τη σχέση (4.3), η μήτρα FIM λαμβάνει τη μορφή μιας Εσσιανής μήτρας (Hessian matrix). Εξίσου σημαντική είναι η μορφή (4.2), καθώς διαπιστώνεται ότι η μήτρα FIM αποτελεί μια μήτρα συνδιακύμανσης. Άμεση συνέπεια, λοιπόν, είναι ότι η μήτρα FIM είναι συμμετρική και θετικά ημιορισμένη, ιδιότητα η οποία εξ' ορισμού σημαίνει ότι:

$$\mathbf{u}^T \mathbf{F} \mathbf{u} \geq 0, \text{ για κάθε } \mathbf{u} \in \mathbb{R}^k - \{\mathbf{0}\} \quad (4.4)$$

Σε περίπτωση που η μήτρα είναι θετικά ορισμένη, η σχέση (4.4) είναι αποκλειστικά ανισότητα. Γενικά, οι θετικά (ημι)ορισμένες μήτρες εμφανίζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, εκ των οποίων τα πιο χρήσιμα για το σκοπό της παρούσας μελέτης είναι τα εξής:

- i. Όλες οι ιδιοτιμές μιας θετικά ορισμένης (ημιορισμένης) μήτρας είναι θετικές (μη αρνητικές).
- ii. Κάθε θετικά ορισμένη μήτρα είναι αντιστρέψιμη, κάτι που δεν ισχύει για τις θετικά ημιορισμένες μήτρες.
- iii. Για κάθε θετικά ημιορισμένη μήτρα, ισχύει η ανισότητα του Hadamard (Hadamard's inequality) [265], η οποία για την περίπτωση της μήτρας FIM λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\det \mathbf{F} \leq \prod_{i=1}^k \mathbb{F}_{ii} = \mathbb{F}_{11} \mathbb{F}_{22} \cdots \mathbb{F}_{kk} \quad (4.5)$$

όπου $\det \mathbf{F}$ η ορίζουσα της μήτρας FIM και \mathbb{F}_{ii} το i -οστό διαγώνιο στοιχείο της. Η ισότητα ισχύει σε περίπτωση που κάποιο διαγώνιο στοιχείο είναι μηδενικό ή η μήτρα είναι διαγώνια.

- iv. Έστω μια συμμετρική, θετικά ορισμένη μήτρα \mathbf{M} η οποία εκφράζεται ως μπλοκ επιμέρους μητρών (block matrix). Τότε ισχύει η εξής ισοδυναμία [265]:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T & \mathbf{D} \end{bmatrix} \succ 0 \Leftrightarrow \exists \mathbf{A}^{-1}, \mathbf{D} \succeq 0, (\mathbf{D} - \mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}) \succeq 0 \quad (4.6)$$

όπου το σύμβολο $[\cdot] \succ 0$ ($[\cdot] \succeq 0$) δηλώνει ότι η μήτρα είναι θετικά ορισμένη (ημιορισμένη) και η μήτρα $\mathbf{D} - \mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$ είναι το συμπλήρωμα Schur της μήτρας \mathbf{A} εντός της μήτρας \mathbf{M} (Schur complement).

- v. Το σύνολο των θετικά ημιορισμένων μητρών, έστω \mathbb{P}_+^k , είναι κυρτό, δηλαδή, εξ' ορισμού, κάθε γραμμικός συνδυασμός δύο μητρών $\mathbf{M}, \mathbf{N} \succeq 0$ της μορφής $a\mathbf{M} + (1-a)\mathbf{N}$, όπου $a \in [0,1]$, είναι επίσης μια θετικά ημιορισμένη μήτρα.

4.2.1.2 Το αποτέλεσμα του Fisher (Fisher score)

Με απλή παρατήρηση των γενικών σχέσεων (4.1) και (4.2), διαπιστώνεται ότι στον υπολογισμό της πληροφορίας του Fisher υπεισέρχεται η ποσότητα $\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$ η οποία αποκαλείται αποτέλεσμα του Fisher. Πρόκειται για μια έννοια με κομβική σημασία στη στατιστική συμπερασματολογία, ενώ, από κοινού με τη μήτρα FIM, προσφέρει και μια διαισθητική ερμηνεία της πληροφορίας του Fisher.

Βάσει του ορισμού του, το αποτέλεσμα του Fisher, έστω $\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta})$, αποτελεί ένα μέτρο της ευαισθησίας της συνάρτησης πιθανοφάνειας ως προς τις μεταβολές των επιμέρους παραμέτρων $\theta_i, i = 1, \dots, k$. Με την υπόθεση των ιδίων συνθηκών κανονικότητας με αυτές των σχέσεων (4.2) και (4.3), αποδεικνύεται ότι το αποτέλεσμα του Fisher είναι μια μήτρα με τα εξής χαρακτηριστικά:

$$E_{\theta_i}[\mathbf{S}_i(\boldsymbol{\theta})] = 0, i = 1, \dots, k \quad (4.7\alpha)$$

$$\text{cov}[\mathbf{S}_i(\boldsymbol{\theta}), \mathbf{S}_j(\boldsymbol{\theta})] = \mathbb{F}_{ij}(\boldsymbol{\theta}), i, j = 1, \dots, k \quad (4.7\beta)$$

$$\text{όπου } \mathbf{S}_i(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}.$$

Από τη σχέση (4.7α), διαπιστώνεται ότι η αναμενόμενη τιμή της μερικής παραγώγου $\mathbf{S}_i(\boldsymbol{\theta})$ είναι μηδενική για κάθε $\theta_i, i = 1, \dots, k$. Αποδεικνύεται ότι ο μηδενισμός του αποτελέσματος του Fisher είναι ικανή συνθήκη για την επίτευξη της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ της παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$ (κατ' αντιστοιχία με το κριτήριο της πρώτης παραγώγου), άρα, ισχύει η εξής σχέση:

$$\mathbf{S}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0} \Rightarrow \boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z}) \quad (4.8)$$

Συνεπώς, η τιμή του αποτελέσματος του Fisher συνιστά κριτήριο για την επίτευξη ή μη της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας.

Εμβραθύνοντας στην έννοια της πληροφορίας του Fisher, το αποτέλεσμα του Fisher ποσοτικοποιεί το σχετικό ρυθμό μεταβολής της συνάρτησης πιθανοφάνειας $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$ ως προς $\boldsymbol{\theta}$. Αντιστοίχως, βάσει ορισμού, η μήτρα FIM ποσοτικοποιεί τον, κατά μέσο όρο, τετραγωνικό σχετικό ρυθμό μεταβολής της συνάρτησης πιθανοφάνειας $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$. Έτσι, η ύπαρξη στοιχείων της μήτρας FIM με υψηλές τιμές για ένα σημείο $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_0$ υποδηλώνει ταχεία μεταβολή της σ.π.π. $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})$ ως προς $\boldsymbol{\theta}$ σε μια μικρή περιοχή πέριξ του σημείου $\boldsymbol{\theta}_0$. Συνεπώς, αν, πράγματι, η τιμή της παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$ είναι $\boldsymbol{\theta}_0$, αυτή μπορεί να εκτιμηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σχέση με τις γειτονικά της σημεία. Συμπερασματικά, είναι επιθυμητό τα στοιχεία της μήτρας FIM να λαμβάνουν μεγάλες τιμές [147].

4.2.1.3 Το κάτω φράγμα Cramér-Rao

Κατ' αρχήν, είναι αναγκαίο να οριστεί η έννοια του αμερόληπτου εκτιμητή, η οποία έχει προαναφερθεί στην υποενότητα 2.2.3.2. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, η μελέτη αφορά τους εκτιμητές μέγιστης πιθανοφάνειας. Έστω $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ ένας εκτιμητής της παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$ με δεδομένο το τυχαίο δείγμα \mathbf{Z} . Συμβολίζοντας, χάριν απλότητας, με $\boldsymbol{\theta}$ την πραγματική τιμή της παραμέτρου, ο εκτιμητής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$

αποκαλείται αμερόληπτος όταν:

$$E_{z|\boldsymbol{\theta}}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] = \boldsymbol{\theta} \quad (4.9)$$

όπου $E_{z|\boldsymbol{\theta}}[\cdot]$ είναι η μέση τιμή των εκτιμήσεων $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ για διαφορετικές παρατηρήσεις \mathbf{z} .

Μια ξεκάθαρη ερμηνεία του ορισμού είναι ότι ο αμερόληπτος εκτιμητής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ επιτυγχάνει κατά μέσο όρο την πραγματική τιμή $\boldsymbol{\theta}$. Άρα, ο καθορισμός ενός κατώτατου ορίου για τη διασπορά του εκτιμητή αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο στοιχείο αναφορικά με την ακρίβειά του [266]. Στο ιδανικό σενάριο όπου ο εκτιμητής πετυχαίνει αυτό το όριο διασποράς, τότε αποκαλείται αποδοτικός ή αποτελεσματικός εκτιμητής (efficient estimator) [147]. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το όριο αποτελεί ένα απόλυτο μέτρο σύγκρισης ώστε να αξιολογείται η ακρίβειά του.

Αν και έχουν προταθεί διάφορα όρια στατιστικής ακρίβειας, το πλέον εύχρηστο είναι το κάτω φράγμα Cramér-Rao, προς τιμήν των Harald Cramér και Calyampudi Radhakrishna Rao, οι οποίοι εργάστηκαν ανεξάρτητα για τον υπολογισμό του κατά τα μέσα της δεκαετίας του 1940. Με την υπόθεση των ίδιων συνθηκών κανονικότητας με αυτές της υποενότητας 4.2.1.2, για τον αμερόληπτο εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ ικανοποιείται η εξής συνθήκη [266]:

$$\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] - \mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \succeq \mathbf{0} \quad (4.10)$$

όπου $\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] = \text{cov}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] \in \mathbb{R}^{k \times k}$ η μήτρα συνδιακύμανσης του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ και $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$ η μήτρα FIM, υπολογισμένη με βάση την πραγματική τιμή $\boldsymbol{\theta}$.

Σύμφωνα με τη σχέση (4.10), η διαφορά των δύο μητρών είναι θετικά ημιορισμένη με αποτέλεσμα να ορίζεται και ένα σύνολο ανισοτήτων που αφορούν τα διαγώνια στοιχεία των μητρών. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένου ότι τα διαγώνια στοιχεία κάθε ημιορισμένης μήτρας είναι μη αρνητικά, άμεση συνέπεια της σχέσης (4.10) είναι:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})]_{ii} - [\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]_{ii} &\geq 0 \Rightarrow \\ \text{var}(\hat{\theta}_i(\mathbf{Z})) = \mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})]_{ii} &\geq [\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]_{ii}, \quad i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (4.11)$$

όπου $\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})]_{ii}$ το i -οστό διαγώνιο στοιχείο της μήτρας συνδιακύμανσης το οποίο ισούται με τη διασπορά του εκτιμητή της i -οστής παραμέτρου θ_i , $\text{var}(\hat{\theta}_i(\mathbf{Z}))$.

Όπως παρατηρείται, οι αντίστροφες τιμές των διαγωνίων στοιχείων της μήτρας FIM φράσσουν από κάτω τις τιμές των διαγωνίων στοιχείων της μήτρας συνδιακύμανσης $\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})]$ και, επομένως, αποτελούν τις ελάχιστες τιμές τις οποίες μπορούν να λάβουν οι διασπορές $\text{var}(\hat{\theta}_i(\mathbf{Z}))$, $i = 1, \dots, k$. Η ανισότητα (4.11) λαμβάνει τη μορφή της ανισότητας Cramér-Rao (Cramér-Rao inequality), η οποία, για μονοπαραμετρικά προβλήματα, ορίζει ως κάτω φράγμα της διασποράς ενός αμερόληπτου εκτιμητή τον αντίστροφο του αριθμού πληροφορίας του Fisher. Συνεπώς, για την περίπτωση της διανυσματικής παραμέτρου $\boldsymbol{\theta}$, ο αμερόληπτος εκτιμητής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ είναι αποδοτικός όταν κάθε επιμέρους εκτιμητής $\hat{\theta}_i(\mathbf{Z})$, $i = 1, \dots, k$ είναι αποδοτικός, δηλαδή όταν η σχέση (4.11) μετατρέπεται αποκλειστικά σε ισότητα.

Η ύπαρξη ενός αποδοτικού εκτιμητή με δεδομένο ένα τυχαίο δείγμα \mathbf{Z} δεν είναι εγγυημένη. Σε περίπτωση, όμως, που υπάρχει, τότε:

1. βασίζεται στην εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας,
2. εξασφαλίζει την επίτευξη του κάτω φράγματος Cramér-Rao και
3. χαρακτηρίζεται ως εκτιμητής ελάχιστης διασποράς (minimum variance estimator), δηλαδή τα στοιχεία $\vartheta_i, i = 1, \dots, k$ της παραμέτρου $\boldsymbol{\vartheta}$ εκτιμώνται με τις χαμηλότερες δυνατές διασπορές σε σύγκριση με κάθε άλλον αμερόληπτο εκτιμητή [266]–[268].

Γενικά, ως κριτήριο επίτευξης της ελάχιστης διασποράς χρησιμοποιείται η ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος εκτίμησης (mean squared estimation error) [267], το οποίο, για τον αμερόληπτο εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z})$, δίνεται από την εξής σχέση [269]:

$$\text{MSE}_{\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z})} \triangleq \mathbb{E}_{\mathbf{z}|\boldsymbol{\vartheta}} \left[\left(\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z}) - \boldsymbol{\vartheta} \right)^2 \right] = \text{trace} \left\{ \mathbf{C} \left[\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z}) \right] \right\} = \sum_{i=1}^k \left\{ \text{var} \left(\hat{\vartheta}_i(\mathbf{Z}) \right) \right\} \quad (4.12)$$

όπου $\text{trace}\{\cdot\}$ συμβολίζει το ίχνος μιας μήτρας.

Βάσει της σχέσης (4.12), το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z})$ – όπως και κάθε αμερόληπτου εκτιμητή – ταυτίζεται με το άθροισμα των διασπορών των επιμέρους εκτιμητών $\text{var}(\hat{\vartheta}_i(\mathbf{Z})), i = 1, \dots, k$. Συνεπώς, η επίτευξη ισότητας στη σχέση (4.11) εγγυάται και την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος.

Μέσω της ανάλυσης του κάτω φράγματος Cramér-Rao, αναδεικνύεται η κομβική σημασία της μήτρας FIM, η οποία ουσιαστικά αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας, του θεωρήματος Cramér-Rao, όπως ονομάζεται η πλήρης διατύπωση της σχέσης (4.10) από κοινού με τις προαπαιτούμενες συνθήκες κανονικότητας, και των εκτιμητών ελάχιστης διασποράς. Επιπλέον, με βάση τη σχέση (4.10), η αντίστροφη της μήτρας FIM $\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\vartheta})$ εκφράζει τη βέλτιστη («ελάχιστη») μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z})$. Τέλος, προσφέρει μια διαισθητική ερμηνεία του κάτω φράγματος Cramér-Rao: όσο μεγαλύτερες τιμές λαμβάνουν τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας FIM, τόσο χαμηλώνουν τα αντίστοιχα φράγματα στη σχέση (4.11). Με άλλα λόγια, όσο αυξάνεται το πληροφοριακό περιεχόμενο του δείγματος \mathbf{Z} για την παράμετρο $\boldsymbol{\vartheta}$ μέσω του κατάλληλου (επανα)καθορισμού του, τόσο διευρύνεται το περιθώριο βελτίωσης της ακρίβειας του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}(\mathbf{Z})$.

4.2.2 Ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός

4.2.2.1 Γενικές αρχές

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάλυση στην ενότητα 4.2.1., εμπεδώνεται ότι απαραίτητη προϋπόθεση για τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας ενός εκτιμητή είναι ο βέλτιστος (επανα)σχεδιασμός του αντίστοιχου πειράματος. Χωρίς να διατίθεται αυστηρός ορισμός, η διαδικασία του πειραματικού σχεδιασμού αναφέρεται στον ποιοτικό και ποσοτικό προσδιορισμό των παρατηρήσεων που απαιτούνται προκειμένου να απαντηθούν τα διατυπωμένα ερευνητικά ερωτήματα με σαφήνεια και ακρίβεια. Σαφώς αυστηρότερα ορίζεται ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός, καθώς βασίζεται στη βελτιστοποίηση κάποιου συγκεκριμένου στατιστικού κριτηρίου [270], μέσω του οποίου μεγιστοποιείται το πληροφοριακό

περιεχόμενο του πειράματος ή, ισοδύναμα, ελαχιστοποιείται η διασπορά (συνδιακύμανση) του αντίστοιχου εκτιμητή. Υιοθετώντας ως μέτρο πληροφορίας τη μήτρα FIM, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός ανάγεται στο βέλτιστο καθορισμό του δείγματος \mathbf{Z} , καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, η μήτρα FIM αποτελεί ένα «χαρακτηριστικό» της κοινής σ.π.π. του δείγματος. Δεδομένου, δε, ότι η παρούσα μελέτη αφορά στατικά μοντέλα συγκεντρωμένων παραμέτρων, το δείγμα καθορίζεται πλήρως από τις εξής πληροφορίες: ποια μεγέθη, σε ποια σημεία και με τι επιμέρους ακριβείες παρατηρούνται από τους αισθητήρες της υπό μελέτη υποδομής εποπτείας και ελέγχου. Το σύνολο αυτών των πληροφοριών περιέχεται στη μήτρα FIM.

Μαθηματικό θεμέλιο για την παρούσα υποενοότητα είναι ο ορισμός και η μελέτη των ιδιοτήτων του ελλειψοειδούς εμπιστοσύνης του σφάλματος εκτίμησης, μιας έννοιας η οποία έχει, ήδη, αναφερθεί αρκετές φορές στο παρόν κεφάλαιο. Σε συνέχεια της αναφοράς στην υποενοότητα 2.2.2, θεωρείται ότι $Z_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2), i = 1, \dots, m$. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, η ανάλυση αφορά τον εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$.

Αποδεικνύεται ότι η περιοχή εμπιστοσύνης (confidence region) μιας εκτίμησης $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ οριοθετείται από έναν k – διάστατο ελλειψοειδή χώρο, ο οποίος ορίζεται σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})} = \left\{ \boldsymbol{\theta} : \left(\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z}) \right)^T \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}) \left(\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z}) \right) \leq c \right\} \quad (4.13)$$

όπου $c \in \mathbb{R}$ είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από το θεωρούμενο επίπεδο εμπιστοσύνης, τη συνάρτηση κατανομής των τ.μ., τον αριθμό των παρατηρήσεων m και των επιμέρους παραμέτρων k [257].

Το ελλειψοειδές $\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})}$ – όπως θα αναφέρεται εφεξής – έχει ως κέντρο την εκτίμηση $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ και συνιστά μια περιοχή εμπιστοσύνης στην οποία περιέχεται το σφάλμα της εκτίμησης $\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$. Παρ' όλο που, στο πλαίσιο της στατιστικής θεωρίας του Bayes (Bayesian statistics), η εμπιστοσύνη ως έννοια συνδέεται με την πιθανότητα η πραγματική τιμή μιας υπό εκτίμησης παραμέτρου να εντοπίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή του πεδίου τιμών της και ο καθορισμός της περιοχής αυτής, ουσιαστικά, συνιστά μια τεχνική εκτίμησης [147], [267], η ερμηνεία της περιοχής εμπιστοσύνης δε βασίζεται εξ' ορισμού στην παροχή πιθανοτικών εγγυήσεων. Στην προκείμενη περίπτωση, ωστόσο, δεδομένης της υπόθεσης περί κανονικής κατανομής των τ.μ., κάτι τέτοιο είναι εφικτό [268]. Με βάση την αναφορά [261], θεωρείται ότι το ελλειψοειδές $\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})}$ καταλαμβάνει τον ελάχιστο όγκο χώρου ελλειψοειδούς μορφής ο οποίος περιέχει το σφάλμα $\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ με πιθανότητα ξ και, ως εκ τούτου, η σταθερά c ισούται με την αντίστροφη τιμή της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής μιας τ.μ. η οποία ακολουθεί την κατανομή χ^2 (chi-square distribution) με k βαθμούς ελευθερίας, έστω $F_{\chi_k^2}$, υπολογιζόμενη για ξ , δηλαδή $c = F_{\chi_k^2}^{-1}(\xi)$. Εύλογα, όσο μικρότερος είναι ο όγκος που καταλαμβάνει το ελλειψοειδές, τόσο ακριβέστερη είναι η εκτίμηση $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$, επειδή, αναγκαστικά, το σφάλμα $\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ λαμβάνει μικρότερες τιμές κατά μέτρο [257]. Διαισθητικά, λοιπόν, ο όγκος του ελλειψοειδούς μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο της ακριβείας της εκτίμησης $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$ και, γενικότερα, της επίδοσης του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συσχέτιση της μήτρας FIM με το ελλειψοειδές, δεδομένου ότι η μήτρα FIM εμπλέκεται στον τύπο (4.13). Γενικά, κάθε θετικά ορισμένη μήτρα παράγει στο χώρο μια

μπάλα (ball) ελλειψοειδούς όγκου σύμφωνα με μια σχέση της μορφής (4.13) [270]. Ομοίως, για το προκείμενο πρόβλημα, το ελλειψοειδές είναι ένα «παράγωγο» της μήτρας FIM, πράγμα που σημαίνει ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του καθορίζονται από τα αλγεβρικά χαρακτηριστικά της μήτρας. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι ο όγκος του ελλειψοειδούς $\text{vol}\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(z)}$ είναι αντιστρόφως ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας της ορίζουσας της μήτρας FIM, $\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta})$ [270]. Σε λογαριθμικές τιμές, ο όγκος υπολογίζεται με βάση την εξής σχέση [261]:

$$\ln(\text{vol}\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(z)}) = \beta - \frac{\ln(\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}))}{2} \quad (4.14)$$

όπου $\beta \in \mathbb{R}$ μια σταθερά η οποία εξαρτάται από την πιθανότητα ξ , από τις διασπορές $\sigma_i^2, i = 1, \dots, m$ και τον αριθμό k . Η αναλυτική απόδειξη της σχέσης (4.14) δίνεται στο Παράρτημα Β.

Επιπλέον της σχέσης (4.14), δεδομένου ότι η i -οστή ιδιοτιμή της αντίστροφης μήτρας FIM $\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ είναι ίση με $1/\lambda_i$, όπου λ_i η i -οστή ιδιοτιμή της μήτρας FIM, αποδεικνύεται ότι το μήκος του i -οστού ημιάξονα του ελλειψοειδούς είναι ίσο με $1/\sqrt{\lambda_i}$ και, επιπλέον, αυτός κείται στο i -οστό ιδιοδιάνυσμα της μήτρας [259]. Ακόμη, το ίχνος της μήτρας $\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ ποσοτικοποιεί το μέσο μήκος των ημιάξονων του ελλειψοειδούς. Οι παραπάνω ιδιότητες είναι οι αναμενόμενες διαισθητικά εφόσον είναι επιθυμητή η αύξηση του «μεγέθους» (π.χ. της ορίζουσας) της μήτρας FIM καθώς συνεπάγεται αύξηση του αποδιδόμενου πληροφοριακού περιεχομένου και, βάσει της σχέσης (4.13), μείωση του σφάλματος $\boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}}(z)$ για σταθερή τιμή c . Ισοδύναμα, είναι επιθυμητό να μειωθεί το «μέγεθος» της μήτρας $\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ (π.χ. ιδιοτιμές ή ίχνος) καθώς συνεπάγεται μείωση του ελάχιστου φράγματος για τη μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης και, συνεπώς, επιφέρει μείωση του μεγέθους του ελλειψοειδούς. Συμπερασματικά, γίνεται κατανοητό ότι η ελαχιστοποίηση του μεγέθους του ελλειψοειδούς μπορεί να αναχθεί στη βελτιστοποίηση στατιστικών κριτηρίων με βάση τα αλγεβρικά χαρακτηριστικά της μήτρας FIM [270].

Σε αυτό το πλαίσιο, διαμορφώνονται τρία βασικά στατιστικά κριτήρια για τη θεμελίωση προβλημάτων βελτιστοποίησης με στόχο τη συρρίκνωση του ελλειψοειδούς [257], [270].

- Το κριτήριο D ή κριτήριο της ορίζουσας (D-optimality or determinant criterion) δίνεται ως εξής:

$$\Psi_D = \ln(\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta})) \quad (4.15)$$

Επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του όγκου του ελλειψοειδούς μέσω της μεγιστοποίησης της ορίζουσας της μήτρας FIM με βάση τη σχέση (4.14).

- Το κριτήριο A ή κριτήριο του ίχνους (A-optimality or trace criterion) βασίζεται στην εξής σχέση:

$$\Psi_A = \text{trace}(\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})) = \sum_{i=1}^k [\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]_{ii} = \sum_{i=1}^k \{\text{var}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{Z}))\} \quad (4.16)$$

Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του μέσου αξονικού μήκους του ελλειψοειδούς μέσω της ελαχιστοποίησης του ίχνους της αντίστροφης μήτρας FIM με βάση τη σχέση (4.12) δεδομένου ότι η

σχέση (4.11) ισχύει ως ισότητα. Συνεπώς, ελαχιστοποιείται το άθροισμα των διασπορών $\text{var}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{Z})), i = 1, \dots, k$.

- Το κριτήριο E ή κριτήριο της μέγιστης ιδιοτιμής (E-optimality or largest eigenvalue criterion) συμβολίζεται ως εξής:

$$\Psi_E = \lambda_{\max}(\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})) \quad (4.17)$$

Επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση του μήκους του μεγαλύτερου άξονα (διαμέτρου) του ελλειψοειδούς μέσω της ελαχιστοποίησης της μέγιστης ιδιοτιμής της αντίστροφης μήτρας FIM. Ισοδύναμο κριτήριο είναι η μεγιστοποίηση της ελάχιστης ιδιοτιμής της μήτρας FIM $\lambda_{\min}(\mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}))$ δεδομένου ότι

$$\lambda_{\max}(\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})) = 1/\lambda_{\min}(\mathbb{F}(\boldsymbol{\theta})).$$

Δημοφιλή είναι, επίσης, τα κριτήρια T και L τα οποία συνιστούν παραλλαγές του κριτηρίου A. Το, μεν, πρώτο ισούται με το ίχνος της μήτρας FIM [270], άρα, επιδιώκεται η μεγιστοποίησή του. Το, δε, δεύτερο είναι ίσο με το ίχνος του γινομένου της αντίστροφης μήτρας FIM με μια θετικά ορισμένη μήτρα ίσων διαστάσεων με στόχο να λαμβάνονται υπόψη και οι τιμές των μη διαγώνιων στοιχείων της [257]. Προφανώς, επιδιώκεται η ελαχιστοποίησή του.

Επίσης, διαδεδομένο είναι και το κριτήριο M ή κριτήριο του μέγιστου διαγώνιου στοιχείου ή της διασποράς σφάλματος παραμέτρου (συντεταγμένης) στη δυσμενέστερη περίπτωση (M-optimality or maximum diagonal entry criterion or worst case coordinate error variance) [237], [261], το οποίο συμβολίζεται ως εξής:

$$\Psi_M = \max_{i=1, \dots, k} [\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})]_{ii} \quad (4.18)$$

Θεωρώντας ότι η σχέση (4.11) ισχύει ως ισότητα, το κριτήριο Ψ_M ταυτίζεται με τη χειρότερη (μέγιστη) εκ των διασπορών $\text{var}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(\mathbf{Z})), i = 1, \dots, k$. Μάλιστα, λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα (iii) των θετικά ημιορισμένων μητρών στην υποενότητα 4.2.1.1, η μείωση ενός διαγώνιου στοιχείου – στην προκειμένη περίπτωση του μέγιστου – της αντίστροφης μήτρας FIM μπορεί να οδηγήσει στη μείωση της οριζουσας $\det \mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ ή, ισοδύναμα, στην αύξηση της οριζουσας $\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta})$ καθώς ισχύει $\det \mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) = 1/\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta})$.

Σε γενικές γραμμές, το κριτήριο D είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο χάρις στην απλότητά του και στην ιδιότητα του αναλλοίωτου (invariance property) την οποία έχει σε αντίθεση με τα υπόλοιπα κριτήρια. Αυτό σημαίνει ότι παρουσιάζει ευρωστία ενάντια σε γραμμικούς μετασχηματισμούς του συστήματος εξισώσεων οι οποίες συνδέουν τις παρατηρήσεις με τις άγνωστες παραμέτρους και σε μετασχηματισμούς των παραμέτρων υπό προϋποθέσεις [270]. Επίσης, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι τα κριτήρια D και A, καθώς και οι παραλλαγές του τελευταίου, ουσιαστικά, ανάγονται στη μελέτη των ιδιοτιμών της μήτρας

FIM, διότι ισχύει $\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^k \lambda_i$ και $\text{trace}(\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i}$. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω,

για περαιτέρω ανάλυση επιλέγεται, εφεξής, το κριτήριο D. Επίσης, επιλέγεται και το κριτήριο M για δύο λόγους: πρώτον, σε περίπτωση που δεν ισχύει η ισότητα στη σχέση (4.11), το κριτήριο μπορεί να λάβει τη μορφή $\Psi_M = \max_{i=1, \dots, k} \mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})]_{ii}$ διατηρώντας, άρα, τη σημασία του και, δεύτερον, μπορεί να λυθεί στο

πλαίσιο του ημιορισμένου προγραμματισμού εν αντιθέσει με το κριτήριο D , όπως θα δειχθεί στην επόμενη υποενότητα.

Σε αυτό το σημείο, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός έρχεται να απαντήσει στο εξής βασικό ερώτημα:

- «με ποιο τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) ενός επιλεγμένου στατιστικού κριτηρίου για ένα συγκεκριμένο πείραμα;»

Όπως έχει προαναφερθεί στην αρχή της υποενότητας, η μήτρα FIM περιέχει το σύνολο των πληροφοριών αναφορικά με τις παρατηρήσεις του πειράματος. Η μοντελοποίηση κάθε παρατηρούμενου μεγέθους $Z_i, i = 1, \dots, m$ ως τ.μ. γνωστής κατανομής του οποίου η μέση τιμή είναι η θεωρητικά αναμενόμενη με βάση τις εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, αποτελεί το θεμελιακό στοιχείο για τη συγκρότηση της στοιχειώδους ποσότητας πληροφορίας την οποία συνεισφέρει κάθε παρατήρηση στην δημιουργία της μήτρας FIM. Σε αυτό το πλαίσιο, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός λαμβάνει την εξής μορφή: θεωρώντας ως διαθέσιμο προς παρατήρηση ένα πεπερασμένο σύνολο μεγεθών του συστήματος με προκαθορισμένες επιμέρους διασπορές, στόχος είναι η εύρεση του συνδυασμού εκείνου ο οποίος βελτιστοποιεί το επιθυμητό κριτήριο [261], [271]. Κάθε συνδυασμός ορίζεται από τον αριθμό και τις θέσεις των παρατηρήσεων, τα μεγέθη τα οποία παρατηρούνται και τις αντίστοιχες διασπορές. Επίσης, ο συνδυασμός αυτός μπορεί να αποτελεί είτε έναν ανεξάρτητο πειραματικό σχεδιασμό είτε μια προσθήκη σε ένα προϋπάρχον πείραμα το οποίου η ακρίβεια είναι επιθυμητό να βελτιωθεί.

Ακολουθώντας την ανωτέρω στρατηγική, στις επόμενες υποενότητες, τα κριτήρια M και D χρησιμοποιούνται για τη θεμελίωση αντίστοιχων προβλημάτων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού με στόχο τη βέλτιστη επιλογή αισθητήρων σε υποδομές εποπτείας και ελέγχου. Το μαθηματικό υπόβαθρο για τη διατύπωση των προβλημάτων αντλείται από τις αναφορές [261] και [271], όπου, για πρώτη φορά, εφαρμόστηκαν στατιστικά κριτήρια για τη βέλτιστη επιλογή αισθητήρων σε γραμμικά συστήματα.

4.2.2.2 Θεμελίωση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D

Στις αναφορές [261] και [271], το κριτήριο D αποτελεί τη βασική επιλογή για τη διατύπωση ενός προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού, το οποίο, εφεξής, θα αποκαλείται πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D . Όπως προαναφέρθηκε, η σχετική ανάλυση βασίζεται σε μοντέλα γραμμικών συστημάτων, μια θεώρηση η οποία δεν ισχύει στο πλαίσιο του στατικού μοντέλου WLS με βάση το σύστημα εξισώσεων (2.8), αλλά, αν μελετηθεί υπό το πρίσμα της πληροφορίας του Fisher, οδηγεί σε διατυπώσεις γενικής μορφής οι οποίες εφαρμόζονται στο μη γραμμικό πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ.

Υιοθετώντας τους ίδιους συμβολισμούς και υποθέσεις με τις υποενότητες 4.2.1 και 4.2.2, θεωρείται ότι η άγνωστη παράμετρος $\boldsymbol{\theta}$ συνδέεται με την παρατήρηση z μέσω ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων σύμφωνα με την ακόλουθη μητρική μορφή:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 & \dots & \mathbf{A}_m \end{bmatrix}^T}_{\mathbf{A}^T} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}_1 \\ \boldsymbol{\theta}_2 \\ \vdots \\ \boldsymbol{\theta}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \Rightarrow z_i = \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta} + e_i, i = 1, \dots, m \quad (4.19)$$

όπου \mathbf{A}_i είναι η i -οστή στήλη της μήτρας $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{k \times m}$, η οποία περιγράφει τη γραμμική εξίσωση η

οποία συσχετίζει την i -οστή μέτρηση z_i με την άγνωστη παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$ και e_i είναι το αντίστοιχο σφάλμα.

Η μήτρα συνδιακύμανσης του εκτιμητή $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ στην προκειμένη περίπτωση είναι ίση με:

$$\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] = \text{cov}[\mathbf{e}] \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T \right)^{-1} \quad (4.20)$$

όπου $\text{cov}[\mathbf{e}] = \text{diag}\{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\}$ εξαιτίας της υπόθεσης για ανεξαρτησία των τ.μ. και, προφανώς, προϋποτίθεται ότι η μήτρα $\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T$ είναι αντιστρέψιμη.

Αποδεικνύεται ότι το δεξί μέλος της σχέσης (4.20) ταυτίζεται με την αντίστροφη μήτρα FIM για το γραμμικό σύστημα (4.19), άρα, ο εκτιμητής $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ επιτυγχάνει το κάτω φράγμα Cramér-Rao και, άρα, αποδίδει εκτιμήσεις ελάχιστης διασποράς. Η απόδειξη της εν λόγω ιδιότητας παρατίθεται στο Παράρτημα Β. Επομένως, προκειμένου να διατυπωθεί το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D, λαμβάνεται ότι $\mathbf{C}[\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})] = \mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$. Ακόμη, το πληροφοριακό περιεχόμενο της i -οστής παρατήρησης z_i υπολογίζεται αντίστροφα σε σχέση με τον i -οστό όρο του αθροίσματος στη σχέση (4.20):

$$\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sigma_i^2} \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T \quad (4.21)$$

όπου $\mathbf{F}_i(\boldsymbol{\theta})$ συμβολίζει τη συνεισφορά της i -οστής παρατήρησης στη συνολική μήτρα FIM $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$, καθώς η τελευταία μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα επιμέρους μητρών:

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T \right) \quad (4.22)$$

Σε αυτό το πλαίσιο, το πρόβλημα έγκειται στην επιλογή ενός προκαθορισμένου αριθμού $m_s \in \mathbb{N}$ από ένα σύνολο $m_c \in \mathbb{N}$ υποψήφιων αισθητήρων, έστω Σ , με στόχο τη βελτιστοποίηση του κριτηρίου D. Συμβολικά, το πρόβλημα λαμβάνει την εξής μορφή [261], [271]:

$$\begin{aligned} \max \mathcal{P}_D &= \ln(\det \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})) = \ln\left(\det \sum_{i \in \Sigma} \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\theta})\right) \\ \text{s.t.} \quad |\Sigma| &= m_s \end{aligned} \quad (4.23)$$

όπου $|\Sigma|$ η πληθικότητα (cardinality) του συνόλου Σ και $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$ είναι η τελική μήτρα FIM η οποία ποσοτικοποιεί το πληροφοριακό περιεχόμενο των m_s αισθητήρων που επελέγησαν.

Προφανώς, ισχύει πάντα $m_s \leq m_c$. Επιπλέον, αναγκαία συνθήκη για την επίλυση του γραμμικού συστήματος (4.19) είναι να ικανοποιείται η ανισότητα $m \geq k$, δηλαδή οι παρατηρήσεις να είναι τουλάχιστον ίσες σε αριθμό με τις υπό εκτίμηση παραμέτρους.

Στη σχέση (4.23), το σύνολο Σ συνιστά τη μεταβλητή του προβλήματος. Ωστόσο, μια πιο χρηστική μορφή μπορεί να επιτευχθεί ως εξής: έστω ότι στον i -οστό υποψήφιο, προς τοποθέτηση, αισθητήρα ανατίθεται η μεταβλητή απόφασης y_i η οποία λαμβάνει μοναδιαία τιμή ($y_i = 1$) αν αυτός ανήκει στο υποσύνολο των m_s αισθητήρων οι οποίοι συγκροτούν το βέλτιστο συνδυασμό, ειδάλλως λαμβάνει μηδενική τιμή ($y_i = 0$). Τότε, το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D επαναδιατυπώνεται ακολούθως:

$$\begin{aligned} \max \Psi_D &= \ln(\det \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{y})) = \ln \left(\det \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta}) \right) \\ \text{s.t. } \mathbf{y}^T \mathbf{y} &= m_s, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c} \end{aligned} \quad (4.24)$$

όπου $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{m_c})^T$ είναι το διάνυσμα των ακέραιων (δυαδικών) μεταβλητών απόφασης, $\mathbb{Z}_2^{m_c} = \{0, 1\}^{m_c}$ είναι το σύνολο τιμών για δυαδικές μεταβλητές με διάσταση ίση m_c και $\mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{y})$ είναι η τελική μήτρα FIM η οποία, πλέον, εξαρτάται και από το διάνυσμα \mathbf{y} .

Αν και στη διατύπωση (4.24) περιλαμβάνεται μια μη γραμμική, κοίλη (concave) αντικειμενική συνάρτηση και ένας γραμμικός περιορισμός αθροίσματος, το πρόβλημα βελτιστοποίησης δεν είναι κυρτό (convex optimization problem) γιατί το πεδίο τιμών των μεταβλητών περιορίζεται σε ένα υποσύνολο των ακέραιων αριθμών. Πρόκειται για ένα δυαδικό ή Boolean κυρτό (Boolean-convex problem) πρόβλημα [261], του οποίου η επίλυση είναι, γενικά, δυσχερής. Έτσι, προτείνεται η χαλάρωση του περιορισμού περί ακέραιων μεταβλητών καθεμία εκ των οποίων θεωρείται συνεχής στο κλειστό διάστημα $[0, 1]$ – συμβολικά $y_i \in \{0, 1\} \rightarrow y_i \in [0, 1], i = 1, \dots, m_c$ – με στόχο το πρόβλημα να λυθεί αποδοτικά στο πλαίσιο του κυρτού προγραμματισμού [261]. Για την πληρότητα της μελέτης, ο αυστηρός ορισμός ενός προβλήματος κυρτού προγραμματισμού παρατίθεται στο Παράρτημα Β.

4.2.2.3 Θεμελίωση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M

Ακολουθώντας τη θεώρηση και περιγραφή του προβλήματος της βέλτιστης επιλογής αισθητήρων της προηγούμενης υποενότητας, διατυπώνεται το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M με μόνη αλλαγή την αξιοποίηση του κριτηρίου M αντί του κριτηρίου D . Έτσι, προκύπτει το εξής πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \min \Psi_M &= \max_{i=1, \dots, k} \left[\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{y}) \right]_{ii} = \max_{i=1, \dots, k} \left[\left(\sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta}) \right)^{-1} \right]_{ii} \\ \text{s.t. } \mathbf{y}^T \mathbf{y} &= m_s, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c} \end{aligned} \quad (4.25)$$

όπου ισχύουν οι ίδιοι συμβολισμοί με το πρόβλημα (4.24) και, προφανώς, προϋποτίθεται η αντιστρεψιμότητα της μήτρας FIM σε αντιστοιχία με τη σχέση (4.20).

Η διατύπωση (4.25) περιγράφει ένα Boolean κυρτό πρόβλημα, καθώς περιλαμβάνει μία κυρτή αντικειμενική συνάρτηση, ένα γραμμικό περιορισμό αθροίσματος και ακέραιες μεταβλητές. Η επίλυση του προβλήματος διευκολύνεται μέσω της μετατροπής του σε ένα πρόβλημα ημιορισμένου

προγραμματισμού (semidefinite program) [261], με βάση την ιδιότητα (v) των θετικά ημιορισμένων μητρώων στην υποενότητα 4.2.1.1. Η νέα – ισοδύναμη με τη μορφή (4.25) – διατύπωση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \min \quad & \Psi_M = t \\ \text{s.t.} \quad & t \geq \mathbf{e}_i^T \mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{y}) \mathbf{e}_i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}(\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{y}) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\vartheta}) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq 0, \quad i = 1, \dots, k \\ & \mathbf{y}^T \mathbf{y} = m_s, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c} \end{aligned} \quad (4.26)$$

όπου $t \in \mathbb{R}$ συνιστά τη γραμμική, πλέον, αντικειμενική συνάρτηση και \mathbf{e}_i είναι το μοναδιαίο k – διάστατο διάνυσμα με μόνο μη μηδενικό το i – οστό στοιχείο του.

Όπως παρατηρείται, η ανισότητα στο αριστερό μέλος του πρώτου περιορισμού του προβλήματος (4.26) φράσσει όλα τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας $\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{y})$ κάτω από την τιμή t , της οποίας επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση. Με αυτόν τον τρόπο, προφανώς, επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του μέγιστου διαγώνιου στοιχείου $\Psi_M = \max_{i=1, \dots, k} [\mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{y})]_{ii}$. Οι γραμμικοί αυτοί περιορισμοί μετατρέπονται σε μια ισοδύναμη μορφή, έναν περιορισμό γραμμικής ανισότητας μήτρας (ή περιορισμού LMI, με βάση τα αρχικά των λέξεων της αγγλικής απόδοσης του όρου η οποία έχει προαναφερθεί) ο οποίος επιβάλλει το μπλοκ μητρώων, που περιλαμβάνει τη μήτρα FIM, να είναι θετικά ημιορισμένο. Η μετατροπή εξηγείται με βάση την ιδιότητα (iv) των θετικά ημιορισμένων μητρώων στην υποενότητα 4.2.1.1, καθώς διακρίνεται εύκολα ότι η αρχική ανισότητα του περιορισμού ταυτίζεται με τη συνθήκη (4.6) σχετικά με το συμπλήρωμα Schur για το μπλοκ μητρώων του προβλήματος (4.26). Προφανώς, με βάση την ίδια ιδιότητα, ο περιορισμός LMI επιβάλλει και την αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}(\boldsymbol{\vartheta}, \mathbf{y})$. Το πρόβλημα (4.26) ανήκει στο μεικτό ακέραιο ημιορισμένο προγραμματισμό λόγω της συνύπαρξης των ακέραιων μεταβλητών $y_i, i = 1, \dots, m_c$ με την πραγματική μεταβλητή t . Τέλος, και για το συγκεκριμένο πρόβλημα, προτείνεται χαλάρωση του περιορισμού περί ακέραιων μεταβλητών με στόχο την αποδοτική επίλυσή του [261].

Σημειώνεται ότι ο ημιορισμένος προγραμματισμός (με συνεχείς μεταβλητές) ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια του κυρτού προγραμματισμού και συνιστά την πιο ενδιαφέρουσα εξέλιξη στις μεθόδους μαθηματικού προγραμματισμού κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες [273], [274]. Οι γενικές αρχές και τα χαρακτηριστικά του, σε συσχέτιση με τον κυρτό προγραμματισμό, αναλύονται στο Παράρτημα Β.

4.2.2.4 Επιλυσιμότητα των προβλημάτων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού **D** και **M**

Προτού παρουσιαστεί η εφαρμογή των μοντέλων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού **D** και **M** στην περίπτωση των ΣΗΕ, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη συζήτηση σχετικά με την επιλυσιμότητα των αντίστοιχων προβλημάτων σε θεωρητικό επίπεδο. Περαιτέρω εμβάθυνση επ' αυτού του θέματος δεν εμπίπτει στους στόχους της παρούσας διατριβής. Το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής αισθητήρων, όπως μορφοποιήθηκε στην υποενότητα 4.2.2.2, ανήκει στη συνδυαστική βελτιστοποίηση [261], μια περιοχή του μαθηματικού προγραμματισμού η οποία αφορά την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με διακριτή ή συνδυαστική δομή [275]. Μια τέτοια δομή βασίζεται στην εύρεση της

βέλτιστης λύσης από ένα πεπερασμένο σύνολο αποδεικτών λύσεων και, επομένως, ανάγεται στη λήψη αποφάσεων για τη συμπερίληψη ή όχι κάθε αντικειμένου στο βέλτιστο συνδυασμό-λύση. Η συνδυαστική βελτιστοποίηση, λοιπόν, συνδέεται άρρηκτα με τον κίεραιο προγραμματισμό με αποτέλεσμα η δυσκολία των σχετικών προβλημάτων να αυξάνεται και να απαιτούνται ειδικοί αλγόριθμοι για την επίλυσή τους [275]. Για παράδειγμα, αν και τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού μπορούν να επιλυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο (P problems), τα προβλήματα κίεραίου γραμμικού προγραμματισμού είναι, ως επί το πλείστον, NP-δύσκολα (NP-hard problems), δηλαδή είναι δύσκολο να επιλυθούν σε πολυωνυμικό χρόνο από τους, μέχρι σήμερα, γνωστούς αλγόριθμους [276], [277].

Σχετικά με τα προβλήματα βέλτιστης επιλογής αισθητήρων, αναφέρεται ότι, γενικά, είναι NP-δύσκολα [261]. Στην αναφορά [199], αποδεικνύεται ότι το προτεινόμενο πρόβλημα, το οποίο βασίζεται στη χρήση της μήτρας FIM και επιδιώκει τον καθορισμό ενός προεπιλεγμένου αριθμού μετρητών, είναι NP-δύσκολο. Επιπλέον, όλα τα σχετικά προβλήματα τα οποία διατυπώνονται στο πλαίσιο του μεικτού κίεραίου ημιορισμένου προγραμματισμού είναι NP-δύσκολα [264]. Δεδομένου ότι το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D (4.24) έχει παρεμφερή δομή με αυτό της αναφοράς [199] και το πρόβλημα M (4.26) ανήκει στον μεικτό κίεραιο ημιορισμένο προγραμματισμό, μπορούν να θεωρηθούν ως NP-δύσκολα χωρίς, ωστόσο, να υπάρχει αυστηρή μαθηματική απόδειξη για αυτόν τον ισχυρισμό [261].

Σε αυτό το σημείο, λοιπόν, είναι προσήκον να γίνει μνεία στη χαλάρωση των μεταβλητών μέσω της οποίας επιδιώκεται η διευκόλυνση της επίλυσης των προβλημάτων. Μολονότι είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος όπως π.χ. στις αναφορές [237], [255] και [264], οδηγεί σε παραλλαγές των αρχικών προβλημάτων (4.24) και (4.26), με αποτέλεσμα οι αποδιδόμενες λύσεις να είναι, γενικά, μη βέλτιστες [261]. Αυτό συμβαίνει διότι, μετά από την επίλυση του παραλλαγμένου προβλήματος, η συνεχής μεταβλητή y_i πρέπει να λάβει είτε μοναδιαία είτε μηδενική τιμή ώστε να ληφθεί η απόφαση για την τοποθέτηση ή μη του i -οστού υποψήφιου αισθητήρα, αντίστοιχα. Η απλούστερη πρακτική είναι οι μεταβλητές $y_i, i = 1, \dots, m_c$ να κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά τιμών και, κατόπιν, οι m_s πρώτες μεταβλητές να λαμβάνουν μοναδιαία τιμή, ενώ οι υπόλοιπες $m_c - m_s$ λαμβάνουν μηδενική τιμή. Αυτή η προσεγγιστική επίλυση, γενικά, δημιουργεί ένα κενό (gap) μεταξύ της βέλτιστης λύσης του αρχικού και του παραλλαγμένου προβλήματος. Το μειονέκτημα αυτό καθιστά προτιμότερη την επίλυση των προβλημάτων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D και M χωρίς τη χαλάρωση των μεταβλητών. Όπως αναφέρεται και στην εργασία [264], άλλωστε, η ανάπτυξη αλγόριθμων και λογισμικού για την αποδοτική επίλυση προβλημάτων χωρίς την ανάγκη χαλάρωσης των κίεραίων μεταβλητών είναι, πλέον, μια εφικτή επιλογή.

Ένα, επιπλέον, ζήτημα το οποίο πρέπει να σημειωθεί αναφορικά με την επιλυσιμότητα των προβλημάτων

είναι το εξής: πρακτικά, η αποτίμηση του όρου
$$\sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbf{F}_i(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{i=1}^{m_c} \left(\frac{y_i}{\sigma_i^2} \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T \right)$$
 κατά την επίλυση του

προβλήματος από έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης οδηγεί σε απροσδιοριστία – ο λογάριθμος της ορίζουσας απειρίζεται στην περίπτωση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D – εφόσον αποδίδει μια μη αντιστρέψιμη μήτρα. Επομένως, το πρόβλημα μπορεί να εξεταστεί ως εξής: έστω ότι επιδιώκεται η ενίσχυση μιας υφιστάμενης υποδομής m_0 αισθητήρων μέσω της εγκατάστασης m_s νέων αισθητήρων. Τότε, θεωρώντας ότι η υφιστάμενη υποδομή χαρακτηρίζεται από μια αρχική

μήτρα FIM $\mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta})$, η τελική μήτρα FIM μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{y}) = \mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta}) + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta}) \quad (4.27)$$

Προκειμένου να είναι εφικτή επίλυση του προβλήματος με χρήση της έκφρασης (4.27), αναγκαία και ικανή συνθήκη είναι η αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta})$ ούτως ώστε οι ορίζουσες που προκύπτουν να είναι πάντα θετικές. Προφανώς, λοιπόν, πρέπει να ισχύει $m_0 \geq k$.

Σε παρόμοια συμπεράσματα οδηγεί η εξέταση της επιλυσιμότητας του βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M στην αρχική μορφή (4.25), δεδομένου ότι προϋποτίθεται η αντιστρεψιμότητα του όρου $\sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta})$. Μεγάλο ενδιαφέρον, ωστόσο, παρουσιάζει η εξέταση του θέματος για το ισοδύναμο πρόβλημα ημιορισμένου προγραμματισμού (4.26). Χρησιμοποιώντας την έκφραση (4.27) για τη διατύπωση του περιορισμού LMI, με απλές πράξεις προκύπτει εξής μορφή:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{y}) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq 0 &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta}) + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq \\ &\Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & 0 \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \begin{pmatrix} \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta}) & \mathbf{0}_{1 \times k} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} & 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{k \times k} & \mathbf{0}_{1 \times k} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} & 1 \end{pmatrix} \succeq 0, i = 1, \dots, k \end{aligned} \quad (4.28)$$

Όπως είναι φανερό, η συνθήκη για την αντιστρεψιμότητα του αρχικού μπλοκ μητρών δεν επιβάλλει καμία αντίστοιχη συνθήκη για τις μήτρες $\mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta})$ και $\sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_i(\boldsymbol{\theta})$. Αυτή η ιδιότητα είναι πολύ σημαντική καθώς καθιστά εφικτή τη βέλτιστη επιλογή αισθητήρων σε υποδομές των οποίων η μήτρα $\mathbb{F}_0(\boldsymbol{\theta})$ είναι μη αντιστρέψιμη. Επισημαίνεται ότι η έκφραση (4.27) ταυτίζεται με την κανονική μορφή (canonical form) ενός περιορισμού LMI, όπως αυτή ορίζεται στο Παράρτημα Β.

4.3 Προτεινόμενες Μέθοδοι Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών μονάδων σε Δίκτυα Διανομής

Στην παρούσα υποενότητα, περιγράφονται αναλυτικά οι προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής οι οποίες προκύπτουν μέσω της εφαρμογής των μοντέλων βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D και M σε μετρητικές υποδομές ΣΗΕ. Όπως προκύπτει από τη μελέτη της βιβλιογραφίας για τα δίκτυα διανομής στην υποενότητα 4.1.2., ο κύριος στόχος των σχετικών μεθόδων είναι η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης, άρα, ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός αποτελεί μια απολύτως ενδεδειγμένη μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης με τον ανωτέρω στόχο.

Το, βασιζόμενο στην πληροφορία του Fisher, συμπαγές θεωρητικό πλαίσιο για το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής αισθητήρων χρησιμοποιείται αυτούσιο για την ανάπτυξη των προτεινόμενων μεθόδων με βάση το στατικό μοντέλο WLS, το οποίο αναλύθηκε στην υποενότητα 2.2.3. Οι μόνες

τροποποιήσεις αφορούν στη χρήση εννοιών και μεγεθών από την ανάλυση ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, ισχύουν οι εξής αντιστοιχίσεις:

- Αντί του όρου «παρατήρηση», χρησιμοποιείται ο όρος «μέτρηση».
- Αντί του όρου «αισθητήρας», χρησιμοποιείται ο όρος «μετρητική μονάδα». Μια μετρητική μονάδα μπορεί να καταγράφει ένα ή περισσότερα ηλεκτρικά μεγέθη τα οποία αφορούν στο πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ σύμφωνα με την υποενότητα 2.2.3.1. Συνοψίζεται ότι πρόκειται για μετρήσεις ροών ενεργού και αέργου ισχύος κλάδων, εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος κόμβων καθώς και μέτρων τάσης κόμβων. Κάθε μετρούμενο ηλεκτρικό μέγεθος χαρακτηρίζεται και από την αντιστοιχη διασπορά, η οποία εξαρτάται, προφανώς, από την ακρίβεια της μετρητικής μονάδας.
- Ως άγνωστη, υπό εκτίμηση, παράμετρος $\boldsymbol{\theta}$ θεωρείται το διάνυσμα κατάστασης \boldsymbol{x} του υπό μελέτη ΣΗΕ. Επιπλέον, αντί των συμβολισμών $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z})$ και $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$, χρησιμοποιείται ο ενιαίος συμβολισμός $\hat{\boldsymbol{x}}$ τόσο για την εκτίμηση κατάστασης WLS ως διαδικασία όσο και για κάθε μεμονωμένη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης \boldsymbol{x} .

Το πλέον σημαντικό στοιχείο, ωστόσο, αφορά τη μήτρα κέρδους του στατικού μοντέλου WLS, η οποία αναλύθηκε εκτενώς στην υποενότητα 2.2.3.2. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι η μήτρα κέρδους ταυτίζεται με τη μήτρα FIM της εκτίμησης κατάστασης WLS. Κατά συνέπεια, η μήτρα συνδιακύμανσης του γραμμικοποιημένου συστήματος (2.13), στο οποίο βασίζεται η επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης WLS, ισούται με την αντίστροφη μήτρα FIM η οποία επιτυγχάνει το κάτω φράγμα Cramér-Rao [199]. Στο Παράρτημα Β, παρατίθεται η αναλυτική απόδειξη για την ταύτιση της μήτρας κέρδους με τη μήτρα FIM του στατικού μοντέλου WLS.

