

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

Τεχνικές Εκτίμησης και Επιλογής Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Μ. Μανουσάκης

Αθήνα, Απρίλιος 2013



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

Τεχνικές Εκτίμησης και Επιλογής Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Μ. Μανουσάκης

Αθήνα, Απρίλιος 2013



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

Τεχνικές Εκτίμησης και Επιλογής Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Νικόλαος Μ. Μανουσάκης

Συμβουλευτική Επιτροπή :

Γεώργιος Κορρές Κωνσταντίνος Βουρνάς Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Απριλίου του 2013.

Γ. Κορρές Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. Κ. Βουρνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π. Ν. Χατζηαργυρίου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

..... Ν. Μαράτος Καθηγητής Ε.Μ.Π. Π. Γεωργιλάκης Λέκτορας Ε.Μ.Π. Ε. Διαλυνάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

..... Η. Κυριακίδης Επ. Καθηγητής Παν. Κύπρου

Αθήνα, Απρίλιος 2013

•••••

Νικόλαος Μ. Μανουσάκης

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

Copyright © Νικόλαος Μ. Μανουσάκης, 2013. 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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή άρχισε να εκπονείται τον Νοέμβριο του 2005 και ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 2013, στον Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή κ. Γεωργίου Ν. Κορρέ.

Προς τον Αν. Καθηγητή κ. Γ. Κορρέ που επέβλεψε από πολύ κοντά την εξέλιξη της εργασίας και συνέβαλε αποφασιστικά στην ολοκλήρωση της με την συνεχή καθοδήγηση, ενθάρρυνση και συμπαράστασή του, εκφράζω τις πιο θερμές ευχαριστίες.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Κ. Βουρνά και κ. Ν. Χατζηαργυρίου, όπως και τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Ν. Μαράτο, Λέκτορα κ. Π. Γεωργιλάκη, Καθηγητή κ. Ε. Διαλυνά και Επ. Καθηγητή κ. Η. Κυριακίδη, για το ενδιαφέρον τους και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Θα ήθελα να εκφράσω ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον Λέκτορα κ. Π. Γεωργιλάκη για τη συνεχή βοήθεια και υποστήριξή του, όπως και για τις πολύτιμες επιστημονικές του υποδείξεις σε επιμέρους θέματα της διατριβής αυτής.

Ευχαριστίες οφείλω και σε όλο το εκπαιδευτικό και ειδικό τεχνικό προσωπικό του Τμήματος Ηλεκτρολογίας του Ανωτάτου Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους Επ. Καθηγητές κ. Ι. Λιβέρη και κ. Δ. Μαράντη για την καθολική στήριξη που μου παρείχαν καθόλη τη διάρκεια της διατριβής, καθώς και την κ. Φ. Μεταξά, μέλος Ε.Τ.Π. του Τμήματος, για την αμέριστη συμπαράσταση και την ειλικρινή της κατανόηση.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους: τους φίλους μου, που μοιράστηκαν μαζί μου χαρές και αγωνίες όλο αυτό το διάστημα, και την οικογένειά μου, που πίστεψε στην αξία της προσπάθειας αυτής και με στήριξε όσο κανείς άλλος.

«Η παρούσα διατριβή αφιερώνεται στους γονείς μου, Μηνά και Ζηνοβία Μανουσάκη, ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για όσα έχουν κάνει και συνεχίζουν να κάνουν για εμένα»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, η βιομηχανία ενέργειας ισχύος υπόκειται σε πολλαπλές αλλαγές εξαιτίας της απελευθέρωσης της αγοράς. Στις μέρες μας, οι ανταγωνιζόμενες μεταξύ τους αγορές ενέργειας παρέγουν επαρκή παραγωγή ισχύος, τεχνολογικές καινοτομίες, και πιο φθηνά τιμολόγια. Σ' αυτό το περιβάλλον, η ασφαλής λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων απαιτεί στενή παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας τους. Αυτό επιτυγγάνεται μέσω των κέντρων ελέγγου, που συγκεντρώνουν τα δεδομένα που λαμβάνονται από διάφορους υποσταθμούς για να παράσχουν μία εκτίμηση των φασιθετών τάσης, των λήψεων των μετασχηματιστών, των καταστάσεων των διακοπτών, και άλλων μετρούμενων και μη μετρούμενων ηλεκτρικών μεγεθών και παραμέτρων του ηλεκτρικού συστήματος. Παραδοσιακά, τα διαθέσιμα δεδομένα είναι μετρήσεις οι οποίες παρέχονται από το σύστημα SCADA, και περιλαμβάνουν ενεργές και άεργες ροές και εγγύσεις ισγύος, όπως επίσης μέτρα τάσεων και καταστάσεις διακοπτικών στοιγείων. Με την έλευση του παγκοσμίου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS), το σύνολο των μετρήσεων διευρύνθηκε ώστε να συμπεριλάβει τις διαθέσιμες συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών, οι οποίες παρέχονται από τις μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMUs). Αυτές είναι μετρητικές συσκευές που παρέχουν την απαραίτητη πληροφορία για την ελαγιστοποίηση και τον έλεγχο των απωλειών ισχύος και την αποφυγή προβλημάτων όπως οι μεγάλου μεγέθους διακοπές παρογής ισγύος.

Αυτή η διατριβή επικεντρώνεται στα οφέλη από τη χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών και μονάδων PMU με σκοπό την βελτίωση της εποπτείας και του ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος. Τα οφέλη διερευνώνται σε σχέση με την ανάλυση της παρατηρησιμότητας του μετρητικού συστήματος, τη βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMU και την εκτίμηση κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος. Αρχικά, η διατριβή παρουσιάζει απλούς και αποτελεσματικούς αλγορίθμους που αφορούν την ανάλυση παρατηρησιμότητας, τον έλεγχο και την αποκατάσταση, για συστήματα που περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές όσο και μετρήσεις φασιθετών. Καινοτόμες μέθοδοι βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων ναι την αποκατάσταση, για συστήματα που περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές όσο και μετρήσεις φασιθετών. Καινοτόμες μέθοδοι βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU βασισμένες σε ευρετικούς και μαθηματικούς αλγορίθμους που διασφαλίζουν μέγιστη περίσσεια μετρήσεων και λαμβάνουν υπ' όψιν την ύπαρξη ή μη συμβατικών μετρήσεων, επίσης προτείνονται. Τέλος, παρουσιάζονται διατυπώσεις του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης βασισμένες στα ελάχιστα σταθμισμένα τετράγωνα, που περιλαμβάνουν τόσο κλασικές όσο και μετρήσεων και αποφεύγουν σποιοδήποτε αριθμητικό παράφους τύπους μετρήσεων και αποφεύγουν σποιοδήποτε αριθμητικό πρόβλημα μπορεί να προκύψει από την χρησιμοποίηση πολικών ή καρτεσιανών συντεταγμένων των φασιθετών ρεύματος.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στρατηγική τοποθέτηση μερικών μονάδων PMU στο σύστημα μπορεί να αυξήσει σημαντικά την περίσσεια των μετρήσεων, και με τη σειρά της να βελτιώσει την ικανότητα ανίχνευσης και εντοπισμού των εσφαλμένων δεδομένων.

Λέξεις-Κλειδιά: Επεξεργασία εσφαλμένων δεδομένων, συμβατικές μετρήσεις, ευρετικοί αλγόριθμοι, μαθηματικοί αλγόριθμοι, ανάλυση παρατηρησιμότητας, πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU, μονάδα μέτρησης φασιθετών (PMU), συγχρονισμένες μετρήσεις, εκτίμηση κατάστασης, WLS.

ABSTRACT

The last decades, electric power industry is undergoing multiple changes due to the process of deregulation. Nowadays, the competitive electricity markets provide efficient power generation, technological innovations, and eventually lower retail prices. In this environment, secure operation of power systems requires close monitoring of the system operating conditions. This is accomplished through control centres, gathering the data received from numerous substations to provide an estimate of the bus voltage phasors, the tap positions, the circuit breaker status, and other metered and unmetered electrical quantities and parameters of the power system. Traditionally, the available data are redundant measurements commonly provided by SCADA, including active and reactive power flows and injections and bus voltage magnitudes and statuses of switching devices. With the advent of global positioning system (GPS), the measurement set is enlarged to include the available synchronized phasor measurements provided by the phasor measurement units (PMUs). These are measurement devices providing the precise knowledge necessary to minimize and control power outages and avoid problems such as cascading blackouts.

This dissertation is focused on the possible benefits of using synchronized phasor measurements and PMUs in order to improve the power system monitoring and control. The benefits are investigated with respect to the measurement system observability analysis, the optimal PMU placement, and the power system state estimation. Initially, this dissertation presents simple and effective algorithms concerning the observability analysis, checking and restoration, for systems including phasor measurement units as well as conventional measurements. Novel methods of optimal PMU placement based on heuristic and mathematical algorithms ensuring maximum measurement redundancy and considering or not conventional measurements, are also proposed. Finally, weighted least square formulations of the state estimation problem, including traditional as well as voltage and current phasor measurement types and avoid any numerical problems encountered by using the polar or rectangular coordinates of current phasors.

The results show that the strategic placement of a few PMUs in the system can significantly increase measurement redundancy, which in turn can improve the capability of bad data detection and identification.

Index Terms: Bad data processing, conventional measurements, heuristic algorithms, mathematical algorithms, observability analysis, optimal PMU placement problem, phasor measurement unit (PMU), synchronized measurements, state estimation, WLS.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

5
6
9
15
19

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>: Εισαγωγή

1.1	Ιστορική Αναδρομή21
1.2	Συμβολή της διατριβής24
1.3	Διάρθρωση της διατριβής24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Συγχρονισμένες Μετρήσεις και Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών

2.1	Μαθηματική έκωραση ωασιθέτη	27
2.2	Σιννοονισμένη μέτοηση φασιθέτη	27
2.2	$207 \mu \text{portoperative}$	·····27 28
2.5	$M_{0} = M_{0} = M_{0$	20
2.4		
2.5	Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης	30
2.6	Ιεραρχία συστημάτων μετρήσεως φασιθετών	31
2.7	Λειτουργικές απαιτήσεις PMUs και PDCs	32
2.7.1	Εξέλιξη προτύπου συγχρονισμένων φασιθετών	32
2.7.2	Δομή αρχείου συγχρονισμένης μέτρησης	33
2.8	Πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων	34
2.8.1	Πρότυπο 1PPS	34
2.8.2	Πρότυπο IRIG-B	35
2.9	Σύγκριση τεχνολογίας PMU και SCADA	35
2.10	Πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση PMUs	37
2.10.1	Παρακολούθηση και έλεγχος σε πραγματικό χρόνο	37
2.10.2	Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού συστήματος	39
2.10.3	Διαχείριση συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο	40
2.10.4	Επικύρωση και συντονισμός των μοντέλων των συστημάτων	40
2.10.5	Ανάλυση διαταραχών	41
2.10.6	Επαναφορά συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	41
2.10.7	Έλεγχος υπερφόρτισης και δυναμική εκτίμηση	42
2.10.8	Επιλεκτική Προστασία	42
2.10.9	Προγραμματισμένη απομόνωση ηλεκτρικών συστημάτων	43
2.10.10	Ευφυές δίκτυο	44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ανάλυση και Αποκατάσταση Παρατηρησιμότητας Συστήματος

3.1	Ταξινόμηση μεθόδων ανάλυσης παρατηρησιμότητας	45
3.1.1	Τοπολογικές μέθοδοι	45
3.1.2	Αριθμητικές μέθοδοι	46
3.1.3	Υβριδικές μέθοδοι	46
3.1.4	Συμβολικές μέθοδοι	46
3.2	Διατύπωση συνθήκης παρατηρησιμότητας	46
3.3	Δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων	47
3.4	Νησιδοποίηση συστήματος	47
3.5	Θεμελίωση του μοντέλου μειωμένης τάξης	49
3.6	Προτεινόμενος αλγόριθμος ανάλυσης και αποκατάστασης παρατηρησιμότη	τας με

	χρήση μετρήσεων SCADA και PMU	50
3.6.1	Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων και έλεγχος της παρατηρησιμότητας	50
3.6.2	Μοντέλο μειωμένης τάξης με μετρήσεις φασιθετών	52
3.6.3	Επεξηγηματικό παράδειγμα εντοπισμού μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων	.53
3.6.4	Εντοπισμός μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων	54
3.6.5	Αποκατάσταση παρατηρησιμότητας	
3.6.6	Επεξηγηματικό παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου	
3.6.7	Αποτελέσματα προσομοίωσης παρατηρησιμότητας	.62
3.7	Προτεινόμενος αλγόριθμος ανάλυσης και αποκατάστασης παρατηρησιμότητας με	
	μετρήσεις μηδενικές έγχυσης και PMU	.65
3.7.1	Αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας	.67
3.7.2	Επεξηγηματικό παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου	.69
3.7.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης	.71

<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>: Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών

4.1	Βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMUs	73
4.2	Ταξινόμηση μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος OPP	74
4.2.1	Μαθηματικοί αλγόριθμοι	74
4.2.1.1	Ακέραιος προγραμματισμός	74
4.2.1.2	Εξαντλητική αναζήτηση	75
4.2.2	Ευρετικοί αλγόριθμοι	76
4.2.2.1	Γενετικός αλγόριθμος	76
4.2.2.2	Αναζήτηση Tabu	76
4.2.2.3	Προσομοιωμένη ανόπτηση	76
4.2.2.4	Διαφορική εξέλιξη	77
4.2.2.5	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων	77
4.2.2.6	Ανοσοποιητικός αλγόριθμος	77
4.2.2.7	Επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση	77
4.2.2.8	Εύρεση γεννητικού δένδρου	77
4.2.2.9	Άπληστος αλγόριθμος	78
4.2.2.10	Επαναληπτικός αλγόριθμος ασφάλειας Ν	78
4.2.2.11	Δένδρο απόφασης	78
4.2.2.12	Πρακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι	78
4.3	Βέλτιστη τοποθέτηση PMU με την βοήθεια γραμμικού προγραμματισμού	79
4.3.1	Διαμόρφωση περιορισμών γωρίς μετρήσεις ροής ή μηδενικής έγγυσης	80
4.3.2	Διαμόρφωση περιορισμών θεωρώντας μετρήσεις ροής	81
4.3.3	Διαμόρφωση περιορισμών θεωρώντας μετρήσεις ροής και μηδενικής έγγυσης	82
4.3.3.1	Διαμόρφωση μη γραμμικών περιορισμών	83
4.3.3.2	Τοπολογικός μετασγηματισμός	84
4.4	Προτεινόμενοι μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων PMU	85
4.4.1	Πρακτικός αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU	85
4.4.1.1	Επεξηγηματικό παράδειγμα	86
4.4.1.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	89
4.4.2	Τεχνική τοποθέτησης μονάδων PMU για πλήρη παρατηρησιμότητα	91
4.4.2.1	Επεξηγηματικό παράδειγμα	92
4.4.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	94
4.4.3	Τεχνική ελαγίστων τετραγώνων για τοποθέτηση μονάδων PMU	94
4.4.3.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU γωρίς συμβατικές	
	μετρήσεις	101
4.4.3.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU θεωρώντας μετρήσεις	
	ροής	103
4.4.3.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU με θεώρηση συμβατικά	ών
	μετρήσεων	105
	• • •	

4.4.3.4	Δείκτης τοποθέτησης μονάδων ΡΜU	108
<u>КЕФАЛ</u>	<u>ΑΙΟ 5</u> : Εκτίμηση Κατάστασης με Χρήση Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθει	τών
5.1	Καταστάσεις λειτουργίας	111
5.2	Θεμελίωση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης	111
5.3	Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης σταθμισμένων ελαγίστων τετραγώνων	115
5.4	Επεζεργασία εσφαλμένων δεδομένων	117
5.4.1	Kατανομή- χ^2	117
5.4.2	Έλενγος μένιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου	117
5.5	Εκτίμηση κατάστασης με ισοτικούς περιορισμούς	119
5.6	Διατύπωση εξισώσεων συμβατικών μετρήσεων	120
5.7	Διατύπωση εξισώσεων συγγρονισμένων μετρήσεων	121
5.8	Δομή Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων	125
5.9	Αριθμητική συμπεριφορά παραγώγων φασιθετών ρεύματος σε πολικές	
	συντεταγμένες	129
5.10	Προτεινόμενοι αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης	130
5.10.1	Εκτίμηση κατάστασης και επεξεργασία εσφαλμένων δεδομένων για συστήματ	απου
	περιλαμβάνουν μετρήσεις PMU και SCADA	130
5.10.1.1	Προσομοίωση χωρίς ύπαρξη εσφαλμένων μετρήσεων	133
5.10.1.2	Προσομοίωση με θεώρηση εσφαλμένων μετρήσεων	143
5.10.2	Εκτίμηση κατάστασης με ισοτικούς περιορισμούς και θεώρηση μετρήσεων Ρ	ΜU και
	μηδενικών εγχύσεων	146
5.10.2.1	Προτεινόμενος αλγόριθμος για την επίλυση της εκτίμησης κατάστασης	148
5.10.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης	149
5.10.3	Εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια	154
5.10.3.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης	156
5.10.3.2	Εκτιμητής δύο σταδίων με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και	1
= 10 2 2	μεταβλητες καταστασης εκπεφρασμενες σε καρτεσιανες συντεταγμενες	157
5.10.3.3	Εκτιμητης δυο σταδιων με συγχρονισμενες μετρησεις στο πρωτο σταδιο	
	εκπεφρασμενες σε καρτεσιανες και μεταβλητες καταστασης σε πολικες	159
5.10.4	Εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια παρουσία ισοτικών περιορισμών	
5.10.4.1	Αποτελέσματα ποοσομοίωσης	
5.10.4.2	Εκτιμητής δύο σταδίων με ισοτικούς περιορισμούς και συνχρονισμένες μετού	σεις στο
	πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές	165
5 10 4 2	6υντεταγμενες	105
5.10.4.5	Εκτιμητής συο στασιών με ισυτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρη	010 2130
	πρωτο στασιο τις εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταρλητές καταστάσης πολικές συντεταγμένες	σε 167
<u>КЕФАЛ</u>	<u>ΑΙΟ 6</u> : Συμπεράσματα και Προοπτικές της Εργασίας	
6.1	Συμπεράσματα της εργασίας	171
6.2	Προοπτικές της εργασίας	173
ПАРАРТ	THMA	
	Ιδιότητες βαθμού του μοντέλου μειωμένης τάξης	175
BIRAIO	ΓΡΑΦΙΑ	179

KATAΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Το πρώτο PMU που αναπτύχθηκε στο Virginia Tech [1]	22
Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση φασιθέτη τάσης	28
Σχήμα 2.2 Βασική δομή μονάδας PMU	29
Σχήμα 2.3 Ιεραρχία του μετρητικού συστήματος φασιθετών και επίπεδα των συγκεντρωτών	
δεδομένων φασιθετών	32
Σ χήμα 2.4 Δομή αρχείων PMU	34
Σχήμα 2.5 Έυφυές Δίκτυο	44
Σχήμα 3.1 Νησιδοποίηση συστήματος που φέρει μετρήσεις SCADA	48
Σχήμα 3.2 Νησιδοποίηση συστήματος που φέρει μετρήσεις SCADA και PMU	52
Σχήμα 3.3 Διαχωρισμός συστηματός και παρατηρησιμα υποσυστηματα	54
Σχημα 3.4 Μεικτο συστημα μετρησεών και αντιστοιχες ροονησιδες για το δικτύο IEEE 14 ζυγώ	v.57
Σχημα 3.5 Μεγιστες παρατηρησιμες νησιδες για το μεικτο μετρητικό συστηματού δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών	59
Σχήμα 3.6 Νησιδοποίηση συστήματος με μετρήσεις PMU και μηδενικές εγχύσεις	66
Σχήμα 3.7 Σύστημα μετρήσεων και νησιδοποίηση του δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών	69
Σχήμα 4.1 Σύστημα ΙΕΕΕ 14 ζυγών	80
Σχήμα 4.2 Τοπολογικός μετασχηματισμός συστήματος ΙΕΕΕ 14 ζυγών	84
Σχήμα 4.3 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ΙΕΕΕ 30 ζυγών	88
Σχήμα 4.4 Παρατηρήσιμες περιοχές PMU (α) χωρίς (β) με μέτρηση ροής	97
Σχήμα 4.5 Ζυγός που μέτρηση έγχυσης	99
Σχήμα 4.6 Βέλτιστες θέσεις PMU και αντίστοιχες παρατηρήσιμες νησίδες για το δίκτυο IEEE 14	
ζυγών αγνοώντας τις συμβατικές μετρήσεις	.102
Σχήμα 4.7 Βελτιστες θέσεις PMU και αντιστοιχες παρατηρήσιμες περιοχές για το δίκτυο	105
ΙΕΕΕ 14 ζυγων λαμβανοντας υποψη μετρησεις ροης	102
Σ_{χ} ήμα 4.8 Ρουνήσιοες δίκτυου IEEE 14 ζυγων	.100
2χ i μ u 4.9 BEALIOLEG BEOELG FMO KULUVIOLOUZEG AUPULIPIJOLUEG AEPIOZEG VIU LO OLKLUO	100
Σ_{14} μετρηθείς	112
Σ_{χ} ήμα 5.1 Καταστασείς λειτουργίας συστηματός ηλεκτρικής ενεργείας	114
Σ_{χ} ήμα 5.3 Γενικερμένος (υνός συστήματος ηλεκτοικής ενέονειας	.120
Σχήμα 5.4 Συγγρονισμένες μετρήσεις μέσω μιας μονάδας PMU	.121
Σγήμα 5.5 Ισοδύναμο μοντέλο " π " μιας γραμμής $i - i$, η οποία φέρει στο άκρο i μονάδα PMU.	.122
Σχήμα 5.6 Ορισμός φασικών γωνιών τάστις και ρεύματος με την κρινή αναφορά του GPS	.123
Σχήμα 5.7 Μερικές παράγωνοι του μέτρου ρεύματος I_{ii} και της φασικής νωνίας θ_{ii} ως προς	
το μέτρο τάσης V	.129
Σχήμα 5.8 Μερικές παράγωνοι του μέτρου ρεύματος L_{μ} και της φασικής γωνίας A_{μ} ως προς	•
$-\chi_{ij}$ και της φασικης τωντας v_{ij} ως προς την νωνία φάσης δ.	.130
Σγήμα 5.9 Μερικές παράγωγοι πραγματικού I_{ii} , και φανταστικού I_{ii} , μέρους του ρεύματος	
$ω_{\rm c}$ προς το μέτρο τάσης V_i	.131
Σχήμα 5.10 Μερικές παράγωγοι πραγματικού I_{ii} , και φανταστικού I_{ii} , μέρους του ρεύματος	
ως προς την γωνία φάσης δ_i	.132
Σγήμα 5.11 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυνών	.133
Σχήμα 5.12 % Σφάλμα φασικής γωνίας ζυγών ως προς τις πραγματικές τιμές για το δίκτυο	
ΙΕΕΕ 14 ζυγών	.138
Σχήμα 5.13 % Σφάλμα μέτρου τάσης ζυγών ως προς τις πραγματικές τιμές για το δίκτυο	
ΙΕΕΕ 14 ζυγών	.139
Σχήμα 5.14 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία PMU και	

	συμβατικών μετρήσεων	.140
Σχήμα 5.15	Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών παρουσία PMU και	
	μηδενικών εγχύσεων	.150
Σχήμα 5.16	Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία PMU και	
	μηδενικών εγχύσεων	.151
Σχήμα 5.17	Τυπική απόκλιση φασικών γωνιών τάσης, σε μοίρες, για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών	.152
Σχήμα 5.18	Τυπική απόκλιση μέτρων τάσης, p.u., για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών	.152
Σχήμα 5.19	Τυπική απόκλιση φασικών γωνιών τάσης, σε μοίρες, για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών.	.153
Σχήμα 5.20	Τυπική απόκλιση μέτρων τάσης, p.u., για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών	.153

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU	36
Πίνακας 3.1 Συστήματα μετρήσεων για τα υπό εξέταση δίκτυα	63
Πίνακας 3.2 Ροονησίδες και μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για την πρώτη περίπτωση	63
Πίνακας 3.3 Ροονησίδες και μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για την δεύτερη περίπτωση	64
Πίνακας 3.4 Εγχύσεις και μονάδες ΡΜU για αποκατάσταση παρατηρησιμότητας στην πρώτη	
περίπτωση	64
Πίνακας 3.5 Μονάδες ΡΜυ για αποκατάσταση παρατηρησιμότητας στην δεύτερη	
περίπτωση	64
Πίνακας 3.6 Συστήματα μετρήσεων πριν και μετά την αποκατάσταση παρατηρησιμότητας των	
δικτύων	71
Πίνακας 4.1 Επεξήγηση μητρών πρακτικού αλγορίθμου τοποθέτησης PMU	86
Πίνακας 4.2 Δεδομένα εξεταζόμενων δικτύων	90
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενου πρακτικού αλγορίθμου	90
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης από βιβλιογραφία [78], [117]	91
Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης τεχνικής τοποθέτησης	94
Πίνακας 4.6 Γενικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δικτύων του ΙΕΕΕ	.101
Πίνακας 4.7 Εκτιμώμενες μεταβλητές τοποθέτησης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών	.102
Πίνακας 4.8 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του IEEE	.103
Πίνακας 4.9 Θέσεις μετρήσεων ροής για τα υπό εξέταση δίκτυα	.103
Πίνακας 4.10 Εκτιμώμενες μεταβλητές τοποθέτησης για το δίκτυο ΙΕΕΕ-14 λαμβάνοντας	
υπόψη μετρήσεις ροής	.104
Πίνακας 4.11 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του ΙΕΕΕ	
λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής	.105
Πίνακας 4.12 Θέσεις μετρήσεων ροής και έγχυσης για τα υπό εξέταση δίκτυα	.106
Πίνακας 4.13 Εκτιμώμενες μεταβλητές τοποθέτησης για το δίκτυο ΙΕΕΕ-14 λαμβάνοντας	
υπόψη μετρήσεις ροής και έγχυσης	.107
Πίνακας 4.14 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του ΙΕΕΕ	
λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων	.107
Πίνακας 4.15 Τιμές των δεικτών ΡΡΙ και ΡΡΙ	109
Πίνακας 5.1 Ενεονές και άεονες εννύσεις και ορές ισνύος	.121
Πίνακας 5.2 Μορφές φασιθετών οεύματος και μεταβλητών κατάστασης	.123
Πίνακας 5.3 Φασιθέτες οεύματος και μεταβλητές κατάστασης μίας νοαμμής $i = i$	124
Πίναι τας δια Γαργούος μουριατος και μοταριτής της κατά στα στης μίας γραμμης γ $-$ γ ποιοιομοτικής της πρωθασικός μοτορότοις και μο Αρφοριστικός το μοταβλητός	
πινακας 3.4 Διοιχεία τακωριανής για συμρατικές μετρήσεις και με σεωρήση στι οι μεταρλητές	125
Π ίναι $z = 5$ Στοινοία Ιακωβιαινής της συμβασικός μοτοήσεις και μο Αφόρηση ότι οι μοταβλητός	.143
	176
$\mathbf{\Pi}$ ματαβλητές μα αστιθάτης αρώματος σε καρτοτιστική και μοταβλητές	.120
Πινακάς 5.0 Διοίχεια ιακώριανης για φασισείες ρεσματός σε καρτεσιανή και μεταρλητές	127
Πίναι τας 5.7 Στοινεία Ιακωβιανής για φασιθέτες οσώματος και μεταβλητές κατάστασης σε	.141
Πινακάς 3. 7 Διοιζεία Ιακωρίανης για φαοιοείες ρεσματός και μεταρλητές κατάστασης σε	127
Πίνακας 5 8 Στοινεία Ιακωβιανής για φασιθέτες ορώματος και μεταβλητές κατάστασης σε	.141
πολική μορφή	128
Π (μορφη μορφη μορφη μότου) L (και της αποτηγές μορφη του αποτηγές)	.140
Πινακάς 5.9 Μερικές παραγωγοί του μέτρου T_{ij} και της φασικής γωνίας θ_{ij} του φασιδέτη	
ρεύματος για $V_i = V_j$ και $\delta_i = \delta_j$.129
Πίνακας 5.10 Συστήματα μετοήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυνών	.134
Πίνακας 5.11 Πραγματικές και μετοούμενες τιμές συμβατικών μετούσεων για το δίκτυο	
ΙΕΕΕ 14 ζυνών	.135
Πίνακας 5.12 Πραγματικές και μετρούμενες τιμές συνγρονισμένων μετρήσεων για το δίκτυο	
ΙΕΕΕ 14 ζυνών	.136
Πίνακας 5.13 Πραγματικές και εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14	

	ζυγών	137
Πίνακας 5.14	Μετατοπισμένες πραγματικές και εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης για το	
·	δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών	138
Πίνακας 5.15	Σύστημα μετρήσεων για το δίκτυο IEEE 118 ζυγών	139
Πίνακας 5.16	Εκτιμώμενες τιμές φασικών γωνιών ζυγών για το δίκτυο IEEE 118 ζυγών	141
Πίνακας 5.17	Εκτιμώμενες τιμές μέτρων τάσεων ζυγών για το δίκτυο IEEE 118ζυγών	142
Πίνακας 5.18	Ποιοτικοί δείκτες εκτίμησης κατάστασης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυνών	143
Πίνακας 5.19	Εσφαλμένες μετοήσεις για όλες τις περιπτώσεις του δικτύου ΙΕΕΕ 14 (υνών	144
Πίνακας 5.20	Ανάλυση εσφαλμένων μετοήσεων για την περίπτωση 2 του δικτύου	
	ΤΕΕΕ 14 (τυνών	144
Πίνακας 5.21	Ανάλυση εσωαλμένων μετοήσεων για την περίπτωση 3 του δικτύου ΙΕΕΕ 14 (υνών	144
Πίνακας 5.22	Ανάλυση εσφαλμένων μετοήσεων για την περίπτωση 4 του δικτύου ΙΕΕΕ 14 (υνών	145
Πίνακας 5.23	Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο IEEE 118 ζυνών	145
Πίνακας 5.24	Ποιοτικοί δείκτες εκτίμησης κατάστασης μετά την εκκαθάοιση σφάλματος για το	
1100 000 000 1	δίκτυο IEEE 118 ζυνών	145
Πίνακας 5.25	λιατυπώσεις προτεινώμενων μεθόδων	146
Πίνακας 5.26	Στοινεία Ιακωβιανής μήτρας Η και C για τις προτεινόμενες διατυπώσεις	147
Πίνακας 5.27	Συστήματα μετοήσεων μετά την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας	150
Πίναιας 5.29		151
Πίνακας 5.20	Δ εικτης αποσοσης δ' και μέσος χρονός CFO για τα υπο εςεταση δικτύα	154
Πίνακας 5.29	2τοιχεία τακωριανής μητράς Π για τα δύο στάσια	130
Πινακάς 5.50		
	μετρήθεις στο πρωτο στασιο και μεταρλήτες καταστασής εκπεφρασμένες σε	157
Πίνακας 5 31	καρτεσίανες συντεταγμενες	137
11tvakay 5.51	Ποιοτικοί σεικτές αποτελεσματών για τα εξεταξόμενα σικτύα με συγχρονισμένες	
	μετρησείς στο πρωτο στασίο και μεταρλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε	150
Πίνακας 5.32	Analysis σ and μ in the second s	150
Πίνακας 5.32	Ανάλου ειστά) αστις αλαραίθυση από το εξοσσζάμου α δίκτρα μα στασοριστιάνος	130
Πινακάς 5.55	Αρονοι εκτελεσής αλγορισμου για τα εςεταξομένα σικτύα με συγχρονισμένες	ác
	μετρησεις στο πρωτο στασιο μεταρλητες καταστασης εκπεφρασμενες σε καρτεσιαν	են 1 5 0
Πίνανας 5 34	Ουντεταγμένες	139
11tvukuş 5.54	μετοήσεις στο ποώτο στάδιο εκπεφορατιώνες σε καρτοποινές και μεταβλητές	
	μ ειρησείς στο πρωτο στασίο εκπεψρασμένες σε καρτεσίανες και μεταρλητές	150
Πίνακας 5 35	Ποιοτικοί δείντες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγκοονισμένες	139
11tvukug 5.55	Ποιοτικοί σεικτές αποτελεσματών για τα εξεταξόμενα σικτοά με συγχρονισμένες	
	μ ειρησείς στο πρωτο στασίο εκπεψρασμένες σε καρτεσίανες και μεταρλητές	161
Пívarac 5 36	Ανάλυση εσωαλμένων μετοήσεων για το δίκτυο IFFE 118 ζυνών	161
Πίνακας 5.30	Υσόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγγοριμαμένες	101
IIIvanay 5.57	προνοι εκτελεσής αλιορισμου για τα εξεταξομένα υπτού με συγχρονισμένες	
	μ ειρησείς στο πρωτο στάσιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιάνες και μεταρπητές	162
Πίνακας 5 38	Στοινεία Ιακωβιανής μήτρας Η για τα δύο στάδια με ισοτικούς περιορισμούς	164
Πίνακας 5.39	Μετοητική διάταξη δικτύου IEEE 57 ζυνών με ισοτικούς περιορισμούς και	104
intranay cies	συνγοργισμένες μετοήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης	
	εκπεφοασμένες σε καρτεσιανές στο πρωτο σταστο και μοταριτίος κατασταστίς	165
Πίνακας 5.40	Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσιμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς	100
110,0110,90010	περιορισμούς και συνγρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές	
	κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντετανμένες	166
Πίνακας 5.41	Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 57 ζυνών παρουσία ισοτικών	
	περιορισμών	166
Πίνακας 5.42	Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς περιορισμού	Ĵς
<u> </u>	και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης	5
	εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες	167
Πίνακας 5.43	Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με ισοτικούς περιορισμο	νύς

	και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες
Πίνακας 5.44	Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς
	περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες
Πίνακας 5.45	Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία ισοτικών περιορισμών
Πίνακας 5.46	Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες170

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ

AEP	American Electrical Power
A/D	Analog to Digital
BILP	Binary Integer Linear Programming
BPA	Bonneville Power Administration
BOI	Bus Observability Index
CLONALG	Clonal Algorithm
DE	Differential Evolution
DFR	Digital Fault Recorder
DC	Direct Combination
DFT	Discrete Fourier Transform
EMS	Energy Management System
ESA	European Space Agency
ES	Exhaustive Search
FRACSEC	FRACtion of a SECond
GA	Genetic Algorithm
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLONASS	GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	Global Positioning System
GrA	Greedy Algorithm
IGA	Immune Genetic Algorithm
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IP	Integer Programming
IRIG-B	Inter Range Instrumentation Group-B
IEC	International Electrotechnical Commission
ILS	Iterated Local Search
KCL	Kirchhoff Current Law
LS	Least Squares
NTC	Nominal Transfer Capability
NP-hard	Nondeterministic Polynomial time-hard
NSGA	Nondominated Sorting Genetic Algorithm
OPC-DA	Object linking and embedding for Process Control-Data Access
OPC-HDA	Object linking and embedding for Process Control-Historical Data Access
OPP	Optimal PMU Placement
PSO	Particle Swarm Optimization
PAMU	Phase Angle Measurement Unit
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit
PPI	PMU Placement Index
PPS	Pulse Per Second
RTC	Real-time Transfer Capability
RMS	Root Mean Square
SOC	Second Of Century

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ (ΣΥΝΕΧΕΙΑ)

SA	Simulated Annealing
SPA	Standing Phase Angle
SE	State Estimation
STS	Spanning Tree Search
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SORI	System Observability Redundancy Index
TS	Tabu Search
UTC	Universal Time Coordinated
VME	Virtual Machine Environment
WLS	Weighted Least Squares
WAMPAC	Wide Area Monitoring, Protection and Control

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η πλειονότητα των θεμάτων που καλύπτονται στην παρούσα διατριβή, αφορούν εφαρμογές των συσκευών μέτρησης φασιθετών (PMUs) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ιστορική ανασκόπηση του PMU και της εξέλιξής του, όπως επίσης και στις εφαρμογές που σχετίζονται μ' αυτό.

Τρείς δεκαετίες μετά την εμφάνιση του πρώτου PMU, υπάρχουν ακόμη πολλά εν εξελίξει προγράμματα και ερευνητές που διερευνούν τα οφέλη της χρήσης των PMUs και των μετρήσεών τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τα πλεονεκτήματά τους έναντι των συμβατικών μετρήσεων. Αν και υπάρχει μια ποικιλία εφαρμογών PMUs, οι περισσότερες από τις εφαρμογές που περιγράφονται σ' αυτό το κεφάλαιο είναι ήδη διαθέσιμες σε μορφή εμπορικών πακέτων.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η μονάδα μέτρησης φασιθετών (PMU) είναι μία συσκευή ικανή να μετρά τους φασιθέτες τάσης και ρεύματος θετικής ακολουθίας. Οι φασιθέτες τάσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούσαν πάντα ένα στοιχείο πρωταρχικού ενδιαφέροντος για τους ενεργειακούς μηχανικούς. Είναι γνωστό ότι η ενεργός ροή ισχύος σε μια δεδομένη γραμμή είναι ανάλογη με την διαφορά γωνιών μεταξύ των τερματικών ζυγών της γραμμής [1]. Επομένως, η μέτρηση της διαφοράς των φασικών γωνιών κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς είναι σημαντική για τους ενεργειακούς μηχανικούς.

Η ιστορία των PMUs ανάγεται στο 1977 όπου προτάθηκε ένας αλγόριθμος για την προστασία των γραμμών μεταφοράς [2]. Σ' αυτή τη δημοσίευση περιγράφονται οι συμμετρικές συνιστώσες της τριφασικής τάσης και ρεύματος. Ο υπολογισμός των τάσεων και ρευμάτων θετικής ακολουθίας σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν το πρώτο βήμα στη διαδικασία που υιοθετήθηκε στα PMUs. Οι τάσεις θετικής ακολουθίας των ζυγών του συστήματος, αποτελούν το διάνυσμα κατάστασής του [1]. Μία δημοσίευση του καθηγητή Phadke το 1983 [3] καταδεικνύει με χαρακτηριστικό τρόπο τη σημασία της τάσης θετικής ακολουθίας του συστήματος.

Ταυτόχρονα, η ύπαρξη του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (GPS) και η δυνατότητά του να αντιπροσωπεύει την ακριβέστερη μέθοδο για να συγχρονιστούν οι μετρήσεις σ' ένα ηλεκτρικό σύστημα [4], επέτρεψαν στους ερευνητές του Virginia Tech να δημιουργήσουν το πρώτο πρότυπο μοντέλο μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) στις αρχές της δεκαετίας του '80. Στο Σχήμα 1.1, παρουσιάζεται το πρώτο πρωτότυπο PMU, που δημιουργήθηκε στο Virginia Tech [1]. Ακολούθησε η δημιουργία του πρώτου εμπορικά διαθέσιμου PMU από την Microdyne το 1995 [5].

Οι διαταραχές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έκαναν αναγκαία τη θωράκισή τους μέσω προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης, προστασίας και ελέγχου ευρείας περιοχής (WAMPAC), βελτιώνοντας το σχεδιασμό, την απόδοση και την ενεργειακή εκπαίδευση [6], [7]. Για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος WAMPAC, απαιτείται η χρήση των πιο σύγχρονων τεχνικών ανίχνευσης, επικοινωνίας, πληροφορικής, μοντελοποίησης, απεικόνισης και λογισμικού, με σκοπό τη μελέτη και μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [8]. Η εφαρμογή των PMUs στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο, την επίτευξη καλύτερης εποπτείας, την επίγνωση της κατάστασης, την αξιολόγηση του ορίου ασφαλούς απορρόφησης ισχύος, την έγκαιρη προστασία και υποστήριξη της οικονομικής και αξιόπιστης λειτουργίας τόσο αυτών, όσο και της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και ο συγχρονισμός δεν είναι

μια καινούργια έννοια στα ηλεκτρικά συστήματα, η επιστημονική πρόοδος οδήγησε στη μείωση του χρονικού εύρους για συγχρονισμό.



Σχήμα 1.1 Το πρώτο PMU που αναπτύχθηκε στο Virginia Tech [1]

Χάριν της προόδου στα θέματα συγχρονισμού και επικοινωνιών, το χρονικό εύρος για τις συγχρονισμένες μετρήσεις έχει ελαττωθεί, από μερικά λεπτά (m), που ήταν πρακτικά κάποτε, σε μερικά μικροδευτερόλεπτα (μs) σήμερα. Αν και οι υψηλής ακρίβειας χρονικά σημασμένες μετρήσεις θεωρούνται προς το παρόν πολυτέλεια για τα ηλεκτρικά συστήματα, εφόσον αυτές παρέχονται αποκλειστικά και μόνον από τα PMUs, η βιομηχανία προσβλέπει στην ημέρα όπου όλες οι μετρήσεις θα είναι χρονικά συγχρονισμένες με υψηλή ακρίβεια και οι χρονικές σημάνσεις θα αποτελούν ένα «φυσικό» τμήμα οποιασδήποτε μέτρησης.

Προς το παρόν, τα PMUs είναι οι πιο περίπλοκες ψηφιακές συσκευές μέτρησης που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά συστήματα και εφαρμόζουν υψηλής ακρίβειας υπολογισμούς σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα του σήματος από το GPS. Αν και οι προηγμένες τεχνικές μέτρησης και συγχρονισμού αποτελούν τη βάση για την λειτουργία του PMU, απαιτείται πρόοδος και σε άλλες ερευνητικές περιοχές για να αποκομίσουμε τα μέγιστα οφέλη από τα PMUs. Μια τέτοια περιοχή είναι η μετάδοση δεδομένων, όπου τα ταχύτερα και πιο αξιόπιστα κανάλια επικοινωνίας έδωσαν τη δυνατότητα μετάδοσης πληροφοριών από PMU που έχουν εγκατασταθεί σε απομακρυσμένες περιοχές προς τα κέντρα ελέγχου.

Τα PMUs μπορούν να παρακολουθήσουν τη δυναμική συμπεριφορά των δικτύων με ένα ρυθμό της τάξης του μικροδευτερολέπτου (μs). Αυτό είναι μια μεγάλη πρόοδος σε σχέση με τις μετρήσεις SCADA όπου ο ρυθμός ανανέωσης των δεδομένων ποικίλλει από δευτερόλεπτα (s) έως και λεπτά (m). Τα συλλεγόμενα δεδομένα, που προέρχονται από διαφορετικά PMUs του συστήματος, αποστέλλονται στο Συγκεντρωτή Δεδομένων Φασιθετών (PDC) για να τα ευθυγραμμίσει, μέσω της χρονικής σήμανσης. Κατόπιν, τα δεδομένα από το PDC του κάθε κέντρου αποστέλλονται στο κέντρο της επιχείρησης ηλεκτρικής ενέργειας, όπου τα προερχόμενα από διαφορετικά υποσυστήματα δεδομένα, συγχρονίζονται. Μετά την επεξεργασία των προερχόμενων από PMUs δεδομένων, θα είναι διαθέσιμο ένα στιγμιότυπο των φασιθετών των τάσεων των υποσταθμών.

Όπως σημειώνεται στην αναφορά [9], ο κύριος σκοπός των νέων τεχνολογιών παρακολούθησης, ελέγχου και προστασίας ευρείας περιοχής, είναι:

• Η παρακολούθηση, ο έλεγχος και η προστασία των γραμμών μεταφοράς από τις διαταραχές και τις αρνητικές επιδράσεις τους, όπως είναι οι διακοπές ρεύματος.

• Η αύξηση της χωρητικότητας των γραμμών σε συγκεκριμένη περιοχή μεταφοράς, ιδιαιτέρως μεταξύ δύο διαφορετικών παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την μείωση της συμφόρησης μεταξύ των δικτύων.

• Η μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων μεταφοράς υπό την έννοια της περαιτέρω ανάπτυξης των διαδικασιών σχεδιασμού, ελέγχου, λειτουργίας και προστασίας και της μοντελοποίησής τους.

Οι έρευνες και η ανάπτυξη των μετρήσεων φασιθετών και των εφαρμογών τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις δύο προηγούμενες δεκαετίες, δείχνουν ότι ένα σύστημα που έχει σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση αυτών των συσκευών είναι πολύ πιθανό να επιτύχει τους τρείς ανωτέρω στόχους, καθώς και να ικανοποιήσει τους νέους λειτουργικούς περιορισμούς ευρείας περιοχής στις ακόλουθες τρεις βασικές περιοχές [8]:

- Παρακολούθηση ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο
- Έλεγχος ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο
- Προσαρμοσμένη προστασία ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο

Η γενική αρχιτεκτονική δομή για παρακολούθηση, προστασία, και έλεγχο ευρείας περιοχής περιλαμβάνει τέσσερα διαφορετικά επίπεδα:

- 1º Επίπεδο. Συλλογή δεδομένων σε μορφή φασιθετών. Συσκευές συγχρονισμένων φασιθετών, όπως τα PMUs και οι Ψηφιακοί Καταγραφείς Σφάλματος (DFRs) εγκαθίστανται στους υποσταθμούς και μπορούν να μετρήσουν τους φασιθέτες τάσης και ρεύματος, αλλά και τη συχνότητά του. Η βασική διαδικασία μέτρησης φασιθέτη, παρέχει τους φασιθέτες τάσεως και ρεύματος θετικής ακολουθίας και θεμελιώδους συχνότητας.
- 2º Επίπεδο. Διαχείριση δεδομένων φασιθετών. Ένας κεντρικός σταθμός PDC, ο λεγόμενος SuperPDC, συλλέγει τα δεδομένα από διαφορετικά PMUs καθώς επίσης και από πολλούς σταθμούς PDC που ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές προσθέτοντας τα σε ένα ενιαίο σύνολο δεδομένων. Μπορεί επίσης να μεταδώσει το σύνολο των δεδομένων σε κατάλληλη εφαρμογή, χρησιμοποιώντας τον απομονωτή δεδομένων.
- 3° Επίπεδο. Υπηρεσία δεδομένων. Περιλαμβάνει ένα σύνολο απαραίτητων υπηρεσιών για την παροχή δεδομένων σε διάφορες εφαρμογές. Ο βασικός ρόλος αυτού του επιπέδου είναι να παρέχει δεδομένα σε κατάλληλη μορφή για διάφορες εφαρμογές. Το κατάλληλο μορφότυπο και η γρήγορη εκτέλεση είναι σημαντικοί παράγοντες σ' αυτό το επίπεδο, καθώς παρέχουν αρκετό χρόνο για τρέξιμο της εφαρμογής εντός του χρόνου δειγματοληψίας.
- 4° Επίπεδο. Εφαρμογές. Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει τους ακόλουθους τρεις τομείς: έλεγχος ευρείας περιοχής, παρακολούθηση ευρείας περιοχής και προστασία ευρείας περιοχής σε πραγματικό χρόνο.

Τα τέσσερα επίπεδα που σημειώνονται παραπάνω σχηματίζουν μια πιθανή αρχιτεκτονική δομή η οποία εμπλέκει την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την προστασία του συστήματος και βασίζεται στη χρησιμοποίηση των PMUs.

1.2 Συμβολή της διατριβής

Ο μεγάλος αριθμός εταιρειών κοινής ωφέλειας οι οποίες ήδη χρησιμοποιούν PMUs, αλλά και η διαρκώς αυξανόμενη, παγκοσμίως, ζήτηση για εγκατάσταση περισσότερων PMUs στα ηλεκτρικά συστήματα, έχουν καταστήσει υψίστης σημασίας τις εφαρμογές των PMUs τόσο για τους ερευνητές όσο και για την βιομηχανία.

Πολλές από τις εφαρμογές των PMUs και η ευεργετική τους επίδραση στις εφαρμογές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Αν και οι προαναφερθείσες εφαρμογές περιορίζονται μόνον σ' αυτές που ήδη χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, και οι περισσότερες από αυτές είναι διαθέσιμες σε εμπορική μορφή, εντούτοις οι ερευνητές εξετάζουν συνεχώς νέες μεθόδους ώστε να αντικαταστήσουν τις υπάρχουσες συμβατικές τεχνικές με πιο εξελιγμένες.

Αυτή η διατριβή ερευνά επίσης τις μονάδες μέτρησης φασιθετών, PMUs, και τις εφαρμογές τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κύρια αντικείμενα που μελετήθηκαν σ' αυτή τη διατριβή συνοψίζονται στα ακόλουθα:

• Βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs με σκοπό την πλήρη παρατηρησιμότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων.

 Βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs με σκοπό την πλήρη παρατηρησιμότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων ή μηδενικών εγχύσεων.

• Έλεγχος και αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει τόσο συμβατικές όσο και μετρήσεις φασιθετών.

• Έλεγχος και αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει μόνον μετρήσεις φασιθετών.

• Βελτίωση της διαδικασίας εκτίμησης κατάστασης με ενσωμάτωση των μετρήσεων PMUs στις ήδη υπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις.

 Βελτίωση της διαδικασίας εκτίμησης κατάστασης σε δύο στάδια, με ενσωμάτωση των μεταβλητών κατάστασης του πρώτου σταδίου στις ήδη υπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις, ως μετρήσεων υψηλής ακρίβειας ή ως συνθηκών ισότητας.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Η διατριβή οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια και χωρίζεται σε τρία βασικά τμήματα. Το πρώτο τμήμα (κεφάλαιο 2) περιλαμβάνει μία αναλυτική παρουσίαση της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων και των μονάδων μέτρησης φασιθετών. Το δεύτερο τμήμα (κεφάλαια 3 και 4) μελετά εφαρμογές των PMUs στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας για έλεγχο και αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, όπως επίσης και εφαρμογές τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών. Το τρίτο τμήμα (κεφάλαιο 5) μελετά τις πιο πρακτικές εφαρμογές των PMUs σ' ένα διασυνδεδεμένο σύστημα. Αυτό το τμήμα της διατριβής επικεντρώνεται στη δυνατότητα της άμεσης πρόσβασης σε δεδομένα που προέρχονται από εξωτερικές μονάδες μέτρησης φασιθετών, με σκοπό τη βελτίωση εσωτερικών εφαρμογών του συστήματος, όπως είναι η εκτίμηση κατάστασης.

Τα κεφάλαια αυτής της διατριβής είναι τα ακόλουθα:

- 1. Εισαγωγή και θεωρητικό υπόβαθρο
- 2. Συγχρονισμένες μετρήσεις και Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών
- 3. Ανάλυση και Αποκατάσταση Παρατηρησιμότητας Συστήματος
- 4. Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών
- 5. Εκτίμηση Κατάστασης Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

6. Συμπεράσματα και Προοπτικές της Εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία παρουσίαση και ανάλυση της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων και των μονάδων μέτρησης φασιθετών. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μέθοδοι ανάλυσης και αποκατάστασης της παρατηρησιμότητας οι οποίες χρησιμοποιούν το μοντέλο μειωμένης τάξης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μέθοδοι αυτές υποθέτουν την ύπαρξη ενός μετρητικού συστήματος το οποίο αποτελείται τόσο από συμβατικές όσο και από μετρήσεις προερχόμενες από PMU ή μόνον από μετρήσεις PMU, ή από μετρήσεις PMUs και μηδενικές εγχύσεις εκπεφρασμένες ως ισοτικοί περιορισμοί. Η αποκατάσταση γίνεται χρησιμοποιώντας μετρήσεις εγχύσεων ή μετρήσειςν προερχόμενες από PMUs στη δεύτερη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τρείς μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων PMU. παρουσιάζονται τέσσερις μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων PMU. Οι δύο πρώτες είναι πρακτικές μέθοδοι τοποθέτησης PMUs, λαμβάνοντας ή μη την ύπαρξη μηδενικών εγχύσεων. Η τρίτη μέθοδος ανήκει στις αριθμητικές μεθόδους τοποθέτησης θεωρώντας δίκτυα με ή χωρίς συμβατικές μετρήσεις ροών και εγγύσεων. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές εκτίμησης κατάστασης. Αρχικά, παρουσιάζεται μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί μεικτά συστήματα μετρήσεων αποτελούμενα από μετρήσεις SCADA και PMU και συνοδεύεται από μια διαδικασία ανίχνευσης και εσφαλμένων μετρήσεων. Στη συνέχεια, προτείνονται μέθοδοι που χρησιμοποιούν εντοπισμού μοντέλα αποτελούμενα μόνον από μετρήσεις προερχόμενες από PMUs, ενώ περιλαμβάνουν και μηδενικές εγχύσεις οι οποίες μοντελοποιούνται ως ισοτικοί περιορισμοί. Οι μέθοδοι αυτές διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς την έκφραση των μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης σε πολικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες. Τέλος παρουσιάζονται μοντέλα εκτιμητών κατάστασης σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται μόνο συγχρονισμένες μετρήσεις και ψευδομετρήσεις έγχυσης, εάν αυτές υπάρχουν, ενώ στο δεύτερο στάδιο οι μεταβλητές κατάστασης του πρώτου σταδίου ενσωματώνονται ως μετρήσεις υψηλής ακρίβειας ή ως περιορισμοί ισότητας. Όλες οι δοκιμές προσομοίωσης των προτεινόμενων αλγορίθμων έχουν πραγματοποιηθεί σε υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB, χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή με επεξεργαστή Intel i5-750 και μνήμη RAM 4 GB.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Συγχρονισμένες Μετρήσεις και Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών

Η έννοια του φασιθέτη (phasor) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1893 σε μια δημοσίευση του Charles Proteus Steinmetz, που περιλάμβανε μαθηματικές τεχνικές για την ανάλυση δικτύων εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο φασιθέτης είναι ένα χρήσιμο και βολικό εργαλείο που βοηθά στην αναπαράσταση ενός ημιτονοειδούς σήματος. Χάριν σ' αυτόν είναι επίσης δυνατή η συσχέτιση ενός ημιτονοειδούς σήματος με άλλα. Η μέτρηση τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με την βοήθεια των συσκευών μέτρησης φασιθετών (PMUs). Αυτό το κεφάλαιο επικεντρώνεται κυρίως σε θέματα πρακτικής εφαρμογής των PMUs και αρχιτεκτονικής της συλλογής δεδομένων αλλά και διαχείρισης του συστήματος είναι απαραίτητα για την αποτελεσματική χρησιμοποίηση των δεδομένων που παρέχονται από τα PMUs.

2.1 Μαθηματική έκφραση φασιθέτη

Ο φασιθέτης (phasor) είναι μια έκφραση κάθε ποσότητας που διαθέτει μέτρο και φάση (ως προς μια αναφορά) και χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα ημιτονοειδές σήμα. Το μέτρο του φασιθέτη σχετίζεται με το πλάτος του σήματος. Η φάση (ή αλλιώς φασική γωνία) είναι η απόσταση ανάμεσα στην κορυφή του σήματος και σε μια ορισμένη αναφορά και έχει διαστάσεις γωνίας.

Ας θεωρήσουμε ένα καθαρά ημιτονοειδές σήμα το οποίο δίνεται από την έκφραση:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \tag{2.1}$$

όπου ω η κυκλική συχνότητα του σήματος σε rad/s, ϕ η φασική γωνία σε rad και X_m το πλάτος του σήματος. Η ενεργός τιμή (RMS) του σήματος είναι $X_m / \sqrt{2}$. Η εξίσωση (2.1) μπορεί να γραφεί και ως:

$$x(t) = \operatorname{Re}\left\{X_{m}e^{j(\omega t + \phi)}\right\} = \operatorname{Re}\left[\left\{e^{j(\omega t)}\right\}X_{m}e^{j\phi}\right]$$
(2.2)

Συνήθως στην παραπάνω έκφραση ο όρος $e^{j\omega t}$ παραλείπεται επειδή η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου θεωρείται σταθερή. Η ημιτονοειδής κυματομορφή (2.2) αναπαρίσταται με ένα μιγαδικό αριθμό X, γνωστό ως φασιθέτη:

$$x(t) \leftrightarrow X = \left(X_m / \sqrt{2}\right) e^{j\phi} = \left(X_m / \sqrt{2}\right) [\cos\phi + j\sin\phi] = \left(X_m / \sqrt{2}\right) \angle \phi$$
(2.3)

Σε περίπτωση παραμόρφωσης του σήματος από σήματα άλλων συχνοτήτων, πρέπει να προηγηθεί η εξαγωγή της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος για να ακολουθήσει η αναπαράσταση με φασιθέτη. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται κάνοντας χρήση μετασχηματισμών Fourier. Η αναπαράσταση του φασιθέτη τάσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.