Αξιοποιώντας, όπως και στο Κεφάλαιο 3, το πόρισμα ότι, σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης, οι μεταβλητές κατάστασης εκτιμώνται με τις χειρότερες (μέγιστες) διασπορές σφαλμάτων, ως αρχικό σημείο \boldsymbol{x}^0 για την εξαγωγή του γραμμικοποιημένου συστήματος (2.13) μπορεί να χρησιμοποιηθεί το διάνυσμα κατάστασης, έστω \boldsymbol{x}^p , το οποίο αντιστοιχεί σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης του υπό μελέτη δικτύου [199]. Συνεπώς, με βάση την ακόλουθη ισότητα:

$$\boldsymbol{x}^0 = \boldsymbol{x}^p : \mathbf{C}(\hat{\boldsymbol{x}}) = \mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{x}^p) \quad (4.29)$$

η μήτρα $\mathbf{C}(\hat{\boldsymbol{x}})$ είναι σταθερή, δηλαδή δεν εξαρτάται από το διάνυσμα κατάστασης \boldsymbol{x} , και, ταυτόχρονα, είναι η βέλτιστη («ελάχιστη») μήτρα συνδιακύμανσης του σφάλματος της εκτίμησης κατάστασης WLS θεωρώντας το χειρότερο σενάριο ως προς τις διασπορές των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης.

Διευκρινίζεται ότι είναι σύνηθες να μην επανυπολογίζεται η μήτρα κέρδους $\mathbf{G}(\boldsymbol{x})$ ανά επανάληψη του αλγόριθμου Gauss-Newton λόγω της πολύ μικρής μεταβολής των στοιχείων της κατά την επίλυση του προβλήματος, όπως π.χ. στο πλαίσιο της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου. Συνεπώς, η αρχικοποίηση και, ακολούθως, η επίλυση του προβλήματος με βάση τη σχέση (4.29) είναι έγκυρη. Σε αυτή τη θεώρηση, βασίζονται και οι προτεινόμενες μέθοδοι.

Τέλος, μείζονος σημασίας είναι και η μοντελοποίηση των, υπό τοποθέτηση, μετρητικών μονάδων. Με βάση την ανάλυση της υποενότητας 2.2.3.2, η i -οστή επιμέρους μήτρα κέρδους $\mathbf{G}_i(\boldsymbol{x})$ περιέχει το πλήρες πληροφοριακό περιεχόμενο που φέρει η i -οστή μέτρηση. Ωστόσο, εν προκειμένω, επιδιώκεται η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων. Με δεδομένη την ταύτιση των μητρών κέρδους και FIM του στατικού μοντέλου WLS, θεωρείται ότι η i -οστή υποψήφια προς τοποθέτηση μετρητική μονάδα έχει

τη δυνατότητα μέτρησης m_i ηλεκτρικών μεγεθών, άρα, χαρακτηρίζεται από μια επιμέρους μήτρα FIM – και αντίστοιχα με την έκφραση (4.21) – της εξής μορφής:

$$\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{m_i} \left[\mathbf{H}_{j,c}^T(\mathbf{x}) \cdot \frac{1}{\sigma_{j,c}^2} \cdot \mathbf{H}_{j,c}(\mathbf{x}) \right] \in \mathbb{R}^{(2n-1) \times (2n-1)} \quad (4.30)$$

όπου $\mathbf{H}_{j,c}(\mathbf{x})$ είναι η, εκφυλισμένη σε διάνυσμα-γραμμή, Ιακωβιανή μήτρα του j – οστού ηλεκτρικού μεγέθους το οποίο μετρά η μετρητική μονάδα, $\sigma_{j,c}^2$ είναι η αντίστοιχη διασπορά και το γράμμα c χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι η μετρητική μονάδα, άρα, και οι μετρήσεις που περιλαμβάνει είναι υποψήφιας για τοποθέτηση.

Για παράδειγμα, αν η i – οστή υποψήφια μετρητική μονάδα καταγράφει το μέτρο τάσης και την έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο l του υπό μελέτη δικτύου, χαρακτηρίζεται από την εξής Ιακωβιανή μήτρα:

$$\mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}}^T \mathbf{h}_{i,c}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}}^T \begin{pmatrix} h_{v,l}^c(\mathbf{x}) \\ h_{pinj,l}^c(\mathbf{x}) \\ h_{qinj,l}^c(\mathbf{x}) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times (2n-1)} \quad (4.31)$$

όπου η συνάρτηση $h_{v,l}^c(\mathbf{x})$ ορίζεται στη σχέση (2.21) και οι συναρτήσεις $h_{pinj,l}^c(\mathbf{x})$ και $h_{qinj,l}^c(\mathbf{x})$ ορίζονται στη σχέση (2.19), με την πρώτη να αντιστοιχεί σε έγχυση ενεργού και τη δεύτερη σε έγχυση αέργου ισχύος. Διευκρινίζεται ότι το γράμμα c χρησιμοποιήθηκε ως εκθέτης, απλώς, για οικονομία χώρου.

Εφιστάται η προσοχή στο γεγονός ότι, γενικά, η Ιακωβιανή μήτρα που αντιστοιχεί σε μια μετρητική μονάδα έχει διαστάσεις $m_i \times (2n - 1)$. Προφανώς, αν η μετρητική μονάδα μετρά μόνο ένα ηλεκτρικό μέγεθος, τότε $m_i = 1$ και η αντίστοιχη Ιακωβιανή μήτρα εκφυλίζεται σε ένα διάνυσμα-γραμμή.

4.3.1 Μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής με χρήση του κριτηρίου D

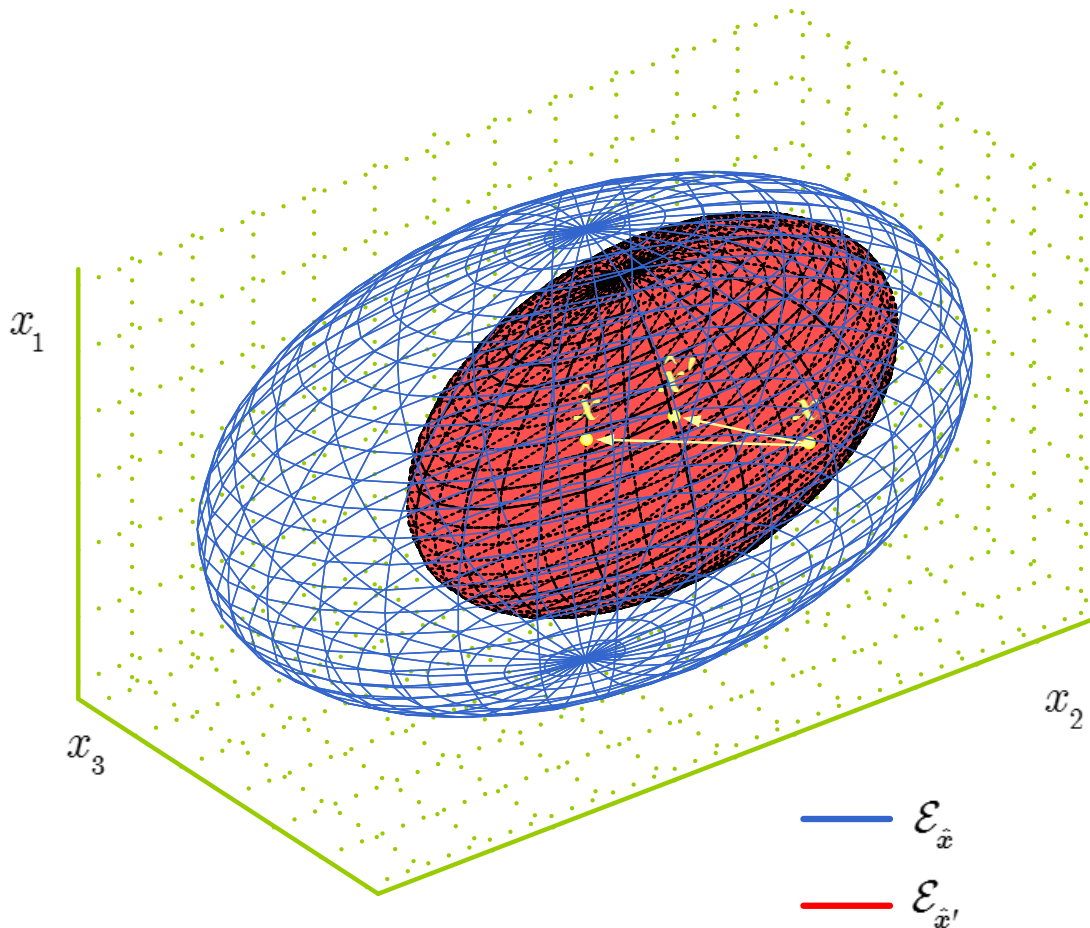
Έστω ένα δίκτυο διανομής n κόμβων με μια υφιστάμενη υποδομή μετρητικών μονάδων η οποία χαρακτηρίζεται από μια μήτρα FIM $\mathbb{F}_0(\mathbf{x})$. Σύμφωνα με όσα έχουν, ήδη, αναφερθεί, το πληροφοριακό περιεχόμενο των μετρήσεων που αποδίδει η μετρητική υποδομή ποσοτικοποιείται μέσω της μήτρας $\mathbb{F}_0(\mathbf{x})$. Επιδιώκεται η βέλτιστη επιλογή ενός προκαθορισμένου αριθμού m_s από ένα σύνολο m_c υποψήφιας μετρητικών μονάδων με στόχο η τελική υποδομή, η οποία αποτελείται από τις προϋπάρχουσες και τις βέλτιστα τοποθετημένες μετρητικές μονάδες, να χαρακτηρίζεται από τη βέλτιστη μήτρα FIM $\mathbb{F}(\mathbf{x})$ ως προς το κριτήριο D. Με άλλα λόγια, στόχος είναι η εύρεση εκείνου του συνδυασμού m_s μετρητικών μονάδων του οποίου η προσθήκη στην προϋπάρχουσα υποδομή αποδίδει ως τελική μήτρα FIM εκείνη με τη μέγιστη, δυνατή ορίζουσα. Επομένως, στην i – οστή υποψήφια μετρητική μονάδα ανατίθεται η μεταβλητή απόφασης y_i η οποία λαμβάνει μοναδιαία τιμή ($y_i = 1$) αν

αυτή, τελικά, επιλεγεί προς τοποθέτηση, ειδάλλως λαμβάνει μηδενική τιμή ($y_i = 0$). Άρα, το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D για την περίπτωση της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \max \Psi_D &= \ln \left(\det \mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p) \right) = \ln \left[\det \left(\mathbf{F}_0(\mathbf{x}^p) + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbf{F}_{i,c}(\mathbf{x}^p) \right) \right] \\ \text{s.t. } \mathbf{y}^T \mathbf{y} &= m_s, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c} \end{aligned} \quad (4.32)$$

όπου $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{m_c})^T$ είναι το διάνυσμα των ακέραιων (δυναδικών) μεταβλητών απόφασης, $\mathbb{Z}_2^{m_c} = \{0, 1\}^{m_c}$ είναι το σύνολο τιμών για δυαδικές μεταβλητές με διάσταση ίση m_c , $\mathbf{F}_{i,c}(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, m_c$ είναι οι επιμέρους μήτρες FIM των υποψήφιων μετρητικών μονάδων, $\mathbf{F}_0(\mathbf{x}^p)$ είναι η μήτρα FIM της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής, $\mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p)$ είναι η τελική, βέλτιστη μήτρα και \mathbf{x}^p είναι το διάνυσμα κατάστασης σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης του δικτύου ως προς το οποίο υπολογίζονται όλες οι μήτρες FIM του προβλήματος.

Στο Σχήμα 4.1, επιχειρείται να αποδοθεί γραφικά η επίδραση της συρρίκνωσης του ελλειψοειδούς εμπιστοσύνης $\mathcal{E}_{\hat{\mathbf{x}}}$ που αντιστοιχεί στο σφάλμα $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$. Το ελλειψοειδές $\mathcal{E}_{\hat{\mathbf{x}}}$ έχει κέντρο το σημείο $\hat{\mathbf{x}}$ και καταλαμβάνει τον ελάχιστο όγκο χώρου ο οποίος περιέχει το σφάλμα $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ με πιθανότητα ξ , σύμφωνα με την ανάλυση στην υποενότητα 4.2.2.1. Μέσω της προσθήκης νέων μετρητικών μονάδων, προκύπτει ένα νέο ελλειψοειδές $\mathcal{E}_{\hat{\mathbf{x}}'}$ με κέντρο το σημείο $\hat{\mathbf{x}}'$ και μικρότερο όγκο στον οποίο περιέχεται το σφάλμα $\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}'$ με πιθανότητα ξ . Άρα, η εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}'$ αναμένεται να είναι ακριβέστερη συγκριτικά με την αρχική εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}$, κάτι το οποίο παρατηρείται στο Σχήμα 4.1, καθώς ισχύει $\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}'\| < \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|$, όπου $\|\cdot\|$ είναι το σύμβολο της Ευκλείδειας νόρμας.



Σχήμα 4.1: Γραφική απεικόνιση βελτίωσης της ακρίβειας της εκτιμώμενης κατάστασης $\hat{x} \in \mathbb{R}^3$ μέσω της συρρίκνωσης του ελλειψοειδούς $\mathcal{E}_{\hat{x}}$ σε $\mathcal{E}_{\hat{x}'}$.

Τέλος, προκειμένου να είναι εφικτή η επίλυση του προβλήματος (4.32), αναγκαία και ικανή συνθήκη είναι η αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}_0(\mathbf{x}^p)$, κατ' αντιστοιχία με όσα έχουν προαναφερθεί στην υποενότητα

4.2.2.4. Η αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}_0(\mathbf{x}^p)$, βάσει του ορισμού της αριθμητικής παρατηρησιμότητας, ισοδυναμεί με την προϋπόθεση το υπό μελέτη δίκτυο διανομής να είναι, εξ αρχής, παρατηρήσιμο. Κατά συνέπεια, η προτεινόμενη μέθοδος με βάση το κριτήριο D μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε δίκτυα διανομής τα οποία είναι παρατηρήσιμα με βάση την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή τους.

4.3.2 Μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής με χρήση του κριτηρίου M

Για τη διατύπωση της προτεινόμενης μεθόδου με βάση το κριτήριο M, ισχύουν οι ίδιες θεωρήσεις με αυτές της υποενότητας 4.3.1. Η διαφορά έγκειται στο στόχο της μεθόδου, ο οποίος είναι η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού m_s από ένα σύνολο m_c μετρητικών μονάδων ώστε η αντίστροφη μήτρα FIM της τελικής μετρητικής υποδομής να είναι βέλτιστη ως προς το κριτήριο M, δηλαδή να ελαχιστοποιείται το μέγιστο διαγώνιο στοιχείο της. Χρησιμοποιώντας, εκ νέου, δυαδικές μεταβλητές απόφασης $y_i, i = 1, \dots, m_c$, η i -οστή υποψήφια μετρητική μονάδα επιλέγεται προς τοποθέτηση σε περίπτωση

που η μεταβλητή απόφασης y_i λάβει μοναδιαία τιμή ($y_i = 1$), ειδάλλως η τοποθέτησή της απορρίπτεται ($y_i = 0$). Έτσι, το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M για την περίπτωση της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
\min \quad & \Psi_M = t \\
\text{s.t.} \quad & t \geq \mathbf{e}_i^T \mathbb{F}^{-1}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p) \mathbf{e}_i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq 0 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}_0(\mathbf{x}^p) + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x}^p) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succeq 0 \\
& \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \mathbb{F}_0(\mathbf{x}^p) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & 0 \end{pmatrix} + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \begin{pmatrix} \mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x}^p) & \mathbf{0}_{1 \times (2n-1)} \\ \mathbf{0}_{(2n-1) \times 1} & 0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{(2n-1) \times (2n-1)} & \mathbf{0}_{1 \times (2n-1)} \\ \mathbf{0}_{(2n-1) \times 1} & 1 \end{pmatrix} \succeq 0, \quad i = 1, \dots, 2n-1 \\
& \mathbf{y}^T \mathbf{y} = m_s, \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c}
\end{aligned} \tag{4.33}$$

όπου $t \in \mathbb{R}$, $\mathbf{e}_i \in \mathbb{R}^{2n-1}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με μόνο μη μηδενικό το i -οστό στοιχείο του,

$\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{m_c})^T$ και όλες οι εμπλεκόμενες μήτρες FIM υπολογίζονται και πάλι στο σημείο \mathbf{x}^p .

Μειζονος σημασίας είναι η παρατήρηση ότι η επίλυση του προβλήματος (4.33) είναι εφικτή χωρίς να προϋποτίθεται η αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}_0(\mathbf{x}^p)$, και' αντιστοιχία με όσα έχουν προαναφερθεί στην υποενότητα 4.2.2.4. Ως εκ τούτου, βάσει του ορισμού της αριθμητικής παρατηρησιμότητας, το υπό μελέτη δίκτυο διανομής δεν απαιτείται να είναι παρατηρήσιμο, οπότε, η προτεινόμενη μέθοδος με βάση το κριτήριο M μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα διανομής τα οποία είτε είναι παρατηρήσιμα με βάση την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή τους είτε όχι. Σε κάθε περίπτωση, όμως, ο περιορισμός LMI εξασφαλίζει ότι η τελική μήτρα $\mathbb{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p)$ είναι θετικά ορισμένη, άρα, αντιστρέψιμη αφού ισχύει η εξής συνεπαγωγή:

$$\begin{pmatrix} \mathbb{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p) & \mathbf{e}_i \\ \mathbf{e}_i^T & t \end{pmatrix} \succ 0 \Rightarrow \mathbb{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^p) \succ 0, \quad i = 1, \dots, 2n-1 \tag{4.34}$$

Συνεπώς, είναι δυνατή η επίτευξη παρατηρησιμότητας και η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης ως προς το κριτήριο M μέσω ενός βέλτιστου συνδυασμού μετρητικών μονάδων.

4.4 Προτεινόμενη Μέθοδος Βέλτιστης Επιλογής Μονάδων PMU σε Συστήματα Μεταφοράς

Μολονότι το κύριο ενδιαφέρον στα δίκτυα διανομής είναι η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης με το βέλτιστο πειραματικό σχεδιασμό να αναδεικνύεται ως πολύτιμο εργαλείο για την ανάπτυξη σχετικών μεθόδων, στα συστήματα μεταφοράς, όπως έχει προαναφερθεί στην υποενότητα 4.1.1, κύριο μέλημα για τις μεθόδους βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων συνιστά η επίτευξη παρατηρησιμότητας με τον ελάχιστο δυνατό αριθμό εγκαταστάσεων. Ακολουθώντας τη σύγχρονη τάση στα ΣΗΕ, η προτεινόμενη μέθοδος αφορά τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασθαιτών, δηλαδή στην εύρεση του ελάχιστου αριθμού και των σημείων εγκατάστασης μονάδων PMU σε ένα σύστημα προκειμένου να εξασφαλίζεται η παρατηρησιμότητά του.

Τα απαραίτητα ερεθίσματα για την τεκμηρίωση και τη διατύπωση της προτεινόμενης μεθόδου έχουν, ήδη, δοθεί σε προηγούμενες ενότητες. Τόσο στην αναφορά [255] όσο και στην ανάλυση στην υποενότητα 4.3.2, τεκμηριώνεται ότι η εκπλήρωση της αυστηρής συνθήκης ανισότητας σε έναν περιορισμό LMI υποχρεώνει τη μήτρα FIM μιας μετρητικής υποδομής να είναι θετικά ορισμένη και καθιστά το, επιτηρούμενο από την υποδομή, σύστημα παρατηρήσιμο. Επομένως, γίνεται φανερό ότι ο ημιορισμένος προγραμματισμός, πέραν από τα προβλήματα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU.

Βασική υπόθεση για την ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι κάθε υποψήφια προς τοποθέτηση μονάδα PMU διαθέτει όσα κανάλια χρειάζονται προκειμένου να μετρά το φασιθέτη τάσης του κόμβου όπου προορίζεται να εγκατασταθεί, καθώς και τους φασιθέτες ρεύματος σε όλους τους προσκείμενους σε αυτόν κλάδους. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη μέθοδος αφορά συστήματα μεταφοράς, σύμφωνα με την υποενότητα 2.2.3.1, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα το μοντέλο DC για τους υπολογισμούς των Ιακωβιανών μητρών οι οποίες εμπλέκονται στην επίλυση του προβλήματος. Η χρήση του μοντέλου DC γίνεται για πρακτικούς λόγους καθώς είναι συμφέρουσα υπολογιστικά και δεν περιορίζει τη λειτουργικότητα της προτεινόμενης μεθόδου, η οποία λειτουργεί απρόσκοπτα και στην περίπτωση του πλήρους, στατικού μοντέλου WLS (εναλλακτικά, μοντέλο AC). Επιπλέον, όπως έχει συζητηθεί στην ενότητα 2.3, το μοντέλο DC αξιοποιείται ευρέως σε μεθόδους ανάλυσης παρατηρησιμότητας.

Η διατύπωση του προβλήματος στηρίζεται στις ίδιες θεωρήσεις με αυτές των προαναφερθεισών μεθόδων για τα δίκτυα διανομής. Έστω ένα σύστημα μεταφοράς n κόμβων όπου προϋπάρχει μία μετρητική υποδομή η οποία δεν εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητά του. Έτσι, χαρακτηρίζεται από μια μήτρα FIM $\mathbf{F}_0(\mathbf{x})$, όπου \mathbf{x} το διάνυσμα κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος, η οποία δεν είναι θετικά ορισμένη. Ζητούμενο, λοιπόν, είναι η εύρεση του ελάχιστου αριθμού μονάδων PMU των οποίων η προσθήκη στην υφιστάμενη μετρητική υποδομή καθιστά το υπό μελέτη σύστημα παρατηρήσιμο. Ισοδύναμα, επιδιώκεται η μήτρα FIM που αντιστοιχεί στην τελική μετρητική υποδομή να είναι θετικά ορισμένη, δηλαδή πλήρους βαθμού και αντιστρέψιμη. Για αυτό σκοπό, θεωρείται ένα διάνυσμα ακέραιων (δυαδικών) μεταβλητών απόφασης $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_{m_c})^T$ με διάσταση $m_c \times 1$, όπου m_c ο αριθμός των υποψήφιων μονάδων PMU. Η μεταβλητή απόφασης y_i σηματοδοτεί την τοποθέτηση ή μη της i -οστής υποψήφιας μονάδας PMU στο σύστημα μεταφοράς όταν λαμβάνει μοναδιαία ($y_i = 1$) ή μηδενική τιμή ($y_i = 0$), αντιστοίχως. Συνεπώς, το πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{w}^T \mathbf{y} \\ & \text{s.t. } \mathbf{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0) = \mathbf{F}_0(\mathbf{x}^0) + \sum_{i=1}^{m_c} y_i \mathbf{F}_{i,c}(\mathbf{x}^0) \succ 0 \\ & \mathbf{y} \in \mathbb{Z}_2^{m_c} \end{aligned} \quad (4.35)$$

όπου $\mathbf{w}^T \mathbf{y}$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση του συνολικού κόστους, $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_{m_c})^T \in \mathbb{R}^{m_c}$ αποτελεί το διάνυσμα συντελεστών βάρους με το στοιχείο w_i να είναι ενδεικτικό του κόστους εγκατάστασης της i -οστής μονάδας PMU, $\mathbb{Z}_2^{m_c} = \{0, 1\}^{m_c}$ είναι το σύνολο τιμών για δυαδικές

μεταβλητές με διάσταση ίση m_c , $\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x}^0)$, $i = 1, \dots, m_c$ είναι οι επιμέρους μήτρες FIM των υποψήφιων μονάδων PMU, $\mathbb{F}_0(\mathbf{x}^0)$ είναι η μήτρα FIM της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής, $\mathbb{F}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0)$ είναι η μήτρα FIM της τελικής μετρητικής υποδομής και ως \mathbf{x}^0 , ως προς το οποίο υπολογίζονται όλες οι μήτρες FIM του προβλήματος, λαμβάνεται, συνήθως, το λεγόμενο “flat voltage profile”, όπως αυτό έχει οριστεί στην υποενότητα 2.2.3. Σημειώνεται ότι, αν τεθεί $w_i = 1$, $i = 1, \dots, m_c$, όλες οι μονάδες PMU έχουν την ίδια προτεραιότητα για να τοποθετηθούν. Τέλος, ο δείκτης c χρησιμοποιείται για να δηλώσει ότι οι μονάδες PMU είναι υποψήφιες για τοποθέτηση.

Όπως παρατηρείται στη διατύπωση (4.35), το πρόβλημα είναι Boolean κυρτό, καθώς περιλαμβάνει μία γραμμική αντικειμενική συνάρτηση, έναν περιορισμό LMI και ακέραιες μεταβλητές. Ο εν λόγω περιορισμός LMI, ο οποίος έχει πιο απλή μορφή συγκριτικά με αυτόν του προβλήματος (4.33), εξασφαλίζει ότι το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί χωρίς να προϋποτίθεται η αντιστρεψιμότητα της μήτρας $\mathbb{F}_0(\mathbf{x}^0)$. Επιπλέον, και στο προκείμενο πρόβλημα, μπορεί να εφαρμοστεί χαλάρωση του περιορισμού περί ακέραιων μεταβλητών με στόχο να διευκολυνθεί η επίλυσή του χωρίς, όμως, να εξασφαλίζεται η παροχή βέλτιστων λύσεων.

Κομβικής σημασίας είναι η μοντελοποίηση των, υπό τοποθέτηση, μονάδων PMU. Κατ’ αντιστοιχία με την ενότητα 4.3, το πλήρες πληροφοριακό περιεχόμενο που φέρει η i -οστή μονάδα PMU περιέχεται στην επιμέρους μήτρα FIM $\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x})$. Προφανώς, σε αντίθεση με τις προτεινόμενες μεθόδους στην ενότητα 4.3, όλες οι επιμέρους μήτρες $\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, m_c$ έχουν την ίδια μορφή, με μόνη διαφορά τη διάστασή τους: η μήτρα FIM $\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x})$ έχει διάσταση $m_i \times 1$, όπου m_i ο συνολικός αριθμός φασιθετών τάσης και ρεύματος που μετρά η i -οστή μονάδα PMU.

Για τη δόμηση της Ιακωβιανής μήτρας της i -οστής μονάδας PMU, έστω $\mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x})$, η οποία προορίζεται για εγκατάσταση στον κόμβο l , χρησιμοποιούνται οι εξής συναρτήσεις μετρήσεων:

1. Δεδομένου ότι όλα τα μέτρα τάσης θεωρούνται μοναδιαία, μελετάται μόνο η συνάρτηση μέτρησης για τη γωνία τάσης του κόμβου, έστω δ_l , η οποία περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$h_{\delta_l}(\mathbf{x}) = \delta_l \quad (4.36)$$

2. Δεδομένου ότι μελετώνται μόνο μεγέθη ενεργού ισχύος, οι συναρτήσεις μετρήσεων για τις ροές ρεύματος των προσκειμένων κλάδων στον κόμβο l αφορούν μόνο την πραγματική συνιστώσα τους. Μάλιστα, οι σχετικές εξισώσεις αποδεικνύεται ότι λαμβάνουν ταυτόσημη μορφή με τις εκφράσεις των αντίστοιχων ροών ενεργού ισχύος [140]. Πιο αναλυτικά, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.2.3.1, οι τιμές των παραμέτρων των κλάδων ενός ΣΗΕ δεν έχουν καμία επίδραση στην παρατηρησιμότητά του. Έτσι, αν όλες οι επαγωγικές αντιδράσεις σειράς τεθούν ίσες με 1,0 p.u., η εξίσωση που περιγράφει την πραγματική συνιστώσα της ροής ρεύματος μεταξύ του κόμβου l και ενός γειτονικού του κόμβου, έστω k , ταυτίζεται με την έκφραση (2.24) και λαμβάνει τη μορφή:

$$h_{I_{lk}}(\mathbf{x}) = \delta_l - \delta_k \quad (4.37)$$

Επομένως, θεωρώντας ότι η εγκατάσταση μίας μονάδας PMU στον κόμβο l συνεισφέρει m_i μετρήσεις, οι $m_i - 1$ από αυτές αφορούν τις ροές ρεύματος στους προσκείμενους σε αυτόν κλάδους και η Ιακωβιανή μήτρα $\mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x})$ λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}}^T \mathbf{h}_{i,c}(\mathbf{x}) = \nabla_{\mathbf{x}}^T \begin{pmatrix} h_{\delta_i}(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ h_{I_k}(\mathbf{x}) \\ \vdots \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m_i \times (2n-1)} \quad (4.38)$$

Λαμβάνοντας ως δεδομένο ότι όλες οι μετρήσεις φασιθετών εμφανίζουν την ίδια διασπορά, έστω ίση με $\sigma_{i,c}^2$, η μήτρα FIM $\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x})$ υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathbb{F}_{i,c}(\mathbf{x}) = \mathbf{H}_{i,c}^T(\mathbf{x}) \cdot \frac{1}{\sigma_{i,c}^2} \mathbf{I} \cdot \mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{(2n-1) \times (2n-1)} \quad (4.39)$$

όπου \mathbf{I} είναι η μοναδιαία μήτρα με διαστάσεις $m_i \times m_i$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΜΕΘΟΔΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ

ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Στόχο του παρόντος κεφαλαίου αποτελεί η αξιολόγηση των μεθόδων βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων οι οποίες προτάθηκαν στο Κεφάλαιο 4 μέσω της εφαρμογής τους σε πρότυπα δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς. Αρχικά, παρουσιάζονται οι στόχοι καθώς και το γενικό πλαίσιο εφαρμογής των τριών προτεινόμενων μεθόδων, ενώ περιγράφεται σε αδρές γραμμές η εργαλειοθήκη YALMIP (YALMIP toolbox) η οποία αποτελεί τον υπολογιστικό πυρήνα του προτεινόμενων μοντέλων βελτιστοποίησης. Κατόπιν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου D σε δίκτυο διανομής προερχόμενο από τη διεθνή βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη μέθοδο βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU σε πρότυπα συστήματα μεταφοράς IEEE, καθώς και σε ειδικότερο τμήμα του πολωνικού συστήματος μεταφοράς. Τέλος, γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου M σε δύο δίκτυα διανομής προερχόμενα από τη διεθνή βιβλιογραφία.

5.1 Γενικό Πλαίσιο Εφαρμογής των Προτεινόμενων Μεθόδων

Μολονότι εμφανίζουν διαφοροποιήσεις ως προς το κριτήριο, τη διατύπωση και το στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης στο οποίο βασίζονται, οι μέθοδοι που προτάθηκαν στο Κεφάλαιο 4 διέπονται από μία κοινή «λογική» η οποία βασίζεται στην πληροφορία του Fisher: κάθε μεμονωμένη μέτρηση, μετρητική υποδομή και μονάδα αποτιμάται ως προς το πληροφοριακό της περιεχόμενο μέσω μιας μοναδικής μήτρας FIM. Η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων, υπολογιστικά, προκύπτει από τη διερεύνηση ενός συνόλου συνδυασμών μέσω της επαναληπτικής άθροισης επιμέρους μητρών FIM έως ότου βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός-λύση ως προς το εκάστοτε κριτήριο κατά το πρότυπο της κεντρικής σχέσης (4.27) στην υποενότητα 4.2.2.4. Επομένως, είναι δυνατόν να τεθεί ένα γενικό πλαίσιο εφαρμογής και των τριών μεθόδων, το οποίο στηρίζεται σε μία ενιαία υπολογιστική διαδικασία. Προτού περιγραφεί το εν λόγω πλαίσιο, είναι απαραίτητο να αναφερθούν τα επιμέρους χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές που αφορούν την ορθή λειτουργία κάθε μεθόδου. Όλες οι σχετικές πληροφορίες συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.1, όπου, για λόγους οικονομίας χώρου, οι μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σε δίκτυα διανομής αναφέρονται μέσω του κριτηρίου το οποίο χρησιμοποιούν.

Ως προς το ζήτημα της παρατηρησιμότητας, παρατηρείται ότι είναι απαραίτητο να ελέγχεται αν το υπό μελέτη δίκτυο διανομής είναι παρατηρήσιμο προτού εφαρμοστεί η μέθοδος του κριτηρίου D. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται το μοντέλο μειωμένης τάξης το οποίο αναλύθηκε στην υποενότητα 2.3.2. Αντιθέτως, δεν υπάρχει αντίστοιχη ανάγκη για τις άλλες δύο μεθόδους. Μάλιστα, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εμμέσως, και για τη διάγνωση της κατάστασης του υπό μελέτη συστήματος μεταφοράς: σε περίπτωση που το σύστημα είναι εξ αρχής παρατηρήσιμο, δεν τοποθετείται καμία νέα μονάδα PMU στην προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή, άρα, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (4.35) λαμβάνει μηδενική τιμή. Άμεση συνέπεια των παραπάνω είναι η διαφοροποίηση στον τρόπο υπολογισμού του διάνυσματος κατάστασης \mathbf{x}^0 . Έτσι, για τη μέθοδο του κριτηρίου M, το διάνυσμα \mathbf{x}^0 μπορεί να υπολογιστεί μέσω εκτίμησης κατάστασης, σε περίπτωση που το

υπό μελέτη δίκτυο είναι εξαρχής παρατηρήσιμο. Σε αντίθετη περίπτωση, είναι δυνατή η χρήση ανάλυσης ροών φορτίου ή του “flat voltage profile”. Επίσης, εφόσον η προτεινόμενη μέθοδος για τις μονάδες PMU βασίζεται στο μοντέλο DC και εφαρμόζεται, κατά βάση, σε μη παρατηρήσιμα συστήματα, η επιλογή του “flat voltage profile” της είναι απολύτως αιτιολογημένη.

Πίνακας 5.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά και προδιαγραφές των προτεινόμενων μεθόδων.

| Μέθοδος | Αρχική κατάσταση παρατηρησιμότητας | Υπολογισμός αρχικού διανύσματος κατάστασης x^0 | Αριθμός μετρητικών μονάδων προς επιλογή |
|---------------------|------------------------------------|---|---|
| Χρήση κριτηρίου D | Παρατηρήσιμο | Εκτίμηση κατάστασης | Προκαθορισμένος |
| Χρήση κριτηρίου M | Χωρίς περιορισμό | Εκτίμηση κατάστασης ή ανάλυση ροών φορτίου ή “flat voltage profile” | Προκαθορισμένος |
| Επιλογή μονάδων PMU | Χωρίς περιορισμό | “Flat voltage profile” | Υπό ελαχιστοποίηση |

Σημαντική παράμετρο συνιστά και ο αριθμός των υπό τοποθέτηση μετρητικών μονάδων όπου αυτός επιβάλλεται να προκαθοριστεί, δηλαδή, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, για τις μεθόδους των κριτηρίων D και M. Προφανώς, ο καθορισμός του γίνεται με βάση οικονομικά και γεωγραφικά κριτήρια από τον ελάχιστο διαχειριστή του δικτύου διανομής. Για παράδειγμα, θεωρώντας τη διαθεσιμότητα περιορισμένων οικονομικών πόρων και ένα συγκεκριμένο κόστος ανά μετρητική μονάδα, μπορεί να προκύψει ο αριθμός των μετρητικών μονάδων οι οποίες είναι εφικτό να εγκατασταθούν. Εναλλακτικά, ο αριθμός αυτός μπορεί να προκύψει από την ανάγκη για την ενίσχυση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης σε τμήμα του δικτύου στο οποίο εμφανίζονται υψηλότερα σφάλματα εκτίμησης συγκριτικά με το υπόλοιπο δίκτυο. Εντοπίζοντας το τμήμα αυτό, μπορεί να ποσοτικοποιηθεί και ο αριθμός των απαιτούμενων μετρητικών μονάδων. Ειδικά για τη μέθοδο του κριτηρίου M, ωστόσο, χρειάζεται προσοχή στην περίπτωση που μελετάται ένα μη παρατηρήσιμο δίκτυο, καθώς πρέπει να εξασφαλίζεται ότι ο αριθμός των μετρητικών μονάδων που θα τοποθετηθούν επαρκεί ώστε το υπό μελέτη δίκτυο να καταστεί τελικώς παρατηρήσιμο. Το ζήτημα αυτό θα διευθετηθεί σε επόμενη ενότητα η οποία αφορά αποκλειστικά την εφαρμογή της μεθόδου του κριτηρίου M.

Με βάση το προτεινόμενο πλαίσιο, μπορεί να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των μεθόδων σε διάφορα δίκτυα διανομής και συστήματα μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, ζητούμενο, αρχικά, είναι να διερευνηθεί η δυνατότητα κάθε μεθόδου να παρέχει λύση κατά την εφαρμογή της σε οποιοδήποτε σύστημα/δίκτυο μελετάται, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές του Πίνακα 5.1. Κατόπιν, είναι απαραίτητο να επαληθευτεί αν η παρεχόμενη λύση είναι η βέλτιστη. Για τις μεθόδους των κριτηρίων D και M, η επαλήθευση της βέλτιστης λύσης απαιτείται να γίνει μέσω διεξοδικής έρευνας στο πλήρες σύνολο των εφικτών λύσεων του προβλήματος, με όσες δυσκολίες αυτή η διαδικασία συνεπάγεται. Τελικό ζητούμενο είναι η αξιολόγηση της επίδρασης της λύσης στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά. Για τη μέθοδο βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU, η εξακρίβωση της βέλτιστης λύσης μπορεί να γίνει μέσω σύγκρισης των αποτελεσμάτων της με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μεθόδων για το ίδιο σύστημα δοκιμών. Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της επίδρασης της προϋπάρχουσας

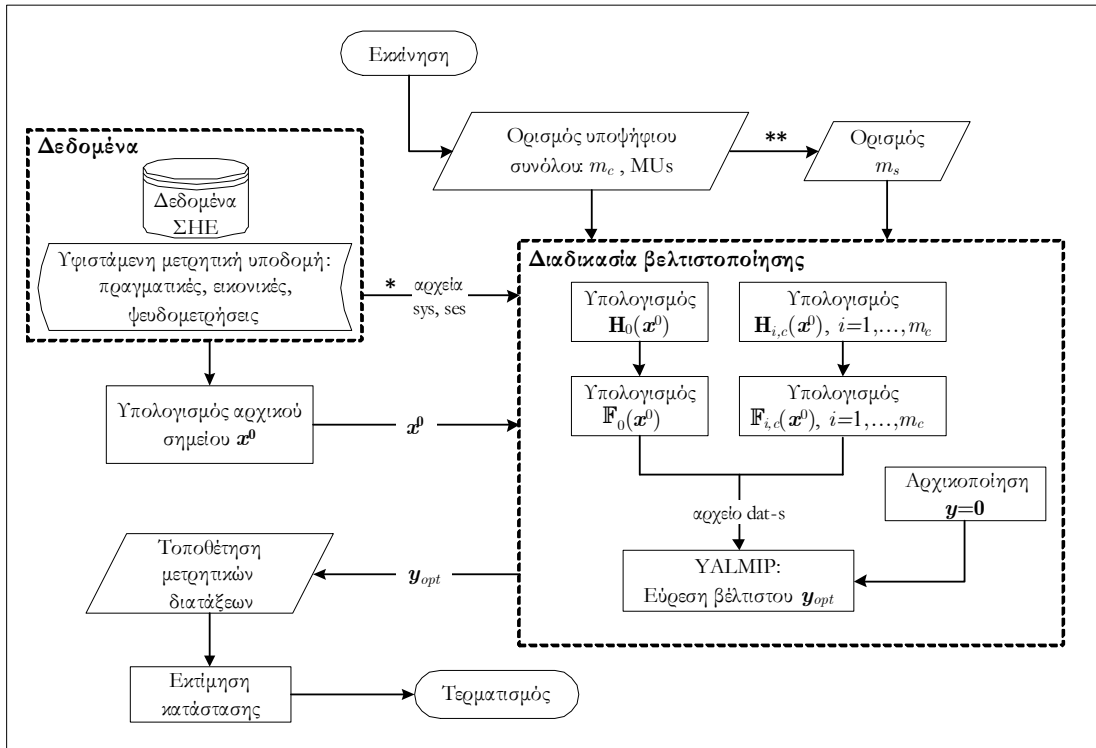
μετρητικής υποδομής τόσο ποσοτικά (ελάχιστος αριθμός) όσο και ποιοτικά (θέσεις εγκατάστασης) στη βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων PMU.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η μέθοδος του κριτηρίου D αξιολογείται με βάση την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU με βάση την επίτευξη παρατηρησιμότητας και η μέθοδος του κριτηρίου M με βάση και τους δύο παράγοντες. Παρακάτω, τίθενται ερευνητικά ερωτήματα αναφορικά με την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων:

5. Μπορεί η μέθοδος του κριτηρίου D να εφαρμοστεί σε δίκτυα διανομής υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές του Πίνακα 5.1; Αν ναι, είναι βέλτιστες οι λύσεις που παρέχει; Πώς επιδρά η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων ποιοτικά και ποσοτικά στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης του υπό μελέτη δικτύου; Πόσο υπολογιστικό φόρτο συνεπάγεται η εφαρμογή της μεθόδου;
6. Μπορεί η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU να εφαρμοστεί σε συστήματα μεταφοράς υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές του Πίνακα 5.1; Αν ναι, είναι βέλτιστες οι λύσεις που παρέχει; Πώς επιδρά η προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή ποιοτικά και ποσοτικά στη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU; Πόσο υπολογιστικό φόρτο συνεπάγεται η εφαρμογή της μεθόδου;
7. Μπορεί η μέθοδος του κριτηρίου M να εφαρμοστεί σε εξαρχής παρατηρήσιμα ή μη δίκτυα διανομής υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται οι αντίστοιχες προδιαγραφές του Πίνακα 5.1; Αν ναι, είναι βέλτιστες οι λύσεις που παρέχει; Σε περίπτωση που το υπό μελέτη δίκτυο είναι αρχικά μη παρατηρήσιμο, καθίσταται παρατηρήσιμο μέσω της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων; Επίσης, πώς επιδρά αυτή ποιοτικά και ποσοτικά στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης του υπό μελέτη δικτύου; Πόσο υπολογιστικό φόρτο συνεπάγεται η εφαρμογή της μεθόδου;

5.1.1 Περιγραφή της υπολογιστικής διαδικασίας

Στο Σχήμα 5.1, απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας στο οποίο βασίζεται η εφαρμογή των τριών μεθόδων. Παρατηρείται ότι τα δεδομένα του υπό μελέτη ΣΗΕ, ήτοι το μοντέλο και οι διαθέσιμες μετρήσεις από την υφιστάμενη μετρητική υποδομή, αφενός μεν παρέχονται ως αρχεία εισόδου τύπου sys και ses – σύμφωνα με την πρότυπη μορφή ΡΤΠ (έκδοση 23) [198] – στη διαδικασία βελτιστοποίησης, αφετέρου δε αξιοποιούνται προκειμένου να υπολογιστεί το αρχικό δάνυσμα κατάστασης \mathbf{x}^0 το οποίο παρέχεται, επίσης, ως είσοδος στη διαδικασία. Προφανώς, ο τρόπος υπολογισμού του επιλέγεται με κριτήριο την αρχική κατάσταση παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη ΣΗΕ, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του Πίνακα 5.1. Δεδομένα εισόδου συνιστούν, επίσης, το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων και ο αριθμός των μονάδων που είναι επιθυμητό να εγκατασταθούν. Οι μόνες διαφοροποιήσεις για την εφαρμογή των μεθόδων επισημαίνονται με αστερίσκους. Με μονό αστερίσκο (*), επισημαίνεται ότι η μέθοδος του κριτηρίου D πρέπει να εφαρμόζεται μόνο σε εξαρχής παρατηρήσιμα δίκτυα διανομής, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 5.1. Με διπλό αστερίσκο (**), επισημαίνεται ότι δεν ισχύει ο καθορισμός του αριθμού m_s για τη μέθοδο βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής της υπολογιστικής διαδικασίας η οποία ακολουθείται για την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων. Με αστερίσκους επισημαίνονται οι επιμέρους διαφοροποιήσεις.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποτελεί τον πυρήνα της υπολογιστικής διαδικασίας· αρχικά, με βάση το διάνυσμα \mathbf{x}^0 , υπολογίζονται η Ιακωβιανή μήτρα της υφιστάμενης μετρητικής υποδομής $\mathbf{H}_0(\mathbf{x}^0)$, καθώς και οι Ιακωβιανές μήτρες $\mathbf{H}_{i,c}(\mathbf{x}^0), i = 1, \dots, m_c$ των υποψήφιων μετρητικών μονάδων όπως στην παραδειγματική σχέση (4.31) ή των υποψήφιων μονάδων PMU σύμφωνα με τη γενική σχέση (4.38). Ακολούθως, γίνεται ο υπολογισμός της μήτρας FIM $\mathbf{F}_0(\mathbf{x}^0)$ και των επιμέρους μητρών FIM $\mathbf{F}_{i,c}(\mathbf{x}^0), i = 1, \dots, m_c$ σύμφωνα με τις γενικές σχέσεις (4.30), για τις μεθόδους των κριτηρίων D και M, και (4.39), για τη μέθοδο βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU. Τα απαραίτητα δεδομένα όλων των εμπλεκόμενων μητρών FIM, δηλαδή οι τιμές των διαγώνιων στοιχείων τους, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των μη μηδενικών στοιχείων του άνω τριγωνικού τμήματός τους, δεδομένης της συμμετρίας τους, αποθηκεύονται σειρικά σε ένα αρχείο τύπου dat-s [278] το οποίο, κατόπιν, παρέχεται ως είσοδος στην εργαλειοθήκη YALMIP [279] προκειμένου να εξαχθεί η βέλτιστη λύση \mathbf{y}_{opt} . Η εργαλειοθήκη YALMIP θα αναλυθεί στην επόμενη υποενότητα, ενώ θα αναφερθεί και το λογισμικό επίλυσης το οποίο χρησιμοποιείται για κάθε μέθοδο.

Στην έξοδό της, η διαδικασία βελτιστοποίησης παρέχει τη βέλτιστη λύση \mathbf{y}_{opt} , άρα, υποδεικνύει τη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων ως προς το κριτήριο που μελετάται. Οι μήτρες FIM των επιλεγμένων μετρητικών μονάδων προσδιορίζουν τις θέσεις εγκατάστασής τους, τον αριθμό, τον τύπο και την ακρίβεια των ηλεκτρικών μεγεθών τα οποία καταγράφουν. Υπολογιστικά, η έννοια της επιλογής σημαίνει την άθροιση των επιλεγμένων μητρών FIM στη μήτρα $\mathbf{F}_0(\mathbf{x}^0)$ της υφιστάμενης μετρητικής

υποδομής. Τέλος, εκτελείται ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης WLS με βάση την τελική μετρητική υποδομή με στόχο:

1. να επιβεβαιωθεί η επίτευξη παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη συστήματος/δικτύου σε περίπτωση που εφαρμόζεται η μέθοδος του κριτηρίου M ή η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU, και
2. να εξαχθεί το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης \hat{x} σε περίπτωση εφαρμογής της μεθόδου του κριτηρίου D ή M .

Η υπολογιστική διαδικασία αναπτύχθηκε εξ' ολοκλήρου στο περιβάλλον του λογισμικού MATLAB [196]. Επιπλέον της εργαλειοθήκης YALMIP, η οποία λειτουργεί αποκλειστικά στο περιβάλλον του MATLAB, έγινε χρήση στοιχείων από το πακέτο MATPOWER [197]. Αξιοποιήθηκαν εκ νέου τα αρχεία συναρτήσεων τα οποία προαναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.5.1 προκειμένου η μετατροπή των αρχείων τύπου *ses* και *sys* σε εσωτερικά αρχεία MATLAB τύπου *mpc* και, ακολούθως, η εκτέλεση του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης WLS να πραγματοποιούνται ανεξαιρέτως για οποιοδήποτε υπό μελέτη σύστημα/δίκτυο. Επιπρόσθετη συνεισφορά συνιστά η διαμόρφωση ενός ενιαίου προγράμματος μικροεντολών και συναρτήσεων (*script*) και για τις τρεις μεθόδους. Ο χειριστής του προγράμματος καλείται να εισαγάγει τα αρχεία *sys* και *ses* του επιθυμητού δικτύου δοκιμών και, ακολούθως, να επιλέξει ποια μέθοδο θέλει να εφαρμοστεί. Κατόπιν, δημιουργείται αυτόματα το κατάλληλο αρχείο *dat-s*. Τέλος, διατυπώνεται το αντίστοιχο πρόβλημα (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί), αρχικοποιούνται όλες οι απαραίτητοι παράμετροι της εργαλειοθήκης YALMIP και γίνεται επιλογή του κατάλληλου λογισμικού επίλυσης.

5.1.2 Σύντομη περιγραφή της εργαλειοθήκης YALMIP

Η εργαλειοθήκη YALMIP αποτελεί μια πλατφόρμα ελεύθερης χρήσης για την επίλυση ενός ευρέος φάσματος προβλημάτων βελτιστοποίησης το οποίο, μεταξύ άλλων, περιλαμβάνει το γραμμικό και τον τετραγωνικό προγραμματισμό, τον κωνικό προγραμματισμό δεύτερης τάξης, τον ημιορισμένο προγραμματισμό, τον μεικτό ακέραιο προγραμματισμό και τα μη γραμμικά προβλήματα μεγιστοποίησης οριζουσών [279]. Η εργαλειοθήκη διαθέτει τη δική της εσωτερική μορφή (*internal format*) για τη μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος μέσω της χρήσης εσωτερικών μεταβλητών. Τα αρχεία *dat-s* είναι συμβατά με αυτή την ειδική μορφή, συνεπώς, η κατηγορία και οι παράμετροι κάθε προβλήματος αναγνωρίζονται αυτομάτως από την εργαλειοθήκη. Αναφορικά με την επίλυσή τους, διατίθεται μια εύχρηστη διεπιφάνεια από όπου μπορεί είτε να επιλεγεί το πλέον κατάλληλο λογισμικό επίλυσης αυτομάτως από το πρόγραμμα είτε να προκαθοριστεί από τον χρήστη. Εάν δε μπορεί να βρεθεί το κατάλληλο λογισμικό επίλυσης, προβλέπεται η μετατροπή του προβλήματος σε ισοδύναμη, επιλύσιμη μορφή. Δεδομένου ότι η εργαλειοθήκη YALMIP είναι εξειδικευμένη σε προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού, η πλέον συνηθισμένη πρακτική είναι η μετατροπή ενός προβλήματος μη επιλύσιμης μορφής σε ένα πρόβλημα ημιορισμένου προγραμματισμού μέσω της χρήσης περιορισμών LMI, οι οποίοι, όπως αναφέρεται και στο Παράρτημα Β, διαθέτουν ιδιαίτερα ευέλικτη, γενικευμένη μορφή.

Σημαντικό υπολογιστικό εργαλείο της πλατφόρμας είναι μία απλή, εσωτερική υλοποίηση του αλγόριθμου διακλάδωσης και οριοθέτησης (*branch and bound – BnB*), στοχευμένη για την επίλυση προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού τα οποία περιλαμβάνουν τη χρήση ακέραιων μεταβλητών, όπως π.χ. τα προβλήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού, τετραγωνικού και ημιορισμένου προγραμματισμού [280]. Μάλιστα, είναι αξιοσημείωτο ότι η εσωτερική υλοποίηση BnB αποτέλεσε το πρώτο, χρονικά, λογισμικό επίλυσης με ελεύθερη χρήση για προβλήματα μεικτού ακέραιου ημιορισμένου προγραμματισμού [279].

Επιπλέον, για προβλήματα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού, διατίθεται και το λογισμικό επίλυσης CUTSDP [280], του οποίου μια εσωτερική υλοποίηση έχει αναπτυχθεί, επίσης, στο πλαίσιο της εργαλειοθήκης και προσρίζεται, γενικά, για προβλήματα κωνικού προγραμματισμού [281]. Δεδομένου ότι η αναλυτική περιγραφή των αρχών και του τρόπου λειτουργίας των ανωτέρω ψηφιακών προγραμμάτων επίλυσης δεν εμπίπτει στους στόχους της παρούσας υποενότητας, η μελέτη περιορίζεται εφεξής στην απλή αναφορά όσων χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή καθεμιάς από τις τρεις μεθόδους, καθώς και κάποιων βασικών στοιχείων για τη λειτουργία τους.

Αναφορικά με τη μέθοδο του κριτηρίου D, χρησιμοποιήθηκε η εσωτερική υλοποίηση BnB από κοινού με το λογισμικό επίλυσης ακαδημαϊκής προέλευσης SDPT3 [282]. Στο πλαίσιο της εσωτερικής υλοποίησης BnB, γίνεται χαλάρωση των ακέραιων μεταβλητών προκειμένου να εφαρμοστεί η κλασική μέθοδος διακλάδωσης και οριοθέτησης [275]. Όπως φανερώνει το όνομά της, η μέθοδος χωρίζει το σύνολο των εφικτών λύσεων για ένα πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού σε μικρότερα υποσύνολα (διαχωρισμός). Κατόπιν, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί κανόνες για να προσδιορισθούν τα υποσύνολα εντός των οποίων είναι περισσότερο πιθανό να περιέχεται η βέλτιστη λύση καθώς και τα υποσύνολα που δεν χρειάζεται να διερευνηθούν επιπλέον διότι δεν περιέχουν πιθανώς τη βέλτιστη λύση. Προς αυτή την κατεύθυνση, ο επαναληπτικός αλγόριθμος της μεθόδου παράγει ένα δέντρο επίλυσης στο οποίο χαράσσεται το μονοπάτι για την εύρεση της βέλτιστης λύσης: ανά βήμα επιλύεται ένα «χαλαρό» πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού – αντίστοιχο του αρχικού – σε έναν κόμβο του δέντρου με στόχο τη συνέχιση ή την ανακατεύθυνση του μονοπατιού. Για την επίλυση των επιμέρους κυρτών προβλημάτων, προτείνεται η χρήση ενός λογισμικού επίλυσης ημιορισμένου προγραμματισμού (SDP solver) και, πιο συγκεκριμένα, του λογισμικού SDPT3 καθώς μπορεί να υποστηρίξει προβλήματα μεγιστοποίησης οριζουσών [280], όπως είναι το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D (4.32).

Όσον αφορά τη μέθοδο του κριτηρίου M και την προτεινόμενη μέθοδο για μονάδες PMU, ακολουθείται η ίδια στρατηγική επίλυσης δεδομένου ότι αμφότερες βασίζονται σε προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιείται το λογισμικό επίλυσης CUTSDP το οποίο λειτουργεί διαφορετικά σε σύγκριση με την εσωτερική υλοποίηση BnB. Ουσιαστικά, η χαλάρωση, εδώ, αφορά τους περιορισμούς και όχι στις ακέραιες μεταβλητές· δεδομένου ότι ένας περιορισμός LMI αντιστοιχεί σε ένα άπειρο σύνολο γραμμικών περιορισμών, όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Β, η βασική ιδέα πίσω από το λογισμικό CUTSDP είναι η προσέγγιση του περιορισμού LMI μέσω ενός πεπερασμένου συνόλου γραμμικών περιορισμών, με άλλα λόγια, η χαλάρωση της γεωμετρίας του κώνου που ορίζει η θετικά ημιορισμένη μήτρα του περιορισμού [280]. Προς αυτή την κατεύθυνση, το λογισμικό επίλυσης βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία ο χώρος των εφικτών λύσεων για το «χαλαρό» πρόβλημα περιορίζεται σταδιακά μέσω της στρατηγικής προσθήκης ενός ή πολλών επιπλέον γραμμικών περιορισμών ανά βήμα – τα λεγόμενα “cutting planes” – έως ότου εντοπιστεί προσεγγιστικά η περιοχή που περιλαμβάνει τη βέλτιστη λύση. Αυτή η τεχνική της εργαλειοθήκης YALMIP αποκαλείται σχήμα εξωτερικής προσέγγισης (outer approximation scheme) [283]. Ως εκ τούτου, η επίλυση του προβλήματος ημιορισμένου προγραμματισμού ανάγεται στην επαναληπτική επίλυση προβλημάτων ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, με αποκλειστικά δυαδικές μεταβλητές (binary integer linear programming – BILP), για τα οποία αξιοποιείται το λογισμικό επίλυσης ακαδημαϊκού προέλευσης SCIP [284], καθώς είναι εξειδικευμένο σε προβλήματα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού.

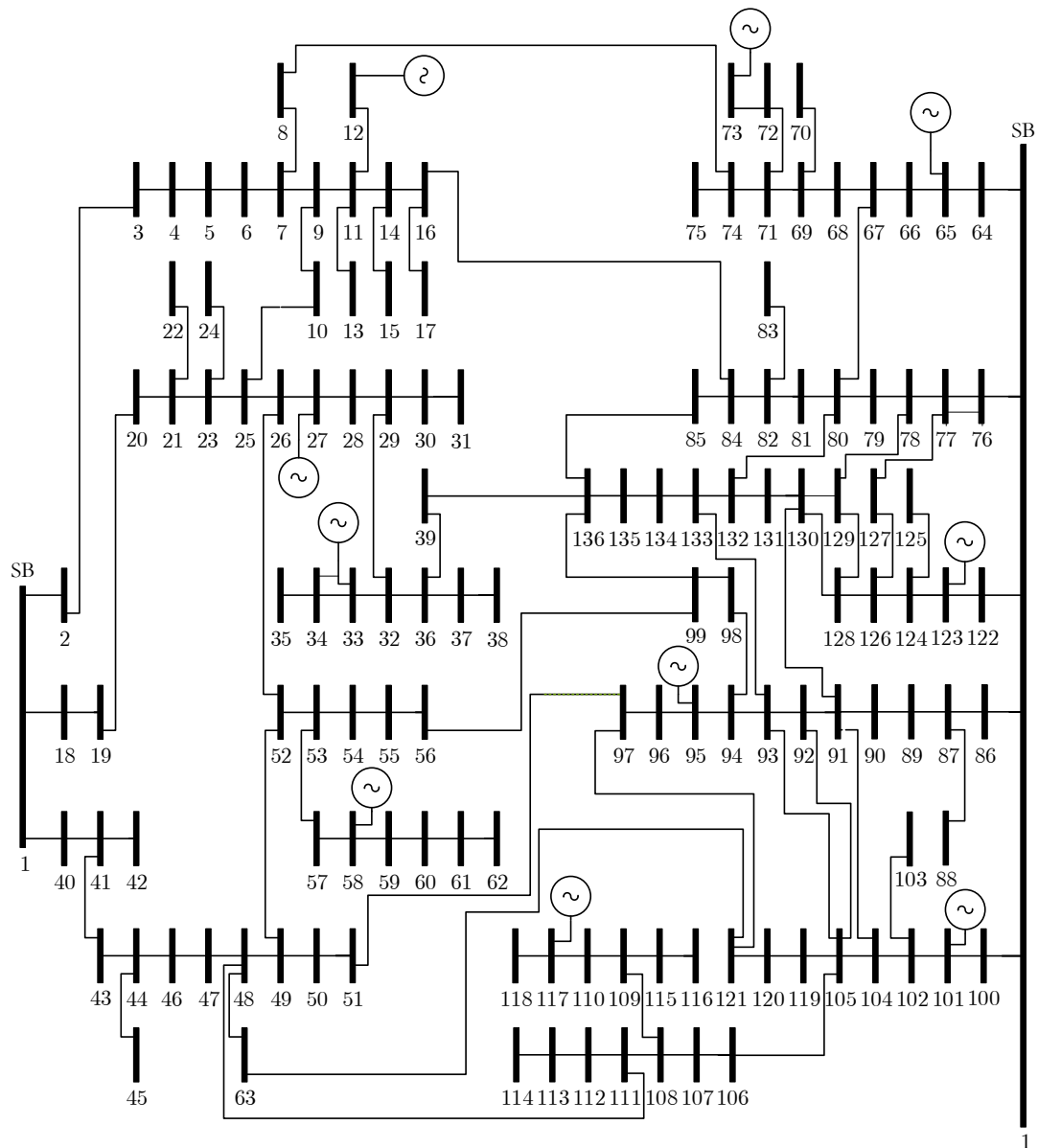
5.2 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών Μονάδων με Χρήση του Κριτηρίου D σε Δίκτυο Διανομής 136 Κόμβων

Στην παρούσα ενότητα, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου D εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο διανομής 136 κόμβων προερχόμενο από τη διεθνή βιβλιογραφία [285]. Αρχικά, σχεδιάζονται διαφορετικά σενάρια εφαρμογής της μεθόδου θεωρώντας εναλλακτικά σύνολα υποψήφιων μετρητικών μονάδων, με μόνη προϋπόθεση η προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή να εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του υπό μελέτη δικτύου. Στη συνέχεια, με γνώμονα το 1^ο ερώτημα που τέθηκε στο τέλος της ενότητας 5.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων εφαρμογής της μεθόδου.

5.2.1 Το δίκτυο δοκιμών

Το δίκτυο δοκιμών είναι τμήμα του δικτύου διανομής της Βραζιλίας και αποτελείται από οκτώ κύριες γραμμές διανομής σε επίπεδο τάσης 13.2 kV, οι οποίες περιλαμβάνουν 136 κόμβους και 156 κλάδους. Στο Σχήμα 5.2, απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου δοκιμών, το οποίο, όπως αναμένεται, έχει βροχοειδή δομή και διαθέτει εγκατεστημένες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Δεδομένου ότι τα δύο αυτά χαρακτηριστικά ανταποκρίνονται στη σύγχρονη μορφή των ενεργών δικτύων διανομής, το συγκεκριμένο δίκτυο δοκιμών συνιστά κατάλληλο πεδίο εφαρμογής και μελέτης των δυνατοτήτων της μεθόδου.

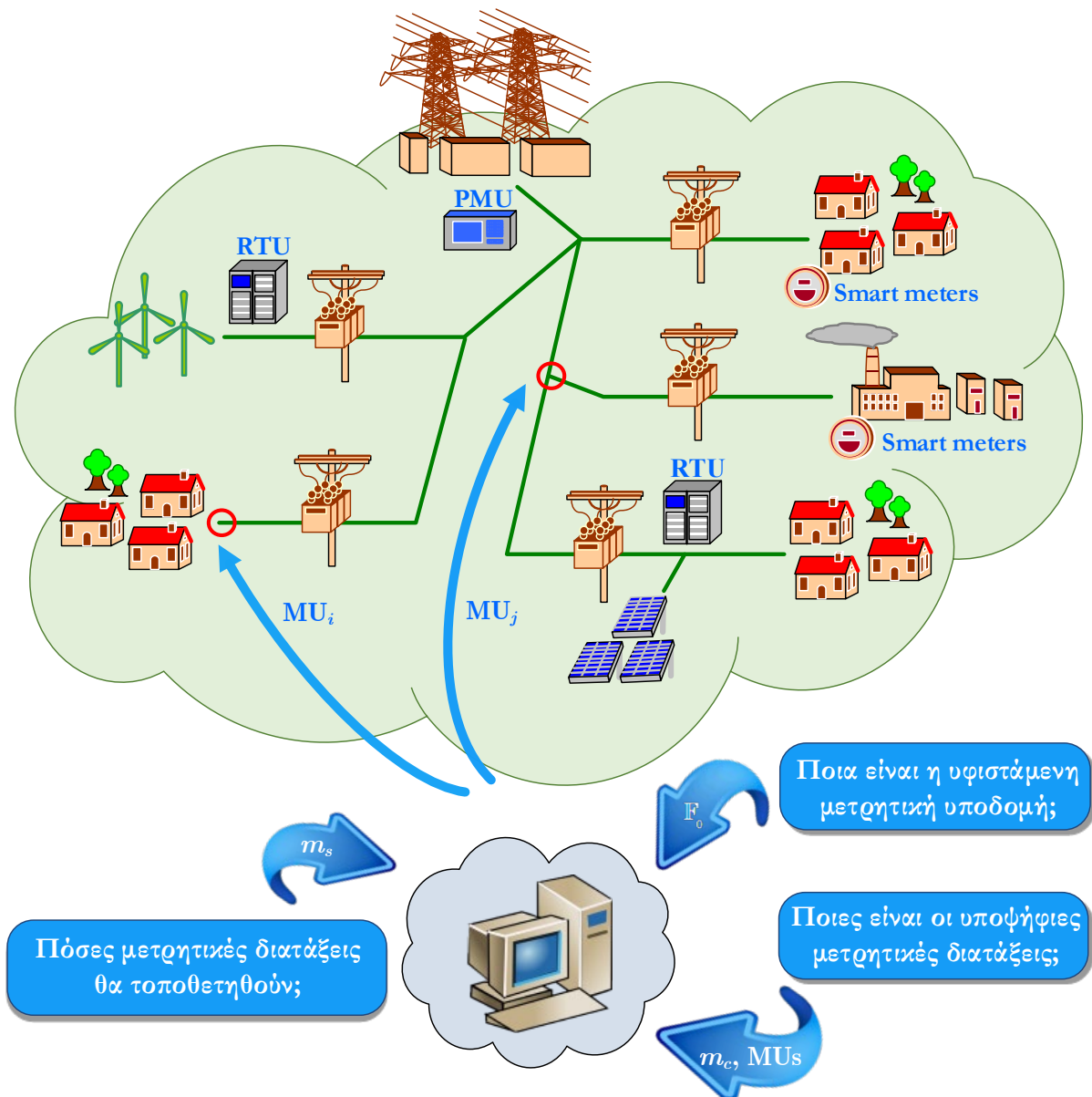
Διευκρινίζεται ότι, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, δεν λαμβάνεται υπόψη η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων του δικτύου και θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του δικτύου. Έτσι, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κόμβων και των κλάδων, όπως οι σύνθετες αντιστάσεις, οι ροές και οι εγχύσεις ισχύος, λαμβάνουν μία ισοδύναμη τιμή. Η μελέτη του πλήρους, τριφασικού μοντέλου του δικτύου θα είχε πρακτική σημασία στην υποθετική περίπτωση που ήταν επιθυμητή η μέτρηση των ηλεκτρικών μεγεθών μίας φάσης (ή δύο φάσεων) αντί και των τριών σε ένα σημείο εγκατάστασης μετρητικής μονάδας ή των ηλεκτρικών μεγεθών και των τριών φάσεων αλλά με διαφορετική ακρίβεια το καθένα. Στην πραγματικότητα, αν μια μετρητική μονάδα επιλεγεί προς εγκατάσταση σε έναν κόμβο ή κλάδο, είναι λογικό ότι θα καταγράφει τα ηλεκτρικά μεγέθη και των τριών φάσεων με την ίδια ακρίβεια. Επομένως, η θεώρηση του απλοποιημένου, μονοφασικού μοντέλου, εκτός από υπολογιστικά συμφέρουσα, είναι και αξιόπιστη για την εφαρμογή μεθόδων βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων, καθώς ανταποκρίνεται στις ρεαλιστικές προδιαγραφές του προβλήματος.



Σχήμα 5.2: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 136 κόμβων.

5.2.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Στο Σχήμα 5.3, δίνεται μία γραφική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της προτεινόμενης μεθόδου. Όπως φαίνεται, στην προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή είναι δυνατό να υπάρχουν διαφορετικά είδη μετρητικών μονάδων όπως μονάδες RTU, PMU και έξυπνα μετρητικά συστήματα, δεδομένου ότι, στο πλαίσιο της μεθόδου, κάθε μετρητική μονάδα αντιμετωπίζεται ως ένα «πακέτο μετρήσεων» το οποίο παρέχεται στο στατικό μοντέλο WLS ή, ισοδύναμα, μοντελοποιείται μέσω μίας μοναδικής μήτρας FIM. Για λόγους συντομογραφίας, οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες αναφέρονται ως “MUs” από την αγγλική απόδοση της έκφρασης, “measurement units”. Η συντομογραφία θα χρησιμοποιείται και στη συνέχεια της ενότητας.



Σχήμα 5.3: Γραφική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων (“MU”) σε δίκτυα διανομής.

Το θέμα του συγχρονισμού των μετρήσεων δε λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Αναφορικά με τις καθυστερήσεις ως προς τη διαθεσιμότητα των μετρήσεων ανά μετρητική μονάδα, ακολουθείται η τεχνική της εργασίας [190], δηλαδή όσο μεγαλύτερες είναι οι καθυστερήσεις, τόσο αυξάνεται η διασπορά των αντίστοιχων μετρήσεων. Για παράδειγμα, οι καθυστερήσεις στη διαθεσιμότητα δεδομένων κατανάλωσης από έξυπνους μετρητές ΧΤ είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με τις μονάδες RTU και PMU. Κατά συνέπεια, οι μετρήσεις εγχύσεων ισχύος σε κόμβους με έξυπνα συστήματα μέτρησης, οι οποίες υπολογίζονται με βάση τα επιμέρους δεδομένα κατανάλωσης όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, χαρακτηρίζονται από μεγάλες διασπορές.

Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να εξασφαλιστεί η παρατηρησιμότητα του δικτύου δοκιμών, η προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή καθορίζεται με χρήση του μοντέλου μειωμένης τάξης. Έτσι, θεωρείται το παρακάτω σύνολο μετρήσεων:

- 11 μετρήσεις μέτρου τάσης στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής,
- 8 ζεύγη μετρήσεων ροών ενεργού και αέργου ισχύος στις αναχωρήσεις των κύριων γραμμών από το ζυγό αναφοράς,
- 11 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος από τους κόμβους παραγωγής,
- 106 ζεύγη ψευδομετρήσεων από κόμβους φορτίου,
- 19 ζεύγη εικονικών μετρήσεων από κόμβους μηδενικής έγχυσης.

Έτσι, ο λόγος των διαθέσιμων μετρήσεων m προς τον αριθμό των μεταβλητών κατάστασης $2n - 1$

διαμορφώνεται ως εξής: $r = \frac{m}{2n - 1} = \frac{299}{271} \approx 1,1$. Η τιμή αυτή είναι χαμηλή, άρα, η προσθήκη

μετρητικών μονάδων στην υφιστάμενη υποδομή αναμένεται να ενισχύσει την ικανότητα του εκτιμητή να φιλτράρει τα σφάλματα των μετρήσεων και την ακρίβεια των παρεχόμενων εκτιμήσεων.

Το αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 προέρχεται από τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS, άρα, για την επέλευσή του πρέπει να καθοριστούν όλες οι αναγκαίες παράμετροι. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, τα μέγιστα σφάλματα κατά την εκτίμηση κατάστασης WLS σε δίκτυα διανομής εμφανίζονται σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης [199]. Προκειμένου, λοιπόν, να εξασφαλιστεί ότι η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων θα φέρει το μέγιστο δυνατό πληροφοριακό περιεχόμενο κατά τη δυσμενέστερη περίπτωση ως προς τα σφάλματα των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης, υπολογίζεται ένα στιγμιότυπο μετρήσεων με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου για το δίκτυο δοκιμών, θεωρώντας ως δεδομένο ότι η φόρτιση των μετασχηματιστών διανομής κυμαίνεται σε ποσοστά άνω του 90% επί της ονομαστικής ικανότητάς τους για τους κόμβους φορτίου. Πρόκειται για μια κατάσταση η οποία προσεγγίζει ικανοποιητικά τις συνθήκες μέγιστης φόρτισης. Λαμβάνοντας σταθερό συντελεστή ισχύος $PF = 0,9$, η φόρτισή τους υπολογίζεται με βάση τους τύπους (3.17) και (3.18), οι οποίοι, για λόγους ευκολίας, παρατίθενται εκ νέου παρακάτω:

$$P_l^{\max} = \frac{MVA_l \times LP_l \times PF}{100} \quad (5.1)$$

$$Q_l^{\max} = \frac{MVA_l \times LP_l \times \sqrt{1 - PF^2}}{100} \quad (5.2)$$

όπου P_l^{\max} και Q_l^{\max} είναι η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο l κατά την υποτιθέμενη μέγιστη φόρτισή του, MVA_l είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του και LP_l το επί τοις εκατό ποσοστό φόρτισής του.

Τα αποτελέσματα από την ανάλυση ροών φορτίου λαμβάνονται ως οι πραγματικές τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών του δικτύου κατά τις συνθήκες μέγιστης φόρτισης. Τα σφάλματα τα οποία φέρουν τα μετρητικά δεδομένα κατά την πραγματική λειτουργία της μετρητικής υποδομής, προσομοιώνονται μέσω της προσθήκης θορύβου κανονικής κατανομής.

Για την i -οστή μέτρηση, χρησιμοποιείται και πάλι η σχέση (3.19) η οποία επαναλαμβάνεται για λόγους ευκολίας:

$$z_i^{meas} = z_i^{true} + randn_i \times \sigma_i \quad (5.3)$$

όπου z_i^{meas} και z_i^{true} είναι η μετρούμενη και η πραγματική (όπως προέκυψε από την ανάλυση ροών φορτίου) τιμή του μετρούμενου ηλεκτρικού μεγέθους, αντίστοιχα, $randn_i$ είναι ένα τυχαίος αριθμός ο οποίος προκύπτει από μια γεννήτρια τιμών κανονικής κατανομής και σ_i είναι η διασπορά της μέτρησης.

Η διασπορά της i -οστής μέτρησης υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3.16) η οποία, κατά τα γνωστά, βασίζεται στη μοντελοποίηση της τιμής του ηλεκτρικού μεγέθους ως τ.μ. κανονικής κατανομής [97]. Θεωρώντας, λοιπόν, ότι η μέση τιμή της i -οστής μέτρησης μ_i ισούται με την τιμή z_i^{true} , η αντίστοιχη διασπορά σ_i υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_i = \frac{\mu_i \times error}{300} = \frac{z_i^{true} \times error}{300} \quad (5.4)$$

όπου $error$ είναι το μέγιστο επί τοις εκατό σφάλμα περί τη μέση τιμή μ_i .

Οι τιμές σφάλματος $error$ των μετρήσεων καθορίζονται με βάση τη θεωρούμενη χρονική διαθεσιμότητα ανά τύπο μέτρησης. Επομένως, όλα τα μέτρα τάσης, οι μετρήσεις ροών ισχύος στις κύριες γραμμές και εγχύσεων ισχύος στους κόμβους παραγωγής, οι οποίες θεωρούνται διαθέσιμες σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο κατά την πραγματική λειτουργία του δικτύου (π.χ. παρεχόμενες από μονάδες RTU), συνδέονται με χαμηλές τιμές σφάλματος: 1% για το μέτρο τάσης του ζυγού αναφοράς και για τις μετρήσεις ροών, και 1,5% για τις μετρήσεις που προέρχονται από τους κόμβους παραγωγής. Πολύ μικρές τιμές σφάλματος της τάξης του 0.01% αποδίδονται στις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων. Τέλος, οι μετρήσεις εγχύσεων ισχύος στους κόμβους φορτίου αντιμετωπίζονται ως ψευδομετρήσεις, άρα, θεωρείται μεγαλύτερη τιμή σφάλματος ίση με 8%.

Προκειμένου να προσεγγιστεί ένα μέσο στιγμιότυπο της κατάστασης, δηλαδή οι μέσες εκτιμώμενες τιμές και οι αντίστοιχες διασπορές των μεταβλητών κατάστασης, σε συνθήκες μέγιστης φόρτισης, ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης WLS εκτελέστηκε επαναληπτικά στο πλαίσιο 1000 προσομοιώσεων Monte Carlo.

Έτσι, προέκυψε το χρησιμοποιούμενο αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 καθώς και η αντίστοιχη μέση μήτρα συνδιακύμανσης (mean covariance matrix). Πρέπει να διευκρινιστεί ότι, προκειμένου να είναι έγκυρη η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για διαφορετικά σενάρια επιλογής μετρητικών μονάδων, η υπολογιστική διαδικασία του Σχήματος 5.1 πρέπει να εκκινεί πάντα από το ίδιο αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 .

Αναφορικά με το σχεδιασμό των σεναρίων, γενική αρχή είναι η χρήση όλων των τύπων μετρήσεων σε διαφορετικούς συνδυασμούς, ώστε να προσομοιώνεται ένα ευρύ φάσμα μετρητικών μονάδων με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας. Σε πρώτη φάση, στόχος είναι η εξακρίβωση της δυνατότητας της μεθόδου να αποδώσει βέλτιστη λύση ανεξαρτήτως του συνόλου των υποψήφιων μετρητικών μονάδων που της παρέχεται. Έτσι, καταστρώνονται σενάρια με περιορισμένο αριθμό υποψήφιων μετρητικών μονάδων ώστε να μπορεί να επαληθευτεί η εύρεση ή μη της βέλτιστης λύσης μέσω διεξοδικής έρευνας. Σε δεύτερη φάση, επιδιώκεται η διερεύνηση της επίδρασης της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Ως εκ τούτου, καταστρώνεται μια σειρά σεναρίων με μεγάλο αριθμό υποψήφιων μετρητικών μονάδων ώστε να εξεταστεί λεπτομερώς η επίδραση του τύπου, της θέσης και της ακρίβειας των μετρήσεων των μετρητικών μονάδων, οι οποίες επιλέγονται προς τοποθέτηση, στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS. Ο

δείκτης Mac_{c_V} χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS. Η σχέση υπολογισμού του, η οποία έχει προαναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, επαναλαμβάνεται για τη διευκόλυνση του αναγνώστη:

$$Mac_{c_V} = \|\tilde{\mathbf{V}}_{error}\|^2 = \left(\sum_{i=1}^n |\tilde{\mathbf{V}}_i^{true} - \hat{\mathbf{V}}_i|^2 \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

όπου $\tilde{\mathbf{V}}_{error}$ είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων εκτίμησης και $\tilde{\mathbf{V}}_i^{true}$ ($\hat{\mathbf{V}}_i$) είναι η πραγματική (εκτιμώμενη) τιμή του φασιθέτη της τάσης του κόμβου i .

Ζητούμενο είναι, επίσης, να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της μεθόδου από πλευράς υπολογιστικού φόρτου. Ως κριτήριο χρησιμοποιείται ο χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας μέχρι την εύρεση λύσης. Ο χρόνος καταγράφεται για όλα τα σενάρια της δεύτερης φάσης. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η εξακρίβωση των παραγόντων εκείνων που επιβαρύνουν υπολογιστικά την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D.

5.2.3 Αποτελέσματα

Αρχικά, παρουσιάζονται τα σενάρια και τα αντίστοιχα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου για την πρώτη φάση των δοκιμών. Πρόκειται για τρία σενάρια με πέντε, κατά μέγιστο, υποψήφιες μετρητικές μονάδες. Έτσι, διευκολύνεται η διεξοδική έρευνα προκειμένου να διαπιστωθεί αν η μέθοδος παρέχει τη βέλτιστη λύση στο πρόβλημα, δηλαδή αν η τιμή του κριτηρίου Ψ_D που προκύπτει είναι η ελάχιστη μεταξύ όλων των δυνατών συνδυασμών μετρητικών μονάδων. Οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες ανά σενάριο, οι οποίες αναφέρονται συντομογραφικά ως “MU”, συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.2 και αναλύονται παρακάτω.

1. Στο σενάριο 1 περιλαμβάνονται πέντε μετρητικές μονάδες ($m_c = 5$), καθεμία από τις οποίες καταγράφει ένα μέτρο τάσης.
2. Στο σενάριο 2 θεωρούνται τέσσερις μετρητικές μονάδες ($m_c = 4$). Καθεμία καταγράφει το μέτρο τάσης ενός κόμβου, καθώς και τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε έναν προσκείμενο σε αυτόν κλάδο.
3. Στο σενάριο 3 περιλαμβάνονται τέσσερις μονάδες ($m_c = 4$), καθεμία από τις οποίες παρέχει ένα ζεύγος μετρήσεων έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος.

Στα τρία σενάρια, η ακρίβεια των μετρήσεων υπολογίζεται βάσει της σχέσης (5.4), θεωρώντας την τιμή $error$ ίση με 1,5%, δηλαδή οι μετρήσεις είναι δυναμικά διαθέσιμες σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο.

Περαιτέρω μνεία πρέπει να γίνει για το σενάριο 3. Εφόσον διατίθενται ψευδομετρήσεις για όλους τους κόμβους φορτίου με βάση την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή, η εγκατάσταση των μετρητικών μονάδων 3.1–3.4 ισοδυναμεί με την αντικατάσταση ψευδομετρήσεων φορτίου με μετρήσεις εγχύσεων ισχύος (σχεδόν) πραγματικού χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι, στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, μία μέτρηση μπορεί να ανήκει στην προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή και, ταυτόχρονα, να παρέχεται από τις υποψήφιες μετρητικές μονάδες με μόνη διαφορά την ακρίβειά της. Υπολογιστικά, υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων καθώς διαφορετικές ακρίβειες αντιστοιχούν σε διαφορετικές επιμέρους μήτρες FIM. Συνεπώς, η μέθοδος μπορεί να υποδεικνύει και τις βέλτιστες θέσεις για την αντικατάσταση μετρήσεων/μετρητικών μονάδων σε μία προϋπάρχουσα υποδομή.

Πίνακας 5.2: Περιγραφή των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) των σεναρίων 1–3.

| Σενάριο 1 | | Σενάριο 2 | | Σενάριο 3 | |
|-----------|-----------|-----------|--------------------------------|-----------|--------------------|
| A/A MU | Μετρήσεις | A/A MU | Μετρήσεις | A/A MU | Μετρήσεις |
| 1.1 | V_2 | 2.1 | V_3, P_{3-4}, Q_{3-4} | 3.1 | P_{23}, Q_{23} |
| 1.2 | V_{18} | 2.2 | $V_{19}, P_{19-20}, Q_{19-20}$ | 3.2 | P_{49}, Q_{49} |
| 1.3 | V_{40} | 2.3 | $V_{43}, P_{43-44}, Q_{43-44}$ | 3.3 | P_{97}, Q_{97} |
| 1.4 | V_{76} | 2.4 | $V_{87}, P_{87-89}, Q_{87-89}$ | 3.4 | P_{133}, Q_{133} |
| 1.5 | V_{80} | | | | |

Στους Πίνακες 5.3, 5.4 και 5.5, με έντονη γραφή παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο για τα σεναρία 1, 2 και 3, αντιστοίχως. Καταγράφονται οι τιμές του κριτηρίου Ψ_D και του δείκτη $Mass_V$ για αριθμό εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων $m_s = 1, 2, 3$. Με κανονική γραφή παρατίθενται, σε σειρά φθίνουσας τιμής Ψ_D , τα αποτελέσματα της διεξοδικής έρευνας, δηλαδή οι τιμές Ψ_D και $Mass_V$ για εναλλακτικές επιλογές-συνδυασμούς μετρητικών μονάδων. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από αναλυτικούς υπολογισμούς χωρίς την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου (διευκρινίζεται ότι, σε κάποιες περιπτώσεις, δεν καταγράφονται όλοι οι συνδυασμοί μετρητικών μονάδων αλλά μόνο όσοι εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές Ψ_D). Όπως παρατηρείται, η προτεινόμενη μέθοδος αποδίδει βέλτιστες λύσεις για $m_s = 1, 2, 3$ και στα τρία σεναρία, καθώς οι τιμές Ψ_D είναι οι μέγιστες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων, μη βέλτιστων επιλογών. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι τιμές $Mass_V$ για τις βέλτιστες λύσεις είναι ελάχιστες. Επομένως, οι βέλτιστες λύσεις ως προς το κριτήριο D οδηγούν σε μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS.

Αναφορικά με επιμέρους παρατηρήσεις, διαπιστώνεται ότι οι βέλτιστες λύσεις για $m_s = 3$ περιλαμβάνουν τις βέλτιστες λύσεις για $m_s = 2$, οι οποίες, με τη σειρά τους, περιλαμβάνουν τις αντίστοιχες λύσεις για $m_s = 1$. Ενδιαφέρουσα είναι η παρατήρηση ότι, αν και όλες οι τιμές $Mass_V$ κυμαίνονται κάτω του 0,035 p.u., στο σενάριο 3 σημειώνεται η μεγαλύτερη βελτίωση του συγκεκριμένου δείκτη. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υπό τοποθέτηση μετρητικές μονάδες, ουσιαστικά, αντικαθιστούν προϋπάρχουσες ψευδομετρήσεις χαμηλής ακρίβειας. Συνεπώς, η εγκατάστασή τους έχει και τον μεγαλύτερο αντίκτυπο στην ακρίβεια των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης. Επιπλέον, η επιλογή της μετρητικής μονάδας 3.4 είναι η πλέον επωφελής, σε αντίθεση με τη μετρητική μονάδα 3.3 η οποία δεν περιλαμβάνεται σε καμία βέλτιστη λύση. Όσον αφορά τα υπόλοιπα σεναρία, κάθε μετρητική μονάδα στο σενάριο 2 φέρει το πληροφοριακό περιεχόμενο τριών μετρήσεων, σε αντίθεση με το σενάριο 1 όπου κάθε μετρητική μονάδα καταγράφει μόνο ένα μέτρο τάσης κόμβου. Όπως αναμένεται, λοιπόν, η μείωση του δείκτη $Mass_V$ είναι εντονότερη στο πλαίσιο του σεναρίου 2 σε σύγκριση με το σενάριο 3.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 1.

| $m_c = 5$ | A/A MU | Ψ_D | $Macc_v$ |
|-----------|----------------------|----------------|-----------------|
| $m_s = 1$ | 1.3 | 254.145 | 0.032356 |
| | 1.1 | 254.133 | 0.032381 |
| | 1.2 | 254.134 | 0.032383 |
| | 1.5 | 253.828 | 0.032401 |
| | 1.4 | 253.826 | 0.032399 |
| $m_s = 2$ | 1.1, 1.3 | 254.937 | 0.032291 |
| | 1.2, 1.3 | 254.930 | 0.032297 |
| | 1.1, 1.2 | 254.926 | 0.032382 |
| | 1.3, 1.4 | 254.581 | 0.032342 |
| | 1.3, 1.5 | 254.580 | 0.032343 |
| $m_s = 3$ | 1.1, 1.2, 1.3 | 255.669 | 0.032261 |
| | 1.1, 1.3, 1.4 | 255.284 | 0.032290 |
| | 1.2, 1.3, 1.5 | 255.282 | 0.032296 |
| | 1.1, 1.3, 1.5 | 255.281 | 0.032289 |
| | 1.2, 1.3, 1.4 | 255.279 | 0.032396 |

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 2.

| $m_c = 4$ | A/A MU | Ψ_D | $Macc_v$ |
|-----------|----------------------|----------------|-----------------|
| $m_s = 1$ | 2.3 | 263.674 | 0.029022 |
| | 2.4 | 262.022 | 0.032103 |
| | 2.2 | 260.135 | 0.031182 |
| | 2.1 | 255.361 | 0.032356 |
| $m_s = 2$ | 2.3, 2.4 | 272.420 | 0.028941 |
| | 2.2, 2.3 | 270.386 | 0.028980 |
| | 2.2, 2.4 | 268.878 | 0.031707 |
| | 2.1, 2.3 | 265.755 | 0.028950 |
| $m_s = 3$ | 2.2, 2.3, 2.4 | 279.109 | 0.028872 |
| | 2.1, 2.3, 2.4 | 274.493 | 0.028913 |
| | 2.1, 2.2, 2.3 | 272.359 | 0.028930 |
| | 2.1, 2.2, 2.4 | 270.870 | 0.031641 |

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 3.

| $m_c = 4$ | A/A MU | Ψ_D | $Macc_V$ |
|-----------|----------------------|----------------|-----------------|
| $m_s = 1$ | 3.4 | 261.543 | 0.027897 |
| | 3.2 | 261.525 | 0.027905 |
| | 3.1 | 261.471 | 0.027928 |
| | 3.3 | 261.460 | 0.028149 |
| $m_s = 2$ | 3.2, 3.4 | 269.834 | 0.027822 |
| | 3.1, 3.4 | 269.781 | 0.027844 |
| | 3.1, 3.2 | 269.760 | 0.027856 |
| | 3.1, 3.3 | 269.697 | 0.027997 |
| $m_s = 3$ | 3.1, 3.2, 3.4 | 278.068 | 0.027572 |
| | 3.2, 3.3, 3.4 | 278.055 | 0.027618 |
| | 3.1, 3.3, 3.4 | 278.003 | 0.027619 |
| | 3.1, 3.2, 3.3 | 277.984 | 0.027830 |

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σενάρια και τα σχετικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου για τη δεύτερη φάση των δοκιμών. Πρόκειται για τέσσερα σενάρια με 30 έως 60 υποψήφιες μετρητικές μονάδες το καθένα. Αρχικά, περιγράφονται τα σενάρια 4 και 5:

4. Στο σενάριο 4 περιλαμβάνονται 60 μετρητικές μονάδες ($m_c = 60$) οι οποίες καταγράφουν μέτρα τάσης. Οι υποψήφιες θέσεις προς εγκατάσταση είναι οι κόμβοι 2÷8, 18÷24, 40÷47, 62÷68, 76÷79, 86÷91, 99÷110 και 121÷129.
5. Στο σενάριο 5 θεωρούνται 60 μετρητικές μονάδες ($m_c = 60$) οι οποίες παρέχουν μετρήσεις ζευγών ροών ενεργού και αέργου ισχύος. Οι υποψήφιες θέσεις προς εγκατάσταση είναι οι κλάδοι 2÷7, 18÷23, 40÷52, 64÷69, 76÷80, 86÷95, 100÷107, 122÷134 και ο κλάδος 48–63.

Οι θέσεις των υποψήφιων μετρητικών μονάδων επελέγησαν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ομοιόμορφα κατανομημένες σε όλη την έκταση του δικτύου δοκιμών. Για τον υπολογισμό της ακρίβειας των μετρήσεων και στα δύο σενάρια, λαμβάνεται τιμή *error* ίση με 1,5%, δηλαδή όλες οι μετρήσεις θεωρούνται δυνητικά διαθέσιμες σε (σχεδόν) πραγματικό χρόνο.

Στους Πίνακες 5.6 και 5.7, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με βάση την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για τα σενάρια 4 και 5. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων λαμβάνει τις τιμές $m_s = 10, 20$ και 40 . Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι οι βέλτιστες λύσεις για $m_s = 10$ τείνουν να είναι υποσύνολα των λύσεων για $m_s = 20$, ενώ το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση $m_s = 20$ η οποία τείνει να είναι υποσύνολο των λύσεων για $m_s = 40$. Επομένως, η μέθοδος εμφανίζει συνεπή συμπεριφορά ως προς την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού μετρητικών μονάδων για αυξανόμενες τιμές m_s .

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 4.

| m_s | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων | Ψ_D | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|----------|----------------|
| 10 | $V_{22}, V_{24}, V_{42}, V_{45}, V_{62}, V_{68}, V_{88}, V_{103}, V_{121}, V_{125}$ | 294.280 | 80.7 |
| 20 | $V_5, V_8, V_{22}, V_{24}, V_{46}, V_{47}, V_{62}, V_{66}, V_{67}, V_{68}, V_{78}, V_{88}, V_{89}, V_{99}, V_{103}, V_{104}, V_{105}, V_{121}, V_{125}, V_{127}$ | 308.009 | 175.1 |
| 40 | $V_5, V_6, V_7, V_8, V_{18}, V_{21}, V_{22}, V_{23}, V_{24}, V_{40}, V_{41}, V_{42}, V_{43}, V_{45}, V_{46}, V_{47}, V_{62}, V_{63}, V_{66}, V_{67}, V_{68}, V_{77}, V_{78}, V_{79}, V_{87}, V_{88}, V_{89}, V_{90}, V_{91}, V_{99}, V_{102}, V_{103}, V_{104}, V_{105}, V_{121}, V_{124}, V_{125}, V_{127}, V_{128}, V_{129}$ | 333.008 | 193.8 |

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 5.

| m_s | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων | Ψ_D | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|----------|----------------|
| 10 | $\{P_{4-5}, Q_{4-5}\}, \{P_{41-42}, Q_{41-42}\}, \{P_{48-49}, Q_{48-49}\}, \{P_{48-63}, Q_{48-63}\}, \{P_{66-67}, Q_{66-67}\}, \{P_{91-92}, Q_{91-92}\}, \{P_{93-94}, Q_{93-94}\}, \{P_{94-95}, Q_{94-95}\}, \{P_{128-130}, Q_{128-130}\}, \{P_{132-133}, Q_{132-133}\}$ | 318.815 | 108.4 |
| 20 | $\{P_{5-6}, Q_{5-6}\}, \{P_{6-7}, Q_{6-7}\}, \{P_{21-23}, Q_{21-23}\}, \{P_{41-42}, Q_{41-42}\}, \{P_{46-47}, Q_{46-47}\}, \{P_{47-48}, Q_{47-48}\}, \{P_{48-49}, Q_{48-49}\}, \{P_{49-50}, Q_{49-50}\}, \{P_{48-63}, Q_{48-63}\}, \{P_{65-66}, Q_{65-66}\}, \{P_{66-67}, Q_{66-67}\}, \{P_{67-68}, Q_{67-68}\}, \{P_{68-69}, Q_{68-69}\}, \{P_{86-87}, Q_{86-87}\}, \{P_{91-92}, Q_{91-92}\}, \{P_{93-94}, Q_{93-94}\}, \{P_{94-95}, Q_{94-95}\}, \{P_{105-106}, Q_{105-106}\}, \{P_{128-130}, Q_{128-130}\}, \{P_{132-133}, Q_{132-133}\}$ | 388.531 | 69.2 |
| 40 | $\{P_{2-3}, Q_{2-3}\}, \{P_{4-5}, Q_{4-5}\}, \{P_{5-6}, Q_{5-6}\}, \{P_{6-7}, Q_{6-7}\}, \{P_{19-18}, Q_{19-18}\}, \{P_{21-23}, Q_{21-23}\}, \{P_{40-41}, Q_{40-41}\}, \{P_{43-44}, Q_{43-44}\}, \{P_{44-46}, Q_{44-46}\}, \{P_{46-47}, Q_{46-47}\}, \{P_{47-48}, Q_{47-48}\}, \{P_{48-49}, Q_{48-49}\}, \{P_{48-63}, Q_{48-63}\}, \{P_{49-50}, Q_{49-50}\}, \{P_{49-52}, Q_{49-52}\}, \{P_{50-51}, Q_{50-51}\}, \{P_{65-66}, Q_{65-66}\}, \{P_{66-67}, Q_{66-67}\}, \{P_{67-68}, Q_{67-68}\}, \{P_{68-69}, Q_{68-69}\}, \{P_{78-79}, Q_{78-79}\}, \{P_{89-90}, Q_{89-90}\}, \{P_{90-91}, Q_{90-91}\}, \{P_{89-90}, Q_{89-90}\}, \{P_{92-93}, Q_{92-93}\}, \{P_{89-90}, Q_{89-90}\}, \{P_{94-95}, Q_{94-95}\}, \{P_{100-101}, Q_{100-101}\}, \{P_{101-102}, Q_{101-102}\}, \{P_{102-104}, Q_{102-104}\}, \{P_{106-107}, Q_{106-107}\}, \{P_{122-123}, Q_{122-123}\}, \{P_{123-124}, Q_{123-124}\}, \{P_{124-125}, Q_{124-125}\}, \{P_{126-127}, Q_{126-127}\}, \{P_{126-128}, Q_{126-128}\}, \{P_{128-130}, Q_{128-130}\}, \{P_{130-131}, Q_{130-131}\}, \{P_{131-132}, Q_{131-132}\}, \{P_{132-133}, Q_{132-133}\}$ | 491.436 | 195.8 |

Όπως αναμένεται, μεγαλύτερες τιμές Ψ_D επιτυγχάνονται στο σενάριο 5 σε σύγκριση με το σενάριο 4, καθώς κάθε μετρητική μονάδα του πρώτου παρέχει το πληροφοριακό περιεχόμενο δύο μετρήσεων αντί μίας που παρέχεται ανά μετρητική μονάδα του δεύτερου. Αναφορικά με τους χρόνους εκτέλεσης, οι τιμές είναι παραπλήσιες και στα δύο σενάρια και οι μεγαλύτερες από αυτές παρατηρούνται για $m_s = 40$.

Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι δε συμπεραίνεται κάποια αναλογική σχέση μεταξύ του χρόνου εκτέλεσης και του αριθμού m_s .

Σε συνέχεια των σεναρίων 4 και 5, καταστρώνεται ένα υβριδικό σενάριο το οποίο περιγράφεται ακολούθως:

6. Στο σενάριο 6, ως υποψήφιες μετρητικές μονάδες λαμβάνονται οι βέλτιστες λύσεις των σεναρίων 4 και 5 για $m_s = 20$. Συνεπώς, ο αριθμός των υποψήφιων μετρητικών μονάδων είναι $m_c = 40$.

Στόχος του εν λόγω σεναρίου είναι η διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών επιπέδων μετρητικής ακρίβειας στη βέλτιστη επιλογή των μετρητικών μονάδων. Προς αυτή την κατεύθυνση, θεωρείται η τιμή *error* ίση με 1,5% για τα μέτρα τάσης και 4% για τις μετρήσεις ροών ισχύος, δηλαδή οι μετρητικές μονάδες του σεναρίου 4 υποτίθεται ότι παρέχουν δεδομένα υψηλότερης ακρίβειας. Στον Πίνακα 5.8, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης για το σενάριο 6. Ο αριθμός των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων λαμβάνει τις τιμές $m_s = 10, 20$ και 30 .

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 6.

| m_s | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων | Ψ_D | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|----------|----------------|
| 10 | $V_{22}, V_{62}, V_{68}, V_{103}, \{P_{41-42}, Q_{41-42}\}, \{P_{46-47}, Q_{46-47}\}, \{P_{49-50}, Q_{49-50}\},$ $\{P_{93-94}, Q_{93-94}\}, \{P_{105-106}, Q_{105-106}\}, \{P_{128-130}, Q_{128-130}\}$ | 288.262 | 67.9 |
| 20 | $V_8, V_{22}, V_{62}, V_{68}, V_{78}, V_{88}, V_{89}, V_{121}, \{P_{6-7}, Q_{6-7}\}, \{P_{21-23}, Q_{21-23}\},$ $\{P_{41-42}, Q_{41-42}\}, \{P_{48-49}, Q_{48-49}\}, \{P_{49-50}, Q_{49-50}\}, \{P_{48-63}, Q_{48-63}\},$ $\{P_{68-69}, Q_{68-69}\}, \{P_{93-94}, Q_{93-94}\}, \{P_{94-95}, Q_{94-95}\}, \{P_{105-106}, Q_{105-106}\},$ $\{P_{128-130}, Q_{128-130}\}, \{P_{132-133}, Q_{132-133}\}$ | 305.461 | 40.6 |
| 30 | $V_5, V_8, V_{22}, V_{24}, V_{46}, V_{62}, V_{66}, V_{68}, V_{78}, V_{88}, V_{89}, V_{103}, V_{104}, V_{105}, V_{121},$ $\{P_{5-6}, Q_{5-6}\}, \{P_{6-7}, Q_{6-7}\}, \{P_{21-23}, Q_{21-23}\}, \{P_{41-42}, Q_{41-42}\},$ $\{P_{46-47}, Q_{46-47}\}, \{P_{48-49}, Q_{48-49}\}, \{P_{49-50}, Q_{49-50}\}, \{P_{48-63}, Q_{48-63}\},$ $\{P_{66-67}, Q_{66-67}\}, \{P_{68-69}, Q_{68-69}\}, \{P_{93-94}, Q_{93-94}\}, \{P_{94-95}, Q_{94-95}\},$ $\{P_{105-106}, Q_{105-106}\}, \{P_{128-130}, Q_{128-130}\}, \{P_{132-133}, Q_{132-133}\}$ | 330.075 | 372.1 |

Η βασική παρατήρηση αφορά τις τιμές Ψ_D οι οποίες κυμαίνονται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σύγκριση με τα σενάρια 4 και 5. Επιπλέον, στις βέλτιστες λύσεις περιλαμβάνονται εξίσου μετρητικές μονάδες των σεναρίων 4 και 5, αν και οι δεύτερες φέρουν πληροφοριακό περιεχόμενο δύο μετρήσεων (εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος). Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι η διακύμανση της ακρίβειας ανά τύπο μετρήσεων επηρεάζει δραστικά τα αποτελέσματα. Πιο αναλυτικά, η ποιότητα των μετρήσεων εγχύσεων ισχύος έχει επιδεινωθεί εξαιτίας της αύξησης του σφάλματος *error* που θεωρείται ότι ενέχουν. Με αυτό τον τρόπο, αντισταθμίζεται το μειονέκτημα των μετρητικών μονάδων του σεναρίου 4 οι οποίες φέρουν την πληροφορία μίας μέτρησης (μέτρου τάσης) αλλά με καλύτερη ακρίβεια. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι τιμές Ψ_D που προκύπτουν είναι χειρότερες από αυτές των σεναρίων 4 και 5, αν και το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων αποτελεί μία μείξη βέλτιστων λύσεων από τα σενάρια αυτά, επιβεβαιώνει

την αρνητική επίπτωση της επιδείνωσης της μετρητικής ακριβείας στα περιθώρια βελτίωσης της ακριβείας της εκτίμησης κατάστασης WLS. Τέλος, αξιοσημείωτα αυξημένος είναι ο χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για $m_s = 30$, αποτέλεσμα που αναδεικνύει ότι η τελευταία επηρεάζεται δυσμενώς από την εισαγωγή διαφορετικών επιπέδων ακριβείας ανά τύπο μέτρησης.

Τέλος, καταστρώνεται το σενάριο 7 το οποίο περιγράφεται παρακάτω.

7. Στο σενάριο 7 περιλαμβάνονται 30 υποψήφιες μετρητικές μονάδες ($m_c = 30$), καθεμία από τις οποίες καταγράφει το μέτρο τάσης ενός κόμβου, καθώς και τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος σε έναν προσκείμενο σε αυτόν κλάδο. Το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων περιγράφεται στον Πίνακα 5.8.

Στόχος του σεναρίου 7 είναι η αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου θεωρώντας πολυάριθμες υποψήφιες μετρητικές μονάδες με δυνατότητα μέτρησης τριών ηλεκτρικών μεγεθών η καθεμία. Η ακριβεία όλων των μετρήσεων υπολογίστηκε για την τιμή *error* ίση με 1,5%. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9, οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες είναι ομοιόμορφα διεσπαρμένες σε όλη την έκταση του δικτύου δοκιμών. Στον Πίνακα 5.10, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης για $m_s = 10, 15$ και 20.

Πίνακας 5.9: Το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) για το σενάριο 7.

| A/A MU | Μετρήσεις | A/A MU | Μετρήσεις | A/A MU | Μετρήσεις |
|--------|--------------------------------|--------|--------------------------------|--------|-------------------------------------|
| 1 | V_5, P_{5-6}, Q_{5-6} | 11 | $V_{67}, P_{67-68}, Q_{67-68}$ | 21 | $V_{99}, P_{98-99}, Q_{98-99}$ |
| 2 | V_6, P_{6-7}, Q_{6-7} | 12 | $V_{68}, P_{68-69}, Q_{68-69}$ | 22 | $V_{101}, P_{101-102}, Q_{101-102}$ |
| 3 | V_8, P_{8-74}, Q_{8-74} | 13 | $V_{76}, P_{76-77}, Q_{76-77}$ | 23 | $V_{103}, P_{102-103}, Q_{102-103}$ |
| 4 | $V_{22}, P_{21-22}, Q_{21-22}$ | 14 | $V_{78}, P_{78-79}, Q_{78-79}$ | 24 | $V_{104}, P_{104-105}, Q_{104-105}$ |
| 5 | $V_{23}, P_{23-25}, Q_{23-25}$ | 15 | $V_{79}, P_{79-80}, Q_{79-80}$ | 25 | $V_{105}, P_{105-106}, Q_{105-106}$ |
| 6 | $V_{24}, P_{23-24}, Q_{23-24}$ | 16 | $V_{87}, P_{87-89}, Q_{87-89}$ | 26 | $V_{121}, P_{120-121}, Q_{120-121}$ |
| 7 | $V_{46}, P_{44-46}, Q_{44-46}$ | 17 | $V_{88}, P_{87-88}, Q_{87-88}$ | 27 | $V_{124}, P_{123-124}, Q_{123-124}$ |
| 8 | $V_{47}, P_{46-47}, Q_{46-47}$ | 18 | $V_{89}, P_{89-90}, Q_{89-90}$ | 28 | $V_{125}, P_{124-125}, Q_{124-125}$ |
| 9 | $V_{49}, P_{49-52}, Q_{49-52}$ | 19 | $V_{91}, P_{89-90}, Q_{89-90}$ | 29 | $V_{127}, P_{126-127}, Q_{126-127}$ |
| 10 | $V_{66}, P_{66-67}, Q_{66-67}$ | 20 | $V_{93}, P_{89-90}, Q_{89-90}$ | 30 | $V_{131}, P_{131-132}, Q_{131-132}$ |

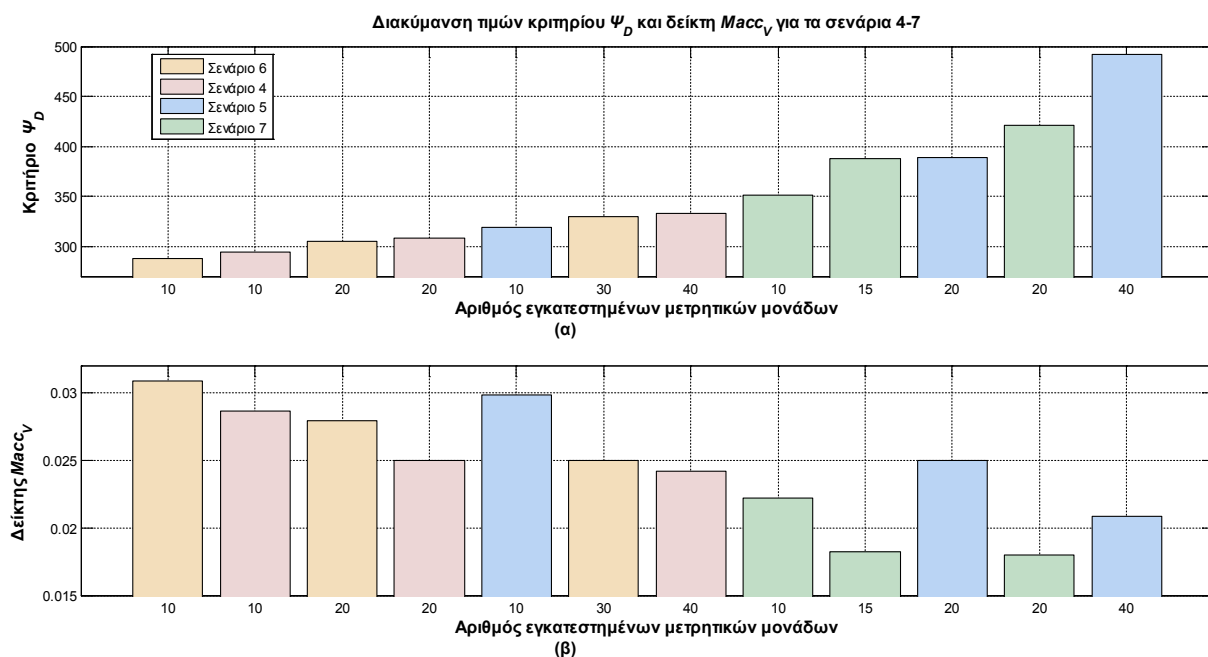
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 7.

| m_s | Βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων | Ψ_D | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|----------|----------------|
| 10 | 3,5,6,7,8,12,15,18,21,25 | 351.464 | 30.3 |
| 15 | 3,4,5,7,10,11,12,14,16,18,21,22,23,25,26 | 388.040 | 1831.9 |
| 20 | 1,2,4,5,6,7,8,11,12,14,15,16,19,21,23,25,26,27,28,29 | 420.593 | 1816.5 |

Όπως παρατηρείται, οι τιμές Ψ_D κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα λαμβάνοντας υπόψη και τις αντίστοιχες τιμές των σεναρίων 4–6, γεγονός που καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής να τοποθετούνται μετρητικές μονάδες με δυνατότητα διενέργειας πολλών μετρήσεων. Επιπλέον, η ραγδαία

αύξηση του χρόνου εκτέλεσης για $m_s = 15$ και 20 επιβεβαιώνει ότι, στο πλαίσιο του εν λόγω σεναρίου, προκύπτουν προβλήματα μεγάλου υπολογιστικού φορτίου. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς όσο αυξάνεται ο αριθμός των μετρήσεων ανά μετρητική μονάδα, τόσο περιορίζεται η αραιότητα των επιμέρους μητρών FIM των μετρητικών μονάδων με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πολυπλοκότητα των απαιτούμενων υπολογισμών για την επίλυση του προβλήματος.

Απολογιστικά, οι τιμές Ψ_D και $Mass_V$ όλων των περιπτώσεων που μελετήθηκαν στο πλαίσιο των σεναρίων 4–7 απεικονίζονται σε ραβδογράμματα στο Σχήμα 5.4. Τα αποτελέσματα εκτίθενται σε σειρά αύξουσας τιμής Ψ_D , ενώ στον οριζόντιο άξονα αναφέρονται οι τιμές των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων ανά περίπτωση.



Σχήμα 5.4: Διακύμανση των τιμών (α) του κριτηρίου Ψ_D και (β) του δείκτη $Mass_V$ ανά αριθμό εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων για τα σενάρια 4–7.

Για τις περιπτώσεις των σεναρίων 4, 6 και 7, διαπιστώνεται ότι, καθώς αυξάνεται η τιμή Ψ_D , μειώνεται η αντίστοιχη τιμή $Mass_V$. Επιπλέον, αν και στο σενάριο 7 τοποθετούνται λιγότερες μετρητικές μονάδες, επιτυγχάνονται οι μεγαλύτερες τιμές Ψ_D και παρατηρείται η ευρύτερη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS συγκριτικά με τα σενάρια 4 και 6. Εύλογα, το πληροφοριακό περιεχόμενο που συνεισφέρουν οι μετρητικές μονάδες του σεναρίου 7 είναι ενισχυμένο λόγω της καταγραφής τριών μετρήσεων ανά μονάδα και της υψηλής ακρίβειάς τους σε αντίθεση με το σενάριο 4, στο οποίο θεωρείται μία μέτρηση υψηλής ακρίβειας ανά μονάδα, και το σενάριο 6, στο οποίο περιλαμβάνονται μετρήσεις χαμηλής ακρίβειας.