2.2 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη

Ως συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη (synchrophasor) ορίζεται κάθε μέτρησή του η οποία φέρει μία χρονική σήμανση ή διαφορετικά μία χρονική σφραγίδα. Η μέτρηση αυτή εκφράζει την ενεργό τιμή και την φασική γωνία ενός ημιτονοειδούς σήματος ως προς μια απόλυτη χρονική στιγμή. Η φασική γωνία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[-\pi, \pi]$, ενώ η συχνότητα θεωρείται σταθερή κατά τη στιγμή της μέτρησης.



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση φασιθέτη τάσης

Στην πράξη, η συχνότητα του δικτύου ενδεχομένως να παρουσιάζει μία ελαφρά διακύμανση λόγω των μεταβολών στη ζήτηση. Επομένως για τον ακριβή υπολογισμό της φασικής γωνίας, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συχνότητα του δικτύου κατά τη στιγμή της μέτρησης.

2.3 Μονάδα Μέτρησης Φασικής Γωνίας

Τη διετία 1987 – 1988, το Πανεπιστήμιο Virginia Tech συνεργάστηκε από κοινού με την εταιρεία American Electric Power (AEP) με σκοπό την κατασκευή μιας συσκευής λήψης και επεξεργασίας συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Καρπός αυτής της συνεργασίας ήταν η Μονάδα Μέτρησης Φασικής Γωνίας (PAMU), η οποία αργότερα ονομάστηκε Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών (PMU). Οι πρώτες μονάδες αποτελούνταν από ένα πλαίσιο VME, ένα τροφοδοτικό, έναν Α/D μετατροπέα 16 καναλιών ο οποίος είχε συχνότητα δειγματοληψίας 720 Ηz και ενεργοποιείτο με τη βοήθεια ενός ρολογιού GPS, έναν προσαρμογέα σήματος, και ένα αντιαναδιπλωτικό φίλτρο. Οι μετρήσεις μεταδίδονταν από τον υποσταθμό σε μια κεντρική τοποθεσία σε δυαδική μορφή μέσω ενός διαύλου 4800 bps και με ρυθμό 12 πακέτα ανά δευτερόλεπτο.

Με σκοπό το συγχρονισμό των δεδομένων, το κάθε πακέτο έπρεπε να περιέχει και μια χρονική σήμανση ή «χρονική σφραγίδα», όπως έχει επικρατήσει. Η πρώτη «χρονική σφραγίδα» ακολουθούσε το μορφότυπο «Έτος - Μήνας - Ημέρα - Ώρα - Λεπτό - Δευτερόλεπτο - Δείγμα». Αργότερα όμως, για λόγους ευκολίας ταξινόμησης των μετρήσεων, υιοθετήθηκε το μορφότυπο «δευτερόλεπτο του αιώνα» (SOC) του Network Time Protocol, το οποίο ήταν ένας μετρητής δευτερολέπτων με εκκίνηση την 1^η Ιανουαρίου 1970.

Τα δεδομένα των μετρήσεων που μεταδίδονταν από τις εγκατεστημένες στους υποσταθμούς μονάδες, συγκεντρώνονταν σε έναν υπολογιστή (αρχικά PDP 11/73, αργότερα DEC MicroVAX) που ήταν εξοπλισμένος με πολλές σειριακές θύρες και ένα σκληρό δίσκο χωρητικότητας 100 MB. Το σύστημα αυτό, που εμπνεύστηκε και υλοποίησε ο Paul Sorenson, αποτέλεσε τον πρώτο Συγκεντρωτή Δεδομένων Φασιθετών (PDC).

2.4 Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών

Πρόγονος της μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) ήταν ο ηλεκτρονόμος απόστασης συμμετρικών συνιστωσών, ο οποίος μετεξελίχθηκε στον ψηφιακό ηλεκτρονόμο, βάσει του οποίου έχει σχεδιαστεί η μονάδα PMU. Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται, διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή σε πολλά σημεία. Επομένως είναι δύσκολο να παρουσιάσουμε την διάταξη του υλικού που περιλαμβάνει με έναν ενιαίο τρόπο. Όμως, είναι δυνατό να παρουσιάσουμε μία γενική μονάδα PMU, η οποία θα βοηθήσει στο να κατανοήσουμε την βασική δομή της. Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει την δομή των πρώτων μονάδων PMU, η οποία προσομοιάζει με αυτή του ψηφιακού ηλεκτρονόμου. Οι αναλογικές είσοδοι είναι ρεύματα και τάσεις που προέρχονται από τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος. Οι τριφασικές τάσεις και ρεύματα χρησιμοποιούνται για να εξαχθούν οι μετρήσεις θετικής ακολουθίας. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτρονόμο, η μονάδα PMU μπορεί να παρέχει τα ρεύματα και τις τάσεις σε διάφορες παροχές και ζυγούς ενός υποσταθμού.



Σχήμα 2.2 Βασική δομή μονάδας ΡΜU

Τα σήματα τάσεων και ρευμάτων μετατρέπονται σε τάσεις μέσω μετασχηματιστών μέτρησης (τυπικά με ένα εύρος ±10V), ώστε να εναρμονίζονται με τις απαιτήσεις των A/D μετατροπέων. Ο ρυθμός δειγματοληψίας που επιλέγεται για τη διαδικασία δειγματοληψίας καθορίζει την απόκριση συχνότητας των φίλτρων αντιαναδίπλωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά είναι αναλογικού τύπου φίλτρα με συχνότητα αποκοπής μικρότερη του μισού της συχνότητας δειγματοληψίας, έτσι ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο του Nyquist. Όπως σε πολλά σχήματα προστασίας [10], μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας με αντίστοιχα υψηλή συχνότητα αποκοπής. Αυτό το βήμα ακολουθείται από ένα ψηφιακό βαθυπερατό φίλτρο που μετατρέπει τα δεδομένα σε ένα χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας, παρέχοντας έτσι ένα ψηφιακό φίλτρο αντιαναδίπλωσης που συνάδει με τα αναλογικά φίλτρα αντιαναδίπλωσης. Η συχνότητα δειγματοληψίας κυμαίνεται από 12 δείγματα ανά κύκλο της ονομαστικής συχνότητας δικτύου για τις πρώτες μονάδες PMU μέχρι 128 δείγματοληψίας θα οδηγήσουν, μελλοντικά, σε ακόμη πιο ακριβείς εκτιμήσεις φασιθετών [10].

Ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει τις εκτιμήσεις θετικής ακολουθίας όλων των σημάτων ρεύματος και τάσης χρησιμοποιώντας τον Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (DFT). Άλλες ενδιαφέρουσες εκτιμήσεις, όπως της συχνότητας και του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας που μετράται τοπικά,

συμπεριλαμβάνονται επίσης στην έξοδο της μονάδας PMU. Κάθε μέτρηση που παράγεται πρέπει να συνοδεύεται από μια χρονική σφραγίδα, την οποία ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει από δύο σήματα του δέκτη GPS.

Στο τελευταίο τμήμα βρίσκεται η διεπαφή του επικοινωνιακού συστήματος. Αυτή μπορεί να είναι ένας διαποδιαμορφωτής (modem) με έξοδο για τηλεφωνικό καλώδιο ή ένας δρομολογητής (router) με έξοδο για καλώδιο Ethernet. Οι χρονικά προσδιορισμένες μετρήσεις που παράγει η μονάδα PMU μπορεί να αποθηκεύονται τοπικά ή να μεταδίδονται μέσω μιας τηλεπικοινωνιακής ζεύξης (π.χ. δίκτυο Ethernet, οπτικές ίνες) σε ένα κεντρικό σταθμό συλλογής μετρήσεων.

Ένα βασικό τμήμα της μονάδας PMU, που τη διαχωρίζει από τον ψηφιακό ηλεκτρονόμο, είναι το τμήμα χρονισμού, που περιλαμβάνει το δέκτη GPS, την κεραία του και τον κρυσταλλικό ταλαντωτή. Ο συνδυασμός των στοιχείων αυτών παρέχει στη μονάδα μια αξιόπιστη χρονική αναφορά. Το τμήμα χρονισμού χρησιμοποιείται τόσο από το μετατροπέα A/D για τη δειγματοληψία των σημάτων όσο και από το μικροεπεξεργαστή για την ενσωμάτωση της χρονικής σφραγίδας στις μετρήσεις. Για την πρώτη διαδικασία ο κρυσταλλικός ταλαντωτής μετατρέπει το σήμα 1PPS, που παράγεται από το δέκτη GPS, σε μια παλμοσειρά υψηλής συχνότητας που χρησιμοποιείται από το μετατροπέα A/D για τη δειγματοληψία. Μάλιστα το ρολόϊ δειγματοληψίας είναι κλειδωμένο ως προς τη φάση με το ρολόϊ του δέκτη GPS. Για τη δεύτερη διαδικασία ο δέκτης GPS στέλνει την ακριβή χρονική πληροφορία στο μικροεπεξεργαστή για να κατασκευαστεί η χρονική σφραγίδα. Ο ακριβής χρόνος παράγεται ως εξής: το σύστημα GPS δίνει τον ακριβή χρόνο GPS στους δέκτες, αυτοί το μετατρέπουν σε χρόνο UTC και σε συνδυασμό με το σήμα 1PPS που παράγουν, δημιουργούν τελικά το δευτερόλεπτο του αιώνα (SOC), το οποίο αποστέλλεται στο μικροεπεξεργαστή.

2.5 Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης

Απαραίτητη προϋπόθεση για το συγχρονισμό των PMUs είναι η ύπαρξη ενός παγκόσμιου δορυφορικού συστήματος πλοήγησης (GNSS). Τα συστήματα αυτά αναπτύχθηκαν και εξελίχθηκαν κατά την διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου. Κάθε τέτοιο σύστημα αποτελείται από τρεις βασικούς τομείς. Αυτοί είναι οι εξής:

- Τομέας διαστήματος
- Τομές Ελέγχου
- Τομέας τελικού χρήστη

Ο τομέας διαστήματος αποτελείται από τους δορυφόρους οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε διαφορετικά τροχιακά επίπεδα και με διαφορετική τροχιακή κλίση. Αυτή η διάταξη των δορυφόρων διασφαλίζει ότι τουλάχιστον 6 από αυτούς θα είναι ορατοί σχεδόν από κάθε σημείο της επιφάνειας της γης. Οι υπόλοιποι πλεονάζοντες δορυφόροι λειτουργούν επικουρικά για αυξημένη ακρίβεια χωρικών συντεταγμένων.

Το τμήμα ελέγχου περιλαμβάνει τις επίγειες εγκαταστάσεις που παρέχουν υπηρεσίες τηλεμετρίας, ιχνηλάτησης, διοίκησης και ελέγχου, επιτήρησης των δορυφόρων, υπολογισμού αστρονομικής εφημερίδας και αναβίβασης δεδομένων. Αποτελείται από έναν κύριο και έναν εφεδρικό σταθμό ελέγχου που σκοπό έχουν την υλοποίηση όλων των διαστημικών επιχειρήσεων, όπως κινήσεις ελιγμού των δορυφόρων, κρυπτογράφηση σήματος, χρονισμό δορυφόρων κ.α. Επίσης περιλαμβάνει τους σταθμούς επιτήρησης που παρακολουθούν συνεχώς τις κινήσεις των δορυφόρων, ενώ ταυτόχρονα συλλέγουν και αποστέλλουν τα δεδομένα ιχνηλάτησης και τις επίγειες κεραίες με δυνατότητα συλλογής δεδομένων τηλεμετρίας και αναβίβασης εντολών και δεδομένων στους δορυφόρους.

Το τμήμα τελικού χρήστη αποτελείται από τέσσερις βασικές κατηγορίες χρηστών, ανάλογα με το είδος των εφαρμογών που αυτοί χειρίζονται. Έτσι ορισμένες εκατοντάδες χιλιάδες είναι στρατιωτικοί, ενώ δεκάδες εκατομμύρια είναι εμπορικοί χρήστες, επιστήμονες ή απλοί πολίτες, αντίστοιχα. Αυτή τη

στιγμή, τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα που βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία ή ακόμη εξελίσσονται είναι τα ακόλουθα:

- GPS (Global Positioning System). Το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS), αναπτύσσεται και συντηρείται από την πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ. Με βάση τα δεδομένα του 2011 περιλαμβάνει 32 ενεργούς δορυφόρους σε τροχιά. Οι περισσότεροι δέκτες GPS παράγουν ένα χρονικό παλμό που ονομάζεται «ένας παλμός ανά δευτερόλεπτο» (1PPS). Είναι το βασικό σύστημα που χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των μονάδων PMU.
- GLONASS (GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). Το δορυφορικό σύστημα GLONASS, βρίσκεται υπό την εποπτεία και διαχείριση του ρωσικού στρατού. Από το 2010 επετεύχθη η πλήρης κάλυψη της ρωσικής επικράτειας. Με τα δεδομένα του 2011, το σύστημα αποτελείται από 23 εν λειτουργία δορυφόρους, με προοπτική να αυξηθούν σε 24 ώστε να παρέχεται συνεχής παγκόσμια κάλυψη.
- GALILEO. Αποτελεί το εν εξελίξει σύστημα GNSS της Ευρωπαϊκής Ένωσης το οποίο διαχειρίζεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA). Σε πρώτη φάση το σύστημα θα αποτελείται από 18 δορυφόρους που θα τεθούν σε τροχιά μέχρι το 2015 και σε τελική φάση θα φτάσει στο σύνολο των 30 δορυφόρων. Το Galileo θα συνυπάρχει με τα προαναφερθέντα συστήματα, όμως η χρήση του θα υπόκειται σε πολιτικό και όχι στρατιωτικό έλεγχο.
- COMPASS. Το σύστημα αυτό, είναι η κινεζική εκδοχή στα συστήματα GNSS. Αποτελεί εξέλιξη του τοπικού δορυφορικού συστήματος πλοήγησης BeiDou-1, το οποίο καλύπτει αποκλειστικά την κινεζική επικράτεια, και είναι γνωστό και ως BeiDou-2. Στην τελική του μορφή θα περιλαμβάνει ένα σύνολο 35 δορυφόρων. Προγραμματίζεται να λειτουργήσει μέσα στο 2012 για την περιοχή Ασίας Ειρηνικού και εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί το 2020, οπότε και θα προσφέρει παγκόσμια κάλυψη.

2.6 Ιεραρχία συστημάτων μετρήσεως φασιθετών

Οι μονάδες PMU εγκαθίστανται στους υποσταθμούς των ηλεκτρικών συστημάτων. Η επιλογή των υποσταθμών εξαρτάται από το σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις που παρέχονται από τις μονάδες. Η βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs θα αναλυθεί εκτενώς σε επόμενο κεφάλαιο.

Στην πλειονότητα των εφαρμογών, τα δεδομένα των φασιθετών χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές περιοχές απ' αυτές που βρίσκονται οι μονάδες PMU. Έτσι πρέπει να υπάρξει μια αρχιτεκτονική δομή που να περιλαμβάνει τις μονάδες PMU, τα κανάλια επικοινωνίας και τους συγκεντρωτές των δεδομένων, ώστε να αποκομίσουμε το μέγιστο δυνατό όφελος από το μετρητικό σύστημα PMU. Μια γενικά αποδεκτή αρχιτεκτονική δομή ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.

Οι μονάδες PMU είναι τοποθετημένες στους υποσταθμούς και παρέχουν χρονικά σημασμένες μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων θετικής ακολουθίας (όπως επίσης και συχνότητας αλλά και ρυθμού μεταβολής της συχνότητας). Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε τοπικές συσκευές αποθήκευσης δεδομένων, στις οποίες μπορούμε να έχουμε πρόσβαση από απομακρυσμένες θέσεις για διαγνωστικούς σκοπούς. Η τοπική χωρητικότητα αποθήκευσης είναι απαραιτήτως περιορισμένη, και τα αποθηκευμένα δεδομένα που αναφέρονται σε ένα σημαντικό γεγονός που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρικό σύστημα πρέπει οπωσδήποτε να σημανθούν, έτσι ώστε να αποθηκευτούν μόνιμα και να αποφεύγεται η επικάλυψη τους όταν εξαντλείται η τοπική χωρητικότητα αποθήκευσης.

Τα δεδομένα μετρήσεων φασιθετών είναι διαθέσιμα σε συνεχή ροή για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Σε περίπτωση που εκτελούνται εφαρμογές στο σημείο της εγκατάστασης τα δεδομένα μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν τοπικά. Ωστόσο, η αποτελεσματική αξιοποίησή τους γίνεται σε ένα ανώτερο επίπεδο όπου είναι διαθέσιμο ένα πλήθος δεδομένων προερχόμενο από διάφορες μονάδες PMU.



Σχήμα 2.3 Ιεραρχία του μετρητικού συστήματος φασιθετών και επίπεδα των συγκεντρωτών δεδομένων φασιθετών

Οι συσκευές στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας είναι ευρέως γνωστές ως Συγκεντρωτές Δεδομένων Φασιθετών (PDCs). Η χαρακτηριστικότερη λειτουργία των PDCs είναι να συγκεντρώνουν τα δεδομένα από τα διάφορα PMUs, να απορρίπτουν τα εσφαλμένα δεδομένα, να ευθυγραμμίζουν τις χρονικές σφραγίδες, και να δημιουργούν ένα ακριβές αρχείο των ταυτοχρόνως καταγεγραμμένων δεδομένων ενός μεγαλύτερου τμήματος του ηλεκτρικού συστήματος. Στους PDCs υπάρχουν υποδομές για τοπική αποθήκευση των δεδομένων καθώς επίσης και τοπικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου που απαιτούν την άμεση πρόσβαση στα δεδομένα των PMUs που έχουν συγκεντρωθεί σε αυτούς.

Σε ένα σύστημα μεγαλύτερης κλίμακας, μπορεί κανείς να διακρίνει ένα ακόμη επίπεδο στην ιεραρχία. Αυτό είναι ο Υπερ Συγκεντρωτής Δεδομένων Φασιθετών (Super PDC). Σε αυτό το ανώτατο επίπεδο ιεραρχίας εκτελούνται λειτουργίες παρόμοιες με αυτές του επιπέδου PDC. Συγκεκριμένα υπάρχουν υποδομές για αποθήκευση δεδομένων φασιθετών που έχουν περάσει από τη διαδικασία ευθυγράμμισης και εφαρμογές που λαμβάνουν ως είσοδο μια σταθερή ροή δεδομένων πραγματικού χρόνου από όλο το σύστημα. Υπό μια ευρεία οπτική γωνία ο Super PDC είναι ένας κεντρικός PDC που συλλέγει και συσχετίζει δεδομένα φασιθετών από όλους τους PDC και παρέχει πλήρη εποπτεία του συστήματος με τη χρήση λογισμικού οπτικοποίησης.

2.7 Λειτουργικές απαιτήσεις PMUs και PDCs

2.7.1 Εξέλιξη προτύπου συγχρονισμένων φασιθετών

Προκειμένου να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ μονάδων PMUs που προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές, είναι σημαντικό όλα τα PMUs να αναφέρονται σε ένα κοινό πρότυπο.

Η αναφορά [11] παρουσιάζει το τρέχον πρότυπο του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) που καθορίζει τις απαιτήσεις των PMUs.

Το 1995 εκδόθηκε για πρώτη φορά το πρότυπο IEEE 1344 [12] για τους συγχρονισμένους φασιθέτες και επικυρώθηκε ξανά το 2001. Τα PMUs της πρώτης γενιάς που βασίζονταν σε αυτά τα πρότυπα εξετάστηκαν ως προς τη διαλειτουργικότητα και ανακαλύφθηκε ότι η απόδοσή τους, εκτός ονομαστικής συχνότητας, δεν ήταν ίδια [13]. Από άποψη διαλειτουργικότητας του εξοπλισμού, αυτό δεν ήταν αποδεκτό. Σύντομα διαπιστώθηκε ότι τα τότε υπάρχοντα πρότυπα [13] δεν ήταν αρκετά σαφή σε ότι αφορά το θέμα των απαιτήσεων απόδοσης για την απόκριση των PMUs εκτός ονομαστικών συχνοτήτων. Μια ομάδα εργασίας της Επιτροπής Προστασίας Ηλεκτρικών Συστημάτων του IEEE ανέλαβε την αναθεώρηση του προηγούμενου προτύπου, και το αποτέλεσμα είναι το τρέχων πρότυπο IEEE C37.118 [14], το οποίο ρύθμισε θέματα που αφορούν στη χρήση των μονάδων PMU στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προδιαγραφές περιγράφουν τα πρότυπα μετρήσεων, τη μέθοδο ποσοτικοποίησης των μετρήσεων, τις απαιτήσεις δοκιμών και πιστοποίησης για εξασφάλιση ακρίβειας, το μορφότυπο μετάδοσης δεδομένων και το πρωτόκολλο μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο.

Άλλα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στη διασύνδεση των μονάδων PMU είναι:

- OPC-DA / OPC-HAD. Πρωτόκολλο διασύνδεσης βασισμένο στο λειτουργικό Microsoft Windows που τροποποιείται, ώστε να χρησιμοποιεί XML και να τρέχει σε υπολογιστές που δεν χρησιμοποιούν Windows.
- IEC 61850. Πρότυπο για αυτοματοποίηση των ηλεκτρικών υποσταθμών.
- BPA PDC Stream. Αποτελεί παραλλαγή του προτύπου IEEE 1344, η οποία χρησιμοποιείται από τη δημόσια επιχείρηση Bonneville Power Administration (BPA).

Με σκοπό τον καθορισμό των μετρήσεων για όλες τις συνθήκες, ακόμη και για δυναμικές μεταβολές του συστήματος, βρίσκεται σε εξέλιξη μία αναθεώρηση του υπάρχοντος προτύπου ΙΕΕΕ C37.118 [14]. Το πρότυπο έχει χωριστεί σε δύο μέρη [15], εκ των οποίων το ένα αφορά τις μετρήσεις και το άλλο την ανταλλαγή δεδομένων, ώστε να εναρμονιστεί με το ΙΕC 61850.

2.7.2 Δομή αρχείου συγχρονισμένης μέτρησης

Η δομή αρχείων για συγχρονισμένους φασιθέτες είναι παρόμοια με την δομή COMTRADE [16], η οποία καθορίζει τα αρχεία για την συλλογή και διάδοση μεταβατικών δεδομένων. Το πρότυπο COMTRADE έχει υιοθετηθεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) και αποτελεί το θεμελιώδες διεθνές μορφότυπο αρχείου που χρησιμοποιείται από τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους, τους ψηφιακούς καταγραφείς σφαλμάτων, και άλλους παραγωγούς και χρήστες μεταβατικών δεδομένων του ηλεκτρικού συστήματος.

Το πρότυπο συγχρονισμένων φασιθετών IEEE C37.118 καθορίζει τέσσερις τύπους αρχείων για τη μετάδοση δεδομένων προς και από τις μονάδες PMUs. Οι τρείς από αυτούς, δηλαδή τα αρχεία επικεφαλίδας, τα αρχεία ρυθμίσεων και τα αρχεία δεδομένων, δημιουργούνται από τις μονάδες PMU και αποστέλλονται προς τα ανώτερα επίπεδα. Ένας τέταρτος τύπος, τα αρχεία εντολών, δημιουργούνται από σταθμούς PDC και αποστέλλονται στις μονάδες PMU, ακολουθούν δηλαδή την αντίθετη φορά. Όλα τα αρχεία έχουν μια κοινή δομή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

Η πρώτη λέξη μεγέθους 2 bytes σχετίζεται με το συγχρονισμό της μεταφοράς δεδομένων. Η δεύτερη λέξη ορίζει το μέγεθος της συνολικής εγγραφής, η τρίτη λέξη αναγνωρίζει κατά μοναδικό τρόπο την πηγή των δεδομένων και οι επόμενες δύο λέξεις παρέχουν το δευτερόλεπτο του αιώνα (SOC) και το κλάσμα δευτερολέπτου (FRACSEC), κατά το οποίο παράγονται τα δεδομένω. Το μήκος των λέξεων των δεδομένων που ακολουθούν την δομή FRACSEC εξαρτάται από τις προδιαγραφές που καθορίζονται στο αρχείο ρυθμίσεων. Η τελευταία λέξη είναι το άθροισμα ελέγχου, που βοηθά στον προσδιορισμό πιθανών σφαλμάτων κατά τη μετάδοση.



Σχήμα 2.4 Δομή αρχείων ΡΜU

Το αρχείο επικεφαλίδας είναι ένα αρχείο αναγνώσιμο από τον άνθρωπο και περιέχει πληροφορίες που ο αποστολέας των δεδομένων θα ήθελε να κοινοποιήσει στον αποδέκτη. Τα αρχεία ρυθμίσεων και δεδομένων είναι αρχεία αναγνώσιμα από τη μηχανή, με συγκεκριμένη δομή. Το αρχείο ρυθμίσεων δίνει πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που περιέχονται στα αρχεία δεδομένων. Στην πράξη τα αρχεία επικεφαλίδας και ρυθμίσεων αποστέλλονται από τη μονάδα PMU όταν καθορίζεται για πρώτη φορά η φύση των δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν. Τα αρχεία δεδομένων περιέχουν δεδομένα φασιθετών και άλλες μετρήσεις, όπως συχνότητα και ρυθμό μεταβολής της συχνότητας, που παράγονται στην έξοδο των μονάδων PMU. Τα δεδομένα φασιθετών καταγράφονται στο αρχείο σε καρτεσιανή ή πολική μορφή. Τα αρχεία εντολών χρησιμοποιούνται από τα ανώτερα επίπεδα ιεραρχίας για τον έλεγχο της απόδοσης των μονάδων PMU. Αρκετές εντολές έχουν καθοριστεί και είναι διαθέσιμες αυτή τη στιγμή, ενώ κάποιες άλλες είναι εφεδρικές σε περίπτωση που χρειαστούν στο μέλλον.

2.8 Πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων

Για τη σωστή λειτουργία των μονάδων PMU και τον ακριβή χρονικό προσδιορισμό των μετρήσεων είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός των μονάδων. Οι κυριότερες μέθοδοι συγχρονισμού βασίζονται στα πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων 1PPS και IRIG-B.

2.8.1 Πρότυπο 1PPS

Το σήμα 1PPS είναι ένας τετραγωνικός παλμός συχνότητας 1Hz που έχει τη θετική του ακμή συγχρονισμένη με την έναρξη ενός δευτερολέπτου του χρόνου GPS. Οι μονάδες PMU που διαθέτουν ενσωματωμένο δέκτη GPS χρησιμοποιούν άμεσα το σήμα 1PPS, που παράγεται από αυτόν, για να συγχρονίσουν τη δειγματοληψία με την αρχή ενός δευτερολέπτου GPS. Ακόμη, ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (δείγματα ανά δευτερόλεπτο) ορίζεται ένα διάστημα που αντιστοιχεί σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου GPS. Έτσι οι μονάδες PMU μεταδίδουν τις μετρήσεις τους συγχρονισμένες με το χρόνο GPS σε διαστήματα κλασμάτων του δευτερολέπτου. Για παράδειγμα, με ένα ρυθμό μετάδοσης 30 δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο, οι μετρήσεις θα μεταδίδονται κατά την έναρξη κάθε δευτερολέπτου και κάθε 1/30 s μεταξύ διαδοχικών δευτερολέπτων.

Η ακρίβεια του παλμού 1PPS εξαρτάται από το εσωτερικό ρολόϊ του δέκτη GPS. Το τυπικό σφάλμα για έναν παλμό 1PPS είναι μερικές δεκάδες νανοδευτερόλεπτα και εξαρτάται από την ποιότητα των μετρήσεων των σημάτων GPS. Επιπλέον, ο παλμός επηρεάζεται από το μήκος του καλωδίου της κεραίας. Το τελευταίο μπορεί να διορθωθεί με ρύθμιση μιας παραμέτρου που μετατοπίζει τον παλμό κατά μια χρονική σταθερά.

2.8.2 Πρότυπο IRIG-B

Όσες μονάδες PMU δεν διαθέτουν ενσωματωμένο δέκτη GPS χρειάζονται μια σύνδεση IRIG-B. Το IRIG-B είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων σε υποσταθμούς ηλεκτρικών δικτύων. Η τελευταία έκδοση του προτύπου είναι το IRIG 200-04 που δημοσιεύτηκε το 2004.

Το πρότυπο IRIG ορίζει μια οικογένεια κωδίκων χρόνου (A, B, D, E, G, H), οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη συχνότητα παλμών που κυμαίνεται από 1 έως 10000 PPS. Υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη παλμών που αντιστοιχούν στο 20% της περιόδου (δυαδικό 0), στο 50% της περιόδου (δυαδικό 1) και στο 80% της περιόδου (δείκτης θέσης P). Ο κώδικας, αναλυτικά, αποτελείται από το μορφότυπο του κώδικα (A, B, D, E, G, H) και τρεις διαδοχικούς αριθμούς αναγνώρισης οι οποίοι εκφράζουν το είδος διαμόρφωσης, τη συχνότητα φέροντος κύματος και κάποιες κωδικοποιημένες παραστάσεις, αντίστοιχα. Ο κώδικας χρόνου IRIG-B είναι διαδεδομένος στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και έχει συχνότητα 100 PPS.

Το σήμα IRIG-B μπορεί να μεταδοθεί είτε αδιαμόρφωτο (DCLS), οπότε είναι περισσότερο ακριβές αλλά κατάλληλο μόνο για μικρές αποστάσεις (μέχρι 100 m περίπου), είτε διαμορφωμένο κατά πλάτος με ημιτονικό φέρον (συχνότητας 1kHz συνήθως), οπότε μπορεί να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις, αλλά η ακρίβεια μειώνεται από 0,1 ms μέχρι αρκετά ms (τιμές που δεν πληρούν τις προδιαγραφές ενός συστήματος PMU), είτε διαμορφωμένο με κωδικοποίηση Manchester όπου το φέρον κύμα είναι τετραγωνικό. Η τελευταία κωδικοποίηση δίνει μεγάλη ακρίβεια χάρη στον τετραγωνικό παλμό του φέροντος κύματος και προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις, άρα πλεονεκτεί έναντι των άλλων δύο. Παρά τα πλεονεκτήματα της, δε χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές PMU.

2.9 Σύγκριση τεχνολογίας PMU και SCADA

Τα τελευταία χρόνια, παρά την ευρεία χρήση των συστημάτων SCADA/EMS, έχουν ανακύψει διάφορα προβλήματα κατά τις μεγάλες διακοπές ρεύματος που συνέβησαν στον κόσμο, όπως τον Αύγουστο του 1996 στη Δυτική Διασύνδεση των Η.Π.Α., τον Αύγουστο του 2003 στην Ανατολική Διασύνδεση των Η.Π.Α. και το καλοκαίρι του 2003 και του 2004 στην Ευρώπη. Η διερεύνηση των περιστατικών αυτών κατέληξε στα ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά με τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας:

- Έλλειψη εποπτείας ευρείας περιοχής
- Έλλειψη συγχρονισμένων δεδομένων
- Αδυναμία παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικό χρόνο

Η τεχνολογία των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών μπορεί να λύσει αυτά τα προβλήματα. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από τις μονάδες PMU σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που τους προσδίδουν μεγάλη αξία σε σχέση με τις συμβατικές μετρήσεις ενός συστήματος SCADA.

Ένα βασικό πλεονέκτημα των μετρήσεων PMU είναι η ταχύτητα. Οι μονάδες PMU μετρούν τάση, ρεύμα και συχνότητα σε πολύ υψηλές ταχύτητες (τυπικά 20 ή 30 ή 60 παρατηρήσεις ανά δευτερόλεπτο) σε σχέση με ένα σύστημα SCADA, όπου το δίκτυο σαρώνεται κάθε 2 δευτερόλεπτα ή πιο αραιά. Η τεχνολογία PMU εγγυάται ότι η πραγματική κατάσταση του συστήματος μεταφοράς μπορεί να μετρηθεί λεπτομερώς με ταχύτητα ανάλογη της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων. Με τα σημερινά δεδομένα, ο προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος απαιτεί χρόνο μερικών δευτερολέπτων για τη λήψη μετρήσεων και χρόνο της τάξης των δεκάδων δευτερολέπτων για τον υπολογισμό της κατάστασης (εκτέλεση αλγόριθμου). Μια ενδεχόμενη μείωση των παραπάνω χρόνων θα επέτρεπε την ακριβή εκτίμηση των δυναμικών καταστάσεων του συστήματος. Έτσι οι χειριστές θα είχαν στη διάθεσή τους μια άμεση εικόνα της κατάστασης του συστήματος σχεδόν σε πραγματικό
χρόνο. Με την προϋπόθεση αυτή θα ήταν εφικτός ο έλεγχος της ευστάθειας του συστήματος και θα υπήρχε άμεση απόκριση σε καταστάσεις ανάγκης.

Επιπλέον τα δεδομένα των PMU διαθέτουν χρονική σφραγίδα, δηλαδή μια χρονική τιμή μεγάλης ακρίβειας που παράγεται στο σημείο της μέτρησης από ένα δέκτη GPS. Η χρονική πληροφορία ενσωματώνεται στα δεδομένα, έτσι ώστε οι μετρήσεις που λαμβάνονται από διαφορετικές περιοχές ή από διαφορετικούς ιδιοκτήτες ηλεκτρικών δικτύων να μπορούν να συγχρονιστούν και να ταξινομηθούν χρονικά στον κεντρικό σταθμό. Όλες οι μετρήσεις PMU με την ίδια χρονική σφραγίδα χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί η κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη στιγμή που ορίζεται από τη σφραγίδα. Με αυτό τον τρόπο η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων στα κανάλια επικοινωνίας δεν είναι πλέον σημαντική παράμετρος. Σε ένα σύστημα SCADA αυτό δεν είναι εφικτό, αφού εκεί τα δεδομένα των μετρήσεων ταξινομούνται με βάση το χρόνο άφιξης στον κεντρικό σταθμό, ο οποίος διαφέρει ανάλογα με την απόσταση που διανύουν τα δεδομένα.

Χαρακτηριστικό	SCADA	PMU					
Μετρήσεις	Αναλογικές	Ψηφιακές					
Ανάλυση	2-4 δείγματα ανά δευτερόλεπτο	Μέχρι 60 δείγματα ανά δευτερόλεπτο					
Ορατότητα	Μόνιμη κατάσταση	Μόνιμη και Δυναμική - Μεταβατική κατάσταση					
Εποπτεία	Τοπική	Ευρείας περιοχής					
Μέτρηση φασικής γωνίας	Όχι	Ναι					
Μετρούμενες ποσότητες	Μέτρο τάσης (RMS), MW, MVAr	Μέτρο τάσης (RMS), MW, MVAr, Φασική απόκλιση από την κοινή αναφορά, Συχνότητα, Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας					

Πίνακας 2.1 Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU

Η τεχνολογία PMU προσφέρει εποπτεία ευρείας περιοχής, αφού δίνει μια ακριβή και αναλυτική εικόνα μιας ολόκληρης διασύνδεσης. Ο ακριβής χρονισμός των μετρήσεων φασιθετών δίνει τη δυνατότητα αξιοποίησης των πληροφοριών πέρα από την περιοχή του ζυγού, όπου έγιναν οι μετρήσεις. Αυτό διευκολύνει τη κατανεμημένη τηλεπισκόπηση και την ανάληψη συντονισμένων δράσεων. Επιπλέον, η ευρεία εποπτεία και η ανάλυση των μετρήσεων επιτρέπει στους χειριστές να αναγνωρίζουν αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο, όπως το είδος και το μέγεθος της καταπόνησης, έτσι ώστε να βελτιώσουν την αξιοπιστία του. Το σύστημα SCADA, αντίθετα, σχεδιάστηκε για εποπτεία μιας περιορισμένης γεωγραφικά περιοχής και δε μπορεί να ανταποκριθεί στη σύγχρονη ανάγκη για έλεγχο ευρύτερων διασυνδέσεων.

Η αξιοποίηση των PMU στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει και οικονομικά οφέλη. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει αυξημένη ροή ισχύος στις ήδη υπάρχουσες γραμμές, γεγονός που αλλάζει τα δεδομένα στην οικονομία της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πληροφορίες από τις μονάδες PMU θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επιτρέπουν τη ροή ισχύος μέχρι το δυναμικό όριο μιας γραμμής μεταφοράς αντί για το όριο της χειρότερης περίπτωσης.

2.10 Πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση PMUs

Η χρησιμοποίηση μετρήσεων φασιθετών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει καταστεί αρκετά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Καθώς οι κατασκευαστές και οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας δείχνουν ενδιαφέρον για τη χρησιμοποίηση PMUs στα συστήματά τους, η επένδυση στα PMUs και τις εφαρμογές τους έχει αυξηθεί. Συνεπώς, η εφαρμογή των PMUs στα ηλεκτρικά συστήματα, όπως επίσης και η σχετική έρευνα πάνω σ' αυτά, λαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερη έκταση. Επειδή το πρόβλημα της χρησιμοποίησης PMUs σ' ένα ηλεκτρικό σύστημα για διάφορες νέες εφαρμογές διαρκώς εξελίσσεται, καθημερινά εισάγονται νέες μέθοδοι που αποσκοπούν στην παρακολούθηση και τον έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων. Αν και τα οφέλη από την χρήση των PMUs είναι πολύ περισσότερα από αυτά που παρατίθενται στη συνέχεια, τα πιο προφανή μπορούν να απαριθμηθούν ως εξής:

- Παρακολούθηση και έλεγχος του συστήματος σε πραγματικό χρόνο
- Βελτίωση της Εκτίμησης Κατάστασης (SE) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Διαχείριση της συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο
- Αξιολόγηση, επικύρωση και ακριβής συντονισμός των μοντέλων των συστημάτων
- Ανάλυση διαταραχών
- Επαναφορά συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- Έλεγχος υπερφόρτισης και δυναμική εκτίμηση
- Επιλεκτική Προστασία
- Προγραμματισμένη απομόνωση ηλεκτρικών συστημάτων

Ακολούθως, κάθε όφελος περιγράφεται εν συντομία.

2.10.1 Παρακολούθηση και έλεγχος σε πραγματικό χρόνο

Ο έλεγχος του συστήματος σε πραγματικό χρόνο παρέχει πληροφορίες του ηλεκτρικού συστήματος στο διαχειριστή του. Η επακριβής γνώση των τρεχουσών πληροφοριών του συστήματος αυξάνει την απόδοσή του υπό κανονικές συνθήκες και βοηθά το διαχειριστή του συστήματος να προσδιορίσει, να προβλέψει και να αντιμετωπίσει τις διαταραχές υπό μη κανονικές συνθήκες.

Σήμερα, τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS) βασίζονται στο αποτέλεσμα του εκτιμητή κατάστασης για την παρακολούθηση της ασφάλειας του συστήματος. Προς τούτο, απαιτούνται τόσο η τοπολογία του όσο και το σύστημα μετρήσεων το οποίο παρέχεται από το Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (SCADA). Ακόμη και στο ενδεχόμενο που οι μετρήσεις ακριβείας και η τοπολογία του συστήματος δεν είναι προσωρινά διαθέσιμα, στην ιδανική περίπτωση, η ανανέωση των δεδομένων και η επικοινωνία διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα.

Από την άλλη πλευρά, οι χρονικά συγχρονισμένες συσκευές είναι ικανές να μετρούν απ' ευθείας τις τάσεις θετικής ακολουθίας. Επομένως, εάν έχουμε αρκετά PMUs διασκορπισμένα σ' αυτό, μπορούμε να μετρήσουμε απ' ευθείας την κατάστασή του. Αν και η παρακολούθηση ενός συστήματος μόνον από PMUs δεν είναι προς το παρόν οικονομική, η σταδιακή εγκατάστασή τους μπορεί να αναδείξει τα οφέλη της χρήσης τους.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των PMUs έγκειται στο γεγονός πως στην περίπτωση ενός αναπάντεχου περιστατικού, τα PMUs είναι ικανά όχι μόνον να αποστέλλουν σήμα κινδύνου για να ενημερώνουν τον εσωτερικό χειριστή του συστήματος, αλλά έχουν και την ικανότητα αποστολής προειδοποιήσεων και στους χειριστές των γειτονικών συστημάτων ώστε να ενημερώνονται για τα αναπάντεχα αυτά γεγονότα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εγκαθιστώντας το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης στο γραφείο του χειριστή που θα ενεργοποιούσε τα σήματα κινδύνου. Αυτά θα ενεργοποιούντο σε περίπτωση παραβίασης των συνθηκών λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Η εκτός λειτουργίας κατάσταση και οι σχεδιαστικές μελέτες, οριοθετούνται βάσει ορισμένων υποθέσεων οι οποίες είναι συνήθως περιοριστικές, με σκοπό να αποτρέπουν την παραβίαση της συνθήκης λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Ένα ακόμη όφελος της παρακολούθησης των γωνιών φάσης σε πραγματικό χρόνο είναι ο καθορισμός τέτοιων ορίων για ένα εν λειτουργία ηλεκτρικό σύστημα. Η ικανότητα των PMUs να μετρούν άμεσα τις γωνίες φάσης του συστήματος επιτρέπει στο διαχειριστή του να μειώσει το περιθώριο σφάλματος και να λειτουργήσει το σύστημα μεταφοράς πιο κοντά στα πραγματικά όρια ευστάθειας του, διασφαλίζοντας ένα ικανοποιητικό επίπεδο ασφάλειας [17]. Ένα άμεσο αποτέλεσμα της λειτουργίας του συστήματος κοντά στα όρια ασφάλειας είναι ότι χαλαρώνει η απαίτηση για ακριβές επενδύσεις αναβάθμισης του υπάρχοντος συστήματος μεταφοράς [18]. Επίσης, η επίγνωση της πραγματικής κατάστασης του συστήματος ενισχύει την τοπική και ευρείας περιοχής προστασία του.

Ο έλεγχος και η ανίχνευση των διαταραχών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν το δυναμικό μοντέλο του συστήματος. Η βελτίωση του δυναμικού μοντέλου του συστήματος μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία και την ακρίβεια του αποτελέσματος των δυναμικών μελετών. Αυτά τα μοντέλα, στη συνέχεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην επιλογή της βέλτιστης στρατηγική θέσης των σταθεροποιητών των συστημάτων. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο μπορεί επίσης να βοηθήσει το χειριστή να αποτρέπει ενδεχόμενες διακοπές ρεύματος. Αν και οι διακοπές αυτές είναι ανάμεσα στα γεγονότα με πολύ μικρή πιθανότητα να συμβούν, θεωρούνται από τα δαπανηρότερα που μπορούν να συμβούν σ' ένα δίκτυο. Με σκοπό την αποκόμιση του μέγιστου δυνατού οφέλους από την παρακολούθηση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, απαιτούνται συγκεκριμένες μελέτες για την αποφυγή των διακοπών ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτές οι μελέτες περιλαμβάνουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των δικτύων όπως επίσης και την προβλεπόμενη ακρίβεια και αξιοπιστία της μεθόδου.

Η αστάθεια τάσης είναι επίσης ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα των ηλεκτρικών συστημάτων. Το σύμπτωμα για την αστάθεια τάσης μπορεί να είναι:

- το χαρακτηριστικά χαμηλό προφίλ της τάσης του συστήματος
- οι μεγάλες τιμές ροής αέργου ισχύος των γραμμών
- η υπερφόρτιση του δικτύου

Συνήθως, ένα από τα προαναφερθέντα συμπτωματικά γεγονότα, που μπορούν να διαρκέσουν από μερικά δευτερόλεπτα (s) έως αρκετά λεπτά (m) και ορισμένες φορές ακόμη και ώρες (h), ακολουθείται από κατάρρευση της τάσης [19]-[21]. Η κατάρρευση τάσης συνήθως ξεκινά από ένα ή πολλά απρόβλεπτα ενδεχόμενα τα οποία θεωρούνται χαμηλής πιθανότητας να συμβούν. Η παρακολούθηση της ευστάθειας της τάσης, απαιτεί συχνή και ακριβή ανάλυση μέσω στατικών και δυναμικών μοντέλων [22]-[25]. Επομένως, η σταθεροποίηση της τάσης είναι ευκολότερη με PMUs, δεδομένου ότι οι υπάρχουσες συσκευές παρακολούθησης δεν είναι σε θέση να ελέγξουν επαρκώς αυτόν τον τύπο των δυναμικών χαρακτηριστικών του συστήματος.

Ενώ μερικές από τις εφαρμογές των ηλεκτρικών συστημάτων απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό PMUs για την εφαρμογή τους, όπως η μέτρηση κατάστασης του συστήματος, άλλες εφαρμογές μπορούν να υλοποιηθούν με μικρό αριθμό PMUs (όπως η παρακολούθηση της διαταραχής συχνότητας). Παρότι η χρήση μεγάλου αριθμού PMUs σε ένα ηλεκτρικό σύστημα επιτρέπει στο διαχειριστή του την ταυτόχρονη εφαρμογή πολλαπλών λειτουργιών, συνήθως οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας προτιμούν τη σταδιακή εγκατάσταση PMUs, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασής τους. Ακόμη όμως και στην περίπτωση της σταδιακής εγκατάστασης, το αρχικό σχέδιο για την τοποθέτηση PMUs πρέπει να εκκινήσει βασιζόμενο σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλότερο αριθμό PMUs, έχοντας πάντοτε την τελική επέκταση στο μυαλό μας. Με άλλα λόγια, η εγκατάσταση PMUs ως βραχυπρόθεσμη επένδυση των εταιρειών κοινής ωφέλειας, πρέπει να είναι σύμφωνη με το μακροπρόθεσμο στόχο αυτών των επιχειρήσεων για τοποθέτηση PMUs. Πολλές εταιρίες κοινής ωφέλειας έχουν εγκαταστήσει ήδη έναν

αρκετά μεγάλο αριθμό PMUs στο σύστημά τους. Αν και τα εγκατεστημένα PMUs ικανοποιούν ορισμένους από τους βραχυπρόθεσμους στόχους των εταιρειών, δυστυχώς τα εγκατεστημένα PMUs έχουν περιορισμένη επίδραση (ή σε ορισμένες περιπτώσεις καθόλου) στο βέλτιστο αριθμό PMUs που απαιτούνται για την παρατηρησιμότητα ή την εύρεση των κρίσιμων μετρήσεων, κλπ. Με άλλα λόγια, η μακροπρόθεσμη επένδυση δεν συμπεριλαμβάνεται στον επενδυτικό σχεδιασμό τους. Η ορθολογικότερη εγκατάσταση των PMUs σε τέτοια συστήματα κοινής ωφέλειας, θα μπορούσε να διασφαλίζει κάποια επιπλέον κέρδη για τα παρόντα και μελλοντικά σχέδια αυτών των εταιρειών.

2.10.2 Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού συστήματος

Η εκτίμηση κατάστασης είναι μία σύνθετη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία υλικού και λογισμικού. Προς το παρόν, οι περισσότεροι από τους εκτιμητές κατάστασης εγκαθίστανται στα κέντρα ελέγχου του ανεξάρτητου διαχειριστή του συστήματος. Οι εκτιμητές αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο, για την απ' ευθείας παρακολούθηση των συνθηκών του δικτύου και την παροχή της καλύτερης δυνατής εκτίμησης του μοντέλου του δικτύου. Η εκτίμηση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης για άλλες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως πιθανοτική ανάλυση, διαχείριση συμφόρησης, βελτιστοποίηση V-VAR, και περιορισμένη ανακατανομή. Η εκτίμηση κατάστασης και οι παρεπόμενες εφαρμογές της, όπως ο εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων, η εκτίμηση παραμέτρων και η εκτίμηση καταστάσεων διακοπτών, χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία με διαφορετικό βαθμό επιτυχίας. Για την επιτυχή εφαρμογή της εκτίμησης απαιτούνται [26]:

- Ένα αξιόπιστο σύνολο μετρήσεων με ικανοποιητική περίσσεια
- Ακριβής γνώση της τοπολογίας του συστήματος βασιζόμενη στις καταστάσεις των διακοπτών
- Ακριβείς τιμές παραμέτρων του δικτύου

Αυτό είναι σύμφωνο με τη άποψη πολλών ειδικών σχετικά με τα ζητήματα που εμποδίζουν την εκτίμηση κατάστασης στην πράξη [27]. Αυτά τα ζητήματα συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- Ανακριβείς παράμετροι για τα στοιχεία του δικτύου
- Ανακριβής τοπολογία του συστήματος
- Ανεπαρκής ή εσφαλμένη τηλεμετρία
- Ασύμβατη μέτρηση φάσης
- Ασυμβατότητα μεταξύ της τοποθέτησης μετρητών στο χώρο και του υπολογιστικού μοντέλου.

Παραδείγματος χάριν, η εσφαλμένη ένδειξη μιας μέτρησης ροής στον εξοπλισμό είναι ένα σύνηθες πρόβλημα. Δυστυχώς τα προβλήματα στην εκτίμηση κατάστασης σήμερα είναι λίγο πολύ τα ίδια με εκείνα που ανέκυπταν στην αρχική βιομηχανική εφαρμογή της. Αν και τέτοια ζητήματα αφορούν την υποδομή και όχι τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης, εντούτοις επηρεάζουν το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης. Τα προαναφερθέντα προβλήματα χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής ως προς τη βελτίωση του αποτελέσματος της εκτίμησης κατάστασης. Οι ερευνητές δε μπορούν να κάνουν πολλά πάνω σε αυτό το θέμα, εκτός από συστάσεις. Η ενσωμάτωση των PMUs στους εκτιμητές κατάστασης είναι αριθμητικά και αλγοριθμικά απλή και βοηθά στην βελτίωση της παρακολούθησης, του ελέγχου και της προστασίας του ηλεκτρικού συστήματος, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

2.10.3 Διαχείριση συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο

Η διαχείριση συμφόρησης είναι ανάμεσα στις υψίστης προτεραιότητας λειτουργίες που εφαρμόζονται από τους χρονοπρογραμματιστές ισχύος στην αγορά ενέργειας. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να εκτελεστεί σε πραγματικό χρόνο από το διαχειριστή του συστήματος. Η διαχείριση της συμφόρησης είναι μία κρίσιμη λειτουργία η οποία έχει κεντρικό ρόλο τόσο στην κατανομή της παραγωγής που είναι μια μελέτη της μελλοντικής αγοράς, όσο και στην ανακατανομή που είναι μία εφαρμογή της αγοράς ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ο βασικός σκοπός της διαχείρισης συμφόρησης είναι να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του δικτύου βέλτιστα και οικονομικά χωρίς να παραβιάζονται τα όρια του ηλεκτρικού δικτύου (όρια γραμμών μεταφοράς και μέτρου τάσης).

Κατά τη ρύθμιση της κατανομής, υπό τον περιορισμό της ελαχιστοποίησης του κόστους, η διαχείριση συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο προσπαθεί να διατηρήσει τις ροές ισχύος στις γραμμές μεταφοράς μέσα στα επιτρεπτά όριά τους.

Στην παραδοσιακή διαχείριση συμφόρησης, η ροή ενεργού ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς συγκρίνεται με την ονομαστική ικανότητα μεταφοράς (NTC), η οποία με τη σειρά της υπολογίζεται μέσω συγκεκριμένων τεχνικών βάσει των περιορισμών του δικτύου, όπως τα θερμικά όρια, τα όρια τάσης, και τα όρια ευστάθειας. Σύμφωνα με τις αναφορές [28] και [29], οι περιορισμοί που χρησιμοποιούνται γι' αυτόν τον υπολογισμό είναι συνήθως πιο αυστηροί απ' ότι κανονικά θα έπρεπε. Αυτό έχει ως συνέπεια, την εμφάνιση κάποιων αδικαιολόγητων περιθωρίων στη διαχείριση συμφόρησης.

Αφού τα PMUs παρέχουν μεγαλύτερης ακρίβειας μετρήσεις, η τοποθέτησή τους στα ηλεκτρικά δίκτυα θα προσφέρει τη δυνατότητα στο κέντρο κατανομής του συστήματος να έχει μια ακριβέστερη εκτίμηση και ένα βελτιωμένο υπολογισμό τόσο των ορίων των γραμμών μεταφοράς, όσο και των ροών σ' αυτές. Αυτό, εν συνεχεία, θα προκαλέσει την λειτουργία του συστήματος κοντά στα όριά του, πράγμα που σημαίνει συνολική βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος, και θα οδηγήσει σε εξοικονόμηση πόρων και τελικά μπορεί να μειώσει το κόστος για τους πελάτες του συστήματος. Ο υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας και η ακρίβεια των PMUs, θα οδηγήσει σε μια γρηγορότερη και ακριβέστερη εκτέλεση των αλγορίθμων πραγματικού χρόνου, όπως η σε πραγματικό χρόνο ικανότητα μεταφοράς (RTC) κατά τη διαχείριση συμφόρησης. Στις περισσότερες γραμμές μεταφοράς, οι ικανότητες μεταφοράς σε πραγματικό χρόνο υπερβαίνουν τις ονομαστικές ικανότητες μεταφοράς και συνεπώς περιορίζεται η ανάγκη για μείωση της συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο [30], [31].

2.10.4 Επικύρωση και συντονισμός των μοντέλων των συστημάτων

Οι παράμετροι ενός ηλεκτρικού συστήματος δεν είναι πάντοτε ακριβείς. Αφού κάθε τμήμα του συστήματος μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό σύνολο παραμέτρων (π.χ. δίκτυο, γεννήτριες, φορτία, κλπ.), οι λανθασμένες παράμετροι θα προκαλέσουν σφάλμα στην μελέτη του συστήματος. Ο αντικειμενικός σκοπός της επικύρωσης του μοντέλου του συστήματος, αλλά και της εκτίμησης παραμέτρων (PE), είναι να προσδιορίσει τις αμφισβητούμενης τιμής παραμέτρους του συστήματος και να κάνει μία βελτιωμένη εκτίμησή τους.

Γενικά, οι παράμετροι των ηλεκτρικών συστημάτων εισάγονται στη βάση δεδομένων της μοντελοποίησης χειροκίνητα, επομένως τα λάθη που εμφανίζονται στα μοντέλα των ηλεκτρικών συστημάτων είναι αναπόφευκτα. Από τη στιγμή που θα εισαχθεί ένα σφάλμα στη βάση δεδομένων του ηλεκτρικού συστήματος, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί και μπορεί να παραμείνει χωρίς να ανιχνευθεί για αρκετά έτη.

Στην περίπτωση της εκτίμησης των παραμέτρων σε μόνιμη κατάσταση, τα σφάλματά τους μπορούν να εντοπιστούν και να αντικατασταθούν με τις διορθωμένες τιμές, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο γνωστό ως εκτίμηση παραμέτρων (PE). Έχοντας πρόσβαση σε ακριβείς συγχρονισμένες μετρήσεις από PMUs, η ικανότητα της εκτίμησης παραμέτρων μπορεί να βελτιωθεί και τα σφάλματα στα μοντέλα των παραμέτρων, όπως οι μιγαδικές αντιστάσεις και οι αγωγιμότητες, να διορθωθούν.

Ενώ είναι σημαντικό να υπάρξει ένα ακριβές πρότυπο του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση, η μέτρηση των δυναμικών παραμέτρων μοντελοποίησης είναι δυσκολότερη, και απαιτεί ακριβή έλεγχο και γνώση της αντίδρασης του συστήματος σε αναμενόμενες και απροσδόκητες διακοπές. Μια γρήγορη επισκόπηση των διαθέσιμων αναφορών σ' αυτόν τον τομέα, όπως οι [32] και [33], δείχνει ότι ο αλγόριθμος εκτίμησης παραμέτρων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και στη μέτρηση των χαρακτηριστικών των δυναμικών μοντέλων.

2.10.5 Ανάλυση διαταραχών

Η ανάλυση διαταραχών είναι η μελέτη και η προσομοίωση της αλληλουχίας των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα αφότου εμφανιστεί μια διαταραχή στο ηλεκτρικό σύστημα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να γίνει μία έρευνα στα δεδομένα που καταγράφονται μέσω των συστημάτων καταγραφής και είναι εγκατεστημένα σε όλο το δίκτυο. Τα συστήματα καταγραφής δεδομένων χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για πολλά έτη. Εντούτοις, η εργασία με τα παραδοσιακά συστήματα καταγραφής δεδομένων είναι πολύ δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία εξαιτίας του γεγονότος ότι τα διαθέσιμα στοιχεία, που παρέχονται από αυτές τις συσκευές, δεν είναι χρονισμένα συγχρονισμένα και είναι πολύ δύσκολο για τους μηχανικούς να ευθυγραμμίσουν τη χρονοσειρά των καταγεγραμμένων δεδομένων.

Το GPS έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών ως μια κοινή χρονική αναφορά, επιτρέποντας σε πολλές συσκευές όπως τα PMUs, να παρέχουν χρονικά συγχρονισμένα δεδομένα. Οι αρχές συστήνουν με επιτακτικό τρόπο την εγκατάσταση PMUs μετά τις διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις βορειοανατολικές Η.Π.Α. και την Ιταλία το 2003 [6], [7].

Η δημιουργία προηγμένων συστημάτων παρακολούθησης, προστασίας και ελέγχου ευρείας περιοχής για λόγους ανάλυσης διαταραχών, δε χρειάζεται να συναντήσει τους ανελαστικούς περιορισμούς της ανάλυσης πραγματικού χρόνου, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι σε λογικά πλαίσια καθυστερήσεις είναι αποδεκτές στην ανάλυση διαταραχών. Επομένως, τα στοιχεία μπορούν να αποθηκευτούν στους υποσταθμούς και να μεταφερθούν στο κέντρο δεδομένων σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Έπειτα, τα διαθέσιμα πακέτα λογισμικού μπορούν να βοηθήσουν το χειριστή του συστήματος να εντοπίσει τις επιθυμητές πληροφορίες μέσα από ένα μεγάλο όγκο δεδομένων.

Το GPS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το χρονικό συγχρονισμό των καταγεγραμμένων δεδομένων από τα όργανα καταγραφής. Κάποιες επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας στις Η.Π.Α. έχουν εφαρμόσει ήδη αυτήν την τεχνολογία για να περιορίσουν το πρόβλημα του χρονικού λάθους στα καταγεγραμμένα δεδομένα τους. Ένα από τα οφέλη μιας τέτοιας μεθόδου είναι η βελτίωση της διάγνωσης διαταραχών. Η εμπειρία δείχνει ότι τα ακριβή συγχρονισμένα χρονικά διαθέσιμα δεδομένα μέσω GPS μπορούν να περιορίσουν το διαγνωστικό χρόνο από αρκετές ώρες σε μερικά δευτερόλεπτα [34].

Μετά από την διακοπή ηλεκτρικού ρεύματος στην Ιταλία το 2003, εγκαταστάθηκαν αρκετά PMUs κατά μήκος της επικράτειάς της. Αν και η αρχική πρόθεση για εγκατάσταση PMUs στο ευρωπαϊκό δίκτυο ήταν να παρασχεθούν χρονικά συγχρονισμένες μετρήσεις, περαιτέρω πλεονεκτήματα διαπιστώθηκαν μετά την επανασύνδεση της νοτιοανατολικής και δυτικής διασύνδεσης το 2004 [7].

2.10.6 Επαναφορά συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ο χειριστής του ηλεκτρικού συστήματος έρχεται συνήθως αντιμέτωπος με μια τεράστια σταθερή διαφορά φάσης (standing phase angle-SPA) κατά μήκος του διακόπτη που συνδέει δύο παρακείμενους υποσταθμούς. Σε περίπτωση που ο χειριστής δεν είναι ενήμερος γι' αυτήν την τεράστια διαφορά φασικής γωνίας, το κλείσιμο του διακόπτη κατά την διαδικασία αποκατάστασης του ηλεκτρικού συστήματος μπορεί να προκαλέσει κλονισμό του συστήματος, που με τη σειρά του μπορεί να βλάψει τον εξοπλισμό ή ακόμα και να οδηγήσει σε επανάληψη της διακοπής λειτουργίας του [35]. Τα PMUs είναι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Λόγω της δυνατότητάς τους για άμεση μέτρηση των γωνιών φάσης, ο

χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τα, συλλεχθέντα μέσω PMU, δεδομένα για να αποφύγει τέτοιου είδους συνέπειες.

2.10.7 Έλεγχος υπερφόρτισης και δυναμική εκτίμηση

Αν και υπάρχει ήδη ένα πλήθος συσκευών και λογισμικού για την παρακολούθηση του εξοπλισμού των ηλεκτρικών συστημάτων [36], εντούτοις η χρήση PMUs μπορεί να καταστήσει τον έλεγχο ακόμη πιο ακριβή. Βοηθά επίσης στον έλεγχο του δικτύου σε υψηλότερους χρόνους ανάλυσης. Αν και ο έλεγχος υπερφόρτισης όπως και η δυναμική εκτίμηση ενός συστήματος, μέσω PMU, είναι σε κάποιο βαθμό ανεπαρκείς συγκρινόμενες με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα ελέγχου, τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης PMUs για αυτό το σκοπό εντοπίζονται στο γεγονός ότι το PMU μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο καλά και για πολλές άλλες εφαρμογές, ενώ οι υπάρχουσες συσκευές μπορούν μόνο να εγκατασταθούν και να χρησιμοποιηθούν για έναν και μόνο σκοπό. Με άλλα λόγια, η πολλαπλή λειτουργία των PMUs τα καθιστά περισσότερο επιθυμητά από οποιαδήποτε άλλη διαθέσιμη συμβατική συσκευή μέτρησης.

Ο έλεγχος υπερφόρτισης είναι γνωστός ως εφαρμογή ελέγχου εξοπλισμού. Αυτή τη στιγμή, η μόνη διαθέσιμη εφαρμογή για τον έλεγχο του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί PMUs είναι ο θερμικός έλεγχος των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Δεδομένου ότι το PMU μπορεί να μετρήσει το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία του ζυγού, η εγκατάσταση PMU στα δύο άκρα μιας γραμμής επιτρέπει τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης αυτής καθώς και της μέσης θερμοκρασίας της γραμμής σε πραγματικό χρόνο. Το μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι το γεγονός ότι τα PMUs δε μπορούν να παράσχουν οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με τα σημείο υπερφόρτισης στις γραμμές μεταφοράς.

2.10.8 Επιλεκτική Προστασία

Η επιλεκτική προστασία, αρχικά, βασίζεται στην ιδέα ότι τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρονόμων και των PMUs πρέπει να αλλάξουν για να ανταποκριθούν στις συνθήκες λειτουργίας του υπάρχοντος ηλεκτρικού συστήματος. Η είσοδος των μονάδων μέτρησης φασιθετών και ορισμένων ηλεκτρονόμων έχει επιτρέψει σ' αυτές τις συσκευές να προσαρμοστούν στις υπάρχουσες συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Οι συμβατικοί ηλεκτρονόμοι και οι διατάξεις προστασίας, που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό σύστημα λειτουργούν συνήθως υπό προκαθορισμένους ανελαστικούς κανόνες που καθορίζονται από το χειριστή του συστήματος. Σε περίπτωση ενός συμβάντος, η απόκριση αυτών των συσκευών γίνεται με προκαθορισμένο τρόπο που καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά τους. Η δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων έχει ξεκινήσει μια νέα εποχή για την σε πραγματικό χρόνο απόκριση στις μεταβολές των δικτύων. Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι βασίζονται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν από τους παραδοσιακούς ηλεκτρονόμους και τις προστατευτικές διατάξεις: Η λειτουργία τους καθορίζεται μέσω λογισμικού και όχι με προκαθορισμένο τρόπο. Επίσης, έχουν την ικανότητα επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο.

Η επιλεκτική προστασία καθορίστηκε μετά τη δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων το 1987 [37], [38]. Ο κύριος λόγος για τη δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων ήταν η αλλαγή στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος. Στη δεκαετία του '80 τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος άρχισαν να λειτουργούν πιο κοντά στα όριά τους λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Από εκείνη τη στιγμή, δόθηκε έμφαση στην οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, το οποίο στη συνέχεια, επηρέασε και άλλαξε την εφαρμογή της παραδοσιακής προστασίας στα ηλεκτρικά συστήματα.

Η εφαρμογή των PMUs ως ηλεκτρονόμων προστασίας, έχει διερευνηθεί. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των PMUs είναι η ακριβής μέτρηση της σύνθετης αντίστασης των γραμμών, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον εντοπισμό του σφάλματος θέσης. Η σύνθετη αντίσταση των γραμμών

έχει ένα σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση των σφαλμάτων θέσης. Η ακριβής τιμή της μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δύο PMUs στα άκρα της. Το όφελος από τη χρησιμοποίηση των PMUs, γίνεται ακόμη πιο αισθητό από το γεγονός ότι η ανακριβής θέση του σφάλματος μπορεί να παρατείνει τις διαδικασίες του εντοπισμού του και της αποκατάστασης του συστήματος.

2.10.9 Προγραμματισμένη απομόνωση ηλεκτρικών συστημάτων

Ο προγραμματισμένος διαχωρισμός του συστήματος σε νησίδες είναι η τελευταία δράση που λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό σύστημα αντιμετωπίζει μια έντονα ασταθή ηλεκτρομηχανική ταλάντωση και ο διαχωρισμός είναι αναπόφευκτος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η μόνη λύση για τους μηχανικούς είναι να δημιουργήσουν νησίδες, να τις απομονώσουν από το υπόλοιπο του δικτύου, και να τις επαναφέρουν στο δίκτυο αργότερα, όταν οι συνθήκες έχουν βελτιωθεί. Στην περίπτωση που ο διαχωρισμός είναι αναπόφευκτος, είναι προτιμότερο να γίνεται βάσει ενός προγραμματισμένου σχεδίου παρά απρογραμμάτιστα. Κατά τη δημιουργία μίας νησίδας, η ιδανική περίπτωση είναι να υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στα υπάρχοντα φορτία και παραγωγές της νησίδας. Από την άλλη, αυτό μπορεί να μη συμβεί στον πραγματικό κόσμο, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να υπάρξουν ανισορροπίες μεταξύ της παραγωγής και των φορτίων σε μία νησίδα μετά τον διαχωρισμό της από το δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να απαιτηθεί διακοπή παραγωγής ή απόρριψη φορτίων για να υπάρξει μια ισορροπία μεταξύ των φορτίων και των παραγωγών στη νησίδα.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο βασικές μέθοδοι για να επιτευχθεί ο παραπάνω διαχωρισμός του συστήματος: η προστασία αποσυγχρονισμού και τα σχήματα αποκατάστασης. Και οι δύο αυτές τεχνικές είναι γνωστές ως εφαρμογές προστασίας. Εντούτοις, τα σχήματα αποκατάστασης είναι μερικές φορές γνωστά και ως εφαρμογή ελέγχου [39]. Οι προαναφερθείσες τεχνικές στηρίζονται στην προκαθορισμένη εκτιμώμενη συμπεριφορά του συστήματος η οποία βασίζεται στην κατάσταση του συστήματος, την τοπολογία, τις διακοπές λειτουργίας, και τα επίπεδα φορτίων και παραγωγής. Είναι σύνηθες στα ηλεκτρικά συστήματα, η προβλεφθείσα κατάσταση του συστήματος να διαφέρει σημαντικά από την πραγματική κατάσταση του συστήματος. Αφού οι ρυθμίσεις των σχημάτων προστασίας προγραμματίζονται βάσει των υπολογισμένων και προκαθορισμένων καταστάσεων του συστήματος, σε περίπτωση υπερβολικού σφάλματος μεταξύ υπολογιζόμενης και πραγματικής κατάστασης, η απόδοση των σχημάτων προστασίας θα ήταν ακατάλληλη και θα μπορούσε να επιδεινώσει τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

Η προγραμματισμένη απομόνωση του συστήματος, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους, με τη χρησιμοποίηση δεδομένων προερχόμενων από PMUs. Η εκ των προτέρων συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να αντικατασταθεί με την παρακολούθηση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις φασιθετών μέσω PMUs. Η εφαρμογή ενός τέτοιου σχήματος βελτιώνει την προγραμματισμένη απομόνωση του συστήματος για δύο βασικούς λόγους:

- Ο χειριστής μπορεί να κατανοήσει πότε το σύστημα οδηγείται προς την ασταθή κατάσταση.
- Μπορούν να εντοπιστούν εκείνες οι γεννήτριες που είναι, πιθανά, πιο ευάλωτες στην απώλεια της ευστάθειά τους.

Τα όρια της νησιδοποίησης μπορούν να προσδιοριστούν σε πραγματικό χρόνο βάσει των καταστάσεων του δικτύου.

2.10.10 Ευφυές δίκτυο

Οι διασυνδέσεις, ή τα ηλεκτρικά συστήματα μεταφοράς, λειτουργούν ως μία μεγάλη και σύνθετη μηχανή. Η πρόσφατη ιστορία έδειξε ότι η παραμικρή αστάθεια σε ένα τμήμα του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά αποτελέσματα μεγαλύτερα τμήματά του. Για αυτόν και πολλούς άλλους λόγους, βρίσκονται σε εξέλιξη προσπάθειες για την υλοποίηση ενός νέου, «Ευφυούς Δικτύου» (Smart Grid) [40]. Το νέο αυτό δίκτυο, Σχήμα 2.5, θα είναι εκσυγχρονισμένο και έξυπνο,

και θα βασίζεται σε έναν αριθμό προηγμένων τεχνολογιών υπολογισμού, επικοινωνίας και μέτρησης, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της ασφάλειάς του. Μία από αυτές τις νέες τεχνολογίες είναι και η μονάδα PMU, η οποία είτε μόνη της είτε ενσωματωμένη σε έναν ψηφιακό ηλεκτρονόμο, θα παίξει καίριο ρόλο στην παρακολούθηση της ευστάθειας του δικτύου. Η χρήση των δεδομένων που θα συλλέγονται από τις μονάδες PMU αναμένεται να βελτιώσουν την απόδοση του συστήματος μεταφοράς με την αύξηση της φόρτισης των γραμμών και τη μείωση των απωλειών τους.



Σχήμα 2.5 Ευφυές Δίκτυο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανάλυση και Αποκατάσταση Παρατηρησιμότητας Συστήματος

Η ανάλυση ασφαλείας ενός ηλεκτρικού συστήματος βασίζεται στα αποτελέσματα του εκτιμητή κατάστασης, ο οποίος παραδοσιακά επεξεργάζεται μετρήσεις οι οποίες παρέχονται από το σύστημα SCADA (ενεργές και άεργες ροές και εγχύσεις ισχύος, όπως επίσης και μέτρα τάσης των ζυγών). Ο εκτιμητής παρέχει μια αξιόπιστη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος, έχοντας ως δεδομένα το μοντέλο του συστήματος και την περίσσεια των μετρήσεων που υπάρχουν σ' αυτό.

Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται παρατηρήσιμο όταν ο αριθμός και η διάταξη των μετρήσεων που υπάρχουν σ' αυτό, επαρκούν για να εκτελεστεί η εκτίμηση κατάστασής του. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της κατάστασής του, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μη παρατηρήσιμο.

Πιο πρόσφατα, ο ραγδαία αυξανόμενος ρυθμός εγκατάστασης των μονάδων PMU στους υποσταθμούς του δικτύου, έχει ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του συστήματος μετρήσεως το οποίο περιλαμβάνει πλέον και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών. Το κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθεί με την ανάλυση παρατηρησιμότητας ενός συστήματος με ένα μοντέλο μειωμένης τάξης το οποίο περιλαμβάνει τόσο συμβατικές, όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις. Η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητάς του πραγματοποιείται κάνοντας χρήση συμβατικών ή συγχρονισμένων μετρήσεων.

3.1 Ταξινόμηση μεθόδων ανάλυσης παρατηρησιμότητας

Οι μέθοδοι ανάλυσης παρατηρησιμότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, ως ακολούθως:

- Τοπολογικές μέθοδοι
- Αριθμητικές μέθοδοι
- Υβριδικές μέθοδοι
- Συμβολικές μέθοδοι

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο σχετικές μέθοδοι της διεθνούς βιβλιογραφίας.

3.1.1 Τοπολογικές μέθοδοι

Οι αλγόριθμοι τοπολογικής παρατηρησιμότητας αναζητούν ένα μέγιστο δένδρο πλήρους βαθμού για το μετρητικό σύστημα.

Ο τοπολογικός αλγόριθμος [41] βασίζεται στη δημιουργία ενός γεννητικού δένδρου πλήρους βαθμού. Στην αναφορά [42], τα μέγιστα παρατηρήσιμα υποσυστήματα ενός μη παρατηρήσιμου συστήματος προκύπτουν επεκτείνοντας τη διαδικασία που προτείνεται στην εργασία [41]. Ένας συνδυασμένος αλγόριθμος παρατηρησιμότητας/τοποθέτησης μετρήσεων παρουσιάζεται στην αναφορά [43], βασιζόμενος στις έννοιες της [41]. Η αναφορά [44] εντοπίζει ένα παρατηρήσιμο γεννητικό δένδρο χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο βασισμένο στις μητροειδείς τομές. Η τοπολογική προσέγγιση που παρουσιάζεται στην εργασία [45] εντοπίζει τις ψευδομετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουν την αξιοπιστία της βάσης δεδομένων από το ενδεχόμενο ύπαρξης εσφαλμένων ψευδομετρήσεων. Ένας αλγόριθμος βασισμένος στην ανάπτυξη ενός μέγιστου δάσους πλήρους βαθμού παρουσιάζεται στην αναφορά [46].

3.1.2 Αριθμητικές μέθοδοι

Οι αριθμητικές μέθοδοι βασίζονται στην ικανότητα του μοντέλου εκτίμηση κατάστασης του συστήματος να μπορεί να επιλυθεί μέσω αριθμητικών τεχνικών.

Ο επαναληπτικός αριθμητικός αλγόριθμος [47], [48] βρίσκει τις παρατηρήσιμες νησίδες και τοποθετεί τις απαραίτητες μετρήσεις για αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας του συστήματος, γρησιμοποιώντας τριγωνική παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους. Αυτή η προσέγγιση επεκτείνεται στην εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιώντας ορθογώνιους μετασχηματισμούς [49], ισοτικούς περιορισμούς [50], [51], και τεχνικές βασισμένες στην μέθοδο Hachtel [52]-[54]. Η αριθμητική προσέγγιση [55] χρησιμοποιεί την μορφή Echelon μιας Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων μειωμένου βαθμού. Μία άμεση (μη επαναληπτική) αριθμητική διαδικασία βασισμένη στη μήτρα κέρδους, παρουσιάζεται στην αναφορά [56]. Οι επίσης άμεσοι (μη επαναληπτικοί) αλγόριθμοι [57], [58] βασίζονται στην παραγοντοποίηση Gauss της μήτρας κέρδους και της Ιακωβιανής μήτρας, αντίστοιχα. Ο μη επαναληπτικός αριθμητικός αλγόριθμος [59], [60] βασίζεται στην τριγωνική παραγοντοποίηση της μήτρας Gram που σχετίζεται με την Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων. Μια αλγεβρική τεχνική, βασισμένη στο λογισμό του μηδενοχώρου, προτείνεται στις αναφορές [61] και [62]. Ένας αλγόριθμος ελέγχου της παρατηρησιμότητας, ο οποίος στηρίζεται στην παραγοντοποίηση Gauss και τη δυαδική αριθμητική, παρουσιάζεται στην αναφορά [63]. Οι αλγόριθμοι [64] και [65] συνδυάζουν τις έννοιες της παραγοντοποίησης και τρινωνοποίησης της μήτρας κέρδους και της Ιακωβιανής, αντίστοιχα. Στην αναφορά [66] αναπτύσσεται μια επαναληπτική μέθοδος βέλτιστης τοποθέτησης μετρήσεων με σκοπό την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας. Η μέθοδος [67] χρησιμοποιεί τις μετρήσεις ροής για να δημιουργήσει τοπολογικά τις ροονησίδες, οι οποίες γρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου μειωμένης τάξης και της αντίστοιχης μήτρας κέρδους, την οποία επεξεργαζόμαστε μέσω μιας αλγεβρικής διαδικασίας.

3.1.3 Υβριδικές μέθοδοι

Οι υβριδικές μέθοδοι είναι ένας συνδυασμός τοπολογικών και αριθμητικών μεθόδων.

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι στις αναφορές [68] και [69] βασίζονται στην εφαρμογή της θεωρίας γράφων και στην μειωμένη μορφή Echelon μιας μήτρας δοκιμής. Στις αναφορές [70] και [71] προτείνεται μία υβριδική μέθοδος για πολλαπλή τοποθέτηση μετρήσεων, βασισμένη στους τριγωνικούς παράγοντες μιας μειωμένης μήτρας Gram και της Ιακωβιανής μήτρας αντίστοιχα.

3.1.4 Συμβολικές μέθοδοι

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν συμβολικές τεχνικές επεξεργασίας.

Στην αναφορά [72], η παρατηρησιμότητα του δικτύου ελέγχεται μέσω της συμβολικής παραγοντοποίησης της Ιακωβιανής μήτρας, χωρίς τον πραγματικό υπολογισμό της. Ένας άμεσος αλγόριθμος, που χρησιμοποιεί συμβολική παραγοντοποίηση Gauss κατάλληλων ακέραιων μητρών [73], αναλύει την παρατηρησιμότητα συστήματος θεωρώντας μετρήσεις SCADA και PMU.

3.2 Διατύπωση συνθήκης παρατηρησιμότητας

Έστω ένα σύστημα S αποτελούμενο από n ζυγούς. Το σύστημα αυτό είναι παρατηρήσιμο εάν ο βαθμός της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων είναι 2n-1. Όταν αυτό συμβαίνει, οι 2n-1 στήλες της Ιακωβιανής μήτρας είναι γραμμικά ανεξάρτητες μεταξύ τους, το οποίο σημαίνει ότι από την εξίσωση:

$$H\lambda = 0$$

(3.1)

προκύπτει $\lambda = 0$.

3.3 Δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων

Το μοντέλο συστήματος μειωμένης τάξης χρησιμοποιεί ένα μικρότερο δίκτυο σε σχέση με το υπό εξέταση δίκτυο και περιλαμβάνει το αντίστοιχο σύστημα μετρήσεων. Θεωρώντας ότι το σύστημα *S* των *n* ζυγών περιλαμβάνει μόνο συμβατικές μετρήσεις και τουλάχιστον μία μέτρηση μέτρου τάσης, και θέτοντας όλους τους φασιθέτες τάσης των ζυγών ίσους με $\tilde{V_i} = 1.0 \ge 0$, ή διαφορετικά $V_i = 1.0 p.u$. και $\delta_i = 0 rad$, $\forall i = 1, ..., n$, η Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

όπου P_{ij} η ενεργός ροή ισχύος στη γραμμή i - j, P_i η ενεργός έγχυση ισχύος στο ζυγό i, Q_{ij} η άεργος ροή ισχύος στη γραμμή i - j, Q_i η άεργος έγχυση ισχύος στο ζυγό i και V_i το μέτρο της τάσεων του ζυγού i. Με g_{ij} και b_{ij} συμβολίζονται η ενεργός και άεργος αγωγιμότητα της γραμμής i - j, ενώ $\alpha(i)$ είναι το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό i.

3.4 Νησιδοποίηση συστήματος

Έστω ότι το σύστημα S χωρίζεται σε r υποσυστήματα S_i τα οποία αποτελούνται από n_i ζυγούς το καθένα ώστε $n = \sum_{i=1}^r n_i$.

Το υποσύστημα S_i σχηματίζει μία παρατηρήσιμη νησίδα $P - \delta$, όταν το υποσύνολο των ενεργών μετρήσεών του καθιστά δυνατή την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης των γωνιών των ζυγών του, $\hat{\delta}_i$, διαστάσεων $(n_i - 1) \times 1$, ως προς έναν τοπικό ζυγό αναφοράς. Αντίστοιχα, το υποσύστημα S_i σχηματίζει μία παρατηρήσιμη νησίδα Q - V, όταν το υποσύνολο των αέργων μετρήσεών του και επιπροσθέτως μία μέτρηση τάσης καθιστούν δυνατή την εκτίμηση των μέτρων τάσεων των ζυγών του, \hat{V}_i , διαστάσεων $n_i \times 1$, ως προς έναν τοπικό ζυγό αναφοράς. Το υποσύστημα S_i σχηματίζει μία πλήρως παρατηρήσιμη νησίδα, όταν το σύνολο των μετρήσεων ενεργού και αέργου ισχύος που περιλαμβάνει και επιπροσθέτως μία μέτρηση τάσης το σύνολο των μετρήσεων ενεργού και αέργου ισχύος που διανύσματος κατάστασης $\hat{x}_i = \left[\hat{\delta}_i^T, \hat{V}_i^T\right]^T$, διαστάσεων $(2n_i - 1) \times 1$, ως προς έναν τοπικό ζυγό αναφοράς. Η μορφή του συστήματος S το οποίο διαχωρίζεται σε r μη αλληλοεπικαλυπτόμενες νησίδες, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Η διατύπωση του μοντέλου για το σύστημα αυτό, είναι η ακόλουθη:

$$z_{1} = h_{1}(x_{1}) + e_{1}$$

$$z_{2} = h_{2}(x_{2}) + e_{2}$$

$$\vdots$$

$$z_{i} = h_{i}(x_{i}) + e_{i}$$

$$\vdots$$

$$z_{r} = h_{r}(x_{r}) + e_{r}$$

$$z_{c} = h_{c}(x_{c}) + e_{c}$$
(3.3)

όπου $x_i = \left[\delta_i^T, V_i^T\right]^T$ είναι το $n_i \times 1$ διάνυσμα της νησίδας S_i , z_i το $m_i \times 1$ διάνυσμα των εσωτερικών μετρήσεων στη νησίδα S_i , e_i το $m_i \times 1$ διάνυσμα θορύβου των μετρήσεων z_i , z_c το $m_c \times 1$ διάνυσμα όλων των οριακών συμβατικών μετρήσεων αλλά και των μετρήσεων τάσης ζυγών των νησίδων, e_c το $m_c \times 1$ διάνυσμα θορύβου των μετρήσεων z_c , και i = 1, ..., r.



Σχήμα 3.1 Νησιδοποίηση συστήματος που φέρει μετρήσεις SCADA

Η Ιακωβιανή μήτρα του παραπάνω συστήματος μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$H = \begin{pmatrix} H_{1} & & \\ & H_{2} & \\ & \ddots & \\ & & H_{r} \\ \hline & & H_{c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{1} & & \\ & H_{2} & \\ & & \ddots & \\ & & & \\ \hline & & & \\ H_{c1} & H_{c2} & \cdots & H_{cr} \end{pmatrix}$$
(3.4)

όπου $H_i = \frac{\partial h_i}{\partial x_i}$, i = 1, ..., r, και $H_c = \frac{\partial h_c}{\partial x_i}$ είναι οι Ιακωβιανές μήτρες των εσωτερικών μετρήσεων και των οριακών μετρήσεων και των μετρήσεων τάσης, αντίστοιχα.

Συνεπώς, η εξίσωση (3.1) μπορεί να διατυπωθεί και με την ακόλουθη μορφή:

$$H_i \lambda_i = 0, \quad i = 1, \dots, r \tag{3.5}$$

$$H_c \lambda = 0 \tag{3.6}$$

όπου το διάνυσμα λ που αφορά τα r υποσυστήματα S_i γράφεται ως εξής:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1^T & \lambda_2^T & \dots & \lambda_i^T & \dots & \lambda_r^T \end{bmatrix}^T$$
(3.7)

Κάθε εξίσωση της μορφής (3.5) δίνει μια λύση λ_i , η οποία είναι της μορφής:

$$\lambda_{i} = a_{i} \mathbf{1}_{n_{i} \times 1}, \qquad i = 1, \dots, r$$

$$\lambda_{i} = b_{i} \mathbf{1}_{n_{i} \times 1}, \qquad i = 1, \dots, r$$

$$\lambda_{i} = \begin{bmatrix} a_{i} \mathbf{1}_{n_{i} \times 1} \\ b_{i} \mathbf{1}_{n_{i} \times 1} \end{bmatrix}, \qquad i = 1, \dots, r$$
(3.8)

για το $P - \delta$, το Q - V, και το πλήρες πρόβλημα, αντίστοιχα, όπου a_i και b_i σταθερές.

3.5 Θεμελίωση του μοντέλου μειωμένης τάζης

Εισάγουμε μία μήτρα W της οποίας ο αριθμός των γραμμών είναι ίσος με τον αριθμό των γραμμών της μήτρας H_c και ο αριθμός των στηλών της είναι r-1 για το $P-\delta$ πρόβλημα, r για το Q-V πρόβλημα και 2r-1 για το πλήρες πρόβλημα, αντίστοιχα. Χωρίς απώλεια της γενικότητας υποθέτουμε ότι ο ζυγός ταλάντωσης ανήκει στην πρώτη νησίδα, το οποίο που σημαίνει ότι $a_i = 0$. Κάθε στήλη της μήτρας W ορίζεται ως:

$$W_{i-1} = \sum_{j \in \mathcal{A}_{,\delta}(i)} H_{c,j} , i = 2,...,r, για το P - \delta πρόβλημα$$
(3.9)

$$W_i = \sum_{j \in \mathcal{B}_{c,V}(i)} H_{c,j}, i = 1,...,r,$$
για το $Q - V$ πρόβλημα (3.10)

$$W_{i-1} = \sum_{j \in \mathcal{A}_{c,\delta}(i)} H_{c,j} , i = 2,...,r$$
, για το πλήρες πρόβλημα (3.11)
$$W_{i} = \sum_{i} H_{c,i} , i = 1,...,r$$

και

, για το πλήρες πρόβλημα (3.11

$$\int_{i} = \sum_{j \in \mathcal{B}_{c,V}(i)} H_{c,j} , i = 1,...,r$$

όπου $\mathcal{A}_{c,\delta}(i)$ και $\mathcal{B}_{c,V}(i)$ είναι τα σύνολα των στηλών της μήτρας H_c που αντιστοιχούν στις γωνίες και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών της νησίδας i, και $H_{c,i}$ η στήλη j της μήτρας H_c .

Αφού η λύση λ περιέχει στοιχεία λ_i της μορφής (3.8), η εξίσωση (3.6) δίνει:

$$Wy = 0 \tag{3.12}$$

όπου $y = y = [a_2 \dots a_r]^T$ για το $P - \delta$ πρόβλημα, $y = [b_1 \dots b_r]^T$ για το Q - V πρόβλημα και $y = [a_2 \dots a_r \ b_1 \dots b_r]^T$ για το πλήρες πρόβλημα, αντίστοιχα.

Η μήτρα W μπορεί να θεωρηθεί ως η Ιακωβιανή μήτρα ενός δικτύου μειωμένης τάξης. Σ' αυτό το δίκτυο κάθε νησίδα S_i παριστάνει έναν "υπερκόμβο" i και κάθε διασύνδεση μεταξύ των νησίδων αποτελεί "γραμμή" διασύνδεσης του ελαττωμένου δικτύου. Το σύστημα μετρήσεων του μοντέλου αυτού αποτελείται από:

- Μετρήσεις τάσεως. Οι μετρήσεις τάσης στους ζυγούς μιας νησίδας μετασχηματίζονται σε μία ισοδύναμη μέτρηση τάσης του "υπερκόμβου".
- Μετρήσεις ροής. Οι μετρήσεις ροής μετασχηματίζονται σε μετρήσεις ροής του ελαττωμένου μοντέλου.
- Μετρήσεις έγχυσης. Κάθε οριακή μέτρηση σε μία νησίδα S_i μετασχηματίζεται σε μία μέτρηση του αθροίσματος των ροών των "γραμμών" μεταξύ του αντίστοιχου "υπερκόμβου" και των "υπερκόμβων" που αντιστοιχούν στις νησίδες με τις οποίες συνδέεται ο παραπάνω οριακός ζυγός.

Αποδεικνύεται ότι εάν η Ιακωβιανή μήτρα H είναι πλήρους βαθμού, τότε και η αντίστοιχη Ιακωβιανή μήτρα W είναι επίσης πλήρους βαθμού και αντίστροφα. Επίσης, η απώλεια βαθμού της μήτρας H είναι ίση με την απώλεια βαθμού της μήτρας W.

3.6 Προτεινόμενος αλγόριθμος ανάλυσης και αποκατάστασης

παρατηρησιμότητας με χρήση μετρήσεων SCADA και PMU

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο μειωμένης τάξης στο οποίο υπάρχουν τόσο συμβατικές όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις PMU. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιλεγεί κάποιος συγκεκριμένος ζυγός του δικτύου ως ζυγός ταλάντωσης, αφού η αναφορά μας είναι το σήμα του δορυφόρου (GPS) και επομένως όλοι οι ζυγοί συμμετέχουν κανονικά στη διαμόρφωση του μοντέλου. Επίσης η αποκατάσταση παρατηρησιμότητας πραγματοποιείται με χρήση τόσο συμβατικών όσο και συγχρονισμένων μετρήσεων.

Η προτεινόμενη αυτή μέθοδος ανήκει στην κατηγορία των υβριδικών μεθόδων και σκοπό έχει τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας, τον εντοπισμό των παρατηρήσιμων νησίδων και την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, για συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές μετρήσεις όσο και μετρήσεις προερχόμενες από PMUs.

3.6.1 Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων και έλεγχος της παρατηρησιμότητας

Η ανάλυση παρατηρησιμότητας πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το γραμμικό μοντέλο μέτρησης:

$$\Delta z = H \Delta x + e \tag{3.13}$$

όπου Δz είναι η διαφορά μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών, Δx είναι η μεταβολή του διανύσματος κατάστασης, H είναι η Ιακωβιανή μήτρα των μετρήσεων, και e είναι το διάνυσμα θορύβου κανονικής κατανομής, μηδενικής μέσης τιμής και διαγώνιας μήτρας διασποράς. Το διάνυσμα κατάστασης απαρτίζουν οι γωνίες και τα μέτρα όλων των τάσεων των ζυγών. Το διάνυσμα μετρήσεων αποτελείται από ενεργές και άεργες ροές και εγχύσεις, αλλά και μετρήσεις μέτρων τάσης ζυγών, προερχόμενες από το SCADA, όπως επίσης και από μετρήσεις φασιθετών τάσεων ζυγών και ρευμάτων γραμμών, προερχόμενες από εγκατεστημένες μονάδες PMU. Η μονάδα PMU που έχει τοποθετηθεί σ' ένα ζυγό θεωρείται ότι μπορεί να μετρήσει το φασιθέτη του ζυγού αυτού (μέτρο και όρισμα). Η γραμμικά αποζευγμένη Ιακωβιανή των μετρήσεων μπορεί να γραφεί ως [41]:

$$H = \begin{pmatrix} H_{P\delta} & | & 0\\ 0 & | & H_{QV} \end{pmatrix}$$
(3.14)

όπου οι Ιακωβιανές υπομήτρες $H_{P\delta}$ και H_{QV} των υποπροβλημάτων $P-\delta$ και Q-V, αντιστοίχως, έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$H_{P\delta} = \left(\frac{H_{P\delta,e}}{H_{P\delta,v}}\right) = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta} \\ \frac{\partial I_{ij,x}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ -b_{ij} & \cdots & b_{ij} \\ \frac{\partial I_{ij,x}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial V} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial V} \end{array}\right) = \left(\begin{array}{cccc} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial$$

όπου b_{ij} είναι η άεργος αγωγιμότητα της γραμμής i - j, P_{ij} (Q_{ij}) η ενεργός (άεργος) ροή ισχύος στο άκρο i της γραμμής i - j, P_i (Q_i) είναι η ενεργός (άεργος) έγχυση ισχύος στο ζυγό i, $I_{ij,r}$ ($I_{ij,i}$) είναι το πραγματικό (φανταστικό) μέρος του φασιθέτη ρεύματος στο άκρο i της γραμμής i - j, δ_i (V_i) είναι το όρισμα (μέτρο) του φασιθέτη τάσης στο ζυγό i, και j,k,... είναι οι ζυγοί οι οποίοι συνδέονται με τον ζυγό i. Αφού η παρατηρησιμότητα του συστήματος είναι ανεξάρτητη από τις παραμέτρους των γραμμών, υποθέτουμε ότι $b_{ii} = -1$ για όλες τις γραμμές i - j.

Εάν δεν υπάρχουν καθόλου PMUs στο σύστημα, εισάγεται μια μηδενική ψευδομέτρηση γωνίας για το ζυγό αναφοράς, χωρίς να εξαιρείται αυτός ο ζυγός από το πρόβλημα. Για να απλοποιήσουμε το πρόβλημα, θα αμελήσουμε την διαφορά μεταξύ των ισοδυνάμων υποπροβλημάτων παρατηρησιμότητας $P - \delta$ και Q - V και θα χρησιμοποιήσουμε την μήτρα H αναφερόμενοι είτε στην μήτρα $H_{P\delta}$ είτε στην H_{QV} . Το σύστημα μετρήσεων θα είναι παρατηρήσιμο εάν η μήτρα H είναι πλήρους βαθμού.

$$rank(H) = n \Leftrightarrow nullity(H) = 0$$
 (3.17)

3.6.2 Μοντέλο μειωμένης τάξης με μετρήσεις φασιθετών

Όταν στο σύστημα υπάρχουν συγχρονισμένες μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU, τότε δημιουργείται ένα διευρυμένο μοντέλο μειωμένης τάξης το οποίο σχηματίζεται με βάση τις ίδιες αρχές όπως αυτές παρουσιάστηκαν στις Ενότητες 3.4-3.5. Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι το σύστημα S χωρίζεται σε r μη αλληλοεπικαλυπτόμενες νησίδες S_i και φέρει μετρήσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται εσωτερικές ή οριακές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Νησιδοποίηση συστήματος που φέρει μετρήσεις SCADA και PMU

Η Ιακωβιανή μήτρα Η μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

όπου οι γραμμές της H_b σχετίζονται με τις οριακές ροές και εγχύσεις ισχύος όπως επίσης και με τους οριακούς φασιθέτες ρεύματος, ενώ οι γραμμές της H_i αντιστοιχούν σε μετρήσεις φασιθετών τάσης, εσωτερικές ροές και εγχύσεις ισχύος όπως επίσης και σε εσωτερικούς φασιθέτες ρεύματος, για το υποσύστημα S_i .

Ορίζεται ένα δίκτυο μειωμένης τάξης, του οποίου οι "υπερκόμβοι" i παριστάνονται από τα υποσυστήματα S_i και οι "γραμμές" i - j από τις μη παρατηρήσιμες γραμμές μεταξύ των υποσυστημάτων S_i και S_j, και μία μειωμένης τάξης Ιακωβιανή μήτρα W_b, η οποία περιλαμβάνει τις οριακές μετρήσεις όπως επίσης και όλες τις μετρήσεις τάσης. Μια οριακή έγχυση (∈ H_b) στο υποσύστημα S_i που συνδέεται με τους οριακούς ζυγούς των υποσυστημάτων S_j($j \neq i$) μετασχηματίζεται σε άθροισμα των ροών των "γραμμών" i - j που διασυνδέουν τα υποσυστήματα. Μία ροή ισχύος ή ρεύματος (∈ H_b) σε μια μη παρατηρήσιμη γραμμή του πλήρους συστήματος που διασυνδέει τα υποσυστήματα S_i και S_j μετασχηματίζεται σε μία ισοδύναμη μέτρηση τάσης στον "υπερκόμβο" i. Η απώλεια βαθμού της Ιακωβιανής μήτρας H μπορεί να καθοριστεί από την απώλεια βαθμού της Ιακωβιανής μήτρας K

$$nullity(H) = nullity(W_b)$$
 (3.19)

Η διαδικασία της εργασίας [43] χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει τοπολογικά τις ροονησίδες, οι οποίες είναι οι μέγιστοι διασυνδεδεμένοι υπογράφοι που σχηματίζονται από τις μετρήσεις ροών ισχύος και ρεύματος των γραμμών του δικτύου. Εάν δύο γειτονικές ροονησίδες έχουν μετρήσεις τάσης, η συνένωσή τους καθίσταται επίσης παρατηρήσιμη σύμφωνα με το Λήμμα Α.1 του παραρτήματος Α. Εφαρμόζοντας αυτή τη διαδικασία σε όλες τις ροονησίδες που φέρουν μετρήσεις τάσης, σχηματίζεται ένα ελάχιστο σύνολο από παρατηρήσιμα υποσυστήματα. Η απώλεια βαθμού της μήτρας W_b υπολογίζεται με έλεγχο του αριθμού των μηδενικών διαγωνίων στοιχείων των παραγόντων Cholesky της θετικά ημιορισμένης μήτρας κέρδους:

$$G_b = W_b^T W_b = LDL^T \tag{3.20}$$

όπου D είναι διαγώνια μήτρα και L είναι μοναδιαία κάτω τριγωνική μήτρα. Ο αριθμός p των μηδενικών διαγώνιων στοιχείων στην D ισούται με την απώλεια βαθμού της W_b [74]. Εάν p = 0 (p > 0), το σύστημα είναι παρατηρήσιμο (μη παρατηρήσιμο).

3.6.3 Επεξηγηματικό παράδειγμα εντοπισμού μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων

Με σκοπό την παρουσίαση του τρόπου εντοπισμού των μέγιστων παρατηρήσιμων υποσυστημάτων χρησιμοποιείται το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ και ένα μεικτό σύστημα μετρήσεων το οποίο αποτελείται τόσο από συμβατικές όσο και από μετρήσεις φασιθετών. Όπως φαίνεται στο

Σχήμα 3.3, το σύστημα μετρήσεων αποτελείται από ροές ισχύος στις γραμμές 1–2, 2–5, 3–4, 6–13, εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς 7, 9, και μονάδες PMU στους ζυγούς 1, 10 και 12.



Σχήμα 3.3 Διαχωρισμός συστήματος και παρατηρήσιμα υποσυστήματα

Η μονάδα PMU στο ζυγό 1 μετρά το φασιθέτη τάσης του ζυγού 1 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 1–2, 1–5, η μονάδα PMU στο ζυγό 10 μετρά το φασιθέτη τάσης του ζυγού 10 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 10–9, 10–11, ενώ η μονάδα PMU στο ζυγό 12 μετρά το φασιθέτες τάσης του ζυγού 12 και του φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 12–6 και 12–13. Με τοπολογική επεξεργασία των μετρήσεων ροής και έγχυσης ισχύος των κλάδων 1–2, 1–5, 2–5, 3–4, 6–13, 10–9, 10–11, 12–6, 12–13, σχηματίζονται επτά παρατηρήσιμες ροονησίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3: {6, 12, 13}, {1, 2, 5}, {9, 10, 11}, {14}, {8}, {7}, και {3, 4}. Οι γειτνιάζουσες ροονησίδες 1, 2, και εγαλύτερο παρατηρήσιμο υποσύστημα. Έτσι, για τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας θα εξετασθούν πέντε παρατηρήσιμα υποσυστήματα (r = 5): {1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 13}, {14}, {8}, {7}, και {3, 4}.

3.6.4 Εντοπισμός μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων

Μετά τον υπολογισμό των παραγόντων LDL^T της G_b , μπορούμε να προσδιορίσουμε τις μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες υπολογίζοντας τη k-οστή στήλη c_k της L^{-T} μέσω αντίστροφων αντικαταστάσεων για εκείνα τα k για τα οποία $d_{kk} = 0$:

$$L^T c_k = e_k \tag{3.21}$$

όπου e_k είναι ένα διάνυσμα με όλα του τα στοιχεία μηδενικά εκτός του k-οστού στοιχείου το οποίο ισούται με 1.0.

Σχηματίζουμε τη μήτρα C αποτελούμενη από τις στήλες c_k και υπολογίζουμε το γινόμενο AC, όπου A είναι η μήτρα πρόσπτωσης κλάδων προς κόμβους. Εάν ένα τουλάχιστον στοιχείο μιας γραμμής της AC είναι μη μηδενικό, τότε ο αντίστοιχος κλάδος (Μ/Σ ή γραμμή) είναι μη παρατηρήσιμος [56].

Σημειώνεται ότι εάν μια γραμμή της A σχετίζεται με μια γραμμή μεταξύ των υπερκόμβων i και j, η αντίστοιχη γραμμή του γινομένου Ac_k ισούται με $c_{k,i} - c_{k,j}$, όπου $c_{k,i}$ ($c_{k,j}$) είναι το στοιχείο i (j) του διανύσματος c_k . Εάν $c_{k,i} - c_{k,j} \neq 0$, τότε ο κλάδος i - j είναι μη παρατηρήσιμος. Έτσι δεν χρειάζεται να υπολογίζουμε και να αποθηκεύουμε τις μήτρες A και AC. Όταν προκύπτει ένα διάνυσμα στήλης c_k , συγκρίνονται τα στοιχεία $c_{k,i}$ και $c_{k,j}$ για κάθε κλάδο i - j. Εάν $c_{k,i} \neq c_{k,j}$ τότε ο κλάδος i - j είναι μη παρατηρήσιμος και απομακρύνεται από το σύνολο των κλάδων. Επαναλαμβάνοντας αυτήν την διαδικασία για κάθε ένα από τα μηδενικά διαγώνια στοιχεία p, προσδιορίζονται και απομακρύνονται όλοι οι μη παρατηρήσιμοι κλάδοι, ενώ τα εναπομείναντα διασυνδεδεμένα υποσυστήματα θα αποτελούν τις μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες.

Εάν το μετρητικό σύστημα αποτελείται μόνον από μετρήσεις μονάδων PMU, οι μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες συμπίπτουν με τα *r* παρατηρήσιμα υποσυστήματα τα οποία προκύπτουν τοπολογικά κατά τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας.

3.6.5 Αποκατάσταση παρατηρησιμότητας

Ο σκοπός της αποκατάστασης παρατηρησιμότητας είναι να επιλεγεί το κατάλληλο σύνολο μετρήσεων για να αποκατασταθεί η πλήρης παρατηρησιμότητα του συστήματος χωρίς να επηρεάζεται η εκτιμώμενη κατάσταση των παρατηρήσιμων νησίδων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν οι μετρήσεις που θα τοποθετηθούν είναι μη πλεονάζουσες σε σχέση με τις υπάρχουσες. Ο τύπος των μετρήσεων που έχουν αυτή την ιδιότητα καλούνται κρίσιμες μετρήσεις [66]. Ο αριθμός των πρόσθετων μετρήσεων θα είναι ακριβώς ίσος με την απώλεια βαθμού p της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων H.

Μολονότι μία μονάδα PMU μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιονδήποτε ζυγό μιας παρατηρήσιμης νησίδας, αντί μόνο των οριακών, για να συγχωνεύσει αυτή τη νησίδα με το υπόλοιπο σύστημα, αυτό δεν είναι πλήρως αξιοποιήσιμο αφού οι φασιθέτες ρεύματος των γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό περιττεύουν ως προς τις εσωτερικές μετρήσεις αυτής της νησίδας και δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας. Έτσι, μόνο μετρήσεις οι οποίες τοποθετούνται σε μη μετρούμενους οριακούς ζυγούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τοποθέτηση. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να προκύψουν διαφορετικά σύνολα μη πλεοναζουσών μετρήσεων, αλλάζοντας την σειρά με την οποία τις επεξεργαζόμαστε. Οι συμβατικές ψευδομετρήσεις είναι συνήθως μετρήσεις έγχυσης ζυγών, και βασίζονται σε προβλεπόμενα φορτία προγραμματισμένες παραγωγές γεννητριών. Η σειρά με την οποία επεξεργαζόμαστε τις και/ή υποψήφιες οριακές εγχύσεις επεξεργάζονται είναι σύμφωνα με την ακρίβεια τους. Για μία υποψήφια οριακή μονάδα PMU, μόνο η τάση του ζυγού και τα ρεύματα των μη παρατηρήσιμων γραμμών θεωρούνται, αφού οι ροές ρεύματος των γραμμών που συνδέονται με εσωτερικούς ζυγούς περιττεύουν σε σχέση με τις υπάρχουσες εσωτερικές μετρήσεις. Οι ανεξάρτητες μη πλεονάζουσες μετρήσεις τάσης ή ρεύματος που επιλέγονται, μπορεί να ανήκουν σε μία ή περισσότερες μονάδες ΡΜU. Μπορεί κανείς να προσθέσει μερικές ή όλες τις αχρησιμοποίητες μετρήσεις των αντίστοιχων PMUs για να αυξήσει την περίσσεια των μετρήσεων. Σημειώνεται, ότι η σειρά επεξεργασίας των PMUs και οι σχετιζόμενες μετρήσεις τάσης και ρεύματος, επηρεάζει τον αριθμό των PMUs που πρόκειται να εγκατασταθούν αλλά όχι το συνολικό αριθμό των ανεξάρτητων μετρήσεων φασιθετών, ο οποίος ισούται πάντοτε με p. Για την ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου αριθμού PMUs

προτείνεται μία ευρετική προσέγγιση σύμφωνα με την οποία οι PMUs που δεν γειτνιάζουν με ζυγούς ήδη υπαρχόντων PMU και έχουν τον μέγιστο αριθμό γειτονικών μη παρατηρήσιμων γραμμών κατατάσσονται πρώτα στην λίστα υποψηφιοτήτων.

Έστω ότι t είναι ο αριθμός των μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων σε ένα μη παρατηρήσιμο σύστημα. Εάν H είναι η Ιακωβιανή μήτρα των υπαρχουσών μετρήσεων και H_c η Ιακωβιανή των υποψήφιων μετρήσεων, έχουμε:

$$nullity \begin{pmatrix} H \\ H_c \end{pmatrix} = nullity \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$$
(3.22)

όπου W_b είναι η Ιακωβιανή μειωμένης τάξης που αντιστοιχεί στις υπάρχουσες μετρήσεις (τάσεις και οριακές εγχύσεις στις μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες) και W_c είναι η Ιακωβιανή μειωμένης τάξης που αντιστοιχεί στις υποψήφιες μετρήσεις (φασιθέτες τάσης και ρεύματος στις μη παρατηρήσιμες γραμμές που σχετίζονται με οριακές μονάδες PMU και οριακές εγχύσεις). Η εξίσωση (3.22) υποδηλώνει ότι όλη η πληροφορία σχετικά με την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας μπορεί να προκύψει από την ελαττωμένης τάξης Ιακωβιανή $\binom{W_b}{W_c}$. Έστω M_{bc} η μήτρα Gram [75] που

scetizetai me th $\begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$:

$$\boldsymbol{M}_{bc} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{W}_{b} \\ \boldsymbol{W}_{c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{W}_{b} \\ \boldsymbol{W}_{c} \end{pmatrix}^{T}$$
(3.23)

Από ιδιότητες γραμμικής άλγεβρας [74], έχουμε ότι:

$$rank(M_{bc}) = rank \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix} = t - nullity \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$$
(3.24)

Από τις εξισώσεις (3.22) και (3.24) προκύπτει ότι το δίκτυο καθίσταται πλήρως παρατηρήσιμο εάν nullity $\begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix} = 0$ και συνεπώς εάν η μήτρα M_{bc} είναι πλήρους βαθμού:

$$rank(M_{bc}) = t \tag{3.25}$$

Με τριγωνική παραγοντοποίηση προκύπτουν οι παράγοντες LDL^T της M_{bc} . Εάν το k-οστό διαγώνιο στοιχείο της D είναι μηδενικό (μη μηδενικό), τότε η γραμμή k της M_{bc} είναι γραμμικά εξαρτημένη (ανεξάρτητη) από το σύνολο των γραμμών 1,...,k-1 της M_{bc} [75] και η μέτρηση k είναι πλεονάζουσα (μη πλεονάζουσα) σε σχέση με τις προηγούμενες k-1 μετρήσεις. Οι υποψήφιες μετρήσεις που σχετίζονται με τα μη μηδενικά διαγώνια στοιχεία της D επιλέγονται για τοποθέτηση, έως ότου ο αριθμός των επιλεγμένων μετρήσεων γίνει ίσος με p. Στην αναφορά [70], η σύγκριση της προτεινόμενης διαδικασίας αποκατάστασης με τις υπάρχουσες άμεσες αριθμητικές μεθόδους [57], [58], [60], δείχνει ότι χρειάζονται ελάχιστες αριθμητικές πράξεις και αντίστοιχη εξοικονόμηση υπολογιστικού φόρτου.

3.6.6 Επεξηγηματικό παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου

Θεωρούμε το δίκτυο IEEE 14 ζυγών και αντίστοιχο μετρητικό σύστημα αποτελούμενο από συμβατικές μετρήσεις και μετρήσεις φασιθετών όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4 Μεικτό σύστημα μετρήσεων και αντίστοιχες ροονησίδες για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Συμβατικές μετρήσεις ροών τοποθετούνται στις γραμμές 2–1, 3–4, 5–2, 11–10, και 12–6, συμβατικές εγχύσεις στους ζυγούς 7, 9, 12, και 13, και PMUs στους ζυγούς 1 και 10. Η μονάδα PMU στο ζυγό 1 μετρά τον φασιθέτη τάσης του ζυγού 1 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 1–2, και 1–5 ενώ η μονάδα PMU στο ζυγό 10 μετρά τον φασιθέτη τάσης του ζυγού 1 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 10–9 και 10–11. Με τοπολογική επεξεργασία των ρευμάτων και των ροών ισχύος των γραμμών, σχηματίζονται οκτώ ροονησίδες (r = 8), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4: {6, 12}, {13}, {14}, {9, 10, 11}, {8}, {7}, {1, 2, 5}, και {3, 4}. Καμία άλλη ένωση των ροονησίδων σε μεγαλύτερα υποσύστημα δεν είναι δυνατή, αφού δεν υπάρχει άμεση διασύνδεση μεταξύ των ροονησίδων 4 και 7. Σύμφωνα με τις ρουνησίδες, σχηματίζουμε την μειωμένης τάξης Ιακωβιανή μήτρα $W_b(6 \times 8)$, που σχετίζεται με τις οριακές εγχύσεις P_7 , P_9 , P_{12} , P_{13} και τις γωνίες δ_1 , δ_{10} .