Σαφώς διαφοροποιημένη είναι η διακύμανση των τιμών αναφορικά με το σενάριο 5. Παρόλο που τιμές $Mass_V$ μειώνονται καθώς αυξάνονται οι τιμές Ψ_D για $m_s = 10, 20$ και 40, παρατηρείται ότι η μείωση αυτή δεν είναι σύμφωνη με την σειρά φθίνουσας τιμής $Mass_V$, η οποία ισχύει για τα υπόλοιπα σενάρια.

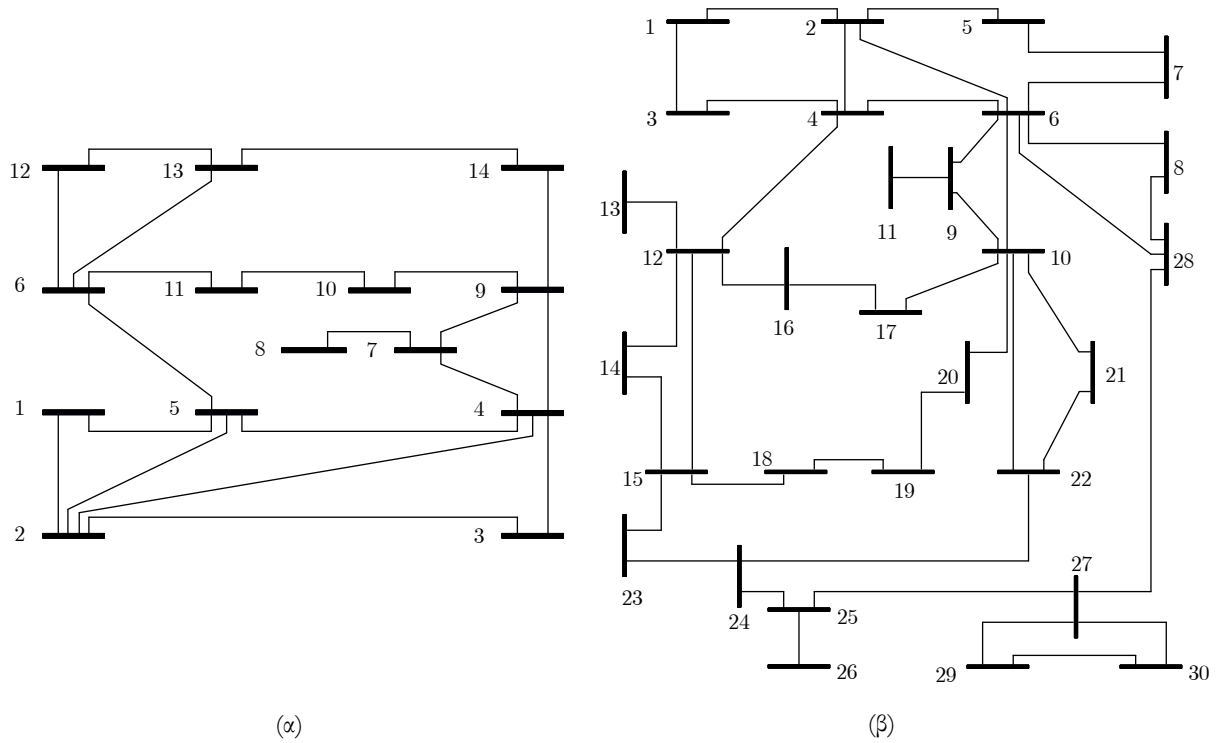
Η απουσία μέτρων τάσης από το πληροφοριακό περιεχόμενο των μετρήσεων του σεναρίου 6 έχει ανασχετικό ρόλο ως προς τη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να ερμηνευτεί με βάση το Σχήμα 4.1· ουσιαστικά, ο όγκος του ελλειψοειδούς που περιλαμβάνει την εκτίμηση $\hat{\mathbf{x}}'$ μετά από την τοποθέτηση των μετρητικών μονάδων μειώνεται σημαντικά ειδικά για $m_s = 20$ και 40, ωστόσο, η απόσταση $\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}'\|$ δε μειώνεται αναλογικά το ίδιο. Ως εκ τούτου, οι τιμές του δείκτη σφάλματος $Mass_V$ εμφανίζουν δυσανάλογα υψηλές τιμές σε σύγκριση με αυτές των υπόλοιπων σεναρίων.

5.3 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μονάδων PMU σε Πρότυπα Συστήματα Μεταφοράς

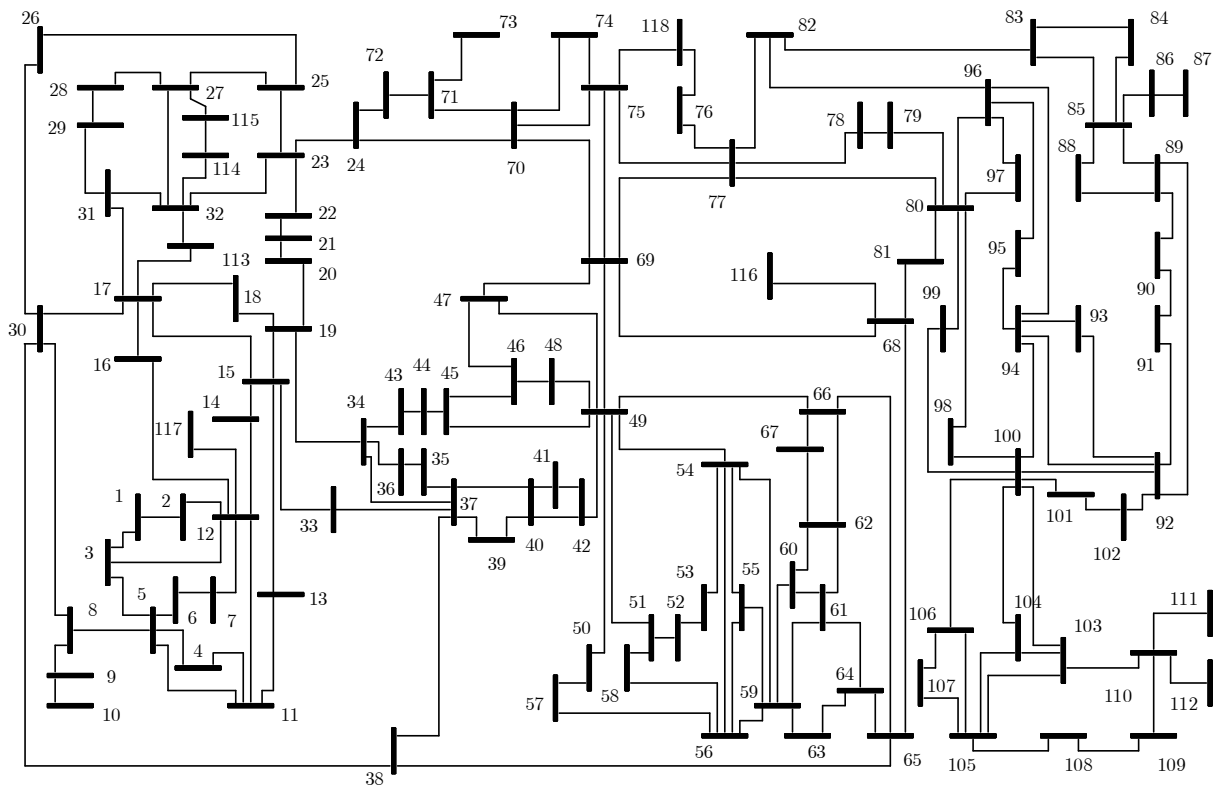
Αντικείμενο της παρούσας ενότητας είναι η εφαρμογή της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μονάδων μέτρησης φασιθετών σε πρότυπα συστήματα μεταφοράς IEEE και σε τμήμα του πολωνικού συστήματος μεταφοράς. Κατ' αρχάς, σχεδιάζονται διαφορετικά σενάρια εφαρμογής της μεθόδου στα ανωτέρω συστήματα θεωρώντας την ύπαρξη εναλλακτικών προϋπαρχουσών μετρητικών υποδομών και περιορισμών αναφορικά με τις θέσεις εγκατάστασης των μονάδων PMU. Στη συνέχεια, με γνώμονα το 2^ο ερώτημα που τέθηκε στο τέλος της ενότητας 5.1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων εφαρμογής της μεθόδου.

5.3.1 Τα συστήματα δοκιμών

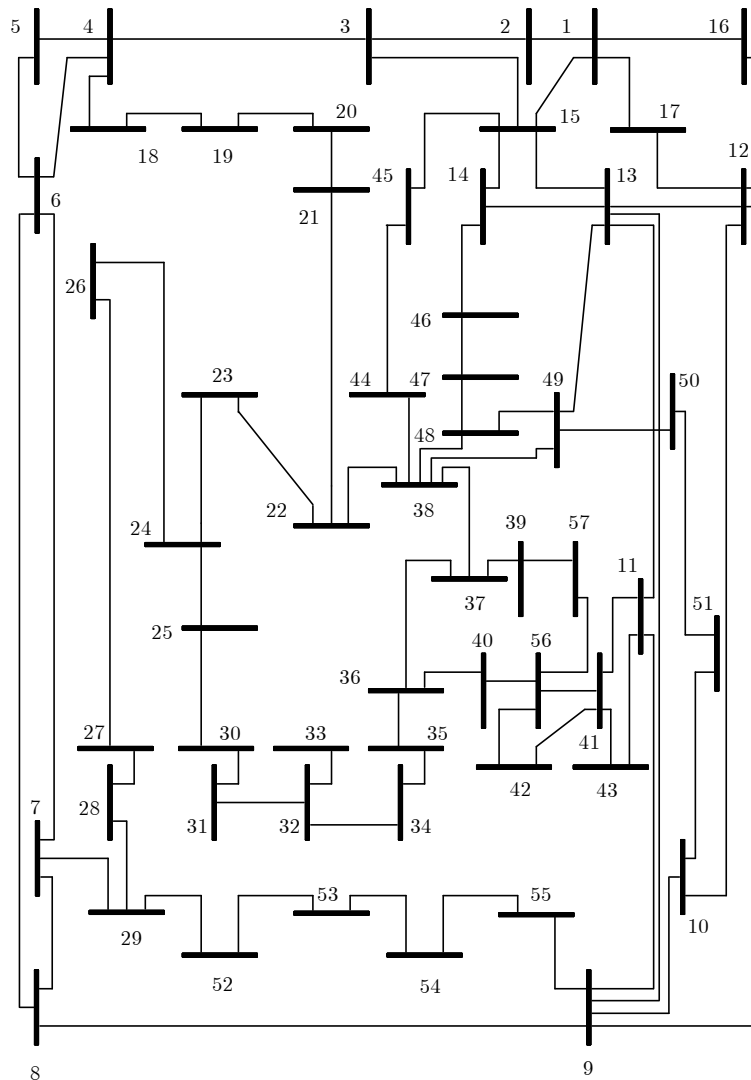
Για την εφαρμογή της μεθόδου, χρησιμοποιούνται τα πέντε πρότυπα συστήματα μεταφοράς IEEE 14, 30, 57, 118 και 300 κόμβων, τα οποία είναι διαθέσιμα στο Διαδίκτυο [198]. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα εκτεταμένο μοντέλο 3120 κόμβων προερχόμενο από το πολωνικό σύστημα μεταφοράς. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κόμβων και των κλάδων του αντλήθηκαν από την ηλεκτρονική ιστοσελίδα του πακέτου MATPOWER [286]. Στα Σχήματα 5.5–5.7, απεικονίζονται τα μονογραμμικά διαγράμματα των συστημάτων IEEE 14, 30, 118 και 57 κόμβων, αντιστοίχως. Διευκρινίζεται ότι, για οικονομία χώρου, δεν απεικονίζονται οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Επίσης, το σύστημα IEEE 300 κόμβων και το εκτεταμένο μοντέλο 3120 κόμβων δεν απεικονίζονται εξαιτίας της μεγάλης έκτασής τους. Όλα τα συστήματα δοκιμών είναι βροχοειδή και η μελέτη τους βασίζεται στα μονοφασικά ισοδύναμα μοντέλα τους, δεδομένου ότι η φόρτιση των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι συμμετρική.



Σχήμα 5.5: Τα μονογραμμικά διαγράμματα των πρότυπων συστημάτων μεταφοράς IEEE (α) 14 κόμβων και (β) 30 κόμβων.



Σχήμα 5.6: Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος μεταφοράς IEEE 118 κόμβων.



Σχήμα 5.7: Το μονογραμμικό διάγραμμα του πρότυπου συστήματος μεταφοράς IEEE 57 κόμβων.

5.3.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί ανεξαρτήτως της μετρητικής υποδομής που προϋπάρχει στο υπό μελέτη σύστημα· υποστηρίζεται ο σχεδιασμός μιας μετρητικής υποδομής αποτελούμενης αμιγώς από μονάδες PMU, η ενίσχυση μίας προϋπάρχουσας αμιγούς υποδομής SCADA και η ενίσχυση μίας προϋπάρχουσας μικτής υποδομής SCADA και μονάδων PMU με στόχο η τελική υποδομή να εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του συστήματος. Συνεπώς, το προϋπάρχον μετρητικό σύνολο μπορεί να αποτελείται από συμβατικές μετρήσεις, συγχρονισμένες μετρήσεις ή ένα μείγμα αυτών, δεδομένου ότι, στο πλαίσιο της μεθόδου, αντιμετωπίζεται ως ένα ενιαίο «πακέτο μετρήσεων» το οποίο παρέχεται στο στατικό μοντέλο WLS ή, ισοδύναμα, μοντελοποιείται μέσω μίας συνολικής μήτρας FIM.

Όπως στις προηγούμενες ενότητες, το θέμα του συγχρονισμού των μετρητικών δεδομένων δε λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Επιπλέον, στα συστήματα μεταφοράς δεν θεωρούνται καθυστερήσεις ως προς τη διαθεσιμότητα των μετρήσεων. Ως εκ τούτου, η διασπορά κάθε μέτρησης εξαρτάται μόνο από την ακρίβεια της μετρητικής μονάδας από την οποία προέρχεται [287]. Έτσι, οι διασπορές των συμβατικών μετρήσεων για τα μέτρα τάσης, τις ροές και τις εγχύσεις ισχύος λαμβάνουν τις σταθερές τιμές 0.004, 0.008 και 0.01, αντιστοίχως. Επίσης, θεωρείται μία κοινή τιμή για τις διασπορές

των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών τάσης και ρεύματος, ίση με 0.0001. Τέλος, για τις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων ισχύος θεωρείται τιμή διασποράς ίση με 0.00001. Διευκρινίζεται ότι όλες οι συμβατικές μετρήσεις ροών, εγχύσεων και μηδενικών εγχύσεων ισχύος θεωρούνται διαθέσιμες σε ζεύγη ενεργού και αέργου ισχύος.

Όπως έχει προαναφερθεί, ως αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 χρησιμοποιείται το λεγόμενο “flat voltage profile”. Έτσι, δεν απαιτείται η εκτέλεση του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης WLS, η οποία, ούτως ή άλλως, είναι επισφαλής δεδομένου ότι η παρατηρησιμότητα των συστημάτων δεν είναι εξασφαλισμένη. Δεδομένου ότι η χρήση του “flat voltage profile” σχετίζεται με την εμφάνιση μητρών κακής κατάστασης, οι φασιθέτες ρεύματος εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες σύμφωνα με την εργασία [140]. Για την πληρότητα της μελέτης, οι αντίστοιχες εξισώσεις των φασιθετών ρεύματος παρατίθενται στο Παράρτημα Α. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του μοντέλου DC απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τους απαιτούμενους υπολογισμούς τόσο για τη μήτρα FIM της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής, $\mathbf{F}_0(\mathbf{x}^0)$, όσο και για τις επιμέρους μήτρες FIM $\mathbf{F}_{i,c}(\mathbf{x}^0)$, $i = 1, \dots, m_c$ των υποψήφιων μονάδων PMU.

Έτσι, η υπολογιστική διαδικασία για την παραγωγή του αρχείου dat-s στο πλαίσιο της παρούσας μεθόδου είναι πιο απλή σε σύγκριση με τις μεθόδους των κριτηρίων D και M.

Προτού σχεδιαστούν τα σενάρια εφαρμογής, είναι απαραίτητο να εξεταστεί το ζήτημα των μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, η ύπαρξη πολλών μετρήσεων τέτοιου τύπου στο μετρητικό σύνολο αυξάνει τις πιθανότητες εμφάνισης μητρών κακής κατάστασης. Στα συστήματα μεταφοράς, ο αριθμός των κόμβων μηδενικής έγχυσης είναι, γενικά, υψηλός, άρα, η επίλυση προβλημάτων που βασίζονται στον υπολογισμό μητρών κέρδους ή, ισοδύναμα, μητρών FIM δυσχεραίνεται. Έτσι, είναι σημαντικό να εξεταστεί η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου σε περιπτώσεις συνόλων προϋπάρχουσών μετρήσεων τα οποία περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό μετρήσεων μηδενικών εγχύσεων. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι, κατά την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, επιτρέπεται, γενικά, η τοποθέτηση μονάδων PMU σε κόμβους μηδενικής έγχυσης. Το θέμα αυτό αντιμετωπίζεται ποικιλοτρόπως στο πλαίσιο σχετικών μεθόδων· δεδομένου ότι μία μονάδα PMU μετρά τους φασιθέτες ρεύματος όλων των προσκείμενων κλάδων στον κόμβο εγκατάστασής της, η τοποθέτησή της θεωρείται ότι αναιρεί την πληροφορία της μηδενικής έγχυσης ισχύος, άρα, δεν είναι επιθυμητή. Από την άλλη πλευρά, απαγορεύοντας την τοποθέτηση μονάδων PMU σε κόμβους μηδενικής έγχυσης, είναι πιθανή η αύξηση του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού μονάδων PMU για την επίτευξη παρατηρησιμότητας.

Ο σχεδιασμός των σεναρίων εφαρμογής της μεθόδου κινείται σε τρεις άξονες. Αρχικά, στόχος είναι η εξακρίβωση της δυνατότητας της μεθόδου να αποδώσει βέλτιστη λύση, δηλαδή τον ελάχιστο αριθμό μονάδων PMU για την επίτευξη παρατηρησιμότητας στο υπό μελέτη σύστημα. Στις μεθόδους βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με στόχο τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης συναντώνται διαφορετικά κριτήρια βελτιστοποίησης, πράγμα που καθιστά, πρακτικά, αδύνατη την ευθεία σύγκριση των αποτελεσμάτων τους ακόμη και για την εφαρμογή τους στο ίδιο σύστημα/δίκτυο δοκιμών. Αντιθέτως, η επίτευξη παρατηρησιμότητας αποτελεί ένα κοινό κριτήριο για όλες τις σχετικές μεθόδους βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU. Δεδομένου, δε, ότι διατίθεται πληθώρα τέτοιων μεθόδων με εφαρμογή στα πρότυπα συστήματα μεταφοράς IEEE, είναι δυνατή η σύγκριση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και άλλων μεθόδων στο ίδιο πρότυπο σύστημα και με την ίδια προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή. Κατόπιν, εξίσου σημαντικός είναι ο στόχος να εξεταστεί η επίδραση της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής στη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU ως προς τον ελάχιστο αριθμό και τις θέσεις εγκατάστασής τους. Προς αυτή την κατεύθυνση, διακρίνονται τέσσερα

βασικά σενάρια για κάθε πρότυπο σύστημα IEEE με τα εξής προϋπάρχοντα μετρητικά σύνολα: (α) καμία προϋπάρχουσα μέτρηση διαθέσιμη, (β) διαθέσιμες μόνο μετρήσεις ρών ισχύος, (γ) διαθέσιμες μόνο μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων ισχύος και (δ) διαθέσιμες μετρήσεις ρών, εγχύσεων και μηδενικών εγχύσεων ισχύος. Η ίδια πρακτική ακολουθείται και για το εκτεταμένο μοντέλο των 3120 κόμβων για το οποίο σχεδιάζονται σενάρια με εναλλακτικούς συνδυασμούς προϋπαρχουσών μετρήσεων ρών και μηδενικών εγχύσεων ισχύος. Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της μεθόδου από πλευράς υπολογιστικού φόρτου, σε όλα τα ανωτέρω σενάρια καταγράφεται ο χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας μέχρι την εύρεση λύσης. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η εξακρίβωση των παραγόντων εκείνων που επιβαρύνουν υπολογιστικά την επίλυση του προβλήματος ημιορισμένου προγραμματισμού.

Ειδικά για τη βέλτιστη επιλογή μονάδων PMU, επιδιώκεται και η διερεύνηση ενός επιπλέον ζητήματος: εξαιτίας της αυξημένου κόστους εγκατάστασης και συντήρησης των μονάδων PMU, κάποιιοι κόμβοι είναι πιθανό να αποτελούν ανεπιθύμητες θέσεις για την εγκατάσταση μονάδας PMU. Από την άλλη πλευρά, συγκεκριμένοι κόμβοι είναι πιθανό να θεωρούνται στρατηγικής σημασίας με αποτέλεσμα να είναι επιθυμητή η, κατά προτεραιότητα, αναβάθμιση του μετρητικού και τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού τους και, άρα, η τοποθέτηση μονάδας PMU σε αυτούς να θεωρείται επιβεβλημένη. Συνεπώς, σχεδιάζονται επιπλέον σενάρια σύμφωνα με τα οποία η τοποθέτηση μονάδων PMU είναι είτε επιβεβλημένη είτε απαγορευμένη για συγκεκριμένους κόμβους του υπό μελέτη συστήματος. Στο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθόδου, οι ανωτέρω περιορισμοί μπορούν να εισαχθούν στο πρόβλημα με δύο τρόπους: είτε μέσω περιορισμού ισότητας θεωρώντας $y_i = 1$ ($y_i = 0$) σε περίπτωση που επιβάλλεται (απαγορεύεται) η εγκατάσταση μονάδας PMU στον i -οστό κόμβο του συστήματος είτε συμπεριλαμβάνοντας στην προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή μονάδες PMU στους κόμβους όπου επιβάλλεται να τοποθετηθούν και αποκλείοντας από το σύνολο των υποψήφιων μονάδων PMU όσες αντιστοιχούν σε ανεπιθύμητους κόμβους. Η δεύτερη τεχνική μπορεί να αξιοποιηθεί και για την περίπτωση που υπάρχουν μονάδες PMU προεγκατεστημένες στο υπό μελέτη σύστημα: εντάσσονται στο μετρητικό σύνολο της προϋπάρχουσας υποδομής και εξαιρούνται από τις θέσεις βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU.

5.3.3 Αποτελέσματα

Αρχικά, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα στο πλαίσιο της σύγκρισης της προτεινόμενης μεθόδου με τις σχετικές μεθόδους των εργασιών [227] και [288], οι οποίες αποσκοπούν στην επίτευξη αριθμητικής παρατηρησιμότητας. Υπενθυμίζεται ότι, στην εργασία [227], προτείνεται μία μέθοδος βασισμένη στον ακέραιο τετραγωνικό προγραμματισμό. Η εργασία [288] περιλαμβάνει ένα ευρύ σύνολο αποτελεσμάτων εφαρμογής της μεθόδου της εργασίας [222] σε πρότυπα συστήματα IEEE. Υπενθυμίζεται ότι η μέθοδος βασίζεται στον ακέραιο προγραμματισμό. Στον Πίνακα 5.11, παρατίθενται τα αποτελέσματα της σύγκρισης της προτεινόμενης μεθόδου με την εργασία [227] για το σύστημα IEEE 14 κόμβων και με την εργασία [288] για το σύστημα IEEE 118 κόμβων. Ασφαλώς, η σύγκριση για κάθε περίπτωση προϋποθέτει τη θεώρηση του ίδιου προϋπάρχοντος μετρητικού συνόλου: τα σύνολα αυτά φαίνονται, επίσης, στον Πίνακα 5.11. Για κάθε μέθοδο, ο ελάχιστος αριθμός μονάδων PMU παρατίθεται με έντονη γραφή, ενώ οι θέσεις της βέλτιστης επιλογής καταγράφονται μέσα σε αγκύλες. Όπως παρατηρείται, η προτεινόμενη μέθοδος αποκαθιστά την παρατηρησιμότητα και στα δύο συστήματα με μικρότερο αριθμό τοποθετημένων μονάδων PMU σε σύγκριση με τις υπόλοιπες δύο μεθόδους, άρα, οι λύσεις που παρέχει είναι βέλτιστες.

Πίνακας 5.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και των εργασιών [227] και [288] για τα πρότυπα συστήματα IEEE 118 και 14 κόμβων, αντίστοιχα.

| Σύστημα δοκιμών | Σύνολο προϋπαρχουσών μετρήσεων | | Αριθμός και θέσεις εγκατάστασης PMUs | | |
|-----------------|---|--|---|---------------|---|
| | Ροές ισχύος | Εγχύσεις ισχύος | Εργασία [288] | Εργασία [227] | Προτεινόμενη μέθοδος |
| IEEE 14 κόμβων | 1-2, 7-4, 7-8, 7-9, 9-7, 9-4 | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13 | — | 2 {6, 9} | 1 {5} |
| IEEE 118 κόμβων | 1-3, 3-5, 3-12, 5-6, 6-7, 8-5, 8-9, 8-30, 12-16, 12-117, 15-19, 19-20, 19-34, 23-32, 25-27, 26-25, 27-32, 28-29, 29-31, 32-114, 34-37, 35-36, 35-37, 38-37, 43-44, 46-47, 49-50, 47-69, 51-52, 51-58, 54-59, 55-59, 59-60, 65-68, 68-69, 68-116, 70-74, 74-75, 82-83, 83-84, 92-94, 93-94, 94-100, 98-100, 99-100, 105-107, 106-107, 110-111, 110-112 | 5, 9, 12, 19, 21, 27, 28, 30, 32, 37, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 59, 62, 63, 64, 68, 71, 81, 83, 86, 94, 96, 108, 110 | 19 {2, 11, 17, 21, 24, 40, 49, 56, 62, 71, 77, 80, 86, 89, 91, 100, 102, 108, 118} | — | 17 {6, 10, 11, 14, 18, 29, 35, 43, 46, 51, 55, 58, 61, 66, 75, 76, 89} |

Στη συνέχεια, καταστρώνονται τέσσερα εναλλακτικά σενάρια για κάθε σύστημα δοκιμών θεωρώντας διαφορετικά σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην υποενότητα 5.3.2. Η δομή των επιμέρους συνόλων καταγράφεται στους Πίνακες 5.12 και 5.13. Επισημαίνεται ότι, με στόχο την περαιτέρω σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ της προτεινόμενης μεθόδου και της εργασίας [288], θεωρούνται οι ίδιες προϋπάρχουσες μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων με αυτές της εργασίας [288] αναφορικά με τα πρότυπα συστήματα IEEE 14, 30, 57 και 118 systems. Αντιθέτως, για το πρότυπο σύστημα IEEE 300 κόμβων θεωρούνται προϋπάρχουσες μετρήσεις για όλους τους κόμβους μηδενικής έγχυσης. Η συγκρότηση των τεσσάρων επιμέρους σεναρίων για κάθε σύστημα δοκιμών αναλύεται στον Πίνακα 5.14.

Πίνακας 5.12: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων για τα πρότυπα συστήματα IEEE 30, 57 και 118 κόμβων.

| Σύστημα δοκιμών | Μετρητικό σύνολο 1 | Μετρητικό σύνολο 2 | Μετρητικό σύνολο 3 |
|-----------------|--|--|--|
| | Ροές ισχύος | Μηδενικές εγχύσεις | Εγχύσεις ισχύος |
| IEEE 14 κόμβων | 1-2, 2-3, 6-11, 7-8, 10-11 | 7 | 8, 11, 13 |
| IEEE 30 κόμβων | 1-2, 1-3, 2-4, 2-5, 2-6, 6-8, 9-10, 10-17, 12-4, 12-13, 12-14, 12-15, 12-16, 18-19, 20-19, 21-22, 23-24, 24-25, 27-29, 29-30 | 6, 9, 11, 25, 28 | 1, 2, 19 |
| IEEE 57 κόμβων | 1-2, 1-15, 1-16, 1-17, 3-15, 4-5, 4-6, 4-18, 7-29, 8-9, 9-10, 10-12, 10-51, 11-41, 11-43, 12-13, 14-46, 19-20, 20-21, 22-38, 23-24, 24-25, 24-26, 27-26, 28-27, 29-52, 30-31, 32-34, 34-35, 36-35, 38-37, 38-44, 38-48, 40-36, 41-42, 42-56, 47-46, 49-38, 51-50, 53-54 | 4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48 | 1, 15, 32, 38, 51, 57 |
| IEEE 118 κόμβων | 1-2, 1-3, 2-12, 3-5, 3-12, 4-5, 4-11, 5-6, 5-11, 6-7, 7-12, 8-5, 8-9, 8-30, 9-10, 11-12, 11-13, 19-20, 20-21, 21-22, 22-23, 23-24, 23-25, 23-32, 24-70, 24-72, 26-25, 26-30, 27-25, 27-28, 27-32, 27-115, 28-29, 29-31, 33-37, 34-36, 34-37, 35-36, 35-37, 37-39, 37-40, 38-30, 38-37, 38-65, 39-40, 40-41, 40-42, 41-42, 42-49, 43-34, 43-44, 44-45, 45-46, 45-49, 50-57, 51-58, 54-55, 54-56, 4-59, 55-56, 55-59, 56-57, 56-58, 56-59, 59-60, 59-61, 60-61, 60-62, 61-62, 62-66, 62-67, 63-59, 63-64, 64-61, 68-81, 69-77, 75-77, 76-77, 76-118, 77-78, 77-80, 77-82, 78-79, 79-80, 80-96, 80-97, 80-98, 80-99, 81-80, 82-83, 82-96, 83-84, 83-85, 84-85, 85-86, 85-88, 85-89, 86-87, 88-89, 92-102, 100-101, 100-103, 100-104, 100-106, 101-102, 103-104, 103-105, 103-110, 104-105, 105-106, 105-107, 105-108, 106-107, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112 | 5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81 | 11, 12, 13, 14, 31, 32, 33, 50, 51, 52, 53, 54, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 91, 92, 93, 94, 95, 100, 101, 102, 103 |

Πίνακας 5.13: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων για τα πρότυπο σύστημα IEEE 300 κόμβων.

| Σύστημα δοκιμών | Μετρητικό σύνολο 1 | Μετρητικό σύνολο 2 | Μετρητικό σύνολο 3 |
|-----------------|--|--|---|
| | Ροές ισχύος | Μηδενικές εγχύσεις | Εγχύσεις ισχύος |
| IEEE 300 κόμβων | 1-5, 2-6, 2-8, 3-2, 3-4, 3-7, 3-19, 3-150, 4-16, 5-9, 7-5, 7-6, 7-12, 7-131, 8-11, 8-14, 9-11, 10-11, 11-13, 12-10, 12-21, 13-20, 14-15, 15-17, 15-37, 15-89, 15-90, 16-15, 16-42, 19-21, 19-87, 20-22, 20-27, 21-20, 21-24, 22-23, 23-25, 24-23, 24-319, 25-26, 26-27, 26-320, 33-34, 33-38, 33-40, 33-41, 34-42, 35-72, 35-76, 35-77, 36-35, 36-88, 37-38, 37-40, 37-41, 37-49, 37-89, 37-90, 37-9001, 38-41, 38-43, 39-42, 40-48, 41-42, 41-49, 41-51, 42-46, 43-44, 43-48, 43-53, 44-47, 44-54, 45-44, 45-46, 45-60, 45-74, 46-81, 47-73, 47-113, 48-107, 49-51, 51-52, 52-55, 53-54, 54-55, 55-57, 57-58, 57-63, 58-59, 59-61, 60-62, 62-61, 62-64, 62-144, 63-64, 63-526, 69-79, 69-211, 70-71, 70-528, 71-72, 71-73, 72-77, 72-531, 73-74, 73-76, 73-79, 74-88, 74-562, 76-77, 77-78, 77-80, 77-552, 77-609, 78-79, 78-84, 79-211, 80-211, 81-88, 81-194, 81-195, 85-86, 85-99, 86-87, 86-102, 86-323, 87-94, 89-91, 90-92, 91-94, 91-97, 92-103, 92-105, 94-97, 97-100, 97-102, 97-103, 98-100, 98-102, 99-107, 99-108, 99-109, 99-110, 100-102, 102-104, 103-105, 104-108, 104-322, 105-107, 105-110, 108-324, 109-110, 109-113, 109-114, 110-112, 112-114, 114-207, 121-115, 115-122, 116-120, 116-124, 117-118, 118-119, 118-121, 118-1201, 119-120, 119-121, 120-1201, 122-123, 122-125, 122-157, 123-124, 123-125, 125-126, 126-127, 126-129, 126-132, 126-157, 126-158, 126-169, 127-128, 127-134, 127-168, 128-130, 128-133, 129-130, 129-133, 130-131, 159-117, 160-124, 201-69, 7001-1, 7002-2, 7003-3, 7011-11, 7012-12, 7017-17, 7023-23, 7024-24, 7039-39, 7044-44, 7049-49, 7055-55, 7057-57, 7061-61, 7062-62, 7071-71 | 4, 7, 12, 16, 19, 24, 34, 35, 36, 39, 42, 45, 46, 60, 62, 64, 69, 74, 78, 81, 85, 86, 87, 88, 100, 115, 116, 117, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 144, 150, 151, 158, 160, 164, 165, 166, 168, 169, 174, 193, 194, 195, 210, 212, 219, 226, 237, 240, 244, 1201, 2040, 7049, 9001, 9005, 9006, 9007, 9012, 9023, 9044 | 13, 14, 15, 17, 39, 40, 41, 47, 48, 49, 79, 80, 84, 104, 105, 107, 108, 109, 110, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 156, 157, 159, 161, 196, 197, 199, 200, 201, 202, 205, 206, 207, 7001, 7002, 7003, 7011, 7012, 7017, 7023, 7024, 7039, 7044, 7055, 9026, 9031, 9032, 9033, 9034, 9035, 9036, 9037 |

Πίνακας 5.14: Συγκρότηση των τεσσάρων σεναρίων εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου ανά σύστημα δοκιμών.

| Σύστημα δοκιμών | Σενάριο | | | |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | Μετρητικό σύνολο (αριθμός μετρήσεων) | Μετρητικό σύνολο (αριθμός μετρήσεων) | Μετρητικό σύνολο (αριθμός μετρήσεων) | Μετρητικό σύνολο (αριθμός μετρήσεων) |
| IEEE 14 κόμβων | – (0) | 1 (5) | 2 (1) | 1 & 2& 3 (9) |
| IEEE 30 κόμβων | – (0) | 1 (20) | 2 (5) | 1 & 2& 3 (28) |
| IEEE 57 κόμβων | – (0) | 1 (70) | 2 (15) | 1 & 2& 3 (61) |
| IEEE 118 κόμβων | – (0) | 1 (117) | 2 (10) | 1 & 2 & 3 (154) |
| IEEE 300 κόμβων | – (0) | 1 (207) | 2 (66) | 1 & 2 & 3 (332) |

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου, δηλαδή ο ελάχιστος αριθμός και οι θέσεις (κόμβοι) εγκατάστασης μονάδων PMU, για τα σεναρία 1–4 παρατίθενται στους Πίνακες 5.15 και 5.16.

Πίνακας 5.15: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα πρότυπα συστήματα IEEE 30, 57 και 118 κόμβων.

| Σύστημα δοκιμών | Σενάριο | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---|--------------|--|--------------|---|--------------|------------|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
| | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι |
| IEEE 14 κόμβων | 4 | 2, 7, 11, 13 | 2 | 4, 13 | 3 | 2, 6, 9 | 2 | 4, 6 |
| IEEE 30 κόμβων | 10 | 1, 2, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 25, 27 | 4 | 6, 9, 10, 25 | 7 | 1, 2, 10, 12, 19, 24, 30 | 2 | 6, 19 |
| IEEE 57 κόμβων | 17 | 1, 4, 7, 13, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 47, 51, 54 | 6 | 8, 15, 22, 32, 54, 57 | 11 | 1, 6, 13, 19, 25, 29, 32, 38, 41, 51, 54 | 2 | 23, 35 |
| IEEE 118-bus | 32 | 1, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 78, 85, 86, 90, 92, 96, 100, 105, 110, 114 | 10 | 12, 17, 32, 46, 52, 68, 70, 71, 90, 94 | 28 | 1, 10, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 35, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114 | 3 | 11, 37, 66 |

Πίνακας 5.16: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα πρότυπο σύστημα IEEE 300 κόμβων.

| Σύστημα δοκιμών | Σενάριο | | | | | | | |
|-----------------|--------------|---|--------------|--|--------------|--|--------------|---|
| | 1 | | 2 | | 1 | | 4 | |
| | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι | Αριθμός PMUs | Κόμβοι |
| IEEE 300-bus | 87 | 1, 2, 3, 11, 12, 13, 15, 17, 23, 24, 26, 33, 35, 39, 43, 44, 47, 49, 55, 57, 61, 62, 63, 70, 71, 72, 74, 77, 78, 81, 86, 97, 100, 104, 105, 108, 114, 119, 120, 122, 124, 130, 132, 133, 134, 137, 139, 140, 143, 153, 156, 159, 164, 166, 173, 178, 184, 188, 189, 194, 204, 205, 210, 211, 214, 217, 221, 225, 229, 231, 232, 234, 237, 238, 240, 244, 247, 249, 9002, 9003, 9004, 9005, 9007, 9012, 9021, 9023, 9053 | 47 | 119, 120, 130, 132, 133, 136, 137, 139, 140, 143, 153, 154, 164, 166, 173, 178, 184, 188, 194, 198, 204, 208, 210, 211, 214, 217, 221, 225, 229, 231, 232, 234, 237, 238, 240, 245, 246, 249, 9002, 9003, 9004, 9005, 9007, 9012, 9021, 9023, 9053 | 70 | 1, 2, 3, 11, 15, 17, 20, 23, 26, 41, 43, 44, 48, 55, 57, 61, 63, 70, 71, 72, 77, 97, 104, 105, 108, 109, 114, 119, 120, 122, 126, 137, 139, 140, 143, 153, 154, 162, 175, 178, 181, 184, 189, 190, 191, 199, 205, 211, 214, 217, 221, 229, 231, 232, 234, 238, 241, 245, 249, 7024, 9002, 9003, 9004, 9021, 9025, 9051, 9052, 9053, 9054, 9071 | 21 | 26, 27, 33, 43, 60, 61, 70, 86, 105, 120, 122, 124, 127, 132, 134, 137, 139, 142, 145, 160, 176 |

Μία βασική παρατήρηση είναι ότι, για το σενάριο 4, υπάρχουν κόμβοι μηδενικής έγχυσης οι οποίοι επιλέγονται για τοποθέτηση μονάδων PMU: ο κόμβος 6 για το σύστημα IEEE 30 κόμβων, ο κόμβος 37 για το σύστημα IEEE 118 κόμβων και οι κόμβοι 60, 132, 134 και 160 για το σύστημα IEEE 300 κόμβων. Επιπλέον, αξιοσημείωτο είναι ότι, στο σενάριο 3, ο αριθμός τοποθετημένων μονάδων PMU ταυτίζεται με τον αντίστοιχο της εργασίας [288] για όλα τα συστήματα δοκιμών, αν και οι κόμβοι εγκατάστασης διαφέρουν γενικά. Βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο ελάχιστος απαιτούμενος αριθμός μονάδων PMU για την επίτευξη παρατηρησιμότητας μειώνεται, όσο διευρύνεται η χωρική διασκόρπιση των προϋπαρχουσών μετρήσεων στο υπό μελέτη σύστημα. Τέλος, οι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας μέχρι την εύρεση της βέλτιστης λύσης για όλα τα σενάρια, καταγράφονται στον Πίνακα 5.17. Όπως διαπιστώνεται, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των προϋπαρχουσών μετρήσεων ανά σενάριο, μεγαλώνει σταδιακά και ο χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας.

Πίνακας 5. 17: Χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας ανά σύστημα δοκιμών και σενάριο.

| Σύστημα δοκιμών | Χρόνος CPU (s) | | | |
|-----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|
| | Σενάριο 1 | Σενάριο 2 | Σενάριο 3 | Σενάριο 4 |
| IEEE 14-bus | 0.159 | 0.204 | 0.213 | 0.355 |
| IEEE 30-bus | 0.193 | 0.219 | 0.313 | 0.361 |
| IEEE 57-bus | 0.234 | 0.402 | 0.647 | 0.648 |
| IEEE 118-bus | 0.261 | 0.417 | 0.984 | 0.995 |
| IEEE 300-bus | 0.370 | 0.426 | 2.361 | 2.366 |

Κατόπιν, καταστρώνονται τα σενάρια που περιλαμβάνουν περιορισμούς αναφορικά με την επιβολή ή απαγόρευση εγκατάστασης μονάδων PMU σε συγκεκριμένους κόμβους, συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης προεγκατεστημένων μονάδων PMU στο υπό μελέτη σύστημα. Τα σενάρια 5–19 περιγράφονται αναλυτικά στους Πίνακες 5.18 και 5.19 και, όπως διαπιστώνεται, όλα περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές μετρήσεις όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών. Επιπλέον, τα σενάρια 6, 9, 12, 15 and 18 περιλαμβάνουν περιορισμούς απαγόρευσης τοποθέτησης μονάδων PMU σε συγκεκριμένους κόμβους, ενώ στα σενάρια 7, 10, 13, 16 and 19 επιβάλλεται η τοποθέτηση μονάδων PMU σε επιλεγμένους κόμβους.

Πίνακας 5.18: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των προεγκατεστημένων μονάδων PMU, και οι περιορισμοί για τα σενάρια 5–13.

| A/A σεναρίου | Σύστημα δοκιμών | Σύνολο προϋπαρχουσών μετρήσεων | | | Πρόσθετοι περιορισμοί | |
|-----------------|--------------------|--|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| | | Ροές ισχύος | Εγγύσεις ισχύος | Θέσεις προ- εγκατεστημένων PMUs | Θέσεις απαγόρευσης εγκατάστασης | Θέσεις υποχρεωτικής εγκατάστασης |
| 5 | IEEE 14 κόμβων | 2-1, 3-4, 5-2, 11-10 | 9 | 1 | – | – |
| 6 | | | | | 6 | – |
| 7 | | | | | – | 13 |
| 8 | IEEE 30 κόμβων | 1-2, 2-5, 7-6, 8-28, 19-18, 21-10 | 2, 4, 22, 23, 27 | 3, 15 | – | – |
| 9 | | | | | 10, 21 | – |
| 10 | | | | | – | 10, 25 |
| 11 | IEEE 57 κόμβων | 1-16, 3-15, 4-5, 18-19, 20-21, 29-52, 30-31, 42-41, 50-51, 57-39 | 6, 12, 20, 28, 32, 49 | 9, 37, 38, 56 | – | – |
| 12 | | | | | 22, 25, 29, 47 | – |
| 13 | | | | | – | 1, 5, 18, 23 |

Πίνακας 5.19: Τα θεωρούμενα σύνολα προϋπαρχουσών μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων των προεγκατεστημένων μονάδων PMU, και οι περιορισμοί για τα σενάρια 14–19.

| Α/Α σεναρίου | Σύστημα δοκιμών | Σύνολο προϋπαρχουσών μετρήσεων | | | Πρόσθετοι περιορισμοί | |
|-----------------|--------------------|---|--|---|---------------------------------------|--|
| | | Ροές ισχύος | Εγγύσεις ισχύος | Θέσεις προ- εγκατεστημένων PMUs | Θέσεις απαγόρευσης εγκατάστασης | Θέσεις υποχρεωτικής εγκατάστασης |
| 14 | IEEE 118 κόμβων | 1-2, 2-12, 4-11, 13-15, 24-70, 48-49, 50-57, 56-55, 60-62, 62-66, 78-79, 86-87, 89-92, 108-109 | 3, 11, 19, 54, 70, 79, 85, 92, 104 | 16, 23, 32, 51, 68, 72, 88, 90, 106, 110 | – | – |
| 15 | | | | | 17, 34, 60, 74, 85, 108 | – |
| 16 | | | | | – | 11, 75, 80, 94, 100, 105 |
| 17 | IEEE 300 κόμβων | 1-5, 2-6, 2-8, 3-1, 3-2, 3-4, 3-7, 3-19, 3-150, 4-16, 5-9, 7-5, 7-6, 7-12, 7-131, 8-11, 8-14, 9-11, 10-11, 11-13, 12-10, 12-21, 15-37, 21-20, 24-23, 21-24, 22-23, 23-25, 24-319, 25-26, 26-27, 26-320, 33-34, 33-38, 33-40, 33-41, 34-42, 35-72, 35-76, 35-77, 36-35, 36-88, 37-38, 37-40, 37-41, 37-49, 37-89, 37-90, 37-9001, 38-41, 38-43, 45-60, 57-58, 58-59, 60-62, 62-61, 62-64, 62-144, 63-64, 63-526, 69-211, 69-79, 70-71, 70-528, 71-72, 71-73, 72-77, 72-531, 73-62, 201-69, 7001-1, 7002-2, 7003-3, 7011-11, 7023-23, 7024-24, 7061-61, 7071-71 | 36, 38, 46, 47, 64, 71, 84, 90, 98, 109, 112, 135, 140, 147, 170, 171, 199, 201, 205, 324, 7049, 9004, 9051 | 3, 15, 26, 97, 121, 133, 140, 141, 157, 179, 189, 198, 202, 206, 220, 224, 228, 9005 | – | – |
| 18 | | | | | 115, 121, 126, 133, 220, 224 | – |
| 19 | | | | | – | 40, 92, 130, 163, 225, 7002 |

Στον Πίνακα 5.20, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου – ο ελάχιστος αριθμός και οι θέσεις (κόμβοι) εγκατάστασης μονάδων PMU – για τα σενάρια 5–19. Σε γενικές γραμμές, παρατηρείται ότι η επιβολή περιορισμών οδηγεί σε αύξηση του ελάχιστου αριθμού μονάδων PMU.

Πίνακας 5. 20: Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου για τα σενάρια 5–19.

| Σύστημα δοκιμών | A/A σεναρίου | Αριθμός PMUs | Θέσεις εγκατάστασης PMUs |
|-----------------|--------------|--------------|--|
| IEEE 14 κόμβων | 5 | 2 | 6, 7 |
| | 6 | 3 | 7, 11, 12 |
| | 7 | 3 | 6, 7, 13 |
| IEEE 30 κόμβων | 8 | 5 | 7, 8, 10, 21, 24 |
| | 9 | 6 | 7, 8, 11, 14, 22, 24 |
| | 10 | 5 | 7, 8, 10, 21, 25 |
| IEEE 57 κόμβων | 11 | 10 | 3, 10, 13, 19, 22, 24, 25, 29, 41, 47 |
| | 12 | 10 | 1, 4, 10, 21, 24, 28, 30, 39, 41, 48 |
| | 13 | 11 | 1, 5, 18, 21, 23, 28, 30, 38, 40, 41, 47 |
| IEEE 118 κόμβων | 14 | 21 | 4, 8, 10, 13, 17, 24, 25, 27, 33, 37, 40, 43, 52, 58, 59, 66, 74, 77, 86, 93, 109 |
| | 15 | 22 | 4, 8, 10, 13, 18, 24, 25, 27, 33, 37, 40, 43, 52, 58, 59, 66, 70, 72, 77, 88, 92, 94 |
| | 16 | 25 | 4, 8, 10, 11, 13, 17, 25, 27, 32, 37, 40, 43, 52, 60, 62, 66, 74, 75, 76, 80, 86, 94, 100, 105, 109 |
| IEEE 300 κόμβων | 17 | 54 | 12, 17, 37, 39, 41, 42, 51, 52, 64, 70, 77, 87, 91, 98, 104, 107, 108, 113, 115, 119, 125, 127, 132, 139, 142, 148, 152, 160, 165, 168, 175, 178, 183, 193, 195, 196, 210, 212, 213, 215, 218, 219, 221, 230, 247, 2040, 7001, 7011, 7012, 7017, 7024, 9001, 9003, 9006 |
| | 18 | 57 | 12, 17, 37, 39, 41, 42, 51, 52, 64, 70, 77, 87, 91, 94, 107, 108, 112, 113, 119, 123, 127, 132, 139, 140, 145, 150, 152, 160, 165, 168, 172, 175, 178, 183, 193, 195, 196, 210, 212, 213, 215, 218, 219, 221, 225, 226, 230, 247, 2040, 7001, 7011, 7012, 7017, 7024, 9001, 9003, 9006 |
| | 19 | 60 | 12, 17, 37, 39, 40, 41, 42, 51, 52, 64, 70, 74, 77, 87, 91, 92, 104, 107, 108, 113, 115, 119, 125, 127, 130, 132, 139, 142, 148, 152, 160, 163, 165, 168, 175, 178, 183, 195, 196, 210, 212, 213, 215, 218, 219, 221, 225, 227, 230, 247, 2040, 7001, 7002, 7011, 7012, 7017, 7024, 9002, 9003, 9006 |

Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόζεται στο εκτεταμένο μοντέλο 3120 κόμβων του πολωνικού συστήματος μεταφοράς θεωρώντας 14 διαφορετικά σενάρια. Στον Πίνακα 5.21, παρατίθενται τα προϋπάρχοντα μετρητικά σύνολα και ο ελάχιστος αριθμός μονάδων PMU ο οποίος προκύπτει για κάθε σενάριο, καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας. Γενική διαπίστωση είναι ότι η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργεί αποτελεσματικά, ενώ, και από πλευράς υπολογιστικού φόρτου, αποδεικνύεται συμφέρουσα. Ο χρόνος εκτέλεσης για το σχεδιασμό μίας μετρητικής υποδομής αμιγώς αποτελούμενη από μονάδες PMU (σενάριο 1) είναι, μόλις, 5.753 s και αυξάνεται βαθμιαία καθώς ο αριθμός των προϋπαρχουσών μετρήσεων ανά σενάριο ανεβαίνει.

Πολύ ενδιαφέρουσα είναι και η πληροφορία που παρέχει η τελευταία στήλη του Πίνακα 5.21· αναφέρεται ο λόγος του αριθμού των εγκατεστημένων μονάδων PMU προς το συνολικό αριθμό των κόμβων του συστήματος. Όπως έχει προαναφερθεί, ο λόγος αυτός έχει παρατηρηθεί ότι κυμαίνεται μεταξύ 1/4 και 1/3 [220]. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.21, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ο λόγος ξεπερνά σημαντικά το κάτω όριο, ωστόσο διατηρείται, πάντα, κάτω από το άνω όριο.

Πίνακας 5.21: Ελάχιστος αριθμός εγκατεστημένων μονάδων PMU ανά θεωρούμενο σενάριο για το εκτεταμένο μοντέλο των 3120 κόμβων.

| A/A σεναρίου | Αριθμός μετρήσεων ροών ισχύος | Αριθμός μετρήσεων μηδενικής έγχυσης | Αριθμός PMUs | Χρόνος CPU (s) | $\lambda = \frac{\text{Αριθμ. PMU}}{\text{Αριθμ. κόμβων}}$ |
|-----------------|-------------------------------------|--|-----------------|----------------|--|
| 1 | 0 | 0 | 992 | 5.753 | 0.318 |
| 2 | 160 | 0 | 963 | 11.362 | 0.310 |
| 3 | 220 | 0 | 947 | 11.635 | 0.304 |
| 4 | 320 | 0 | 926 | 22.193 | 0.297 |
| 5 | 400 | 0 | 909 | 33.686 | 0.291 |
| 6 | 500 | 0 | 888 | 35.132 | 0.285 |
| 7 | 0 | 34 | 982 | 10.355 | 0.315 |
| 8 | 0 | 70 | 975 | 21.396 | 0.313 |
| 9 | 0 | 100 | 960 | 48.866 | 0.308 |
| 10 | 0 | 200 | 921 | 89.323 | 0.295 |
| 11 | 50 | 50 | 971 | 55.581 | 0.311 |
| 12 | 280 | 100 | 900 | 73.264 | 0.289 |
| 13 | 400 | 100 | 881 | 97.719 | 0.287 |
| 14 | 400 | 200 | 841 | 132.453 | 0.270 |

Γενικό συμπέρασμα είναι ότι η σύγκλιση της υπολογιστικής διαδικασίας στη βέλτιστη λύση εξαρτάται από την κατάσταση των εμπλεκόμενων μητρών FIM. Όσο χειροτερεύει η κατάσταση των μητρών, τόσο πιο επισφαλής είναι η σύγκλιση της προτεινόμενης υπολογιστικής διαδικασίας.

5.4 Εφαρμογή της Μεθόδου Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών Μονάδων με Χρήση του Κριτηρίου M σε Δίκτυα Διανομής 55 και 95 Κόμβων

Στην παρούσα ενότητα, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου M εφαρμόζεται σε δύο δίκτυα διανομής 55 και 95 κόμβων τα οποία προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία [202], [97]. Η ενότητα χωρίζεται σε δύο μέρη: στο, μεν, πρώτο η μέθοδος χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη επιλογή θέσεων εγκατάστασης έξυπνων μετρητών στο δίκτυο των 55 κόμβων, στο, δε, δεύτερο χρησιμοποιείται για τη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στο δίκτυο των 95 κόμβων διερευνώντας, επιπλέον, και τη δυνατότητα της μεθόδου να οδηγεί, ταυτόχρονα, και σε επίτευξη παρατηρησιμότητας. Κατά τα πρότυπα των προηγούμενων ενοτήτων, αρχικά, σχεδιάζονται διαφορετικά σενάρια εφαρμογής της μεθόδου θεωρώντας εναλλακτικά σύνολα υποψήφιων θέσεων εγκατάστασης έξυπνων μετρητών ή μετρητικών μονάδων. Κατόπιν, με γνώμονα το 3^ο ερώτημα που τέθηκε στο τέλος της ενότητας 5.1, παρατίθενται τα αποτελέσματα των σεναρίων εφαρμογής της μεθόδου.