όπου με $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7$ και I_8 συμβολίζονται οι ροονησίδες. Η αντίστοιχη μήτρα κέρδους $G_b = W_b^T W_b$ είναι:

	(5	-7	2	0	0	0	0	0
	-7	10	-3	0	0	0	0	0
	2	-3	2	-3	0	1	0	1
<i>C</i> –	0	0	-3	11	1	-6	0	-2
$G_b =$	0	0	0	1	1	-3	0	1
	0	0	1	-6	-3	10	0	-2
	0	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	1	-2	1	-2	0	2

Οι τριγωνικοί παράγοντες της μήτρας G_b είναι:

$$L^{T} = \begin{pmatrix} 1 & -7/5 & 2/5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1/2 & -3/2 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Αφού η D έχει δύο μηδενικά διαγώνια στοιχεία, στις θέσεις 6 και 8, η απώλεια βαθμού των W_b και G_b είναι ίση με 2 και επομένως το δίκτυο είναι μη παρατηρήσιμο. Συνεπώς χρειάζονται δύο μετρήσεις για να καταστήσουν το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο. Μετά τον υπολογισμό των διανυσμάτων c_6 και c_8 με δύο αντίστροφες αντικαταστάσεις:

$$L^{T}c_{6} = e_{6} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{T}, \qquad L^{T}c_{8} = e_{8} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{T}.$$

σχηματίζουμε την μήτρα:

$$C = \begin{pmatrix} c_6 & c_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & -1 \\ 0 & 0 \\ 3 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 \\ 0 & 1 \\ 1_8 \\ \end{bmatrix}$$

Η μήτρα πρόσπτωσης Α κλάδων προς κόμβους του δικτύου μειωμένης τάξης, που σχετίζεται με τις ροονησίδες, και η αντίστοιχη μήτρα AC δίδονται ως ακολούθως:

	(I_1)	I_2	I_3	I_{A}	I_5	I_6	I_7	I_{s}		1 -		
	$\frac{1}{0}$						<u>-</u> '	$\frac{0}{1}$	$P_m \rightarrow 2$	$\int 0$	-1	<i>Br</i> 2-3
	0	0	0	0	0	0	1	-1	DI 2-3	0	-1	<i>Br</i> 2-4
	0	0	0	0	0	0	1	-1	<i>Br</i> 2 - 4		1	D., 1 5
	0	0	0	0	0	0	-1	1	Br 4-5	0	1	DI 4-3
	0	0	0	0	0	1	0	1	B. 4 7	-1	1	<i>Br</i> 4-7
	0	0	0	0	0	-1	0	1	Dr 4-7	0	1	Br 4-9
	0	0	0	-1	0	0	0	1	Br 4-9	1	1	D., 5 6
	-1	0	0	0	0	0	1	0	Br 5-6		1	<i>Dr 3-</i> 0
A =	1	Ο	0	1	0	0	Ο	Ο	AC =	: -1	-1	Br 6-11
	1	0	0	-1	0	0	0	0	<i>Br</i> 0-11	0	0	Br 6-13
	1	-1	0	0	0	0	0	0	Br 6-13		1	D., 7 0
	0	0	0	0	-1	1	0	0	Br 7 - 8	-2	1	Dr /-0
	0	0	0	1	0	1	0	0	Br 7 0	1	0	Br 7-9
	0	0	0	-1	0	1	0	0	Dr 7-9	1	1	Br 9-14
	0	0	-1	1	0	0	0	0	Br 9-14		0	D., 10 12
	1	-1	0	0	0	0	0	0	Br 12-13	0	0	<i>Dr</i> 12-15
	0	1	1	0	0	0	0	0	D. 12 14	(0	0)	<i>Br</i> 13-14
	U	1	-1	U	U	U	U	0)	Br 13-14			

Αφού οι γραμμές 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, και 11 της AC έχουν τουλάχιστον ένα μη μηδενικό στοιχείο, οι αντίστοιχες γραμμές 2–3, 2–4, 4–5, 4–7, 4–9, 5–6, 6–11, 7–8, 7–9 και 9–14, είναι μη παρατηρήσιμες. Αφαιρώντας όλες τις μη παρατηρήσιμες γραμμές, προκύπτουν έξι (t = 6) μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες: {6, 12, 13, 14}, {9, 10, 11}, {8}, {7}, {1, 2, 5} και {3, 4}, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



Σχήμα 3.5 Μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για το μεικτό μετρητικό σύστημα του δικτύου ΙΕΕΕ

14 ζυγών

Με βάση τις μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες, σχηματίζουμε την Ιακωβιανή μήτρα $W_b(4 \times 6)$ που σχετίζεται με τις υπάρχουσες οριακές εγχύσεις P_7 , P_9 και τις μετρήσεις γωνιών δ_1 , δ_{10}

$$W_b = \begin{pmatrix} O_1 & O_2 & O_3 & O_4 & O_5 & O_6 \\ \hline 0 & -1 & -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 3 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_7 \\ P_9 \\ \delta_1 \\ \delta_{10} \end{pmatrix}$$

όπου με O_1, O_2, O_3, O_4, O_5 και O_6 συμβολίζονται οι μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες.

Εάν χρησιμοποιηθούν μόνο μετρήσεις έγχυσης για την αποκατάσταση, υποψήφιες θα είναι μόνο μετρήσεις στους οριακούς ζυγούς που δεν έχουν ήδη μέτρηση, δηλαδή στους 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, και 14. Η αντίστοιχη μειωμένης τάξης Ιακωβιανή μήτρα $W_c(8\times 6)$ και η μήτρα

Gram $M_{bc} = \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}^T$ θα είναι:

									(12	-5	0	-1	2	-1	-6	1	1	-4	-1	1	P_7
	(0	0	0	0	0	\mathbf{O}	`		-5	12	0	3	2	-1	-6	2	-5	1	4	-4	P_9
	$\frac{U_1}{0}$	$\frac{U_2}{0}$	$-\frac{U_3}{0}$	$-\frac{U_4}{0}$	$\frac{0_{5}}{2}$	$-\frac{0}{2}$	P		0	0	1	0	2	-1	-2	2	-1	0	0	0	δ_1
	0	0	0	0	2	-2	$ _{\mathbf{D}}^{\mathbf{I}_2}$		-1	3	0	1	0	0	-1	0	-1	0	1	-1	δ_{10}
	0	0	0	0	-1	1			2	2	2	0	8	-4	-12	6	-2	0	0	0	P_2
117	0	-1	0	-1	-2	4	P_4	14	-1	-1	-1	0	-4	2	6	-3	1	0	0	0	P_3
$w_c =$	-1	0	0	0	2	-1	P_5	$M_{bc} =$	-6	-6	-2	-1	-12	6	22	-8	3	1	-1	1	P_4
	2	-1	1	0	-1	0	P_6		1	2	2	0	6	-3	-8	6	-4	0	-3	3	P_5
	1	1	1	-1	0	0	P_8		1	-5	-1	-1	-2	1	3	-4	6	0	-3	3	P_6
	-1 1	1	0	0	0	0	P_{11}		-4	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	P_8
		-1	0	0	0	0	P_{14}		-1	4	0	1	0	0	-1	1	-3	0	2	-2	P_{11}^{0}
									(1)	-4	0	-1	0	0	1	-1	3	0	-2	2)	P_{14}^{11}
																					17

Οι τριγωνικοί παράγοντες D και L^T της M_{bc} είναι:

$$D = diag \begin{pmatrix} 12 & 9,917 & 1 & 0,244 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

1	1	-0,417	0	-0,083	0,167	-0,083	-0.5	0,083	0,083	-0,333	-0,083	0.083	P_7
	0	1	0	0,261	0,286	-0,143	-0,857	0,244	-0,462	-0,067	0,361	-0,361	P_9
	0	0	1	0	2	-1	-2	2	-1	0	0	0	δ_1
	0	0	0	1	-2,345	1,172	2,931	-2,241	1,138	-0,655	-0,069	0,069	δ_{10}
	0	0	0	0	1	-0,5	-1,909	-0,091	1,182	0,318	-0,591	0,591	P_2
T	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	P_3
L =	0	0	0	0	0	0	1	-1	2	-2	-1	1	P_4
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	P_5
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	P_6
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	P_8
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	P_{11}
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1)	P_{14}

Οι υποψήφιες εγχύσεις στους ζυγούς 2 και 4 είναι μη πλεονάζουσες ως προς τις υπάρχουσες

.

εγχύσεις στους ζυγούς 7 και 9 και τις γωνίες των ζυγών 1 και 10, αφού αντιστοιχούν σε μη μηδενικά διαγώνια στοιχεία της D, και επομένως αυτές επιλέγονται ως το ελάχιστο σύνολο μετρήσεων για την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας.

Εάν χρησιμοποιηθούν μόνο PMUs για την αποκατάσταση, υποψήφιες για τοποθέτηση θα είναι μονάδες PMU στους οριακούς ζυγούς που δεν φέρουν ήδη μέτρηση, δηλαδή στους ζυγούς 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11, και 14. Οι υποψήφιοι ζυγοί για τοποθέτηση μονάδων PMU διατάσσονται σύμφωνα με τον αριθμό των μη παρατηρήσιμων γειτονικών γραμμών, δίνοντας χαμηλότερη προτεραιότητα στους ζυγούς εκείνους που συνδέονται με ζυγούς που ήδη ελέγχονται από μονάδες PMU:

- PMU#4 {3}, PMU#6 {2}, PMU#3 {1}, PMU#14 {1}, PMU#8 {1} (δεν συνδέονται με ζυγούς που ήδη ελέγχονται από PMU)
- PMU#5 {2}, PMU#2 {1}, PMU#11 {1} (συνδέονται με ζυγούς που ήδη ελέγχονται από PMU).

Η αντίστοιχη ελαττωμένης τάξης Ιακωβιανή μήτρα $W_c(22 \times 6)$ θα είναι:

I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	
0	$-\frac{2}{0}$		$-\frac{1}{0}$		$-\frac{6}{1}$	δ_{4}
0	0	0	0	-1	1	I_{4-2}
0	0	0	0	-1	1	I_{4-5}
0	0	0	-1	0	1	I_{4-7}
0	-1	0	0	0	1	<i>I</i> ₄₋₉
1	0	0	0	0	0	δ_6
1	0	0	0	-1	0	I_{6-5}
1	-1	0	0	0	0	<i>I</i> _{6–11}
0	0	0	0	0	1	δ_3
0	0	0	0	-1	1	<i>I</i> ₃₋₂
1	0	0	0	0	0	δ_{14}
1	-1	0	0	0	0	I_{14-9}
0	0	1	0	0	0	δ_8
0	0	1	-1	0	0	<i>I</i> ₈₋₇
0	0	0	0	1	0	δ_5
0	0	0	0	1	-1	I_{5-4}
-1	0	0	0	1	0	I_{5-6}
0	0	0	0	1	0	δ_2
0	0	0	0	1	-1	<i>I</i> ₂₋₃
0	0	0	0	1	-1	I_{2-4}
0	0	1	0	0	0	δ_{11}
1	0	1	0	0	0)	I_{11-6}

Στη συνέχεια σχηματίζουμε τη μήτρα Gram $M_{bc} = \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}^T$ διαστάσεων 26×26, η οποία θα είναι:

[12	-7	0	-1	1	1	1	-2	2	0	0	1	1	1	0	1	-1	4	0	-1	0	0	-1	-1	-1	-1]	
	-7	12	0	3	-1	-1	-1	0	-4	-1	-1	-4	-1	-1	-1	-4	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	
	0	0	1	0	0	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	
	-1	3	0	1	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	
	1	-1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-2	0	0	
	1	-1	-1	0	1	2	2	1	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	-1	-2	-1	-1	-2	-2	0	0	
	1	-1	-1	0	1	2	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	
	2	-4	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	
	0	-1	-1	0	1	2	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	
	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	1	1	1	0	0	-1	-1	-2	-1	-1	-1	0	-1	
	1	-4	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	
	1	-1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	-1	0	0	
$M_{bc} =$	1	-l	-1	0	1	2	2	1	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	-1	-2	-1	-1	-2	-2	0	0	
	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	-l	0	0	0	0	-1	
	1	-4	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	1	2	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	-1	
	-1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1 2	0	0	0	0	0	0	1	1	
	-4	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1		
	_1	1	1	0	_1	-1 _2	-1 _2	_1	_1	0	-1 _1	0	_1	-1 _2	0	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	
	0	1	1	0	0	_1	-1	0	-1	_2	-1	0	-1	_1	-1	0	0	1	1	2	1	1	1	1	0	1	
	0	0	1	0	0	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	
	-1	1	1	0	-1	-2	-2	-1	0	-1	0	-1	-2	0	0	0	0	1	2	1	1	1	2	2	0	0	
	-1	1	1	0	-1	-2	-2	-1	0	-1	0	-1	-2	0	0	0	0	1	2	1	1	1	2	2	0	0	
	-1	1	1	0	-1	-2	-2	-1	-1	0	-1	0	-1	-2	0	0	0	0	1	2	1	1	2	2	0	0	
	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	
	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	2	

Επίσης, η διαγώνια μήτρα D των παραγόντων της παραγοντοποίησης $ext{LDL}^T$ θα είναι:

Το πέμπτο και όγδοο στοιχείο της μήτρας D είναι μη μηδενικά, που σημαίνει ότι οι γραμμές 5 και 8 της μήτρας M_{bc} είναι γραμμικά ανεξάρτητες από τις γραμμές 1, 2, 3 και 4. Έτσι, η μέτρηση γωνίας δ_4 και το ρεύμα γραμμής I_{4-7} είναι μη πλεονάζουσες σε σχέση με τις υπάρχουσες μετρήσεις P_7 , P_9 , δ_1 , και δ_{10} , και επιλέγεται μία μονάδα PMU για τοποθέτηση στο ζυγό 4 η οποία θα καταστήσει το δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο.

3.6.7 Αποτελέσματα προσομοίωσης παρατηρησιμότητας

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι ελέγχου και αποκατάστασης παρατηρησιμότητας δοκιμάστηκαν στα δίκτυα 14, 30, και 57 ζυγών του ΙΕΕΕ. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις:

- Σύστημα μετρήσεων αποτελούμενο από μετρήσεις SCADA και PMU
- Σύστημα μετρήσεων αποτελούμενο μόνο από μετρήσεις PMU

Τα συστήματα μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε δίκτυο φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.1. Στη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα μετρήσεων απαρτίζεται μόνο από τις μετρήσεις PMU που φαίνονται στον πίνακα.

Δίκτυο		SCADA	PMU				
	Ροές	1-2, 4-9, 6-5, και 12-13	6 και 7				
IEEE-14	Εγχύσεις	3, 6, 8, 10 και 12					
IEEE-30	Ροές	1-3, 4-6, 8-6, 9-10, 10-17, 12-13, 18-19, 20-19, 21-22, 23-24, 24-25, 27-29 και 29-30	2 και 12				
	Εγχύσεις	Εγχύσεις 3, 7, 10, 11, 13, 26, 27 και 28					
IEEE-57	Ροές	3-15, 4-5, 4-6, 4-18, 7-29, 8-9, 9-10, 9-13, 10-12, 14-46, 19-20, 20-21, 29-52, 30-31, 32-34, 34-35, 35-36, 36-40, 46-47, 50-51 και 53-54	1, 24, 27, 38 και 41				
	Εγχύσεις	γχύσεις 2, 5, 7, 10, 18, 31, 33, 43, 51 και 52					

Πίνακας 3.1 Συστήματα μετρήσεων για τα υπό εξέταση δίκτυα

Οι ροονησίδες και οι μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.2 και 3.3 αντίστοιχα.

Δίκτυο	Ροονησίδες	Μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες
IEEE-14	{5, 6, 11, 12, 13}, {1, 2, 3} {4, 7, 8, 9}, {10} кац {14}	{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13}, {14}, {1, 2} και {3}
IEEE-30	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 12, 13, 14, 15, 16}, {7}, {9, 10, 17}, {11},{21, 22},{28}, {18, 19, 20}, {23, 24, 25}, {26} και {27, 29, 30}	{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16}, {9, 10, 11, 17), {18, 19, 20), {27, 29, 30}, {23, 24, 25, 26}, {21, 22} και {28}
IEEE-57	$ \{4, 5, 6, 18\}, \{1, 2, 3, 15, 16, 17\}, \\ \{19, 20, 21\}, \{22, 37, 38, 44, 48, 49\}, \\ \{23, 24, 25, 26, 27, 28\}, \{45\}, \{30, 31\}, \\ \{14, 46, 47\}, \{7, 29, 52\}, \{53, 54\}, \\ \{32, 34, 35, 36, 40\}, \{39\}, \{57\}, \{55\}, \\ \{8, 9, 10, 12, 13, 50, 51\}, \{33\} \\ \kappa \alpha i \{11, 41, 42, 43, 56\} $	{1, 2, 3, 11, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 37, 38, 41, 42, 43, 44, 48, 49, 56}, {45}, {14, 46, 47}, {7, 29, 52, 53, 54}, {39}, {57}, {55}, {30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40} και {8, 9, 10, 12, 13, 50, 51}

Πίνακας 3.2 Ροονησίδες και μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για την πρώτη περίπτωση

Δίκτυο	Ροονησίδες	Μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες
IEEE-14	$\{5, 6, 11, 12, 13\}, \{10\}, \{14\}, \{4, 7, 8, 9\}, \{1\}, \{2\}$ km $\{3\}$	$\{4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13\}, \{10\}, \{14\}, \{1\}, \{2\}, \{2\}, \{3\}$
IEEE-30	$\{1, 2, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16\}, \{3\}, \{7\}, \{11\}, \{9\}, \{10\}, \{8\}, \{28\}, \{17\}, \{20\}, \{21\}, \{18\}, \{19\}, \{22\}, \{23\}, \{24\}, \{25\}, \{27\}, \{26\}, \{29\} \ \mbox{xu} \ \{30\}$	$\{1, 2, 4, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16\}, \{3\}, \{7\}, \\\{11\}, \{9\}, \{10\}, \{8\}, \{28\}, \{17\}, \\\{20\}, \{21\}, \{18\}, \{19\}, \{22\}, \{23\}, \{24\}, \\\{25\}, \{27\}, \{26\}, \{29\} \text{ kat } \{30\}$
IEEE-57	$ \{ 26, 27, 28, 23, 24, 25, 22, 38, 44, 48, \\ 37, 49 \}, \{1, 2, 15, 16, 17 \}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \\ \{11, 41, 42, 43, 56 \}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \\ \{10\}, \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{18\}, \{19\}, \{20\}, \\ \{21\}, \{29\}, \{30\}, \{31\}, \{32\}, \{33\}, \{34\}, \\ \{35\}, \{36\}, \{39\}, \{40\}, \{45\}, \{46\}, \{47\}, \\ \{50\}, \{51\}, \{52\}, \{53\}, \{54\}, \{55\} \kappa \alpha \{57\} \} $	$ \{ 26, 27, 28, 23, 24, 25, 22, 38, 44, 48, \\ 37, 49 \}, \{1, 2, 15, 16, 17 \}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \\ \{11, 41, 42, 43, 56 \}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \\ \{12\}, \{13\}, \{14\}, \{18\}, \{19\}, \{20\}, \{21\}, \\ \{29\}, \{30\}, \{31\}, \{32\}, \{33\}, \{34\}, \{35\}, \\ \{36\}, \{39\}, \{40\}, \{45\}, \{46\}, \{47\}, \{50\}, \\ \{51\}, \{52\}, \{53\}, \{54\}, \{55\} \\ \kappa \alpha \{57\} \} $

Πίνακας 3.3 Ροονησίδες και μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες για την δεύτερη περίπτωση

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι, με εξαίρεση το δίκτυο των 14 ζυγών, οι ροονησίδες και οι μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες συμπίπτουν.

Η αποκατάσταση παρατηρησιμότητας στην πρώτη περίπτωση γίνεται με τοποθέτηση τόσο μετρήσεων έγχυσης όσο και μονάδων PMU. Στη δεύτερη περίπτωση, χρησιμοποιούνται μόνον μονάδες PMU. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5 αντιστοίχως.

Πίνακας 3.4 Εγχύσεις και μονάδες PMU για αποκατάσταση παρατηρησιμότητας στην πρώτη περίπτωση

Δίκτυο	Εγχύσεις	PMUs
IEEE-14	1 και 9	2 και 13
IEEE-30	6, 8 και 15	22
IEEE-57	3, 6, 9, 13, 15, 25, 37 kai 39	3, 6, 15, 25 kai 39

Πίνακας 3.5 Μονάδες PMU για αποκατάσταση παρατηρησιμότητας στη δεύτερη περίπτωση

Δίκτυο	PMUs
IEEE-14	2 και 9
IEEE-30	4, 6, 9, 10, 15, 18, 25 και 27
IEEE-57	4, 7, 9, 15, 20, 25, 32, 36, 39, 46, 50 και 53

3.7 Προτεινόμενος αλγόριθμος ανάλυσης και αποκατάστασης παρατηρησιμότητας με μετρήσεις μηδενικές έγχυσης και PMU

Η μέθοδος αυτή αποτελεί παραλλαγή εκείνης που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.6 και έχει σκοπό την ανάλυση και αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας όταν το σύστημα μετρήσεων περιλαμβάνει μηδενικές μετρήσεις έγχυσης και μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU. Το διάνυσμα κατάστασης μπορεί να εκφραστεί είτε σε πολικές συντεταγμένες, V_i , δ_i , είτε σε καρτεσιανές συντεταγμένες, E_i , F_i , όπου V_i , δ_i , E_i , F_i είναι το μέτρο, το όρισμα, το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της τάσης του ζυγού i, αντίστοιχα.

Χωρίς απώλεια της γενικότητας, θέτοντας όλες τις τάσεις ζυγών ίσες με $\tilde{V_i} = 1 \angle 0 = 1 + j0$ και τις σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών ίσες με j1 και αμελώντας τους εγκάρσιους κλάδους, η ανάλυση παρατηρησιμότητας βασίζεται στο γραμμικοποιημένο μοντέλο:

$$\begin{pmatrix} H^T H & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^T \Delta z \\ \Delta c \end{pmatrix}$$
(3.26)

όπου Δz , Δc είναι οι διαφορές μεταξύ μετρούμενων και υπολογιζόμενων τιμών των μετρήσεων PMU και των μηδενικών εγχύσεων αντίστοιχα, Δx είναι η μεταβολή του διανύσματος κατάστασης, H και C είναι οι Ιακωβιανές μήτρες των μετρήσεων PMU και των μηδενικών εγχύσεων, και λ οι πολλαπλασιαστές Lagrange. Στην περίπτωση αυτή οι μήτρες H και C καθίστανται σταθερές και η συνθήκη για πλήρη παρατηρησιμότητα είναι η ακόλουθη [50]:

$$rank \begin{pmatrix} H^{T}H & C^{T} \\ C & 0 \end{pmatrix} = rank \begin{pmatrix} H \\ C \end{pmatrix} = n$$
(3.27)

$$nullity \begin{pmatrix} H^T H & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix} = nullity \begin{pmatrix} H \\ C \end{pmatrix} = 0$$
(3.28)

Οι Ιακωβιανές μήτρες H και C, που σχετίζονται με τις μετρήσεις φασιθετών από μονάδες PMU και τις μηδενικές εγχύσεις αντίστοιχα, θα έχουν την ίδια μορφή είτε το διάνυσμα κατάστασης εκφράζεται σε πολικές είτε σε καρτεσιανές συντεταγμένες:

(3.29)

$$C = \begin{pmatrix} \cdots \delta_{i} (E_{i}) & \cdots \delta_{j} (E_{j}) & \cdots \delta_{k} (E_{k}) \cdots & V_{j} (F_{j}) & \cdots & V_{k} (F_{k}) \cdots & \cdots & \vdots \\ l_{i} & -1 & -1 & & -l_{i} & 1 & 1 & \\ l_{i} & -1 & -1 & & -l_{i} & 1 & 1 & \\ & & & & & & & & & \\ \end{array} \begin{vmatrix} \vdots \\ I_{i,r}^{zero} \\ I_{i,r}^{zero} \\ \vdots \\ \vdots \end{vmatrix}$$
(3.30)

όπου $\{j,k,\ldots\}$ και l_i είναι το σύνολο και ο αριθμός των ζυγών, αντίστοιχα, που συνδέονται με το ζυγό i. Αφού τα μέτρα και ορίσματα ή τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των φασιθετών τάσης και ρεύματος είναι σε ζεύγη, μπορούμε να απλοποιήσουμε το πρόβλημα της παρατηρησιμότητας διαχωρίζοντας τις Ιακωβιανές μήτρες στα ενεργά και άεργα μέρη τους και χρησιμοποιώντας μόνο την "ενεργό" περίπτωση για την ανάλυση της παρατηρησιμότητας.

Για πρακτικά συστήματα ένα μεγάλο μέρος των μετρήσεων είναι μετρήσεις ροών ισχύος και επομένως είναι λογικό να επιλέζουμε ως νησίδες S_i τις λεγόμενες *ροονησίδες*, οι οποίες προσδιορίζονται βάσει των μετρούμενων κλάδων. Μια ροονησίδα είναι ένα υποδίκτυο του συστήματος τέτοιο ώστε μεταξύ δύο οποιωνδήποτε ζυγών αυτής να υπάρχει πάντα ένα μονοπάτι από ένα τουλάχιστον σύνολο μετρούμενων κλάδων.

Θεωρούμε και πάλι ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από r ροονησίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, όπου κάθε ροονησίδα περιλαμβάνει n_i ζυγούς.



Σχήμα 3.6 Νησιδοποίηση συστήματος με μετρήσεις PMU και μηδενικές εγχύσεις

Η Ιακωβιανή μήτρα Η μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$H = \begin{pmatrix} H_1 & & \\ & \ddots & \\ & & H_r \\ - & -H_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 & & \\ & \ddots & \\ & & H_r \\ - & -H_{br} \end{pmatrix}$$
(3.31)

όπου, η Ιακωβιανή $H_i(m_i \times n_i)$ αντιστοιχεί στις εσωτερικές μετρήσεις των φασιθετών ρεύματος της ροονησίδας i, και η Ιακωβιανή υπομήτρα $H_b(m_b \times n)$ αντιστοιχεί στις μετρήσεις των φασιθετών τάσης (εσωτερικών και οριακών) στις ροονησίδες και στις μηδενικές εγχύσεις στους οριακούς ζυγούς των ροονησίδων.

Ορίζεται η μήτρα $W_b(m_b \times r)$ ως:

$$W_b = \begin{pmatrix} w_{b1} & \cdots & w_{br} \end{pmatrix} \tag{3.32}$$

όπου κάθε στήλη w_{bi} είναι το άθροισμα των στηλών της H_{bi} . Η μήτρα W_b μπορεί να θεωρηθεί ως Ιακωβιανή μήτρα ενός συστήματος μειωμένης τάξης, όπου κάθε ροονησίδα i παριστάνεται από τον "υπερκόμβο" i και κάθε γραμμή μεταξύ των ροονησίδων i και j με τη "γραμμή" i - j. Μία μηδενική έγχυση σ' έναν οριακό ζυγό της ροονησίδας i, συνδεόμενο με τους οριακούς ζυγούς των ροονησίδων j ($j \neq i$), μετασχηματίζεται στο άθροισμα των ροών των "γραμμών" i - j. Μία μέτρηση φασιθέτη τάσης σ' ένα ζυγό της ροονησίδας i μετασχηματίζεται σε μέτρηση φασικής γωνίας του "υπερκόμβου" i. Αποδεικνύεται ότι [67]:

$$nullity \begin{pmatrix} H \\ C \end{pmatrix} = nullity (W_b) = p$$
 (3.33)

Η μήτρα Gram, M_b , που σχετίζεται με την W_b μπορεί να γραφεί [75]:

$$M_b = W_b W_b^T \tag{3.34}$$

Από γραμμική άλγεβρα [74], έχουμε:

$$rank(M_{b}) = rank(W_{b}) = r - nullity(W_{b})$$
(3.35)

Από τις εξισώσεις (3.33) και (3.35) προκύπτει ότι το σύστημα είναι παρατηρήσιμο (nullity $(W_b) = 0$), εάν η μήτρα M_b είναι πλήρους βαθμού, που σημαίνει $rank(M_b) = r$. Για τον υπολογισμό του βαθμού της μήτρας M_b εξετάζονται οι παράγοντες Cholesky (LDL^T) που προκύπτουν κατά την παραγοντοποίηση της M_b , όπου D είναι διαγώνια μήτρα και L είναι μοναδιαία κάτω τριγωνική μήτρα. Ο αριθμός των μηδενικών διαγώνιων στοιχείων της D ισούται με την απώλεια βαθμού p [74]. Εάν p = 0, τότε το σύστημα είναι παρατηρήσιμο, διαφορετικά χαρακτηρίζεται ως μη παρατηρήσιμο.

3.7.1 Αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας

Σε ένα μη παρατηρήσιμο σύστημα, πρέπει να προστεθούν μετρήσεις προερχόμενες από PMU ή/και ψευδομετρήσεις έγχυσης ώστε να συγχωνευθούν οι ροονησίδες σε μία ισοδύναμη παρατηρήσιμη νησίδα. Επειδή στη διαδικασία συνένωσης των ροονησίδων συνεισφέρουν μόνο οι μη μετρούμενοι οριακοί ζυγοί, αυτοί θα αποτελούν τις στρατηγικές θέσεις στις οποίες πρέπει να τοποθετηθούν PMUs ή εγχύσεις. Για μια υποψήφια οριακή μονάδα PMU, οι μετρήσεις φασιθέτη τάσης και φασιθετών ρεύματος όλων ή ορισμένων γειτονικών μη παρατηρήσιμων γραμμών που συνδέουν ροονησίδες θα είναι υποψήφιες για τοποθέτηση. Η σειρά με την οποία επεξεργαζόμαστε τις οριακές μονάδες PMU καθορίζεται σύμφωνα με τον αριθμό των διασυνδεδεμένων γειτονικών ροονησίδων, με σκοπό την μεγιστοποίηση του αριθμού των ροονησίδων που συνενώνονται και την ελαχιστοποίηση του αριθμού των επιλεγόμενων PMU. Η σειρά επεξεργασίας των υποψήφιων οριακών εγχύσεων είναι σύμφωνα με την ακρίβειά τους.

Ορίζεται ως $H_c(m_c \times n)$ η Ιακωβιανή υπομήτρα των υποψήφιων μετρήσεων PMU και ως

 $W_c(m_c \times r)$ η αντίστοιχη μειωμένη Ιακωβιανή μήτρα. Μπορεί να αποδειχθεί ότι [67]:

$$nullity \begin{pmatrix} H \\ C \\ H_c \end{pmatrix} = nullity \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$$
(3.36)

Με σκοπό την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, απαιτείται ένα ελάχιστο σύνολο από p μετρήσεις της μήτρας H_c , ως προς τις υπάρχουσες μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος στην H και τις μηδενικές εγχύσεις στην C. Από την εξίσωση (3.36) συνάγεται ότι ένα σύνολο γραμμών της H_c είναι γραμμικά ανεξάρτητες από τις γραμμές της $\begin{pmatrix} H \\ C \end{pmatrix}$, εάν οι αντίστοιχες γραμμές της W_c είναι γραμμικά ανεξάρτητες από τις γραμμές της W_b . Η παρατήρηση αυτή οδηγεί σε μια άμεση μέθοδο για τον προσδιορισμό του ελάχιστου συνόλου μετρήσεων. Έστω ότι M_{bc} είναι η μήτρα Gram που σχετίζεται με την ελαττωμένη Ιακωβιανή μήτρα $\begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$:

$$M_{bc} = \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}^T$$
(3.37)

Με τριγωνική παραγοντοποίηση λαμβάνουμε τους παράγοντες Cholesky (LDL^T) της M_{bc} . Εάν το διαγώνιο στοιχείο στην θέση k της μήτρας D είναι μη μηδενικό, τότε η γραμμή k της M_{bc} είναι γραμμικά ανεξάρτητη από το σύνολο των γραμμών 1,...,k-1 της M_{bc} και η μέτρηση k είναι μη πλεονάζουσα ως προς τις προηγούμενες k-1 μετρήσεις [75]. Επομένως, υποψήφιες μετρήσεις που σχετίζονται με τα μη μηδενικά διαγώνια στοιχεία της D επιλέγονται για τοποθέτηση, μέχρι ο αριθμός των επιλεγμένων μετρήσεων να φτάσει το p. Όταν ο φασιθέτης τάσης ενός ζυγού i ή ο φασιθέτης ρεύματος μιας γραμμής i-j επιλεγεί για τοποθέτηση, τότε όλες οι διαθέσιμες μετρήσεις της μονάδας PMU που εγκαθίσταται στο ζυγό i θα χρησιμοποιηθούν για αποκατάσταση, αυξάνοντας την περίσσεια και αξιοπιστία του συστήματος.

3.7.2 Επεξηγηματικό παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου

Έστω το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ, το οποίο περιλαμβάνει μετρήσεις μηδενικής έγχυσης στους ζυγούς 1 και 3 και μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος οι οποίες προέρχονται από μονάδες PMU εγκατεστημένες στους ζυγούς 6 και 7. Θεωρούμε ότι οι μονάδες PMU μετρούν τον φασιθέτη τάσης του ζυγού στον οποίο είναι εγκατεστημένες και τους φασιθέτες ρεύματος όλων των γραμμών που συνδέονται σ' αυτόν. Έτσι η μονάδα PMU στο ζυγό 6 μετρά τον φασιθέτη τάσης στον ζυγό 6 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 6-5, 6-11, 6-12 και 6-13. Αντίστοιχα, η μονάδα PMU στο ζυγό 7 μετρά τον φασιθέτη τάσης του ζυγού 7 και τους φασιθέτες ρεύματος των γραμμών 7-4, 7-8 και 7-9.

Με τοπολογική επεξεργασία των ρευμάτων γραμμών, σχηματίζονται οι ακόλουθες επτά (r = 7) ροονησίδες: {5, 6, 11, 12, 13}, {10}, {14}, {4, 7, 8, 9}, {1}, {2}, και {3}, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.





Σύμφωνα με τις ροονησίδες που σχηματίζονται, η ελαττωμένη Ιακωβιανή μήτρα $W_b(4 \times 7)$ που σχετίζεται με τις δύο φασικές γωνίες δ_6 , δ_7 και τις μετρήσεις μηδενικής έγχυσης P_1^{zero} και P_3^{zero} , είναι η ακόλουθη:

$$W_b = \begin{pmatrix} I_1 & I_2 & I_3 & I_4 & I_5 & I_6 & I_7 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_6 \\ \delta_7 \\ P_1^{zero} \\ P_2^{zero} \end{pmatrix}$$

όπου, I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , I_5 , I_6 και I_7 είναι οι ροονησίδες του δικτύου. Η μήτρα Gram $M_b = W_b W_b^T$ είναι:

$$M_{b} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{6} \\ \delta_{7} \\ P_{1}^{zero} \\ P_{3}^{zero} \end{pmatrix}$$

Οι τριγωνικοί παράγοντες τη
ς $M_b\,$ είναι:

$$L^{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1/5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{6} \\ \delta_{7} \\ P_{1}^{zero} \\ P_{3}^{zero} \end{pmatrix} \qquad D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 24/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{6} \\ \delta_{7} \\ P_{1}^{zero} \\ P_{3}^{zero} \end{pmatrix}$$

Τα τέσσερα διαγώνια στοιχεία της μήτρας D είναι μη μηδενικά, το οποίο σημαίνει ότι $rank(M_b) = rank(W_b) = 4$ και $nullity(W_b) = r - rank(W_b) = 3 \neq 0$. Επομένως, το δίκτυο είναι μη παρατηρήσιμο και χρειάζονται τρεις μετρήσεις για να αποκατασταθεί πλήρως η παρατηρησιμότητα. Υποψήφιες μονάδες PMU για τοποθέτηση είναι εκείνες στους μη μετρούμενους οριακούς ζυγούς 2, 4, 5, 9, 10, 11, 13, 14 και διατάσσονται σύμφωνα με τον αριθμό των διασυνδεδεμένων γειτονικών ροονησίδων. Η ελαττωμένη Ιακωβιανή μήτρα $W_c(26 \times 7)$ προς επεξεργασία για την τοποθέτηση PMUs θα είναι:

$$W_{c} = \begin{pmatrix} W_{c2}^{T} & W_{c4}^{T} & W_{c5}^{T} & W_{c9}^{T} & W_{c10}^{T} & W_{c14}^{T} & W_{c11}^{T} & W_{c13}^{T} \end{pmatrix}^{T}$$

όπου W_{ci} είναι η ελαττωμένη Ιακωβιανή μήτρα που σχετίζεται με τις μετρήσεις της μονάδας PMU που εγκαθίσταται στο ζυγό *i*:

$$\begin{split} & I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ & W_{c2} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{2} \\ I_{2-1} \\ I_{2-3} \\ I_{2-4} \\ I_{2-5} \end{pmatrix} \\ & W_{c4} = \begin{pmatrix} I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{4} \\ I_{4-2} \\ I_{4-3} \\ I_{4-5} \end{pmatrix} \\ & W_{c5} = \begin{pmatrix} I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{5} \\ I_{5-1} \\ I_{5-2} \\ I_{5-4} \end{pmatrix} \\ & W_{c9} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{9} \\ I_{9-10} \\ I_{9-14} \end{pmatrix} \\ & W_{c10} = \begin{pmatrix} I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_{10} \\ I_{10-9} \\ I_{10-11} \end{pmatrix} \\ & W_{c11} = \begin{pmatrix} I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ I_{1} \quad I_{2} \quad I_{3} \quad I_{4} \quad I_{5} \quad I_{6} \quad I_{7} \\ I_{1-10} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{1-10} \\ I_{1-1} \\ I_{1-1} & I_{1-1} \\ I_{1-1}$$

Σχηματίζοντας την 30×7 μήτρα $W_{bc} = \begin{pmatrix} W_b \\ W_c \end{pmatrix}$ και υπολογίζοντας τους παράγοντες Cholesky της

μήτρας Gram $M_{bc} = W_{bc}W_{bc}^T$, προκύπτουν τρία οδηγά στοιχεία (pivots) που αντιστοιχούν στις μετρήσεις δ_2 , I_{9-10} και I_{9-14} και το ελάχιστο σύνολο των PMUs που απαιτούνται για αποκατάσταση αποτελείται από PMUs στους ζυγούς 2 και 9.

3.7.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι ελέγχου και αποκατάστασης της παρατηρησιμότητας δοκιμάστηκαν στα δίκτυα 14 και 118 ζυγών του ΙΕΕΕ. Η αποκατάσταση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μόνο μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος από PMU. Τα συστήματα μετρήσεων, όπως επίσης και τα αποτελέσματα του ελέγχου και της αποκατάστασης παρατηρησιμότητας εμφανίζονται στον Πίνακα 3.6.

Δίκτυο	Πριν την αποκατάσταση				Μετά την αποκατάσταση	
	Μετρήσεις		Αριθμός	Επιλεγμένες	Μετρήσεις	
	Μηδενικές	PMUs	Ροονησίδων	μετρήσεις	Μηδενικές	PMUs
	Εγχύσεις			(PMUs)	Εγχύσεις	
IEEE-14	11	2, 9	6	6, 7	11	2, 6, 7, 9
IEEE-	30, 38, 64,	2, 9, 11, 21,	44	5, 12, 17, 24,	30, 38, 64,	2, 5, 9, 11, 12,
118	71, <i>και</i> 81	28, 34, 37,		25, 40, 52,	71, <i>και</i> 81	17, 21, 24, 25,
		45, 49, 56,		63, 68, 73,		28, 34, 37, 40,
		62, 75, 80,		77, 94, και		45, 49, 52, 56,
		85, 86, 90,		101		62, 63, 73, 75,
		105, 110, και				77, 80, 85, 86,
		114				90, 94, 101,
						105, 110, και
						114
1	1	1		1		

Πίνακας 3.6 Συστήματα μετρήσεων πριν και μετά την αποκατάσταση παρατηρησιμότητας των δικτύων
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών

Η παρατηρησιμότητα ενός δικτύου σχετίζεται άμεσα με την διάταξη μετρήσεων του συστήματος. Οι συνεχείς μεταβολές στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, που οφείλονται κυρίως σε αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου ή σε εσφαλμένες ενδείξεις μετρητικών συσκευών, αναγκάζουν τους χειριστές των ηλεκτρικών συστημάτων να ελέγχουν την παρατηρησιμότητα του δικτύου προτού εφαρμόσουν την εκτίμηση κατάστασης. Στην περίπτωση που οι διαθέσιμες μετρήσεις δεν είναι επαρκείς ώστε να υπολογιστεί η κατάσταση του δικτύου, ακολουθείται μία διαδικασία τοποθέτησης πρόσθετων μετρήσεων οι οποίες θα καταστήσουν και πάλι το σύστημα παρατηρήσιμο.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τεχνικές τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών με σκοπό τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνόλου των ζυγών στους οποίους θα τοποθετηθούν PMUs. Ο όρος "βέλτιστο", υπονοεί ότι το σύνολο αυτό θα περιέχει τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό και τις θέσεις των PMUs, ώστε το δίκτυο να καταστεί πλήρως παρατηρήσιμο. Το πρόβλημα αυτό είναι ευρύτερα γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως Πρόβλημα Βέλτιστης Τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών.

4.1 Βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMUs

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μονάδες PMU είναι συσκευές οι οποίες παρέχουν προηγμένη προστασία, ανάλυση και έλεγχο στα ηλεκτρικά συστήματα, χρησιμοποιώντας δορυφορικές τεχνολογίες.

Η τυπική διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU –Optimal PMU Placement (OPP) problem– αφορά τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού των PMUs, n_{PMU} , και το βέλτιστο σύνολο θέσεων, $S(n_{PMU})$, που αντιστοιχεί στα n_{PMU} PMUs, που διασφαλίζουν ότι το σύστημα γίνεται παρατηρήσιμο. Αυτό το μοντέλο μπορεί να γενικευτεί με σκοπό να συμπεριλάβει οποιοδήποτε άλλο πρόσθετο περιορισμό ή ενδεχόμενο ως ακολούθως [76]:

$$\min_{n_{\text{PMU}}} \left\{ G\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) \right\}$$
s.t. $f\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) = 1$
(4.1)

όπου $G(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ είναι το σύνολο των μη παρατηρήσιμων ζυγών, και $f(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ είναι μια πολυκριτηριακή λογική συνάρτηση, οριζόμενη ως:

$$f\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) = O_{bs}\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) + O_{bs}\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right) \bullet C_{on}\left(n_{\text{PMU}}, S(n_{\text{PMU}})\right)$$
(4.2)

όπου $O_{bs}(.)$ είναι η λογική συνάρτηση υπολογισμού της παρατηρησιμότητας, $C_{on}(.)$ η λογική συνάρτηση υπολογισμού κάθε περιορισμού ή ενδεχομένου, ενώ τα σύμβολα + και • υποδηλώνουν τους λογικούς τελεστές OR και AND αντίστοιχα. Από άποψη υπολογιστικής πολυπλοκότητας, το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs κατατάσσεται στη κατηγορία NP-hard (Non deterministic Polynomial time-hard) και δεν έχει μοναδική λύση. Αναλόγως του σημείου εκκίνησης, η βελτιστοποίηση μπορεί να δώσει διαφορετικά σύνολα από βέλτιστες λύσεις, με τον ίδιο πάντοτε ελάχιστο αριθμό μονάδων PMU. Οι διαφορετικές διατυπώσεις του προβλήματος τοποθέτησης PMUs, που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία, περιλαμβάνουν τους ακόλουθους περιορισμούς και ενδεχόμενα:

- Επίδραση ζυγών μηδενικής έγχυσης
- Επίδραση συμβατικών μετρήσεων
- Επίδραση χωρητικότητας καναλιών PMU
- Ενδεχόμενο απώλειας ενός ή πολλών μονάδων PMU
- Ενδεχόμενο απώλειας μίας γραμμής
- Ενδεχόμενο απώλειας μίας γραμμής ή ενός PMU

4.2 Ταξινόμηση μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος OPP

Στη διεθνή βιβλιογραφία, οι μέθοδοι βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU μπορούν να καταταγούν σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Μαθηματικοί Αλγόριθμοι
- Ευρετικοί Αλγόριθμοι

4.2.1 Μαθηματικοί αλγόριθμοι

4.2.1.1 Ακέραιος προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός -Integer Programming (IP)- είναι μία μέθοδος μαθηματικού προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με ακέραιες μεταβλητές, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί, μη γραμμικοί ή τετραγωνικοί, οδηγώντας σε αλγορίθμους ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού και τετραγωνικού προγραμματισμού, αντιστοίχως [77].

Ο σκοπός της μεθόδου [78] είναι να επιτύχει την τοποθέτηση μονάδων PMU σε στρατηγικούς ζυγούς του δικτύου ώστε να καταστήσουν το δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο. Επίσης εξετάζεται η ύπαρξη περιορισμών οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη PMUs και ψευδομετρήσεων ή πραγματικών μετρήσεων έγχυσης, όπως επίσης και συγχρονισμένων αλλά και συμβατικών μετρήσεων έγχυσης και ροής. Στην αναφορά [79], παρουσιάζεται μια αριθμητική μέθοδος βέλτιστης τοποθέτησης ικανή να μετασχηματίσει τις υπάρχουσες κρίσιμες μετρήσεις σε πλεονάζουσες. Ο κύριος στόχος είναι να βελτιώσει τις διαδικασίες ανίχνευσης και εντοπισμού των εσφαλμένων μετρήσεων του εκτιμητή κατάστασης για ένα συγκεκριμένο σύστημα, εκμεταλλευόμενη τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας των PMUs.

Μία ακόμη έκφραση του προβλήματος με χρήση γραμμικού προγραμματισμού προτείνεται στην αναφορά [80]. Αυτή η πρόταση βελτιώνει τις διαδικασίες ανίχνευσης και εντοπισμού του εκτιμητή, θεωρώντας ότι κάθε σφάλμα που θα παρουσιαστεί σε μία μέτρηση θα είναι ανιχνεύσιμο. Ανάλογα με τη μετρητική διάταξη και την τοπολογία του δικτύου, οι κρίσιμες μετρήσεις μετασχηματίζονται σε πλεονάζουσες. Το πρόβλημα διευρύνεται για να συμπεριλάβει συμβατικές μετρήσεις ως υποψήφιες για τοποθέτηση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει τις βέλτιστες θέσεις όταν απαιτείται ένα συγκεκριμένο επίπεδο τοπικής περίσσειας στο σύστημα. Ένας απλός αλγόριθμος βασισμένος στον ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό, διασφαλίζει την πλήρη τοπολογική παρατηρησιμότητα του δικτύου υπό φυσιολογικές όπως και υπό κρίσιμες συνθήκες [81]. Μία μέθοδος βασισμένη στην ευστάθεια τάσης εφαρμόζεται για να καλύψει ορισμένα κρίσιμα ενδεχόμενα τα οποία συνυπολογίζονται στη βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs.

Διάφορα ενδεχόμενα, όπως απώλειες γραμμών ή μετρήσεων, μπορούν να ληφθούν ως επιπρόσθετες συνθήκες ταυτόχρονα ή ξεχωριστά στην επίλυση του προβλήματος τοποθέτησης [82]. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή συμπεριλαμβάνει τις συνθήκες επικοινωνίας των ηλεκτρικών δικτύων ως περιορισμούς οι οποίοι ενσωματώνονται στο μοντέλο με σκοπό τον περιορισμό του αριθμού των

PMUs. Στην αναφορά [83], προτείνεται μία μέθοδος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs για πλήρη και μερική παρατηρησιμότητα, θεωρώντας περιπτώσεις με και χωρίς μηδενικές εγχύσεις, και η οποία μπορεί να μοντελοποιηθεί και να επιλυθεί ως ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Μία παρόμοια μοντελοποίηση, λαμβάνοντας ή όχι υπόψη συμβατικές μετρήσεις ροής και έγχυσης, προτείνεται στην αναφορά [84].

Η πολλαπλών σταδίων διαδικασία τοποθέτησης PMUs [85] επιβεβαιώνει ότι η λύση τοποθέτησης PMUs, όπως προκύπτει από την διαδικασία αυτή, είναι η ίδια ακριβώς με αυτή που υποθέτει την τοποθέτησή τους σε ένα μόνο στάδιο. Παράλληλα, στην πρόταση αυτή αναπτύσσεται ένα γραμμικό μοντέλο στο οποίο εμπεριέχονται περιορισμοί μηδενικών εγχύσεων και εισάγονται δύο δείκτες, ο δείκτης παρατηρησιμότητας ζυγού (BOI) και ο δείκτης περίσσειας παρατηρησιμότητας συστήματος (SORI), με σκοπό την ταξινόμηση των πολλαπλών λύσεων. Μία υβριδική τεχνική τοποθέτησης PMUs δύο σταδίων παρουσιάζεται στην αναφορά [86]. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει μια προσέγγιση ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού η οποία διασφαλίζει την τοπολογική παρατηρησιμότητα, ενώ το δεύτερο στάδιο καθορίζει την αριθμητική παρατηρησιμότητα, εξετάζοντας πότε η Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων είναι πλήρους βαθμού.

Η περιγραφή μιας στρατηγικής για βέλτιστη τοποθέτηση PMUs "κλάδων" ("branch" PMUs) με σκοπό την πλήρη παρατηρησιμότητα παρουσιάζεται στην αναφορά [87]. Αυτή η μελέτη λαμβάνει επίσης υπόψη σφάλματα των PMUs και τοπολογικές μεταβολές του δικτύου ως πρόσθετους περιορισμούς και ενδεχόμενα. Μία ενιαία προσέγγιση τοποθέτησης, που εμπεριέχει τόσο την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων όσο και την πιθανότητα απώλειας ενός η περισσοτέρων PMUs παρουσιάζεται στην αναφορά [88]. Το πρόβλημα σχηματίζεται ως ένα πρόβλημα δυαδικού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (BILP).

Μια άλλη έκφραση δυαδικού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού στην οποία λαμβάνεται υπόψη ο περιορισμένος αριθμός καναλιών PMUs, προτείνεται στην αναφορά [89]. Η μέθοδος ισχύει και για την περίπτωση ύπαρξης μηδενικών εγχύσεων. Η βέλτιστη λύση τοποθέτησης PMUs με συγκεκριμένο αριθμό καναλιών εξετάζεται επίσης στην αναφορά [90].

Ένα ακόμη μοντέλο BILP για την ταυτόχρονη τοποθέτηση PMUs και συμβατικών μετρήσεων ροής διατυπώνεται στην αναφορά [91], με την εισαγωγή βοηθητικών μεταβλητών και περιορισμών. Ο μεικτός ακέραιος προγραμματισμός χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει την πιθανοτική φύση των συνιστωσών του προβλήματος και των πιθανοτήτων διακοπής λειτουργίας τους, ενώ προτείνεται μια αποδοτική τεχνική γραμμικοποίησης η οποία μετατρέπει τη μη γραμμική συνάρτηση που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα παρατηρησιμότητας σε ένα σύνολο γραμμικών εκφράσεων [92]. Η προσέγγιση εξετάζει τη τοποθέτηση PMUs σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Μια πολυκριτηριακή διατύπωση ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs που διασφαλίζει την παρατηρησιμότητα του δικτύου υπό φυσιολογικές συνθήκες όπως επίσης και υπό συνθήκες απώλειας μιας γραμμής ή μιας μονάδας PMU, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιεί την περίσσεια μετρήσεων στους ζυγούς, παρουσιάζεται στην αναφορά [93]. Η μέθοδος [94] είναι μια παρεμφερής διαδικασία ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού που περιλαμβάνει συμβατικές μετρήσεις ροής και έγχυσης, και άλλους περιορισμούς, όπως συγκεκριμένα επίπεδα περίσσειας σε επιλεγμένους ζυγούς και εγκατάσταση PMUs σε συγκεκριμένους κρίσιμους ή προτιμώμενους ζυγούς.

4.2.1.2 Εξαντλητική αναζήτηση

Η εξαντλητική αναζήτηση (ES) είναι μια γενική τεχνική βελτιστοποίησης που απαριθμεί συστηματικά όλες τις πιθανές υποψήφιες λύσεις και επιλέγει την υποψήφια λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς για βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Το κύριο της πλεονέκτημα είναι ότι εγγυάται την εύρεση του ολικού βέλτιστου. Εντούτοις, δεν είναι κατάλληλη για μεγάλης κλίμακας συστήματα έχοντας τεράστιο διάστημα αναζήτησης.

Μια δυαδική μέθοδος εξαντλητικής αναζήτησης εφαρμόζεται στην αναφορά [95] θεωρώντας την απώλεια μιας γραμμής, με ή χωρίς την ύπαρξη μηδενικών εγχύσεων. Στην περίπτωση πολλαπλών λύσεων, προτείνεται ένας αλγόριθμος για την επιλογή του καταλληλότερου συνόλου βασιζόμενος στην περίσσεια των μετρήσεων.

4.2.2 Ευρετικοί αλγόριθμοι

4.2.2.1 Γενετικός αλγόριθμος

Ο γενετικός αλγόριθμος (GA) είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη στην υπόθεση της φυσικής επιλογής και στην γενετική. Ο γενετικός αλγόριθμος εφαρμόζεται σε έναν πληθυσμό ατόμων, γνωστό ως «χρωμοσώματα», τα οποία είναι πιθανές λύσεις σε ένα δεδομένο πρόβλημα και συνδυάζονται για να αναπαραγάγουν τα νέα άτομα [96].

Η συνδυαστική μέθοδος μιας γραφικής θεωρητικής διαδικασίας που υπολογίζει μεμονωμένες βέλτιστες λύσεις και ενός απλού μη κυριαρχούμενου γενετικού αλγορίθμου ταξινόμησης (NSGA) που βρίσκει τις καλύτερες συμβιβαστικές λύσεις μεταξύ των διαφόρων ανταγωνιστικών στόχων προτείνεται στην [97]. Ένας προσαρμοστικός κλωνικός αλγόριθμος (CLONALG) χρησιμοποιείται στην αναφορά [98] για να βρει συνολικές και σχεδόν βέλτιστες λύσεις, που εξασφαλίζουν την παρατηρησιμότητα του συστήματος.

4.2.2.2 Αναζήτηση Tabu

Η αναζήτηση Tabu (TS) είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης καθοδικής κλίσης με μνήμη [96].

Στην αναφορά [99], το πρόβλημα τοποθέτησης μονάδων PMU επιλύεται μέσω ενός αλγορίθμου TS και μιας γρήγορης μεθόδου ανάλυσης παρατηρησιμότητας βασισμένης σε μια επαυξημένη μήτρα πρόσπτωσης που χρησιμοποιεί μόνο ακέραιους αριθμούς και μπορεί γρήγορα και εύκολα να αξιολογήσει την παρατηρησιμότητα του δικτύου ως προς το σχέδιο τοποθέτησης PMUs. Συγκρίσεις μεταξύ του TS και άλλων μεθόδων παρουσιάζονται στην αναφορά [100].

4.2.2.3 Προσομοιωμένη ανόπτηση

Η προσομοιωμένη ανόπτηση (SA) είναι μια γενική ευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης που εμπνέεται από την ανόπτηση στη μεταλλουργία [96].

Η αναφορά [101] αποτελεί την πρώτη πρόταση επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs και χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη αναζήτηση διχοτόμησης για να καθορίσει τον αριθμό PMUs και μια μέθοδο προσομοιωμένης ανόπτησης, αναζητώντας ένα σύνολο τοποθέτησης που οδηγεί σε παρατηρήσιμο δίκτυο, για συγκεκριμένο αριθμό PMUs. Στην αναφορά [100] γίνονται τρείς τροποποιήσεις του προβλήματος που αφορούν τους μη παρατηρήσιμους ζυγούς, το "πρόγραμμα ψύξης" και τους κανόνες επιλογής των PMUs σύμφωνα με τις προηγούμενες λύσεις.

Μια γραφική θεωρητική προσέγγιση για την τοποθέτηση PMUs βασισμένη στην μερική παρατηρησιμόητα και την προσομοιωμένη ανόπτηση με σκοπό την επίλυση του προβλήματος τοποθέτησης υπό τον περιορισμό της πραγματικής επικοινωνίας των συσκευών αναλύεται στην [102]. Η μέθοδος [103] περιλαμβάνει ως περιορισμό την ευαισθησία, υπό την έννοια της τοποθέτησης PMUs στους ζυγούς με τις υψηλότερες ευαισθησίες και εξετάζει τόσο τη βέλτιστη τοποθέτηση PMUs όσο και τα δυναμικά στοιχεία του συστήματος με σκοπό την πλήρη παρατηρησιμότητα. Συγκρίσεις μεταξύ SA και άλλων μεθόδων αναφέρονται στην [84].