5.4.1 Εφαρμογή στο δίκτυο διανομής 55 κόμβων

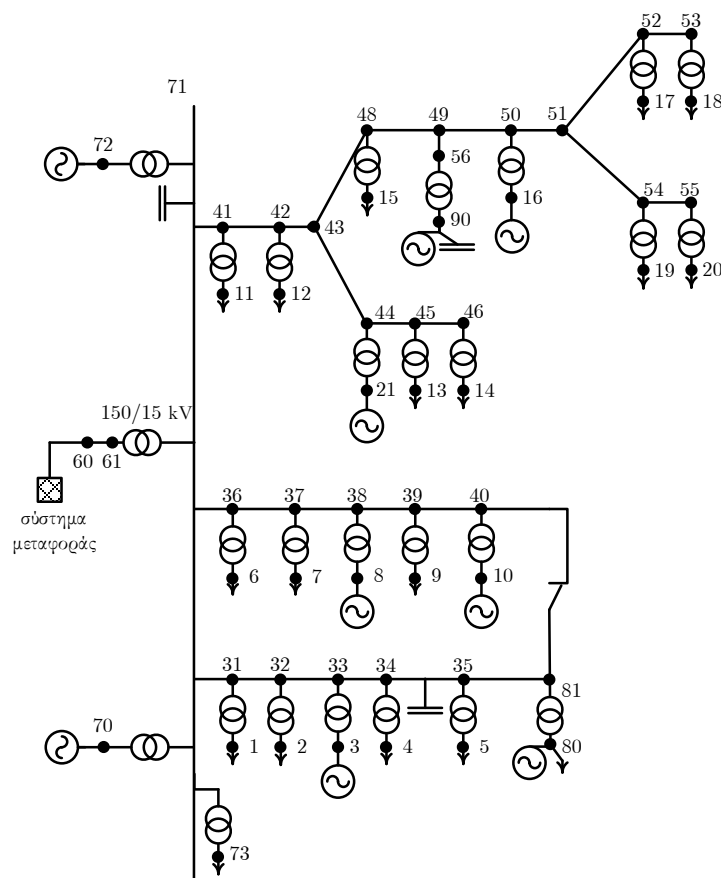
Η βέλτιστη επιλογή κόμβων φορτίου για την εγκατάσταση έξυπνου συστήματος μέτρησης σε δίκτυα διανομής με στόχο τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας υποενότητας. Η επιλογή ενός κόμβου φορτίου σηματοδοτεί την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών στους καταναλωτές ΧΤ που εξυπηρετεί. Προς αυτή την κατεύθυνση, η εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει τη χρήση μίας μεθόδου εκτίμησης φορτίου, δεδομένου ότι, σύμφωνα με όσα έχουν προαναφερθεί στην ενότητα 3.3, τα δεδομένα φορτίου που προέρχονται από έξυπνους μετρητές δε

μπορούν να εισαχθούν απ' ευθείας στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Θεωρώντας ότι το υπό μελέτη δίκτυο εξυπηρετείται από ένα πλήρως λειτουργικό σύστημα ΑΜΙ (περίπτωση iii, ενότητα 3.4), επιλέγεται η χρήση της μεθόδου εκτίμησης φορτίου [169].

5.4.1.1 Το δίκτυο δοκιμών

Ως δίκτυο δοκιμών χρησιμοποιείται το αρχικό δίκτυο, από το οποίο, μέσω περικλοπή, συγκροτήθηκε το δίκτυο δοκιμών της υποενότητας 3.5.4. Πρόκειται για ένα πειραματικό δίκτυο ερευνητικού σκοπού του οποίου η δομή περιγράφεται λεπτομερώς στην αναφορά [202] και το μονογραμμικό διάγραμμα απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8. Αποτελείται από 5 μικροδίκτυα ακτινικής δομής με δυνατότητα επαναδιαμόρφωσης και περιλαμβάνει 6 κόμβους με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, άρα, έχει τα χαρακτηριστικά ενός ενεργού δικτύου διανομής. Συνολικά, τροφοδοτεί 16 κόμβους φορτίου, οπότε, παρέχεται επαρκής αριθμός κόμβων ως υποψήφιες θέσεις για την εγκατάσταση έξυπνου συστήματος μέτρησης. Παράλληλα, το μέγεθος του δικτύου είναι αρκετών μικρό ώστε να μπορεί να αναπτυχθεί μία υποδομή ΑΜΙ. Συνεπώς, το δίκτυο δοκιμών είναι κατάλληλο πεδίο εφαρμογής και μελέτης των δυνατοτήτων της μεθόδου.

Με βάση την επιχειρηματολογία που αναπτύχθηκε στην υποενότητα 5.2.1, διευκρινίζεται ότι, και για την παρούσα μελέτη, δεν λαμβάνεται υπόψη η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων του δικτύου και θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του δικτύου. Έτσι, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των κόμβων και των κλάδων, όπως οι σύνθετες αντιστάσεις, οι ροές και οι εγχύσεις ισχύος, λαμβάνουν μία ισοδύναμη τιμή.



Σχήμα 5.8: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 55 κόμβων.

5.4.1.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βασίζεται στο εξής σκεπτικό: προκειμένου να αξιοποιηθούν με βέλτιστο τρόπο τα μετρητικά δεδομένα που προέρχονται από έξυπνα συστήματα μέτρησης στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάσταση, επιδιώκεται η βέλτιστη επιλογή των κόμβων φορτίου για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών ώστε να μεγιστοποιείται η ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης του υπό μελέτη δικτύου. Προσεγγίζοντας τη διαδικασία σε πρακτικό επίπεδο, θεωρείται ότι η ανάπτυξη ενός έξυπνου συστήματος μέτρησης βασίζεται, μεταξύ άλλων, στην εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε όλους τους καταναλωτές ΧΤ που τροφοδοτούνται από επιλεγμένους μετασχηματιστές διανομής του δικτύου, οι οποίοι αντιστοιχούν, ένας προς έναν, σε συγκεκριμένους κόμβους φορτίου. Η θεώρηση αυτή έχει ρεαλιστική βάση, δεδομένου ότι το οικονομικό κόστος για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε όλους τους καταναλωτές ενός δικτύου διανομής είναι πολύ μεγάλο. Επιπλέον, η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε στρατηγικές θέσεις επιδιώκοντας την πλήρη κάλυψη όλων των καταναλωτών συγκεκριμένων μετασχηματιστών διανομής αποτελεί μία ρεαλιστική πρακτική [191]. Τέλος, δεδομένου ότι ένα έξυπνο σύστημα μέτρησης αναπτύσσεται, κυρίως, για τιμολογιακούς σκοπούς, η στοχευμένη εγκατάσταση έξυπνων μετρητών λαμβάνοντας υπόψη τη φόρτιση (ή την ονομαστική ικανότητα) κάθε μετασχηματιστή διανομής είναι, επίσης, αναμενόμενη.

Σε δεύτερο επίπεδο, είναι απαραίτητο να περιγραφεί ένα ρεαλιστικό πλαίσιο για τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα μετρητικά δεδομένα από ένα έξυπνο σύστημα μέτρησης στο πλαίσιο λειτουργίας των εκτιμητών κατάσταση. Σύμφωνα με την ενότητα 3.3, για την αξιοποίηση μετρητικών δεδομένων φορτίου από τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάσταση, είναι απαραίτητη η επεξεργασία τους σε προγενέστερο στάδιο χρησιμοποιώντας κάποια μέθοδο εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου. Ειδικά για μετρητικά δεδομένα από έξυπνους μετρητές, είναι απαραίτητη η χρήση μίας μεθόδου εκτίμησης φορτίου με βάση δεδομένα σχεδόν πραγματικού χρόνου· τα δεδομένα φορτίου από τους έξυπνους μετρητές θεωρείται ότι συλλέγονται και αποστέλλονται στο ΚΕΕ του υπό μελέτη δικτύου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, αθροίζονται κατάλληλα ώστε να προκύψει το συνολικό φορτίο των αντίστοιχων μετασχηματιστών διανομής και, τέλος, γίνεται χρήση της μεθόδου εκτίμησης φορτίου σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, προκύπτουν ζεύγη εγχύσεων ενεργού/αέργου ισχύος για τους αντίστοιχους κόμβους φορτίου τα οποία παρέχονται ως ψευδομετρήσεις στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάσταση.

Με βάση το ανωτέρω πλαίσιο, για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης φορτίου [169] και ακολουθείται η προσέγγιση της υποενότητας 3.5.4.2. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται και πάλι τα κανονικοποιημένα προφίλ φορτίου NLP1–NLP9 από το δίκτυο διανομής της Ιρλανδίας προκειμένου να δημιουργηθούν τεχνητά δεδομένα φορτίου σε επίπεδο κόμβων για το δίκτυο δοκιμών. Η εφαρμογή της μεθόδου εκτίμησης φορτίου σε αυτά τα δεδομένα αποδίδει ψευδομετρήσεις αυξημένης ακρίβειας οι οποίες, κατόπιν, παρέχονται στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάσταση. Με αυτό τον τρόπο, η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών στους καταναλωτές ενός κόμβου φορτίου ισοδυναμεί με τη διαθεσιμότητα ψευδομετρήσεων φορτίου αυξημένης ακρίβειας για αυτόν, οι οποίες αντικαθιστούν προϋπάρχουσες ψευδομετρήσεις χαμηλής ακρίβειας (π.χ. με βάση ιστορικά δεδομένα καταναλώσεων). Άρα, θεωρώντας προιαθορισμένο τον αριθμό των διαθέσιμων έξυπνων μετρητών και, άρα, τον αριθμό των κόμβων φορτίου που μπορούν να εξοπλιστούν πλήρως, η προτεινόμενη μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων υποδεικνύει το βέλτιστο συνδυασμό ψευδομετρήσεων φορτίου ή, ισοδύναμα, των κόμβων φορτίου όπου πρέπει να εγκατασταθούν έξυπνοι μετρητές προκειμένου να εκπληρώνεται το κριτήριο M για την τελική μετρητική υποδομή.

Δεδομένου ότι, στο πλαίσιο της παρούσας εφαρμογής, δεν επιδιώκεται να μελετηθεί το θέμα της παρατηρησιμότητας, η προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή καθορίζεται με χρήση του μοντέλου μειωμένης τάξης ώστε να εξασφαλίζεται η παρατηρησιμότητα του δικτύου δοκιμών. Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο σύνολο μετρήσεων:

- 10 μετρήσεις μέτρου τάσης στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής,
- 7 ζεύγη μετρήσεων ροών ενεργού και αέργου ισχύος στους κλάδους οι οποίοι αναχωρούν από τον κόμβο 71,
- 10 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής,
- 16 ζεύγη ψευδομετρήσεων σε κόμβους φορτίου,
- 29 ζεύγη εικονικών μετρήσεων στους κόμβους μηδενικής έγχυσης.

Συνεπώς, ο λόγος των διαθέσιμων μετρήσεων m προς τον αριθμό των μεταβλητών κατάστασης $2n - 1$

είναι ίσος με: $r = \frac{m}{2n - 1} = \frac{124}{110} \approx 1,13$. Πρόκειται για μία χαμηλή τιμή, οπότε, είναι αναγκαία η

ενίσχυση της υφιστάμενης μετρητικής υποδομής.

Όπως στην υποενότητα 5.2.2, το θέμα του συγχρονισμού των μετρήσεων δε λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή της μεθόδου, ενώ ακολουθείται η ίδια τεχνική για τη συσχέτιση της καθυστέρησης ως προς τη διαθεσιμότητα κάθε μέτρησης με την αντίστοιχη διασπορά της.

Το δίκτυο δοκιμών, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 5.8, περιλαμβάνει 16 κόμβους φορτίου, συγκεκριμένα, τους κόμβους 1, 2, 47, 9, 11÷15 and 17÷20. Για την εξαγωγή εικονικών δεδομένων φορτίου για τους εν λόγω κόμβους χρησιμοποιήθηκε μία διαδικασία παρόμοια με αυτή της υποενότητας 3.5.4.2. Πιο αναλυτικά, τα 8 προφίλ NLP1 έως NLP8 αθροίστηκαν ανά ζεύγη με τρόπο ώστε να τηρείται ο διαχωρισμός οικιακών, εμπορικών και βιομηχανικών καταναλωτών και, κατόπιν, τα 4 προφίλ φορτίου που προέκυψαν, έστω Α, Β, Γ και Δ, κανονικοποιήθηκαν εκ νέου με βάση την αιχμή τους ώστε να διατηρούν την ενδοημερήσια διακύμανσή τους. Τέλος, αποδόθηκαν στους επιθυμητούς κόμβους φορτίου σύμφωνα με τα σενάρια που θα περιγραφούν παρακάτω, ρυθμίζοντας τις αιχμές με βάση την ονομαστική ικανότητα των αντίστοιχων μετασχηματιστών. Έτσι, κάθε κόμβος φορτίου αποκτά εικονικά δεδομένα φορτίου σε ωριαία βάση για οποιοδήποτε επιθυμητό χρονικό διάστημα.

Αρχικά, πριν από την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών, ως ψευδομετρήσεις φορτίου κάθε κόμβου σε πραγματικό χρόνο λαμβάνονται τα δεδομένα φορτίου του κατά το ίδιο χρονικό διάστημα, την προηγούμενη ημέρα. Για την εξαγωγή των πραγματικών τιμών των μεγεθών, για τα οποία θεωρείται ότι διατίθενται μετρήσεις, χρησιμοποιείται η ανάλυση ροών φορτίου ακολουθώντας ακριβώς την ίδια διαδικασία με αυτή της υποενότητας 3.5.4.2. Αναφορικά με τις μετρούμενες τιμές τους, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (5.3) και (5.4) σύμφωνα με την υποενότητα 5.2.2. Για τους υπολογισμούς λαμβάνονται οι εξής τιμές σφάλματος *error*: 0,2% για όλα τα μέτρα τάσης, 1% για όλες τις μετρήσεις ροών ισχύος και εγχύσεων ισχύος στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής, οι οποίες θεωρούνται διαθέσιμες σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο κατά την πραγματική λειτουργία του δικτύου, 0,01% για τις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων και, τέλος, 15% για τις ψευδομετρήσεις φορτίου, οι οποίες αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου. Αντιθέτως, οι ψευδομετρήσεις φορτίου που προέρχονται από τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου [169] μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών, λαμβάνουν χαμηλότερες τιμές *error* και, μάλιστα, διαφορετικές ανά προφίλ φορτίου, δεδομένου ότι κάθε προφίλ εκτιμάται με διαφορετική ακρίβεια. Με μία υπολογιστική μελέτη παρόμοια με αυτή που

απέδωσε τα αποτελέσματα του Σχήματος 3.20 για τα αρχικά προφίλ NLP, υπολογίστηκαν οι επιμέρους ακρίβειες για τα 4 προφίλ φορτίου και απεικονίζονται στον Πίνακα 5.22.

Πίνακας 5.22: Τιμές σφάλματος *error* ανά προφίλ φορτίου.

| Προφίλ φορτίου | Τύπος | Τιμή <i>error</i> (%) |
|----------------|-------------|-----------------------|
| A | Οικιακό | ±5 |
| B | Οικιακό | ±8 |
| Γ | Εμπορικό | ±3 |
| Δ | Βιομηχανικό | ±2 |

Για τον υπολογισμό του αρχικού διανύσματος \mathbf{x}^0 και της αντίστοιχης μήτρας συνδιακύμανσης, χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες τιμές που προέκυψαν από την εκτέλεση του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης WLS σε ωριαία διαστήματα, για μία ολόκληρη μέρα του Ιουλίου. Η υπολογιστική διαδικασία του Σχήματος 5.1 εκκινεί από το ίδιο αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 για όλα τα επιμέρους σενάρια της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου.

Όσον αφορά το σχεδιασμό των σεναρίων, πρώτος στόχος είναι η επαλήθευση της δυνατότητας της μεθόδου να αποδίδει βέλτιστες λύσεις, άρα, καταστρώνονται σενάρια με περιορισμένο αριθμό υποψήφρων μετρητικών μονάδων ώστε να διευκολύνεται υπολογιστικά η διεξοδική έρευνα. Σε δεύτερη φάση, επιδιώκεται η διερεύνηση της επίδρασης των βέλτιστων λύσεων στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Με αυτό το σκοπό, καταστρώνονται σενάρια που περιλαμβάνουν όλους τους κόμβους φορτίου ως υποψήφιους για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών. Ως δείκτης για την αξιολόγηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS χρησιμοποιείται η τιμή Ψ_M του κριτηρίου M, δηλαδή το μέγιστο διαγώνιο στοιχείο της αντίστροφης μήτρας FIM της τελικής μετρητικής υποδομής. Σε όλα τα ανωτέρω σενάρια, βασική επιδίωξη είναι, επίσης, η διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών επιπέδων ακρίβειας εκτίμησης των επιμέρους προφίλ φορτίου Α έως Δ από τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου [169] στη βέλτιστη επιλογή των κόμβων φορτίου όπου θα εγκατασταθούν έξυπνοι μετρητές. Προς αυτή την κατεύθυνση, θεωρείται διαφορετική κατανομή προφίλ φορτίου ανά κόμβου φορτίου σε κάθε επιμέρους σενάριο. Τέλος, ζητούμενο είναι να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα της μεθόδου από πλευράς υπολογιστικού φόρτου, οπότε, καταγράφεται ο χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας μέχρι την εύρεση λύσης στα σενάρια της δεύτερης φάσης των δοκιμών.

5.4.1.3 Αποτελέσματα

Στην πρώτη φάση των δοκιμών, υποψήφιοι για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών είναι μόνο οι τέσσερις κόμβοι 2, 7, 15 και 20 ($m_c = 4$). Θεωρούνται δύο επιμέρους σενάρια με διαφορετική κατανομή προφίλ φορτίου ανά κόμβο. Έτσι, στο σενάριο 1, και στους τέσσερις κόμβους φορτίου αποδίδεται το ίδιο προφίλ φορτίου· τυχαία επιλέγεται το προφίλ Γ. Αντιθέτως, στο σενάριο 2, γίνεται η εξής κατανομή: προφίλ φορτίου Α – κόμβος 20, προφίλ φορτίου Β – κόμβος 15, προφίλ φορτίου Γ – κόμβος 7 και προφίλ φορτίου Δ – κόμβος 2.

Στους Πίνακες 5.23 και 5.24, με έντονη γραφή παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής κόμβων φορτίου για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο για τα σενάρια 1 και 2, αντιστοίχως. Επίσης, καταγράφονται οι τιμές του κριτηρίου Ψ_M για αριθμό προς

επιλογή κόμβων $m_s = 1, 2$ και 3 . Με κανονική γραφή παρατίθενται, σε σειρά φθίνουσας τιμής Ψ_M , τα αποτελέσματα της διεξοδικής έρευνας, δηλαδή οι τιμές Ψ_D που αντιστοιχούν σε εναλλακτικές επιλογές-συνδυασμούς. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από αναλυτικούς υπολογισμούς χωρίς την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου (προφανώς, καταγράφονται οι εναλλακτικοί συνδυασμοί που εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές Ψ_M). Όπως φαίνεται, η προτεινόμενη μέθοδος αποδίδει βέλτιστες λύσεις για $m_s = 1, 2, 3$ και στα δύο σενάρια, καθώς οι τιμές Ψ_M είναι οι ελάχιστες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των υπόλοιπων, μη βέλτιστων επιλογών. Άρα, εξασφαλίζεται η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS μέσω της εκπλήρωσης του κριτηρίου M.

Πίνακας 5.23: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 1.

| $m_c = 4$ | Κόμβος εγκατάστασης έξυπνων μετρητών | $\Psi_M (\times 10^{-6})$ |
|-----------|---|---------------------------|
| $m_s = 1$ | 15 | 6.8607 |
| | 20 | 6.8663 |
| | 7 | 6.8709 |
| | 2 | 6.8711 |
| $m_s = 2$ | 15, 20 | 6.8565 |
| | 7, 15 | 6.8584 |
| | 2, 15 | 6.8586 |
| $m_s = 3$ | 7, 15, 20 | 6.8553 |
| | 2, 15, 20 | 6.8554 |
| | 2, 7, 15 | 6.8575 |
| | 2, 7, 20 | 6.8591 |

Πίνακας 5.24: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (κανονική γραφή) για το σενάριο 2.

| $m_c = 4$ | Κόμβος εγκατάστασης έξυπνων μετρητών | $\Psi_M (\times 10^{-6})$ |
|-----------|---|---------------------------|
| $m_s = 1$ | 15 | 6.8645 |
| | 20 | 6.8682 |
| | 7 | 6.8709 |
| | 2 | 6.8714 |
| $m_s = 2$ | 15, 20 | 6.8599 |
| | 2, 15 | 6.8617 |
| | 2, 20 | 6.8626 |
| | 7, 20 | 6.8647 |
| $m_s = 3$ | 2, 15, 20 | 6.8572 |
| | 7, 15, 20 | 6.8576 |
| | 2, 7, 15 | 6.8581 |
| | 2, 7, 20 | 6.8595 |

Περνώντας σε περαιτέρω σχόλια επί των αποτελεσμάτων, αρχικά επιβεβαιώνεται ότι, εξαιτίας της χρήσης όλων των προφίλ φορτίου στο σενάριο 2, οι τιμές Ψ_M που επιτυγχάνονται είναι χειρότερες (μεγαλύτερες) σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του σεναρίου 1. Αυτό συμβαίνει διότι στο σενάριο 2 χρησιμοποιούνται τα προφίλ φορτίου Α και Β τα οποία εκτιμώνται με χειρότερη ακρίβεια σε σύγκριση με το προφίλ φορτίου Γ, το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά στο σενάριο 1. Παρ' όλα αυτά, οι βέλτιστες επιλογές κόμβων φορτίου για εγκατάσταση έξυπνων μετρητών παραμένουν σχεδόν οι ίδιες και στα δύο σενάρια, με εξαίρεση την επιλογή για $m_s = 3$: στο σενάριο 2, επιλέγεται ο κόμβος 2 αντί του κόμβου 7. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το προφίλ Δ, το οποίο αποδόθηκε στον κόμβο 2 στο σενάριο 2, εκτιμάται με καλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με το προφίλ Γ, το οποίο του αποδόθηκε στο σενάριο 1. Ως εκ τούτου, οι αντίστοιχες ψευδομετρήσεις φορτίου είναι πιο ακριβείς με συνέπεια η χρήση τους να συμβάλει στη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS. Συνεπώς, η ακρίβεια εκτίμησης των προφίλ φορτίου από τη μέθοδο εκτίμησης φορτίου [169] επιδρά στη συγκρότηση του βέλτιστου συνδυασμού.

Στη δεύτερη φάση των δοκιμών, εξετάζονται δύο επιπλέον σενάρια με όλους τους κόμβους φορτίου ως υποψήφιες θέσεις για εγκατάσταση έξυπνων μετρητών. Στο σενάριο 3, χρησιμοποιείται και πάλι μόνο το προφίλ φορτίου Γ. Αντιθέτως, στο σενάριο 3 χρησιμοποιούνται όλα τα προφίλ φορτίου τα οποία κατανέμονται τυχαία στους κόμβους φορτίου του υπό μελέτη δικτύου σύμφωνα με τον Πίνακα 5.25.

Πίνακας 5.25: Κατανομή προφίλ φορτίου ανά κόμβο για το σενάριο 4.

| Προφίλ φορτίου | Κόμβοι φορτίου |
|-----------------------|-----------------------|
| A | 1, 4, 9, 12, 19 |
| B | 11, 13, 15, 17, 20 |
| Γ | 5, 6, 18 |
| Δ | 2, 7, 14 |

Στους Πίνακες 5.26 και 5.27, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής των κόμβων φορτίου για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών με βάση την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς και οι

αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για τα σενάρια 3 και 4. Ο αριθμός των προς επιλογή κόμβων φορτίου λαμβάνει τις τιμές $m_s = 4, 8$ και 12 .

Πίνακας 5.26: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (ιανονική γραφή) για το σενάριο 3.

| m_s | Κόμβοι εγκατάστασης έξυπνων μετρητών | $\Psi_M (\times 10^{-6})$ | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|---------------------------|----------------|
| 4 | 13, 14, 18, 20 | 2.7356 | 164.9 |
| 8 | 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20 | 1.0085 | 144.3 |
| 12 | 4, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20 | 0.9534 | 124.1 |

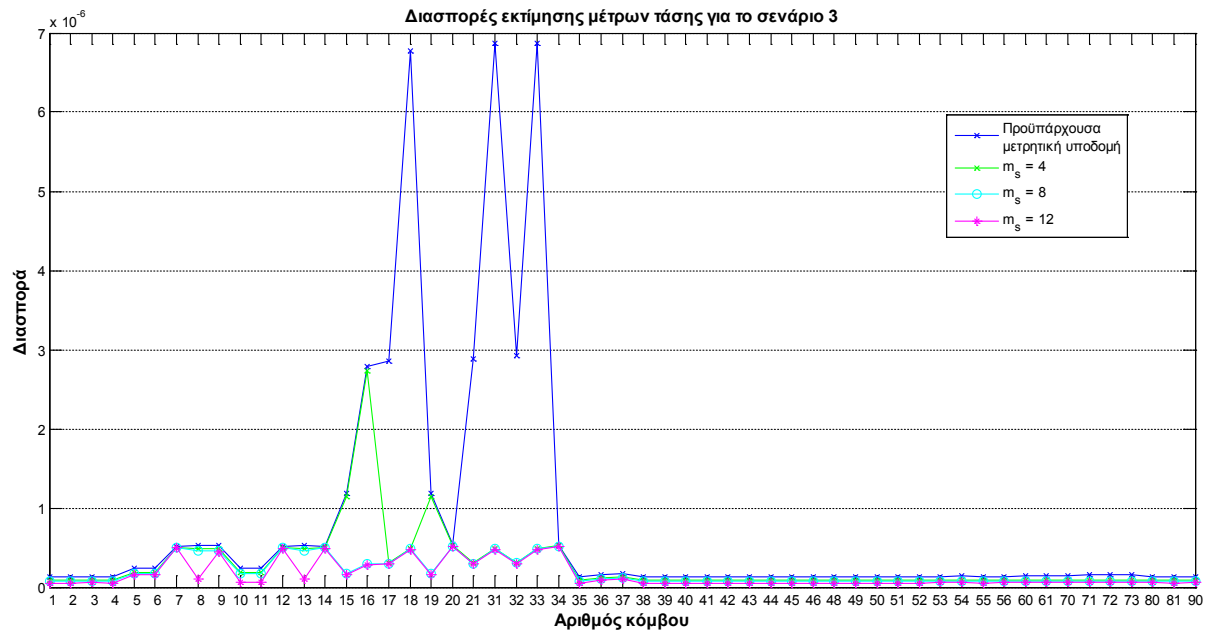
Πίνακας 5.27: Αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου (έντονη γραφή) και της διεξοδικής έρευνας (ιανονική γραφή) για το σενάριο 4.

| m_s | Κόμβοι εγκατάστασης έξυπνων μετρητών | $\Psi_M (\times 10^{-6})$ | Χρόνος CPU (s) |
|-------|--|---------------------------|----------------|
| 4 | 12, 14, 18, 20 | 2.9072 | 139.2 |
| 8 | 6, 7, 12, 14, 15, 17, 18, 20 | 1.2210 | 135.1 |
| 12 | 2, 6, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20 | 1.1382 | 119.8 |

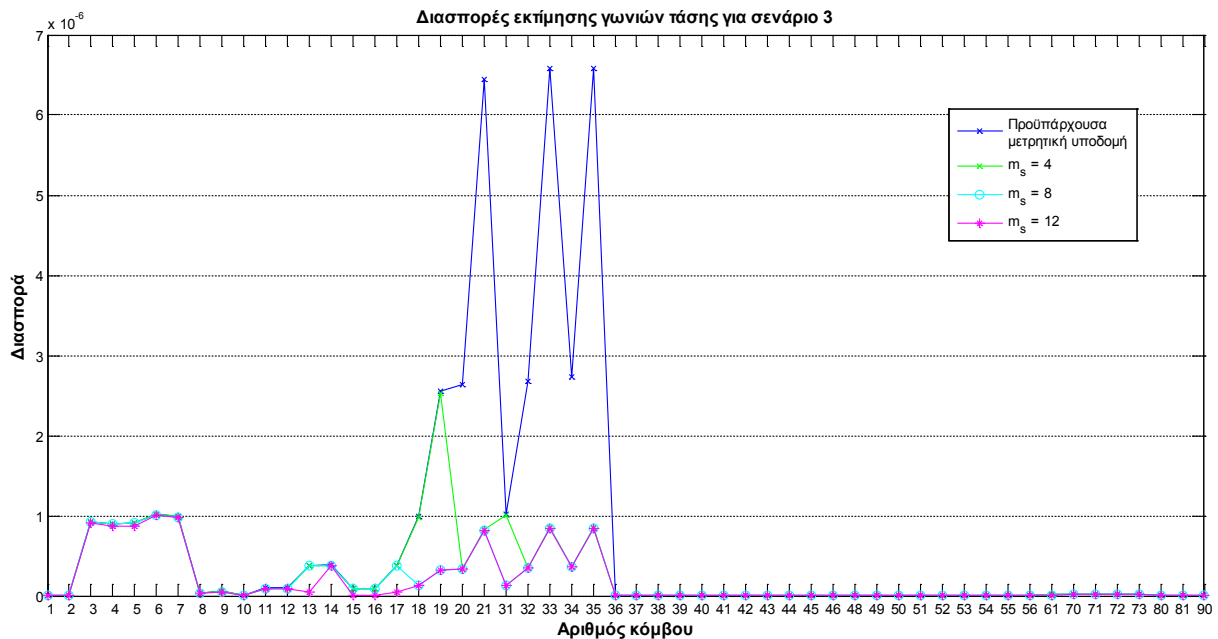
Και για τα δύο σενάρια, διαπιστώνεται ότι οι βέλτιστες λύσεις για $m_s = 4$ είναι υποσύνολα των λύσεων για $m_s = 8$, ενώ το ίδιο ισχύει και για την περίπτωση $m_s = 8$ σε σύγκριση με την περίπτωση $m_s = 12$. Επομένως, η μέθοδος εμφανίζει συνεπή συμπεριφορά ως προς την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού μετρητικών μονάδων για αυξανόμενες τιμές m_s .

Πολύ σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι τιμές Ψ_M για το σενάριο 4 είναι χειρότερες (μεγαλύτερες) σε σύγκριση με αυτές του σεναρίου 3, ένα γεγονός αναμενόμενο δεδομένου ότι στο πρώτο χρησιμοποιούνται ψευδομετρήσεις για τα προφίλ φορτίου Α και Β οι οποίες είναι πιο ανακριβείς σε σύγκριση με τις ψευδομετρήσεις για το προφίλ Γ. Επιπλέον, οι βέλτιστες λύσεις μεταξύ των δύο σεναρίων διαφέρουν ελαφρώς: για $m_s = 4$, στο σενάριο 4 επιλέγεται ο κόμβος 12 αντί του κόμβου 13, καθώς το προφίλ φορτίου Α που αντιστοιχεί στον πρώτο εκτιμάται με καλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με το προφίλ Β που αντιστοιχεί στο δεύτερο. Τέλος, οι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας είναι ελαφρώς αυξημένοι για το σενάριο 3. Μία πιθανή εξήγηση είναι ότι η αποκλειστική χρήση ενός προφίλ φορτίου δυσχεραίνει την εύρεση της βέλτιστης λύσης, καθώς περιορίζει δραστικά τη διαφοροποίηση μεταξύ των επιμέρους συνδυασμών.

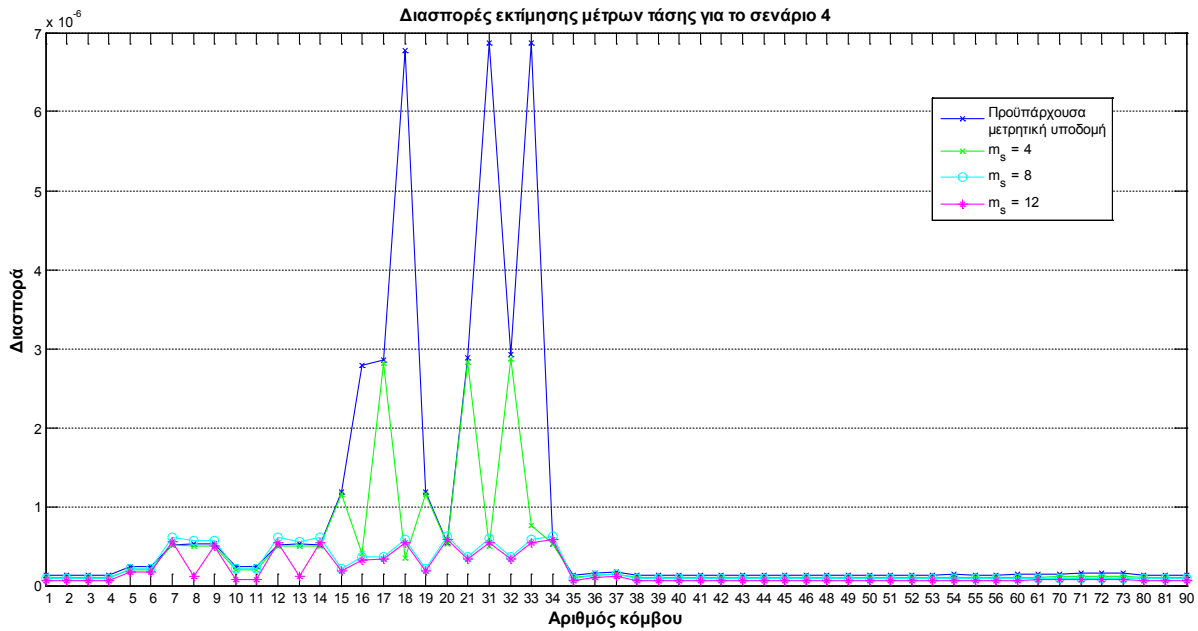
Τέλος, προκειμένου να διερευνηθεί η συνολική επίδραση της εγκατάστασης των έξυπνων μετρητών με βέλτιστο τρόπο στο υπό μελέτη δίκτυο, στα Σχήματα 5.9–5.12 απεικονίζεται η διακύμανση των διασπορών εκτίμησης των μέτρων και των γωνιών τάσης των κόμβων του δικτύου για όλες τις περιπτώσεις των σεναρίων 3 και 4. Για λόγους σύγκρισης, σχεδιάζεται και η διακύμανση των διασπορών με βάση την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή. Σε όλα τα σχήματα, είναι εμφανής η σταδιακή μείωση των διασπορών καθώς η τιμή m_s αυξάνεται.



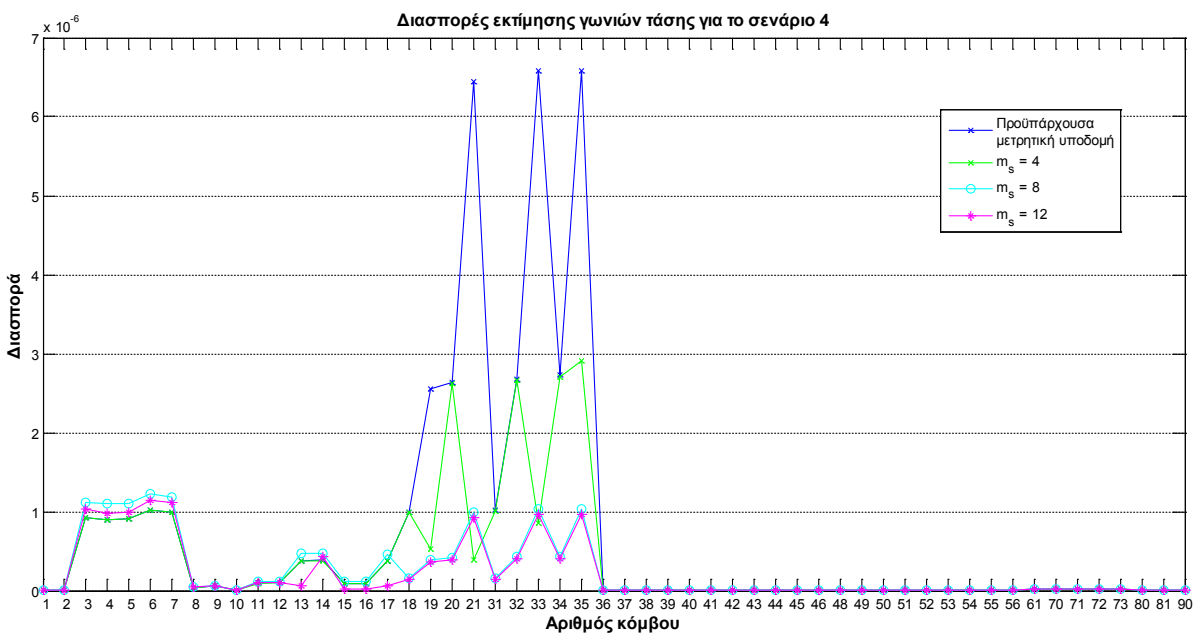
Σχήμα 5.9: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 3.



Σχήμα 5.10: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης γωνίας τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 3.



Σχήμα 5.11: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης μέτρου τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 4.



Σχήμα 5.12: Διακύμανση της διασποράς εκτίμησης γωνίας τάσης ανά κόμβο πριν (προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή) και μετά από την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών σε $m_s = 4, 8$ και 12 κόμβους φορτίου στο πλαίσιο του σεναρίου 4.

Εξετάζοντας προσεκτικά τα παραπάνω σχήματα, είναι δυνατό να εξηγηθεί ο λόγος που η προτεινόμενη μέθοδος δείχνει μία σαφή τάση να επιλέγει κόμβους από την κύρια γραμμή διανομής στο άνω μέρος του υπό μελέτη δικτύου όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.8. Διαπιστώνεται, λοιπόν, ότι οι μεγαλύτερες διασπορές πριν από την εγκατάσταση των έξυπνων μετρητών παρουσιάζονται μεταξύ των κόμβων 15 έως 20. Συνεπώς, είναι αναμενόμενο η ενίσχυση της μετρητικής υποδομής να επικεντρώνεται σε αυτές τις

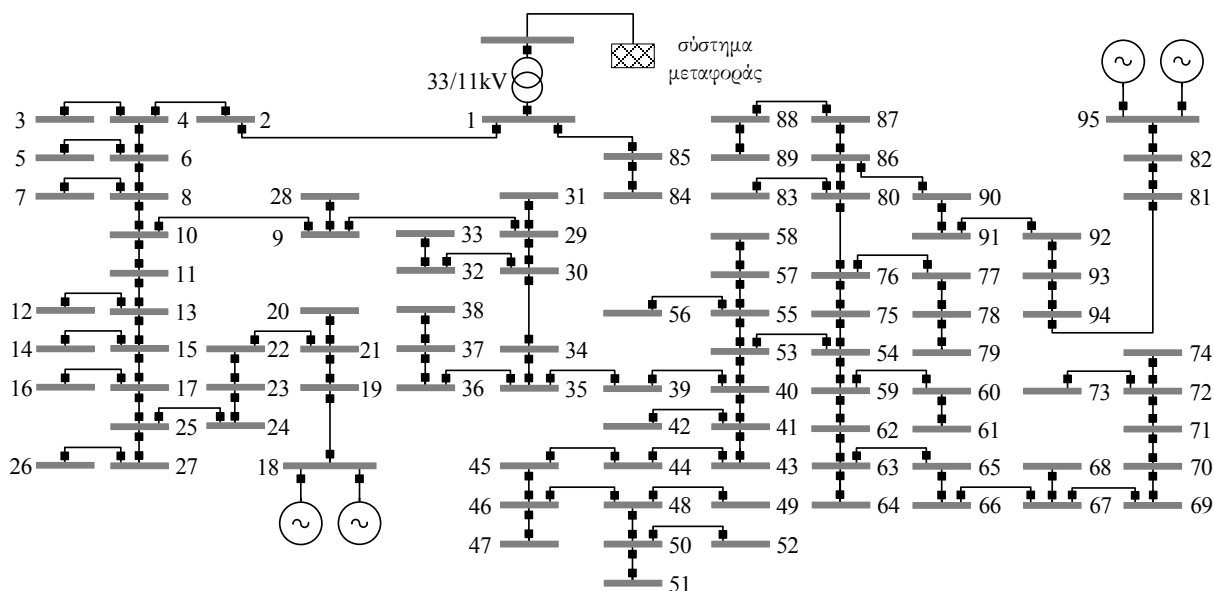
θέσεις, οι οποίες εντοπίζονται στην εν λόγω κύρια γραμμή διανομής. Τέλος, απόρροια της χρήσης όλων των προφίλ φορτίου στο σενάριο 4, συμπεριλαμβανομένων δηλαδή των «ανακριβών» προφίλ Α και Β, είναι και η μικρότερη βελτίωση των διασπορών εκτίμησης συνολικά σε σύγκριση με το σενάριο 3.

5.4.2 Εφαρμογή στο δίκτυο διανομής 95 κόμβων

Στην παρούσα ενότητα, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου Μ εφαρμόζεται σε ένα μεγαλύτερο δίκτυο διανομής, εντός ενός γενικότερου πλαισίου δοκιμών για τη βέλτιστη τοποθέτηση μετρητικών μονάδων. Κατά τα πρότυπα της υποενότητας 5.2.2, σχεδιάζονται διαφορετικά σενάρια θεωρώντας εναλλακτικά σύνολα υποψήφιων μετρητικών μονάδων είτε η προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή καθιστά το υπό μελέτη δίκτυο παρατηρήσιμο είτε όχι. Κατόπιν, με γνώμονα το 3^ο ερώτημα που τέθηκε στο τέλος της ενότητας 5.1, γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των αποτελεσμάτων των σεναρίων εφαρμογής της μεθόδου.

5.4.2.1 Το δίκτυο δοκιμών

Το δίκτυο δοκιμών είναι ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο δικτύου διανομής από το Ηνωμένο Βασίλειο. Προέρχεται από το γενικό αρχείο μοντέλων δικτύων διανομής του Ηνωμένου Βασιλείου (UK generic distribution system), το οποίο αναπτύχθηκε για ερευνητικούς σκοπούς. Αποτελείται από 95 κόμβους και 94 κλάδους σε επίπεδο τάσης 11 kV. Στο Σχήμα 5.14, απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του – το οποίο έχει ακτινική μορφή όπως αναμένεται – συμπεριλαμβανομένων των εγκατεστημένων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής που διαθέτει. Τόσο το συγκεκριμένο δίκτυο όσο και άλλα δίκτυα από το προαναφερόμενο γενικό αρχείο έχουν χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως π.χ. στις εργασίες [97], [188] και [175], καθώς αποτελούν πρότυπα μοντέλα ενεργών δικτύων διανομής. Συνεπώς, το συγκεκριμένο δίκτυο δοκιμών αποτελεί κατάλληλο πεδίο εφαρμογής και μελέτης των δυνατοτήτων της μεθόδου.



Σχήμα 5. 13: Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου διανομής 95 κόμβων.

Για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου στην παρούσα μελέτη, ισχύει η επιχειρηματολογία που αναπτύχθηκε στην υποενότητα 5.2.1, δηλαδή δεν λαμβάνεται υπόψη η ασύμμετρη φόρτιση των φάσεων του δικτύου και θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο μοντέλο του δικτύου. Έτσι, τα χαρακτηριστικά

μεγέθη των κόμβων και των κλάδων, όπως οι σύνθετες αντιστάσεις, οι ροές και οι εγχύσεις ισχύος, λαμβάνουν μία ισοδύναμη τιμή.

5.4.2.2 Σχεδιασμός και υλοποίηση

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των σεναρίων εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου, όπως προαναφέρθηκε, είναι παρόμοιας λογικής με την αντίστοιχη υποενότητα 5.2.2, η οποία αφορά την εφαρμογή της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου D. Για την αποφυγή άσκοπων επαναλήψεων, παρατίθενται μόνο τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά του συνόλου των προϋπαρχουσών μετρήσεων και στοιχεία για την αρχικοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας του Σχήματος 5.1. Για την αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας σχεδιασμού και υλοποίησης των σεναρίων, ο αναγνώστης παραπέμπεται στην υποενότητα 5.2.2. Διευκρινίζεται ότι χρησιμοποιείται και εδώ η συντομογραφία “MUs” για τη δήλωση των υποψήφιων μετρητικών μονάδων, δεδομένου ότι τα σενάρια περιλαμβάνουν διαφορετικά είδη μετρητικών μονάδων. Τέλος, υπενθυμίζεται ότι το θέμα του συγχρονισμού των μετρήσεων δε λαμβάνεται υπόψη και οι διασπορές των μετρήσεων – με προέλευση είτε την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή είτε τις υποψήφιες μετρητικές μονάδες – είναι ανάλογες των καθυστερήσεων ως προς τη διαθεσιμότητα τους.

Για το σχεδιασμό όλων των σεναρίων, θεωρείται μία βασική προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή η οποία, σύμφωνα με το μοντέλο μειωμένης τάξης, εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του δικτύου δοκιμών. Παρακάτω, καταγράφεται το σύνολο των προϋπαρχουσών μετρήσεων:

- 3 μετρήσεις μέτρων τάσης στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής,
- 2 μετρήσεις ζευγών ροών ενεργού και αέργου ισχύος στους κλάδους 1–2 και 1–85,
- 3 ζεύγη μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό αναφοράς και τους κόμβους παραγωγής,
- 54 ζεύγη ψευδομετρήσεων στους κόμβους φορτίου,
- 38 ζεύγη εικονικών μετρήσεων στους κόμβους μηδενικής έγχυσης.

Άρα, ο λόγος των διαθέσιμων μετρήσεων m προς τον αριθμό των μεταβλητών κατάστασης $2n - 1$ είναι

ίσος με: $r = \frac{m}{2n - 1} = \frac{197}{189} \approx 1,04$. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα χαμηλή, άρα, είναι απαραίτητη η

προσθήκη νέων μετρητικών μονάδων στην υφιστάμενη υποδομή προκειμένου να ενισχυθεί η λειτουργία του εκτιμητή κατάστασης για το υπό μελέτη δίκτυο.

Με βάση τον Πίνακα 5.1, το αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 για την εκκίνηση της υπολογιστικής διαδικασίας της προτεινόμενης μεθόδου μπορεί να προέλθει είτε από ανάλυση ροών φορτίου είτε από τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Αν και το ανωτέρω σύνολο των προϋπαρχουσών μετρήσεων εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του δικτύου δοκιμών, εν προκειμένω επιλέγεται η ανάλυση ροών φορτίου για τον υπολογισμό του. Όπως έχει προαναφερθεί, προκειμένου να είναι έγκυρη η άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου για διαφορετικά σενάρια επιλογής μετρητικών μονάδων, η υπολογιστική διαδικασία πρέπει να εκκινεί πάντα από το ίδιο διάνυσμα \mathbf{x}^0 . Ειδική μνεία για το αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 που χρησιμοποιείται στα σενάρια τα οποία αφορούν το θέμα της επίτευξης παρατηρησιμότητας γίνεται στην υποενότητα των αποτελεσμάτων.

Σε αυτό το πλαίσιο, ακολουθώντας τη διαδικασία της υποενότητας 5.2.2 με χρήση των τύπων (5.1) και (5.2), το αρχικό διάνυσμα \mathbf{x}^0 συγκροτήθηκε με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροών φορτίου. Οι

διασπορές των μετρήσεων και οι μετρούμενες τιμές τους υπολογίστηκαν με χρήση των τύπων (5.4) και (5.3), αντιστοίχως, στο πλαίσιο 1000 προσομοιώσεων Monte Carlo προκειμένου να αποτυπωθεί ένα μέσο στιγμιότυπο του συνόλου των προϋπαρχουσών μετρήσεων. Για τον υπολογισμό των διασπορών των μετρήσεων, ισχύουν οι εξής θεωρήσεις: οι μετρήσεις που αφορούν το ζυγό αναφοράς και τις ροές στους προσκειμένους σε αυτόν κλάδους θεωρούνται διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο και συνδέονται με τιμή σφάλματος *error* ίση με 1,5%, ενώ οι μετρήσεις που προέρχονται από τους κόμβους παραγωγής λαμβάνονται ως δεδομένα σχεδόν πραγματικού χρόνου με διπλάσια τιμή σφάλματος *error* (3%). Πολύ χαμηλές τιμές σφάλματος της τάξης του 0.03% αποδίδονται στις μετρήσεις μηδενικών εγχύσεων. Τέλος, για τις ψευδομετρήσεις, θεωρούνται τρία επίπεδα ακριβείας, δεδομένου ότι η έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος κάθε κόμβου εκτιμάται με διαφορετική ακρίβεια από την ελάχιστη χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου. Έτσι, θεωρούνται τιμές σφάλματος *error* ίσες με 15%, 20% και 25% οι οποίες αποδίδονται τυχαία στους 54 κόμβους φορτίου του υπό μελέτη δικτύου.

Τα σενάρια σχεδιάζονται με γενική αρχή τη χρήση όλων των τύπων μετρήσεων σε διαφορετικούς συνδυασμούς, ώστε να προσομοιώνεται ένα ευρύ φάσμα μετρητικών μονάδων. Κατά το πρώτο στάδιο της εφαρμογής, επιδιώκεται να εξακριβωθεί η δυνατότητα της μεθόδου να αποδίδει βέλτιστες λύσεις θεωρώντας περιορισμένο αριθμό υποψήφια μετρητικών μονάδων και εφαρμόζοντας διεξοδική έρευνα στο σύνολο των πιθανών λύσεων. Στο επόμενο στάδιο, στόχος είναι η μελέτη της επίδρασης της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Για αυτό το σκοπό, καταστρώνεται μια σειρά σεναρίων με μεγάλο αριθμό υποψήφια μετρητικών μονάδων ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του τύπου, της θέσης και της ακριβείας των μετρήσεων των μετρητικών μονάδων, οι οποίες περιλαμβάνονται στη βέλτιστη λύση, στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS. Ως δείκτης ακριβείας χρησιμοποιείται η τιμή Ψ_M του κριτηρίου M, δηλαδή το μέγιστο διαγώνιο στοιχείο της αντίστροφης μήτρας FIM της τελικής μετρητικής υποδομής. Στο τελικό στάδιο της εφαρμογής, ελέγχεται η δυνατότητα της μεθόδου να αποκαθιστά την παρατηρησιμότητα του υπό μελέτη δικτύου και να μεγιστοποιεί την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS ταυτόχρονα, δηλαδή μέσω μίας εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας της. Προς αυτή την κατεύθυνση, καταστρώνονται σενάρια λαμβάνοντας το δίκτυο δοκιμών ως μη παρατηρήσιμο αρχικά.

Τέλος, η αποδοτικότητα της μεθόδου από πλευράς υπολογιστικού φόρτου εξετάζεται με κριτήριο το χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας μέχρι την εύρεση λύσης. Ο χρόνος καταγράφεται για όλα τα σενάρια πλην του πρώτου. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για τους παράγοντες οι οποίοι επιβαρύνουν υπολογιστικά την επίλυση του προβλήματος βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M.

5.4.2.3 Αποτελέσματα

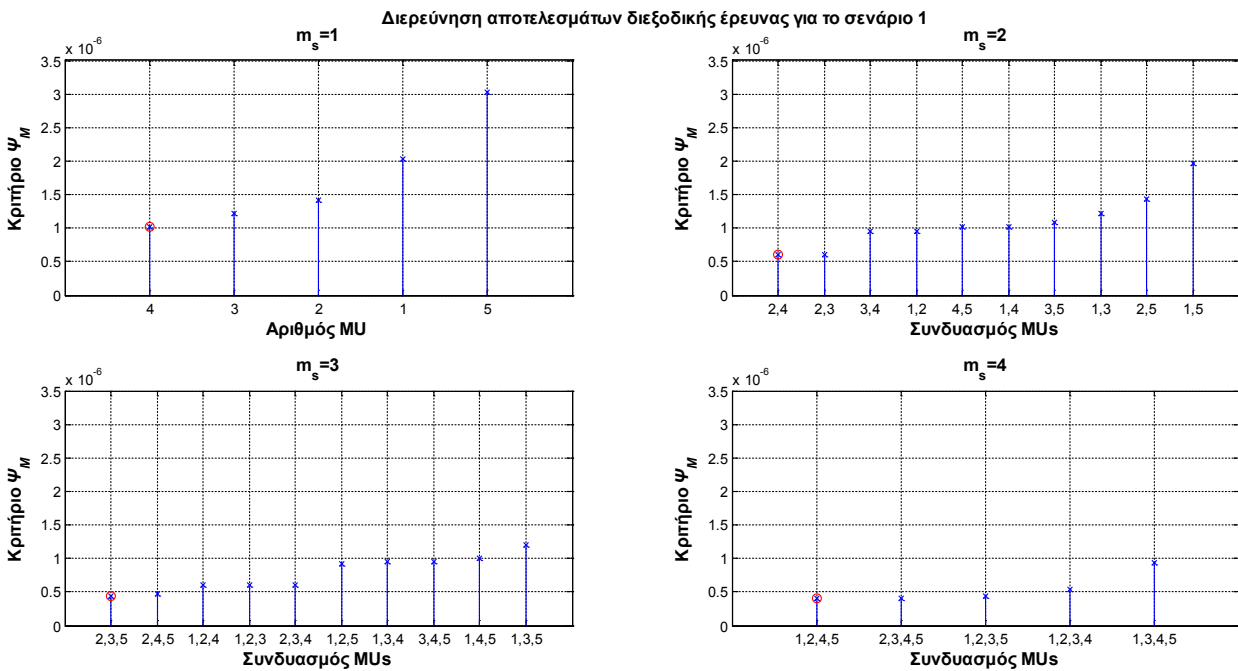
Αρχικά, θεωρείται το παρακάτω σενάριο για την εκπόνηση διεξοδικής έρευνας:

1. Στο σενάριο 1 περιλαμβάνονται πέντε μετρητικές μονάδες ($m_c = 5$), καθεμία από τις οποίες καταγράφει το μέτρο τάσης ενός κόμβου και ένα ζεύγος ροών ισχύος σε προσκειμένο κλάδο. Οι υποψήφια μετρητικές μονάδες περιγράφονται στον Πίνακα 5.28.

Πίνακας 5.28: Περιγραφή των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (MU) του σεναρίου 1.

| A/A MU | Μετρήσεις |
|--------|--------------------------------|
| 1 | V_9, P_{9-29}, Q_{9-29} |
| 2 | $V_{10}, P_{10-11}, Q_{10-11}$ |
| 3 | $V_{30}, P_{30-34}, Q_{30-34}$ |
| 4 | $V_{53}, P_{53-54}, Q_{53-54}$ |
| 5 | $V_{76}, P_{76-75}, Q_{76-75}$ |

Όλες οι μετρήσεις θεωρούνται δυνητικά διαθέσιμες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, οπότε, αντιστοιχούν σε τιμή *error* ίση με 3%. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου και της διεξοδικής έρευνας για αριθμό εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων $m_s = 1, 2, 3$ και 4, απεικονίζονται στο Σχήμα 5.14 σε μορφή ιστογράμματος. Με κόκκινο κύκλο επισημαίνονται οι λύσεις που παρέχονται από την προτεινόμενη μέθοδο, ενώ καταγράφονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί μετρητικών μονάδων. Παρατηρώντας το σχήμα, επιβεβαιώνεται ότι οι παρεχόμενες λύσεις είναι βέλτιστες δεδομένου ότι οι αντίστοιχοι ιστοί εμφανίζουν την ελάχιστη τιμή Ψ_M ανά αριθμό m_s . Επίσης, διαπιστώνεται ότι υπάρχει συνάφεια μεταξύ των επιλεγόμενων μετρητικών μονάδων ανά περίπτωση.



Σχήμα 5.14: Διερεύνηση αποτελεσμάτων διεξοδικής έρευνας με επισήμανση των παρεχόμενων λύσεων από την προτεινόμενη μέθοδο (κυκλωμένες με κόκκινο χρώμα).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σενάρια και τα σχετικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου για τη δεύτερη φάση των δοκιμών. Υπενθυμίζεται ότι το δίκτυο δοκιμών είναι εξαρχής παρατηρήσιμο. Πρόκειται για τέσσερα σενάρια με 15 έως 30 υποψήφιες μετρητικές μονάδες το καθένα, τα οποία περιγράφονται ακολούθως:

2. Στο σενάριο 2 περιλαμβάνονται 30 μετρητικές μονάδες ($m_c = 30$) οι οποίες καταγράφουν μέτρα τάσης. Οι υποψήφιες θέσεις προς εγκατάσταση είναι οι κόμβοι $35 \div 42$, $48 \div 58$ και $74 \div 84$. Οι

παρεχόμενες μετρήσεις θεωρούνται δυνητικά διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο ($error = 1,5\%$). Ο αριθμός των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων λαμβάνει τιμές $m_s = 10, 15$ και 20 .