4.2.2.4 Διαφορική εξέλιξη

Η διαφορική εξέλιξη (DE) είναι μια ευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί τα τυχαία δειγματοληπτούμενα ζεύγη διαφορών των αντικειμενικών διανυσμάτων για την καθοδήγηση της διαδικασίας μετάλλαξης, αντί των συναρτήσεων κατανομής πιθανοτήτων [96].

Ο αλγόριθμος [104] είναι μια οργανική ολοκλήρωση του Pareto μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης αλγορίθμου και του αλγορίθμου διαφορικής εξέλιξης.

4.2.2.5 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO) είναι μια "πληθυσμιακή" μέθοδος βελτιστοποίησης στην οποία κάθε πιθανή λύση (αποκαλούμενη σωματίδιο) ορίζεται με μια τυχαία ταχύτητα και στη συνέχεια διατρέχει το υπερδιάστημα του προβλήματος. Η βελτιστοποίηση PSO έχει κριθεί ως εξαιρετικά αποτελεσματική για την επίλυση ενός μεγάλου πλήθους προβλημάτων βελτιστοποίησης εφαρμοσμένης μηχανικής [96].

Η δυαδική πρόταση βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων της αναφοράς [105] ικανοποιεί τους περιορισμούς απώλειας PMU ή επίδρασης του ενδεχόμενου διακοπής λειτουργίας μίας γραμμής και τα αποτελέσματά της συγκρίνονται με εκείνα των [78], [82], [94], [102], [101], και [99]. Μία παρόμοια μεθοδολογία, που λαμβάνει υπόψη οποιαδήποτε διαθέσιμα στοιχεία από τις υπάρχουσες συμβατικές μετρήσεις, τον αριθμό και τη θέση των ζυγών μηδενικής έγχυσης, τον αριθμό και τη θέση των εγκατεστημένων PMUs και την τοπολογία του συστήματος, προτείνεται στην [106].

4.2.2.6 Ανοσοποιητικός αλγόριθμος

Ο ανοσοποιητικός αλγόριθμος είναι μια στρατηγική αναζήτησης βασισμένη στις αρχές των γενετικών αλγορίθμων και εμπνευσμένη από τους μηχανισμούς προστασίας των έμβιων οργανισμών ενάντια σε βακτήρια και ιούς.

Στην αναφορά [107], η λύση του προβλήματος τοποθέτησης προκύπτει χρησιμοποιώντας έναν γενετικό ανοσοποιητικό αλγόριθμο (IGA) που χρησιμοποιεί κάποια χαρακτηριστικά και τη γνώση του προβλήματος με σκοπό τον περιορισμό των εκφυλιστικών φαινομένων κατά τη διάρκεια της εξέλιξης και τη βελτίωση της αποδοτικότητάς του.

4.2.2.7 Επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση

Η επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση (ILS) είναι μια τεχνική βελτιστοποίησης που διερευνά μια σειρά από λύσεις που αποτελούν διαταραχές της τρέχουσας βέλτιστης λύσης, τα αποτελέσματα της οποίας εκκαθαρίζονται χρησιμοποιώντας άλλες ενσωματωμένες ευρετικές μεθόδους.

Ο αλγόριθμος [108] λύνει το πρόβλημα τοποθέτησης PMUs υποθέτοντας ότι το PMU που εγκαθίσταται σε κάποιο ζυγό είναι ικανό να μετρήσει όλα τα ρεύματα των γραμμών που συνδέονται σ' αυτόν. Η προτεινόμενη μέθοδος υποθέτει μια αρχική κατανομή των PMUs που καθιστά το δίκτυο παρατηρήσιμο και έπειτα η επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση χρησιμοποιείται για να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται για να παρατηρήσουν το δίκτυο.

4.2.2.8 Εύρεση γεννητικού δένδρου

Ο αλγόριθμος εύρεσης γεννητικού δένδρου (STS) καθορίζει δυναμικά την καλύτερη πορεία από την πηγή προς τον προορισμό αποφεύγοντας ανακυκλώσεις που μπορούν να προκαλέσουν παρερμηνεία αποτελεσμάτων.

Στην αναφορά [102], τα γεννητικά δένδρα των γράφων του συστήματος χρησιμοποιούνται για να βρεθούν οι βέλτιστες θέσεις των PMUs λαμβάνοντας υπόψη την έννοια του βάθους μη παρατηρησιμότητας. Ο στόχος είναι να μειωθεί ο αριθμός των PMUs έναντι του αριθμού που απαιτείται για πλήρη παρατηρησιμότητα, περιορίζοντας την απόσταση μεταξύ των μη παρατηρήσιμων και παρατηρήσιμων ζυγών και εξασφαλίζοντας μια σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή PMUs σε όλο το δίκτυο. Η αναζήτηση ενός γεννητικού δένδρου πολλαπλών λύσεων με ένα ελάχιστο σύνολο PMUs, υπό την έννοια των άμεσων και έμμεσων μετρήσεων τάσης και ρεύματος, προτείνεται στην αναφορά [109].

4.2.2.9 Απληστος αλγόριθμος

Ο άπληστος αλγόριθμος (GrA) είναι μια ευρετική μεθοδολογία βελτιστοποίησης η οποία πραγματοποιεί μία τοπικά βέλτιστη επιλογή σε κάθε στάδιο, με την ελπίδα της εύρεσης του ολικού βελτίστου.

Στην αναφορά [110], μια εικονική μέθοδος προεπεξεργασίας και απόρριψης δεδομένων και ένας αλγόριθμος ελάττωσης μητρών εισάγονται για να μειώσουν το μέγεθος του μοντέλου τοποθέτησης και τον υπολογιστικό φόρτο για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνόλου τοποθέτησης. Μια χαμηλής πολυπλοκότητας μέθοδος που διευκολύνει την τοποθέτηση ασφαλών PMUs έναντι οποιασδήποτε έγχυσης εσφαλμένων δεδομένων και διαχειρίζεται διαφορετικούς τύπους μετρήσεων PMU, αναπτύσσεται στην αναφορά [111]. Στην [112], ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της συνολικής απόκρισης του αισθητήρα (PMU) ελαχιστοποιώντας το συσχετισμό μεταξύ των πληροφοριών στις εξόδους του και κατ' επέκταση ελαχιστοποιώντας τις πλεονάζουσες πληροφορίες που παρέχονται από τους πολλαπλούς αισθητήρες για την αποτελεσματική αξιολόγηση της δυναμικής απόδοσης του ηλεκτρικού συστήματος. Τα μέτρα των τάσεων των ζυγών, και οι δείκτες συνοχής γωνίας και συχνότητας που υπολογίζονται από τη στατιστική δειγματοληψία των σημάτων απόκρισης του ηλεκτρικού συστήματος, χρησιμοποιούνται ως αποκρίσεις του αισθητήρα.

4.2.2.10 Επαναληπτικός αλγόριθμος ασφάλειας Ν

Ο επαναληπτικός αλγόριθμος ασφάλειας N είναι στην ουσία ένας αλγόριθμος εύρεσης γεννητικού δένδρου πολλαπλών λύσεων, με διαφορετικό σημείο εκκίνησης.

Στην αναφορά [109], το πρόβλημα τοποθέτησης προσεγγίζεται με έναν επαναληπτικό και ένα μη επαναληπτικό αλγόριθμο ασφάλειας N που διασφαλίζουν την παρατηρησιμότητα του δικτύου, με απώτερο σκοπό τη γραμμική στατική εκτίμηση κατάστασης. Οι αλγόριθμοι αυτοί συνυπολογίζουν επίσης τα ενδεχόμενα απώλειας μιας γραμμής ή μιας μονάδας PMU.

4.2.2.11 Δένδρο απόφασης

Ένα δένδρο απόφασης είναι ένα δένδρο στο οποίο κάθε κόμβος κλάδου αντιπροσωπεύει μια επιλογή μεταξύ διάφορων εναλλακτικών λύσεων και κάθε κόμβος φύλλων αντιπροσωπεύει μια ταξινόμηση ή μια απόφαση.

Η τεχνική τοποθέτησης PMU που προτείνεται στην αναφορά [113], προσδιορίζει τις κρίσιμες θέσεις των νέων PMUs, αυξάνοντας την αξιοπιστία της ταξινόμησης με στόχο τον γρήγορο έλεγχο ασφάλειας της τάσης.

4.2.2.12 Πρακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι

Ένας αλγόριθμος που εξετάζει τα ενδεχόμενα απώλειας μίας μέτρησης και μίας γραμμής προτείνεται στην [114]. Η αριθμητική παρατηρησιμότητα επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τα στοιχεία μιας κανονικοποιημένης μήτρας μετρήσεων από κοινού με τη διαδοχική

αποβολή. Ο δυαδικός ακέραιος προγραμματισμός εφαρμόζεται επίσης για να επιλέξει τις βέλτιστες πλεονάζουσες μετρήσεις ενώ χρησιμοποιείται μια ευρετική προσέγγιση για να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των θέσεων τοποθέτησης PMUs.

Μια στρατηγική τοποθέτησης PMUs έτσι ώστε να επιτευχθεί η παρατηρησιμότητα θέσης σφάλματος, εξετάζοντας το κόστος εγκατάστασης των PMUs, προτείνεται στην [115]. Αυτό το σχήμα μπορεί να εντοπίσει γρήγορα και επακριβώς τη θέση του σφάλματος στο ηλεκτρικό δίκτυο ενώ τα δικτυακά μοντέλα των δικτύων μεταφοράς προ του σφάλματος δεν είναι απαραίτητα.

Ο αλγόριθμος [116] καθορίζει το ζυγό ταλάντωσης και η μονάδα PMU που εγκαθίσταται στο ζυγό ταλάντωσης κάθε υποσυστήματος ενός κατανεμημένου εκτιμητή κατάστασης παρέχει τις συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών. Η μέθοδος άμεσου συνδυασμού (DC) που προτείνεται στην αναφορά [100] αποφεύγει το χρονοβόρο χαρακτηριστικό γνώρισμα της τυχαίας αναζήτησης, χρησιμοποιώντας έναν απλό αλλά πολύ αποτελεσματικό ευρετικό κανόνα.

4.3 Βέλτιστη τοποθέτηση ΡΜU με την βοήθεια γραμμικού προγραμματισμού

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs [117], βασίζεται στο γραμμικό ακέραιο προγραμματισμό. Η διατύπωση του προβλήματος παρουσιάζεται παρακάτω.

Για ένα δίκτυο *n* ζυγών, το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης PMUs μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως:

$$\min \sum_{i}^{n} w_{i} \cdot x_{i}$$

$$(4.3)$$

$$s.t. f(X) \ge \hat{1}$$

όπου X είναι ένα διάνυσμα απόφασης αποτελούμενο από τις δυαδικές μεταβλητές x_i , των οποίων οι τιμές καθορίζονται ως εξής:

$$x_i = \begin{cases} 1, & εάν έχει τοποθετηθεί PMU στον ζυγό i \\ 0, & σε διαφορετική περίπτωση \end{cases}$$

και w_i το κόστος της μονάδας PMU η οποία εγκαθίσταται στο ζυγό i. Με f(X) συμβολίζεται μία διανυσματική συνάρτηση, της οποίας οι τιμές είναι μη μηδενικές εάν η αντίστοιχη τάση του ζυγού μπορεί να υπολογιστεί από το δεδομένο σύνολο μετρήσεων των υποψήφιων για εγκατάσταση PMU, και μηδέν σε αντίθετη περίπτωση, ενώ με $\hat{1}$ εκφράζεται το μοναδιαίο διάνυσμα.

Το γινόμενο w_ix_i εκφράζει το συνολικό κόστος εγκατάστασης της επιλεγμένης μονάδας PMU. Οι συναρτήσεις των περιορισμών διασφαλίζουν την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν το κόστος εγκατάστασης των PMUs.

Για την περιγραφή της διαδικασίας κατάστρωσης των περιορισμών, θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια:



Σχήμα 4.1 Σύστημα ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Η διαδικασία κατάστρωσης των περιορισμών θα περιγραφεί για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Αγνοώντας τις μετρήσεις ροής ή μηδενικής έγχυσης
- Λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής
- Λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής και μηδενικής έγχυσης

4.3.1 Διαμόρφωση περιορισμών χωρίς μετρήσεις ροής ή μηδενικής έγχυσης

Σχηματίζουμε αρχικά τη δυαδική μήτρα διασυνδέσεων A, τα στοιχεία της οποίας ορίζονται ως εξής :

$$A_{i,j} = \begin{cases} 1, & εάν \ i = j \ ή \ εάν \ οι \ ζυγοί \ i, \ j \ συνδέονται μεταξύ τους \\ 0, & σε \ διαφορετική περίπτωση \end{cases}$$

Επομένως, η μήτρα Α για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 θα είναι:

Οι περιορισμοί σε αυτήν την περίπτωση μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 &\geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 &\geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 &\geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 &\geq 1 \\ f_5 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 &\geq 1 \\ f_6 = x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} &\geq 1 \\ f_7 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 &\geq 1 \\ f_8 = x_7 + x_8 &\geq 1 \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} &\geq 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} &\geq 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11} &\geq 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} &\geq 1 \\ f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} &\geq 1 \end{cases}$$

$$(4.5)$$

Ο τελεστής "+" αντιστοιχεί στη λογική πράξη "OR" και η παρουσία της μονάδας στο δεξιό μέλος των περιορισμών διασφαλίζει ότι τουλάχιστον μία από τις μεταβλητές που εμφανίζονται στο λογικό άθροισμα θα είναι διάφορη του μηδενός. Για παράδειγμα ο περιορισμός που αφορά το ζυγό 1 θα είναι :

$$f_1 = x_1 + x_2 + x_5 \ge 1$$

που σημαίνει ότι τουλάχιστον μία μονάδα PMU θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποιον από τους ζυγούς 1, 2, ή 5 προκειμένου να καταστεί ο ζυγός 1 παρατηρήσιμος.

4.3.2 Διαμόρφωση περιορισμών θεωρώντας μετρήσεις ροής

Έστω και πάλι το δίκτυο του Σχήματος 4.1, το οποίο στην συγκεκριμένη περίπτωση περιλαμβάνει μία μέτρηση ροής στη γραμμή 5-6. Η ύπαρξη αυτής της μέτρησης θα οδηγήσει στην

τροποποίηση των περιορισμών που αφορούν τους ζυγούς 5 και 6. Η τροποποίηση αυτή βασίζεται στην παρατήρηση ότι η ύπαρξη μιας μέτρησης ροής, επιτρέπει τον υπολογισμό της τάσης του ενός από τους τερματικούς ζυγούς της γραμμής όταν η τάση στον ζυγό του άλλου άκρου της είναι γνωστή. Επομένως, οι περιορισμοί f_5 και f_6 μπορούν να συγχωνευθούν σε έναν ισοδύναμο, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{cases} f_5 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 \ge 1 \\ f_6 = x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \ge 1 \end{cases} \implies f_{5_new} = f_5 + f_6 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \ge 1 \end{cases}$$

Ο περιορισμός f_{5_new} υποδηλώνει ότι εάν ένας από τους δύο φασιθέτες τάσης των ζυγών 5 και 6 είναι παρατηρήσιμος, τότε και ο άλλος θα είναι επίσης παρατηρήσιμος.

Εφαρμόζοντας την τροποποίηση αυτή στους περιορισμούς του συστήματος, προκύπτει το ακόλουθο σύστημα περιορισμών:

	$f_1 = x_1 + x_2 + x_5$	≥ 1	
	$f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5$	≥1	
-	$f_3 \qquad = x_2 + x_3 + x_4$	≥1	
	$f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9$	≥1	
	$f_{5_new} = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13}$	≥1	
	$f_7 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9$	≥1	
$f(x) = Ax = \left\{ \begin{cases} x \\ x$	$f_8 \qquad = x_7 + x_8$	≥1	
	$f_9 \qquad = \ x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14}$	≥1	(4.6)
	$f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11}$	≥1	
	$f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11}$	≥1	
	$f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13}$	≥1	
	$f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14}$	≥1	
	$f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14}$	≥1	

4.3.3 Διαμόρφωση περιορισμών θεωρώντας μετρήσεις ροής και μηδενικής έγχυσης

Αυτή είναι η πιο γενική περίπτωση, όπου υπάρχουν στο δίκτυο τόσο μετρήσεις έγχυσης όσο και ροής, αλλά δεν επαρκούν ώστε να το καταστήσουν πλήρως παρατηρήσιμο. Οι μετρήσεις έγχυσης αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο, είτε είναι μηδενικές (ψευδομετρήσεις) είτε όχι.

Ας θεωρήσουμε και πάλι το Σχήμα 4.1, στο οποίο ο ζυγός 7 θεωρείται ζυγός μηδενικής έγχυσης. Είναι προφανές ότι αν οι φασιθέτες τάσης σε τρεις εκ των τεσσάρων ζυγών 4, 7, 8 και 9 είναι γνωστοί, τότε ο τέταρτος μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff (KCL) στο ζυγό 7, όπου το εγχεόμενο ρεύμα είναι γνωστό.

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι διαχείρισης των εγχύσεων και διαμόρφωσης των περιορισμών. Ο ένας είναι να διαμορφώσουμε τους μη γραμμικούς περιορισμούς των ζυγών, με μετρήσεις έγχυσης. Η εναλλακτική προσέγγιση βασίζεται στον τοπολογικό μετασχηματισμό. Οι δύο αυτοί τρόποι θα μελετηθούν παρακάτω.

4.3.3.1 Διαμόρφωση μη γραμμικών περιορισμών

Έστω η μέτρηση μηδενικής έγχυσης στο ζυγό 7. Οι περιορισμοί που αφορούν όλους τους ζυγούς που σχετίζονται με τον ζυγό 7, είναι οι ακόλουθοι:

$$\begin{cases} f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + f_7 \bullet f_8 \bullet f_9 \ge 1 \\ \\ f_8 = x_7 + x_8 + f_4 \bullet f_7 \bullet f_9 & \ge 1 \\ \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + f_4 \bullet f_7 \bullet f_8 & \ge 1 \end{cases}$$

Ο τελεστής "•" εξυπηρετεί το λογικό "AND". Οι εκφράσεις των περιορισμών f_i μπορούν να απλοποιηθούν περαιτέρω χρησιμοποιώντας ιδιότητες των λογικών τελεστών "AND" και "OR": για δύο δεδομένα σύνολα A και B, όπου το σύνολο A είναι υποσύνολο του συνόλου B ισχύουν: A + B = B και $A \bullet B = A$.

Για παράδειγμα, αντικαθιστώντας την έκφραση των περιορισμών f_7 , f_8 και f_9 στον περιορισμό f_4 , ο τελευταίος απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή:

$$f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + x_8 \bullet x_{10} + x_8 \bullet x_{14}$$

Εφαρμόζοντας την ίδια λογική απλοποιήσεων και στις υπόλοιπες εκφράσεις των περιορισμών, το σύνολο των περιορισμών που αφορούν τους ζυγούς που σχετίζονται με το ζυγό 7 γίνεται ως οι εξής:

$$\begin{cases} f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + x_8 \bullet x_{10} + x_8 \bullet x_{14} & \ge 1 \\ \\ f_8 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 & \ge 1 \\ \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + x_2 \bullet x_8 + x_3 \bullet x_8 + x_5 \bullet x_8 \ge 1 \end{cases}$$

Σημειώνεται ότι οι περιορισμοί όλων των άλλων ζυγών θα παραμείνουν οι ίδιοι όπως δίδονται από την εξίσωση (4.6). Μία εξαίρεση σ' αυτό αποτελεί ο περιορισμός που αφορά το ζυγό 7, ο οποίος έχει μέτρηση έγχυσης. Αυτός ο περιορισμός θα απομακρυνθεί από το σύνολο των περιορισμών. Ο λόγος της απομάκρυνσης των περιορισμών που σχετίζονται με τους ζυγούς έγχυσης είναι πως οι επιδράσεις τους λαμβάνονται εμμέσως υπόψη μέσω των μη γραμμικών όρων που προστίθενται στους περιορισμούς των γειτονικών ζυγών. Το σύνολο των περιορισμών για τη συγκεκριμένη περίπτωση δίδονται στην εξίσωση (4.7).

c

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 & \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 & \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 & \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + x_8 \bullet x_{10} + x_8 \bullet x_{14} & \geq 1 \\ f_5_{-new} = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_8 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + x_2 \bullet x_8 + x_3 \bullet x_8 + x_5 \bullet x_8 & \geq 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \end{cases}$$

Αυτός ο τρόπος διατύπωσης των περιορισμών για μηδενικές ή μη εγχύσεις είναι σύνθετος και χρονοβόρος. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι το μη γραμμικό μέρος που εισάγεται στους περιορισμούς επιβραδύνει ακόμη περισσότερο τον ακέραιο προγραμματισμό. Έτσι προτείνεται η ακόλουθη εναλλακτική μέθοδος του τοπολογικού μετασχηματισμού για συστήματα που περιέχουν μεγάλο αριθμό μετρήσεων.

4.3.3.2 Τοπολογικός μετασχηματισμός

Η βασική ιδέα αυτής της μεθόδου είναι η συνένωση ενός ζυγού που φέρει μέτρηση έγχυσης με οποιονδήποτε από τους γειτονικούς του ζυγούς. Αυτό βασίζεται στην παρατήρηση ότι εάν οι φασιθέτες τάσης όλων των γειτονικών ζυγών είναι γνωστές, τότε ο φασιθέτης τάσης του ζυγού έγχυσης μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff (KCL). Το Σχήμα 4.2, παρουσιάζει το ενημερωμένο διάγραμμα του συστήματος μετά την συνένωση των ζυγών 7 και 8 σε ένα ισοδύναμο νέο ζυγό 8[']. Η νέα γραμμή 8['] – 9 αντιστοιχεί στην πραγματική διασύνδεση μεταξύ των ζυγών 7 και 9.



Σχήμα 4.2 Τοπολογικός μετασχηματισμός συστήματος ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Έτσι, το σύνολο των περιορισμών διαμορφώνεται ως εξής:

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 & \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 & \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 & \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_{5_new} = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{5_new} = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{9} = x_4 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_{9} = x_4 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \end{cases}$$

Ο τοπολογικός μετασχηματισμός είναι ταχύτερος και δεν εισάγει μη γραμμικούς όρους στο σύνολο των περιορισμών. Σ' αυτό το σημείο, πρέπει να δώσουμε προσοχή στην περίπτωση όπου η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει κάποιον από τους εικονικούς ζυγούς. Σε ένα τέτοιο ενδεχόμενο η μονάδα PMU μπορεί να τοποθετηθεί σ' έναν από τους δύο ζυγούς που έχουν συνενωθεί ή ακόμη και στους δύο. Με σκοπό την εύρεση της πραγματικής λύσης στο αρχικό δίκτυο, πραγματοποιείται μια τοπολογική ανάλυση για να ελεγχθεί η παρατηρησιμότητα του δικτύου και να διασφαλιστεί ο ελάχιστος αριθμός PMUs που πρόκειται να εγκατασταθούν.

4.4 Προτεινόμενοι μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων ΡΜU

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής διατυπώθηκαν και υλοποιήθηκαν μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων PMU οι οποίες ταξινομούνται ως πρακτικές (ευρετικές) και ως αναλυτικές (μαθηματικές).

4.4.1 Πρακτικός αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων ΡΜU

Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται σε έναν απλό ευρετικό αλγόριθμο. Με σκοπό την υλοποίησή του, τα δεδομένα της τοπολογίας του δικτύου, οι ζυγοί και οι διασυνδέσεις τους, καταχωρούνται σε μήτρες σύμφωνα με τον αριθμό των διασυνδέσεων του κάθε ζυγού και το ενδεχόμενο να έχει ο ζυγός αυτός επιλεγεί για τοποθέτηση PMU. Τόσο οι μήτρες που χρησιμοποιούνται όσο και η επεξήγησή τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Τα βήματα υλοποίησης του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

- Βήμα 1. Εντοπισμός των ζυγών του δικτύου που φέρουν μία διασύνδεση (μήτρα RB) και τοποθέτηση μονάδων PMU στους ζυγούς που διασυνδέονται με τους ζυγούς αυτούς.
- Βήμα 2. Εντοπισμός των εν σειρά διασυνδεδεμένων ζυγών του δικτύου που φέρουν αυστηρά δύο διασυνδέσεις (μήτρα TB). Όταν ο αριθμός των ζυγών αυτών είναι άρτιος, τοποθετείται μία μονάδα PMU ανά δύο διασυνδεδεμένους ζυγούς της εν σειρά διάταξης. Όταν ο αριθμός είναι περιττός, τοποθετείται επίσης μία μονάδα PMU ανά δύο ζυγούς και ένα επιπλέον PMU στον προτελευταίο ζυγό της συστοιχίας.
- Βήμα 3. Προσδιορισμός των ζυγών που εμφανίζονται περισσότερες της μίας φοράς στην μήτρα IC. Πρακτικά, επιλέγονται ζυγοί οι οποίοι, αρχικά, έφεραν περισσότερες των δύο

διασυνδέσεων. Σε κάθε επανάληψη ο ζυγός που επιλέγεται για τοποθέτηση μίας μονάδας PMU, είναι αυτός που εμφανίζεται περισσότερες φορές στην μήτρα IC.

- Βήμα 4. Τοποθέτηση PMUs στους εναπομένοντες ζυγούς της μήτρας TB, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η παρατηρησιμότητα όσο το δυνατόν περισσότερων μη παρατηρήσιμων ζυγών που εμπεριέχονται στην μήτρα IC.
- Βήμα 5. Έλεγχος ύπαρξης μη παρατηρήσιμων ζυγών. Σε μια τέτοια περίπτωση, η μονάδα PMU τοποθετείται στο ζυγό που φέρει τις περισσότερες διασυνδέσεις με μη παρατηρήσιμους ζυγούς, και η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το δίκτυο καταστεί πλήρως παρατηρήσιμο.

Μήτρα	Επεξήγηση
RB (Radial Buses)	Περιλαμβάνει τους ζυγούς που φέρουν μία μόνον διασύνδεση. Ουσιαστικά τα στοιχεία της μήτρας αυτής είναι οι ακτινικοί ζυγοί του δικτύου.
TB (Two Buses)	Περιλαμβάνει τους ζυγούς δικτύου που φέρουν αυστηρά δύο μόνο διασυνδέσεις.
IC (Inter-Connections)	Περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του εκάστοτε εξεταζόμενου ζυγού.
OPL (Optimal PMU Locations)	Περιλαμβάνει τους ζυγούς στους οποίους έχουν τοποθετηθεί μονάδες PMU.
ITB (Initial Two Buses)	Περιλαμβάνει τους ζυγούς που φέρουν αυστηρά δύο μόνο διασυνδέσεις, πριν την τοποθέτηση κάποιας μονάδας PMU στο δίκτυο.
IIC (Initial Inter-Connections)	Περιλαμβάνει τις διασυνδέσεις του εκάστοτε εξεταζόμενου ζυγού, πριν την τοποθέτηση κάποιας μονάδας PMU στο δίκτυο.

Πίνακας 4.1 Επεξήγηση μητρών πρακτικού αλγορίθμου τοποθέτησης PMU

Ενδέχεται, η λύση που προέκυψε να περιλαμβάνει αριθμό PMUs μεγαλύτερο από το βέλτιστο. Αυτό συμβαίνει όταν επιλέγονται θέσεις τοποθέτησης PMUs που ακόμη κι αν αφαιρεθούν, το υπό εξέταση δίκτυο παραμένει παρατηρήσιμο. Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνόλου τέτοιοι ζυγοί, θα πρέπει να ανιχνεύονται και να αφαιρούνται. Σημειώνεται ότι η ιεράρχηση των βημάτων 2 και 3 δεν είναι απόλυτη, αλλά εξαρτάται από την τοπολογία του εξεταζόμενου δικτύου, η οποία μπορεί να επηρεάσει την βέλτιστη λύση. Εάν η αμοιβαία εναλλαγή των βημάτων 2 και 3 και η εξ αρχής εκτέλεση του αλγορίθμου δώσουν λύση με μικρότερο αριθμό PMUs, τότε η λύση αυτή λαμβάνεται ως βέλτιστη, διαφορετικά η διαδικασία τερματίζεται και βέλτιστη θεωρείται η προηγούμενη αποθηκευμένη λύση.

4.4.1.1 Επεζηγηματικό παράδειγμα

Για να γίνει αντιληπτή η παραπάνω προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζεται η εφαρμογή της στο δίκτυο 30 ζυγών του ΙΕΕΕ, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Στο δίκτυο αυτό, οι ακτινικοί ζυγοί του δικτύου είναι οι ζυγοί 11, 13 και 26, οι οποίοι συνδέονται με τους ζυγούς 9, 12 και 25.

RB	11	13	26
ПС	9	12	25

Επομένως, σύμφωνα με το πρώτο βήμα, οι τρεις πρώτες μονάδες PMU θα τοποθετηθούν σε εκείνους τους ζυγούς που συνδέονται με τους ακτινικούς. Άρα, η μήτρα *OPL* ενημερώνεται και θα περιλαμβάνει τους ζυγούς 9, 12 και 25:



Οι ζυγοί του δικτύου με δύο διασυνδέσεις και οι αντίστοιχες, σχηματίζουν τη μήτρα ΙΤΒ:

ITB	1	3	5	7	8	14	16	17	18	19	20	21	23	29	30
ПС1	2	1	2	5	6	12	12	10	15	18	10	10	15	27	27
ПС2	3	4	7	6	28	15	17	16	19	20	19	22	24	30	29

Με *IIC1* και *IIC2* συμβολίζονται οι δύο διασυνδέσεις κάθε ζυγού. Για παράδειγμα ο ζυγός 1 διασυνδέεται με τους ζυγούς 2 και 3.

Εφόσον η τοποθέτηση μίας μονάδας PMU σε ένα ζυγό, καθιστά τόσο το ζυγό αυτόν, όσο και τους γειτονικούς του παρατηρήσιμους, οι στήλες της μήτρας που αντιστοιχούν σε ζυγούς όπου έχουν τοποθετηθεί PMU, διαγράφονται. Συνεπώς η έβδομη και όγδοη στήλη, οι οποίες περιλαμβάνουν το ζυγό 12 στον οποίο έχει τοποθετηθεί PMU από το προηγούμενο βήμα, διαγράφονται. Έτσι δημιουργείται μία τροποποιημένη μήτρα *TB*, η οποία θα έχει την ακόλουθη μορφή:

ТВ	1	3	5	7	8	17	18	19	20	21	23	29	30
IC1	2	1	2	5	6	10	15	18	10	10	15	27	27
IC2	3	4	7	6	28	16	19	20	19	22	24	30	29

Με βάση αυτήν τη μήτρα, θα αναζητηθούν όσοι ζυγοί έχουν ακριβώς δύο διασυνδέσεις και συνδέονται εν σειρά μεταξύ τους. Υπάρχουν τρία ζεύγη {ζυγός 1-ζυγός 3, ζυγός 5-ζυγός 7, ζυγός 29-ζυγός 30} και μία τριάδα {ζυγός 18-ζυγός 19-ζυγός 20} ζυγών που πληρούν αυτή την προϋπόθεση.

ТВ	1	3	5	7	8	17	18	19	20	21	23	29	30
IC1	2	1	2	5	6	10	15	18	10	10	15	27	27
IC2	3	4	7	6	28	16	19	20	19	22	24	30	29

Επειδή η τριάδα των ζυγών αντιστοιχεί σε περιττό αριθμό, μία μονάδα PMU τοποθετείται στο δεύτερο ζυγό της συστοιχίας, δηλαδή στο ζυγό 19, και μία ακόμη στον προτελευταίο ζυγό της εν σειρά συστοιχίας, ο οποίος είναι επίσης ο ζυγός 19. Συνεπώς στη συστοιχία των τριών ζυγών τοποθετείται μόνο μία μονάδα PMU στο ζυγό 19.

Σε σχέση με τις συστοιχίες άρτιου αριθμού ζυγών, η διαδικασία τοποθέτησης είναι περισσότερο ελαστική. Η λύση δεν επηρεάζεται από την επιλογή του ζυγού της κάθε δυάδας στον οποίο θα τοποθετηθεί PMU. Έτσι, στο παράδειγμά μας, μία μονάδα PMU μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο ζυγό 1 είτε στο ζυγό 3, χωρίς να αλλοιώνεται το αποτέλεσμα. Ομοίως, το αποτέλεσμα δεν αλλοιώνεται τοποθετώντας PMU στο ζυγό 5 ή στο ζυγό 7 και τέλος στο ζυγό 29 ή στο ζυγό 30. Εδώ γίνεται αντιληπτό, το γιατί το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs έχει πολλαπλές λύσεις και όχι μία και μοναδική.



Σχήμα 4.3 Μονογραμμικό διάγραμμα δικτύου ΙΕΕΕ 30

Ολοκληρώνοντας το δεύτερο βήμα, θεωρούμε ότι οι ζυγοί που επιλέγονται για τοποθέτηση PMUs είναι οι 3, 5, 19 και 30. Η μήτρα *OPL* ενημερώνεται εκ νέου και γίνεται:



Διαγράφοντας και πάλι από τη μήτρα *ITB*, εκείνες τις στήλες οι οποίες περιέχουν ζυγούς στους οποίους έχουν τοποθετηθεί PMU, η μήτρα γίνεται:

ТВ	8	17	21	23
IC1	6	10	10	15
IC2	28	16	22	24

Στη συνέχεια, αναζητούνται οι ζυγοί που εμφανίζονται περισσότερες από μία φορές στις διασυνδέσεις της παραπάνω μήτρας.

ТВ	8	17	21	23
IC1	6	10	10	15
IC2	28	16	22	24

Είναι προφανές ότι ο ζυγός 10 εμφανίζεται δύο φορές στην παραπάνω μήτρα και άρα η επόμενη μονάδα PMU θα τοποθετηθεί στο ζυγό 10. Μετά την ενημέρωση, η μήτρα *OPL* γίνεται:

Διαγράφοντας τις στήλες που περιλαμβάνουν το ζυγό 10, η νέα μήτρα TB θα είναι:

ТВ	8	23
IC1	6	15
IC2	28	24

Με βάση την παραπάνω μήτρα οι μόνοι ζυγοί που παραμένουν μη παρατηρήσιμοι, είναι οι 6, 8, 15, 23, 24 και 28. Τοποθετώντας μία μονάδα PMU σε οποιονδήποτε από τους ζυγούς που απαρτίζουν τη δεύτερη και τρίτη στήλη της μήτρας, το δίκτυο καθίσταται αυτομάτως πλήρως παρατηρήσιμο. Επιλέγοντας αυθαίρετα τους ζυγούς 8 και 23, η ενημερωμένη μήτρα *OPL* γίνεται :

Συνεπώς η λύση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης περιλαμβάνει έναν ελάχιστο αριθμό δέκα μονάδων PMU, στις θέσεις που αναγράφονται στην παραπάνω μήτρα.

Σημειώνεται ότι τα βήματα 4 και 5 δεν χρειάστηκε να εκτελεστούν, διότι το υπό εξέταση δίκτυο κατέστη παρατηρήσιμο με την ολοκλήρωση του τρίτου βήματος. Αυτό συμβαίνει στα περισσότερα δίκτυα, τα οποία έχουν ομοιόμορφα κατανεμημένους ζυγούς με μία έως δύο το πολύ διασυνδέσεις.

4.4.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δοκιμάστηκε στα δίκτυα 14, 30, 57 και 118 ζυγών του ΙΕΕΕ. Για τον έλεγχο της μεθόδου και στην περίπτωση ύπαρξης μηδενικών εγχύσεων, χρησιμοποιήθηκε ο τοπολογικός μετασχηματισμός που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.3.3.2.

Ο Πίνακας 4.2 περιλαμβάνει τα τοπολογικά δεδομένα των υπό εξέταση δικτύων, όπως επίσης τον αριθμό και τις θέσεις των μηδενικών εγχύσεων.

Δίκτυο	Αριθμός κλάδων	Αριθμός μηδενικών εγχύσεων	Θέσεις μηδενικών εγχύσεων
IEEE- 14	20	1	7
IEEE- 30	41	5	6, 9, 11 , 25, 28
IEEE- 57	78	15	4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45,46, 48
IEEE- 118	179	10	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81

Πίνακας 4.2 Δεδομένα εξεταζόμενων δικτύων

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενου πρακτικού αλγορίθμου

Δίκτυο	Χωρίς θεώρ	ηση μηδενικών εγχύσεων	Με θεώρησ	η μηδενικών εγχύσεων	Χρόνος
	Αριθμός PMU	Ζυγοί ΡΜU	Αριθμός PMU	Ζυγοί ΡΜU	Εκτέλεσης (s)
IEEE- 14	4	{2, 7, 11, 13}	3	{2, 6, 9}	0,480017
IEEE- 30	10	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, 3, 6, 9, 10, \\ 12, 15, 20, 25, 27 \end{array} \right\} $	7	$ \left\{ \begin{matrix} 3, \ 7, \ 10, \ 17, \\ 22, \ 26, \ 27 \end{matrix} \right\} $	0,450795
IEEE- 57	17	$ \left\{ \begin{matrix} 1, 4, 9, 20, 22, \\ 25, 27, 29, 32, \\ 36, 39, 41, 44, \\ 46, 49, 51, 54 \end{matrix} \right\} $	12	$ \left\{\begin{array}{c} 1, 3, 9, 19, 25, \\ 29, 32, 38, 41, \\ 47, 49, 54 \end{array}\right\} $	0,507901
IEEE- 118	32	3, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 30, 35, 40, 43, 48, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114	30	$ \left\{ \begin{array}{c} 3, 8, 11, 12, 17, \\ 21, 23, 28, 34, \\ 40, 43, 48, 49, \\ 52, 56, 62, 65, \\ 67, 70, 74, 76, \\ 79, 84, 85, 89, \\ 93, 100, 104, \\ 109, 113 \end{array} \right\} $	0,505195

Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με ή χωρίς θεώρηση μηδενικών εγχύσεων. Στον ίδιο πίνακα εμφανίζονται και οι αντίστοιχοι χρόνοι εκτέλεσης του αλγορίθμου. Με σκοπό την επικύρωση των αποτελεσμάτων, τα τελευταία συγκρίθηκαν με τα ήδη υπάρχοντα στη διεθνή βιβλιογραφία (Πίνακας 4.4). Η σύγκριση αποδεικνύει ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Δίκτυο	Χωρίς θεώρ	ηση μηδενικών εγχύσεων	Με θεώρησ	η μηδενικών εγχύσεων
	Αριθμός PMU	Θέσεις ΡΜU	Αριθμός PMU	Θέσεις ΡΜU
IEEE- 14	4	$\{2, 6, 7, 9\}$	3	$\{2, 6, 9\}$
IEEE- 30	10	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, 4, 6, 9, 10, \\ 12, 15, 18, 25, 27 \end{array} \right\} $	7	$ \left\{ \begin{matrix} 3, \ 5, \ 10, \ 12, \\ 18, \ 23, \ 27 \end{matrix} \right\} $
IEEE- 57	17	$ \left\{ \begin{matrix} 1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, \\ 25, 27, 32, 36, 38, \\ 39, 41, 46, 50, 53 \end{matrix} \right\} $	13	$ \left\{ \begin{matrix} 1, 6, 9, 15, 20, \\ 25, 27, 32, 38, \\ 47, 50, 53, 56 \end{matrix} \right\} $
IEEE- 118	32	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, 5, 9, 11, 12, 17, \\ 21,24, 25, 28, 34, \\ 37, 40,45, 49, 52, \\ 56, 62, 63,68, 73, \\ 75, 77, 80, 85, 86, \\ 90, 94, 101, 105, \\ 110, 114 \end{array} \right\} $	29	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, 8, 11, 12, 15, \\ 19, 21, 27, 31, \\ 32, 34, 40, 45, \\ 49, 52, 56, 62, \\ 65, 72, 75, 77, \\ 80, 85, 86, 90, \\ 94, 101, 105, 110 \end{array} \right\} $

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης από βιβλιογραφία [78], [117]

4.4.2 Τεχνική τοποθέτησης μονάδων ΡΜU για πλήρη παρατηρησιμότητα

Η προτεινόμενη τεχνική βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο τοποθέτησης μονάδων PMU και συνοψίζεται στα ακόλουθα τέσσερα βήματα:

- Βήμα 1. Αναζήτηση του μη παρατηρήσιμου ζυγού που φέρει τον μικρότερο αριθμό διασυνδέσεων με μη παρατηρήσιμους ζυγούς. Στην πρώτη επανάληψη οι ζυγοί αυτοί αντιστοιχούν στους ακτινικούς ζυγούς του δικτύου. Η διαδικασία είναι επαναληπτική και σε περίπτωση που βρεθούν περισσότεροι του ενός ζυγοί, οι οποίοι ικανοποιούν την παραπάνω απαίτηση και συνδέονται μεταξύ τους, τότε αυτοί δεν συμμετέχουν αρχικά στην διαδικασία και ο αλγόριθμος μεταβαίνει στο βήμα 3, προσπερνώντας το βήμα 2.
- Βήμα 2. Αναζήτηση στους διασυνδεδεμένους ζυγούς του επιλεγόμενου ζυγού εκείνου ο οποίος φέρει τις περισσότερες διασυνδέσεις με μη παρατηρήσιμους ζυγούς και τοποθέτηση μονάδας PMU στο ζυγό αυτό.
- Βήμα 3. Ενημέρωση των μητρών που περιέχουν τον αριθμό των διασυνδέσεων και τη βέλτιστη λύση και καταμέτρηση των μη παρατηρήσιμων διασυνδέσεων των ζυγών. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή, επαναληπτικά, μέχρις ότου καταστούν παρατηρήσιμοι όλοι οι μη παρατηρήσιμοι ζυγοί του δικτύου.
- Βήμα 4. Έλεγχος για την ύπαρξη ζυγών που δεν είχαν αρχικά συμμετάσχει στην διαδικασία, αφού ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία των τριών πρώτων βημάτων. Σε μία τέτοια περίπτωση, υπάρχουν ακόμη μη παρατηρήσιμοι ζυγοί στο δίκτυο,. Σε περίπτωση που ο αλγόριθμος εντοπίσει τέτοιους ζυγούς, τους καθιστά παρατηρήσιμους τοποθετώντας PMU σε εκείνον που έχει τις περισσότερες διασυνδέσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, το βήμα αυτό δεν εκτελείται.

Μετά την ολοκλήρωση και του τελευταίου βήματος, το δίκτυο θα είναι πλέον παρατηρήσιμο

χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό μανάδων PMU.

4.4.2.1 Επεξηγηματικό παράδειγμα

Με σκοπό την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του προτεινόμενου αλγορίθμου, χρησιμοποιούμε και πάλι το δίκτυο 30 ζυγών του ΙΕΕΕ, όπως αυτό φαίνεται στην Ενότητα 4.4.1.1.

Κατά την πρώτη ανακύκλωση, η μήτρα που περιέχει τον αριθμό των διασυνδέσεων έχει την ακόλουθη μορφή (λόγω περιορισμένου χώρου η μήτρα έχει χωριστεί σε δύο τμήματα):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	5	3	5	3	8	3	3	4	7	2	6	2	3	5

16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3	3	3	3	3	3	4	3	4	4	2	5	4	3	3

Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει την αρίθμηση των ζυγών του δικτύου και η δεύτερη τον αριθμό των διασυνδέσεων που αντιστοιχούν σε κάθε ζυγό, επαυξημένο κατά ένα. Αναζητώντας τους ζυγούς με τον ελάχιστο αριθμό διασυνδέσεων, παρατηρούμε ότι αυτοί είναι οι ζυγοί 11, 13 και 26, οι οποίοι φέρουν από δύο διασυνδέσεις. Επειδή δεν υπάρχει τοπολογική διασύνδεση μεταξύ τους, δε χρειάζεται να μπουν κάποιοι απ' αυτούς σε κατάσταση αδρανοποίησης.

Στη συνέχεια γίνεται αναζήτηση στις διασυνδέσεις των επιλεγμένων ζυγών, ώστε να βρεθεί εκείνος ο διασυνδεδεμένος ζυγός ο οποίος φέρει τις περισσότερες διασυνδέσεις με μη παρατηρήσιμους ζυγούς. Ο ζυγός 11 διασυνδέεται με το ζυγό 9 και τον εαυτό του. Ανατρέχοντας στην παραπάνω μήτρα διασυνδέσεων, διαπιστώνεται ότι ο ζυγός 9 φέρει τέσσερις μη παρατηρήσιμες διασυνδέσεις και ο ζυγός 11 δύο. Επομένως θα τοποθετηθεί μία μονάδα PMU στο ζυγό 9. Ομοίως, ο ζυγός 13 διασυνδέσεις και ο ζυγός 12 και τον εαυτό του. Ο ζυγός 12 φέρει έξι μη παρατηρήσιμες διασυνδέσεις και ο ζυγός 13 δύο. Άρα, μία ακόμη μονάδα PMU θα τοποθετηθεί στον ζυγό 12. Τέλος, ο ζυγός 26 διασυνδέεται με τον ζυγό 25 και τον εαυτό του. Με το ίδιο σκεπτικό προκύπτει μία επιπλέον μονάδα PMU η οποία εγκαθίσταται στον ζυγό 25.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης επανάληψης έχουν τοποθετηθεί τρείς μονάδες PMU στους ζυγούς 9, 12 και 25. Η τοποθέτηση των PMUs στους συγκεκριμένους ζυγούς, κατέστησε εμμέσως παρατηρήσιμους τους ζυγούς 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 24, 25, 26 και 27. Έτσι, οι ζυγοί αυτοί αποκλείονται από υποψήφιοι για τοποθέτηση PMU και ταυτόχρονα δεν συμμετέχουν στην επανακαταμέτρηση των διασυνδέσεων.

Αφού ολοκληρώθηκε η επανακαταμέτρηση των νέων μη παρατηρήσιμων διασυνδέσεων, η ανανεωμένη μήτρα διασυνδέσεων θα είναι η ακόλουθη:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	2	2	3	4	2	2	0	4	0	0	0	0	2
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Στη μήτρα διασυνδέσεων οι ζυγοί 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 24, 25, 26 και 27 είναι άμεσα ή έμμεσα παρατηρήσιμοι από την πρώτη επανάληψη) και δε συμμετέχουν στην αναζήτηση του ζυγού με τις ελάχιστες διασυνδέσεις. Οι ζυγοί με τον ελάχιστο αριθμό μη παρατηρήσιμων διασυνδέσεων είναι οι 17 και 23. Ο ζυγός 17 διασυνδέεται με τους 10 και 16. Ο ζυγός 10 φέρει τέσσερις (4) διασυνδέσεις έναντι μίας του ζυγού 16. Άρα η μονάδα PMU θα τοποθετηθεί στο ζυγό 10. Ομοίως ο ζυγός 23 διασυνδέεται με τους 15 και 24. Και οι δύο αυτοί ζυγοί φέρουν από δύο διασυνδέσεις. Ο αλγόριθμος μπορεί ελεύθερα να επιλέξει οποιονδήποτε από τους δύο χωρίς η επιλογή αυτή να αλλοιώσει την τελική λύση του προβλήματος. Έστω ότι έχει επιλεγεί για τοποθέτηση ο ζυγός 15. Μετά τον αποκλεισμό των άμεσα και έμμεσα παρατηρήσιμων ζυγών της δεύτερης επανάληψης και την επανακαταμέτρηση των διασυνδέσεων, η ανανεωμένη μήτρα μη παρατηρήσιμων διασυνδέσεων για την τρίτη επανάληψη θα είναι η εξής:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	2	2	3	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3	2	2	2

Ο ζυγός 19 διασυνδέεται με τους 18, 20 και τον εαυτό του. Όλοι φέρουν από μία διασύνδεση. Αφού η επιλογή της θέσης δεν επηρεάζει την λύση, επιλέγεται για τοποθέτηση ο ζυγός 19. Η ανανεωμένη μήτρα μη παρατηρήσιμων διασυνδέσεων για την τέταρτη επανάληψη θα είναι:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	2	2	3	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Σε αυτό το σημείο, οι ζυγοί που φέρουν ελάχιστο αριθμό διασυνδέσεων είναι οι 3, 7, 8, 28, 29 και 30. Ο ζυγός 3 διασυνδέεται με τους 1 και 4, εκ των οποίων ο ζυγός 1 φέρει τον μέγιστο αριθμό διασυνδέσεων και άρα επιλέγεται για τοποθέτηση PMU. Ο ζυγός 7 διασυνδέεται με τους 5, 6 και τον εαυτό του. Το μέγιστο αριθμό διασυνδέσεων φέρει ο ζυγός 6 και σ' αυτόν τοποθετείται η μονάδα PMU. Οι ζυγοί που θα έπρεπε στη συνέχεια να εξεταστούν, είναι οι 8, 28, 29 και 30. Όμως η εγκατάσταση PMU στο ζυγό 6 καθιστά παρατηρήσιμους και τους ζυγούς 8 και 28. Έτσι, ο αλγόριθμος δε χρειάζεται να εξετάσει τις διασυνδέσεις τους και τους θέτει εκτός καταμέτρησης. Επομένως η νέα μήτρα διασυνδέσεων γίνεται:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	3	2	2	3	4	2	2	0	0	0	0	0	0	0
16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	<mark>29</mark>	30

Στην παραπάνω μήτρα οι ζυγοί 29 και 30 φέρουν τον ίδιο ελάχιστο αριθμό διασυνδέσεων και συνδέονται άμεσα μεταξύ τους. Επομένως ο αλγόριθμος τους θέτει σε αδρανοποίηση και εξετάζει τους εναπομείναντες ζυγούς. Σ' αυτούς περιλαμβάνεται μόνον ο ζυγός 5, ο οποίος διασυνδέεται με τους ζυγούς 2 και 7 αλλά και με τον εαυτό του. Επιλέγεται για τοποθέτηση ο ζυγός 2 και απομένουν

ως μη παρατηρήσιμοι οι δύο (2) αδρανείς ζυγοί. Προφανώς μία ακόμη μονάδα PMU θα τοποθετηθεί σε έναν από τους δύο ζυγούς καθιστώντας το δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο. Επιλέγοντας το ζυγό 29, η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει δέκα μονάδες PMU τοποθετημένες στις θέσεις {1, 2, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 29}.

4.4.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η αξιοπιστία του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχθηκε μέσω δοκιμών στα δίκτυα 14, 30, 57 και 118 ζυγών του ΙΕΕΕ. Η μέθοδος δοκιμάστηκε για σενάρια με ή χωρίς θεώρηση μηδενικών εγχύσεων, χρησιμοποιώντας για την δεύτερη περίπτωση τον τοπολογικό μετασχηματισμό της Ενότητας 4.3.3.2. Τα τοπολογικά δεδομένα των υπό εξέταση δικτύων, όπως επίσης ο αριθμός και η θέση των μηδενικών εγχύσεων, είναι ίδια με αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Η επικύρωση των αποτελεσμάτων, γίνεται πραγματοποιώντας σύγκριση με αυτά της διεθνούς βιβλιογραφίας, τα οποία παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4.4 της Ενότητας 4.4.1.2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των διαφόρων σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5.

Δίκτυο	Χωρίς	θεώρηση μηδενικών εγχύσεων	Με θεώρη	ση μηδενικών εγχύσεων	Χρόνος Εκτέλεσης
	Αριθμός PMU	Θέσεις ΡΜU	Αριθμός PMU	Θέσεις ΡΜU	(s)
IEEE- 14	4	{2, 7, 11, 13}	3	{2, 6, 9}	0,806751
IEEE- 30	10	$ \left\{ \begin{matrix} 1, \ 2, \ 6, \ 9, \ 10, \ 12, \\ 15, \ 18, \ 25, \ 29 \end{matrix} \right\} $	7	$ \left\{ \begin{matrix} 1, \ 7, \ 10, \ 17, \\ 22, \ 26, \ 27 \end{matrix} \right\} $	0,347325
IEEE- 57	17	$ \left\{\begin{array}{c} 1, 4, 7, 9, 15, \\ 19, 22, 25, 27, \\ 32, 36, 38, 41, \\ 46, 51, 53, 57 \end{array}\right\} $	12	$ \begin{cases} 1, 3, 9, 19, 25, \\ 29, 32, 38, 41, \\ 47, 49, 54 \end{cases} $	0,441714
IEEE- 118	32	$\left\{\begin{array}{c}3, 5, 9, 12, 15, \\17, 20, 23, 25, \\28, 34, 37, 42, \\45, 49, 52, 56, \\62, 63, 68, 71, \\75, 77, 80, 85, \\86, 91, 94, 101, \\105, 110, 114\end{array}\right\}$	29	$ \left\{ \begin{array}{c} 1, 8, 11, 12, 17, \\ 21, 27, 28, 32, 34, \\ 40, 45, 49, 52, 56, \\ 62, 65, 67, 70, 74, \\ 76, 79, 84, 85, 89, \\ 93, 100, 104, 109 \end{array} \right\} $	0,262584

Πίνακας 4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης προτεινόμενης τεχνικής τοποθέτησης

4.4.3 Τεχνική ελαχίστων τετραγώνων για τοποθέτηση μονάδων ΡΜU

Η προτεινόμενη μέθοδος τοποθέτησης μονάδων PMU εγγυάται την πλήρη παρατηρησιμότητα του συστήματος, ελαχιστοποιώντας το συνολικό κόστος εγκατάστασης των μονάδων. Αποτελεί μια καθαρά μαθηματική μέθοδο, η οποία διατυπώνεται ως ένα μη γραμμικό μοντέλο σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χωρίς περιορισμούς, με συνεχείς μεταβλητές απόφασης. Η διατύπωση του προβλήματος γίνεται με θεώρηση ή όχι μετρήσεων ροής και έγχυσης

Κάθε μονάδα PMU θεωρείται ότι μετράει το φασιθέτη τάσης του ζυγού εγκατάστασης και τους φασιθέτες ρεύματος όλων των γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό. Το πρόβλημα λύνεται θεωρώντας ότι η τοποθέτηση των μονάδων PMU στο δίκτυο θα το καταστήσει μία παρατηρήσιμη νησίδα.

Για ένα σύστημα *n* ζυγών, το πρόβλημα διατυπώνεται ως εξής:

$$\min_{x} J(x) = x^{T} W x = \sum_{i=1}^{n} w_{i} x_{i}^{2}$$
(4.9)

s.t.
$$\begin{aligned} f(x) &= \hat{0} \\ \hat{0} &\leq x \leq \hat{1} \end{aligned}$$
 (4.10)

όπου x_i είναι μια συνεχής μεταβλητή απόφασης η οποία ισούται με την μονάδα (1) όταν η μονάδα PMU εγκαθίσταται στο ζυγό i, διαφορετικά ισούται με το μηδέν (0). Με J(x) συμβολίζεται η αντικειμενική συνάρτηση που πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί, x είναι το $n \times 1$ διάνυσμα τοποθέτησης μονάδων PMU, $W = diag(w_i)$ είναι η διαγώνια μήτρα βαρών διαστάσεων $n \times n$, w_i είναι η βαρύτητα τοποθέτησης μιας μονάδας PMU στο ζυγό i (που αντιστοιχεί στο κόστος εγκατάστασης), f(x) είναι το $n \times 1$ διάνυσμα συναρτήσεων του οποίου το στοιχείο i ορίζει τον περιορισμό παρατηρησιμότητας για το ζυγό i, και $\hat{0}$ το μηδενικό διάνυσμα διαστάσεων $n \times 1$.