3. Στο σενάριο 3 θεωρούνται 20 μετρητικές μονάδες ($m_c = 20$) εκ των οποίων οι μισές παρέχουν μετρήσεις μέτρου τάσης με υποψήφιες θέσεις προς εγκατάσταση τους κόμβους 2÷10 και 29. Οι υπόλοιπες μετρητικές μονάδες παρέχουν μετρήσεις ζευγών ροών ενεργού και αέργου ισχύος με υποψήφιες θέσεις όλους τους κλάδους μεταξύ των κόμβων 3÷11 και τους μεμονωμένους κλάδους 9–29 και 9–29. Όλες οι μετρήσεις θεωρούνται δυνητικά διαθέσιμες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ($error = 3\%$). Ο αριθμός των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων λαμβάνει τιμές $m_s = 8, 12$ και 16 .
4. Το σενάριο 4 έχει παρόμοια δομή με το σενάριο 3 ($m_c = 20, m_s = 8, 12$ και 16), ωστόσο οι υποψήφιοι κόμβοι και κλάδοι για εγκατάσταση μετρητικών μονάδων προέρχονται από τα κατάντη τμήματα του υπό μελέτη δικτύου (δεξί μέρος του μονογραμμικού διαγράμματος στο Σχήμα 5.13). Έτσι, υποψήφιες θέσεις για την εγκατάσταση μετρητικών μονάδων μέτρων τάσης είναι οι κόμβοι 35÷37, 51÷53 και 74÷77, ενώ για την εγκατάσταση μετρητικών μονάδων ροών ισχύος όλοι οι κλάδοι μεταξύ των κόμβων 39÷41, 50÷52 και 70÷74 και οι μεμονωμένοι κλάδοι 40–53 και 53–54. Οι παρεχόμενες μετρήσεις λαμβάνονται ως δεδομένα σχεδόν πραγματικού χρόνου.
5. Το σενάριο 5 περιλαμβάνει τη βέλτιστη επιλογή κόμβων για την αντικατάσταση ψευδομετρήσεων φορτίου με μετρήσεις εγχύσεων ισχύος σχεδόν πραγματικού χρόνου ($error = 3\%$), π.χ. προερχόμενες από έξυπνα συστήματα μέτρησης. Ως υποψήφιες θέσεις για την εγκατάσταση έξυπνων μετρητών θεωρούνται οι κόμβοι φορτίου 3, 5, 12, 14, 33, 38, 39, 42, 52, 56, 61, 62, 75, 82 και 92 ($m_c = 15$). Ο αριθμός των εγκατεστημένων μετρητικών μονάδων λαμβάνει τιμές $m_s = 5$ και 10 .

Στους Πίνακες 5.29–5.32, παρατίθενται τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με βάση την προτεινόμενη μέθοδο, καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για τα τέσσερα ανωτέρω σενάρια. Για λόγους ευκολίας, κάθε μετρητική μονάδα αναφέρεται με βάση τη μέτρηση ή τις μετρήσεις που παρέχει. Ο γαλάζιος χρωματισμός υποδεικνύει ότι μία μετρητική μονάδα συμπεριλαμβάνεται στη βέλτιστη επιλογή για ένα συγκεκριμένο αριθμό m_s .

Πίνακας 5.29: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 2.

| m_s | V_{35} | V_{36} | V_{37} | V_{38} | V_{39} | V_{40} | V_{41} | V_{42} | V_{48} | V_{49} | V_{50} | V_{51} | V_{52} | V_{53} | V_{54} | V_{55} | V_{56} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| m_s | V_{57} | V_{58} | V_{74} | V_{75} | V_{76} | V_{77} | V_{78} | V_{79} | V_{80} | V_{81} | V_{82} | V_{83} | V_{84} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|-------------------|
| 10 | | | | | | | | | | | | | | 0.2913 | 898 |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | 0.2911 | 766 |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | 0.2910 | 749 |

Πίνακας 5.30: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 3.

| m_s | V_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | V_7 | V_8 | V_9 | V_{10} | V_{29} | P_{3-4} Q_{3-4} | P_{4-6} Q_{4-6} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|------------------------|------------------------|
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | |

| m_s | P_{5-6} Q_{5-6} | P_{6-8} Q_{6-8} | P_{7-8} Q_{7-8} | P_{8-10} Q_{8-10} | P_{9-10} Q_{9-10} | P_{10-11} Q_{10-11} | P_{9-28} Q_{9-28} | P_{9-29} Q_{9-29} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 8 | | | | | | | | | 0.1193 | 284 |
| 12 | | | | | | | | | 0.1178 | 67 |
| 16 | | | | | | | | | 0.1173 | 95 |

Πίνακας 5.31: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 4.

| m_s | V_{35} | V_{36} | V_{37} | V_{51} | V_{52} | V_{53} | V_{74} | V_{75} | V_{76} | V_{77} | P_{39-40} Q_{39-40} | P_{40-41} Q_{40-41} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| 8 | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | |

| m_s | P_{40-53} Q_{40-53} | P_{50-51} Q_{50-51} | P_{50-52} Q_{50-52} | P_{53-54} Q_{53-54} | P_{70-71} Q_{70-71} | P_{71-72} Q_{71-72} | P_{72-73} Q_{72-73} | P_{72-74} Q_{72-74} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 8 | | | | | | | | | 0.0625 | 549 |
| 12 | | | | | | | | | 0.0624 | 121 |
| 16 | | | | | | | | | 0.0623 | 85 |

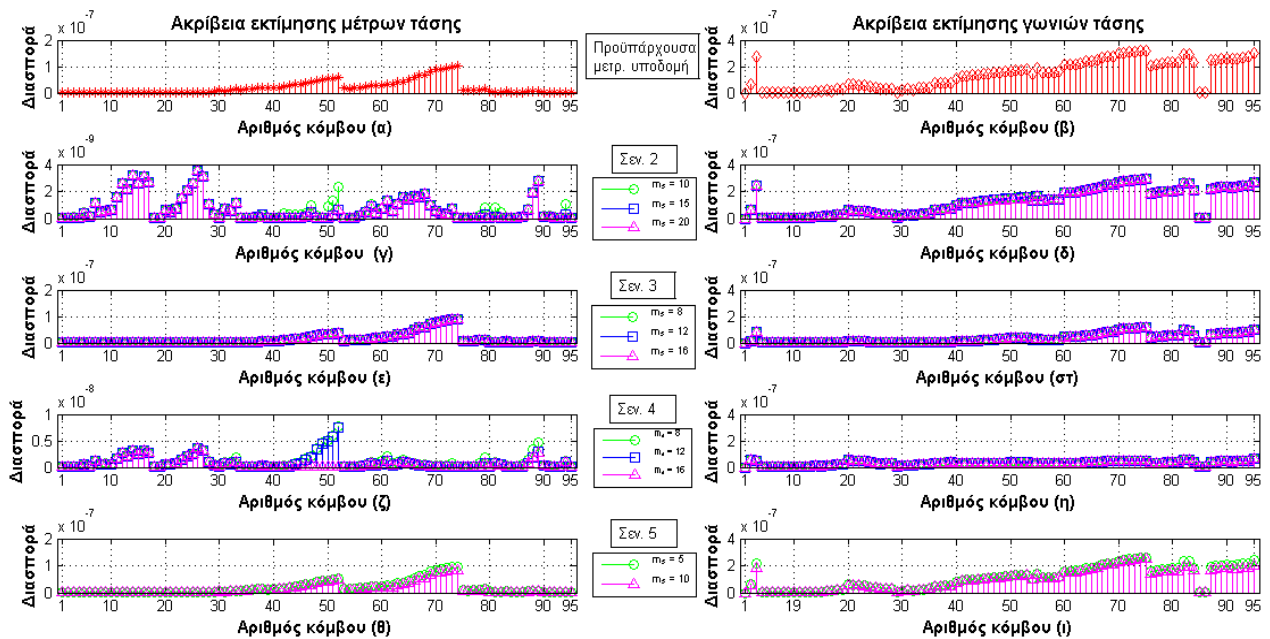
Πίνακας 5.32: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 5.

| m_s | P_3 Q_3 | P_5 Q_5 | P_{12} Q_{12} | P_{14} Q_{14} | P_{33} Q_{33} | P_{38} Q_{38} | P_{39} Q_{39} | P_{42} Q_{42} | P_{52} Q_{52} |
|-------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 5 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |

| m_s | P_{56} Q_{56} | P_{61} Q_{61} | P_{62} Q_{62} | P_{75} Q_{75} | P_{82} Q_{82} | P_{92} Q_{92} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------|
| 5 | | | | | | | 0.2605 | 962 |
| 10 | | | | | | | 0.2512 | 134 |

Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση των βέλτιστων λύσεων στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS, στο Σχήμα 5.15 καταγράφονται οι ακριβείες εκτίμησης των τάσεων των κόμβων του υπό μελέτη δικτύου για όλα τα σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, απεικονίζονται σε ιστογράμματα οι διακυμάνσεις των διασπορών των εκτιμώμενων τάσεων κατά μέτρο και γωνία ανά αριθμό m_s για κάθε

σενάριο. Επιπλέον, για λόγους πληρότητας, στην κορυφή του σχήματος παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες διασπορές που προκύπτουν από την εκτέλεση του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης WLS με δεδομένες τις μετρήσεις από την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή, δηλαδή πριν από τη βέλτιστη επιλογή νέων μετρητικών μονάδων.



Σχήμα 5.15: Διασπορές εκτιμώμενων μέτρων και γωνιών τάσης του υπό μελέτη δικτύου με δεδομένη την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή (α, β) και μετά την προσθήκη σε αυτήν των βέλτιστα επιλεγμένων μετρητικών μονάδων των σεναρίων 2 (γ, δ), 3 (ε, στ), 4 (ζ, η) και 5 (θ, ι).

Με βάση τους ανωτέρω πίνακες και το Σχήμα 5.15, μπορούν γίνουν τα ακόλουθα απολογιστικά σχόλια:

- Η συνδυασμένη εγκατάσταση μετρητικών μονάδων που παρέχουν μετρήσεις μέτρων τάσης και ροών ισχύος (σενάρια 3 και 4) αναδεικνύεται ως η πλέον αποτελεσματική στρατηγική για την ελαχιστοποίηση του κριτηρίου M . Επιπλέον, η αντικατάσταση ψευδομετρήσεων φορτίου με μετρήσεις εγχύσεων ισχύος (σενάριο 5) είναι πιο αποδοτική στρατηγική σε σύγκριση με την εγκατάσταση μετρητικών μονάδων που καταγράφουν μέτρα τάσης (σενάριο 2), καθώς αποδίδει μικρότερες τιμές Ψ_M .
- Αναφορικά με τους υπολογιστικούς χρόνους, τα σενάρια 2 και 3 πλεονεκτούν καθώς εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές. Αιτία αποτελεί η γεινίαση των υποψήφιων μετρητικών μονάδων για τα σενάρια αυτά, καθώς, με αυτό τον τρόπο, η υπολογιστική διαδικασία οδηγείται ευκολότερα στις βέλτιστες επιλογές συγκριτικά με τα σενάρια 1 και 4, στα οποία οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες είναι διασκορπισμένες σε όλη την έκταση του υπό μελέτη δικτύου.
- Καθώς ο αριθμός m_s αυξάνεται, κάθε βέλτιστη λύση τείνει να είναι υπερσύνολο της προηγούμενης. Η μόνη εξαίρεση αφορά το σενάριο 1, στο οποίο τα μέτρα τάσης V_{78} και V_{82} , τα οποία περιλαμβάνονται στη βέλτιστη επιλογή για $m_s = 15$, αντικαθίστανται με τα μέτρα τάσης V_{79} και V_{81} για $m_s = 20$.
- Για τα σενάρια 3 και 4, η προτεινόμενη μέθοδος ευνοεί την επιλογή μετρητικών μονάδων που καταγράφουν ροές ισχύος αντί μέτρων τάσης. Όπως αναφέρεται στην εργασία [240], η προσθήκη

ενός ζεύγους μετρήσεων ροών ισχύος βελτιώνει την εκτίμηση των τάσεων κατά μέτρο και γωνία, καθώς φέρει τον πληροφοριακό περιεχόμενο δύο μετρήσεων. Άρα, αυτός ο τύπος μετρητικών μονάδων αποτελεί, γενικά, μία πολύ αποδοτική προσθήκη, η οποία, εν προκειμένω, πλεονεκτεί έναντι μίας μέτρησης μέτρου τάσης.

- Όσον αφορά το σενάριο 5, η προτεινόμενη μέθοδος αποδεικνύεται ότι έχει την δυνατότητα να υποδεικνύει τις βέλτιστες θέσεις για την αντικατάσταση μετρήσεων χαμηλής ακριβείας, εν προκειμένω, ψευδομετρήσεων, σε μια προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή. Σχετική ανάλυση έχει γίνει στην υποενότητα 5.2.3 για τη μέθοδο με χρήση του κριτηρίου D, η οποία έχει την ίδια δυνατότητα.
- Οι τιμές Ψ_M που παρατίθενται στους Πίνακες 5.29–5.32 αναφέρονται αποκλειστικά σε διασπορές εκτίμησης γωνιών τάσης. Για τα σενάρια 2, 3 και 5, η γωνία τάσης του κόμβου 75 είναι η μεταβλητή κατάστασης που εκτιμάται με τη χειρότερη διασπορά. Το ίδιο ισχύει για τη γωνία τάσης του κόμβου 95 στο σενάριο 4. Όσον αφορά τα μέτρα τάσης, ο κόμβος 73 εμφανίζει τη χειρότερη διασπορά στα σενάρια 3 και 5 και ο κόμβος 26 στο σενάριο 2. Για το σενάριο 4, με τη μεγαλύτερη ανακρίβεια εκτιμώνται τα μέτρα τάσης του κόμβου 52 για $m_s = 8$ και 12 και του κόμβου 26 για $m_s = 16$.
- Συνολικά, παρατηρείται ότι η ελαχιστοποίηση του κριτηρίου M προοικεί γενική μείωση των περισσότερων, αν όχι όλων, διασπορών των εκτιμώμενων μεταβλητών κατάστασης, όπως αναμένεται από τη σχέση (4.5). Επιπλέον, διαπιστώνεται ότι η μείωση των διασπορών για τις γωνίες τάσης είναι πιο δύσκολη σε σύγκριση με τη βελτίωση των διασπορών των μέτρων τάσης.
- Η βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων στο σενάριο 2 οδηγεί σε δραστική μείωση των διασπορών για τα εκτιμώμενα μέτρα τάσης, αλλά μόνο σε μικρή βελτίωση των διασπορών για εκτιμώμενες γωνίες τάσης.
- Αν και στα σενάρια 3 και 4 το σύνολο των υποψήφιων μετρητικών μονάδων έχει παρόμοια δομή, είναι αξιοσημείωτο ότι οι τιμές των διασπορών που επιτυγχάνονται στο δεύτερο σε σύγκριση με το πρώτο είναι πιο βελτιωμένες (χαμηλότερες) για κάθε αριθμό m_s . Αιτία αποτελεί η επιλογή των θέσεων εγκατάστασης των υποψήφιων μετρητικών μονάδων (δεδομένου ότι όλες οι μετρήσεις έχουν το ίδιο επίπεδο ακριβείας). Στο σενάριο 4 (Πίνακας 5.31), οι υποψήφιες θέσεις είναι μεταξύ των κόμβων 35 και 77, οι οποίοι ανήκουν σε μία περιοχή υψηλών διασπορών εκτίμησης αναφορικά με την προϋπάρχουσα μετρητική υποδομή, όπως φαίνεται στα ιστογράμματα (α) και (β) του Σχήματος 5.15. Αντιθέτως, στο σενάριο 3 (Πίνακας 5.30), οι υποψήφιες θέσεις είναι μεταξύ των κόμβων 2 και 29, οι οποίοι ανήκουν σε μία περιοχή χαμηλών διασπορών πριν από την εγκατάσταση μετρητικών μονάδων. Συνεπώς, οι βέλτιστες επιλογές στο σενάριο 4 αποδεικνύονται πιο στοχευμένες και αποδοτικές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες του σεναρίου 3, καθώς επιδρούν ευεργετικά σε «αδύναμες» θέσεις της προϋπάρχουσας μετρητικής υποδομής. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και η εργασία [242], όπου ευνοείται η τοποθέτηση μετρήσεων μέτρων τάσης σε κόμβους που εμφανίζουν υψηλές διασπορές εκτίμησης.
- Με βάση το Σχήμα 5.15, τα ιστογράμματα για τα σενάρια 3 και 5 έχουν παρόμοια μορφή. Το γεγονός αυτό είναι λογικό δεδομένου ότι οι όλες μετρητικές μονάδες που επιλέγονται στο σενάριο 5 και οι περισσότερες στο σενάριο 3 παρέχουν μετρήσεις ισχύος (εγχύσεις και ροές, αντίστοιχα). Ωστόσο, παρατηρείται ότι η βελτίωση των διασπορών στο σενάριο 5 είναι πιο περιορισμένη σε σύγκριση με το σενάριο 3, ειδικά για τις γωνίες τάσης, εξαιτίας του διαφορετικού τύπου των μετρήσεων ισχύος και των διαφορετικών θέσεων εγκατάστασης των μετρητικών μονάδων.

Απολογιστικά, η εύρεση της βέλτιστης λύσης σε χαμηλούς υπολογιστικούς χρόνους για όλες τις περιπτώσεις οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη διατύπωση του προβλήματος με χρήση του κριτηρίου M είναι υπολογιστικά συμφέρουσα. Επιπλέον, η υπολογιστική διαδικασία χαρακτηρίζεται από ευρωστία απέναντι στην εμφάνιση μητρώων κακής κατάστασης, δεδομένου ότι, στο πλαίσιο των σεναρίων, καλείται να εκτελέσει υπολογισμούς με μήτρες FIM οι οποίες συμπεριλαμβάνουν μετρήσεις με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας με κυριότερο παράδειγμα τις προϋπάρχουσες ψευδομετρήσεις.

Στο τελευταίο στάδιο της εφαρμογής της μεθόδου, περιλαμβάνονται δύο σεσάκια με το δίκτυο δοκιμών να λαμβάνεται ως μη παρατηρήσιμο εξαρχής. Προς αυτή την κατεύθυνση, το σύνολο των προϋπάρχουσών μετρήσεων περικόπτεται: στο σεσάριο 6, αφαιρούνται οι μετρήσεις εγχύσεων ισχύος για τους κόμβους 9, 10 και 28 (κόμβος φορτίου), ενώ, στο σεσάριο 7, αφαιρούνται οι αντίστοιχες μετρήσεις για τους κόμβους μηδενικής έγχυσης 44, 45 και 46. Εξαιτίας της ακτινικής δομής του δικτύου δοκιμών, το δίκτυο καθίσταται μη παρατηρήσιμο για τα ανωτέρω σεσάκια. Για την ανάλυση παρατηρησιμότητας έγινε χρήση του μοντέλου μειωμένης τάξης. Ως αρχικό διάνυσμα x^0 λαμβάνεται το “flat voltage profile”, δεδομένου ότι το δίκτυο είναι μη παρατηρήσιμο και τα σεσάκια 6 και 7 εξετάζονται αυτοτελώς χωρίς να συγκρίνονται με τα προηγούμενα σεσάκια. Τέλος, για τον υπολογισμό των τελικών μητρώων FIM, χρησιμοποιείται το διάνυσμα κατάστασης που προκύπτει από τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης με βάση τη τελική μετρητική υποδομή μετά από τη βέλτιστη επιλογή μετρητικών μονάδων, η οποία, προφανώς, εξασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Στους Πίνακες 5.33 και 5.34, παρατίθενται οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες, τα αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με βάση την προτεινόμενη μέθοδο και οι χρόνοι εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για τα σεσάκια 6 και 7, αντίστοιχα. Οι υποψήφιες μετρητικές μονάδες έχουν προεπιλεγεί έτσι ώστε να βρίσκονται στις περιοχές των κόμβων των οποίων αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις εγχύσεων ισχύος. Όπως παρατηρείται, οι δοκιμές εκινούν για $m_s = 2$, μία τιμή που μπορεί να προσφέρει στο σύνολο των διαθέσιμων μετρήσεων 2 έως 4 επιπλέον μετρήσεις. Η εγκατάσταση δύο μετρητικών μονάδων που παρέχουν ζεύγη μετρήσεων ροών ισχύος αποδεικνύεται επαρκής για την επίτευξη παρατηρησιμότητας και για τα δύο σεσάκια. Πέραν των μετρήσεων εγχύσεων ισχύος που αφαιρέθηκαν αρχικά, στις βέλτιστες λύσεις περιλαμβάνονται, κατά κύριο λόγο, μετρήσεις ροών ισχύος σε κλάδους που πρόσκεινται στους κόμβους των οποίων αφαιρέθηκαν οι μετρήσεις. Παρατηρείται, επίσης, ότι, σε αντίθεση με το σεσάριο 6, οι βέλτιστες επιλογές στο σεσάριο 7 διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους λόγω του αυξημένου αριθμού υποψήφιων μετρητικών μονάδων που εμπλουτίζει το σύνολο των πιθανών συνδυασμών.

Πίνακας 5.33: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σεσάριο 6.

| m_s | V_8 | V_9 | V_{10} | V_{11} | V_{13} | V_{28} | V_{29} | V_{30} |
|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |

| m_s | P_9 Q_9 | P_{10} Q_{10} | P_{28} Q_{28} | P_{9-10} Q_{9-10} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|----------------|----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 2 | | | | | 0.6461 | 55 |
| 3 | | | | | 0.1161 | 38 |
| 4 | | | | | 0.1159 | 66 |

Πίνακας 5.34: Αποτελέσματα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων και χρόνος εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας για το σενάριο 7.

| m_s | V_{40} | V_{41} | V_{43} | V_{44} | V_{45} | V_{46} | V_{53} | V_{54} | V_{75} |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | |

| m_s | V_{76} | P_{44} Q_{44} | P_{45} Q_{45} | P_{46} Q_{46} | P_{40-41} Q_{40-41} | P_{44-45} Q_{44-45} | Ψ_M ($\times 10^{-6}$) | Χρόνος CPU (s) |
|-------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------|
| 2 | | | | | | | 0.3488 | 45 |
| 3 | | | | | | | 0.3083 | 82 |
| 4 | | | | | | | 0.3082 | 256 |
| 5 | | | | | | | 0.3034 | 160 |

Τέλος, αναφορικά με την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης WLS, οι τιμές Ψ_M που επιτυγχάνονται στο σενάριο 6 είναι καλύτερες (χαμηλότερες) σε σύγκριση με το σενάριο 7. Αυτά τα αποτελέσματα είναι απόρροια των διαφορετικών θέσεων των υποψήφιων μετρητικών μονάδων στα δύο σενάρια. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι 9, 10 και 28 είναι στην κορυφή της κύριας γραμμής διανομής του υπό μελέτη δικτύου, άρα, η προσθήκη μετρητικών μονάδων στις περιοχές αυτές συμβάλλουν πιο αποτελεσματικά στη βελτίωση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης. Αντιθέτως, οι κόμβοι 44, 45 και 46 βρίσκονται στα κατάντη τμήματα του υπό μελέτη δικτύου, άρα, η εγκατάσταση μετρητικών μονάδων κοντά τους δεν έχει τόσο θετική επίδραση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΣΥΜΒΟΛΗ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Το σύνολο του ερευνητικού έργου που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αναπτύσσεται λεπτομερώς στα Κεφάλαια 3, 4 και 5. Στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής, πραγματοποιείται μία σύντομη ανακεφαλαίωση του και, κατόπιν, συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνας. Στη συνέχεια, αναλύεται η συμβολή της διατριβής και τεκμηριώνεται η πρωτοτυπία των προτεινόμενων μεθόδων. Τέλος, γίνεται μνεία για τις ερευνητικές προοπτικές αναφορικά με τους εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ και προτείνεται ένα πλαίσιο μελλοντικής έρευνας.

❖ Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η βέλτιστη διαχείριση μετρήσεων στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς και δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ελλιπή δεδομένα. Ο όρος «βέλτιστη διαχείριση» αναφέρεται στην επιλογή και την αξιοποίηση μετρητικών δεδομένων με γνώμονα την αποδοτική λειτουργία των εκτιμητών κατάστασης ΣΗΕ, η οποία συγκεκριμενοποιείται σε δύο βασικούς άξονες: την ενίσχυση της παρατηρησιμότητας και της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Επιπλέον, η ποιοτική και ποσοτική ανεπάρκεια που χαρακτηρίζει συνολικά ή εν μέρει τα μετρητικά δεδομένα τα οποία διατίθενται στους εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ αποδίδεται με τον όρο «ελλιπή δεδομένα». Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνονται μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων από ένα δυνητικά διαθέσιμο μετρητικό σύνολο με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού για την επίτευξη παρατηρησιμότητας και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Επιπλέον, παρουσιάζονται τεχνικές διαχείρισης ψευδομετρήσεων με στόχο την αξιόπιστη λειτουργία εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Οι προτεινόμενες τεχνικές υποστηρίζουν τη χρήση ψευδομετρήσεων στο πλαίσιο των λειτουργιών του επεξεργαστή τοπολογίας και της εκτίμησης κατάστασης.

Μετά από μία λεπτομερή βιβλιογραφική επισκόπηση, στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται οι μέθοδοι στις οποίες βασίστηκε η εκπόνηση του συνολικού ερευνητικού έργου αναφορικά με τις λειτουργίες του επεξεργαστή τοπολογίας, της ανάλυσης παρατηρησιμότητας και της εκτίμησης κατάστασης. Αρχικά, διατυπώνεται το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης με χρήση του στατικού μοντέλου WLS, το οποίο παρέχει το θεμελιακό υπόβαθρο για την ανάπτυξη των προτεινόμενων μεθόδων και τεχνικών. Κατόπιν, περιγράφεται το μοντέλο μειωμένης τάξης, το οποίο χρησιμοποιείται ως η βασική μέθοδος ανάλυσης παρατηρησιμότητας για όλες τις προσομοιώσεις και τις εφαρμογές της παρούσας διατριβής, και παρουσιάζεται μία πιθανοτική μέθοδος επεξεργασίας τοπολογίας.

Το Κεφάλαιο 3 επικεντρώνεται στη διαχείριση ψευδομετρήσεων στο πλαίσιο της λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Αφού μελετώνται μέσω της σχετικής βιβλιογραφίας οι έννοιες της εκτίμησης, επιμερισμού και πρόβλεψης φορτίου, αναλύονται εκτενώς τρεις σχετικές μέθοδοι παραγωγής ψευδομετρήσεων και προτείνονται αντίστοιχες τεχνικές για τη συνδυασμένη λειτουργία κάθε μεθόδου με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων εκτενών προσομοιώσεων των προτεινόμενων πλαισίων συνδυασμένης λειτουργίας σε δίκτυα διανομής από τη διεθνή βιβλιογραφία, καθώς και τα αποτελέσματα της εφαρμογής του εκτιμητή κατάστασης ο οποίος αναπτύχθηκε στοχευμένα για εγχώρια δίκτυα διανομής, σε τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου.

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζεται στο πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ με στόχο την ενίσχυση παρατηρησιμότητας και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης. Μετά από μία διεξοδική βιβλιογραφική έρευνα αναφορικά με σχετικές, προϋπάρχουσες εργασίες, προτείνονται τρεις καινοτόμες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων οι οποίες, με θεμέλιο την πληροφορία του Fisher, λαμβάνουν τη μορφή προβλημάτων κυρτού και ημιορισμένου προγραμματισμού. Κύριος στόχος των δύο μεθόδων είναι η μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης σε δίκτυα διανομής, ενώ η τρίτη μέθοδος εξειδικεύεται στην επίτευξη παρατηρησιμότητας σε συστήματα μεταφοράς μέσω της βέλτιστης επιλογής του ελάχιστου αριθμού μονάδων μέτρησης φασιθετών. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 5, οι προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων εφαρμόζονται σε πρότυπα συστήματα μεταφοράς του ινστιτούτου IEEE και σε περιπτώσεις δικτύων διανομής από τη διεθνή βιβλιογραφία. Οι δοκιμές αφορούν τόσο το σχεδιασμό νέων όσο και την ενίσχυση υφιστάμενων υποδομών.

Υπό το πρίσμα του ερευνητικού έργου που ανακεφαλαιώθηκε, τα κυριότερα συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής συνοψίζονται παρακάτω:

- Με βάση τη διεξοδική βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τις λειτουργίες των εκτιμητών κατάστασης ΣΗΕ στο Κεφάλαιο 2, το στατικό μοντέλο WLS αναδεικνύεται ως η πλέον δημοφιλής και αξιόπιστη υλοποίηση του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης. Επιπλέον, η επέκταση των εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής, καθώς και η αξιοποίηση των συγχρονισμένων μετρήσεων από τις μονάδες μέτρησης φασιθετών συνδυαστικά με τις προϋπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις στο πλαίσιο λειτουργίας των εκτιμητών κατάστασης αποτελούν τα κυριότερα ζητήματα που συγκεντρώνουν το ερευνητικό ενδιαφέρον σε παγκόσμια κλίμακα. Αναφορικά με το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ, η βιβλιογραφική έρευνα στο Κεφάλαιο 4 προβάλλει ως κυριότερα θέματα το σχεδιασμό νέων μετρητικών υποδομών εξ' ολοκλήρου βασισμένων σε μονάδες PMU για τα συστήματα μεταφοράς, καθώς και την αναβάθμιση υφιστάμενων μετρητικών υποδομών στα δίκτυα διανομής μέσω της στοχευμένης προσθήκης νέων μετρητικών μονάδων.
- Στο Κεφάλαιο 3, διερευνάται πολύπλευρα το ζήτημα της χρήσης ψευδομετρήσεων με στόχο την αξιόπιστη λειτουργία εκτιμητών κατάστασης στα δίκτυα διανομής. Τα προγράμματα προσομοίωσης λειτουργίας των μεθόδων επιμερισμού, πρόβλεψης και εκτίμησης φορτίου, οι οποίες προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία, συνδυαστικά με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS για δίκτυα διανομής αποδίδουν ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης. Η μέθοδος επιμερισμού φορτίου, μάλιστα, επιβεβαιώνεται ότι αποτελεί μία επαρκή λύση για την περίπτωση των ελληνικών δικτύων διανομής, τα οποία χαρακτηρίζονται από ένδεια μετρήσεων πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, η προσομοίωση λειτουργίας της προτεινόμενης πιθανοτικής μεθόδου επεξεργασίας τοπολογίας είναι επιτυχής για το δικτύου δοκιμών της Ρόδου, το οποίο αποτελεί μία χαρακτηριστική περίπτωση δικτύου με αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ και συχνές τοπολογικές αλλαγές.
- Στο Κεφάλαιο 4, προτείνονται τρεις καινοτόμες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ με στόχο την επίτευξη παρατηρησιμότητας και τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS. Η πληροφορία του Fisher αναδεικνύεται ως ένα ισχυρό μεθοδολογικό εργαλείο στο οποίο θεμελιώνονται μαθηματικά και οι τρεις μέθοδοι, μολονότι βασίζονται σε διαφορετικά κριτήρια βελτιστοποίησης η καθεμία. Εξίσου σημαντικό εργαλείο αναδεικνύεται ο βέλτιστος πειραματικός σχεδιασμός για τον καθορισμό των κριτηρίων βελτιστοποίησης της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Η διατύπωση των μαθηματικών μοντέλων των μεθόδων

στο πλαίσιο του κυρτού και του ημιορισμένου προγραμματισμού αποτελεί εχέγγυο για την αποδοτική επίλυσή τους κατά το πρότυπο του γενικού προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων σε υποδομές εποπτείας και ελέγχου συστημάτων.

- Στο Κεφάλαιο 5, προτείνεται ένα γενικό πλαίσιο εφαρμογής των μεθόδων βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων το οποίο βασίζεται σε μία απλή υπολογιστική διαδικασία. Η εφαρμογή της μεθόδου βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου D σε δίκτυο διανομής της διεθνούς βιβλιογραφίας αποδίδει βέλτιστες λύσεις σε όλα τα σενάρια δοκιμών. Επιπλέον, η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μονάδων PMU αποκαθιστά την παρατηρησιμότητα σε όλα τα συστήματα μεταφοράς στα οποία εφαρμόζεται, ενώ η παροχή βέλτιστων λύσεων σε επιλεγμένα σενάρια επιβεβαιώνεται μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων της εφαρμογής της με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων μεθόδων. Αναφορικά με τη μέθοδο βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου M, η εφαρμογή της σε δίκτυα διανομής της διεθνούς βιβλιογραφίας παρέχει βέλτιστες λύσεις σε όλα τα σενάρια δοκιμών, ενώ αποκαθιστά την παρατηρησιμότητα σε όσα από αυτά περιλαμβάνουν αρχικά μη παρατηρήσιμο δίκτυο. Τέλος, κοινό συμπέρασμα από την εφαρμογή των μεθόδων με χρήση των κριτηρίων D και M είναι ότι η πλέον αποτελεσματική στρατηγική για τη μεγιστοποίηση της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης είναι η συνδυαστική εγκατάσταση μετρητικών μονάδων που παρέχουν μετρήσεις μέτρων τάσης και ροών ισχύος σε επιλεγμένες θέσεις του υπό μελέτη ΣΗΕ (κόμβους και κλάδους, αντίστοιχα).

❖ Συμβολή και πρωτοτυπία

Οι κύριες συνεισφορές της παρούσας διατριβής αφορούν τις λειτουργίες του επεξεργαστή τοπολογίας, της ανάλυσης παρατηρησιμότητας και της εκτίμησης κατάστασης. Η συμβολή των προτεινόμενων μεθόδων και τεχνικών εστιάζεται στην αντιμετώπιση του προβλήματος των ελλিপών δεδομένων, το οποίο δυσχεραίνει την παρατηρησιμότητα και επιδεινώνει την ακρίβεια των εκτιμητών κατάστασης ΣΗΕ, μέσω της βέλτιστης διαχείρισης μετρήσεων. Σε σύγκριση με σχετικές εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας, οι προτεινόμενες προσεγγίσεις εμφανίζουν χαρακτηριστικά πρωτοτυπίας ως προς τα μεθοδολογικά εργαλεία, τη μαθηματική διατύπωση, την υλοποίηση και τις δυνατότητές τους.

Με βάση τα ανωτέρω συμπεράσματα, τα οποία επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της έρευνας, είναι δυνατό να συνοψισθούν οι εξής συνεισφορές:

1. Οι τρεις προτεινόμενες μέθοδοι βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων στα ΣΗΕ είναι πρωτότυπες αναφορικά με τη μεθοδολογική τους βάση και τη μαθηματική τους διατύπωση. Ειδικότερα, το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων προσεγγίζεται υπό το πρίσμα της στατιστικής πληροφορίας του Fisher με αποτέλεσμα και οι τρεις προτεινόμενες μέθοδοι να έχουν κοινή μεθοδολογική βάση. Η συγκρότηση ενός ενιαίου μεθοδολογικού πλαισίου για την ανάπτυξη μεθόδων βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων ανεξαρτήτως του επιθυμητού κριτηρίου βελτιστοποίησης (π.χ. επίτευξη παρατηρησιμότητας ή ευρωστία ενάντια σε απώλεια μετρήσεων με ελάχιστο κόστος, στατιστικά κριτήρια για την ακρίβεια εκτιμητών κατάστασης κ.α.) αποτελεί μία χρήσιμη συνεισφορά για την πολύπλευρη μελέτη και επίλυση του προβλήματος. Από τη διερεύνηση της προϋπάρχουσας βιβλιογραφίας, μόνο η εργασία [200] χρησιμοποιεί την πληροφορία κατά Fisher για τη θεμελίωση του προβλήματος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων.

Σε συνέχεια των παραπάνω, οι προτεινόμενες μέθοδοι προβλέπουν την επίλυση προβλημάτων κυρτού και ημιορισμένου προγραμματισμού με χρήση αυστηρά ακέραιων (δυαδικών) μεταβλητών απόφασης. Συνεπώς, τα προβλήματα λύνονται είτε στην αρχική τους μορφή είτε σε μία ισοδύναμη

μορφή, χωρίς να χρησιμοποιούνται προσεγγιστικές επαναδιατυπώσεις οι οποίες καθιστούν τις παρεχόμενες λύσεις μη βέλτιστες. Αντιθέτως, οι προϋπάρχουσες, σχετικές μέθοδοι της διεθνούς βιβλιογραφίας, στο σύνολό τους, βασίζονται σε χαλάρωση των ακέραιων μεταβλητών απόφασης, ενώ πολλές από αυτές επιλύουν προσεγγιστικές μορφές του αρχικού προβλήματος που θέτουν. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στη διεξοδική βιβλιογραφική επισκόπηση του Κεφαλαίου 4 (ενότητα 4.1) για την αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών κάθε μεθόδου.

2. Αναφορικά με τις δυνατότητες των προτεινόμενων μεθόδων, η χρήση της πληροφορίας του Fisher για την ποσοτικοποίηση του πληροφοριακού περιεχομένου κάθε μετρητικής υποδομής, μετρητικής μονάδας ή μεμονωμένης μέτρησης καθιστά εφικτή την απρόσκοπτη λειτουργία των μεθόδων ανεξαρτήτως της συγκρότησης του συνόλου των υποψήφιων μετρητικών μονάδων, με άλλα λόγια, του πλήθους, του τύπου και της θέσης των αντίστοιχων μετρήσεων. Αντιθέτως, οι περισσότερες προϋπάρχουσες μέθοδοι περιορίζονται σε συγκεκριμένους τύπους μετρήσεων ή μετρητικών μονάδων όπως π.χ. στις εργασίες [200], [244], [246] και [247].
3. Η μέθοδος βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων με χρήση του κριτηρίου M λειτουργεί ανεξάρτητα από την αρχική κατάσταση παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη δικτύου διανομής. Επιπλέον, η μέθοδος έχει τη δυνατότητα αποκατάστασης της παρατηρησιμότητας του υπό μελέτη δικτύου και μεγιστοποίησης της ακρίβειας της εκτίμησης κατάστασης WLS, ταυτόχρονα, δηλαδή μέσω μίας εκτέλεσης της υπολογιστικής διαδικασίας της. Ο συνδυασμός των τριών αυτών χαρακτηριστικών δε συναντάται σε καμία προϋπάρχουσα, σχετική μέθοδο της διεθνούς βιβλιογραφίας. Άρα, είναι ασφαλής ο ισχυρισμός ότι η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει καινοτόμες δυνατότητες.
4. Δεδομένου ότι η υλοποίηση εκτιμητών κατάστασης δικτύων διανομής από τους αρμόδιους διαχειριστές είναι υπό ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο, το προτεινόμενο πρόγραμμα προσομοίωσης για τη συνδυασμένη λειτουργία της μεθόδου επιμερισμού φορτίου [159] με τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS, από κοινού με την προτεινόμενη πιθανοτική μέθοδο επεξεργασίας τοπολογίας συναποτελούν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την υλοποίηση ενός εκτιμητή κατάστασης, στοχευμένου για τα ελληνικά δίκτυα διανομής. Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα της εφαρμογής του στο τμήμα του δικτύου διανομής της Ρόδου συνηγορούν στο ότι το ανωτέρω πλαίσιο μπορεί να αποτελέσει παράδειγμα για την ανάπτυξη εκτιμητών κατάστασης στα ελληνικά δίκτυα διανομής.
5. Αξιόλογες συνεισφορές περιλαμβάνονται και στην ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον του λογισμικού MATLAB για την υλοποίηση όλων των προτεινόμενων μεθόδων. Οι συνεισφορές αυτές έχουν προαναφερθεί στις υποενότητες 3.5.1 και 5.1.1.

❖ Προοπτικές και μελλοντική έρευνα

Η επέκταση των εκτιμητών κατάστασης ώστε να καλύπτουν όλο και μεγαλύτερα τμήματα των σύγχρονων ΣΗΕ με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους σε επίπεδο ακρίβειας αποτελούν κομβικούς άξονες για την υποστήριξη της λειτουργίας των ΚΕΕ σε πραγματικό χρόνο σύμφωνα με τις προδιαγραφές των ευφυών δικτύων. Συνεπώς, οι ερευνητικές προοπτικές σχετικά με τους εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ διαβλέπονται ευνοϊκές τόσο σε επιστημονικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο. Καταλύτη για την εκπλήρωση αυτών των προοπτικών αποτελεί η αναβάθμιση των μετρητικών υποδομών των ΣΗΕ σε παγκόσμια κλίμακα στο πλαίσιο του εκσυγχρονισμού τους.

Δεδομένου ότι το ερευνητικό έργο της παρούσας διατριβής επικεντρώθηκε στην ενίσχυση των επιμέρους λειτουργιών των εκτιμητών κατάστασης μέσω της βέλτιστης διαχείρισης μετρήσεων, ως παρακαταθήκη για μελλοντική έρευνα μένουν οι προτεινόμενες μέθοδοι και τεχνικές υπό τη μορφή

λογισμικού. Σε αυτό το πλαίσιο, ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω ανάπτυξη του ανωτέρω λογισμικού προς τις εξής κατευθύνσεις:

- Με δεδομένη την έντονη επίδραση των ψευδομετρήσεων φορτίου στην ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης στα δίκτυα διανομής, μείζονος σημασίας είναι ο ακριβής καθορισμός των διασπορών των ψευδομετρήσεων φορτίου με βάση την ελάχιστοτε χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης ή πρόβλεψης φορτίου. Η εφαρμογή στοιχείων θεωρίας στατιστικής προς αυτή την κατεύθυνση κρίνεται αναγκαία.
- Η ευρωστία ενάντια σε απώλεια μετρητικών μονάδων ή τοπολογικές αλλαγές αποτελεί ένα επιθυμητό χαρακτηριστικό για τις προτεινόμενες μεθόδους βέλτιστης επιλογής μετρητικών μονάδων. Άρα, ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατάλληλη επέκταση των μεθόδων.
- Η χρήση της λειτουργίας της εκτίμησης κατάστασης για τον υπολογισμό μη τεχνικών απωλειών (non-technical losses) και εντοπισμού σφαλμάτων (fault location) στα δίκτυα διανομής αποτελούν εφαρμογές οι οποίες συγκεντρώνουν το ερευνητικό ενδιαφέρον παγκοσμίως. Εξίσου σημαντική αναδεικνύεται η διερεύνηση ζητημάτων κυβερνοασφάλειας (cybersecurity) στο πλαίσιο λειτουργίας εκτιμητών κατάστασης ΣΗΕ. Σε αυτό το πλαίσιο, οι μέθοδοι βέλτιστης τοποθέτησης μετρητικών μονάδων είναι δυνατό να επεκταθούν μελλοντικά προκειμένου οι ανωτέρω υπηρεσίες και εφαρμογές να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό ή την αναβάθμιση των μετρητικών υποδομών ΣΗΕ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παρόν τμήμα γίνεται αναλυτική περιγραφή των ισοδύναμων μονοφασικών μοντέλων των στοιχείων ενός ΣΗΕ που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο των εκτιμητών κατάστασης. Στη συνέχεια, καταστρώνονται οι μαθηματικές εκφράσεις των μετρήσεων που παρέχονται ως είσοδοι στην εκτίμηση κατάστασης. Οι μετρήσεις αυτές διακρίνονται σε:

- συμβατικές, δηλαδή προερχόμενες από συστήματα SCADA, που περιλαμβάνουν
 1. εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος
 2. ροές ενεργού και αέργου ισχύος
 3. μέτρων τάσης κόμβων
 4. μέτρων ρεύματος κλάδων
- συγχρονισμένες, δηλαδή προερχόμενες από μονάδες PMU, καθεμιά εκ των οποίων περιλαμβάνει
 5. τον φασιθέτη τάσης του κόμβου εγκατάστασης
 6. τους φασιθέτες ρεύματος κλάδων προσκείμενων στον κόμβο εγκατάστασης.

1. Ισοδύναμα μοντέλα στοιχείων ΣΗΕ

1.1 Μοντέλα γραμμών και εγκάρσιων στοιχείων

Για τη μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς και διανομής χρησιμοποιείται το ισοδύναμο δίθυρο κύκλωμα Π. Η γραμμή που συνδέει δύο κόμβους, έστω i και j , αναπαρίσταται με μια ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αγωγιμότητα y_{ij} και δύο εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες y_{sij} , οι οποίες γειώνουν τους κόμβους i και j . Οι αγωγιμότητες y_{ij} και y_{sij} υπολογίζονται βάσει των τύπων Α.1 και Α.2:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (\text{A.1})$$

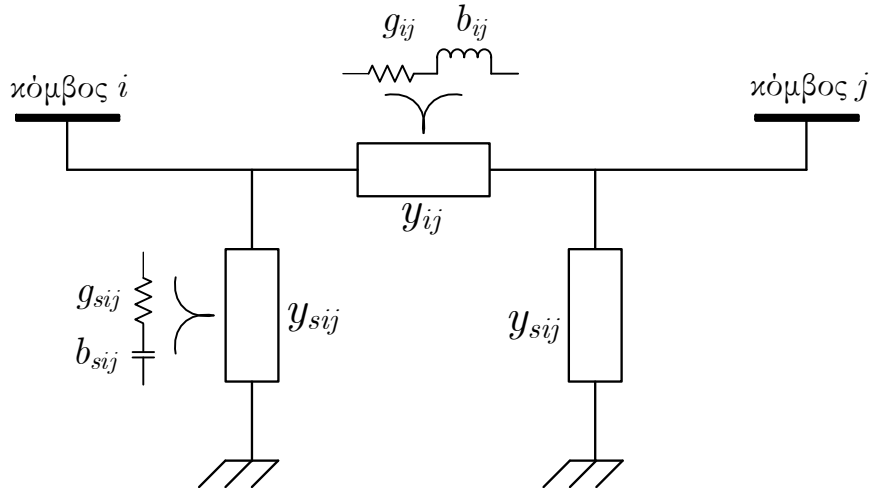
$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (\text{A.2})$$

όπου g_{ij} είναι b_{ij} είναι η ωμική και η επαγωγική αγωγιμότητα της εν σειρά συνιστώσας και g_{sij} και b_{sij} είναι η ωμική και η χωρητική αγωγιμότητα κάθε εγκάρσιας συνιστώσας, αντίστοιχα.

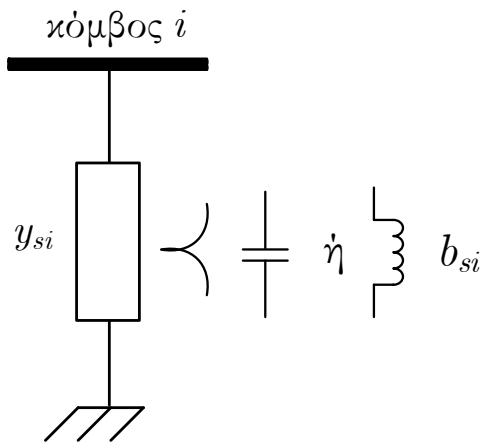
Τα εγκάρσια στοιχεία που μοντελοποιούν τις διατάξεις χωρητικής ή επαγωγικής αντιστάθμισης για έλεγχο τάσης, αέργου ισχύος κ. α. αναπαρίστανται μέσω μιας εγκάρσιας φαντασικής αγωγιμότητας y_{si} που υπολογίζεται βάσει της σχέσης Α.3:

$$y_{si} = jb_{si} \quad \text{όπου } b_{si} = \begin{cases} > 0, \text{ για εγκάρσιο πυκνωτή} \\ < 0, \text{ για εγκάρσιο πηνίο} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Στα Σχήματα Α.1 και Α.2 απεικονίζονται τα ισοδύναμα μοντέλα που περιγράφηκαν για τις γραμμές και τα εγκάρσια στοιχεία, αντίστοιχα.



Σχήμα Α.1: Ισοδύναμο μοντέλο γραμμής μεταφοράς ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα Α.2: Ισοδύναμο μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου.

1.2 Μοντέλο μετασχηματιστών

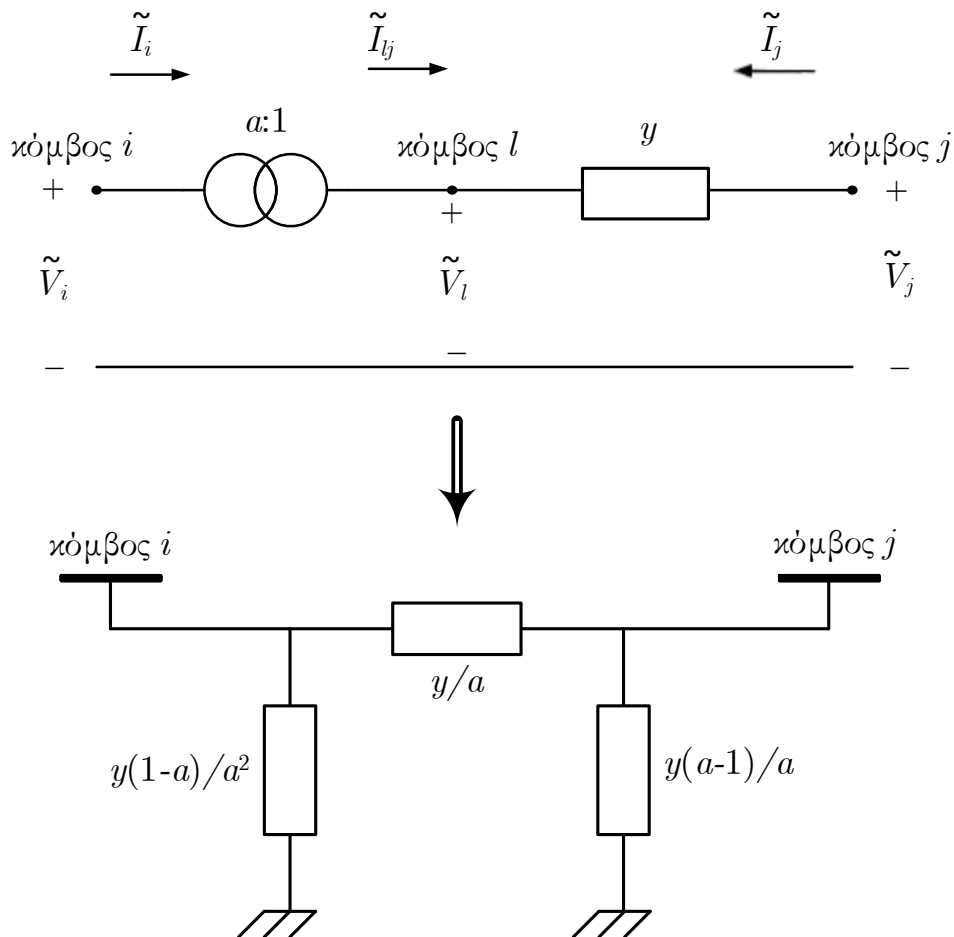
Θεωρώντας ότι κάθε μετασχηματιστής αποτελείται από την εν σειρά σύνδεση ενός ιδανικού μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού a και μιας σύνθετης αγωγιμότητας y , το ισοδύναμο μοντέλο του προκύπτει μέσω υπολογισμών επί του δίθυρου κυκλώματος του μετασχηματιστή που περιγράφηκε. Πιο αναλυτικά, αν οι ακροδέκτες του μετασχηματιστή συνδέονται σε δυο κόμβους i και j του συστήματος, θεωρείται ένας εικονικός κόμβος l ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα Α.3 μαζί με τα θεωρούμενα ρεύματα και τις τάσεις των κόμβων. Η εφαρμογή του νόμου ρευμάτων Kirchhoff στον εικονικό κόμβο αποδίδει τις έκφρασεις των ρευμάτων σε μορφή πίνακα:

$$\tilde{I}_{ij} + \tilde{I}_j = 0 \Rightarrow \tilde{I}_{ij} = -\tilde{I}_j = -y(\tilde{V}_j + \tilde{V}_l) \Rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{I}_{ij} \\ \tilde{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_l \\ \tilde{V}_j \end{bmatrix}$$

Επιπλέον, η εφαρμογή των σχέσεων μετασχηματισμού ρεύματος και τάσης $\tilde{I}_l = a\tilde{I}_i$ και $\tilde{V}_l = a^{-1}\tilde{V}_i$ αποδίδει την τελική μορφή των εκφράσεων των ρευμάτων για το δίθυρο κύκλωμα:

$$\begin{bmatrix} a\tilde{I}_i \\ \tilde{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_i/a \\ \tilde{V}_j \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \tilde{I}_i \\ \tilde{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y/a^2 & -y/a \\ -y/a & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_i \\ \tilde{V}_j \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Βάσει του τύπου (Α.4), κάθε μετασχηματιστής αναπαρίσταται με ένα ισοδύναμο δίθυρο κύκλωμα Π.



Σχήμα Α.3: Ισοδύναμο μοντέλο μετασχηματιστή.

1.3 Μοντέλα κόμβων με έγχυση ισχύος

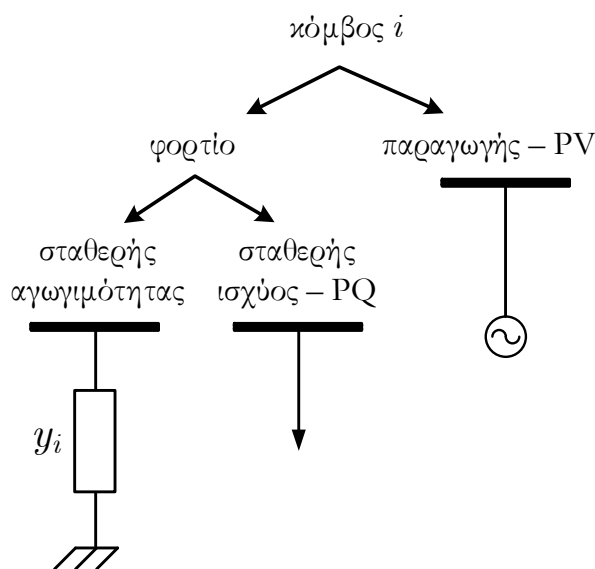
Οι κόμβοι στους οποίους εγχέεται ισχύς διακρίνονται σε κόμβους φορτίου και κόμβους παραγωγής. Η διάκριση βασίζεται στο πρόσημο της εγχεόμενης ενεργού ισχύος. Σε κάθε κόμβο παραγωγής, υπάρχει σύνδεση μονάδας (ή μονάδων) παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και η εγχεόμενη ενεργός ισχύς είναι πάντοτε θετική. Κατά τους υπολογισμούς της ροής ισχύος δια του κόμβου i , θεωρούνται γνωστά μεγέθη η εγχεόμενη ενεργός ισχύς P_i και το μέτρο τάσης τους V_i , για αυτό και συμβολίζονται με τα αρχικά PV.