Έστω ότι με \mathcal{A}_i συμβολίζεται το σύνολο των γειτονικών με το ζυγό *i*. Ο περιορισμός παρατηρησιμότητας $f_i(x)$ για τον ζυγό *i* δίνεται ως ακολούθως:

$$f_i(x) = (1 - x_i) \prod_{j \in \mathcal{A}_i} (1 - x_j) = 0, \quad \forall i \in \mathfrak{I}$$
(4.11)

όπου ℑ το σύνολο των ζυγών του συστήματος. Ο ισοτικός περιορισμός (4.11) διασφαλίζει ότι τουλάχιστον μία από τις μεταβλητές τοποθέτησης PMU x_k , $k \in \{i\} \cup A_i$ θα είναι ίση με την μονάδα, το οποίο με τη σειρά του υποδηλώνει ότι τουλάχιστον μία μονάδα PMU πρέπει να τοποθετηθεί σε οποιονδήποτε από τους ζυγούς $k \in \{i\} \cup A_i$ (ή σε όλους) για να καταστήσει το ζυγό i παρατηρήσιμο.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης (4.9)–(4.10) επιλύεται σε πολυονομικό χρόνο και μπορεί να παράσχει διαφορετικά σύνολα βέλτιστων θέσεων PMUs, ανάλογα με τα βάρη που χρησιμοποιούνται, διασφαλίζοντας τον ίδιο ελάχιστο αριθμό PMUs. Μια ισοδύναμη διατύπωση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων χωρίς περιορισμούς, μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\min_{x} J(x) = x^{T} W x + f(x)^{T} V f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(w_{i} x_{i}^{2} + v_{i} \left(1 - x_{i} \right)^{2} \left(\prod_{j \in \mathcal{A}_{i}} \left(1 - x_{j} \right) \right)^{2} \right)$$
(4.12)

όπου $V = diag(v_i)$ διαγώνια μήτρα βαρών διαστάσεων $n \times n$, με $v_i \to \infty$ (πρακτικά $v_i = 10^7$). Για την επίλυση της (4.12) ακολουθείται η εξής επαναληπτική διαδικασία:

$$\left(W + F^{T}VF\right)\Delta x^{k} = -Wx^{k} - F^{T}Vf(x^{k})$$

$$(4.13)$$

όπου k είναι ο δείκτης επανάληψης, x^k είναι το διάνυσμα της λύσης στην επανάληψη k, $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$, και $F = \partial f / \partial x$ συμμετρική $n \times n$ Ιακωβιανή μήτρα, με δομή ίδια με την μήτρα αγωγιμοτήτων και με τιμές μεταξύ 0 και 1. Τα στοιχεία της μήτρας F ορίζονται ως εξής:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} = -\prod_{j \in \mathcal{A}_i} (1 - x_j) \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} = -(1 - x_i) \prod_{\substack{k \in \mathcal{A}_i \\ k \neq j}} (1 - x_k)$$
(4.15)

Η διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης (4.12) διασφαλίζει ότι οι βέλτιστες εκτιμήσεις \hat{x}_i , $\forall i \in \Im$ θα παίρνουν πραγματικές τιμές στο διάστημα [0,1], αποφεύγοντας έτσι την έκφραση με ανισοτικούς περιορισμούς που παρουσιάστηκε στο Εδάφιο 4.3.1. Αυτό μπορεί να αποδειχθεί θεωρώντας τις ακόλουθες περιπτώσεις για την βέλτιστη \hat{x}_i :

$$\begin{array}{l} \alpha) \ \hat{x}_{i} < -1 \qquad \Rightarrow \ \hat{x}_{i}^{2} > 1, \qquad \left(1 - \hat{x}_{i}\right)^{2} > 4 \\ \beta) \ -1 \le \hat{x}_{i} < 0 \Rightarrow 0 < \hat{x}_{i}^{2} \le 1, \ 1 < \left(1 - \hat{x}_{i}\right)^{2} \le 4 \\ \gamma) \ 1 < \hat{x}_{i} \le 2 \qquad \Rightarrow \ \hat{x}_{i}^{2} > 1, \qquad 0 < \left(1 - \hat{x}_{i}\right)^{2} \le 1 \\ \delta) \ 0 \le \hat{x}_{i} \le 1 \qquad \Rightarrow 0 \le \hat{x}_{i}^{2} \le 1, \ 0 \le \left(1 - \hat{x}_{i}\right)^{2} \le 1 \end{array}$$

Όπως μπορεί εύκολα να παρατηρήσει κανείς, η περίπτωση (δ) δίδει την ελάχιστη τιμή για το δείκτη απόδοσης J(x) στην (4.12). Το γραμμικό σύστημα (4.13) μπορεί να επιλυθεί ως προς x κάνοντας ευθείες/αντίστροφες αντικαταστάσεις στους παράγοντες Cholesky της θετικά ημιορισμένης μήτρας συντελεστών.

Για να γίνει πιο κατανοητή η παραπάνω διατύπωση στην περίπτωση της πλήρους παρατηρησιμότητας, χρησιμοποιείται ως παράδειγμα το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ του Σχήματος 4.1.

Η διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης γράφεται ως:

$$\min\sum_{i=1}^{14} w_i x_i^2$$

υπό τους μη γραμμικούς περιορισμούς παρατηρησιμότητας:

$$f(x) = \begin{cases} f_1 = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_5) = 0 \\ f_2 = (1 - x_2)(1 - x_1)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5) = 0 \\ f_3 = (1 - x_3)(1 - x_2)(1 - x_4) = 0 \\ f_4 = (1 - x_4)(1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_5)(1 - x_7)(1 - x_9) = 0 \\ f_5 = (1 - x_5)(1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_4)(1 - x_6) = 0 \\ f_6 = (1 - x_6)(1 - x_5)(1 - x_{11})(1 - x_{12})(1 - x_{13}) = 0 \\ f_7 = (1 - x_7)(1 - x_4)(1 - x_8)(1 - x_9) = 0 \\ f_8 = (1 - x_8)(1 - x_7) = 0 \\ f_9 = (1 - x_9)(1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_{10})(1 - x_{14}) = 0 \\ f_{10} = (1 - x_{10})(1 - x_9)(1 - x_{11}) = 0 \\ f_{11} = (1 - x_{11})(1 - x_6)(1 - x_{13}) = 0 \\ f_{12} = (1 - x_{12})(1 - x_6)(1 - x_{13}) = 0 \\ f_{13} = (1 - x_{13})(1 - x_6)(1 - x_{13}) = 0 \\ f_{14} = (1 - x_{14})(1 - x_9)(1 - x_{13}) = 0 \end{cases}$$

 $0 \le \mathbf{x}_i \le 1$

Ενδεικτικά, τα στοιχεία της πρώτης γραμμής της μήτρας F, που αφορούν τον περιορισμό παρατηρησιμότητας του ζυγού 1, $f_1 = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_5) = 0$, υπολογίζονται ως εξής:

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = -(1 - x_2)(1 - x_5)$$
$$\frac{\partial f_1}{\partial x_2} = -(1 - x_1)(1 - x_5)$$
$$\frac{\partial f_1}{\partial x_5} = -(1 - x_1)(1 - x_2)$$

Έστω η γραμμή i - j ενός δικτύου. Υποθέτοντας ότι στους ζυγούς k και m του ίδιου δικτύου έχουν τοποθετηθεί PMUs, ορίζονται δύο παρατηρήσιμες περιοχές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 (α).

Εάν υπάρχει μία μέτρηση ροής στη γραμμή i - j, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.4 (β), τότε μία από τις τάσεις των άκρων της, μπορεί να υπολογιστεί όταν η άλλη είναι γνωστή. Επομένως, οι δύο παρατηρήσιμες περιοχές μπορούν να συνενωθούν σε μία μόνο παρατηρήσιμη περιοχή.

Αυτή η παρατήρηση χρησιμοποιείται για να τροποποιηθούν οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας (4.11) λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής. Συγκεκριμένα, για τη γραμμή i - j οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας που αφορούν τους ζυγούς i, j θα δίνονται από τις σχέσεις $f_i(x) = 0$ και $f_j(x) = 0$, αντίστοιχα. Όταν υπάρχει μία ροή στη γραμμή i - j, οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας των ζυγών i και j συνενώνονται σε έναν ισοδύναμο περιορισμό ως εξής:



Σχήμα 4.4 Παρατηρήσιμες περιοχές PMU (α) χωρίς (β) με μέτρηση ροής

$$f_{i new}(x) = f_i(x)f_i(x) = 0$$
(4.17)

Για ένα σύστημα η ζυγών με m μετρήσεις ροής, η διανυσματική συνάρτηση (4.10) γίνεται:

$$f_{new}(x) = \hat{0} \tag{4.18}$$

όπου $f_{new}(x) = (f_{bus_new}(x)^T, f_{bus}(x)^T)^T$ είναι η διανυσματική συνάρτηση διαστάσεων $(n-m)\times 1$, $f_{bus_new}(x)$, $f_{bus}(x)$ είναι οι διανυσματικές συναρτήσεις διαστάσεων $m\times 1$ και $(n-2m)\times 1$ που σχετίζονται με τους περιορισμούς παρατηρησιμότητας (4.17) και (4.11), αντίστοιχα, και $\hat{0}$ είναι το μηδενικό διάνυσμα διαστάσεων $(n-m)\times 1$.

Σημειώνεται ότι το γινόμενο στην εξίσωση (4.17) θα περιέχει όρους τάξης μεγαλύτερης ή ίσης του $(1-x_i)^2$, καθώς ο όρος $(1-x_i)$ είναι κοινός στους δύο περιορισμούς παρατηρησιμότητας $f_i(x)$ και $f_j(x)$. Γενικά, όσοι όροι της μορφής $(1-x_i)^r$, $r \ge 2$ προκύψουν στους νέους περιορισμούς, μπορούν να αντικατασταθούν ισοδύναμα από τον πρώτης τάξης όρο $(1-x_i)$, λαμβάνοντας υπόψη ότι το δεξί μέλος της εξίσωσης (4.17) είναι ίσο με μηδέν.

Το τροποποιημένο μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί επίσης να διατυπωθεί και να επιλυθεί ως ένα πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.12) την f(x) με την ως εξής:

$$\min_{x} J(x) = x^{T}Wx + f_{new}(x)^{T}V_{new}f_{new}(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(w_{i}x_{i}^{2} + v_{i_{new}}(1-x_{i})^{2} \left(\prod_{j \in \mathcal{A}_{i_{new}}}(1-x_{j})\right)^{2} \right)$$
(4.19)

όπου $V_{new} = diag(v_{i_new})$ είναι διαγώνια μήτρα βαρών διαστάσεων $(n-m) \times (n-m)$ με βάρη $v_{i_new} \rightarrow \infty$ (πρακτικά $v_{i_new} = 10^7$).

Θεωρώντας μία γραμμή η οποία συνδέεται με το ζυγό *i* και την ύπαρξη ή απουσία μέτρησης ροής κατά μήκος της, συμβολίζουμε με \mathcal{A}_{i_new} το σύνολο των ζυγών που σχετίζονται με το ζυγό *i* σύμφωνα με την (4.17) ή (4.11), αντίστοιχα. Το επαναληπτικό σχήμα επίλυσης δίνεται από την:

$$\left(W + F_{new}^{T}V_{new}F_{new}\right)\Delta x^{k} = -Wx^{k} - F_{new}^{T}V_{new}f_{new}(x^{k})$$

$$(4.20)$$

όπου $F_{new} = \partial f_{new} / \partial x$ είναι η διαστάσεων $(n-m) \times (n-m)$ Ιακωβιανή μήτρα των τροποποιημένων ισοτικών περιορισμών (4.18).

Για λόγους επεξήγησης, θεωρούμε το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ, το οποίο περιλαμβάνει δύο μετρήσεις ροής στις γραμμές 9–10 και 10–11. Οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας που αφορούν τους ζυγούς 9, 10 και 11 είναι οι ακόλουθοι:

$$f_9 = (1 - x_9)(1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_{10})(1 - x_{14}) = 0$$

$$f_{10} = (1 - x_{10})(1 - x_9)(1 - x_{11}) = 0$$

$$f_{11} = (1 - x_{11})(1 - x_6)(1 - x_{10}) = 0$$

Η ύπαρξη των δύο αυτών μετρήσεων ροής οδηγεί σ' ένα νέο ισοδύναμο περιορισμό f_{9_new} ως εξής:

$$f_{9_new} = f_9 f_{10} f_{11} = (1 - x_9)^2 (1 - x_4) (1 - x_6) (1 - x_7) (1 - x_{10})^3 (1 - x_{11})^2 (1 - x_{14}) = 0$$

Ο περιορισμός $f_{9_{new}}$, ο οποίος περιλαμβάνει όρους δεύτερης και τρίτης τάξης, μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη μορφή:

$$f_{9_{new}} = (1 - x_9)(1 - x_4)(1 - x_6)(1 - x_7)(1 - x_{10})(1 - x_{11})(1 - x_{14}) = 0$$

Η τελική διατύπωση του προβλήματος τοποθέτησης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι:

$$\min\sum_{i=1}^{14} w_i x_i^2$$

υπό τους μη γραμμικούς περιορισμούς:

$$f_{new}(x) = \begin{cases} f_{9_new} = (1-x_9)(1-x_4)(1-x_6)(1-x_7)(1-x_{10})(1-x_{11})(1-x_{14}) = 0 \\ f_1 = (1-x_1)(1-x_2)(1-x_5) = 0 \\ f_2 = (1-x_2)(1-x_1)(1-x_3)(1-x_4)(1-x_5) = 0 \\ f_3 = (1-x_3)(1-x_2)(1-x_4) = 0 \\ f_4 = (1-x_4)(1-x_2)(1-x_3)(1-x_5)(1-x_7)(1-x_9) = 0 \\ f_5 = (1-x_5)(1-x_1)(1-x_2)(1-x_4)(1-x_6) = 0 \\ f_6 = (1-x_6)(1-x_5)(1-x_{11})(1-x_{12})(1-x_{13}) = 0 \\ f_7 = (1-x_7)(1-x_4)(1-x_8)(1-x_9) = 0 \\ f_8 = (1-x_8)(1-x_7) = 0 \\ f_{13} = (1-x_{12})(1-x_6)(1-x_{13}) = 0 \\ f_{14} = (1-x_{14})(1-x_9)(1-x_{13}) = 0 \end{cases}$$
(4.21)

Έστω ο ζυγός *i* ενός δικτύου, ο οποίος συνδέεται με τους ζυγούς *j*,*k*,...,*m*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5, και φέρει μία μέτρηση έγχυσης. Εάν οι φασιθέτες τάσης όλων των παραπάνω ζυγών πλην ενός είναι γνωστοί, τότε ο φασιθέτης του εναπομένοντος ζυγού μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας τον νόμο ρευμάτων του Kirchhoff (KCL), αφού το εγχεόμενο ρεύμα σ' αυτόν είναι γνωστό.



Σχήμα 4.5 Ζυγός με μέτρηση έγχυσης

Αυτή η παρατήρηση χρησιμοποιείται για να τροποποιηθούν εκ νέου οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας (4.11) με θεώρηση των μετρήσεων έγχυσης.

Για το ζυγό *i* και τους ζυγούς *j*,*k*,...,*m*, που διασυνδέονται με αυτόν, οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας θα δίδονται από τις σχέσεις $f_i(x) = 0, f_j(x) = 0, f_k(x) = 0,..., f_m(x) = 0$ αντίστοιχα. Όταν υπάρχει μία μέτρηση έγχυσης στο ζυγό *i*, τότε ο περιορισμός παρατηρησιμότητας που αφορά το συγκεκριμένο ζυγό παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$f_{i_{new}}^{*} = f_i \cdot (f_j + f_k + \dots + f_m) = 0$$
(4.22)

Οι περιορισμοί των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό έγχυσης διαγράφονται από το σύνολο των περιορισμών των ζυγών του δικτύου.

Για ένα σύστημα n ζυγών με l μετρήσεις έγχυσης, η διανυσματική συνάρτηση (4.10) γίνεται:

$$f_{new}^*(x) = \hat{0}$$
(4.23)

όπου $f_{new}^*(x) = (f_{bus_new}^*(x)^T, f_{bus}^*(x)^T)^T$ είναι η διανυσματική συνάρτηση διαστάσεων $(n-m)\times 1$, $f_{bus_new}^*(x)$, $f_{bus}^*(x)$ είναι οι διανυσματικές συναρτήσεις διαστάσεων $l\times 1$ και $(n-l-m)\times 1$, που σχετίζονται με τους περιορισμούς παρατηρησιμότητας (4.22) και (4.11), αντίστοιχα, $\hat{0}$ είναι το μηδενικό διάνυσμα διαστάσεων $(n-m)\times 1$ και m είναι ο αριθμός των ζυγών που συνδέονται με τους ζυγούς έγχυσης.

Το τροποποιημένο μοντέλο βελτιστοποίησης μπορεί ομοίως να διατυπωθεί και να επιλυθεί ως ένα πρόβλημα σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, αντικαθιστώντας στην εξίσωση (4.12) την f(x) με $f_{new}^*(x)$, ως εξής:

$$\min_{x} J(x) = x^{T}Wx + f_{new}^{*}(x)^{T}V_{new}^{*}f_{new}^{*}(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(w_{i}x_{i}^{2} + v_{i_new}^{*}\left(f_{i_new}^{*}\right)^{2} + v_{i}\left(f_{i}\right)^{2} \right)$$
(4.24)

όπου $V_{new}^* = diag\left(v_{i_new}^*, v_i\right)$ είναι η διαστάσεων $(n-m) \times (n-m)$ διαγώνια μήτρα βαρών της οποίας στοιχεία $v_{i_new}^*$, v_i είναι τα βάρη των περιορισμών παρατηρησιμότητας (4.22) και (4.11), αντίστοιχα, με $v_{i_new}^*$, $v_i \to \infty$ (πρακτικά $v_{i_new}^* = v_i = 10^7$).

Θεωρώντας l ζυγούς έγχυσης, το επαναληπτικό σχήμα επίλυσης θα δίνεται από την:

$$\left(W + F_{new}^{*T} V_{new}^{*} F_{new}^{*}\right) \Delta x^{k} = -W x^{k} - F_{new}^{*T} V_{new}^{*} f_{new}^{*} (x^{k})$$
(4.25)

όπου $F_{new}^* = \partial f_{new}^* / \partial x$ είναι η $(n-m) \times (n-m)$ Ιακωβιανή μήτρα των τροποποιημένων ισοτικών περιορισμών (4.18).

Για την κατανόηση της μεθόδου, θεωρούμε το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ, το οποίο περιλαμβάνει μία μέτρηση έγχυσης στο ζυγό 7. Ο ζυγός αυτός συνδέεται με τους ζυγούς 4, 8 και 9. Ο περιορισμός παρατηρησιμότητας του ζυγού 7 μετασχηματίζεται σε έναν νέο περιορισμό $f_{7_new}^*$, ενώ αυτοί των υπολοίπων τριών ζυγών διαγράφονται. Έτσι η μορφή του περιορισμού $f_{7_new}^*$ θα είναι η ακόλουθη:

$$f_{7_new}^{*} = f_7 \cdot (f_4 + f_8 + f_9) = 0$$

όπου

$$f_{7} = (1 - x_{4})(1 - x_{7})(1 - x_{8})(1 - x_{9}) = 0,$$

$$f_{4} = (1 - x_{2})(1 - x_{3})(1 - x_{4})(1 - x_{5})(1 - x_{7})(1 - x_{9}) = 0,$$

$$f_{8} = (1 - x_{7})(1 - x_{8}) = 0$$

$$f_{9} = (1 - x_{4})(1 - x_{7})(1 - x_{9})(1 - x_{10})(1 - x_{14}) = 0.$$

Η τελική διατύπωση του προβλήματος τοποθέτησης για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι:

$$\min\sum_{i=1}^{14} w_i x_i^2$$

υπό τους μη γραμμικούς περιορισμούς:

$$f_{new}^{*}(x) = \begin{cases} f_{7_new}^{*} = f_{7} \cdot (f_{4} + f_{8} + f_{9}) = 0 \\ f_{1} = (1 - x_{1})(1 - x_{2})(1 - x_{5}) = 0 \\ f_{2} = (1 - x_{2})(1 - x_{1})(1 - x_{3})(1 - x_{4})(1 - x_{5}) = 0 \\ f_{3} = (1 - x_{3})(1 - x_{2})(1 - x_{4}) = 0 \\ f_{5} = (1 - x_{5})(1 - x_{1})(1 - x_{2})(1 - x_{4})(1 - x_{6}) = 0 \\ f_{6} = (1 - x_{6})(1 - x_{5})(1 - x_{11})(1 - x_{12})(1 - x_{13}) = 0 \\ f_{10} = (1 - x_{10})(1 - x_{9})(1 - x_{11}) = 0 \\ f_{11} = (1 - x_{11})(1 - x_{6})(1 - x_{10}) = 0 \\ f_{12} = (1 - x_{12})(1 - x_{6})(1 - x_{12})(1 - x_{14}) = 0 \\ f_{13} = (1 - x_{13})(1 - x_{6})(1 - x_{13}) = 0 \\ f_{14} = (1 - x_{14})(1 - x_{9})(1 - x_{13}) = 0 \\ 0 \le x_{i} \le 1 \end{cases}$$

$$(4.28)$$

4.4.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU χωρίς συμβατικές μετρήσεις

Οι προσομοιώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου, αγνοώντας την ύπαρξη μετρήσεων ροής και έγχυσης, πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τα δίκτυα 14, 30 και 57 ζυγών του ΙΕΕΕ. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων, αυτά συγκρίθηκαν με άλλα γνωστά στην βιβλιογραφία [78], [117]. Ο Πίνακας 4.6 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δικτύων.

Δίκτυο	Αριθμός γραμμών	Μέγιστος αριθμός γραμμών που συνδέονται σε ένα ζυγό	Ζυγοί που φέρουν το μέγιστο αριθμό διασυνδέσεων
IEEE- 14	20	5	5
IEEE- 30	41	7	6
IEEE- 57	80	6	9, 13

Πίνακας 4.6 Γενικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δικτύων του ΙΕΕΕ

Το όριο σύγκλισης του αλγορίθμου WLS τέθηκε ίσο με 10^{-4} . Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών απόφασης και οι τιμές των βαρών για όλες τις μονάδες PMU τέθηκαν ίσες προς $x_i^0 = 0.5$ και $w_i = 1, \forall i \in \Im$, αντίστοιχα.

Μετά από 10 επαναλήψεις, ο αλγόριθμος δίνει ως λύση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU ένα ελάχιστο αριθμό τεσσάρων PMU τα οποία τοποθετούνται στους ζυγούς 2, 6, 7 και 9 και καθιστούν το δίκτυο IEEE 14 ζυγών πλήρως παρατηρήσιμο. Η μορφή των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται αναλυτικά στην δεύτερη στήλη του Πίνακα 4.7. Σημειώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει την ίδια λύση με αυτή που προτείνεται στις μεθόδους [78], [117] η οποία φαίνεται στην τρίτη στήλη του ίδιου πίνακα. Το Σχήμα 4.6 δείχνει ότι οι θέσεις που επέλεξε ο αλγόριθμος ως βέλτιστες, διασφαλίζουν την παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Μεταβλητές απόφασης	WLS	IP [78],[117]
<i>x</i> ₁	0,000000222861	0
x ₂	0,99999666666171	1
x ₃	0,000000222848	0
x_4	0,0000222858963	0
<i>x</i> ₅	0,0000033764419	0
<i>x</i> ₆	0,9999974999984	1
<i>x</i> ₇	0,9999000097991	1
<i>x</i> ₈	0,0000009998030	0
<i>x</i> ₉	0,9999949999702	1
x ₁₀	0,000000372476	0
<i>x</i> ₁₁	0,000000487275	0
x ₁₂	0,000000344397	0
<i>x</i> ₁₃	0,000006020789	0
x ₁₄	0,0000003724711	0
Ελάχιστος αριθμός PMUs	4	4
Βέλτιστες θέσεις μονάδων ΡΜU	{2,6,7,9}	{2,6,7,9}

Πίνακας 4.7 Εκτιμώμενες μεταβλητές τοποθέτησης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών



Σχήμα 4.6 Βέλτιστες θέσεις PMU και αντίστοιχες παρατηρήσιμες νησίδες για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών αγνοώντας τις συμβατικές μετρήσεις

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης και των τριών δικτύων, συμπεριλαμβανομένου και του αντίστοιχου χρόνου εκτέλεσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8.

Δίκτυο	Βέλτιστες θέσεις WLS	μονάδων ΡΜU IP [78],[117]	Ελάχιστος αριθμός ΡΜU	Χρόνος εκτέλεσης (s)
IEEE 14	{2, 6, 7, 9}	{2, 6, 7, 9}	4	0,833580
IEEE 30	$ \left\{ \begin{matrix} 1, \ 7, \ 8, \ 10, \ 11, \ 12, \\ 18, \ 23, \ 26, \ 30 \end{matrix} \right\} $	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, 4, 6, 9, 10, 12, \\ 15, 18, 25, 27 \end{array} \right\} $	10	0,937778
IEEE 57	$ \left\{ \begin{array}{c} 2, \ 6, \ 10, \ 12, \ 19, \\ 22, \ 25, \ 27, \ 32, \ 36, \ 41, \\ 45, \ 46, \ 49, \ 52, \ 55, \ 57 \end{array} \right\} $	$ \left\{ \begin{matrix} 1, 4, 7, 9, 15, \\ 20, 24, 25, 27, 32, 36, \\ 38, 39, 41, 46, 50, 53 \end{matrix} \right\} $	17	1,104285

Πίνακας 4.8 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του ΙΕΕΕ

4.4.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU θεωρώντας μετρήσεις ροής

Προσομοιώσεις του προτεινόμενου αλγορίθμου, πραγματοποιήθηκαν επίσης λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής και χρησιμοποιώντας τα δίκτυα 14, 30 και 57 ζυγών του ΙΕΕΕ. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων επιτεύχθηκε κάνοντας την σύγκριση τους με αυτά των μεθόδων [78], [117]. Ο Πίνακας 4.9 παρουσιάζει τις θέσεις των μετρήσεων ροής για κάθε εξεταζόμενο δίκτυο.

Δίκτυο	Μετρήσεις ροής ισχύος
IEEE 14	1-2, 2-3, 6-11, 7-8, 10-11
IEEE 30	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
IEEE 57	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

Πίνακας 4.9 Θέσεις μετρήσεων ροής για τα υπό εξέταση δίκτυα

Οι τιμές του ορίου σύγκλισης, των μεταβλητών απόφασης (αρχικές τιμές), αλλά και των βαρών για όλες τις μονάδες PMU είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στο Εδάφιο 4.4.3.1.

Το σύνολο των περιορισμών για το συγκεκριμένο σύστημα μετρήσεων είναι το ακόλουθο:

$$f_{1_new} = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5) = 0$$

$$f_{6_new} = (1 - x_5)(1 - x_6)(1 - x_9)(1 - x_{10})(1 - x_{11})(1 - x_{12})(1 - x_{13}) = 0$$

$$f_{7_new} = (1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_8)(1 - x_9) = 0$$

$$f_4 = (1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)(1 - x_7)(1 - x_9) = 0$$

$$f_5 = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_4)(1 - x_5)(1 - x_6) = 0$$

$$f_9 = (1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_9)(1 - x_{10})(1 - x_{14}) = 0$$

$$f_{12} = (1 - x_6)(1 - x_{12})(1 - x_{13})(1 - x_{14}) = 0$$

$$f_{14} = (1 - x_9)(1 - x_{13})(1 - x_{14}) = 0$$

Αναλυτικά αποτελέσματα για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του Πίνακα 4.10. Η λύση που προκύπτει μέσω των μεθόδων [78], [117] φαίνεται στην τρίτη στήλη, αντίστοιχα. Μετά από 9 επαναλήψεις, ο αλγόριθμος δίνει ως λύση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU, ελάχιστο αριθμό 2 PMUs οι οποίες εγκαθίστανται στους ζυγούς 4 και 13 καθιστώντας το δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο.

Μεταβλητές απόφασης	WLS	IP [78],[117]
<i>x</i> ₁	0,000000023282	0
x ₂	0,000000034923	0
x ₃	0,000000023282	0
<i>x</i> ₄	0,99999999998000	1
x ₅	0,000000074128	0
x ₆	0,000000315959	0
<i>x</i> ₇	0,000000034922	0
<i>x</i> ₈	0,000000011640	0
<i>x</i> ₉	0,000000183543	0
x ₁₀	0,000000097410	0
x ₁₁	0,000000109051	0
x ₁₂	0,000000327600	0
x ₁₃	0,9999999974975	1
x ₁₄	0,000000207072	0
Ελάχιστος αριθμός PMUs	2	2
Βέλτιστες θέσεις ΡΜU	{4,13}	{4,13}

Πίνακας 4.10 Εκτιμώμενες μεταβλητές τοποθέτησης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών με θεώρηση μετρήσεων ροής



Σχήμα 4.7 Βέλτιστες θέσεις PMU και αντίστοιχες παρατηρήσιμες περιοχές για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών λαμβάνοντας υπόψη μετρήσεις ροής

Το Σχήμα 4.7 δείχνει ότι οι επιλεγμένες θέσεις εξασφαλίζουν την τοπολογική παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης των τριών δικτύων με θεώρηση μετρήσεων ροής ισχύος, όπως και ο αντίστοιχος χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου, συνοψίζονται στον Πίνακα 4.11.

Δίκτυο	Βέλτιστες θέσεις	Ελάχιστος	Χρόνος		
	WLS	IP [78],[117]	αριθμός PMU	εκτελεσης (s)	
IEEE 14	{4, 13}	{4, 13}	2	0,795642	
IEEE 30	{6, 10, 11, 25}	{6, 10, 11, 25}	4	0,925934	
IEEE 57	{7, 15, 22, 32, 55, 57}	{6, 15, 22, 32, 54, 57}	6	1,025625	

Πίνακας 4.11 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του ΙΕΕΕ λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής

4.4.3.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης τοποθέτησης μονάδων PMU με θεώρηση συμβατικών μετρήσεων

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει περιπτώσεις που αφορούν τα δίκτυα 14, 30 και 57 ζυγών του ΙΕΕΕ και τα οποία φέρουν συστήματα μετρήσεων αποτελούμενα από ροές και εγχύσεις. Ο Πίνακας 4.12 παρουσιάζει τις μετρητικές διατάξεις των εξεταζόμενων δικτύων.

Η κατάστρωση των περιορισμών παρατηρησιμότητας ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα. Αρχικά καταστρώνεται το σύνολο των περιορισμών λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις μετρήσεις ροής και στην

συνέχεια από αυτό δημιουργείται ένα καινούργιο το οποίο περιλαμβάνει τις μετρήσεις έγχυσης. Με βάση μόνο τις μετρήσεις ροής δημιουργούνται οι ροονησίδες που απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8.

Δίκτυο	Μετρήσεις ροής ισχύος	Μετρήσεις έγχυσης ισχύος
IEEE 14	1-2, 2-3, 6-11, 7-8, 10-11	8, 11, 13
IEEE 30	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	1, 2, 11, 19, 25
IEEE 57	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	1, 15, 24, 32, 38, 46, 51, 57

Πίνακας 4.12 Θέσεις μετρήσεων ροής και έγχυσης για τα υπό εξέταση δίκτυα



Σχήμα 4.8 Ροονησίδες δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Όσες εγχύσεις είναι εσωτερικές στις ροονησίδες, δεν συμμετέχουν στην κατάστρωση των εξισώσεων. Έτσι το σύνολο των νέων περιορισμών παρατηρησιμότητας θα είναι:

$$f_{new}^{*}(x) = \begin{cases} f_{13_new}^{*} = f_{13} \cdot \left(f_{6_new} + f_{12} + f_{14}\right) = 0\\ f_{1_new} = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5) = 0\\ f_4 = (1 - x_2)(1 - x_3)(1 - x_4)(1 - x_5)(1 - x_7)(1 - x_9) = 0\\ f_5 = (1 - x_1)(1 - x_2)(1 - x_4)(1 - x_5)(1 - x_6) = 0\\ f_{7_new} = (1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_8)(1 - x_9) = 0\\ f_9 = (1 - x_4)(1 - x_7)(1 - x_9)(1 - x_{10})(1 - x_{14}) = 0 \end{cases}$$

όπου $f_{6_new} = f_6 f_{11} f_{10} = (1 - x_5)(1 - x_6)(1 - x_9)(1 - x_{10})(1 - x_{11})(1 - x_{12})(1 - x_{13}) = 0$, $f_{12} = (1 - x_{12})(1 - x_6)(1 - x_{13}) = 0$ και $f_{14} = (1 - x_{14})(1 - x_9)(1 - x_{13}) = 0$.

Οι τιμές του ορίου σύγκλισης, των αρχικών τιμών των μεταβλητών απόφασης, αλλά και των βαρών για όλες τις μονάδες PMU είναι ίδιες με αυτές που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 4.4.3.1. Τα αποτελέσματα για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.13.

Μετά 11 επαναλήψεις, η λύση του προβλήματος δίνει ως ελάχιστο αριθμό PMUs 2, τα οποία εγκαθίστανται στους ζυγούς 4 και 9. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται οι θέσεις και οι αντίστοιχες περιοχές που καλύπτουν οι μονάδες PMU.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης των τριών δικτύων λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής και έγχυσης, όπως και ο αντίστοιχος χρόνος εκτέλεσης του προτεινόμενου αλγορίθμου, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.14.

Μεταβλητές απόφασης	WLS
x_1	0,0000000010027
<i>x</i> ₂	0,0000000150678
<i>x</i> ₃	0,00000000820366
x_4	0,99999999799980
x ₅	0,00001549707012
<i>x</i> ₆	0,00001155323153
<i>x</i> ₇	0,0000000120029
<i>x</i> ₈	0,0000000040012
<i>x</i> ₉	0,99999576092759
<i>x</i> ₁₀	0,00001748696086
x ₁₁	0,00002544586976
x ₁₂	0,00001354273849
<i>x</i> ₁₃	0,00002135384992
x ₁₄	0,00000556728098
Ελάχιστος αριθμός PMUs	2
Βέλτιστες θέσεις PMUs	{4,9}

Πίνακας 4.1.	3 Εκτιμώμενες	μεταβλητές	τοποθέτησης γ	για το δίκτυο) IEEE-14 λ	αμβάνοντας	υπόψη
	μετρήσεις ρο	ής και έγχυσ	ης				

Πίνακας 4.14 Συνολικά αποτελέσματα προσομοίωσης για τα εξεταζόμενα δίκτυα του ΙΕΕΕ λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη συμβατικών μετρήσεων

Δίκτυο	Βέλτιστες θέσεις μονάδων PMU WLS	Ελάχιστος αριθμός ΡΜU	Χρόνος εκτέλεσης (s)
IEEE 14	{4, 9}	2	0,835494
IEEE 30	{6, 10, 24}	3	1,047683
IEEE 57	{7, 22, 55}	3	1,086521


Σχήμα 4.9 Βέλτιστες θέσεις PMU και αντίστοιχες παρατηρήσιμες περιοχές για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών λαμβάνοντας υπόψη συμβατικές μετρήσεις

4.4.3.4 Δείκτης τοποθέτησης μονάδων ΡΜU

Θεωρώντας ότι ο αριθμός των εγκατεστημένων PMUs είναι ίσος με n_P και των ζυγών του δικτύου n, αντίστοιχα, τότε ορίζεται ο δείκτης τοποθέτησης μονάδων PMUs (*PPI*) ως:

$$PPI = \frac{n_P}{n} 100\% \tag{4.29}$$

Ο παραπάνω δείκτης χρησιμοποιείται για να εκφράσει το ποσοστό των PMUs που χρειάζονται για να καταστήσουν ένα δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο. Οι τιμές του δείκτη *PPI* για κάθε δίκτυο αγνοώντας ή λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη μετρήσεων ροής και έγχυσης, όπως επίσης και η μέση τιμή του *PPI* η οποία ορίζεται ως:

$$\overline{PPI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (PPI)_i$$
(4.30)

όπου Ν είναι ο αριθμός των δικτύων που εξετάστηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.15.

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, πρέπει να εγκατασταθούν PMUs στο 30,57% των ζυγών ενός δικτύου, στο οποίο δεν υπάρχει κάποια διάταξη μετρήσεων, για να καταστεί αυτό παρατηρήσιμο. Το ποσοστό μειώνεται στο 12,72% όταν στο δίκτυο προϋπάρχουν μετρήσεις ροής και στο 9,85% όταν το δίκτυο περιλαμβάνει συμβατικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα της δεύτερης στήλης του πίνακα επιβεβαιώνουν την παρατήρηση ότι ένα δίκτυο μπορεί να καταστεί παρατηρήσιμο με στρατηγική τοποθέτηση PMUs στο ένα τρίτο των ζυγών του [101]. Ο αριθμός αυτός, προφανώς, μειώνεται εάν στο σύστημα προϋπάρχουν συμβατικές μετρήσεις έγχυσης και ροής.

Δίκτυο	PPI(%)					
	Χωρίς θεώρηση συμβατικών μετρήσεων	Με θεώρηση μετρήσεων ροής	Με θεώρηση συμβατικών μετρήσεων			
IEEE-14	28,57	14,29	14,28			
IEEE- 30	33,33	13,33	10,00			
IEEE- 57	29,82	10,53	5,26			
PPI	30,57	12,72	9,85			

Πίνακας 4.15 Τιμές των δεικτών ΡΡΙ και ΡΡΙ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Εκτίμηση Κατάστασης με Χρήση Συγχρονισμένων Μετρήσεων Φασιθετών

Οι πρώτοι που εισήγαγαν την εκτίμηση κατάστασης ήταν οι μαθηματικοί Gauss και Legendre γύρω στο 1800. Η βασική ιδέα ήταν η βέλτιστη ρύθμιση των μεταβλητών κατάστασης μέσω της ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων (υπόλοιπο είναι η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της τιμής που δημιουργείται από το μοντέλο). Αυτή είναι η γνωστή μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (LS), που έγινε ο ακρογωνιαίος λίθος της κλασικής στατιστικής και χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα. Ο Gauss εισήγαγε αργότερα την κανονική (ή Gaussian) κατανομή ως την κατανομή σφαλμάτων για την οποία η μέθοδος LS είναι βέλτιστη.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται μοντέλα εκτιμητών κατάστασης στα οποία το σύστημα μετρήσεων, αποτελείται από μετρήσεις προερχόμενες τόσο από το SCADA όσο και από τα PMUs ή περιλαμβάνει μόνον συγχρονισμένες μετρήσεις από PMUs. Παράλληλα, γίνεται ανίχνευση και εντοπισμός των εσφαλμένων μετρήσεων. Οι προτεινόμενες μέθοδοι περιγράφονται λεπτομερώς και παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα, με σκοπό την αξιολόγησή τους μέσω του υπολογιστικού περιβάλλοντος της MATLAB.

5.1 Καταστάσεις λειτουργίας

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος για ένα δεδομένο χρονικό σημείο μπορούν να υπολογιστούν, εάν το μοντέλο του δικτύου και οι φασιθέτες τάσεις σε κάθε ζυγό του συστήματος είναι γνωστά. Αφού το σύνολο των τάσεων των ζυγών καθορίζει τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, χαρακτηρίζεται ως στατική κατάσταση του συστήματος. Σύμφωνα με την αναφορά [118], καθώς οι συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν, το σύστημα μπορεί να περιέλθει σε μία από τις τρεις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας: κανονική, έκτακτη και επαναφοράς.

Ένα σύστημα βρίσκεται στην κανονική κατάσταση αν όλα του τα φορτία τροφοδοτούνται με την απαραίτητη ισχύ χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας. Τέτοιοι περιορισμοί είναι συνήθως τα όρια ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τα όρια των τάσεων των ζυγών. Η κανονική κατάσταση μπορεί να είναι ασφαλής ή επισφαλής. Στην πρώτη περίπτωση το σύστημα μπορεί να παραμένει στην κανονική κατάσταση μετά από μία διαταραχή, ενώ στη δεύτερη το σύστημα με την εμφάνιση ορισμένων διαταραχών μεταπίπτει σε κατάσταση έκτακης ανάγκης. Το σύστημα με την εμφάνιση ορισμένων διαταραχών μεταπίπτει σε κατάσταση έκτακης ανάγκης. Το σύστημα περιέρχεται σε έκτακτη κατάσταση αν, λόγω απρόσμενων συμβάντων, παραβιαστούν κάποιοι περιορισμοί λειτουργίας. Όλα τα φορτία εξακολουθούν να τροφοδοτούνται. Αν σε αυτό το σημείο εφαρμοστούν άμεσα διορθωτικές κινήσεις από τους χειριστές, το σύστημα μπορεί να επαναφοράς προκειμένου να αποφευχθεί η ολική του κατάρρευση. Οι διορθωτικές ενέργειες στην κατάσταση αυτή περιλαμβάνουν την αποκοπή φορτίου και την αποσύνδεση γραμμών και εξοπλισμού με στόχο την επίτευξη της ευστάθειας, την ικανοποίηση των περιορισμών λειτουργίας διαφορετικών καταστάσεων του Σχήματος 5.1, παρουσιάζει τις μεταβάσεις μεταξύ των τριών διαφορετικών καταστάσεων του συστήματος.

5.2 Θεμελίωση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης σ' ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τον πυρήνα των εφαρμογών παρακολούθησης ανάλυσης και ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Στα σύγχρονα συστήματα, το κέντρο ελέγχου λαμβάνει πληροφορίες και δεδομένα μετρήσεων από το SCADA. Όμως, πολλές

φορές αυτά δεν είναι ακριβή και αξιόπιστα λόγω σφαλμάτων στις μετρήσεις, σφαλμάτων τηλεμετρίας, τηλεπικοινωνιακού θορύβου κλπ. Από την άλλη, οι συλλεγόμενες μετρήσεις μπορεί να μην επιτρέπουν την απευθείας εξαγωγή της αντίστοιχης κατάστασης λειτουργίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι ανησυχίες έφεραν την εξέλιξη στην εκτίμηση κατάστασης [119], [120].



Σχήμα 5.1 Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η εκτίμηση κατάστασης λειτουργεί ως ένα φίλτρο ανάμεσα στη σειρά των μετρήσεων που λαμβάνονται από το σύστημα και όλων των εφαρμογών που απαιτούν μία πιο αξιόπιστη βάση δεδομένων για την εξαγωγή της τρέχουσας κατάστασης λειτουργίας του συστήματος. Χρησιμοποιείται το μονοφασικό κύκλωμα θετικής ακολουθίας για την μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος. Υποτίθεται ότι το σύστημα λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση υπό ισορροπημένες συνθήκες, το οποίο σημαίνει ότι όλα τα φορτία των ζυγών και οι ροές ισχύος των γραμμών θα είναι τριφασικές και ισορροπημένες, όλες οι γραμμές μεταφοράς θα είναι πλήρως αντιμετατεθειμένες και όλες οι υπόλοιπες συσκευές θα είναι επίσης τριφασικές και συμμετρικές.

Η εκτίμηση κατάστασης συλλέγει δεδομένα μετρήσεων από μετρητικές συσκευές που είναι διάσπαρτες σε όλο το δίκτυο. Οι συνηθέστεροι τύποι μετρήσεων που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθοι:

- Μετρήσεις ροής ισχύος, οι οποίες παρέχουν τη ροή ενεργού και αέργου ισχύος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς ή των μετασχηματιστών.
- Μετρήσεις έγχυσης ισχύος, οι οποίες παρέχουν την πραγματική και άεργο εγχεόμενη ισχύ στους ζυγούς.
- Μετρήσεις μέτρου τάσης, οι οποίες παρέχουν τα μέτρα τάσεων των ζυγών.

Επιπλέον, στην εκτίμηση κατάστασης σε συστήματα διανομής, λαμβάνονται υπόψη οι μετρήσεις των μέτρων των ρευμάτων, οι οποίες παρέχουν τα μέτρα των ροών ρεύματος κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς ή των μετασχηματιστών.

Με την διαρκώς αυξανόμενη χρήση των PMUs, η ακρίβεια και η αξιοπιστία των εκτιμώμενων καταστάσεων όπως επίσης και ο εντοπισμός των εσφαλμένων μετρήσεων έχουν βελτιωθεί αισθητά [1], [121], [122].

Όταν χρησιμοποιούνται καρτεσιανές συντεταγμένες για τις συγχρονισμένες μετρήσεις και τις μεταβλητές κατάστασης, σ' ένα σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο αποκλειστικά από μονάδες PMU, η σχέση τους γίνεται γραμμική και οι καταστάσεις μπορούν να υπολογιστούν μέσω ενός γραμμικού μηεπαναληπτικού αλγορίθμου [123]. Εντούτοις, επειδή η πλειονότητα των μετρήσεων στους υπάρχοντες εκτιμητές είναι οι συμβατικές, είναι αρκετά δύσκολο να αντικατασταθούν πλήρως από PMUs στο εγγύς μέλλον. Κατά συνέπεια, είναι αναγκαία η ανάπτυξη εκτιμητών που περιλαμβάνουν τόσο συγχρονισμένες όσο και συμβατικές μετρήσεις.

Στην αναφορά [124], το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης διατυπώνεται χωρίς την χρήση πραγματικού ή εικονικού ζυγού ταλάντωσης. Το κυριότερο πλεονέκτημα αυτής της διατύπωσης είναι ότι μπορεί να ανιχνεύσει και να εντοπίσει επιτυχώς τις εσφαλμένες συγχρονισμένες μετρήσεις. Ένας εκτιμητής κατάστασης διευρυμένης περιοχής προτείνεται στην αναφορά [125], όπου ένας κεντρικός συντονιστής λαμβάνει τα αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης των επιμέρους περιοχών, τις συνοριακές μετρήσεις αυτών και ορισμένες διάσπαρτες συγχρονισμένες μετρήσεις, και υπολογίζει τη λύση του συνολικού συστήματος.

Στην αναφορά [126] προτείνεται ένας εκτιμητής δύο βημάτων, ο οποίος συνδυάζει τις συμβατικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα της κλασσικής εκτίμησης κατάστασης σε έναν γραμμικό εκτιμητή και παρέχει τα ίδια αποτελέσματα με τον μη-γραμμικό εκτιμητή. Στην αναφορά [127] παρουσιάζεται μία διατύπωση με χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων, με την οποία αποφεύγονται τα αριθμητικά προβλήματα που προκύπτουν κατά την αρχικοποίηση του αλγορίθμου όταν χρησιμοποιούνται φασιθέτες ρεύματος. Επιπλέον, δεν απαιτείται η χρήση ζυγού αναφοράς, το οποίο διευκολύνει την επεξεργασία σφαλμάτων στις συμβατικές και τις μετρήσεις φασιθετών.

Ένας κατανεμημένος εκτιμητής κατάστασης, που χρησιμοποιεί συγχρονισμένες μετρήσεις, παρουσιάζεται στην αναφορά [116]. Η συνολική λύση προκύπτει από τις επιμέρους χρησιμοποιώντας ανάλυση ευαισθησίας σε επιλεγμένους οριακούς ζυγούς και έναν αλγόριθμο που εντοπίζει PMUs και καθορίζει το ζυγό αναφοράς για κάθε υποσύστημα ώστε να συντονίσει τη λύση του κατανεμημένου εκτιμητή. Ένας υβριδικός εκτιμητής, που χρησιμοποιεί συμβατικές μετρήσεις και μετρήσεις από PMUs εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες, παρουσιάζεται στην αναφορά [128]. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται στο μετασχηματισμό των μετρήσεων από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες, ενισχύοντας τα σφάλματα των μετρήσεων PMU. Στην αναφορά [129], αναλύονται η επίδραση των μη συγχρονισμένων μετρήσεων στην ακρίβεια του εκτιμητή όπως και του συνδυασμού μετρήσεων PMU και SCADA.

Ένας επαναληπτικός ελαχίστων τετραγώνων εκτιμητής διατυπώνεται στην αναφορά [130], χρησιμοποιώντας τα μέτρα των τάσεων ζυγών και των ρευμάτων γραμμών ως μεταβλητές κατάστασης. Μια σημαντική πτυχή αυτής της διατύπωσης είναι η ικανότητά της να διορθώνει για σταθερή ή τυχαία μετατόπιση φάσης που μπορεί να παρατηρηθεί σε ορισμένα PMU. Μια ολοκληρωμένη στρατηγική που συνδυάζει συμβατικές μετρήσεις με μετρήσεις PMU σ' έναν σταθμισμένο ελαχίστων τετραγώνων εκτιμητή κατάστασης παρουσιάζεται στην αναφορά [131]. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την βέλτιστη θέση και των αριθμό των PMUs ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απόδοση του εκτιμητή.

Στην αναφορά [132] παρουσιάζεται μία μέθοδος που προσδιορίζει τα βάρη των συγχρονισμένων μετρήσεων χρησιμοποιώντας την θεωρεία πολλαπλασιασμού της αβεβαιότητας και οι οποίες χρησιμοποιούνται σ' έναν ελαχίστων τετραγώνων εκτιμητή κατάστασης. Δύο εναλλακτικοί αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης χρησιμοποιούνται στην αναφορά [133]. Στον πρώτο, οι φασιθέτες των ρευμάτων γραμμών και οι φασιθέτες τάσης των ζυγών μετατρέπονται σε ισοδύναμες ροές

γραμμών και ενσωματώνονται σε έναν μη γραμμικό ελαχίστων τετραγώνων αλγόριθμο. Στο δεύτερο, χρησιμοποιείται ένας εκτιμητής δύο φάσεων, όπου τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης, με χρήση ενός κλασσικού εκτιμητή και οι μετρήσεις φασιθετών χρησιμοποιούνται στη δεύτερη φάση μέσω εννός γραμμικού εκτιμητή. Η προσθήκη μετρήσεων φασιθετών σε ένα στατικό εκτιμητή έχει μελετηθεί σε αρκετές αναφορές [134]–[137].

Με την εισαγωγή των μονάδων PMU στην εκτίμηση κατάστασης, προστέθηκαν δύο ακόμη τύποι μετρήσεων:

- Μετρήσεις φασιθετών τάσης. Αυτές είναι οι φασικές γωνίες και τα μέτρα των φασιθετών τάσεως των ζυγών του συστήματος.
- Μετρήσεις φασιθετών ρεύματος. Αυτές είναι οι φασικές γωνίες και τα μέτρα των φασιθετών ρεύματος των γραμμών μεταφοράς ή των μετασχηματιστών.

Η χρησιμοποίηση των δύο αυτών τύπων μετρήσεων θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια. Συνοπτικά, η εκτίμηση κατάστασης μπορεί να περιγραφεί μέσω του Σχήματος 5.2.



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα λειτουργίας εκτίμησης κατάστασης

Το μοντέλο μετρήσεων γράφεται ως εξής:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e$$
(5.1)

όπου:

- *m*, ο αριθμός των μετρήσεων
- z, το διάνυσμα των μετρήσεων
- z_i, η μετρούμενη τιμή της μέτρησης *i*

 $h^{T} = [h_{1}(x), h_{2}(x), ..., h_{m}(x)],$ το διάνυσμα των συναρτήσεων μέτρησης

 $h_i(x)$, η μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει την μέτρηση i με το διάνυσμα κατάστασης

 x_i , η κατάσταση του ζυγού i

 $x^{T} = [x_{1}, x_{2}, ..., x_{n}]$, το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος

 $e^{T} = [e_1, e_2, ..., e_m]$, το διάνυσμα που παριστάνει τα σφάλματα των μετρήσεων και

 $e_{i},$ το σφάλμα της μέτρησης i .

Σχετικά με τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων γίνονται οι εξής υποθέσεις:

- το σφάλμα μέτρησης e_i ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή E(e_i) = 0 και γνωστή τυπική απόκλιση,
- τα σφάλματα μέτρησης υποτίθεται ότι είναι ανεξάρτητα και ασυσχέτιστα μεταξύ τους, $E[e_ie_i] = 0$.

Συνεπώς, η μήτρα διασποράς των σφαλμάτων μέτρησης, R, είναι διαγώνια και ορίζεται ως:

$$R = Cov(e) = E\left[ee^{T}\right] = diag\left\{\sigma_{1}^{2}, \sigma_{2}^{2}, ..., \sigma_{m}^{2}\right\}$$
(5.2)

Η τυπική απόκλιση σ, κάθε μέτρησης i αντανακλά την ανακρίβεια του αντίστοιχου οργάνου.

5.3 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων

Η μέθοδος σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (WLS) είναι η πλέον χρησιμοποιημένη στην επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης, το οποίο διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης της μορφής:

Minimize
$$\sum_{i=1}^{m} W_{ii} r_i^2$$

s.t. $z_i = h_i(x) + r_i$ $i = 1,...,m$ (5.3)

όπου:

m, ο αριθμός των μετρήσεων

n, ο αριθμός των καταστάσεων του συστήματος

 z_i , η μετρούμενη τιμή της μέτρησης $\ i$

 $\boldsymbol{z}^{^{T}}=\left[\boldsymbol{z}_{1},\boldsymbol{z}_{2},...,\boldsymbol{z}_{m}\right]$, το διάνυσμα μέτρησης

 $h^{T} = [h_{1}(x), h_{2}(x), ..., h_{m}(x)],$ το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων και

 $x^{T} = [x_{1}, x_{2}, ..., x_{n}]$, το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος

Με W συμβολίζεται η μήτρα βαρών, η οποία ορίζεται ως η αντίστροφη της μήτρας διασποράς των σφαλμάτων μέτρησης R:

$$W = R^{-1} = diag\left\{\frac{1}{\sigma_1^2}, \frac{1}{\sigma_2^2}, \dots, \frac{1}{\sigma_m^2}\right\}$$
(5.4)

Επομένως σ' έναν σταθμισμένο εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων, ελαχιστοποιείται η ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση J(x)

$$\min_{x} J(x) = \left[z - h(x)\right]^{T} R^{-1} \left[z - h(x)\right]$$
(5.5)

Η συνάρτηση J(x) ελαχιστοποιείται στην τιμή που μηδενίζει τη μερική παράγωγο της J(x) ως προς x:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0$$
(5.6)

όπου H(x) είναι η Ιακωβιανή μήτρα η οποία ορίζεται ως εξής:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$$
(5.7)

Η μη γραμμική εξίσωση (5.6) μπορεί περαιτέρω να επιλυθεί με το επαναληπτικό σχήμα Gauss-Newton, ως ακολούθως:

$$x^{k+1} = x^k - \left[G\left(x^k\right)\right]^{-1} \cdot g\left(x^k\right)$$
(5.8)

όπου, k ο δείκτης επανάληψης και x^k το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k. Επίσης:

$$g\left(x^{k}\right) = -H^{T}\left(x^{k}\right)R^{-1}\left(z-h\left(x^{k}\right)\right)$$
(5.9)

$$G\left(x^{k}\right) = \frac{\partial g\left(x^{k}\right)}{\partial x} = H^{T}\left(x^{k}\right)R^{-1}H\left(x^{k}\right)$$
(5.10)

Η μήτρα G(x) ονομάζεται μήτρα κέρδους και είναι αραιή, θετικά ορισμένη και συμμετρική, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Στην επανάληψη k, υπολογίζονται οι τριγωνικοί παράγοντες και επιλύεται η ακόλουθη γραμμική εξίσωση με ευθεία/αντίστροφη αντικατάσταση:

$$G\left(x^{k}\right)\Delta x^{k+1} = H^{T}\left(x^{k}\right)R^{-1}\left(z-h\left(x^{k}\right)\right)$$
(5.11)

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

5.4 Επεξεργασία εσφαλμένων δεδομένων

Μία από τις βασικές λειτουργίες της εκτίμησης κατάστασης είναι η επεξεργασία των εσφαλμένων δεδομένων. Η εκτίμηση κατάστασης ανιχνεύει, εντοπίζει και διορθώνει ή εξουδετερώνει τα μεγάλα σφάλματα στις μετρήσεις, με σκοπό την εύρερση αξιόπιστων αποτελεσμάτων [138]-[140].

Η διαχείριση των εσφαλμένων δεδομένων εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο εκτίμησης. Για την ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο WLS, η ανίχνευση και ο εντοπισμός των εσφαλμένων δεδομένων γίνεται μετά την επίλυση της εκτίμησης, αναλύοντας τα υπόλοιπα των μετρήσεων.