Ως προς τα φορτία, διακρίνονται σε σταθερής αγωγιμότητας και σταθερής ισχύος. Τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας χαρακτηρίζονται από μια τιμή σύνθετης αγωγιμότητας $y_i = g_i + jb_i$ και αναπαρίστανται ως εγκάρσια στοιχεία προς γη. Η εγχεόμενη σε αυτά ενεργός ισχύς μπορεί να λαμβάνει είτε θετικές είτε

αρνητικές τιμές. Από την άλλη πλευρά, αν ο κόμβος i εξυπηρετεί φορτίο σταθερής ισχύος, χαρακτηρίζεται από γνωστές τιμές ενεργού και αέργου ισχύος P_i και Q_i , εξ' ου και ο συμβολισμός PQ, ενώ η τάση του \tilde{V}_i θεωρείται άγνωστη. Επιπλέον, η εγχεόμενη ενεργός ισχύς είναι πάντοτε αρνητική. Οι τιμές ενεργού και αέργου ισχύος ανά τύπο κόμβου δίνονται συνοπτικά στον Πίνακα Α.Ι, ενώ η γραφική αναπαράσταση των μοντέλων απεικονίζεται στο Σχήμα Α.4.

Πίνακας Α.Ι: Τιμές ενεργού και αέργου ισχύος ανά τύπο κόμβου.

| Τύπος κόμβου i | Ενεργός ισχύς P_i | Άεργος ισχύς Q_i |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Γεννήτρια | $P_i > 0$ | $Q_i < 0$ ή $Q_i > 0$ |
| Φορτίο σταθερής ισχύος | $P_i < 0$ | $Q_i < 0$ ή $Q_i > 0$ |
| Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας | $P_i < 0$ ή $P_i > 0$ | $Q_i < 0$ ή $Q_i > 0$ |



Σχήμα Α.4: Ισοδύναμα μοντέλα κόμβων με έγχυση ισχύος.

1.4 Μοντέλο γενικευμένου κόμβου

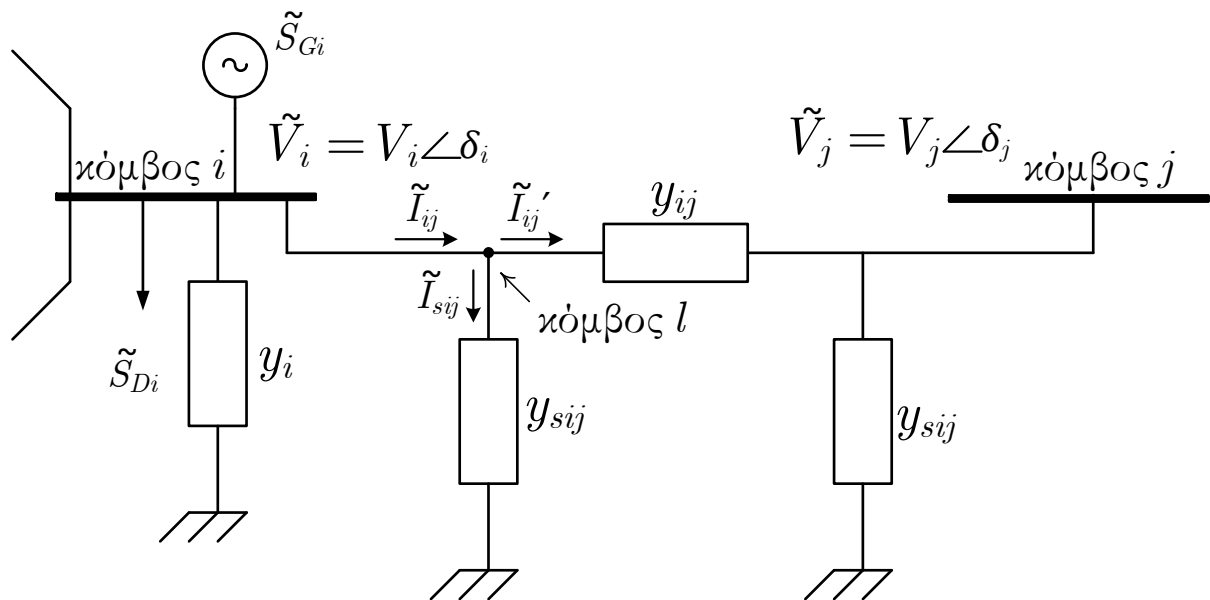
Με βάση τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν στις υποενότητες (1.1)–(1.3), μπορεί να δομηθεί το ισοδύναμο μοντέλο ενός γενικευμένου κόμβου i ο οποίος διαθέτει γεννήτρια, τροφοδοτεί φορτία και διασυνδέεται με ένα υποσύνολο κόμβων του συστήματος, έστω $A(i)$. Το μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα Α.5, στο οποίο έχουν γίνει οι εξής θεωρήσεις:

1. Εφόσον οι γραμμές και οι μετασχηματιστές ανάγονται σε ισοδύναμα μοντέλα Π , οποιοσδήποτε κλάδος που συνδέει τον κόμβο i με έναν κόμβο j αναπαρίσταται μέσω ενός δίθυρου κυκλώματος Π του οποίου οι σύνθετες αγωγιμότητες y_{ij} και y_{sij} υπολογίζονται από την εν σειρά σύνδεση επιμέρους κυκλωμάτων Π .

2. Εφόσον οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας μοντελοποιούνται ως εγκάρσια στοιχεία μεταξύ κόμβου και γης, υπολογίζεται ένα ισοδύναμο εγκάρσιο στοιχείο σύνθετης αγωγιμότητας y_i ίσης με το άθροισμα των επιμέρους διατάξεων και φορτίων.

Η έγχυση ισχύος μελετάται σε επίπεδο δυο συνιστώσων: την παραγόμενη από τη γεννήτρια μιγαδική ισχύ $\tilde{S}_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di}$ και την καταναλισκόμενη ισχύ από το φορτίο σταθερής ισχύος $\tilde{S}_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$. Στο πλαίσιο του παρούσας διατριβής υιοθετείται η έκφραση των μιγαδικών τάσεων σε πολικές συντεταγμένες, οπότε το μέτρο και η γωνία της μιγαδικής τάσης \tilde{V}_i συμβολίζονται με V_i και δ_i , αντιστοίχως. Συνεπώς, ισχύει:

$$\begin{aligned}\tilde{V}_i &= V_i \angle \delta_i = V_i \cos \delta_i + j V_i \sin \delta_i \\ \tilde{V}_j &= V_j \angle \delta_j = V_j \cos \delta_j + j V_j \sin \delta_j\end{aligned}\quad (\text{A.5})$$



Σχήμα Α.5 : Ισοδύναμο μοντέλο γενικευμένου ζυγού.

2. Εξισώσεις μετρήσεων

2.1 Συμβατικές μετρήσεις

Η εξαγωγή των αναλυτικών εκφράσεων των συμβατικών μετρήσεων ηλεκτρικών μεγεθών που διατίθενται στο πλαίσιο των επιμητών κατάστασης βασίζεται στη μελέτη του μοντέλου γενικευμένου κόμβου της υποενότητας (1.5). Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff στον κόμβο l του Σχήματος Α.5, ισχύει:

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{ij} - \tilde{I}'_{ij} - \tilde{I}_{sij} &= 0 \Rightarrow \tilde{I}_{ij} = \tilde{I}'_{ij} + \tilde{I}_{sij} \Rightarrow \tilde{I}_{ij} = (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) y_{ij} + \tilde{V}_j y_{sij} \\ &\Rightarrow \tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_i (y_{sij} + y_{ij}) - \tilde{V}_j y_{ij}\end{aligned}\quad (\text{A.6})$$

Παράρτημα Α

Η μιγαδική ισχύς S_{ij} που ρέει μεταξύ των κόμβων i και j είναι ίση με:

$$\tilde{S}_{ij} = \tilde{V}_i \tilde{I}_{ij}^* \stackrel{(A.6)}{=} \tilde{V}_i^2 y_{ij}^* - \tilde{V}_i \tilde{V}_j y_{ij}^* = P_{ij} + jQ_{ij}$$

Εκφράζοντας την σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής $i - j$ σύμφωνα με τις σχέσεις (Α.1) και (Α.2) και τις τάσεις σύμφωνα με τις σχέσεις (Α.5), με κατάλληλες πράξεις προκύπτουν οι εξισώσεις ροών ενεργού και αέργου ισχύος:

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sij}) - V_i V_j \alpha_{ij} \quad (A.7)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sij}) - V_i V_j \beta_{ij} \quad (A.8)$$

όπου οι όροι α_{ij} και β_{ij} χρησιμοποιούνται για την απλοποίηση των εξισώσεων και είναι ίσοι με:

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \\ \beta_{ij} &= g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \end{aligned}$$

Με αντίστοιχο τρόπο εξάγονται οι εξισώσεις εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος στον κόμβο i . Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff στον κόμβο i με δεδομένα το εγχεόμενο ρεύμα από τη γεννήτρια \tilde{I}_{Gi} και το ρεύμα που απορροφά το φορτίο σταθερής ισχύος \tilde{I}_{Di} , ισχύει:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{Gi} - \tilde{I}'_{Di} - \tilde{V}_i y_i^* - \sum_{k \in A(i)} \tilde{I}_{ik} &= 0 \Rightarrow \tilde{I}_{Gi} - \tilde{I}_{Di} = \tilde{V}_i y_i + \sum_{k \in A(i)} \tilde{I}_{ik} \\ \stackrel{(A.6)}{\Rightarrow} \tilde{I}_{Gi} - \tilde{I}_{Di} &= \tilde{V}_i y_i + \sum_{k \in A(i)} \left[\tilde{V}_i (y_{sik} + y_{ik}) - \tilde{V}_k y_{ik} \right] \\ \Rightarrow \tilde{I}_{Gi} - \tilde{I}_{Di} &= \tilde{V}_i \left[y_i + \sum_{k \in A(i)} (y_{sik} + y_{ik}) \right] - \sum_{k \in A(i)} \tilde{V}_k y_{ik} \end{aligned} \quad (A.9)$$

όπου ο κόμβος k ανήκει στο σύνολο $A(i)$, \tilde{V}_k η μιγαδική τάση του και \tilde{I}_{ik} είναι το ρεύμα που ρέει στον κλάδο $i - k$.

Συνεπώς, η μιγαδική ισχύς που εγχέεται στον κόμβο i μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\tilde{S}_i = \tilde{S}_{Gi} - \tilde{S}_{Di} = \tilde{V}_i \tilde{I}_{Gi}^* - \tilde{V}_i \tilde{I}_{Di}^* = \tilde{V}_i (\tilde{I}_{Gi}^* - \tilde{I}_{Di}^*) \quad (A.10)$$

Εκκινώντας από την (Α.10) και με χρήση των σχέσεων (Α.1)–(Α.3), (Α.5) και (Α.9), με κατάλληλες πράξεις προκύπτουν οι εξισώσεις εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος:

$$P_i = V_i^2 \sum_{k \in A(i)} (g_{ik} + g_{sik}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \alpha_{ik} \quad (A.11)$$

$$Q_i = -V_i^2 \sum_{k \in A(i)} (b_{ik} + b_{sik}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \beta_{ik} \quad (A.12)$$

όπου χρησιμοποιούνται, και πάλι, οι όροι α_{ij} και β_{ij} για την απλοποίηση των σχέσεων.

Τέλος, με βάση την σχέση (Α.6.), μπορεί να εξαχθεί η αναλυτική έκφραση του μέτρου ρεύματος του κλάδου $i - j$. Παρακάτω, δίνεται ο συμβολισμός του μιγαδικού ρεύματος καθώς και η εξίσωση του μέτρου του:

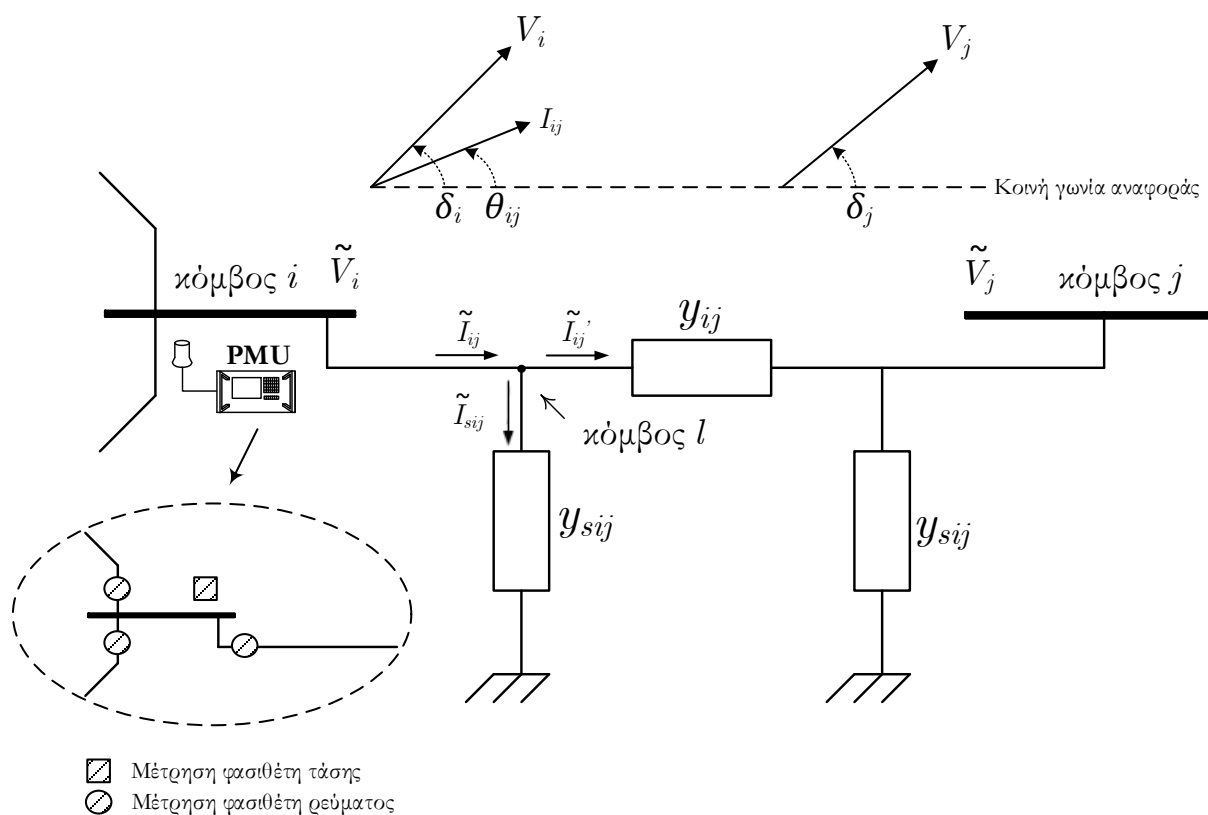
$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij} = I_{ij} \cos \theta_{ij} + j I_{ij} \sin \theta_{ij} \quad (\text{Α.13})$$

$$I_{ij} = \sqrt{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j} \quad (\text{Α.14})$$

όπου I_{ij} και θ_{ij} το μέτρο και η γωνία του μιγαδικού ρεύματος.

2.2 Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών

Προκειμένου να εξαχθούν οι εξισώσεις των μετρήσεων φασιθετών από μονάδες PMU, υιοθετούνται οι εκφράσεις των φασιθετών τάσης και ρεύματος σε πολικές συντεταγμένες σύμφωνα με τις (Α.5) και (Α.13), αντίστοιχα. Θεωρώντας ότι στον κόμβο i του Σχήματος Α.6 υπάρχει εγκατεστημένη μονάδα PMU, λαμβάνονται συγχρονισμένες μετρήσεις του φασιθέτη τάσης \tilde{V}_i και των φασιθετών ρευμάτων $\tilde{I}_{ik}, k \in A(i)$. Επιπλέον, εισάγεται μια κοινή γωνία αναφοράς για όλους τους φασιθέτες του υπό μελέτη συστήματος με βάση τη λειτουργία του συστήματος GPS που υποστηρίζει τη μετρητική υποδομή με μονάδες PMU. Συνεπώς, όλες οι γωνίες υπολογίζονται με βάση αυτή την κοινή αναφορά, όπως δίνεται παραστατικά στο Σχήμα Α.6.



Σχήμα Α.6 : Μοντέλο γενικευμένου κόμβου με εγκατεστημένη μονάδα PMU.

Η έκφραση του μέτρου και της γωνίας των ρευμάτων υπολογίζεται όπως στην υποενότητα (2.1), δηλαδή με εφαρμογή του νόμου ρευμάτων Kirchhoff στον κόμβο l του Σχήματος Α.6. Κατά συνέπεια, προκύπτει η έκφραση (Α.14) για το μέτρο του φασιθέτη ρεύματος και η παρακάτω έκφραση για τη γωνία του:

$$\theta_{ij} = \arctan \left\{ \frac{V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right]}{V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right]} \right\} \quad (\text{A.15})$$

3. Όροι Ιακωβιανής μήτρας: μερικές παράγωγοι εξισώσεων μετρήσεων

3.1 Μερικές παράγωγοι εξισώσεων συμβατικών μετρήσεων

Στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης, η Ιακωβιανή μήτρα περιλαμβάνει όλες τις παραγώγους πρώτης τάξης του διανύσματος των μη γραμμικών συναρτήσεων $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, που αντιστοιχούν στις διαθέσιμες μετρήσεις, ως προς το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης \mathbf{x} . Για ένα σύστημα n κόμβων με m διαθέσιμες συμβατικές μετρήσεις, η Ιακωβιανή μήτρα λαμβάνει την εξής μορφή:

$$\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{P}_{fl}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{P}_{fl}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{inj}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{Q}_{fl}}{\partial \boldsymbol{\delta}} & \frac{\partial \mathbf{Q}_{fl}}{\partial \mathbf{V}} \\ \mathbf{0} & \frac{\partial \mathbf{V}_m}{\partial \mathbf{V}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.16})$$

όπου $\mathbf{H}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^{m \times (2n-1)}$, $\mathbf{x} = (\delta_2, \dots, \delta_n, V_1, \dots, V_n)$ το διάνυσμα των $2n - 1$ μεταβλητών κατάστασης, καθώς θεωρείται ως γωνία αναφοράς $\delta_1 = 0$, $\boldsymbol{\delta} = (\delta_2, \dots, \delta_n)^T$, $\mathbf{V} = (V_1, \dots, V_n)^T$, \mathbf{P}_{inj} και \mathbf{Q}_{inj} τα σύνολα των διαθέσιμων μετρήσεων εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος αντιστοίχως, \mathbf{P}_{fl} και \mathbf{Q}_{fl} τα αντίστοιχα σύνολα για τις ροές ισχύος και \mathbf{V}_m το σύνολο των μετρήσεων μέτρων τάσης.

Με δεδομένες τις εξισώσεις (Α.7), (Α.8), (Α.11) και (Α.12), μπορούν να υπολογιστούν οι μερικές παράγωγοι που αφορούν τα ηλεκτρικά μεγέθη ισχύος.

Θεωρώντας διαθέσιμες μετρήσεις εγχύσεων στον κόμβο i ο οποίος διασυνδέεται ένα σύνολο κόμβων $A(i)$ και μετρήσεις ροών σε έναν προσκείμενο κλάδο $i - j$, οι μερικές παράγωγοι ως προς την γωνία και το μέτρο της τάσης του $l - \text{οστού}$ κόμβου του συστήματος είναι:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_l} = \begin{cases} V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \beta_{ik}, l = i \\ -V_i V_l \beta_{il}, l \in A(i) \\ 0, l \neq i \text{ και } l \notin A(i) \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} V_i V_j \beta_{ij}, l = i \\ -V_i V_j \beta_{ij}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_l} = \begin{cases} -V_i \sum_{k \in A(i)} V_k \alpha_{ik}, l = i \\ V_i V_l \alpha_{il}, l \in A(i) \\ 0, l \neq i \text{ και } l \notin A(i) \end{cases} \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} -V_i V_j \alpha_{ij}, l = i \\ V_i V_j \alpha_{ij}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_l} = \begin{cases} 2V_i \sum_{k \in A(i)} (g_{ik} + g_{sik}) + 2V_i g_i - \sum_{k \in A(i)} V_k \alpha_{ik}, l = i \\ -V_i \alpha_{il}, l \in A(i) \\ 0, l \neq i \text{ και } l \notin A(i) \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_l} = \begin{cases} -V_j \alpha_{ij} + 2V_i (g_{ij} + g_{sij}), l = i \\ -V_i \alpha_{ij}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_l} = \begin{cases} -2V_i \sum_{k \in A(i)} (b_{ik} + b_{sik}) - 2V_i b_i - \sum_{k \in A(i)} V_k \beta_{ik}, l = i \\ -V_i \beta_{il}, l \in A(i) \\ 0, l \neq i \text{ και } l \notin A(i) \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_l} = \begin{cases} -V_j \beta_{ij} - 2V_i (b_{ij} + b_{sij}), l = i \\ -V_i \beta_{ij}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.24})$$

Επιπλέον, αν υπάρχει διαθέσιμη μέτρηση μέτρου τάσης στον κόμβο i , οι αντίστοιχες μερικές παράγωγοι διαμορφώνονται ως εξής:

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_l} = \begin{cases} 1, l = i \\ 0, l \neq i \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_l} = 0, \text{ για κάθε } l \quad (\text{A.26})$$

Οι εκφράσεις (A.17)–(A.26) αφορούν τις συμβατικές μετρήσεις και αποτελούν τον σκληρό πυρήνα της δομής της Ιακωβιανής μήτρας χάρις στην αυξημένη διαθεσιμότητα τους σε σχέση με τα δεδομένα μέτρων ρεύματος και τις μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος. Οι μετρήσεις μέτρων ρεύματος είναι δυνατό να διατίθενται μεμονωμένες, ειδικά στα δίκτυα διανομής, στην αρχή των αναχωρήσεων των κύριων γραμμών διανομής. Θεωρώντας σχετική μέτρηση στον κλάδο $i - j$, η Ιακωβιανή μήτρα επαυξάνεται κατά μια γραμμή με βάση την (A.16) μέσω των εξής εκφράσεων:

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} \frac{[(g_{ij} + g_{sij})\beta_{ij} + (b_{ij} + b_{sij})\alpha_{ij}]V_i V_j}{\sqrt{[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2]V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2)V_j^2 + 2[(b_{ij} + b_{sij})\beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij})\alpha_{ij}]V_i V_j}}, l = i \\ \frac{-[(g_{ij} + g_{sij})\beta_{ij} + (b_{ij} + b_{sij})\alpha_{ij}]V_i V_j}{\sqrt{[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2]V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2)V_j^2 + 2[(b_{ij} + b_{sij})\beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij})\alpha_{ij}]V_i V_j}}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_l} = \begin{cases} \frac{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i + \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_j}{\sqrt{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = i \\ \frac{(g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_j}{\sqrt{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.28})$$

3.2 Μερικές παράγωγοι εξισώσεων συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών

Οι μετρήσεις φασιθετών εισάγουν επιπλέον γραμμές στην Ιακωβιανή μήτρα που αφορούν τις γωνίες τάσεων και ρευμάτων. Επιπλέον, λαμβάνοντας ως αναφορά τη γωνία η οποία προέρχεται από το σύστημα GPS, οι μεταβλητές κατάστασης είναι $2n$ όπου n ο αριθμός των κόμβων του συστήματος. Θεωρώντας μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος στον κόμβο i και στον κλάδο $i - j$, αντίστοιχα, οι μερικές παράγωγοι για τις αντίστοιχες γωνίες δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_l} = 0, \forall l \quad (\text{A.29}) \quad \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_l} = \begin{cases} 1, l = i \\ 0, l \neq i \end{cases} \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} \frac{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = i \\ \frac{(g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.31})$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_l} = \begin{cases} \frac{\left[(b_{ij} + b_{sij}) \alpha_{ij} + (g_{ij} + g_{sij}) \beta_{ij} \right] V_j}{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = i \\ \frac{\left[(b_{ij} + b_{sij}) \alpha_{ij} + (g_{ij} + g_{sij}) \beta_{ij} \right] V_i}{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j}}, l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.32})$$

3.3 Εξισώσεις συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών ρευμάτων σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Για την υλοποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας της μεθόδου βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU, είναι αναγκαία και η χρήση των εκφράσεων των φασιθετών ρευμάτων σε καρτεσιανές συντεταγμένες σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας. Για την πληρότητα της μελέτης, λοιπόν, παρατίθενται οι σχετικές εξισώσεις καθώς και οι αντίστοιχες μερικές παράγωγοί τους. Διευκρινίζεται ότι η μέθοδος λειτουργεί με

Παράρτημα Α

το διάνυσμα κατάστασης καθώς και τις συμβατικές μετρήσεις – αν προϋπάρχουν – εκπεφρασμένες σε πολικές συντεταγμένες.

Η γενικά έκφραση του φασιθέτη ρεύματος του κλάδου $i - j$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι η εξής:

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i} \quad (\text{A.33})$$

Η πραγματική και η φανταστική συνιστώσα του φασιθέτη ρεύματος υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες σχέσεις:

$$I_{ij,r} = \left\{ V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (\text{A.34})$$

$$I_{ij,i} = \left\{ V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (\text{A.35})$$

Η εξαγωγή των ανωτέρω σχέσεων βασίζεται στο Σχήμα Α.6.

Τέλος, οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων (Α.34) και (Α.35) ως προς τις μεταβλητές κατάστασης, οι οποίες παραμένουν εκπεφρασμένες σε πολικές συντεταγμένες, είναι οι εξής:

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} -V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i + (b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i \right], l = i \\ V_j \left[g_{ij} \sin \delta_j + b_{ij} \cos \delta_j \right], l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.36})$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_l} = \begin{cases} V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right], l = i \\ -V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right], l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.37})$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_l} = \begin{cases} \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right], l = i \\ - \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right], l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.38})$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_l} = \begin{cases} \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right], l = i \\ - \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right], l = j \\ 0, l \neq i, j \end{cases} \quad (\text{A.39})$$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παρόν τμήμα υποστηρίζεται το μαθηματικό πλαίσιο του Κεφαλαίου 4 μέσω της αναλυτικής διατύπωσης ορισμών, συνθηκών και αποδείξεων σχέσεων και τύπων των οποίων η παράθεση απ' ευθείας στο κεφάλαιο παραλείφθηκε για οικονομία χώρου. Η δομή του παραρτήματος είναι σύμφωνη με τη διαδοχή των εννοιών του Κεφαλαίου 4 αρχίζοντας από την υποενότητα 4.2.1, η οποία αφορά την πληροφορία του Fisher.

1. Αποδείξεις και Αναλυτικές Διατυπώσεις για την Πληροφορία του Fisher

1.1 Συνθήκες κανονικότητας

Προϋπόθεση για την ισχύ του θεωρήματος Cramér-Rao και την εξαγωγή των εναλλακτικών τύπων για τον υπολογισμό της μήτρας FIM είναι η εκπλήρωση τεσσάρων συνθηκών κανονικότητας οι οποίες περιγράφονται ακολούθως [147]:

- i. Ο παραμετρικός χώρος Θ είναι ανοιχτό υποσύνολο του k -διάστατου χώρου των πραγματικών αριθμών \mathbb{R}^k ή, ισοδύναμα, η ανάλυση αφορά αποκλειστικά τα εσωτερικά σημεία του χώρου Θ .
- ii. Το σύνολο τιμών του δείγματος \mathcal{Z} , $\mathcal{Q} = \{\mathbf{Z} = \mathbf{z} \in \mathbb{R}^m : L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) > 0\}$ δεν εξαρτάται από την παράμετρο $\boldsymbol{\theta}$.
- iii. Υπάρχουν και είναι πεπερασμένες οι μερικές παράγωγοι της συνάρτησης πιθανοφάνειας $L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) = f(\mathbf{z}; \boldsymbol{\theta})$ ως προς $\theta_i, i = 1, \dots, k$, για κάθε $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^m$ και $\boldsymbol{\theta} \in \Theta$.
- iv. Υπάρχουν οι παράγωγοι ως προς $\boldsymbol{\theta}$ των ολοκληρωμάτων $\int_{\mathcal{Q}} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z}$ και $\int_{\mathcal{Q}} \hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{Z}) L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z}$.

Επιπλέον, στις ποσότητες αυτές είναι δυνατή η εναλλαγή της σειράς διαφορίσης και ολοκλήρωσης (ή άθροισης).

1.2 Εναλλακτικές μορφές υπολογισμού μήτρας FIM

Αρχικά, αποδεικνύεται ότι η μέση τιμή όλων των μερικών παραγώγων $\mathcal{S}_i(\boldsymbol{\theta}) = \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}, i = 1, \dots, k$

είναι μηδενική:

$$\begin{aligned} E_{\boldsymbol{\theta}}(\mathcal{S}_i(\boldsymbol{\theta})) &= \int_{\mathcal{Q}} \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} f(\mathbf{z}; \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z} = \int_{\mathcal{Q}} \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z} = \int_{\mathcal{Q}} \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} d\mathbf{z} \\ &= \frac{\partial}{\partial \theta_i} \int_{\mathcal{Q}} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) d\mathbf{z} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} (1) = 0, \quad i = 1, \dots, k \end{aligned}$$

Συνεπώς, εκκινώντας από τη γνωστή ταυτότητα της συνδιακύμανσης δύο μεταβλητών προκύπτει η απόδειξη της σχέσης (4.2):

$$\begin{aligned} \text{cov} \left[\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}), \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right] &= E_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right) - \underbrace{E_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right)}_{\mathbf{0}} \underbrace{E_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right)}_{\mathbf{0}} \\ &= E_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right) = \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) \end{aligned}$$

Παράρτημα Β

Επιπλέον, η απόδειξη της σχέσης (4.3) γίνεται αντίστροφα, δηλαδή εικινώντας από το δεξί μέλος:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\partial^2 \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right] &= \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\partial}{\partial \theta_i} \left(\frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \right) \right] = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\partial}{\partial \theta_i} \left(\frac{\frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}}{L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right) \right] = \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial^2 L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) - \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}}{L^2(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] \\
 &= \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial^2 L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j}}{L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] - \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}}{L^2(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] = \int_{\mathbb{Q}} \frac{\partial^2 L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) dz - \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}}{L^2(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] \\
 &= \int_{\mathbb{Q}} \frac{\partial^2 L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i \partial \theta_j} dz - \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j} \frac{\partial L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i}}{L^2(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] = \frac{\partial^2}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \int_{\mathbb{Q}} L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) dz - \mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\frac{\frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_i} \frac{\partial \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_j}}{L^2(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta})} \right] \\
 &= \frac{\partial^2}{\partial \theta_i \partial \theta_j} (1) - \mathbb{F}_{ij}(\boldsymbol{\theta}) = -\mathbb{F}_{ij}(\boldsymbol{\theta})
 \end{aligned}$$

Συνεπώς, σε μητρική μορφή ισχύει η εξής σχέση:

$$\mathbb{F}(\boldsymbol{\theta}) = -\mathbb{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \left(\nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(\mathbf{z} | \boldsymbol{\theta}) \right) \right] \quad (\text{B.1})$$

2. Αποδείξεις για το Βέλτιστο Πειραματικό Σχεδιασμό

2.1 Απόδειξη σχέσης (4.14)

Θεωρώντας ότι $c = 1$ στη σχέση ορισμού (4.13), ο όγκος του ελλειψοειδούς $\text{vol}_{\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})}}$ εξαρτάται από την ορίζουσα της αντίστροφης μήτρας FIM $\det \mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})$ και τη διάσταση του χώρου που καταλαμβάνει το ελλειψοειδές, εν προκειμένω ίση με k . Για $c \in \mathbb{R}$, αποδεικνύεται ότι [276]:

$$\text{vol}_{\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})}} = c^{k/2} V_k \sqrt{\det \mathbb{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})} \quad (\text{B.2})$$

όπου V_k ο όγκος της μοναδιαίας σφαίρας στο χώρο \mathbb{R}^k , θεωρώντας ότι το κέντρο της βρίσκεται στο εκτιμώμενο σημείο $\hat{\boldsymbol{\theta}}(\mathbf{z})$. Η μοναδιαία σφαίρα έχει μοναδιαία ακτίνα και ο όγκος της υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$V_n = \frac{\pi^{k/2}}{\Gamma(k/2 + 1)} \approx \frac{1}{\sqrt{\pi k}} \left(\frac{2e\pi}{k} \right)^{k/2}$$

όπου $\Gamma(k) = (k-1)!$ είναι η κατανομή Γάμμα για την περίπτωση των φυσικών αριθμών $k \in \mathbb{N}$.

Έτσι, με λογαρίθμηση της σχέσης (B.2) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \ln(\text{vol}\mathcal{E}_{\hat{\boldsymbol{\theta}}(z)}) &= \ln\left(c^{k/2}V_k\sqrt{\det\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})}\right) = \underbrace{\ln\left(c^{k/2}V_k\right)}_{\beta} + \ln\left(\sqrt{\det\mathbf{F}^{-1}(\boldsymbol{\theta})}\right) = \beta + \ln\left(1/\sqrt{\det\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})}\right) \\ &= \beta - \frac{\ln(\det\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}))}{2} \end{aligned}$$

Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, η εξάρτηση της σταθεράς β από την πιθανότητα ξ , τις διασπορές $\sigma_i^2, i = 1, \dots, m$ εξαιτίας της σταθεράς c , καθώς και από τον αριθμό των επιμέρους παραμέτρων k .

2.2 Υπολογισμός της μήτρας FIM του γραμμικού συστήματος (4.19)

Δεδομένου ότι η αναφορά [261] βασίζεται στην εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας, η μήτρα FIM του γραμμικού συστήματος (4.19) υπολογίζεται με χρήση της σχέσης ορισμού της μήτρας FIM (4.1) και της σχέσης (2.5), η οποία αποτελεί τη γενική έκφραση της συνάρτησης πιθανοφάνειας σε ένα πρόβλημα εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας υπό τις προϋποθέσεις: α) της ανεξαρτησίας των διαθέσιμων παρατηρήσεων (μετρήσεων) $z_i, i = 1, \dots, m$ και β) της μοντελοποίησης των αντίστοιχων μεγεθών

$Z_i, i = 1, \dots, m$ ως τ.μ. κανονικής κατανομής. Επιπλέον, σύμφωνα με την ανάλυση στην υποενότητα

4.2.2.1, θεωρείται ότι η μέση τιμή κάθε παρατηρούμενου μεγέθους $Z_i, i = 1, \dots, m$ ισούται με τη θεωρητικά αναμενόμενη με βάση τις εξισώσεις που περιγράφουν το σύστημα, εν προκειμένω το γραμμικό σύστημα (4.19). Επομένως, προκύπτουν οι εξής υπολογισμοί:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) &= \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \ln L(z | \boldsymbol{\theta}) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \ln L(z | \boldsymbol{\theta}) \right] = \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\nabla_{\boldsymbol{\theta}} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta}}{\sigma_i} \right)^2 \right) \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \left(\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j - \mathbf{A}_j^T \boldsymbol{\theta}}{\sigma_j} \right)^2 \right) \right] \\ &= \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\left(- \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta})}{\sigma_i^2} \nabla_{\boldsymbol{\theta}} \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta} \right) \left(- \sum_{j=1}^m \frac{(z_j - \mathbf{A}_j^T \boldsymbol{\theta})}{\sigma_j^2} \nabla_{\boldsymbol{\theta}}^T \mathbf{A}_j^T \boldsymbol{\theta} \right) \right] \\ &= \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\left(\sum_{i=1}^m (z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i \right) \left(\sum_{j=1}^m (z_j - \mathbf{A}_j^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_j^{-2} \mathbf{A}_j^T \right) \right] \\ &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[(z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i (z_j - \mathbf{A}_j^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_j^{-2} \mathbf{A}_j^T \right] \quad (\Sigma) \\ &= \sum_{i=1}^m \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[(z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i (z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta}) \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i^T \right] \quad (\Gamma) \\ &= \sum_{i=1}^m \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i \mathbf{E}_{\boldsymbol{\theta}} \left[\underbrace{(z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta})(z_i - \mathbf{A}_i^T \boldsymbol{\theta})}_{\sigma_i^2} \right] \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i^T \\ &= \sum_{i=1}^m \sigma_i^{-2} \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T = \text{cov}[e] \left(\sum_{i=1}^m \mathbf{A}_i \mathbf{A}_i^T \right) \end{aligned}$$

όπου για την ενδιάμεση έκφραση (Σ) χρησιμοποιούνται οι, γνωστές από την υποενότητα 1.1, συνθήκες κανονικότητας και για την έκφραση (Γ) αξιοποιείται η υπόθεση για την ανεξαρτησία των μετρήσεων.

Σημειώνεται ότι το μαθηματικό υπόβαθρο για την ανωτέρω απόδειξη αντλείται από την αναφορά [260].

2.3 Ορισμός προβλήματος κυρτού προγραμματισμού

Ένα πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού συνίσταται στην ελαχιστοποίηση μιας κυρτής συνάρτησης (convex function) επί ενός κυρτού συνόλου (convex set) και η γενική μορφή του είναι η εξής [272]:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in \mathbb{C} \end{aligned} \tag{B.3}$$

όπου $\mathbb{C} \subseteq \mathbb{R}^k$ είναι ένα κυρτό σύνολο, $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)^T$ είναι η μεταβλητή του προβλήματος και f μια κυρτή συνάρτηση επί του συνόλου \mathbb{C} .

Ο ορισμός (B.3) δίνεται σε πεπλεγμένη μορφή αλλά επιδέχεται μια πιο αναλυτική, ρητή διατύπωση [272]:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & h_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \tag{B.4}$$

όπου $f, g_i, i = 1, \dots, m : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ είναι κυρτές συναρτήσεις και $h_i, i = 1, \dots, p : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ ομοπαράλληλικές συναρτήσεις (affine functions).

Πράγματι, η διατύπωση (B.4) εμπίπτει στις προδιαγραφές του γενικού ορισμού (B.3), καθώς η συνάρτηση f είναι κυρτή και το σύνολο των εφικτών λύσεων (feasible set) που ορίζουν οι περιορισμοί – δηλαδή, σε αντιστοιχία με τον ορισμό, το σύνολο \mathbb{C} – είναι κυρτό [272].

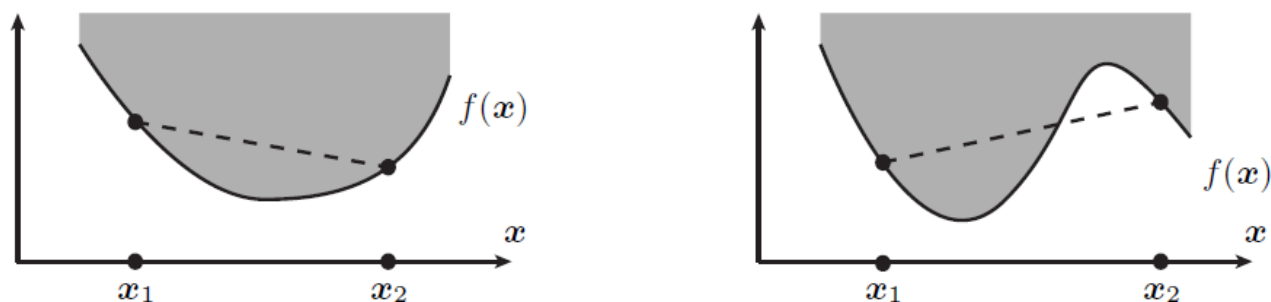
Δε θα γίνει περαιτέρω μνεία για τις ομοπαράλληλικές συναρτήσεις, παρά μόνον ότι κάθε βαθμωτή γραμμική συνάρτηση είναι ομοπαράλληλική. Ακολουθώντας, παρατίθενται οι ορισμοί και οι ιδιότητες των κυρτών συναρτήσεων και συνόλων.

Μια συνάρτηση f καλείται κυρτή όταν ικανοποιεί την εξής σχέση [271]:

$$f(\alpha \mathbf{x}_1 + \beta \mathbf{x}_2) \leq \alpha f(\mathbf{x}_1) + \beta f(\mathbf{x}_2) \tag{B.5}$$

για κάθε $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^n$ και $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ με $\alpha + \beta = 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0$.

Η γεωμετρική ερμηνεία του ορισμού (B.5) είναι ότι κάθε ευθύγραμμο τμήμα το οποίο ενώνει δύο σημεία-λύσεις της συνάρτησης βρίσκεται «πάνω» από τη γραφική παράσταση της συνάρτησης, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα Β.1 για $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, χωρίς βλάβη της γενικότητας.



Σχήμα Β.1: Γεωμετρική ερμηνεία της ιδιότητας της κυρτής συνάρτησης.

Ένα σύνολο $C \subseteq \mathbb{R}^k$ αποκαλείται κυρτό όταν ισχύει η εξής σχέση [271]:

$$\alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2 \in C \quad (\text{B.6})$$

για κάθε $x_1, x_2 \in C$ και $\alpha \in [0, 1]$.

Γεωμετρικά, η σχέση (B.6) σημαίνει ότι κάθε ευθύγραμμο τμήμα το οποίο ενώνει τα σημεία x_1 και x_2 ανήκει στο σύνολο C . Η έννοια του κυρτού συνόλου αποδίδεται γραφικά στο Σχήμα Β.2.



Σχήμα Β.2: Γεωμετρική ερμηνεία της ιδιότητας του κυρτού συνόλου. Αριστερά: παράδειγμα κυρτού συνόλου. Δεξιά: παράδειγμα μη κυρτού συνόλου.

Από τις σχέσεις ορισμού (B.5) και (B.6), προκύπτει διαισθητικά μια εξαιρετικά σημαντική ιδιότητα του κυρτού προγραμματισμού: αν x^* είναι ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης f επί του συνόλου C στο γενικό πρόβλημα (B.3), τότε αυτό το σημείο είναι και ολικό ελάχιστο στο ίδιο σύνολο [272]. Κατά συνέπεια, αλγοριθμικές μέθοδοι, οι οποίες, γενικά, επιτυγχάνουν την εύρεση τοπικών ελαχίστων όπως η μέθοδος εσωτερικού σημείου (interior-point method) ή η μέθοδος Newton-Raphson, στην περίπτωση προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού οδηγούν σε ολικά ελάχιστα [272].

Σημειώνεται ότι πρόβλημα κυρτού προγραμματισμού συνιστά και η μεγιστοποίηση μιας κοίλης συνάρτησης επί ενός κυρτού συνόλου (ουσιαστικά, ένα τέτοιο πρόβλημα ανάγεται στην ελαχιστοποίηση μιας κυρτής συνάρτησης αν η κοίλη αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλασιαστεί με -1) [272]. Σε αυτή την κατηγορία, εμπίπτει το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού D με χαλάρωση των δυαδικών μεταβλητών, καθώς περιλαμβάνει τη μεγιστοποίηση μιας κοίλης αντικειμενικής συνάρτησης με ένα γραμμικό περιορισμό (οι γραμμικές συναρτήσεις είναι πάντοτε κυρτές) επί του κλειστού συνόλου $[0, 1]^{m_c}$, το οποίο είναι κυρτό. Αντιθέτως, το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M λαμβάνει την κλασική μορφή (B.4), δηλαδή αφορά την ελαχιστοποίηση μιας κυρτής αντικειμενικής συνάρτησης.

2.4 Γενικές αρχές και χαρακτηριστικά του ημιορισμένου προγραμματισμού

Ο ημιορισμένος προγραμματισμός περιλαμβάνει μια κλάση προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού στα οποία οι περιορισμοί λαμβάνουν τη μορφή γραμμικής μητρικής ανισότητας ή, συντομογραφικά, LMI. Θεωρείται το εξής πρόβλημα ημιορισμένου προγραμματισμού [273]:

$$\begin{aligned} \min \quad & \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{F}(\mathbf{x}) \succeq 0 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

όπου $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)^T \in \mathbb{R}^k$ είναι η μεταβλητή του προβλήματος, $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_k)^T \in \mathbb{R}^k$ είναι ένα

διάνυσμα σταθερών όρων και $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \triangleq \mathbf{F}_0 + \sum_{i=1}^k x_i \mathbf{F}_i \succeq 0$ είναι η κανονική μορφή ενός περιορισμού LMI με

$\mathbf{F}_i \in \mathbb{R}^{p \times p}$, $i = 0, \dots, k$ να αποτελεί ένα σύνολο $k + 1$ συμμετρικών μητρών.

Το πρόβλημα (B.7) είναι κυρτό δεδομένου ότι, επιπλέον της γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, ο περιορισμός LMI επί της μεταβλητής \mathbf{x} είναι κυρτός (convex constraint), καθώς το σύνολο των θετικά ημιορισμένων μητρών, έστω \mathbb{P}_+^k , είναι κυρτό (εναλλακτικά, αποκαλείται και «κώνος»). Εν προκειμένω, αν

$\mathbf{F}(\mathbf{x}_1), \mathbf{F}(\mathbf{x}_2) \in \mathbb{P}_+^k$, τότε, για κάθε $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^k$ και $a \in [0, 1]$, ισχύει:

$$\mathbf{F}(a\mathbf{x} + (1-a)\mathbf{y}) = a\mathbf{F}(\mathbf{x}) + (1-a)\mathbf{F}(\mathbf{y}) \quad (\text{B.8})$$

Η σχέση (B.8) είναι ισοδύναμη με την ιδιότητα (v) στην υποενότητα 4.2.1.1.

Η μορφή (B.7), αν και μπορεί να φαίνεται ως ειδική, καλύπτει ένα μεγάλο αριθμό σημαντικών προβλημάτων βελτιστοποίησης [273], όπως το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων. Επίσης, αποδεικνύεται ότι ακόμη κι αν στο πρόβλημα συμπεριλαμβάνονται γραμμικοί περιορισμοί ισότητας της μορφής $\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b}$, τότε αυτό μπορεί να αναχθεί σε ισοδύναμη μορφή όμοια με τη (B.7).

Επισημαίνεται ότι σε περίπτωση που η μεταβλητή $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}_2^k$, τότε το πρόβλημα παύει να είναι κυρτό.

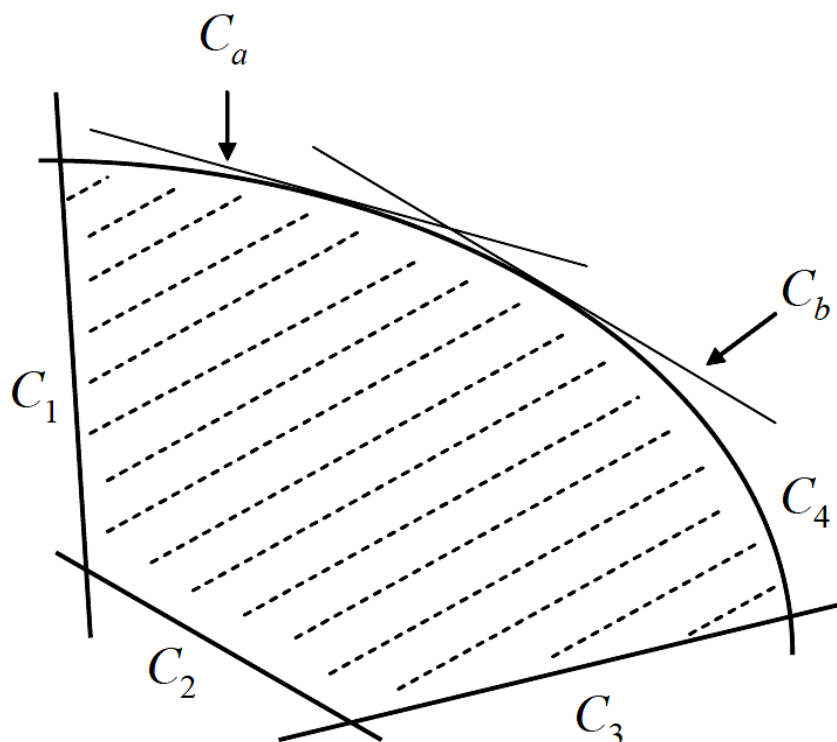
Όπως παρατηρείται από τη μορφή του προβλήματος (B.7), η μοναδική διαφορά ενός προβλήματος ημιορισμένου προγραμματισμού από ένα αντίστοιχο γραμμικού προγραμματισμού έγκειται στον περιορισμό LMI. Πιο αναλυτικά, στο γραμμικό προγραμματισμό, καθένας εκ των επιμέρους γραμμικών περιορισμών παράγει ένα υπερεπίπεδο (hyperplane) στον χώρο \mathbb{R}^k , δηλαδή έναν υποχώρο διάστασης $k - 1$ ο οποίος ορίζεται από επίπεδα ή ευθείες (flat face subspace), δηλαδή δεν εμφανίζει καμπυλότητα.

Π.χ. για την περίπτωση που $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$, τα υπερεπίπεδα είναι ευθείες. Αντιθέτως, ένας περιορισμός LMI, ως μη γραμμικός γενικά, παράγει έναν υποχώρο που χαρακτηρίζεται από καμπυλότητα [274]. Ένα σχετικό, διαφωτιστικό παράδειγμα δίνεται στο Σχήμα Β.3: απεικονίζεται το σύνολο των εφικτών λύσεων ενός προβλήματος ημιορισμένου προγραμματισμού, το οποίο περιλαμβάνει τρεις γραμμικούς περιορισμούς C_1 , C_2 και C_3 , καθώς και έναν μη γραμμικό περιορισμό C_4 . Με τα σύμβολα C_a και C_b , διακρίνονται

δύο μόνο από τους άπειρους γραμμικούς περιορισμούς, οι οποίοι ορίζονται από τον περιορισμό C_4 .

Συνεπώς, ένας περιορισμός LMI μπορεί να ερμηνευθεί ως μια κλάση άπειρων γραμμικών περιορισμών [274]. Εξάλλου, και βάσει του ορισμού μιας θετικά ημιορισμένης μήτρας, γίνεται αντιληπτό ότι μια

ανισότητα της μορφής $\mathbf{u}^T \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \geq 0$, για κάθε $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p - \{\mathbf{0}\}$ επιβάλλει ένα σύνολο άπειρων γραμμικών περιορισμών στη μεταβλητή \mathbf{x} [273].



Σχήμα Β.3: Σύνολο εφικτών λύσεων ενός προβλήματος ημιορισμένου προγραμματισμού: αντιπαράθεση γραμμικών περιορισμών με τον (μη γραμμικό) περιορισμό LMI.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό του ημιορισμένου προγραμματισμού έγκειται στο γεγονός ότι ένα ευρύ φάσμα κυρτών περιορισμών μπορούν να μοντελοποιηθούν υπό τη μορφή περιορισμού LMI. Επιγραμματικά, αναφέρονται κάποιες κατηγορίες προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού τα οποία μπορούν να διατυπωθούν στο πλαίσιο του ημιορισμένου προγραμματισμού.

- i. Όλοι οι γραμμικοί περιορισμοί ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού, έστω $\mathbf{A}_i \mathbf{x} \geq \mathbf{b}_i, i = 1, \dots, p$, μπορούν να διατυπωθούν ως ένας περιορισμός LMI (σε αυτή την ειδική περίπτωση, ο υποχώρος που ορίζεται είναι υπερεπίπεδο) εκφράζοντας τα διανύσματα \mathbf{x} και \mathbf{b} σε μορφή διαγώνιων μητρών.
- ii. Μη γραμμικά προβλήματα κυρτού προγραμματισμού (nonlinear convex optimization programs) μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού. Εισάγεται μια βοηθητική μεταβλητή, έστω $t \in \mathbb{R}$, η οποία χρησιμοποιείται ως αντικειμενική συνάρτηση και δομείται ένα μπλοκ μητρών το οποίο, αξιοποιώντας τις ιδιότητες του συμπληρώματος του Schur με δεδομένο τον περιορισμό LMI, περιλαμβάνει τη μη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμούς του αρχικού προβλήματος. Κυριότερο παράδειγμα είναι τα κυρτά προβλήματα τετραγωνικού προγραμματισμού με τετραγωνικούς περιορισμούς (quadratically constrained quadratic programs).
- iii. Οι κωνικοί περιορισμοί δεύτερης τάξης (second-order cone constraints), οι οποίοι συνιστούν μια γενική μορφή κυρτών περιορισμών, μπορούν να διατυπωθούν υπό τη μορφή περιορισμού LMI. Αυτή

η ιδιότητα είναι ισχυρότερη των προαναφερθεισών δεδομένου ότι ο κωνικός προγραμματισμός δεύτερης τάξης (second-order cone programming) περιλαμβάνει όλα τα προβλήματα κυρτού τετραγωνικού και γραμμικού προγραμματισμού.

- iv. Υπό τη μορφή περιορισμού LMI, μπορούν να διατυπωθούν προβλήματα βελτιστοποίησης που αφορούν νόρμες και αλγεβρικά χαρακτηριστικά μητρών. Η ελαχιστοποίηση (μεγιστοποίηση) της μέγιστης (ελάχιστης) ιδιοτιμής ή του ίχνους μιας μήτρας αποτελούν κλασικά, σχετικά παραδείγματα. Και σε αυτού του είδους τα προβλήματα εισάγεται μια βοηθητική μεταβλητή $t \in \mathbb{R}$, η οποία αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση και φράσσει άνω (κάτω) το υπό ελαχιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μέγεθος της μήτρας με βάση τις ιδιότητες του συμπληρώματος του Schur υπό τον περιορισμό LMI. Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτει το πρόβλημα βέλτιστου πειραματικού σχεδιασμού M το οποίο αναλύεται στην υποενότητα 4.2.2.3. Τέτοια προβλήματα εμφανίζονται κατά κόρον στη συνδυαστική βελτιστοποίηση [276], [277], όπου ανήκει και το γενικό πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης αισθητήρων [237], [261].

Με βάση τα παραπάνω, ο ημιορισμένος προγραμματισμός αναδεικνύεται ως ένα πολύτιμο, ενιαίο εργαλείο για τη μελέτη των ιδιοτήτων πληθώρας προβλημάτων κυρτού προγραμματισμού, καθώς και για την ανάπτυξη αλγόριθμων για την επίλυσή τους [273]. Προς αυτή την κατεύθυνση, το κυριότερο πλεονέκτημα του είναι ότι τα προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού μπορούν να επιλυθούν αποδοτικά, με τη χρήση μεθόδων εσωτερικού σημείου να προάγεται ως η πλέον κατάλληλη για αυτά. Το γεγονός, μάλιστα, ότι είναι εφικτή η χαλάρωση πολλών μη κυρτών προβλημάτων (nonconvex problems), π.χ. προερχομένων από τη συνδυαστική βελτιστοποίηση, σε προβλήματα ημιορισμένου προγραμματισμού, ενισχύει ακόμη περισσότερο τη χρησιμότητά του ανάμεσα στους επιμέρους κλάδους του μαθηματικού προγραμματισμού.