Για την ανίχνευση των εσφαλμένων μετρήσεων, συνήθως χρησιμοποιείται η χ^2 κατανομή. Όταν αυτές ανιχνευθούν, χρησιμοποιείται ο έλεγχος μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου (r_{max}^N) ώστε να εντοπιστούν.

5.4.1 Κατανομή- X²

Αποδεικνύεται ότι το άθροισμα των τετραγώνων ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών εμφανίζει μία X^2 κατανομή, όταν κάθε μεταβλητή ακολουθεί την κανονική κατανομή. Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση J(x) ακολουθεί μια X^2 κατανομή με (m-n) βαθμούς ελευθερίας, όπου m ο αριθμός των μετρήσεων και n ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης, αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας τις στατιστικές ιδιότητες της αντικειμενικής συνάρτησης, ορίζονται τα ακόλουθα βήματα για την ανίχνευση των εσφαλμένων μετρήσεων:

 Επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης και υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης όπως ορίζεται από την εξίσωση (5.3):

$$J(\hat{x}) = \sum_{i=1}^{m} \frac{(z_i - h_i(\hat{x}))^2}{\sigma_i^2}$$

όπου \hat{x} είναι το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης, διάστασης n.

- Exétash the timus empisitosúng aníceushe $X^2_{(m-n),p}$ yia χ^2 katanomh kai pidanóthta ordúg apórashe $p = \Pr(J(\hat{x}) \le x^2_{(m-n),p})$ me (m-n) badmoús elevderías
- Eán $J(\hat{x}) \ge X^2_{(m-n),p}$ anicneútai η ύπαρξη εσφαλμένων μετρήσεων, σε διαφορετική περίπτωση όχι.

5.4.2 Έλεγχος μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου

Έστω οι γραμμικές εξισώσεις μέτρησης, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε κάθε επανάληψη της αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης:

$$\Delta z = H \Delta x + e \tag{5.12}$$

Εφαρμόζοντας το κριτήριο βελτιστοποίησης, λαμβάνουμε την εκτιμούμενη μεταβολή του διανύσματος x:

$$\Delta \hat{x} = \left(H^T R^{-1} H\right)^{-1} H^T R^{-1} \Delta z = G^{-1} H^T R^{-1} \Delta z$$
(5.13)

Η εκτιμούμενη μεταβολή του διανύσματος z θα είναι:

$$\Delta \hat{z} = H \Delta \hat{x} = H G^{-1} H^T R^{-1} \Delta z = K \Delta z$$
(5.14)

όπου $K = HG^{-1}H^TR^{-1}$. Έτσι, τα υπόλοιπα των μετρήσεων γράφονται ως εξής:

$$r = \Delta z - \Delta \hat{z} = (I - K) \Delta z$$

= $(I - K)(H \Delta x + e) \Delta z = (I - K)e$ (5.15)
= Se

όπου S = (I - K) είναι η μήτρα ευαισθησίας υπολοίπων, η οποία έχει την ιδιότητα $SRS^T = SR$ και εκφράζει την ευαισθησία των υπολοίπων των μετρήσεων ως προς τα σφάλματα των μετρήσεων.

Οι στατιστικές ιδιότητες των υπολοίπων των μετρήσεων είναι:

$$E(r) = E(Se) = SE(e) = 0$$

$$Cov(r) = \Sigma_r = E\left[rr^T\right] = SE\left[ee^T\right]S^T = SRS^T = SR$$
(5.16)

όπου Σ_r είναι η μήτρα συσχετισμού των υπολοίπων των μετρήσεων.

Το κανονικοποιημένο υπόλοιπο για μέτρηση i δίνεται ως:

$$r_{i}^{N} = \frac{|r_{i}|}{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}} = \frac{|r_{i}|}{\sqrt{R_{ii}S_{ii}}}$$
(5.17)

όπου το διάνυσμα των κανονικοποιημένων υπολοίπων r^N ακολουθεί κανονική κατανομή, N(0,1).

Αποδεικνύετται ότι, εάν υπάρχει περίσσεια μετρήσεων, το μέγιστο κανονικοποιημένο υπόλοιπο θα αντιστοιχεί στην εσφαλμένη μέτρηση. Ο έλεγχος μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου (r_{max}^N) χρησιμοποιεί αυτή την ιδιότητα για να εντοπίζει και διαγράφει τις εσφαλμένες μετρήσεις, ακολουθώντας την εξής διαδικασία:

- Επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης και υπολογισμός των υπολοίπων των μετρήσεων: $r_i = z_i h_i(\hat{x})$ i = 1, ..., m.
- Υπολογισμός των κανονικοποιημένων υπολοίπων των μετρήσεων:

$$r_i^N = \frac{\left|r_i\right|}{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}} = \frac{\left|r_i\right|}{\sqrt{R_{ii}S_{ii}}} \qquad i = 1, \dots, m$$

- Υπολογισμός της μέγιστης τιμής r_k^N των κανονικοποιημένου υπολοίπου, το οποίο αντιστοιχεί στη μέτρηση k.
- Εάν $r_k^N > c$, η μέτρηση k χαρακτηρίζεται ως εσφαλμένη. Διαφορετικά, δεν εντοπίζονται εσφαλμένες μετρήσεις. Η σταθερά c είναι η τιμή του κατωφλίου εντοπισμού εσφαλμένης μέτρησης (π.χ. 3,0).
- Διαγραφή της μέτρησης k και επανάληψη της εκτίμησης κατάστασης, έως ότου εντοπιστούν όλες οι εσφαλμένες μετρήσεις.

5.5 Εκτίμηση κατάστασης με ισοτικούς περιορισμούς

Η χρήση πολύ μεγάλων βαρών με σκοπό τη μοντελοποίηση μετρήσεων πολύ μεγάλης ακρίβειας, όπως είναι οι μηδενικές εγχύσεις, οδηγεί σε προβλήματα σύγκλισης του αλγορίθμου. Μία εναλλακτική λύση είναι η θεώρηση των μετρήσεων αυτών ως συνθηκών ισότητας στον εκτιμητή. Το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης σε μια τέτοια περίπτωση μπορεί να συνταχθεί ως ακολούθως:

$$\begin{array}{l} \text{Minimize } J\left(x\right) = \left(z - h(x)\right)^{T} W\left(z - h(x)\right) \\ \text{s.t.} \qquad c(x) = 0 \end{array} \tag{5.18}$$

όπου c(x) είναι το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων που εκφράζουν τις ακριβείς ψευδομετρήσεις, όπως οι μηδενικές εγχύσεις, οι οποίες εξαιρούνται από το h(x).

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με την Λαγκραντζιανή μέθοδο, όπου σχηματίζεται η ακόλουθη Λαγκραντζιανή:

$$L = J(x) - \lambda^{\mathrm{T}} c(x) \tag{5.19}$$

Οι συνθήκες βελτίστου πρώτης τάξεως προκύπτουν ως εξής:

$$\frac{\partial L(x)}{\partial x} = 0 \Longrightarrow H^T W [z - h(x)] + C^T \lambda = 0$$

$$\frac{\partial L(x)}{\partial \lambda} = 0 \Longrightarrow c(x) = 0$$
(5.20)

όπου $C = \partial c(x) / \partial x$, είναι η Ιακωβιανή μήτρα του c(x).

Εφαρμόζοντας μέθοδο Gauss-Newton, το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων (5.20) επιλύεται επαναληπτικά ως ακολούθως:

$$\begin{pmatrix} G(x^k) & C^T(x^k) \\ C(x^k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{k+1} - x^k \\ \lambda^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^T(x^k)W(z - h(x^k)) \\ -c(x^k) \end{pmatrix}$$
(5.21)

όπου k ο δείκτης της επανάληψης, x^k και λ^k το διάνυσμα κατάστασης και οι πολλαπλασιαστές Lagrange κατά την επανάληψη k, $H(x) = \frac{\partial h}{\partial x}$ και $C(x) = \frac{\partial c}{\partial x}$ οι Ιακωβιανές μήτρες, και $G(x^k) = H^T(x^k)WH(x^k)$ η μήτρα κέρδους. Η μήτρα W δεν έχει πλέον μεγάλες τιμές, εξουδετερώνοντας έτσι το κύριο πρόβλημα μη σύγκλισης του αλγορίθμου. Εάν $null F = null \begin{pmatrix} G & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix} = 0$ τότε εξασφαλίζεται ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο [50].

Πρακτικά δεν απαιτείται αντιστροφή της μήτρας F και αντί αυτού παραγοντοποιείται στους τριγωνικούς της παράγοντες, η δε εξίσωση (5.16) επιλύεται χρησιμοποιώντας ευθεία/αντίστροφη αντικατάσταση σε κάθε επανάληψη k. Αν και η μήτρα G είναι συμμετρική και θετικά ορισμένη ή ημιορισμένη, η F είναι συμμετρική αλλά αόριστη. Η αριθμητική ευστάθεια δεν είναι εγγυημένη όταν τα μη μηδενικά στοιχεία της διαγωνίου λαμβάνονται με τυχαία σειρά και τόσο η συμβολική όσο και η αριθμητική παραγοντοποίηση είναι αδύνατες. Αντιθέτως, οι αριθμητικές τιμές των στοιχείων και η παραγοντοποίηση χρησιμοποιεί μία μείξη 1×1 και 2×2 μη μηδενικών διαγώνιων στοιχείων (pivots) [141], [142].

5.6 Διατύπωση εξισώσεων συμβατικών μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το διάνυσμα μετρήσεων του κλασσικού εκτιμητή περιλαμβάνει μετρήσεις τάσης ζυγών, ενεργών και αέργων ροών και εγχύσεων γραμμών. Ανάλογα με την μορφή των μεταβλητών στο διάνυσμα κατάστασης, οι συμβατικές μετρήσεις μπορούν να εκφρασθούν σε πολική ή σε καρτεσιανή μορφή.

Ας θεωρήσουμε το γενικευμένο ζυγό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η γραμμή μεταξύ των ζυγών i και j παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο " π ". Στο ζυγό i είναι επίσης συνδεδεμένη μία εγκάρσια μιγαδική αγωγιμότητα y_i , που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων. Η γεννήτρια που συνδέεται στον ζυγό i εγχέει ρεύμα \tilde{I}_{Gi} , ενώ το αντίστοιχο φορτίο \tilde{S}_{Di} απορροφά ρεύμα \tilde{I}_{Di} . Οι τάσεις των ζυγών i και j, συμβολίζονται με V_i και V_j αντίστοιχα. Η μιγαδική αγωγιμότητα σειράς της γραμμής i-j συμβολίζεται με y_{ij} και οι αντίστοιχες εγκάρσιες με y_{sij} και y_{sji} .

Επίσης, ισχύουν:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$$
 (5.22)

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \tag{5.23}$$

$$y_{sii} = g_{sii} + jb_{sii} \tag{5.24}$$

$$y_i = g_i + jb_i \tag{5.25}$$

Με g_{ij} , g_{sij} , g_{sji} συμβολίζονται οι ενεργές αγωγιμότητες και με b_{ij} , b_{sij} , b_{sji} οι άεργες αγωγιμότητες των εν σειρά και εγκάρσιων μιγαδικών αγωγιμοτήτων της γραμμής, ενώ με g_i και b_i η ενεργός αγωγιμότητα και η άεργος αγωγιμότητα του σταθερού εγκάρσιου φορτίου στον ζυγό i, αντίστοιχα.

Το διάνυσμα κατάστασης x απαρτίζεται είτε από τις φασικές γωνίες τάσεων δ_i όλων των ζυγών, εκτός του ζυγού αναφοράς, και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών V_i , είτε από το πραγματικό μέρος E_i όλων των ζυγών και το φανταστικό μέρος F_i της μιγαδικής τάσης όλων των ζυγών, εκτός του ζυγού αναφοράς, όπου i = 1, ..., N και N ο αριθμός των ζυγών. Οι εξισώσεις των συμβατικών μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.



Σχήμα 5.3 Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Μεταβλητές Κατάστασης	Συμβατικές Μετρήσεις
	$P_{i} = V_{i}^{2} \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + V_{i}^{2} g_{i} - V_{i} \sum_{j \in a(i)} V_{j} \alpha_{ij}$
δδΥΥ	$P_{ij} = V_i^2 \left(g_{ij} + g_{sij} \right) - V_i V_j \alpha_{ij}$
<i>U_i, U_j, V_i, V_j</i>	$Q_{i} = -V_{i}^{2} \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - V_{i}^{2} b_{i} - V_{i} \sum_{j \in a(i)} V_{j} \beta_{ij}$
	$Q_{ij} = -V_i^2 \left(b_{ij} + b_{sij} \right) - V_i V_j \beta_{ij}$
	$P_{i} = \left(E_{i}^{2} + F_{i}^{2}\right) \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + E_{i} \sum_{j \in \alpha(i)} \left(-g_{ij}E_{j} + b_{ij}F_{j}\right) - F_{i} \sum_{j \in \alpha(i)} \left(g_{ij}F_{j} + b_{ij}E_{j}\right)$
E E E E	$P_{ij} = (g_{sij} + g_{ij}) (E_i^2 + F_i^2) + E_i (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - F_i (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j)$
L_i, L_j, I_i, I_j	$Q_{i} = -\left(E_{i}^{2} + F_{i}^{2}\right)\sum_{j \in \alpha(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + E_{i}\sum_{j \in \alpha(i)} \left(g_{ij}F_{j} + b_{ij}E_{j}\right) + F_{i}\sum_{j \in \alpha(i)} \left(-g_{ij}E_{j} + b_{ij}F_{j}\right)$
	$Q_{ij} = -(b_{sij} + b_{ij}) \left(E_i^2 + F_i^2 \right) + E_i \left(g_{ij} F_j + b_{ij} E_j \right) + F_i \left(-g_{ij} E_j + b_{ij} F_j \right)$
όπου	

Πίνακας 5.1 Ενεργές και άεργες εγχύσεις και ροές ισχύος

οπου,

$$\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$$
$$\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$$

5.7 Διατύπωση εξισώσεων συγχρονισμένων μετρήσεων

Μία μονάδα PMU παρέχει απευθείας δύο τύπους μετρήσεων, τον φασιθέτη τάσης του ζυγών στον οποίο εγκαθίσταται και τους φασιθέτες ρεύματος όλων ή ορισμένων γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Συγχρονισμένες μετρήσεις μέσω μιας μονάδας PMU

Με σκοπό την διατύπωση των εξισώσεων που αφορούν τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος, θεωρούμε και πάλι το ισοδύναμο μοντέλο "π" μιας γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j. Ο φασιθέτης τάσης στο ζυγό i συμβολίζεται με $\tilde{V_i}$ και στο ζυγό j με $\tilde{V_j}$, αντίστοιχα. Στην αρχή της γραμμής θεωρούμε ότι έχει τοποθετηθεί μία μονάδα PMU, η οποία μετράει το φασιθέτη τάσης του ζυγού i και το φασιθέτη ρεύματος $\tilde{I_{ij}}$ της γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.

Όλοι οι φασιθέτες μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης τόσο σε πολική όσο και σε καρτεσιανή μορφή.

Το ρεύμα \tilde{I}_{ij} , αναλύεται σε δύο ρεύματα, τα \tilde{I}_{si} και \tilde{I}'_{ij} , αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff (KCL) στον κόμβο A, θα ισχύει:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_{si} + \tilde{I}'_{ij} \tag{5.26}$$

Τα δύο ρεύματα στο δεξί μέλος της εξίσωσης (5.26), μπορούν να αναλυθούν συναρτήσει των τάσεων των ζυγών και των χαρακτηριστικών της γραμμής, ως ακολούθως:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_{ij} y_{sij} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) y_{ij} = \tilde{V}_i (y_{sij} + y_{ij}) - \tilde{V}_j y_{ij}$$
(5.27)

Εξετάζονται τρείς περιπτώσεις, όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.2.

Τονίζεται ότι όταν χρησιμοποιούνται συγχρονισμένες μετρήσεις προερχόμενες από PMUs, όλοι οι φασιθέτες έχουν κοινή αναφορά το GPS, Σχήμα 5.6. Αυτό έχει ως συνέπεια την άρση της ανάγκης επιλογής ενός ζυγού του δικτύου, ως ζυγού ταλάντωσης. Οι εξισώσεις των μετρήσεων φασιθετών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.



Σχήμα 5.5 Ισοδύναμο μοντέλο " π " μιας γραμμής i - j, η οποία φέρει στο άκρο i μονάδα PMU

Περίπτωση	Φασιθέτης Ρεύματος	Μεταβλητές Κατάστασης
1.	Καρτεσιανές Συντεταγμένες	Πολικές Συντεταγμένες
2.	Πολικές Συντεταγμένες	Πολικές Συντεταγμένες
3.	Καρτεσιανές Συντεταγμένες	Καρτεσιανές Συντεταγμένες

Πίνακας 5.2 Μορφές φασιθετών ρεύματος και μεταβλητών κατάστασης



Σχήμα 5.6 Ορισμός φασικών γωνιών τάσης και ρεύματος με την κοινή αναφορά του GPS

Μεταβλητές Φασιθέτες Τάσεων Φασιθ		Φασιθέτης Ρεύματος	
Κατάστασης		Συμπαγής Μορφή	Αναλυτικές Εκφράσεις
δ. δ. V. V.	$\tilde{V_i} = V_i \angle \delta_i = V_i \cos \delta_i + j \ V_i \sin \delta_i$	$\tilde{I}_{\cdots} = I_{\cdots} + iI_{\cdots}$	$I_{ij,r} = \left\{ V_i \left[\left(g_{ij} + g_{sij} \right) \cos \delta_i - \left(b_{ij} + b_{sij} \right) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \right\}$
	$\tilde{V}_j = V_j \angle \delta_j = V_j \cos \delta_j + j \ V_j \sin \delta_j$	$I_{ij} - I_{ij,r} + JI_{ij,i}$	$I_{ij,i} = \left\{ V_i \left[\left(b_{ij} + b_{sij} \right) \cos \delta_i + \left(g_{ij} + g_{sij} \right) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \right\}$
			$\theta_{ij} = arctg \left\{ \frac{V_i \Big[\Big(b_{ij} + b_{sij} \Big) \cos \delta_i + \Big(g_{ij} + g_{sij} \Big) \sin \delta_i \Big] - V_j \Big[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \Big]}{V_i \Big[\Big(g_{ij} + g_{sij} \Big) \cos \delta_i - \Big(b_{ij} + b_{sij} \Big) \sin \delta_i \Big] - V_j \Big[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \Big]} \right\}$
$\delta_i, \delta_j, V_i, V_j$	$\tilde{V}_i = V_i \angle \delta_i = V_i \cos \delta_i + j \ V_i \sin \delta_i$ $\tilde{V}_j = V_j \angle \delta_j = V_j \cos \delta_j + j \ V_j \sin \delta_j$	$\tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij}$	$I_{ij} = \sqrt{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2\right]V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2)V_j^2 + 2\left[(b_{ij} + b_{sij})\beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij})\alpha_{ij}\right]V_iV_j}$
			όπου:
			$\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$
			$\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$
E. E. F. F.	$\tilde{V_i} = E_i + jF_i$	$\tilde{L}_{ij} = L_{ij} + iL_{ij}$	$I_{ij,r} = \left[\left(g_{sij} + g_{ij} \right) E_i - \left(b_{sij} + b_{ij} \right) F_i - g_{ij} E_j + b_{ij} F_j \right]$
E_i, E_j, F_i, F_j	$\tilde{V_j} = E_j + jF_j$	$I_{ij} - I_{ij,r} + JI_{ij,i}$	$I_{ij,i} = \left[\left(g_{sij} + g_{ij} \right) F_i + \left(b_{sij} + b_{ij} \right) E_i - g_{ij} F_j - b_{ij} E_j \right]$

TT/ E3	Φ 0'	,	01 /	,	,	/ .	
Πινακας 5.5	Ψασιθετες	ρευματος και	μεταβλητες	καταστασης	μιας γραμμ	m c i -	1
		p p	F		1	13 -	5

5.8 Δομή Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων

Αν θεωρήσουμε ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει *n* μεταβλητές κατάστασης και *m* μετρήσεις, η δομή της Ιακωβιανής θα είναι η ακόλουθη:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$
(5.28)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων για κάθε τύπο μετρήσεων. Όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολική ή σε καρτεσιανή μορφή τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας που αφορούν τις συμβατικές μετρήσεις παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.4 και 5.5. Θεωρώντας ότι οι φασιθέτες ρεύματος εκφράζονται σε καρτεσιανή μορφή και οι μεταβλητές κατάστασης σε πολική ή σε καρτεσιανή μορφή τα αντίστοιχα στοιχεία της Ιακωβιανής δίνονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7, ενώ ο Πίνακας 5.8 αναφέρεται στην περίπτωση όπου τόσο οι φασιθέτες ρεύματος όσο και οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες.

Πίνακας 5.4 Στοιχεία Ιακωβιανής για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητέ	ς
κατάστασης είινα σε πολική μορφή	

Μεταβλητές	Παράγωγοι				
καταστασης	$rac{d}{d\delta_i}\{\cdot\}$	$\frac{d}{d\delta_j}\{\cdot\}$	$rac{d}{dV_i}\{\cdot\}$	$\frac{d}{dV_{j}}\{\cdot\}$	
$\delta_i, \delta_j, V_i, V_j$	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i \sum_{j \in a(i)} \left(g_{ij} + g_{sij} \right) + 2V_i g_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij}$	
	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \alpha_{ij} + 2V_i \left(g_{ij} + g_{sij}\right)$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij}$	
	$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - 2V_i b_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij}$	
	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \beta_{ij} - 2V_i \left(b_{ij} + b_{sij} \right)$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij}$	

όπου,

$$\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$$
$$\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)$$

- $P_i(Q_i)$: η έγχυση ενεργού (αέργου) ισχύος στον ζυγό i
- $P_{ij}\left(Q_{ij}\right)$: η ροή ενεργού (αέργου) ισχύος στην γραμμή i-j

Μεταβλητές	Παράγωγοι					
καταστασης	$rac{d}{dE_i}\{.\}$	$\frac{d}{dE_j}\{\cdot\}$	$rac{d}{dF_i}\{\cdot\}$	$\frac{d}{dF_j}\{\cdot\}$		
E_i, E_j, F_i, F_j	$\frac{\partial P_i}{\partial E_i} = 2E_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j)$	$\frac{\partial P_i}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i$	$\frac{\partial P_i}{\partial F_i} = 2F_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) - \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j)$	$\frac{\partial P_i}{\partial F_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i$		
	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_i} = 2(g_{sij} + g_{ij})E_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial F_i} = 2(g_{sij} + g_{ij})F_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial F_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i$		
	$\frac{\partial Q_i}{\partial E_i} = -2E_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j)$	$\frac{\partial Q_i}{\partial E_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i$	$\frac{\partial Q_i}{\partial F_i} = -2F_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j)$	$\frac{\partial Q_i}{\partial F_j} = g_{ij}E_i + b_{ij}F_i$		
	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_i} = -2(b_{sij} + b_{ij})E_i + g_{ij}F_j + b_{ij}E_j$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_i} = -2(b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_j} = g_{ij}E_i + b_{ij}F_i$		

Πίνακας 5.5 Στοιχεία Ιακωβιανής για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητές κατάστασης είινα σε καρτεσιανή μορφή

όπου,

*P*_i: η έγχυση ενεργού ισχύος στον ζυγό *i*

 P_{ij} : η ροή ενεργού ισχύος στην γραμμή i-j

 Q_i : η έγχυση αέργου ισχύος στον ζυγό i

 Q_{ij} : η ροή αέργου ισχύος στην γραμμή i-j

Μεταβλητές Κατάστασης	Συμπαγής Μορφή	Παράγωγοι			
$\delta_i, \delta_j, V_i, V_j$	$\tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i}$	$\frac{d}{d\delta_i}\{.\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_i} = -V_i \Big[\Big(g_{ij} + g_{sij} \Big) \sin \delta_i + \Big(b_{ij} + b_{sij} \Big) \cos \delta_i \Big]$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_i} = V_i \Big[\Big(g_{ij} + g_{sij} \Big) \cos \delta_i - \Big(b_{ij} + b_{sij} \Big) \sin \delta_i \Big]$	
		$\frac{d}{d\delta_j}\{\cdot\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_j} = V_j \left[g_{ij} \sin \delta_j + b_{ij} \cos \delta_j \right]$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_j} = -V_j \Big[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \Big]$	
		$\frac{d}{dV_i}\{.\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_i} = \left[\left(g_{ij} + g_{sij} \right) \cos \delta_i - \left(b_{ij} + b_{sij} \right) \sin \delta_i \right]$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_i} = \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right]$	
		$\frac{d}{dV_j}\{\cdot\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_j} = -\left[g_{ij}\cos\delta_j - b_{ij}\sin\delta_j\right]$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_j} = -\left[b_{ij}\cos\delta_j + g_{ij}\sin\delta_j\right]$	

Πίνακας 5.6 Στοιχεία Ιακωβιανής για φασιθέτες ρεύματος σε καρτεσιανή και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή

Πίνακας 5.7 Στοιχεία Ιακωβιανής για φασιθέτες ρεύματος και μεταβλητές κατάστασης σε καρτεσιανή μορφή

Μεταβλητές Κατάστασης	Συμπαγής Μορφή		Παράγωγοι	
E_i, E_j, F_i, F_j	$\tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i}$	$\frac{d}{dE_i}\{\cdot\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_i} = g_{sij} + g_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_i} = b_{sij} + b_{ij}$
		$\frac{d}{dE_j}\{.\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_j} = -g_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_j} = -b_{ij}$
		$\frac{d}{dF_i}\{.\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F_i} = -(b_{sij} + b_{ij})$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_i} = g_{sij} + g_{ij}$
		$\frac{d}{dF_j}\{.\}$	$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F_j} = b_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_j} = -g_{ij}$

Μεταβλητές	Συμπαγής Μορατ	Παράγωγοι				
καταστασης	πορφη	$\frac{d}{d\delta_i}\{\cdot\}$	$rac{d}{d\delta_j}\{\cdot\}$	$rac{d}{dV_i}\{\cdot\}$	$\frac{d}{dV_j}\{\cdot\}$	
$\delta_i, \delta_j, V_i, V_j$	$ ilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle heta_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i V_j D_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{V_i V_j D_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = \frac{V_i A_{ij} + V_j C_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = \frac{V_j B_{ij} + V_i C_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}}$	
		$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i^2 A_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{V_j^2 B_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{V_j D_{ij}}{E_{ij}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i^2 A_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}}$	

Πίνακας 5.8 Στοιχεία Ιακωβιανής για φασιθέτες ρεύματος και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή

όπου,

$$A_{ij} = \left[\left(g_{ij} + g_{sij} \right)^2 + \left(b_{ij} + b_{sij} \right)^2 \right]$$

$$B_{ij} = \left(g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \right)$$

$$C_{ij} = \left[-\left(g_{ij} + g_{sij} \right) \alpha_{ij} + \left(b_{ij} + b_{sij} \right) \beta_{ij} \right]$$

$$D_{ij} = \left[\left(g_{ij} + g_{sij} \right) \beta_{ij} + \left(b_{ij} + b_{sij} \right) \alpha_{ij} \right]$$

$$E_{ij} = V_i^2 A_{ij} + V_j^2 B_{ij} + 2V_i V_j C_{ij}$$

$$\alpha_{ij} = g_{ij} \cos\left(\delta_i - \delta_j \right) + b_{ij} \sin\left(\delta_i - \delta_j \right)$$

$$\beta_{ij} = g_{ij} \sin\left(\delta_i - \delta_j \right) - b_{ij} \cos\left(\delta_i - \delta_j \right)$$

128

5.9 Αριθμητική συμπεριφορά παραγώγων φασιθετών ρεύματος σε πολικές συντεταγμένες

Όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες, είναι σημαντική η μελέτη της αριθμητικής συμπεριφοράς των παραγώγων των φασιθετών ρεύματος σε πολικές συντεταγμένες. Έστω μία γραμμή i - j για την οποία $g_{sij} \approx 0$ και $b_{sij} \approx 0$. Αν ισχύει $V_i \approx V_j$ και $\delta_i \approx \delta_j$, που συνήθως συμβαίνει κατά την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου ή σε περίπτωση ελαφρά φορτισμένης γραμμής, τότε το ρεύμα της γραμμής $I_{ij} \approx 0$ και οι παράγωγοί του ως προς τις μεταβλητές κατάστασης καθίστανται απροσδιόριστες. Αυτό μπορεί να επιβεβαιωθεί με απλή επισκόπηση των σχέσεων του Πίνακα 5.9.

	5 5					
$ ilde{V_i} = ilde{V_j} \ , \ g_{sij} \ge 0$	$\tilde{V}_i = \tilde{V}_j, \ g_{sij} = 0,$	$b_{sij} \ge 0$				
$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = -\frac{(g_{sij}b_{ij} - b_{sij}g_{ij})}{\sqrt{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{g_{sij}b_{ij} - b_{sij}g_{ij}}{\sqrt{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = g_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = -g_{ij}$			
$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = \frac{g_{sij}^2 + b_{sij}^2 + g_{sij}g_{ij} + b_{sij}b_{ij}}{\sqrt{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = -\frac{(g_{sij}g_{ij} + b_{sij}b_{ij})}{\sqrt{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = b_{sij} + b_{ij}$	$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = -b_{ij}$			
$\boxed{\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{g_{sij}^2 + b_{sij}^2 + g_{sij}g_{ij} + b_{sij}b_{ij}}{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{(g_{sij}g_{ij} + b_{sij}b_{ij})}{g_{sij}^2 + b_{sij}^2}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = 1 + \frac{b_{ij}}{b_{sij}} = \frac{b_{sij} + b_{ij}}{b_{sij}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{b_{ij}}{b_{sij}}$			
$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = \frac{g_{sij}b_{ij} - b_{sij}g_{ij}}{V_i(g_{sij}^2 + b_{sij}^2)}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_j} = -\frac{(g_{sij}b_{ij} - b_{sij}g_{ij})}{V_i(g_{sij}^2 + b_{sij}^2)}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{g_{ij}}{V_i b_{sij}}$	$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_j} = \frac{g_{ij}}{V_i b_{sij}}$			

Πίνακας 5.9 Μερικές παράγωγοι του μέτρου I_{ij} και της φασικής γωνίας θ_{ij} του φασιθέτη ρεύματος για $V_i = V_i$ και $\delta_i = \delta_i$

Η μεταβολή των μερικών παραγώγων του μέτρου και της φασικής γωνίας του φασιθέτη ρεύματος που ρέει από το ζυγό *i* προς το ζυγό *j* ως προς τις μεταβλητές κατάστασης V_i και δ_i , παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.7 και 5.8.



Σχήμα 5.7 Μερικές παράγωγοι του μέτρου ρεύματος I_{ij} και της φασικής γωνίας θ_{ij} ως προς το μέτρο τάσης V_i



Σχήμα 5.8 Μερικές παράγωγοι του μέτρου ρεύματος I_{ij} και της φασικής γωνίας θ_{ij} ως προς την γωνία φάσης δ_i

Από τα σχήματα αυτά είναι εμφανές ότι για συγκεκριμένες τιμές των V_i και δ_i , πρακτικά κοντά στα 1,0 *p.u.* και 0 *rad*, οι μερικές παράγωγοι $\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i}$, $\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i}$, $\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i}$, $\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i}$ μεταβάλλονται απότομα από μία μεγάλη σε μία μικρή τιμή και καθίστανται απροσδιόριστες (άπειρη τιμή) για $V_i = 1,0$ *p.u.* και $\delta_i = 0$ *rad*.

5.10 Προτεινόμενοι αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής διατυπώθηκαν και υλοποιήθηκαν αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης οι οποίοι περιλαμβάνουν:

- Συστήματα μετρήσεων αποτελούμενα από συμβατικές και μετρήσεις φασιθετών
- Συστήματα μετρήσεων αποτελούμενα μόνον από μετρήσεις φασιθετών και ψευδομετρήσεις μηδενικής έγχυσης.

5.10.1 Εκτίμηση κατάστασης και επεξεργασία εσφαλμένων δεδομένων για συστήματα που περιλαμβάνουν μετρήσεις PMU και SCADA

Με σκοπό την αποφυγή των αριθμητικών προβλημάτων που αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.9, οι περισσότεροι εκτιμητές κατάστασης που χρησιμοποιούν μεικτό σύστημα μετρήσεων ενσωματώνουν τις μετρήσεις ρευμάτων φασιθετών σε καρτεσιανή μορφή. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την κατασκευαστική φιλοσοφία των μονάδων PMU, οι οποίες παρέχουν μετρήσεις φασιθετών σε πολική μορφή (τα τελευταία χρόνια ορισμένοι κατασκευαστές PMU παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα επιλογής της μορφής των μετρήσεων).

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εκφράζει ένα μη γραμμικό εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων που περιλαμβάνει τόσο συμβατικές μετρήσεις προερχόμενες από το σύστημα SCADA όσο και μετρήσεις φασιθετών ρεύματος και τάσης προερχόμενες από μονάδες PMU. Σχηματίζεται χωρίς την χρήση ζυγού αναφοράς και όλες οι φασικές γωνίες λαμβάνονται ως προς την αναφορά που καθορίζεται από το GPS. Εάν δεν υπάρχουν μετρήσεις φασιθετών, τότε εισάγεται μια τεχνητή μέτρηση μηδενικής φασικής γωνίας σ' έναν αυθαίρετα επιλεγμένο ζυγό αναφοράς, χωρίς να εξαιρείται ο ζυγός αυτός από τη διατύπωση του προβλήματος. Αυτό είναι ισοδύναμο με την κλασσική διατύπωση του εκτιμητή, όπου επιλέγεται μία φασική γωνία μηδενικής τιμής στο ζυγό ταλάντωσης και εξαιρείται από την διατύπωση του προβλήματος. Τα αριθμητικά προβλήματα που ανακύπτουν, στην πρώτη ή σε οποιαδήποτε άλλη επανάληψη, αίρονται με τη χρησιμοποίηση των μετρήσεων φασιθετών ρεύματος σε πολική μορφή, χρησιμοποιώντας καρτεσιανές συντεταγμένες για την επανάληψη στην οποία εμφανίζεται το πρόβλημα και πολικές συντεταγμένες στις υπόλοιπες. Η επίδραση της χρήσης καρτεσιανών συντεταγμένων στην αριθμητική συμπεριφορά των παραγώγων των Σχημάτων 5.7 και 5.8, εμφανίζεται στα Σχήματα 5.9 και 5.10, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.9 Μερικές παράγωγοι πραγματικού $I_{ij,r}$ και φανταστικού $I_{ij,i}$ μέρους του ρεύματος ως προς το μέτρο τάσης V_i

Η διατύπωση με φασιθέτες ρεύματος σε πολικές συντεταγμένες αποτελεί καλύτερη επιλογή σε σύγκριση με την αντίστοιχη σε καρτεσιανές, διότι το μέτρο και η φασική γωνία μιας ποσότητας φασιθέτη, όπως αυτά μετρώνται και υπολογίζονται σε μία μονάδα PMU, είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητες μεταβλητές [143].

To movtélo metrýsew the ektímsky katástashe basíletai se autó the Evóthtae 5.2 kai dívetai aró th szésh z = h(x) + e órou z eívai to diávusma two metrýsewo diastásewo $(m \times 1)$, xto $(n \times 1)$ diávusma two metablitúv katástashe, n = 2N, h(x) kai e ta diavúsmata two ezisússewo métrynshe kai borúbou metrýsewo diastásewo $(m \times 1)$, to kabéva, kai N o aribmós two zúvýwo tou diktúou. H erílush vívetai zrhsimonoúvtas to eravalistikó szúma $G(x^k)\Delta x^k = H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k$, órou k o deíktis the saválnyme, x^k h lúsh katá the eraválnym k, $\Delta x^k = x^{k+1} - x^k$, $\Delta z^k = z - h(x^k)$, $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ kai $G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$ h Iakwbiavý kai h mútra kérdous diastásewo $(m \times n)$, avtístova.

Η παρατηρησιμότητα του δικτύου γίνεται ελέγχοντας την απώλεια βαθμού της μήτρας κέρδους κατά την τριγωνική της παραγοντοποίηση [144]. Το σύστημα χαρακτηρίζεται παρατηρήσιμο εάν η απώλεια βαθμού είναι ίση με το μηδέν.

Η αποζευγμένη Ιακωβιανή μήτρα H_p , όταν χρησιμοποιούνται πολικές συντεταγμένες για τους φασιθέτες ρεύματος και τάσης και H_r όταν χρησιμοποιούνται καρτεσιανές συντεταγμένες, έχουν την ακόλουθη δομή:



Σχήμα 5.10 Μερικές παράγωγοι πραγματικού $I_{ij,r}$ και φανταστικού $I_{ij,i}$ μέρους του ρεύματος ως προς τη γωνία φάσης δ_i

$H_p =$	$\left(\begin{array}{c} \partial h_{P_{ij}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \partial h_{Q_{ij}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \overline{\partial h_{P_i}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \partial h_{P_i} \\ \overline{\partial \delta} \\ \partial h_{Q_i} \\ \overline{\partial \delta} \\ \overline{\partial h_{\delta_i}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \overline{\partial h_{V_i}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \overline{\partial h_{I_{ij}}} \\ \overline{\partial \delta} \\ \partial h_{\theta_i} \end{array} ight)$	$\begin{array}{c} \displaystyle \frac{\partial h_{P_{ij}}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{Q_{ij}}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{P_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{\delta_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{\delta_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{V_i}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{I_{ij}}}{\partial V} \\ \displaystyle \frac{\partial h_{\theta_{ij}}}{\partial V} \end{array}$	$H_r =$	$\left(egin{array}{c} \partial h_{P_{ij}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial h_{Q_{ij}}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial h_{Q_{ij}}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial h_{Q_i}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial h_{Q_i}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial h_{Q_i}} \ \overline{\partial \delta} \ \overline{\partial \delta}$	$ \begin{array}{c} \frac{\partial h_{P_{ij}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{Q_{ij}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{P_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{Q_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{\delta_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{V_i}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{I_{ij,i}}}{\partial V} \\ \frac{\partial h_{\theta_{ij,i}}}{\partial V} \end{array} $	(5.29)
	$rac{\partial h_{ heta_{ij}}}{\partial \delta}$	$\left(rac{\partial h_{ heta_{ij}}}{\partial V} ight)$		$rac{\partial h_{ heta_{ij,\mathrm{r}}}}{\partial \mathcal{S}}$	$rac{\partial h_{ heta_{ij,i}}}{\partial V}$	

Οι εκφράσεις των μερικών παραγώγων για τη συμβατική ενεργό P_{ij} και άεργο Q_{ij} ροή στην γραμμή i - j, έγχυσης στο ζυγό i (P_i, Q_i) , όπως και του μέτρου (V_i) αλλά και της φασικής γωνίας (δ_i) στο ζυγό i ως προς τις μεταβλητές κατάστασης δίδονται από τους Πίνακες 5.4, 5.6 και 5.8. Οι μετρήσεις φασιθετών σε πολική μορφή χαρακτηρίζονται ως άμεσες μετρήσεις, ενώ οι μετρήσεις σε καρτεσιανή μορφή χαρακτηρίζονται ως έμμεσες μετρήσεις.

Οι διασπορές θορύβου $\sigma_{I_{ij,r}}^2$, $\sigma_{I_{ij,i}}^2$ για το πραγματικό $I_{ij,r}$ και το φανταστικό $I_{ij,i}$ μέρος του φασιθέτη ρεύματος \tilde{I}_{ij} υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις [128]:

$$\sigma_{I_{ij,x}}^{2} = (\cos \theta_{ij})^{2} \sigma_{I_{ij}}^{2} + (I_{ij} \sin \theta_{ij})^{2} \sigma_{\theta_{ij}}^{2}$$
(5.30)

$$\sigma_{I_{ij,i}}^{2} = (\sin \theta_{ij})^{2} \sigma_{I_{ij}}^{2} + (I_{ij} \cos \theta_{ij})^{2} \sigma_{\theta_{ij}}^{2}$$
(5.31)

όπου $\sigma_{I_{ij}}^2$, $\sigma_{\theta_{ij}}^2$ είναι οι διασπορές θορύβου των I_{ij} και θ_{ij} αντίστοιχα.

Από τις (5.30) και (5.31) είναι προφανές ότι ο μετασχηματισμός των μετρήσεων από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες ενισχύει τα σφάλματα μετρήσεων των PMUs. Επομένως, για τη βελτίωση της ακρίβειας του εκτιμητή, η χρήση άμεσων μετρήσεων PMU είναι η καλύτερη επιλογή. Η διαδικασία ανίχνευσης και εντοπισμού των εσφαλμένων μετρήσεων, είναι πολύ σημαντική για την ακρίβεια της εκτιμώμενης κατάστασης. Η διαδικασία που ακολουθείται, παρουσιάζεται αναλυτικά στην Ενότητα 5.5.

5.10.1.1 Προσομοίωση χωρίς ύπαρξη εσφαλμένων μετρήσεων

Ως επεξηγηματικό παράδειγμα χρησιμοποιείται το δίκτυο 14 ζυγών του ΙΕΕΕ του Σχήματος 5.11. Το σύστημα μετρήσεων είναι μεικτό περιλαμβάνοντας συμβατικές μετρήσεις και μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU. Κάθε PMU θεωρείται ότι μπορεί να μετρήσει το φασιθέτη τάσης του ζυγού στον οποίο είναι εγκατεστημένο και τους φασιθέτες ρεύματος όλων των γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό. Ο ζυγός 1 επιλέγεται ως ζυγός ταλάντωσης της συμβατικής εκτίμησης κατάστασης. Το όριο σύγκλισης του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης λαμβάνεται ίσο με 10⁻⁴.



Σχήμα 5.11 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Με σκοπό την προσομοίωση του Gaussian θορύβου της μέτρησης *i*, χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$z_i^{meas} = z_i^{true} + rand \times \sigma_i \tag{5.32}$$

όπου z_i^{meas} είναι η μετρούμενη τιμή, z_i^{true} είναι η αληθής τιμή που παρέχεται από την επίλυση της ροής φορτίου, rand είναι ένας τυχαίος αριθμός N(0,1), και σ_i είναι η τυπική απόκλιση του

σφάλματος μέτρησης. Εάν υποτεθεί ότι z_i^{true} είναι η μέση τιμή της μέτρησης *i*, τότε μία απόκλιση $\pm 3\sigma_i$ γύρω από τη μέση τιμή καλύπτει περίπου το 99,7% της καμπύλης κανονικής κατανομής. Συνεπώς, η τυπική απόκλιση σ_i υπολογίζεται ως εξής [145]:

$$\sigma_i = \frac{\mu_i \times \% \, error}{3 \times 100} = \frac{z_i^{true} \times \% \, error}{3 \times 100} \tag{5.33}$$

όπου με %*error* εκφράζεται η ανακρίβεια του αντίστοιχου μετρητικού οργάνου. Οι μετρήσεις φασιθετών θεωρούνται πιο ακριβείς, παρουσιάζοντας σφάλμα 0,5% σε σχέση με το αντίστοιχο 2% των συμβατικών.

Με σκοπό τον έλεγχο της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου, προσομοιώνονται τέσσερις διαφορετικές παρατηρήσιμες περιπτώσεις, Πίνακας 5.10. Η πρώτη περίπτωση περιλαμβάνει μόνο μετρήσεις προερχόμενες από το σύστημα SCADA. Η δεύτερη περίπτωση περιλαμβάνει μετρήσεις SCADA και μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος που προέρχονται από PMUs εγκατεστημένα στους ζυγούς 2, 7 και 9. Η τρίτη και η τέταρτη περίπτωση αντιστοιχούν σε συστήματα μετρήσεων που περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές μετρήσεις όσο και PMUs εγκατεστημένα στους ζυγούς 2, 6, 7, 9 και 13, αντίστοιχα. Όταν εξετάζεται ένα μεικτό σύστημα μετρήσεων, η περίσσεια των μετρήσεων $r = \frac{m}{n}$, όπου m ο αριθμός των μετρήσεων και n ο αριθμός των μεταβλητών κατάστασης, θεωρείται σταθερή και ίση με 1,78.

A/A	Σύ	т	п	r			
	SCA	DA		PMUs			
	Ροές	Εγχύσεις	Μέτρο Τάσης				
1	1-2, 1-5, 2-5, 3-4 4-5, 4-7, 4-9, 6-11 6-12, 6-13, 7-8, 7-9 9-10, 9-14, 10-11 12-13, 13-14	3, 5, 13, 14	1	_	44	28	1,57
2	4-5, 4-7, 4-9, 7-9 10-11, 12-13, 13-14	3, 5, 13, 14	_	2, 7, 9	50	28	1,78
3	4-9, 10-11, 12-13	3, 5, 14	-	2, 6, 7, 9	50	28	1,78
4	10-11	5	-	2, 6, 7, 9, 13	50	28	1,78

Πίνακας 5.10 Συστήματα μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Οι μετρούμενες τιμές των συμβατικών και συγχρονισμένων μετρήσεων φαίνονται στους Πίνακες 5.11 και 5.12. Για τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος γραμμών χρησιμοποιούνται καρτεσιανές συντεταγμένες για την πρώτη ανακύκλωση και πολικές για τις υπόλοιπες. Οι πραγματικές και μετρούμενες τιμές σε καρτεσιανή μορφή που περιέχονται στον Πίνακα 5.12 προκύπτουν χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς των σχέσεων (5.30) και (5.31). Χρησιμοποιώντας πολικές συντεταγμένες για τα ρεύματα γραμμών, ο αλγόριθμος συγκλίνει σε 4 επαναλήψεις για την πρώτη, 6

για τη δεύτερη και τρίτη, και 7 για την τέταρτη περίπτωση. Ο Πίνακας 5.13 παρουσιάζει τις πραγματικές και εκτιμώμενες καταστάσεις για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Ο Πίνακας 5.14 παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα με τις φασικές γωνίες μετατοπισμένες ώστε να συμφωνούν με τη σύμβαση ότι η γωνία του ζυγού αναφοράς πρέπει να είναι ίση με μηδέν.

Τύπος	Αληθής	Μετρούμενη	Τύπος	Αληθής	Μετρούμενη
$\delta_1(\text{deg})$	0,00000	0,00573	$V_1(\text{deg})$	1,06000	1,06707
$P_{1-2}(p.u.)$	1,57788	1,58577	$Q_{1-2}(p.u.)$	-0,20616	-0,20512
$P_{1-5}(p.u.)$	0,74957	0,74408	$Q_{1-5}(p.u.)$	0,09203	0,09135
$P_{2-5}(p.u.)$	0,41642	0,41905	$Q_{2-5}(p.u.)$	0,07881	0,07931
$P_{3-4}(p.u.)$	-0,22964	-0,23086	$Q_{3-4}(p.u.)$	0,07808	0,07766
$P_{4-5}(p.u.)$	-0,61898	-0,61423	$Q_{4-5}(p.u.)$	0,04951	0,04989
$P_{4-7}(p.u.)$	0,29018	0,28709	$Q_{4-7}(p.u.)$	0,06091	0,06026
$P_{4-9}(p.u.)$	0,16444	0,16345	$Q_{4-9}(p.u.)$	0,06866	0,06825
$P_{6-11}(p.u.)$	0,06582	0,06529	$Q_{6-11}(p.u.)$	0,03364	0,03337
$P_{6-12}(p.u.)$	0,07697	0,07733	$Q_{6-12}(p.u.)$	0,02524	0,02536
$P_{6-13}(p.u.)$	0,17384	0,17324	$Q_{6-13}(p.u.)$	0,07189	0,07126
$P_{7-8}(p.u.)$	0,00000	0,00010	$Q_{7-8}(p.u.)$	-0,16888	-0,16899
$P_{7-9}(p.u.)$	0,29018	0,28883	$Q_{7-9}(p.u.)$	0,21147	0,21048
$P_{9-10}(p.u.)$	0,06001	0,06050	$Q_{9-10}(p.u.)$	0,04422	0,04457
$P_{9-14}(p.u.)$	0,09961	0,10021	$Q_{9-14}(p.u.)$	0,03785	0,03808
$P_{10-11}(p.u.)$	-0,03018	-0,02986	$Q_{10-11}(p.u.)$	-0,01428	-0,01413
$P_{12-13}(p.u.)$	0,01513	0,01490	$Q_{12-13}(p.u.)$	0,00750	0,00738
$P_{13-14}(p.u.)$	0,05147	0,05174	$Q_{13-14}(p.u.)$	0,01653	0,01662
$P_3(p.u.)$	-0,94200	-0,95770	$Q_3(p.u.)$	0,04400	0,04327
$P_5(p.u.)$	-0,07600	-0,07580	$Q_5(p.u.)$	-0,01600	-0,01596
$P_{13}(p.u.)$	-0,13500	-0,13374	$Q_{13}(p.u.)$	-0,05800	-0,05746
$P_{14}(p.u.)$	-0,14900	-0,14761	$Q_{14}(p.u.)$	-0,05000	-0,04953

Πίνακας 5.11 Πραγματικές και μετρούμενες τιμές συμβατικών μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Μέτρο	Δληθής	Мето	Γωνία	Δληθής	Meto	Re	Δληθής	Meto	Im	Δληθής	Мето
(<i>p.u.</i>)	miloilà	Meth.	(deg)	milous	Mictp.	(<i>p.u.</i>)	majoris	Micth.	(<i>p.u.</i>)	- Aniloita	merp.
					ΡΜU στο	ζυγό 2					
V_2	1,0450	1,0509	δ_2	-5,0126	-4,9841						
<i>I</i> ₂₋₁	1,4926	1,4906	θ_{2-1}	5,3441	5,3370	<i>I</i> _{2-1,r}	-1,4862	-1,4881	<i>I</i> _{2-1,i}	-0,1390	-0,1393
<i>I</i> ₂₋₃	0,7096	0,7078	θ_{2-3}	-11,8940	-11,9257	<i>I</i> _{2-3,r}	0,6944	0,6926	<i>I</i> _{2-3,i}	-0,1463	-0,1468
<i>I</i> ₂₋₄	0,5454	0,5472	θ_{2-4}	-12,7553	-12,7128	<i>I</i> _{2-4,r}	0,5319	0,5337	<i>I</i> _{2-4,i}	-0,1204	-0,1199
<i>I</i> ₂₋₅	0,4056	0,4083	θ_{2-5}	-15,7300	-15,6251	<i>I</i> _{2-5,r}	0,3904	0,3930	<i>I</i> _{2-5,i}	-0,1100	-0,1089
					ΡΜU στο	ζυγό 6					
V_6	0,9805	0.9776	δ_6	-14,9247	-14,9695						
I ₆₋₅	0,4454	0,4426	θ_{6-5}	-25,9841	-26,1486	<i>I</i> _{6-5,r}	-0,4004	-0,4030	I _{6-5,i}	0,1952	0,1935
<i>I</i> ₆₋₁₁	0,0754	0,0749	θ_{6-11}	-42,0005	-42,2805	<i>I</i> _{6-11,r}	0,0560	0,0556	<i>I</i> _{6-11,i}	-0,0504	-0,0509
<i>I</i> ₆₋₁₂	0,0826	0,0828	θ_{6-12}	-33,0834	-33,0820	<i>I</i> _{6-12,r}	0,0692	0,0693	<i>I</i> _{6-12,i}	-0,0451	-0,0450
<i>I</i> ₆₋₁₃	0,1919	0,1917	θ_{6-13}	-37,9110	-37,4160	<i>I</i> _{6-13,r}	0,1524	0,1523	<i>I</i> _{6-13,i}	-0,1165	-0,1166
	ΡΜυ στο ζυγό 7										
V_7	0,9907	0,9887	δ_7	-13,6736	-13,7009						
<i>I</i> ₇₋₄	0,2960	0,2980	$ heta_{ extsf{7-4}}$	-22,0225	-21,8757	<i>I</i> _{7-4,r}	-0,2744	-0,2726	I _{7-4,i}	0,1110	0,1120
I_{7-8}	0,1705	0,1697	$ heta_{ ext{7-8}}$	76,3264	75,9702	I _{7-8,r}	0,0403	0,0393	I _{7-8,i}	0,1656	0,1648
I ₇₋₉	0,3624	0,3627	$ heta_{7-9}$	-49,7559	-49,7227	I _{7-9,r}	0,2342	0,2344	I _{7-9,i}	-0,2766	-0,2764
				1	ΡΜU στο	ζυγό 9	-	1			
V_9	0,9678	0,9742	δ_9	-15,5817	-15,4778						
I ₉₋₄	0,1779	0,1782	$ heta_{9-4}$	-32,8296	-32,7858	<i>I</i> _{9-4,r}	-0,1495	-0,1492	I _{9-4,i}	0,0965	0,0966
I ₉₋₇	0,3624	0,3627	$ heta_{9-7}$	-49,7559	-49,7227	<i>I</i> _{9-7,r}	-0,2342	-0,2302	I _{9-7,i}	0,27665	0,2769
I ₉₋₁₀	0,0770	0,0768	$ heta_{9-10}$	-51,9660	-52,1392	I _{9-10,r}	0,0475	0,0472	I _{9-10,i}	-0,0607	-0,0609
I ₉₋₁₄	0,1101	0,1094	$ heta_{9-14}$	-36,3886	-36,6311	<i>I</i> _{9-14,r}	0,0886	0,08800	I _{9-14,i}	-0,0653	-0,0660
					ΡΜU στο ζ	υγό 13					-
<i>V</i> ₁₃	0,9594	0,9636	δ_{13}	-16,0145	-15,9451						
<i>I</i> ₁₃₋₆	0,1919	0,1931	$ heta_{13-6}$	-37,3911	-37,1543	<i>I</i> _{13-6,r}	-0,1524	-0,1514	<i>I</i> _{13-6,i}	0,1165	0,1175
<i>I</i> ₁₃₋₁₂	0,0175	0,0176	θ_{13-12}	-42,2919	-42,0099	<i>I</i> _{13-12,r}	-0,0130	-0,0128	<i>I</i> _{13-12,i}	0,0118	0,0119
<i>I</i> ₁₃₋₁₄	0,0564	0,0563	θ_{13-14}	-33,8197	-33,8761	<i>I</i> _{13-14,r}	0,0468	0,0467	<i>I</i> _{13-14,i}	-0,0313	-0,0314

Πίνακας 5.12 Πραγματικές και μετρούμενες τιμές συγχρονισμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

	Αληθής	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
$\delta_1(\text{deg})$	0,00000	0,02762	0,02517	0,00732	0,00767
$\delta_2(\text{deg})$	-5,01253	-5,01034	-4,98856	-4,98691	-4,97786
$\delta_3(\text{deg})$	-12,73979	-12,58964	-12,79257	-12,76418	-12,66468
$\delta_4(\text{deg})$	-10,1673	-10,18644	-10,16117	-10,15626	-10,13989
$\delta_5(\text{deg})$	-8,65046	-8,67606	-8,63973	-8,637446	-8,62384
$\delta_6(\text{deg})$	-14,92473	-14,93210	-14,91665	-14,91652	-14,90185
$\delta_7(\text{deg})$	-13,67358	-13,67124	-13,67430	-13,66231	-13,65193
$\delta_8(\text{deg})$	-13,67358	-13,67134	-13,68473	-13,67307	-13,66297
$\delta_9(\text{deg})$	-15,58169	-15,53640	-15,58623	-15,56549	-15,55351
$\delta_{10}(\text{deg})$	-15,80722	-15,74073	-15,81051	-15,78869	-15,77571
$\delta_{11}(\text{deg})$	-15,52248	-15,43423	-15,52750	-15,50708	-15,49437
$\delta_{12}(\text{deg})$	-15,92980	-15,84047	-15,91952	-15,92223	-15,90485
$\delta_{13}(\text{deg})$	-16,01450	-15,91699	-16,00331	-16,00554	-15,99122
$\delta_{14}(\text{deg})$	-16,96869	-16,76763	-16,96337	-16,94011	-16,93485
$V_1(p.u.)$	1,06000	1,05663	1,05755	1,06045	1,06217
$V_2(p.u.)$	1,04500	1,04171	1,04253	1,04546	1,04719
$V_3(p.u.)$	0,99961	0,99500	0,99673	0,99965	1,00168
$V_4(p.u.)$	1,00156	0,99822	0,99923	1,00197	1,00364
$V_5(p.u.)$	1,00808	1,00564	1,00574	1,00850	1,01017
$V_6(p.u.)$	0,98051	0,97812	0,97843	0,98088	0,98240
$V_7(p.u.)$	0,99069	0,98743	0,98846	0,99119	0,99270
$V_8(p.u.)$	1,02072	1,01752	1,01835	1,02108	1,02258
$V_9(p.u.)$	0,96775	0,96543	0,96553	0,96825	0,96973
$V_{10}(p.u.)$	0,96192	0,95706	0,95971	0,96242	0,96391
$V_{11}(p.u.)$	0,96736	0,96404	0,96510	0,96780	0,96928
$V_{12}(p.u.)$	0,96442	0,96204	0,96237	0,96475	0,96633
$V_{13}(p.u.)$	0,95940	0,95710	0,95742	0,95980	0,96128
$V_{14}(p.u.)$	0,94437	0,94205	0,94232	0,94503	0,94629

Πίνακας 5.13 Πραγματικές και εκτιμώμενες μεταβλητές κατάστασης για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Τα Σχήματα 5.12 και 5.13 παρουσιάζουν το εκατοστιαίο σφάλμα των εκτιμώμενων φασικών γωνιών και μέτρων τάσεων ως προς τις πραγματικές τους τιμές.