3. Αποδείξεις για τις Προτεινόμενες Μεθόδους Βέλτιστης Επιλογής Μετρητικών Μονάδων στα ΣΗΕ

3.1 Υπολογισμός της μήτρας FIM του στατικού μοντέλου WLS

Η μήτρα FIM του στατικού μοντέλου WLS υπολογίζεται με χρήση της σχέσης ορισμού της μήτρας FIM (4.1), της γενικής έκφρασης της συνάρτησης πιθανοφάνειας (2.5) και του μη γραμμικού συστήματος (2.8), το οποίο αποτελεί το μοντέλο μετρήσεων του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Παράλληλα, ισχύουν όλες οι θεωρήσεις των υποενότητων 2.2.2 και 2.2.3. Κατόπιν, εκτελούνται οι εξής υπολογισμοί:

$$\begin{aligned}
 \mathbb{F}(\mathbf{x}) &= \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\nabla_{\mathbf{x}} \ln L(\mathbf{z} | \mathbf{x}) \nabla_{\mathbf{x}}^T \ln L(\mathbf{z} | \mathbf{x}) \right] = \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\nabla_{\mathbf{x}} \left(\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - h_i(\mathbf{x})}{\sigma_i} \right)^2 \right) \nabla_{\mathbf{x}}^T \left(\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j - h_j(\mathbf{x})}{\sigma_j} \right)^2 \right) \right] \\
 &= \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\left(-\sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\mathbf{x}))}{\sigma_i^2} \nabla_{\mathbf{x}} h_i(\mathbf{x}) \right) \left(-\sum_{j=1}^m \frac{(z_j - h_j(\mathbf{x}))}{\sigma_j^2} \nabla_{\mathbf{x}}^T h_j(\mathbf{x}) \right) \right] \\
 &= \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\left(\sum_{i=1}^m (z_i - h_i(\mathbf{x})) \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) \right) \left(\sum_{j=1}^m (z_j - h_j(\mathbf{x})) \sigma_j^{-2} \mathbf{H}_j(\mathbf{x}) \right) \right] \\
 &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[(z_i - h_i(\mathbf{x})) \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) (z_j - h_j(\mathbf{x})) \sigma_j^{-2} \mathbf{H}_j(\mathbf{x}) \right] \\
 &= \sum_{i=1}^m \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[(z_i - h_i(\mathbf{x})) \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) (z_i - h_i(\mathbf{x})) \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i(\mathbf{x}) \right] \\
 &= \sum_{i=1}^m \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) \mathbb{E}_{\mathbf{x}} \left[\underbrace{(z_i - h_i(\mathbf{x})) (z_i - h_i(\mathbf{x}))}_{\sigma_i^2} \right] \sigma_i^{-2} \mathbf{H}_i(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \left[\mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}) \cdot \frac{1}{\sigma_i^2} \cdot \mathbf{H}_i(\mathbf{x}) \right]
 \end{aligned}$$

όπου $\mathbf{H}_i(\mathbf{x})$ είναι i -οστή γραμμή της Ιακωβιανής μήτρας.

Σημειώνεται ότι, κατά τους υπολογισμούς, αξιοποιήθηκαν οι συνθήκες κανονικότητας και η υπόθεση για την ανεξαρτησία των μετρήσεων, όμοια με τη ενότητα 2.2 του παρόντος παραρτήματος. Παρατηρείται ότι η μήτρα FIM ταυτίζεται με την έκφραση (2.27) της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}(\mathbf{x})$. Επίσης, η γενική μορφή του ij -οστού της μήτρας είναι η ακόλουθη:

$$\mathbb{F}_{ij} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{\sigma_k^2} \frac{\partial h_k(\mathbf{x})}{\partial x_i} \frac{\partial h_k(\mathbf{x})}{\partial x_j} \quad (\text{B.9})$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Hatziaargyriou, J. Amantegui, B. Andersen, M. Armstrong, P. Boss, B. Dalle, G. de Montravel, A. Negri, C. A. Nucci, and P. Southwell, “Cigre wg network of the future, electricity supply systems of the future,” *Electra*, vol. 256, pp. 42–49, Jun. 2011.
- [2] CEN/CENELEC/ETSI Joint Working Group (2011), Final Report on Standards for Smart Grids.
- [3] Energy Independence and Security Act of 2007: Title XIII – Smart Grid, Public Law 110–140, 110th Congress of the United States, Dec. 2007.
- [4] J. Slootweg, C. J. Cordova C. Montes Portela and J. Morren, “Smart grids – intelligence for sustainable electrical power systems,” in *Proc. of 33rd IEEE Int. Telecommun. Energy Conf. (INTELEC)* Amsterdam, Netherlands, pp. 1–8, 2011.
- [5] W. Wang, Y. Xu, M. Khanna, “A survey on the communication architectures in smart grid,” *Comp. Netw.*, vol. 55, no. 15, pp. 3604–3629, Oct. 2011.
- [6] F. F. Wu, K. Moslehi, and A. Bose, “Power System Control Centers: Past, Present, and Future,” *Proc. of IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1890–1908, Nov. 2005.
- [7] J. Ekanayake, K. Liyanage, J. Wu, A. Yokoyama, and N. Jenkins. *Smart Grid: Technology and Applications*, New York, NY: John Wiley and Sons, 2012.
- [8] H. Farhangi, “The path of the smart grid,” *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan./Feb. 2010.
- [9] EU Commission Task Force for Smart Grids (2010), Expert Group 1: Functionalities of smart grids and smart meters, Final Deliverable.
- [10] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, P. Crossley, *Microgrids and Active Distribution Networks*. London, UK: Inst. Eng. Technol. 2009.
- [11] E. Santacana, G. Rackliffe, L. Tang, and X.M. Feng, “Getting smart”, *IEEE Power and Energy Mag.*, vol. 8, pp. 41–48, Mar./Apr. 2010.
- [12] A. Abur and A. Gomez Exposito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. New York, NY: Marcel Dekker, 2004.
- [13] M. Mitchell, “Self-Awareness and Control in Decentralized Systems,” in *Proc. AAAI Spring Symp. Metacognition in Computation*, pp. 80–85, Stanford, CA, USA, 2005 [Online] Available: www.cs.pdx.edu/~mm/self-awareness.pdf.
- [14] F. C. Schweppé, J. Wildes, and D. B. Rom, “Power system static state estimation – Part I, II, III,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–135, Jan. 1970.
- [15] Β. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: Τόμος Ι Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Έκδοση Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1985.
- [16] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκδόσεις Συμμέτρα*, Αθήνα, 2010.
- [17] A. Monticelli, “Electric Power System State Estimation,” *Proc. of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 262–282, Feb. 2000.
- [18] J. D. Glover, M. S. Sarma, T. J. Overbye, *Power Systems Analysis and Design*. Boston, MA: Cengage Learning, 2012.
- [19] State Estimation Concepts and Terminology, Power Systems Operations Committee, State Estimation Algorithms Working Group (2016), IEEE PES Society.

- [20] A. Phadke J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. New York, NY: Springer-Verlag, 2008.
- [21] Y.-F. Huang, S. Werner, J. Huang, N. Kashyap, and V. Gupta, “State estimation in electric power grids: Meeting new challenges presented by the requirements of the future grid”, *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 29, no. 5, pp. 33–43, Sep. 2012.
- [22] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, “Smart grid – the new and improved power grid: A survey,” *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 14, no. 4 pp. 944–980, Dec. 2012.
- [23] A. Gomez-Exposito, A. Abur, A. V. Jaen, and C. Gomez-Quiles, “A multilevel state estimation paradigm for smart grids,” in *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 952–976, Jun. 2011.
- [24] M. S. Thomas and J. D. McDonald, *Power System SCADA and Smart Grids*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [25] F. C. Schweppe, J. Wildes, and D. Rom, “Power system static state estimation,” *Power Syst. Eng. Group, M.I.T. Rep.* 10, Nov. 1968.
- [26] F. C. Schweppe, E. J. Handschin, “Static state estimation in electric power systems,” *Proc. IEEE*, vol. 62, no. 7, pp. 972–982, Jul. 1974.
- [27] A. Monticelli and A. Garcia, “Fast decoupled state estimators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 5, no. 2, pp. 556–564, May 1990.
- [28] O. Alsac, N. Vempati, B. Stott, and A. Monticelli, “Generalized state estimation,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1069–1075, Aug. 1998.
- [29] A. Monticelli, *State estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [30] L. Holten, A. Gjelsvik, S. Aam, F. F. Wu, and W.-H. E. Liu, “Comparison of different methods for state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 4, Nov. 1988.
- [31] F. F. Wu, “Power system state estimation: A survey,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 80–87, Apr. 1990.
- [32] A. Monticelli and A. Garcia, “Modeling zero impedance branches in power system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 1561–1570, Nov 1991.
- [33] J. M. R. Muñoz and A. Gómez-Expósito, “A line-current measurement based state estimator,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 7, no. 2, pp. 513–519, May 1992.
- [34] A. Abur and A. Gómez-Expósito, “Detecting multiple solutions in state estimation in the presence of current magnitude measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 370–375, Feb. 1997.
- [35] K. A. Clements, P. W. Davis, and K. D. Frey, “Treatment of inequality constraints in power system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 567–574, May 1995.
- [36] A. Simoes-Costa, V. H. Quintana, “A robust numerical technique for power system state estimation,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 2, pp. 691–698, Feb. 1981.
- [37] G. N. Korres, “A robust method for equality constrained state estimation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 305–314, May 2002.
- [38] L. Mili, M. G. Cheniae, N. S. Vichare, and, P. J. Rousseeuw, “Robust state estimation based on projection statistics of power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 1118–1127, May 1996.
- [39] P. J. Huber, *Robust Statistics*. New York, NY: John Wiley and Sons, 1981.
- [40] R.C. Pires, A. Simoes Costa, and L. Mili, “Iteratively reweighted least-squares state estimation through givens rotations,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1499–1505, Nov. 1999.

- [41] R. Jabr, “Power system Huber m-estimation with equality and inequality constraints,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 74, no. 2, pp. 239–246, May 2005.
- [42] E. Kyriakides, S. Suryanarayanan, and G. T. Heydt, “State estimation in power engineering using the huber robust regression technique,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1183–1184, May 2005.
- [43] A. S. Debs and R. E. Larson, “A Dynamic Estimator for tracking the state of a Power System,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1670–1678, Sep. 1970.
- [44] R. D. Masiello F. C. Schweppe, "A tracking static state estimator", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-90, no. 3, pp. 1025–1033, May 1971.
- [45] A. M. Leite da Silva, M. B. Do Coutto Filho, and J. F. de Queiroz, “State forecasting in electric power systems,” *Inst. Elect. Eng. Proc. Gener. Trans. Distrib.*, vol. 130, no. 5, pp. 237–244, Sep. 1983.
- [46] A. M. L. Silva, M. B. Coutto, J. M. C. Cantera, “An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data-processing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no.4, pp. 1050–1058, Nov. 1987.
- [47] L. da Silva, A.M. Do Coutto Filho, and J. M. C. Cantera, “An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing,” *IEEE Trans Power Syst.*, vol. PWRS-2, no. 4, pp. 1050–1058, Nov. 1987.
- [48] G. Durgaprasad and S. S. Thakur, “Robust dynamic state estimation of power systems based on M-estimation and realistic modeling of system dynamics,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 1331–1336, Nov. 1998.
- [49] G. Valverde and V. Terzija, “Unscented Kalman filter for power system dynamic state estimation,” *IET Gener., Trans. Distrib.*, vol. 5, no. 1, pp. 29–37, Jan. 2011.
- [50] P. Rousseaux, T. Van Cutsem, and T. E. Dy Liacco, “Whither dynamic state estimation,” *Int. J. Elec. Power*, vol. 12, no.2, pp. 105–116 , Apr. 1990.
- [51] M. Brown Do Coutto Filho and J. C. S. de Souza, “Forecasting-aided state estimation-Part I: Panorama,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1667–1677, Nov. 2009.
- [52] A. Bose and K. A. Clements, “Real-time modeling of power networks,” *IEEE Proc., Special Issue Comput. in Power Syst. Operations*, vol. 75, no. 12, pp 1607–1622 , Dec. 1987.
- [53] N. Singh and H. Glavitsch H., “Detection and identification of topological errors in on-line power system analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 324–331, Feb. 1991.
- [54] K. A. Clements and A. S. Costa, “Topology error identification using normalized Lagrange multipliers,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 347–353, May 1998.
- [55] L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca, and D. French, “A robust estimation method for topology error identification,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 1469–1476, Nov. 1999.
- [56] H. J. Koglin and H. T. Neisius, “A topology processor based on state estimation,” in *Proc. 11th Power Syst. Comput. Conf.*, Avignon, France, 1993, pp. 633–638.
- [57] A. Monticelli, “Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 1143–1149, Aug. 1993.
- [58] G. N. Korres and P. J. Katsikas, “Identification of circuit breaker statuses in WLS state estimator,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 818–825, Aug. 2002.
- [59] F. Vosgerau, A. S. Costa, K. A. Clements, and E. M. Lourenço, “Power system state and topology coestimation,” in *Proc. IREP Symp. Bulk Power Syst. Dyn. Control*, Rio de Janeiro, Brazil, 2010, pp. 1–6.

- [60] T. Van Cutsem, J. L. Horward, and M. Ribbens-Pavella, “A two-level static state estimator for electric power systems,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3722–3732, Aug. 1981.
- [61] A. Gómez-Expósito, A. de la Villa Jaén, C. Gómez-Quiles, P. Rousseaux, and T. Van Cutsem, “A taxonomy of multi-area state estimation methods,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 4, pp. 1060–1069, 2011.
- [62] D. M. Falcao, F. F. Wu, and L. Murphy, “Parallel and distributed state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, pp. 724–730, May 1995.
- [63] R. Ebrahimian and R. Baldick, “State estimation distributed processing,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 4, pp. 1240–1246, Nov. 2000.
- [64] G. N. Korres, “A distributed multi-area state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 73–84, Feb. 2011.
- [65] L. Xie, D.-H. Choi, S. Kar, and H. V. Poor, “Fully distributed state estimation for wide-area monitoring systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 1154–1169, Sep. 2012.
- [66] V. Kekatos and G. B. Giannakis, “Distributed robust power system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1617–1626, May 2013.
- [67] J. S. Thorp, A.G. Phadke, and K. J. Karimi, “Real time voltage-phasor measurements for static state estimation,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3098–3106, Nov. 1985.
- [68] A. G. Phadke, J. S. Thorp, and K. J. Karimi, “State estimation with phasor measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 233–238, Feb. 1986.
- [69] A. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements in power systems,” *IEEE Comput. Appl. Power*, vol. 6, no. 2, pp. 10–15, Apr. 1993.
- [70] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*. New York, NY: Springer Science and Business Media, 2008.
- [71] R. Nuqui and A. Phadke, “Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements,” in *Proc. IEEE Power Tech 2007, Lausanne, Switzerland, 2007*, pp. 1665–1669.
- [72] J. Zhu and A. Abur, “Effect of phasor measurements on the choice of reference bus for state estimation,” in *Proc. IEEE PES General Meeting, Tampa, FL, 2004*, pp. 1–5.
- [73] M. Zhou, V. A. Centeno, and J. S. Thorp, A.G. Phadke, “An alternative for including phasor measurements in state estimators,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1930–1937, Nov. 2006.
- [74] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “A state estimator including conventional and synchronized phasor measurements,” *Comput. Electr. Eng.* vol. 38, no. 2, pp. 294–305, Mar. 2012.
- [75] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Valverde, and V. Terzija, “State Estimation Including Synchronized Measurements,” in *Proc. IEEE Power Tech, Bucharest, Romania, 2009*, pp 1–5.
- [76] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, “PMU Measurement Uncertainty Considerations in WLS State Estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 1062–1071, May 2009.
- [77] L. Zhao and A. Abur, “Multiarea state estimation using synchronized phasor measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 611–617, May 2005.
- [78] W. Jiang, V. Vittal, and G. T. Heydt, “A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no.2, pp. 563–571, May 2007.

- [79] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, “Transition to a two-level linear state estimator–Part I: Architecture, Part II: Algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 46–62, Feb. 2011.
- [80] G. T. Heydt, “The next generation of power distribution systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 225–235, Nov. 2010.
- [81] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [82] I. Roytelman and S. M. Shahidehpour, “State estimation for electric power distribution systems in quasi real time conditions,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 4, pp. 2009–2015, Oct. 1993.
- [83] M. E. Baran and A. W. Kelley, “State estimation for real time monitoring of distribution system,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 3, pp. 1601–1609, Aug. 1994.
- [84] M. E. Baran and A. W. Kelley, “A branch current based state estimation method for distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 483–491, Feb. 1995.
- [85] C. N. Lu, J. H. Teng, and W. H. E. Liu, “Distribution system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 229–240, Feb. 1995.
- [86] A. Primadianto and C.-N. Lu, “A Review on Distribution System State Estimation,” *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3875–3883, Sep. 2017.
- [87] K. Li, “State estimation for power distribution system and measurement impacts,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 911–916, May 1996.
- [88] Y. Deng, Y. He, and B. Zhang, “A branch estimation-based state estimation method for radial distribution systems,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 4, pp. 1057–1062, Oct. 2002.
- [89] H. Wang and N. N. Schulz, “A revised branch current based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 207–213, Feb. 2004.
- [90] M. E. Baran, J. Jaesung, and T. E. McDermott, “Including voltage measurements in branch current state estimation for distribution systems,” in *Proc. IEEE Power & Energy Soc. General Meeting*, Calgary, Canada, 2009, pp. 1–5.
- [91] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Efficient branch-current-based distribution system state estimation including synchronized measurements,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 9, pp. 2419–2429, Sep. 2013.
- [92] M. Pau, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Performance of three-phase WLS distribution system state estimation approaches,” in *Proc. IEEE Int. Workshop Appl. Meas. Power Syst.*, Aachen, Germany, 2015, pp. 138–143.
- [93] C. Muscas, M. Pau, P. Pegoraro, and S. Sulis, “Effects of measurements and pseudomeasurements correlation in distribution system state estimation,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 12, pp. 2813–2823, Dec. 2014.
- [94] A. K. Ghosh, D. L. Lubkeman, M. J. Downey, and R. H. Jones, “Distribution circuit state estimation using probabilistic approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, no. 1, pp. 45–51, Feb. 1997.
- [95] M. K. Celik and W. H. E. Liu, “A practical distribution state calculation algorithm,” in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, New York, NY, 1999, pp. 442–447.
- [96] D. L. Lubkeman, J. Zhang, A. K. Ghosh, and R. H. Jones, “Field results for a distribution circuit state estimator implementation,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 1, pp. 399–406, Jan. 2000.

- [97] R. Singh, B. C. Pal, and R. A. Jabr, “Choice of estimator for distribution system state estimation,” *IET Gener., Transm. Distrib.*, vol. 3, no. 7, pp. 666–678, Jul. 2009.
- [98] S. Naka, T. Genji, T. Yura, and Y. Fukuyama, “A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 60–68, Feb. 2003.
- [99] A. Souza, E. M. Lourenco, and A. S. Costa, “Real-time monitoring of distributed generation through state estimation and geometrically-based tests,” in *Proc. iREP Symp. Power Syst. Dynamics and Control*, 2010, pp. 1–8.
- [100] V. Miranda, J. Pereira, and J. T. Saraiva, “Load allocation in DMS with a fuzzy state estimator,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 529–534, May 2000.
- [101] A. T. Saric and R. M. Ciric, “Integrated fuzzy state estimation and load flow analysis in distribution networks,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 2, pp. 571–578, Apr. 2003.
- [102] Y. Hu, A. Kuh, T. Yang, and A. Kavcic, “A belief propagation based power distribution system state estimator,” *IEEE Comput. Intell. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 36–46, Aug. 2011.
- [103] D. Thukaram, J. Jerome, and C. Surapong, “A robust three-phase state estimation algorithm for distribution networks,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 55, pp. 191–200, Nov. 2000.
- [104] J. Wu, Y. He, and N. Jenkins, “A robust state estimator for medium voltage distribution networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1008–1016, May 2012.
- [105] W. Li, B. Mi, C. Huang, and X. Xiong, “Distribution network state estimation based on node voltage of variable weights,” in *Proc. 5th Int. Conf. Model., Identification Control*, Cairo, Egypt, 2013, pp. 163–167.
- [106] B. P. Hayes, J. K. Gruber, and M. Prodanovic, “A closed-loop state estimation tool for MV network monitoring and operation,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 2116–2125, Jul. 2014.
- [107] J. Zhang, G. Welch, and G. Bishop, “Lodim: A novel power system state estimation method with dynamic measurement selection,” in *Proc. IEEE Power & Energy Soc. General Meeting*, Detroit, MI, 2011, pp. 1–7.
- [108] P. H. Nguyen, G. K. Venayagamoorthy, W. L. Kling, and P. F. Ribeiro, “Dynamic state estimation for distribution networks with renewable energy integration,” *Int. J. of Smart Grid and Clean Energy*, vol. 2, no. 3, pp. 307–315, Oct. 2013.
- [109] F. Ahmad, M. A. K. Rashid, A. Rasool, E. E. Özsoy, A. Sabanovic, and M. Elitaş, “Performance Comparison of Static and Dynamic State Estimators for Electric Distribution Systems,” *Int. J. Emerging Electr. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, May 2017.
- [110] L. D. A. Garcia and S. Grenard, “Scalable distribution state estimation approach for distribution management systems,” in *Proc. IEEE PES Int. Conf. Exhib. Innovative Smart Grid Technol. Eur.*, Manchester, UK, 2011, pp. 1–6.
- [111] C. Gomez-Quiles, A. Gomez-Exposito, and A. V. Jaen, “State estimation for smart distribution substations,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 986–995, Jun. 2012.
- [112] C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro, S. Sulis, F. Ponci, and A. Monti, “Multiarea distribution system state estimation,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 5, pp. 1140–1148, May 2014.
- [113] S. Sarri, M. Paolone, R. Cherkaoui, A. Borghetti, F. Napolitano, and C. A. Nucci, “State estimation of active distribution networks: comparison between WLS and iterated Kalman-filter algorithm integrating PMUs,” in *Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Eur.*, Berlin, Germany, 2012, pp. 1–8.

- [114] D. A. Haughton and G. T. Heydt, “A linear state estimation formulation for smart distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1187–1195, May 2013.
- [115] B. P. Hayes and M. Prodanovic, “State forecasting and operational planning for distribution network energy management systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 1002–1011, Mar. 2016.
- [116] A. Meliopoulos, E. Polymeneas, Z. Tan, R. Huang, and D. Zhao, “Advanced distribution management system,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2109–2117, Dec. 2013.
- [117] J. M. C. Pereira, “A State Estimation Approach for Distribution Networks Considering Uncertainties and Switching,” Ph.D. Dissertation, Faculty of Eng., Univ. of Porto, Portugal, Jul. 2001.
- [118] M. P. Selvan and K. S. Swarup, “Dynamic topology processing in a radial distribution system,” *Inst. Electr. Eng. Proc.-Gener., Transm. Distrib.*, vol. 153, no. 2, pp. 155–163, 2006.
- [119] Y. Sharon, A. M. Annaswamy, A. L. Motto, and A. Chakraborty, “Topology Identification in Distribution Network with Limited Measurements,” in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technol.*, Washington, DC, 2012, pp. 1–6 .
- [120] R. Singh, E. Manitsas, B. C. Pal, and G. Strbac, “A recursive Bayesian approach for identification of network configuration changes in distribution system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1329–1336, Aug. 2010.
- [121] G. N. Korres, N. D. Hatziaargyriou, and P. J. Katsikas, “State estimation in multi-microgrids,” *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 21, no. 2, pp. 1178–1199, Mar. 2011.
- [122] E. Lourenco, E. Coelho, and B. Pal, “Topology error and bad data processing in generalized state estimation” *Power Systems IEEE Transactions Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3190–3200, Nov. 2015.
- [123] S. Choi, B. Kim, G. J. Cokkinides, and A. P. S. Meliopoulos, “Feasibility study: Autonomous state estimation in distribution systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2109–2117, Nov. 2011.
- [124] K. A. Clements and B. F. Wollenberg, “An algorithm for observability determination in power system state estimation,” *IEEE/PES Summer Meeting*, San Francisco, CA, 1975.
- [125] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis, “Power System Observability: a Practical Algorithm using Network Topology,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-99, no. 4, pp. 1534–1542, Jul./Aug. 1980.
- [126] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, “Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Observability / Measurement Placement Algorithm,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 7, pp. 2012–2020, Jul. 1983.
- [127] V. H. Quintana, A. Simoes-Costa, and A. Mandel, “Power System Observability Using a Direct Graph-Theoretic Approach,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 3, pp. 617–626, Mar. 1982.
- [128] T. Van Cutsem, and P.J.Gaily, “A Simple Algorithm for Power System Observability Analysis and Related Functions,” in *Proc. CIGRE-IFAC Symp.*, Florence, Italy, Sep. 1983, paper 101-05.
- [129] R. R. Nucera and M. L. Gilles, “Observability analysis: A new topological algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, pp. 466–475, May 1991.
- [130] A. Monticelli and F. F.Wu, “Network observability: Theory,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, pp. 1035–1041, May 1985.

- [131] A. Monticelli and F. F. Wu, “Network observability: Identification of observable islands and measurement placement,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, pp. 1042–1048, May 1985.
- [132] F. F. Wu, W.-H. E. Liu, and S.-M. Lun, “Observability analysis and bad data processing for state estimation with equality constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 541–548, May 1988.
- [133] G. C. Contaxis and G. N. Korres, “A reduced model for power system observability analysis and restoration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, pp. 1411–1417, Nov. 1988.
- [134] G. N. Korres, P. J. Katsikas, K. A. Clements, and P. W. Davis, “Numerical observability analysis based on network graph theory,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 3, pp. 1035–1045, Aug. 2003.
- [135] B. Gou and A. Abur, “A direct numerical method for observability analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 625–630, May 2000.
- [136] B. Gou, “Jacobian matrix-based observability analysis for state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 348–356, Feb. 2006.
- [137] G.N. Korres, “A Gram matrix-based method for observability restoration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2569–2571, Nov. 2011.
- [138] R. Avila-Rosales, M. J. Rice, J. Giri, L. Beard, and F. Galvan, “Recent experience with a hybrid SCADA/PMU on-line state estimator,” in *Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meeting*, Calgary, Canada, Jul. 2009, pp. 1–8.
- [139] G. N. Korres, “An integer-arithmetic algorithm for observability analysis of systems with SCADA and PMU measurements,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1388–1402, Jul. 2011.
- [140] J. Chen and A. Abur, “Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation,” *Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1608–1615, Nov. 2006.
- [141] M. Gol and A. Abur, “Observability and criticality analyses for power systems measured by phasor measurements,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3319–3326, Aug. 2013.
- [142] N. Kashyap, S. Werner, Y.-F. Huang, and T. Riihonen, “Power system state estimation under incomplete PMU observability—A reduced order approach,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 8, no. 6, pp. 1051–1062, Dec. 2014.
- [143] J. Jerome, “Network Observability And Bad Data Processing Algorithm for Distribution Networks,” in *Proc. Power Eng. Soc. Summer Meeting*, Vancouver, Canada, Jul. 2001, pp. 1–6.
- [144] R. Gelagaev, P. Vermeyen, J. Vandewalle, and J. Driesen, “Numerical observability analysis of distribution systems,” in *Proc. 14th Int. Conf. Harmonics Quality Power*, Bergamo, Italy, Sep. 2010, pp. 1–6.
- [145] B. Brinkmann and M. Negnevitsky, “A Probabilistic Approach to Observability of Distribution Networks,” in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 1169–1178, March 2017.
- [146] D. Montenegro and G. Ramos, “Real time observability analysis for distribution networks,” in *Proc. IEEE PowerTech*, Grenoble, France, 2013, pp. 1–5.
- [147] Σ. Κουρούβλης, Κ. Πετρόπουλος, και Β. Πιπερίγκου, *Θέματα παραμετρικής στατιστικής συμπερασματολογίας*. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/5687>
- [148] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1997.

- [149] K. Knight, *Mathematical Statistics*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 1999.
- [150] W. Tinney and R. Walker, “Direct solutions of sparse network equations be optimally ordered triangular factorization,” *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 11, pp. 1801–1809, Nov. 1967.
- [151] K.A. Clements, “Observability methods and optimal meter placement,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 12, no. 2, pp. 88–93, Apr. 1990.
- [152] Power Systems Operations Committee/State Estimation Algorithms Working Group/Task Force on State Estimation Concepts and Terminology, “State Estimation Concepts and Terminology,” *IEEE Power Energy Soc.*, Piscataway, NJ, Rep. PES TR-20, May 2016.
- [153] Ν. Μ. Μανουσάκης, «Τεχνικές Εκτίμησης και Επιλογής Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιοθετών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Διδακτορική διατριβή, Σχολή ΗΜ&ΜΥ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [154] A. Abur, H. Kim, and M. Celik, “Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.10, pp. 2029–2035, Nov. 1995.
- [155] E. M. Lourenço, A. J. A. Simões Costa, and K. A. Clements, “Bayesian based hypothesis testing for topological error identification in generalized state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1206–1215, May 2004.
- [156] E. Caro, A. J. Conejo, A. Abur, “Breaker status identification,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no.2, pp. 694–702, May 2010.
- [157] Π. Ι. Κατσίκας, «Ανίχνευση τοπολογίας και παραμέτρων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια του γενικευμένου εκτιμητή κατάστασης», Διδακτορική διατριβή, Σχολή ΗΜ&ΜΥ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2003.
- [158] C.-C. Liu, S. McArthur, and S.-J. Lee, *Smart Grid Handbook*, 3 Volume Set. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2016.
- [159] A. Ghosh, D. Lubkeman, M. Downey and R. Jones, “Load modeling for distribution circuit state estimation,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 2, Apr. 1997.
- [160] A. Gómez-Expósito, C. Gómez-Quiles and I. Džafić, “State Estimation in Two Time Scales for Smart Distribution Systems,” in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 421–430, Jan. 2015.
- [161] V. Thornley, N. Jenkins, and S. White, “State estimation applied to active distribution networks with minimal measurements,” in *Proc. 15th Power Syst. Comp. Conf. (PSCC)*, Liege, Belgium, 2005, pp. 1–7.
- [162] C. Carmona-Delgado, E. Romero-Ramos, and J. Riquelme-Santos, “Fast and reliable distribution load and state estimator,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 101, pp. 110–124, Aug. 2013.
- [163] G. Pieri, M. Asprou and E. Kyriakides, “Load pseudomeasurements in distribution system state estimation,” in *Proc. IEEE Power Tech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1–6.
- [164] A. Al-Wakeel, J. Wu, and N. Jenkins, “State estimation of medium voltage distribution networks using smart meter measurements,” *Appl. Energy*, vol. 184, pp. 207–218, Dec. 2016.
- [165] A. Angioni, T. Schlösser, F. Ponci and A. Monti, “Impact of pseudo-measurements from new power profiles on state estimation in low-voltage grids,” in *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 1, pp. 70–77, Jan. 2016.
- [166] C. Muscas, M. Pau, P. A. Pegoraro and S. Sulis, “Effects of measurements and pseudomeasurements correlation in distribution system state estimation,” in *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no. 12, pp. 2813–2823, Dec. 2014.

- [167] Jie Wan and K. Miu, "Load estimation in radial electric power distribution networks using limited measurements," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. Emerging Technol. for the 21st Century, Geneva, Italy, 2000, pp. 517–520.
- [168] J. Wan and M. K. Nan, "A zonal load estimation method for unbalanced, radial distribution networks," in IEEE Power Eng. Rev., vol. 22, no. 6, pp. 58-58, Jun. 2002.
- [169] H. Wang, and N. N. Schulz, "A load modeling algorithm for distribution system state estimation," in Proc. of the 2001 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo., Atlanta, GE, USA, 2001, pp. 102–106.
- [170] A. Vargas and M. E. Samper, "Real-time monitoring and economic dispatch of smart distribution grids: high performance algorithms for DMS applications," in IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 866-877, Jun. 2012.
- [171] I. Džafić, M. Gilles, R. A. Jabr, B. C. Pal and S. Henselmeyer, "Real time estimation of loads in radial and unsymmetrical three-phase distribution networks," in IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 4, pp. 4839-4848, Nov. 2013.
- [172] J. A. D. Massignan, C. A. Fantin, J. B. A. London and M. H. M. Camillo, "Real-time load estimation for distribution feeders," in Proc. IEEE Power Tech, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1–6.
- [173] E. Manitsas, R. Singh, B. Pal, and G. Strbac, "Modeling of pseudo-measurements for distribution system state estimation," in Proc. IET-CIRED Seminar: SmartGrids Distrib., Frankfurt, Germany, 2008, pp. 1–4.
- [174] W. Kong, D. Wang, C. Foote, G. Ault, A. Michiorri, and R. Currie, "Advanced load modelling techniques for state estimation on distribution networks with multiple distributed generators," in Proc. 17th Power Syst. Comput. Conf. (PSCC), Stockholm, Sweden, 2011, pp. 1–6.
- [175] E. Manitsas, R. Singh, B. C. Pal and G. Strbac, "Distribution system state estimation using an artificial neural network approach for pseudo measurement modeling," in IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 4, pp. 1888–1896, Nov. 2012.
- [176] R. Arritt and R. Dugan, "Comparing load estimation methods for distribution system analysis," in Proc. 22nd Int. Conf. Exhibit. Electricity Distrib. (CIRED), Stockholm, Sweden, 2013, pp. 1–4.
- [177] C. Carmona, E. Romero-Ramos, J. Riquelme and A. Gómez-Expósito, "Distribution transformer load allocation from substation measurements and load patterns," in Proc. 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. Europe (ISGT Europe), Gothenburg, Sweden, 2010, pp. 1–8.
- [178] G. Valverde, A. T. Sarić and V. Terzija, "Iterative load re-allocation for distribution system state estimation," in Proc. IEEE Power Tech, Trondheim, Norway, 2011, pp. 1–8.
- [179] H. K. Alfares and M. Nazeeruddin, "Electric load forecasting: Literature survey and classification of methods," Int. J. Syst. Science, vol. 33, no 1, pp. 23–34, 2002.
- [180] J. Y. Fan and J. D. McDonald, "A real-time implementation of short-term load forecasting for distribution power systems," in IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 2, pp. 988-994, May 1994.
- [181] N. Ding, Y. Bésanger, F. Wurtz, G. Antoine and P. Deschamps, "Time series method for short-term load forecasting using smart metering in distribution systems," in Proc. IEEE PowerTech, Trondheim, Norway, 2011, pp. 1–6.

- [182] M. Z. Degefa, R. J. Millar, M. Koivisto, M. Humayun and M. Lehtonen, “Load flow analysis framework for active distribution networks based on smart meter reading system,” *Eng.*, vol. 5, pp. 1–8, Oct. 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2013.510A001>
- [183] R. Dobbe, D. Arnold, S. Liu, D. Callaway and C. Tomlin, “Real-time distribution grid state estimation with limited sensors and load forecasting,” in *Proc. ACM/IEEE 7th Int. Conf. Cyber-Physical Syst. (ICCPS)*, Vienna, Austria, 2016, pp. 1–10.
- [184] N. Löf, M. Pikkarainen, S. Repo, and P. Järventausta, “Utilizing Smart Meters in LV Network Management,” in *Proc. 21st Int. Conf. Electricity Distrib. (CIRED)* Frankfurt, Germany, 2011, pp. 1–4.
- [185] Έκθεση της Επιτροπής. «Συγκριτική αξιολόγηση της εγκατάστασης έξυπνων μετρητών στην EE-27 με επικέντρωση στην ηλεκτρική ενέργεια», Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Διαθέσιμο διαδικτυακά: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/markets-and-consumers/smart-grids-and-meters>, Ανασύρθηκε στις: 16 Μαΐου 2018.
- [186] N. Uribe-Pérez, L. Hernández, D. de la Vega, and I. Angulo, “State of the Art and Trends Review of Smart Metering in Electricity Grids,” *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 3, pp. 68–92, Feb. 2016.
- [187] I. Dzafic, S. Henselmeyer and H. T. Neisius, “High performance State Estimation for smart grid distribution network operation,” in *Proc. 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. (ISGT)*, Hilton Anaheim, CA, 2011, pp. 1–6.
- [188] K. Samarakoon, J. Wu, J. Ekanayake and N. Jenkins, “Use of delayed smart meter measurement for distribution state estimation,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1–6.
- [189] A. Abdel-Majeed and M. Braun, “Low voltage system state estimation using smart meters,” in *Proc. 47th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, London, UK, 2012, pp. 1–6.
- [190] A. Alimardani, F. Therrien, D. Atanackovic, J. Jatskevich and E. Vaahedi, “Distribution system state estimation based on nonsynchronized smart meters,” in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 6, pp. 2919–2928, Nov. 2015.
- [191] Q. Chen, D. Kaleshi, Z. Fan and S. Armour, “Impact of smart metering data aggregation on distribution system state estimation,” in *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 12, no. 4, pp. 1426–1437, Aug. 2016.
- [192] D. Waeresch, R. Brandalik, W. H. Wellssow, J. Jordan, R. Bischler and N. Schneider, “Linear state estimation in low voltage grids based on smart meter data,” in *Proc. IEEE Power Tech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1–6.
- [193] H. Wang, and N. N. Schulz, 2006, “Using AMR data for load estimation for distribution system analysis,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 5, pp. 336–342, Mar. 2006.
- [194] W. H. Kersting and W. H. Phillips, “Load allocation based upon automatic meter readings,” in *Proc. IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo.*, Chicago, IL, USA, 2008, pp. 1–7.
- [195] F. Bignucolo, R. Caldon, and M. Valente, “Probabilistic voltage estimation for active control of distribution networks,” in *Proc. 19th Int. Conf. Exhibit. Electricity Distrib. (CIRED)*, Vienna, Austria, 2007, pp. 1–4.
- [196] Matlab. Version 8.3 (Release 2014a). Natick, MA: MathWorks, 2014.
- [197] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, “MATPOWER: Steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, Feb. 2011.

- [198] Power systems test case archive, Data formats, PTI power flow data format. [Online]. Available: <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/> Accessed on: December 3rd, 2012.
- [199] “Deliverable 3.3: Advanced local distribution grid monitoring/state estimation,” The SuSAINABLE project, INESC Porto, Portugal, Jun. 2014.
- [200] M. G. Damavandi, V. Krishnamurthy, and J. R. Martí “Robust meter placement for state estimation in active distribution systems,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp.1972–1982, Feb. 2015.
- [201] “Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation,” Eastern Interconnection Phasor Project, KEMA, Arnhem, Netherlands, Jan. 2006.
- [202] J. A. Peças Lopes and N. Gil, “TD3.3 Description of a Test Network to be used for Simulation Platform Development,” More MicroGrids Technical Internal Report, EU FP6, Project: More Microgrids, INESC Porto, Portugal, Jul. 2006.
- [203] Derived Load Profiles 2013-Guidance Section-Retail Market Design Service. [Online]. Available: http://www.rmdservice.com/guidance/standard_load_profiles.htm Accessed on: July 3rd, 2014.
- [204] MET éireann, The Irish Meteorological Service, Daily data. [Online]. Available: <https://www.met.ie/climate/available-data/daily-data> Accessed on: July, 3rd, 2014.
- [205] R. Lukomski, K. Wilkosz, 'Methods of measurement placement design for power system state estimation', *AT&P J. Plus 2: Power Syst. Model. Control*, 2008. [Online]. Available: https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2008_2/plus75_79.pdf
- [206] H. J. Koglin, “Optimal measuring system for state estimation,” in *Proc. PSCC*, Cambridge, U.K., 1975, Paper no. 2. 3/12.
- [207] S. Aam, L. Holten, and O. Gjerde, “Design of the measurement system for state estimation in the Norwegian high voltage transmission network,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3769–3777, Dec. 1983.
- [208] M. K. Celik and W.-H. Edwin Liu, “An incremental measurement placement algorithm for state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1698–1703, Aug. 1995.
- [209] Mesut E. Baran, J. Zhu, H. Zhu, and Kenneth E. Garren, “A Meter Placement Method for State Estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1704–1710, Aug. 1995.
- [210] F. H. Magnago and A. Abur, “A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 945–949, Aug. 2000.
- [211] B. Gou and A. Abur, “An improved measurement placement algorithm for network observability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 819–824, Nov. 2001.
- [212] E. Castillo, A. J. Conejo, R. E. Pruneda, and C. Solares, “Observability analysis in state estimation: a unified numerical approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 877–886, May 2006.
- [213] M. Yehia, R. Jabr, I. El-Bitar, and R. Waked, “A PC based state estimator interfaced with a remote terminal unit placement algorithm,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 2, pp. 210–215, May 2001.
- [214] J. B. A. London, G. L. R. Brito, and N. G. Bretas, “Method for meter and RTU placement for state estimation purposes,” in *Proc. IEEE Power Tech.*, Bologna, Italy, 2003, pp. 1–6.

- [215] J. Coser, A. J. A. Simões Costa, and J. G. Rolim, “Metering scheme optimization with emphasis on ensuring bad-data processing capability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1903–1911, Nov. 2006.
- [216] J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, M. Th. Schilling, and C. Capdeville, “Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 1700–1708, Nov. 2005.
- [217] H. Rocha, J. Souza, and M. Filho, “Planning high quality metering systems for state estimation through a constructive heuristic,” *Elect. Power Energy Syst.*, vol. 52, pp. 34–41, Apr. 2013.
- [218] H. R. O. Rocha, J. A. L. Silva, J.C.S. Souza, and M. B. Do Coutto Filho, “Fast and flexible design of optimal metering systems for power systems monitoring,” *J. Control Autom. Elect. Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 209–218, Apr. 2018.
- [219] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, “Taxonomy of PMU placement methodologies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1070–1077, May 2012.
- [220] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, and R. Adapa, “Power system observability with minimal phasor measurement placement,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 701–715, May 1993.
- [221] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, “Phasor measurement placement techniques for complete and incomplete observability,” *IEEE Trans Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.
- [222] B. Xu and A. Abur, “Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs,” in *Proc. IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, New York, NY, 2004, pp. 943–946.
- [223] B. Gou, “Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, Aug. 2008.
- [224] N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis, and G. N. Korres, “Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 4, pp. 347–356, Apr. 2013.
- [225] D. Dua, S. Dambhare, R. K. Gajbhiye, and S. A. Soman, “Optimal multistage scheduling of PMU placement: An ILP approach,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 1812–1820, Oct. 2008.
- [226] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, “Contingency-constrained PMU placement in power networks,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 516–523, Feb. 2010.
- [227] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, and D. G. Eliades, “Placement of synchronized measurements for power system observability,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 1, pp. 12–19, Jan. 2009.
- [228] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and B. Mozafari, “Optimal placement of PMUs to maintain network observability using a modified BPSO algorithm,” *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 28–34, Jan. 2011.
- [229] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, “Optimal placement of phasor measurement units for power system observability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1433–1440, Aug. 2008.
- [230] J. Chen and A. Abur, “Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1608–1615, Nov. 2006.
- [231] M. Korkali and A. Abur, “Placement of PMUs with channel limits,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Calgary, AB, 2009, pp. 1–4.

- [232] I. Kamwa and R. Grondin, “PMU configuration for system dynamic performance measurement in large, multiarea power systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 385–394, May 2002.
- [233] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, “An optimal PMU placement method against measurement loss and branch outage,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 22, no. 1, pp. 101–107, Jan. 2007.
- [234] C. Mishra, K. D. Jones, A. Pal, and V. A. Centeno, “A binary PSO-based optimal substation coverage algorithm for PMU installations in practical systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 2, pp. 555–562, Feb. 2016.
- [235] W. Jiang and V. Vittal, “Optimal placement of phasor measurements for the enhancement of state estimation,” in *Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo.*, Atlanta, USA, 2007, pp. 1550–1555.
- [236] Q. Li, R. Negi, and M. D. Ilić, “Phasor measurement units placement for power system state estimation: A greedy approach,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Detroit, USA, 2011, pp. 1–8.
- [237] V. Kekatos, G. B. Giannakis, and B. Wollenberg, “Optimal placement of phasor measurement units via convex relaxation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1521–1530, Aug. 2012.
- [238] M. Asprou and E. Kyriakides, “Enhancement of hybrid state estimation using pseudo flow measurements,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Detroit, MI, 2011, pp. 1–7.
- [239] E. Caro, R. Singh, B. C. Pal, A. J. Conejo, and R. A. Jabr, “Participation factor approach for phasor measurement unit placement in power system state estimation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 9, pp. 922–929, Aug. 2012.
- [240] R. Singh, B. C. Pal, and R. B. Vinter, “Measurement placement in distribution system state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 668–675, May 2009.
- [241] M. E. Baran, J. X. Zhu, and A. W. Kelly, “Meter placement for real-time monitoring of distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, no. 1, pp. 332–337, Feb. 1996.
- [242] A. Shafiu, N. Jenkins, and G. Strbac, “Measurement location for state estimation of distribution networks with generation,” *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 2, pp. 240–246, Mar. 2005.
- [243] I. Cobelo, A. Shafiu, N. Jenkins, and G. Strbac, “State estimation of networks with distributed generation,” *Euro. Trans. Elect. Power*, vol. 17, pp. 21–36, Jul. 2007.
- [244] R. Singh, B. C. Pal, R. A. Jabr, and R. B. Vinter, “Meter placement for distribution system state estimation: An ordinal optimization approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2328–2335, Nov. 2011.
- [245] C. Muscas, F. Pilo, G. Pisano and S. Sulis, “Optimal allocation of multichannel measurement devices for distribution state estimation,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no.6, pp. 1929–1937, Jun. 2009.
- [246] J. Liu, J. Tang, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, and P. A. Pegoraro, “Trade-offs in PMU deployment for state estimation in active distribution grids,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 915–924, Jun. 2012.
- [247] P. A. Pegoraro and S. Sulis, “Robustness-oriented meter placement for distribution system state estimation in presence of network parameter uncertainty,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 5, pp. 954–962, May 2013.

- [248] J. Liu, F. Ponci, A. Monti, C. Muscas, P. A. Pegoraro, and S. Sulis, “Optimal meter placement for robust measurement systems in active distribution grids,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 63, no.5, pp. 1096–1105, May 2014.
- [249] Y. Xiang, P. F. Ribeiro, and J. F. G. Cobben, “Optimization of state-estimator-based operation framework including measurement placement for medium voltage distribution grid,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2929–2937, Nov. 2014.
- [250] F. Fusco and J. C. Willumsen, “Sensor placement for optimal estimation in power distribution grids”, in *Proc. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technol. Conf. (ISGT)*, Washington, DC, 2015, pp. 1–5.
- [251] X. Chen, J. Lin, C. Wan, and Y. Song, “Optimal meter placement for distribution network state estimation: A circuit representation based MILP approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 4357–4370, Nov. 2016.
- [252] N. Nusrat, M. Irving and G. Taylor, “Novel meter placement algorithm for enhanced accuracy of distribution system state estimation,” in *Proc. 2012 IEEE PES General Meeting*, San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1-8.
- [253] P. Janssen, T. Sezi, and J.-C. Maun, “Meter placement impact on distribution system state estimation,” in *Proc. 22nd Int. Conf. Exhibit. Electricity Distrib. (CIRED)*, Stockholm, Sweden, 2013, pp. 1–4.
- [254] R. Milbradt, L. Canha, P. Zorrilla, A. Abaide, P. Pereira, and S. Schmaedecke, “A multicriteria approach for meter placement in monitoring of smart distribution systems”, in *Proc. 48th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, Dublin, Ireland, 2013, pp. 1–6.
- [255] D. J. Chmielewski, T. Palmer, and V. Manousiouthakis, “On the theory of optimal sensor placement,” *AIChE J.*, vol. 48, no. 5, pp. 1001–1012, 2002.
- [256] D. Ucinski, *Optimal Measurement Methods for Distributed Parameter System Identification*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.
- [257] M. Patan, *Optimal Sensor Networks Scheduling in Identification of Distributed Parameter Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [258] Π. Γεωργιλάκης, *Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας*. [ηλεκτροβιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015. Διαθέσιμο στο: <https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2013/1/Georgilakis-Full-KOY.pdf>
- [259] A. N. Bishop, B. Fidan, B. D.O. Anderson, K. Doğançay, and P. N. Pathirana, “Optimality analysis of sensor-target localization geometries,” *Automatica*, vol. 46, no. 3, pp. 479–492, Mar. 2010.
- [260] F. Ghassemi and V. Krishnamurthy, “Separable approximation for solving the sensor subset selection problem,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 557–568, Jan. 2011.
- [261] S. Joshi and S. Boyd, “Sensor selection via convex optimization,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 57, no. 2, pp. 451–462, Feb. 2009.
- [262] M. F. Huber, “On multi-step sensor scheduling via convex optimization,” in *Proc. 2nd Int. Workshop Cognitive Inform. Process.*, Elba, Italy, 2010, pp. 376–381.
- [263] F. Altenbach, S. Corroy, G. Bacherer, and R. Mathar, “Strategies for distributed sensor selection using convex optimization”, in *Proc. 2012 Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 2367–2372.

- [264] J. A. Taylor, N. Luangsomboon, and D. Fooladivanda, “Allocating sensors and actuators via optimal estimation and control,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 25, no. 3, pp. 1060–1067, June 2016.
- [265] F. Zhang, *Matrix Theory: Basic Results and Techniques*. New York, NY : Springer-Verlag, 1999.
- [266] S. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1993.
- [267] Χ. Δαμιανού και Μ. Κούτρως, *Εισαγωγή στη Στατιστική Μέρος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2003.
- [268] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation and Modulation Theory, Part I*. New York, NY: John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [269] B. Flury, *A First Course in Multivariate Statistics*. New York, NY: Springer-Verlag, 1997.
- [270] F. Pukelsheim, *Optimal Design of Experiments*. New York, NY: Wiley, 1993.
- [271] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. New York, NY: Cambridge University Press, 2004.
- [272] A. Beck, *Introduction to nonlinear optimization: Theory, algorithms, and applications with MATLAB (vol. 19)*. Philadelphia, PA: SIAM, 2014.
- [273] L. Vandenberghe and S. Boyd, “Semidefinite programming,” *SIAM Review*, vol. 38, no. 1, pp. 49–95, March 1996.
- [274] M. Epelman, (2007). *Continuous Optimization Methods, Section 1*. [Online]. Available: <http://www.cse.iitd.ernet.in/~naveen/courses/CSL866/511notes.pdf> Accessed on: September 3rd, 2014.
- [275] Ιωάννης Μαρινάκης και Αθανάσιος Μυγδαλάς, *Συνδυαστική βελτιστοποίηση*. Αθήνα: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, 2016.
- [276] M. Grötschel, L. Lovász, and A. Schrijver, *Geometric Algorithms and Combinatorial Optimization*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1993.
- [277] A. Bockmayr and K. Reinert, (2011). *Combinatorial Optimization and Integer Linear Programming*. [Online]. Available: <http://www.mi.fu-berlin.de/wiki/pub/ABI/IntegerLinearOptimizationWS11/combopt.pdf> Accessed on: September 6th, 2014.
- [278] K. Fujisawa, M. Fukuda, K. Kobayashi, M. Kojima, K. Nakata, M. Nakata, and M. Yamashita, “SDPA (SemiDefinite Programming Algorithm) and SDPA-GMP User’s Manual-Version 7.1.1.,” Jun. 2008. [Online]. Available: <http://sdpa.indsys.chuou.ac.jp/sdpa/index.html>
- [279] J. Lofberg, “YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB,” in *Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. Robotics Automat. (IEEE Cat. No.04CH37508)*, New Orleans, LA, USA, 2004, pp. 284-289. [Online]. Available: <http://users.isy.liu.se/johanl/yalmip/>
- [280] YALMIP Tutorials. [Online]. Available: <https://yalmip.github.io> Accessed on: September, 16th, 2012.
- [281] S. Karisch, “CUTSDP A toolbox for a cutting-plane approach based on semidefinite programming,” *User's guide/version 1.0*, Technical Report IMM-REP-1998-10, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Jun. 1998.
- [282] R. H. Tutuncu, K. C. Toh, and M. Todd, “Solving semidefinite-quadratic linear programs using SDPT3,” *Math. Programming*, vol. 95, no.2, pp. 189–217, Feb. 2003.

- [283] K. Krishnan and J. Mitchell, “Novel approaches to hard discrete optimization problems: Semi-infinite linear programming approaches to semidefinite programming problems,” *Fields Inst. Commun. Series*, vol. 37, pp. 123–142, Aug. 2001.
- [284] T. Berthold, G. Gamrath, A. M. Gleixner, S. Heinz, T. Koch, and Y. Shinano, “Solving mixed integer linear and nonlinear problems using the SCIP optimization suite,” *ZIB-Report 12-27*, 2012, pp. 1–23. [Online]. Available: <http://opus4.kobv.de/opus4-zib/frontdoor/index/index/docId/1565>
- [285] A. Gómez-Expósito, E. Romero-Ramos, and I. Džafić, “Hybrid real-complex current injection-based load flow formulation,” *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 237–246, Feb. 2015.
- [286] MATPOWER. Version 4.1. [Online]. Available: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>. Accessed on: December 3rd, 2012.
- [287] M. Y. Ccahuana, F. Schmidt and M. C. de Almeida, “Analysis of bad data detection in power system State Estimators considering PMUs,” in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Denver, CO, 2015, pp. 1–5.
- [288] B. Xu and A. Abur, “Optimal placement of phasor measurements unit for state estimation: Final project report,” *Power Syst. Eng. Res. Center (PSERC)*, Publication 05–20, New York, NY, Oct. 2005.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ

Εργασίες σε διεθνή περιοδικά

1. Themistoklis Xygkis, George Korres, “Optimized Measurement Allocation for Power Distribution Systems Using Mixed Integer SDP,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 11, pp. 2967–2976, Nov. 2017.
2. Themistoklis Xygkis, George Korres, and Nikolaos Manousakis, “Fisher Information based Meter Placement in Distribution Grids via the D-optimal Experimental Design,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1452–1461, Mar. 2018.
3. George Korres, Nikolaos Manousakis, Themistoklis Xygkis, and J. Lofberg, “Optimal phasor measurement unit placement for numerical observability in the presence of conventional measurements using semi-definite programming,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol 9, no. 15, pp. 2427–2436, Nov. 2015.

Εργασίες σε διεθνή συνέδρια (με κρίση)

4. N. M. Manousakis, T. C. Xygkis and G. N. Korres, “A Mixed Integer SDP Method for Optimal Meter Placement in Power Transmission Systems,” accepted to be published in *Proc. IEEE PowerTech*, Milano, Italy, 2019, pp. 1–6.
5. N. M. Manousakis, T. C. Xygkis and G. N. Korres, “Synchrophasor applications using conic optimization,” in *Proc. 2018 IEEE Int. Energy Conf. (ENERGYCON)*, Limassol, Cyprus, 2018, pp. 1–6.
6. Themistoklis Xygkis, George Korres “Optimal Allocation of Smart Metering Systems for Enhanced Distribution System State Estimation,” in *Proc. 19th Power Syst. Comp. Conf. (PSCC)*, Genoa, Italy, 2016, pp. 1–7.
7. Themistoklis Xygkis, Nikolaos Manousakis, George Korres, and Nikos Hatziargyriou, “Distribution Grid State Estimation using Load Pseudomeasurements and Topology Identification Techniques,” in *Proc. 23rd Int. Conf. Electricity Distrib. (CIRED)*, Lyon, France, 2015, pp. 1–4.
8. George Korres, Themistoklis Xygkis, and Nikolaos Manousakis, “Optimal Location of Measurement Devices in Distribution Grids via Boolean Convex Optimization,” in *Proc. 23rd Int. Conf. Electricity Distrib. (CIRED)*, Lyon, France, 2015, pp. 1–4.
9. Themistoklis Xygkis, George Karlis, Isidoros Siderakis, and George Korres, “Use of near real-time and delayed smart meter data for distribution system load and state estimation,” in *Proc. 9th Mediterranean Conf. Power Gener. Transm. Distrib. Energy Convers. (MedPower)*, Athens, Greece, 2014, pp. 1–6.