	Αληθής	Περίπτωση 1	Περίπτωση 2	Περίπτωση 3	Περίπτωση 4
$\delta_1(\text{deg})$	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
$\delta_2(\text{deg})$	-5,01253	-5,01963	-5,01373	-4,99423	-4,98553
$\delta_3(\text{deg})$	-12,73979	-12,77964	-12,81774	-12,77145	-12,67235
$\delta_4(\text{deg})$	-10,16730	-10,1864	-10,18634	-10,16358	-10,14756
$\delta_5(\text{deg})$	-8,65046	-8,79606	-8,66490	-8,64476	-8,63151
$\delta_6(\text{deg})$	-14,92473	-14,93210	-14,94182	-14,92384	-14,90952
$\delta_7(\text{deg})$	-13,67358	-13,68124	-13,69947	-13,66963	-13,65960
$\delta_8(\text{deg})$	-13,67358	-13,68435	-13,70991	-13,68038	-13,67064
$\delta_9(\text{deg})$	-15,58169	-15,49640	-15,61141	-15,57281	-15,56118
$\delta_{10}(\text{deg})$	-15,80722	-15,74073	-15,83568	-15,79610	-15,78338
$\delta_{11}(\text{deg})$	-15,52248	-15,43423	-15,55267	-15,51440	-15,50204
$\delta_{12}(\text{deg})$	-15,92980	-15,85047	-15,94470	-15,92955	-15,91252
$\delta_{13}(\text{deg})$	-16,01450	-15,91699	-16,02848	-16,01286	-15,99889
$\delta_{14}(\text{deg})$	-16,96869	-16,86763	-16,98854	-16,94743	-16,94252

Πίνακας 5.14 Μετατοπισμένες πραγματικές και εκτιμώμενες τιμές φασικών γωνιών για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών



Σχήμα 5.12 % Σφάλμα φασικής γωνίας ζυγών ως προς τις πραγματικές τιμές για το δίκτυο IEEE 14 ζυγών



Σχήμα 5.13 % Σφάλμα μέτρου τάσης ζυγών ως προς τις πραγματικές τιμές για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Όπως φαίνεται από τα σχήματα αυτά, τα χειρότερα αποτελέσματα εντοπίζονται όταν χρησιμοποιούνται μόνο μετρήσεις προερχόμενες από το SCADA. Η προσθήκη μετρήσεων προερχόμενων από PMUs βελτιώνει αισθητά τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης.

Με σκοπό την επιβεβαίωση της λειτουργίας του αλγορίθμου σε μεγαλύτερα δίκτυα χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών. Η μετρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.15 και τα αποτελέσματα της εκτίμησης στους Πίνακες 5.16 και 5.17, αντίστοιχα.

Μετρήσεις		
Ροές	Εγχύσεις	PMUs
1-2, 3-1, 3-12, 5-3, 5-6, 5-7, 8-5, 8-9, 12-7, 13-15, 14-12,	8, 10, 20, 22, 24,	11, 17, 27, 37,
14-15, 16-12, 18-19, 19-20, 22-21, 25-23, 26-25, 23-32, 24-	26, 29, 41, 43,	56, 69, 85, kai
23, 24-70, 19-34, 30-38, 31-32, 33-15, 34-43, 35-36, 40-41,	45, 50, 52, 63,	100
44-45, 45-49, 46-48, 47-46, 48-49, 49-42, 49-66, 51-52, 51-	67, 73, 74, 78,	
58, 53-54, 54-59, 54-49, 57-50, 59-60, 60-62, 61-62, 61-64,	82, 87, 90, 91,	
64-65, 65-38, 66-65, 66-67, 68-65, 77-78, 77-80, 77-82, 77-	93, 95, 97, 111,	
76, 79-80, 70-74, 72-71, 80-81, 80-98, 80-99, 81-68, 82-83,	112, 116, 117, και	
89-90, 89-92, 90-91, 96-94, 96-95, 96-97, 94-93, 102-92,	118	
103-110, 106-105, 106-107, 108-105, 110-109, 113-32, 114-		
32, 115-114, και 118-76		

Πίνακας 5.15 Σύστημα μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών



Σχήμα 5.14 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία PMU και συμβατικών μετρήσεων

$\delta_1(\text{deg})$	10,980	$\delta_{36}(\text{deg})$	11,055	$\delta_{71}(\text{deg})$	22,203	$\delta_{106}(\text{deg})$	20,388
$\delta_2(\text{deg})$	11,518	$\delta_{37}(\text{deg})$	11,966	$\delta_{72}(\text{deg})$	21,097	$\delta_{107}(\text{deg})$	17,553
$\delta_3(\text{deg})$	11,856	$\delta_{38}(\text{deg})$	17,107	$\delta_{73}(\text{deg})$	21,991	$\delta_{108}(\text{deg})$	19,441
$\delta_4(\text{deg})$	15,573	$\delta_{39}(\text{deg})$	8,576	$\delta_{74}(\text{deg})$	21,671	$\delta_{109}(\text{deg})$	18,894
$\delta_5(\text{deg})$	16,019	$\delta_{40}(\text{deg})$	7,495	$\delta_{75}(\text{deg})$	22,927	$\delta_{110}(\text{deg})$	18,055
$\delta_6(\text{deg})$	13,299	$\delta_{41}(\text{deg})$	7,047	$\delta_{76}(\text{deg})$	21,796	$\delta_{111}(\text{deg})$	19,703
$\delta_7(\text{deg})$	12,842	$\delta_{42}(\text{deg})$	8,629	$\delta_{77}(\text{deg}).$	26,748	$\delta_{112}(\text{deg})$	14,970
$\delta_8(\text{deg})$	21,040	$\delta_{43}(\text{deg})$	11,458	$\delta_{78}(\text{deg})$	26,443	$\delta_{113}(\text{deg})$	13,992
$\delta_9(\text{deg})$	28,295	$\delta_{44}(\text{deg})$	13,926	$\delta_{79}(\text{deg})$	26,742	$\delta_{114}(\text{deg})$	14,725
$\delta_{10}(\text{deg})$	35,875	$\delta_{45}(\text{deg})$	15,760	$\delta_{80}(\text{deg})$	28,984	$\delta_{115}(\text{deg})$	14,716
$\delta_{11}(\text{deg})$	13,005	$\delta_{46}(\text{deg})$	18,575	$\delta_{81}(\text{deg})$	28,142	$\delta_{116}(\text{deg})$	27,161
$\delta_{12}(\text{deg})$	12,488	$\delta_{47}(\text{deg})$	20,797	$\delta_{82}(\text{deg})$	27,270	$\delta_{117}(\text{deg})$	10,948
$\delta_{13}(\text{deg})$	11,629	$\delta_{48}(\text{deg})$	20,012	$\delta_{83}(\text{deg})$	28,463	$\delta_{118}(\text{deg})$	21,936
$\delta_{14}(\text{deg})$	11,767	$\delta_{49}(\text{deg})$	21,019	$\delta_{84}(\text{deg})$	31,001		
$\delta_{15}(\text{deg})$	11,474	$\delta_{50}(\text{deg})$	18,979	$\delta_{85}(\text{deg})$	32,556		
$\delta_{16}(\text{deg})$	12,186	$\delta_{51}(\text{deg})$	16,356	$\delta_{86}(\text{deg})$	31,187		
$\delta_{17}(\text{deg})$	13,995	$\delta_{52}(\text{deg})$	15,401	$\delta_{87}(\text{deg})$	31,443		
$\delta_{18}(\text{deg})$	11,780	$\delta_{53}(\text{deg})$	14,431	$\delta_{88}(\text{deg})$	35,690		
$\delta_{19}(\text{deg})$	11,318	$\delta_{54}(\text{deg})$	15,346	$\delta_{89}(\text{deg})$	39,749		
$\delta_{20}(\text{deg})$	12,196	$\delta_{55}(\text{deg})$	15,056	$\delta_{90}(\text{deg})$	33,333		
$\delta_{21}(\text{deg})$	13,780	$\delta_{56}(\text{deg})$	15,243	$\delta_{91}(\text{deg})$	33,345		
$\delta_{22}(\text{deg})$	16,331	$\delta_{57}(\text{deg})$	16,447	$\delta_{92}(\text{deg})$	33,882		
$\delta_{23}(\text{deg})$	21,247	$\delta_{58}(\text{deg})$	15,590	$\delta_{93}(\text{deg})$	30,853		
$\delta_{24}(\text{deg})$	21,110	$\delta_{59}(\text{deg})$	19,445	$\delta_{94}(\text{deg})$	28,684		
$\delta_{25}(\text{deg})$	28,179	$\delta_{60}(\text{deg})$	23,229	$\delta_{95}(\text{deg})$	27,710		
$\delta_{26}(\text{deg})$	29,958	$\delta_{61}(\text{deg})$	24,118	$\delta_{96}(\text{deg})$	27,542		
$\delta_{27}(\text{deg})$	15,603	$\delta_{62}(\text{deg})$	23,504	$\delta_{97}(\text{deg})$	27,911		
$\delta_{28}(\text{deg})$	13,878	$\delta_{63}(\text{deg})$	22,825	$\delta_{98}(\text{deg})$	27,435		
$\delta_{29}(\text{deg})$	12,882	$\delta_{64}(\text{deg})$	24,591	$\delta_{99}(\text{deg})$	27,069		
$\delta_{30}(\text{deg})$	19,033	$\delta_{65}(\text{deg})$	27,719	$\delta_{100}(\text{deg})$	28,061		
$\delta_{31}(\text{deg})$	13,002	$\delta_{66}(\text{deg})$	27,559	$\delta_{101}(\text{deg})$	29,649		
$\delta_{32}(\text{deg})$	15,059	$\delta_{67}(\text{deg})$	24,912	$\delta_{102}(\text{deg})$	32,353		
$\delta_{33}(\text{deg})$	10,853	$\delta_{68}(\text{deg})$	27,596	$\delta_{103}(\text{deg})$	24,320		
$\delta_{34}(\text{deg})$	11,511	$\delta_{69}(\text{deg})$	29,998	$\delta_{104}(\text{deg})$	21,749		
$\delta_{35}(\text{deg})$	11,054	$\delta_{70}(\text{deg})$	22,615	$\delta_{105}(\text{deg})$	20,648		

Πίνακας 5.16 Εκτιμώμενες τιμές φασικών γωνιών ζυγών για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

$V_1(p.u.)$	0,955	$V_{36}(p.u.)$	0,980	$V_{71}(p.u.)$	0,987	$V_{106}(p.u.)$	0,961
$V_2(p.u.)$	0,971	$V_{37}(p.u.)$	0,991	$V_{72}(p.u.)$	0,980	$V_{107}(p.u.)$	0,952
$V_3(p.u.)$	0,968	$V_{38}(p.u.)$	0,961	$V_{73}(p.u.)$	0,991	$V_{108}(p.u.)$	0,966
$V_4(p.u.)$	0,998	$V_{39}(p.u.)$	0,970	$V_{74}(p.u.)$	0,958	$V_{109}(p.u.)$	0,967
$V_5(p.u.)$	1,002	$V_{40}(p.u.)$	0,970	$V_{75}(p.u.)$	0,967	$V_{110}(p.u.)$	0,973
$V_6(p.u.)$	0,990	$V_{41}(p.u.)$	0,967	$V_{76}(p.u.)$	0,943	$V_{111}(p.u.)$	0,980
$V_7(p.u.)$	0,989	$V_{42}(p.u.)$	0,985	$V_{77}(p.u.)$	1,006	$V_{112}(p.u.)$	0,975
$V_8(p.u.)$	1,015	$V_{43}(p.u.)$	0,977	$V_{78}(p.u.)$	1,003	$V_{113}(p.u.)$	0,993
$V_9(p.u.)$	1,043	$V_{44}(p.u.)$	0,984	$V_{79}(p.u.)$	1,009	$V_{114}(p.u.)$	0,960
$V_{10}(p.u.)$	1,050	$V_{45}(p.u.)$	0,986	$V_{80}(p.u.)$	1,040	$V_{115}(p.u.)$	0,960
$V_{11}(p.u.)$	0,985	$V_{46}(p.u.)$	1,005	$V_{81}(p.u.)$	0,997	$V_{116}(p.u.)$	1,005
$V_{12}(p.u.)$	0,990	$V_{47}(p.u.)$	1,017	$V_{82}(p.u.)$	0,989	$V_{117}(p.u.)$	0,974
$V_{13}(p.u.)$	0,968	$V_{48}(p.u.)$	1,021	$V_{83}(p.u.)$	0,984	$V_{118}(p.u.)$	0,949
$V_{14}(p.u.)$	0,984	$V_{49}(p.u.)$	1,025	$V_{84}(p.u.)$	0,980		
$V_{15}(p.u.)$	0,970	$V_{50}(p.u.)$	1,001	$V_{85}(p.u.)$	0,985		
$V_{16}(p.u.)$	0,984	$V_{51}(p.u.)$	0,967	$V_{86}(p.u.)$	0,987		
$V_{17}(p.u.)$	0,995	$V_{52}(p.u.)$	0,957	$V_{87}(p.u.)$	1,015		
$V_{18}(p.u.)$	0,973	$V_{53}(p.u.)$	0,946	$V_{88}(p.u.)$	0,987		
$V_{19}(p.u.)$	0,962	$V_{54}(p.u.)$	0,955	$V_{89}(p.u.)$	1,005		
$V_{20}(p.u.)$	0,957	$V_{55}(p.u.)$	0,952	$V_{90}(p.u.)$	0,985		
$V_{21}(p.u.)$	0,958	$V_{56}(p.u.)$	0,954	$V_{91}(p.u.)$	0,980		
$V_{22}(p.u.)$	0,969	$V_{57}(p.u.)$	0,971	$V_{92}(p.u.)$	0,990		
$V_{23}(p.u.)$	0,999	$V_{58}(p.u.)$	0,959	$V_{93}(p.u.)$	0,985		
$V_{24}(p.u.)$	0,992	$V_{59}(p.u.)$	0,985	$V_{94}(p.u.)$	0,990		
$V_{25}(p.u.)$	1,050	$V_{60}(p.u.)$	0,993	$V_{95}(p.u.)$	0,980		
$V_{26}(p.u.)$	1,015	$V_{61}(p.u.)$	0,995	$V_{96}(p.u.)$	0,992		
$V_{27}(p.u.)$	0,968	$V_{62}(p.u.)$	0,998	$V_{97}(p.u.)$	1,011		
$V_{28}(p.u.)$	0,962	$V_{63}(p.u.)$	0,969	$V_{98}(p.u.)$	1,023		
$V_{29}(p.u.)$	0,963	$V_{64}(p.u.)$	0,984	$V_{99}(p.u.)$	1,010		
$V_{30}(p.u.)$	0,985	$V_{65}(p.u.)$	1,005	$V_{100}(p.u.)$	1,017		
$V_{31}(p.u.)$	0,967	$V_{66}(p.u.)$	1,050	$V_{101}(p.u.)$	0,991		
$V_{32}(p.u.)$	0,963	$V_{67}(p.u.)$	1,020	$V_{102}(p.u.)$	0,989		
$V_{33}(p.u.)$	0,971	$V_{68}(p.u.)$	1,003	$V_{103}(p.u.)$	1,010		
$V_{34}(p.u.)$	0,984	$V_{69}(p.u.)$	1,035	$V_{104}(p.u.)$	0,971		
$V_{35}(p.u.)$	0,980	$V_{70}(p.u.)$	0,984	$V_{105}(p.u.)$	0,965		

Πίνακας 5.17 Εκτιμώμενες τιμές μέτρων τάσεων ζυγών για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

Σε κάθε σενάριο στο τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας υπολογίζονται τα σφάλματα εκτίμησης από τα οποία φαίνεται πόσο αποκλίνει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης από το πραγματικό. Οι δείκτες αυτοί αφορούν τόσο τα μέτρα όσο και τις φασικές γωνίες των φασιθετών τάσης των ζυγών και ορίζονται ως εξής:

$$E_{ang} = \sum_{i=1}^{N} \left(\delta_{i,est} - \delta_{i,pf} \right)^2$$
(5.34)

$$E_{mag} = \sum_{1}^{N} \left(V_{i,est} - V_{i,pf} \right)^2$$
(5.35)

όπου $\delta_{i,est}$, $\delta_{i,pf}$, $V_{i,est}$ και $V_{i,pf}$ είναι οι φασικές γωνίες και τα μέτρα τάσεων των εκτιμώμενων και αληθών τιμών των διανυσμάτων κατάστασης του ζυγού *i*, αντίστοιχα.

Επιπλέον εισάγεται ως πρόσθετο μέτρο ακρίβειας, το κανονικοποιημένο σφάλμα, το οποίο ορίζεται ως το σχετικό σφάλμα του διανύσματος κατάστασης σε σχέση με το πραγματικό διάνυσμα υπολογισμένο με την ευκλείδεια νόρμα. Έτσι:

$$NE_{ang} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{1}^{N} (\delta_{i,est} - \delta_{i,pf})^{2}}}{\sqrt{\sum_{1}^{N} \delta_{i,pf}^{2}}}\right) \cdot 100\%$$
(5.36)
$$\left(\sqrt{\sum_{1}^{N} (V_{i,est} - V_{i,pf})^{2}}\right)$$

$$NE_{mag} = \left(\frac{\sqrt{\sum_{1}^{N} (V_{i,est} - V_{i,pf})^{2}}}{\sqrt{\sum_{1}^{N} V_{i,pf}}^{2}}\right) \cdot 100\%$$
(5.37)

Συνολικά, οι τιμές των παραπάνω δεικτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.18.

Δείκτης	Τιμή
E_{ang}	0,002482341
$E_{\scriptscriptstyle mag}$	0,0000058
NE_{ang} (%)	0,02587513
NE_{mag} (%)	0,00705864

Πίνακας 5.18 Ποιοτικοί δείκτες εκτίμησης κατάστασης για το δίκτυο ΙΕΕΕ-118

5.10.1.2 Προσομοίωση με θεώρηση εσφαλμένων μετρήσεων

Το δίκτυο και τα συστήματα μέτρησης των περιπτώσεων 2, 3 και 4 της Ενότητας 5.10.1.1 χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και εντοπισμό των εσφαλμένων μετρήσεων. Όταν εισάγεται ένα μεγάλο σφάλμα στην μέτρηση *i*, η μετρούμενη τιμή δίνεται ως $z_i^{meas} = z_i^{true} + b_i \sigma_i$, όπου b_i συντελεστής σφάλματος της τυπικής απόκλισης σ_i . Ο Πίνακας 5.19 παρουσιάζει τα σφάλματα για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση.

Ένας κύκλος επιτυχημένων εκτελέσεων της εκτίμησης κατάστασης πραγματοποιείται μέχρι να εντοπιστούν και εξουδετερωθούν όλες οι εσφαλμένες μετρήσεις. Τα πέντε μεγαλύτερα κανονικοποιημένα υπόλοιπα για κάθε περίπτωση εμφανίζονται στους Πίνακες
5.20, 5.21 και 5.22, αντίστοιχα. Μετά τον επιτυχή εντοπισμό και εξουδετέρωση των μετρήσεων όλα τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα είναι μικρότερα του 3.

Περίπτωση	Εσφαλμένες Μετρήσεις	Προστιθέμενος θόρυβος
2	P_{4-7}, I_{2-3}	$-4,6\sigma_{P_{4-7}}, -4,4\sigma_{I_{2-3}}$
3	P_3, I_{7-4}	$-4,6\sigma_{P_3}, 4,6\sigma_{I_{7-4}}$
4	$P_{10-11}, \ \theta_{6-5}$	$11\sigma_{P_{10-11}}, -5,5\sigma_{\theta_{6-5}}$

Πίνακας 5.19 Εσφαλμένες μετρήσεις για όλες τις περιπτώσεις του δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Πίνακας 5.20 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για την περίπτωση 2 του δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (3 ^η εκτέλεση)
I ₂₋₃	-5,2737927	<i>P</i> ₄₋₇	-3,8433749	<i>P</i> ₁₂₋₁₃	-1,5652712
<i>P</i> ₃	-4,4937954	<i>I</i> ₇₋₄	2,2851059	<i>P</i> ₁₃	-1,5612857
P ₄₋₇	-4,0267047	V_9	1,8246539	δ_2	1,4128903
I ₆₋₅	2,4050491	<i>P</i> ₁₂₋₁₃	-1,4806201	Q_3	1,3966393
P ₁₃	-1,7021527	<i>P</i> ₁₃	-1,4752576	<i>P</i> ₁₃₋₁₄	-1,3499825

Πίνακας 5.21 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για την περίπτωση 3 του δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (3 ^η εκτέλεση)
<i>I</i> ₇₋₄	3,9644529	<i>P</i> ₃	-3,0451822	θ_{6-5}	-1,5243909
<i>P</i> ₃	-3,0698754	<i>I</i> ₂₋₃	-2,5927956	θ_{9-10}	1,5241162
P_{4-9}	-2,1948656	Q_{10-11}	-1,6682899	Q_{10-11}	-1,4420463
θ_{9-10}	1,9296083	θ_{6-5}	-1,6504320	θ_{6-13}	1,2587065
θ_{6-11}	-1,9214778	$ heta_{9-10}$	1,6275999	P ₂₋₃	1,2265944

Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (3 ^η εκτέλεση)
θ_{6-5}	-4,2000287	<i>P</i> ₁₀₋₁₁	3,5264595	<i>I</i> ₆₋₁₂	-1,0909473
<i>P</i> ₁₀₋₁₁	3,2141597	<i>P</i> ₆₋₁₃	-2,6530376	P_5	-1,0365171
$ heta_{9-10}$	3,0752578	θ_{6-11}	2,6360537	<i>I</i> ₂₋₁	0,9183223
θ_{6-11}	-2,9552111	θ_{2-3}	-2,5756068	<i>I</i> ₂₋₄	0,9150354
θ_{9-4}	2,8519842	θ_{2-1}	2,3207849	V_6	-0,8770409

Πίνακας 5.22 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για την περίπτωση 4 του δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών

Έστω το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών και η μετρητική διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Εάν υποτεθεί ένα μεγάλο τυχαίο σφάλμα στη μέτρηση αέργου ροής ισχύος Q_{5-3} , τότε η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται με δύο διαδοχικές εκτελέσεις του αλγορίθμου. Τα πέντε πρώτα κανονικοποιημένα υπόλοιπα σε κάθε εκτέλεση παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.23. Οι ποιοτικοί δείκτες όπως ορίζονται από τις εξισώσεις (5.34)-(5.37), μετά την εκκαθάριση του σφάλματος εμφανίζονται στον Πίνακα 5.24.

Πίνακας 5.23 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)
Q_{5-3}	3,2456942	<i>Q</i> _{18–19}	2,4746325
P ₂₆₋₂₅	3,0321643	P ₂₆₋₂₅	2,2502197
<i>Q</i> _{18–19}	2,4327191	<i>P</i> ₁₂₋₇	2,0931128
Q_{25-23}	2,2459183	<i>Q</i> _{19–34}	2,0526924
<i>P</i> ₁₂₋₇	2,2356792	Q_{64-65}	1,9449251

Πίνακας 5.24 Ποιοτικοί δείκτες εκτίμησης κατάστασης μετά την εκκαθάριση

σφάλματος για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

Δείκτης	Τιμή
E_{ang}	0,00423641
E_{mag}	0,0000025
NE_{ang} (%)	0,02765580
NE_{mag} (%)	0,00469919

5.10.2 Εκτίμηση κατάστασης με ισοτικούς περιορισμούς και θεώρηση μετρήσεων PMU και μηδενικών εγχύσεων

Ο ραγδαίος ρυθμός με τον οποίο τοποθετούνται μονάδες PMU, τις έχει καταστήσει ένα βασικό και αναπόσπαστο εργαλείο για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού συστήματος. Προς το παρόν και παρά την δυναμική τους να βελτιώνουν τον έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος, οι μονάδες PMU δε μπορούν να αντικαταστήσουν τα συστήματα SCADA. Όμως, όλα τα στοιχεία δείχνουν ότι στο εγγύς μέλλον, όπου οι συσκευές αυτές θα αποτελέσουν μόνιμο εξοπλισμό για την παρακολούθηση τα γύνει πραγματικότητα.

Υπ' αυτό το πρίσμα, στο συγκεκριμένο εδάφιο διατυπώνονται και συγκρίνονται τρεις διαφορετικοί εκτιμητές κατάστασης οι οποίοι περιλαμβάνουν μόνο μονάδες PMU και μηδενικές εγχύσεις. Οι μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος που παρέχουν οι μονάδες PMU εκφράζονται είτε σε καρτεσιανές είτε σε πολικές συντεταγμένες. Δε χρησιμοποιείται κάποιος συγκεκριμένος ζυγός ως ζυγός ταλάντωσης, αφού η αναφορά μας καθορίζεται από το σύστημα GPS.

Το μοντέλο των μετρήσεων της εκτίμησης κατάστασης, για ένα σύστημα Ν ζυγών, διατυπώνεται σύμφωνα με την Ενότητα 5.5. Συγκεκριμένα, οι εξισώσεις που συσχετίζουν τις μετρήσεις με τους αγνώστους (καταστάσεις) ορίζονται ως z = h(x) + e υπό τους περιορισμούς c(x) = 0, όπου z είναι το $m \times 1$ διάνυσμα των μετρήσεων που προέρχονται από τις μονάδες PMU, h(.) είναι το $m \times 1$ διάνυσμα των εξισώσεων που εκφράζουν τις μετρήσεις z, x είναι το $n \times 1$ διάνυσμα κατάστασης το οποίο αποτελείται από τις γωνίες και τα μέτρα (ή το πραγματικό και φανταστικό μέρος) των τάσεων των ζυγών, e είναι το $m \times 1$ διάνυσμα των σφαλμάτων μέτρησης, c(.) είναι το $l \times 1$ διάνυσμα των εξισώσεων που μοντελοποιούν τους ισοτικούς περιορισμούς για τις μηδενικές εγχύσεις, m είναι ο αριθμός των μετρήσεων και n = 2N ο αριθμός των καταστάσεων τους συστήματος. Θεωρούμε ότι το διάνυσμα θορύβου ακολουθεί κανονική κατανομή E(e) = 0e uε και $cov(e) = E(ee^T) = R = diag \{\sigma_1^2, \dots, \sigma_m^2\},$ όπου σ_i είναι η τυπική απόκλιση της μέτρησης i. Ο εκτιμητής WLS θα ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση (5.18). Οι τρείς υπό εξέταση διατυπώσεις, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.25.

	Μέθοδος	1	2	3
Διάνυσμα Κατάστασης		RC	РС	РС
Φασιθέτης	Έκφραση Μέτρησης	RC PC PC		PC
Τάσης	Εξισώσεις	Πίνακας 5.3		
Φασιθέτης	Έκφραση Μέτρησης	RC	RC	PC
Ρεύματος Εξισώσεις			Πίνακας 5.3	
Περιορισμοί	Έκφραση Περιορισμού	RC	RC	RC

Πίνακας 5.25 Διατυπώσεις προτεινόμενων μεθόδων

όπου, RC Καρτεσιανές Συντεταγμένες και PC Πολικές Συντεταγμένες. Οι ισοτικοί περιορισμοί των μηδενικών εγχύσεων ρεύματος προκύπτουν θέτοντας το αριστερό μέλος των αντίστοιχων εξισώσεων ρεύματος ίσο με το μηδέν. Ο Πίνακας 5.26 παρουσιάζει τις Ιακωβιανές μήτρες *Η* και *C* για κάθε διατύπωση.

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο 1, οι εξισώσεις της εκτίμησης κατάστασης (5.21) γίνονται γραμμικές και επιλύονται με ένα μη επαναληπτικό τρόπο. Στις μεθόδους 2 και 3 οι εξισώσεις της

εκτίμησης κατάστασης (5.21) είναι μη γραμμικές και επομένως επιλύονται επαναληπτικά. Τα στοιχεία κάθε Ιακωβιανής παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.8.

Μέθοδος	Φασιθέτης Τάσης	Φασιθέτης Ρεύματος	Μηδενική Έγχυση	Διάνυσμα Κατάστασης	Ιακωβιανή <i>Η</i>	Ιακωβιανή <i>C</i>
1	RC	RC	RC	RC	$H_{RR} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_i}{\partial E} & \frac{\partial E_i}{\partial F} \\ \frac{\partial F_i}{\partial E} & \frac{\partial F_i}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F} \end{pmatrix}$	$C_{RR} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_{i,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{i,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{i,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{i,i}}{\partial F} \end{pmatrix}$
2	PC	RC	RC	PC	$H_{RP} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$	$C_{RP} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_{i,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{i,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$
3	PC	PC	RC	PC	$H_{PP} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial V_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V} \end{pmatrix}$	$C_{PP} = C_{RP}$

Πίνακας 5.26 Στοιχεία Ιακωβιανής μήτρας H και C για τις προτεινόμενες διατυπώσεις

Μετασχηματίζοντας τις άμεσες μετρήσεις (πολική μορφή) σε έμμεσες (καρτεσιανή μορφή), οι πραγματικές και φανταστικές συνιστώσες των φασιθετών τάσης και ρεύματος έχουν διασπορές οι οποίες συσχετίζονται, ως ακολούθως [146]:

$$R_{E_i,F_i} = \begin{pmatrix} \sigma_{E_i}^2 & \sigma_{E_i,F_i}^2 \\ \sigma_{E_i,F_i}^2 & \sigma_{F_i}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\cos\delta_i)^2 \sigma_{V_i}^2 + (V_i \sin\delta_i)^2 \sigma_{\delta_i}^2 & \sin\delta_i \cos\delta_i (\sigma_{V_i}^2 - V_i^2 \sigma_{\delta_i}^2) \\ \sin\delta_i \cos\delta_i (\sigma_{V_i}^2 - V_i^2 \sigma_{\delta_i}^2) & (\sin\delta_i)^2 \sigma_{V_i}^2 + (V_i \cos\delta_i)^2 \sigma_{\delta_i}^2 \end{pmatrix}$$
(5.38)

$$R_{I_{ij,r},I_{ij,i}} = \begin{pmatrix} \sigma_{I_{ij,r}}^2 & \sigma_{I_{ij,r},I_{ij,i}}^2 \\ \sigma_{I_{ij,r},I_{ij,i}}^2 & \sigma_{I_{ij,i}}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (\cos\theta_{ij})^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + (I_{ij}\sin\theta_{ij})^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2 & \sin\theta_{ij}\cos\theta_{ij}(\sigma_{I_{ij}}^2 - I_{ij}^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2) \\ \sin\theta_{ij}\cos\theta_{ij}(\sigma_{I_{ij}}^2 - I_{ij}^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2) & (\sin\theta_{ij})^2 \sigma_{I_{ij}}^2 + (I_{ij}\cos\theta_{ij})^2 \sigma_{\theta_{ij}}^2 \end{pmatrix} (5.39)$$

όπου $\sigma_{V_i}^2$, $\sigma_{\delta_i}^2$, $\sigma_{I_{ij}}^2$, $\sigma_{\theta_j}^2$, $\sigma_{E_i}^2$, $\sigma_{F_i}^2$, $\sigma_{I_{ij,r}}^2$, $\sigma_{I_{ij,r}}^2$ είναι οι διασπορές σφαλμάτων των V_i , δ_i , I_{ij} , θ_{ij} , E_i , F_i , $I_{ij,r}$, $I_{ij,r}$, $I_{ij,i}$, αντιστοίχως, και σ_{E_i,F_i}^2 , $\sigma_{I_{ij,r},I_{ij,i}}^2$ είναι οι συνδιασπορές των (E_i,F_i) και $(I_{ij,r},I_{ij,i})$, αντιστοίχως. Από τις εξισώσεις (5.38) και (5.39) προκύπτει ότι ο μετασχηματισμός μετρήσεων από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση των σφαλμάτων των μετρήσεων φασιθετών ρεύματος.

Ot προτεινόμενοι αλγόριθμοι ξεκινούν τους επαναληπτικούς υπολογισμούς τους είτε από ένα διάνυσμα στο οποίο όλες οι τάσεις ζυγών έχουν μοναδιαίο μέτρο (1,0 *p.u.*) και μηδενική φασική γωνία (0 deg), ή χρησιμοποιούν το φασιθέτη τάσης ενός ζυγού στον οποίο έχει τοποθετηθεί PMU ως μια αρχική εκτίμηση, και εκτιμούν το φασιθέτη τάσης ενός γειτονικού με αυτόν ζυγού, με τον οποίο συνδέεται μέσω μιας γραμμής, κάνοντας χρήση των υπαρχουσών μετρήσεων φασιθετών τάσης και ρεύματος και των γνωστών παραμέτρων της γραμμής. Θεωρώντας, στην περίπτωση της μεθόδου 3, μία γραμμή i-j στην οποία μετράται ο φασιθέτης ρεύματος \tilde{I}_{ij} , τότε εάν στην πρώτη ή σε κάποια επόμενη επανάληψη προκύψει $\tilde{V_i} - \tilde{V_j} \rightarrow 0$ με $g_{sij} = 0$, $b_{sij} \rightarrow 0$, η τιμή του φασιθέτη ρεύματος είναι αμελητέα ($\tilde{I}_{ij} \rightarrow 0$) και οι μερικές παράγωγοι των I_{ij} και απροσδιόριστες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.9. Αυτό οδηγεί σε προβλήματα σύγκλισης του αλγορίθμου λόγω απροσδιοριστίας στοιχείων στην Ιακωβιανή μήτρα H και την μήτρα συντελεστών F της εξίσωσης (5.21). Στις μεθόδους 1 και 2 δεν εμφανίζονται τέτοιου είδους προβλήματα. Μια λύση για να ξεπεραστεί το πιο πάνω πρόβλημα είναι η χρησιμοποίηση καρτεσιανών συντεταγμένεν για τους φασιθέτες ρεύματος $(I_{ij,r} = I_{ij,i} \rightarrow 0)$ για έναν αριθμό επαναλήψεων και μετά επαναφορά σε πολικές συντεταγμένες, όταν $\tilde{V_i} - \tilde{V_i} \neq 0$.

Ο έλεγχος και η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.6.

5.10.2.1 Προτεινόμενος αλγόριθμος για την επίλυση της εκτίμησης κατάστασης

Οι μετρήσεις PMU (φασιθέτες τάσης και ρεύματος) σχετίζονται με την $m \times n$ Ιακωβιανή μήτρα Η . Υποθέτουμε ότι q είναι η απώλεια βαθμού της $n \times n$ μήτρας κέρδους $G = H^T R^{-1} H$. Εάν q = 0, τότε η G είναι θετικά ορισμένη (ομαλή) και η μήτρα συντελεστών $F = \begin{pmatrix} G & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix}$ στην εξίσωση

(5.21) μπορεί να παραγοντοποιηθεί χωρίς αριθμητική οδήγηση (pivoting). Εάν $q \neq 0$, τότε η G είναι θετικά ημιορισμένη (μη ομαλή) και η F μπορεί να παραγοντοποιηθεί μόνο με αριθμητική οδήγηση [147]. Με σκοπό την αποφυγή της αριθμητικής οδήγησης, το γραμμικό σύστημα (5.21) επαναδιατυπώνεται όπως στην αναφορά [147]:

$$\begin{pmatrix} G_B(x^k) & C^T(x^k) & B^T R_B^{-1/2} \\ C(x^k) & 0 & 0 \\ \hline R_B^{-1/2} B & 0 & I_{q \times q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{k+1} - x^k \\ \lambda^{k+1} \\ -\mu^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^T(x^k) R^{-1}(z - h(x^k)) \\ -c(x^k) \\ 0 \end{pmatrix}$$
(5.40)

όπου B είναι μία διαστάσεων $q \times N$ Ιακωβιανή υπομήτρα που περιλαμβάνει q κρίσιμες ψευδομετρήσεις τάσης που αναφέρονται στις μετρήσεις PMU της Ιακωβιανής H, η μήτρα

 $G_B = G + B^T R_B^{-1} B$ είναι θετικά ορισμένη και ομαλή, R_B^{-1} είναι μια διαγώνια μήτρα βαρών μεγέθους ίσου προς τον αριθμό των μετρήσεων φασιθετών, και $I_{q \times q}$ είναι μια μοναδιαία μήτρα βαθμού q. Ως κρίσιμες μετρήσεις θεωρούνται εκείνες οι ψευδομετρήσεις τάσης στους q απομονωμένους ζυγούς (ροονησίδες ενός ζυγού) που προκύπτουν κατά τη διάρκεια κατασκευής των ροονησίδων. Χωρίζουμε τους κόμβους του γράφου γειτνίασης της μήτρας συντελεστών F_B της εξίσωσης (5.40), σε τρία σύνολα, G, C, και B που αντιστοιχούν στις γραμμές των μητρών G, C, και B αντίστοιχα. Είναι εφικτή μια αναδιάταξη P γραμμών και στηλών της F_B ώστε PF_BP^T να είναι παραγοντοποιήσιμη χωρίς αριθμητική οδήγηση, εάν κατά την διάρκεια της διαγραφής των κόμβων ικανοποιείται ο περιορισμός Bridson [148].

5.10.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Για τον έλεγχο της απόδοσης των τριών διαφορετικών διατυπώσεων εκτίμησης κατάστασης χρησιμοποιήθηκαν τα δίκτυα 14 και 118 ζυγών του ΙΕΕΕ. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος ελαχίστου βαθμού για τη μείωση των μη μηδενικών στοιχείων των αραιών μητρών συντελεστών LDL^T και το αποτέλεσμά του τροποιείται κατάλληλα ώστε να είναι σύμφωνο με τους περιορισμούς Bridson. Το όριο σύγκλισης τέθηκε ίσο προς 10^{-4} . Η μετρούμενη τιμή της μέτρησης i (z_i^{meas}) δημιουργείται προσθέτοντας στην πραγματική της τιμή, θόρυβο κανονικής κατανομής σύμφωνα με την εξίσωση $z_i^{meas} = z_i^{true} + rand × \sigma_i$, όπου η τυπική της απόκλιση σ_i υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση $\sigma_i = \frac{\mu_i \times error\%}{3 \times 100} = \frac{z_i^{true} \times error\%}{3 \times 100}$, θεωρώντας ότι η ανακρίβεια των μετρήσεων φασιθετών τάσης και ρεύματος είναι *error*% = 0,2.

Όταν οι μετρήσεις φασιθετών ρεύματος μετασχηματίζονται από πολική σε καρτεσιανή μορφή για να αποφύγουμε την απροσδιοριστία κάποιων στοιχείων της μήτρας κέρδους, όπως προτείνεται στην μέθοδο 3, το αντίστοιχο τμήμα της μήτρας R επαναπροσδιορίζεται χρησιμοποιώντας την θεωρία πολλαπλασιασμού της αβεβαιότητας [146]. Οι επαναλήψεις της μεθόδου χαρακτηρίζονται ως "παθολογικές" ή "υγιής" εξετάζοντας την τιμή της διαφοράς των μέτρων τάσης για τους κλάδους i - j στους οποίους $g_{sij} = 0$ και $b_{sij} \rightarrow 0$. Εάν αυτή η τιμή, στην αρχή κάθε επανάληψης, είναι μικρότερη ενός προκαθορισμένου κατώτατου ορίου, η επανάληψη χαρακτηρίζεται ως "παθολογική", διαφορετικά ως "υγιείς". Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν η τιμή κατωφλίου επιλέχθηκε ίση με 10^{-5} p.u. Για την εκκίνηση με επίπεδο διάνυσμα, η επανάληψη χαρακτηρίζεται αυτομάτως "παθολογική" και εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

Η τυπική απόκλιση των μεταβλητών κατάστασης (εκτιμώμενη έναντι αληθούς τιμής) χρησιμοποιείται ως δείκτης για την αξιολόγηση και σύγκριση των τριών μεθόδων:

$$\sigma_{i} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^{M} \left(x_{i,j}^{est} - x_{i}^{true} \right)^{2}}$$
(5.41)

Εφαρμόστηκαν προσομοιώσεις Monte Carlo ώστε να δημιουργηθούν αρκετά στατιστικά δεδομένα και να υπολογιστούν οι τυπικές αποκλίσεις σ_i. Η μέση τιμή των τυπικών αποκλίσεων σ_i όλων των καταστάσεων χρησιμοποιείται επίσης ως δείκτης αξιολόγησης:

$$\overline{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sigma_i}{N}$$
(5.42)

όπου, N ο αριθμός των καταστάσεων, M είναι ο αριθμός των προσομοιώσεων Monte Carlo, $x_{i,j}^{est}$ είναι η εκτιμώμενη τιμή της κατάστασης i για την Monte Carlo προσομοίωση j και x_i^{true} είναι η αληθής τιμή της κατάστασης i.

Αρχικά, θεωρούμε ότι τα δύο υπό εξέταση δίκτυα έχουν συγκεκριμένα συστήματα μετρήσεων τα οποία αποτελούνται από μηδενικές μετρήσεις έγχυσης και μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU χωρίς να εξασφαλίζεται η παρατηρησιμότητά τους. Συνολικά τα αρχικά συστήματα μετρήσεων, ο έλεγχος και η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εμφανίζονται στην Ενότητα 3.7.2. Τα συστήματα μετρήσεων των δύο υπό εξέταση δικτύων μετά την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, φαίνονται στον Πίνακα 5.27.

Δίκτυο	Μετρήσεις		
	Μηδενικές Εγχύσεις	PMUs	
IEEE-14	11	2, 6, 7, 9	
IEEE-118	30, 38, 64, 71 kai 81	2, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 24, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 73, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, και 114	

Πίνακας 5.27 Συστήματα μετρήσεων μετά την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας

Οι παρατηρήσιμες μετρητικές διατάξεις που προκύπτουν από την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των μεθόδων εκτίμησης κατάστασης. Τα δίκτυα με τις αντίστοιχες μετρητικές διατάξεις τους φαίνονται στα Σχήματα 5.15 και 5.16, αντίστοιχα.



Σχήμα 5.15 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 14 ζυγών παρουσία PMU και μηδενικών εγχύσεων



Σχήμα 5.16 Τοπολογία και σύστημα μετρήσεων δικτύου ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία PMU και μηδενικών εγχύσεων

Τα Σχήματα 5.17-5.20 παρουσιάζουν τις τυπικές αποκλίσεις σ_i των φασικών γωνιών και των μέτρων τάσης των ζυγών για κάθε μέθοδο και για κάθε εξεταζόμενο δίκτυο.



Σχήμα 5.17 Τυπική απόκλιση φασικών γωνιών τάσης, σε μοίρες, για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών



Σχήμα 5.18 Τυπική απόκλιση μέτρων τάσης, p.u., για το δίκτυο ΙΕΕΕ 14 ζυγών



Σχήμα 5.19 Τυπική απόκλιση φασικών γωνιών τάσης, σε μοίρες, για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών



Σχήμα 5.20 Τυπική απόκλιση μέτρων τάσης, p.u., για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

Ο Πίνακας 5.28 απαριθμεί τη μέση τυπική απόκλιση σ, την υπολογιστική ταχύτητα και τον αριθμό επαναλήψεων για κάθε μέθοδο και για κάθε εξεταζόμενο δίκτυο. Όπως μπορεί να φανεί, η μέθοδος 3 δίδει ακριβέστερες εκτιμήσεις σε σχέση με τις μεθόδους 1 και 2, οι οποίες παρέχουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα. Επίσης διαπιστώνεται ότι, κατά μέσον όρο, η μέθοδος 3 απαιτεί μεγαλύτερους χρόνους υπολογισμού από τις άλλες δύο μεθόδους. Ο Πίνακας 5.28 δεν λαμβάνει υπόψη το χρόνο για το μετασχηματισμό των μετρήσεων ρεύματος από πολικές σε καρτεσιανές και ο οποίος απαιτείται στις μεθόδους 1 και 2.

Δίκτυο	Μέθοδος Εκτίμησης Κατάστασης	Τυπική Απόκλιση $\overset{-}{\sigma}$	Μέσος Χρόνος CPU (s)	Μέσος Αριθμός Επαναλήψεων
	1	$1,20 \times 10^{-3}$	0,02	1
IEEE-14	2	$9,97 \times 10^{-4}$	0,03	4
	3	$7,49 \times 10^{-4}$	0,05	6
	1	3,11×10 ⁻³	0,67	1
IEEE-118	2	$10,2 \times 10^{-3}$	3,30	5
	3	$1,09 \times 10^{-3}$	5,39	7

Πίνακας 5.28 Δείκτης απόδοσης $\overline{\sigma}$ και μέσος χρόνος CPU για τα υπό εξέταση δίκτυα

5.10.3 Εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια

Στην ενότητα αυτή προτείνεται ένας εναλλακτικός εκτιμητής κατάστασης παρουσία συμβατικών και συγχρονισμένων μετρήσεων, ο οποίος βασίζεται σε μία προσέγγιση δύο σταδίων. Οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις της εκτίμησης κατάστασης σε πολλαπλά στάδια χρησιμοποιούν, αρχικά, έναν κλασσικό εκτιμητή που περιλαμβάνει τις συμβατικές μετρήσεις του μετρητικού συστήματος και σε δεύτερο στάδιο εισάγουν τα αποτελέσματά του σε έναν εκτιμητή που εμπεριέχει και τις συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών [150]-[155].

Δεδομένου ότι οι μονάδες PMU παρέχουν συγχρονισμένες μετρήσεις υψηλής ακρίβειας, ο προτεινόμενος αλγόριθμος ακολουθεί την αντίστροφη ακριβώς πορεία. Έτσι στο πρώτο στάδιο γίνεται χρήση μόνον μετρήσεων προερχόμενων από μονάδες PMU. Βάσει των μετρήσεων αυτών, πραγματοποιείται μια τοπική εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης των ζυγών που περιλαμβάνονται στις ροονησίδες που δημιουργούνται από τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος και τάσης. Στο επόμενο στάδιο, οι μεταβλητές κατάστασης του αρχικού σταδίου ενσωματώνονται ως μετρήσεις υψηλής ακρίβειας σε έναν κλασσικό εκτιμητή ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τις συμβατικές μετρήσεις της αρχικής μετρητικής διάταξης.

Το μετρητικό μοντέλο της εκτίμησης κατάστασης βασίζεται σε αυτό που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.2. Θεωρούμε ένα μετρητικό σύστημα το οποίο αποτελείται από m_1 μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος, προερχόμενες από μονάδες PMU, και m_2 συμβατικές μετρήσεις, προερχόμενες από το σύστημα SCADA, έτσι ώστε $m = m_1 + m_2$. Εάν z_1 είναι το $(m_1 \times 1)$ διάνυσμα των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών και x_1 είναι το $(n_1 \times 1)$ διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης που σχετίζονται με τους ζυγούς οι οποίοι εμπεριέχονται στις ροονησίδες που σχηματίζονται από τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος και τάσης, τότε το μοντέλο των μετρήσεων θα δίνεται από την σχέση:

$$z_1 = h_1(x) + e_1 \tag{5.43}$$

όπου e_1 το διάνυσμα θορύβου των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών $(m_1 \times 1)$ και $h_1(x)$ το διάνυσμα των συναρτήσεων μετρήσεων $(m_1 \times 1)$. Εάν οι μεταβλητές κατάστασης και οι μετρήσεις φασιθετών εκφράζονται σε καρτεσιανή μορφή, τότε οι συναρτήσεις $h_1(x)$ είναι γραμμικές και το πρόβλημα μεταπίπτει σε επίλυση μιας γραμμικής εκτίμησης κατάστασης με το μη επαναληπτικό σχήμα:

$$\hat{x}_{l} = G_{l}^{-1}(x_{l})H_{l}^{T}(x_{l})R_{l}^{-1}z_{l}$$
(5.44)

όπου με \hat{x}_1 συμβολίζεται η εκτίμηση του διανύσματος x_1 και με $H_1(x_1) = \frac{\partial h_1(x_1)}{\partial x_1}$, $G_1(x_1) = H_1^T(x_1)R_1^{-1}H_1(x_1)$ η Ιακωβιανή και η μήτρα κέρδους διαστάσεων $(m_1 \times n_1)$ και $(n_1 \times n_1)$, αντίστοιχα.

Όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες και οι μετρήσεις φασιθετών εκφράζονται σε καρτεσιανές, τότε το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης είναι μη γραμμικό. Η επίλυσή του γίνεται χρησιμοποιώντας το επαναληπτικό σχήμα:

$$G_{1}(x_{1}^{k})\Delta x_{1}^{k} = H_{1}^{T}(x_{1}^{k})R_{1}^{-1}\Delta z_{1}^{k}$$
(5.45)

όπου k ο δείκτης της επανάληψης, x_1^k η λύση κατά την επανάληψη k, $\Delta x_1^k = x_1^{k+1} - x_1^k$, $\Delta z_1^k = z_1 - h_1(x_1^k)$, και $H_1(x_1) = \frac{\partial h_1(x_1)}{\partial x_1}$ και $G_1(x_1^k) = H_1^T(x_1^k)R_1^{-1}H_1(x_1^k)$ η Ιακωβιανή και η μήτρα

κέρδους διαστάσεων $(m_1 imes n_1)$ και $(n_1 imes n_1)$, αντίστοιχα και R_1 η μήτρα διασποράς.

Το μετρητικό μοντέλο του δεύτερου σταδίου δίνεται από τη σχέση:

$$x_2 = h_2(x_2) + e_2 \tag{5.46}$$

Το διάνυσμα z_2 περιλαμβάνει τις μη συγχρονισμένες μετρήσεις που προέρχονται από το σύστημα SCADA (ενεργές και άεργες ροές και εγχύσεις, καθώς και μέτρα τάσεων) καθώς και τις εκτιμώμενες τάσεις από το πρώτο βήμα. Το διάνυσμα x_2 είναι το διευρυμένο διάνυσμα κατάστασης, εκπεφρασμένο σε πολικές συντεταγμένες, ενώ $h_2(x_2)$ είναι το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων και e_2 είναι το διάνυσμα του θορύβου των μετρήσεων. Οι εκτιμώμενες καταστάσεις του πρώτου σταδίου εισάγονται στο δεύτερο με πολύ μεγάλα βάρη. Το εκτιμώμενο διάνυσμα \hat{x}_2 υπολογίζεται από το σχήμα:

$$G_{2}(x_{2}^{k})\Delta x_{2}^{k} + C_{2}^{T}(x_{2}^{k})\lambda_{2}^{k+1} = H_{2}^{T}(x_{2}^{k})R_{2}^{-1}\Delta z_{2}^{k}$$

$$C_{2}(x_{2}^{k})\Delta x_{2}^{k} = -c_{2}(x_{2}^{k})$$
(5.47)

όπου k είναι ο δείκτης κάθε επανάληψης, $\Delta x_2^k = x_2^{k+1} - x_2^k$, $\Delta z_2^k = z_2 - h_2(x_2^k)$, x_2^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k, λ_2^k είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange στην επανάληψη

k,
$$H_2(x_2) = \frac{\partial h_2(x_2)}{\partial x_2}$$
 kai $C_2(x_2) = \frac{\partial c_2(x_2)}{\partial x_2}$ είναι Ιακωβιανές μήτρες,

 $G_2(x_2^k) = H_2^T(x_2^k)R_2^{-1}H_2(x_2^k)$ είναι η μήτρα κέρδους και R_2 η μήτρα διασποράς. Στο δεύτερο στάδιο το σύστημα θεωρείται ότι είναι παρατηρήσιμο.

Οι Ιακωβιανές μήτρες των μετρήσεων που αντιστοιχούν στο πρώτο και δεύτερο στάδιο εμφανίζονται στον Πίνακα 5.29, όπου RC οι καρτεσιανές και PC οι πολικές συντεταγμένες, αντίστοιχα. Τα στοιχεία κάθε Ιακωβιανής παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.8. Στο προτεινόμενο αλγόριθμο μπορεί να εφαρμοστεί ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με την βοήθεια του μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 5.4.2.

Στάδιο	Φασιθέτης	Φασιθέτης	Διάνυσμα	Ιακωβιανή Η
210010	Τάσης	Ρεύματος	Κατάστασης	
1	RC	RC	RC	$H_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_{i}}{\partial E} & \frac{\partial E_{i}}{\partial F} \\ \frac{\partial F_{i}}{\partial E} & \frac{\partial F_{i}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F} \end{pmatrix}$
1	PC	RC	PC	$H_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial V_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$
2			PC	$H_{2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial V_{i}}{\partial V} \end{pmatrix}$

Πίνακας 5.29 Στοιχεία Ιακωβιανής μήτρας H για τα δύο στάδια

5.10.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η απόδοση του αλγορίθμου δύο σταδίων εξετάστηκε χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες δύο διαφορετικές διατυπώσεις για τον εκτιμητή του πρώτου σταδίου:

- Συγχρονισμένες μετρήσεις και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες.
- Συγχρονισμένες μετρήσεις εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε πολικές συντεταγμένες.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο δίκτυο 57 ζυγών του ΙΕΕΕ [156], για την πρώτη περίπτωση, και στο δίκτυο 118 ζυγών του ΙΕΕΕ, για τη δεύτερη περίπτωση. Και οι δύο εκδοχές εφαρμόστηκαν σ' ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας 2383 ζυγών [157]. Το όριο σύγκλισης τέθηκε ίσο προς 10^{-3} . Η μετρούμενη τιμή για την μέτρηση i (z_i^{meas}) σχηματίζεται προσθέτοντας στην πραγματική τιμή της,

έναν κανονικά κατανεμημένο (Γκαουσιανό) θόρυβο σύμφωνα με την εξίσωση $z_i^{meas} = z_i^{true} + rand \times \sigma_i$, όπου η τυπική της απόκλιση σ_i υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$3\sigma_i = \frac{0.02 \times z_i^{true}}{FS_i} + 10^{-4}$$

όπου $z_i^{true} z_i$ και FS_i είναι η ακριβής τιμή και η ακρίβεια της μέτρησης i. Ως δείκτες αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου έχουν επιλεγεί αυτοί των εξισώσεων (5.34)-(5.37).

5.10.3.2 Εκτιμητής δύο σταδίων με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Θεωρούμε το δίκτυο 57 ζυγών του ΙΕΕΕ το οποίο περιλαμβάνει τη μετρητική διάταξη όπως αυτή του Πίνακα 5.30.

Πίνακας 5.30 Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 57 ζυγών του ΙΕΕΕ με συγχρονισμένες

μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες

	Μετρήσεις
	E_{18}, E_{22}, E_{56}
Same and subjects	F_{18}, F_{22}, F_{56}
2υγχρονισμένες (PMU)	$I_{18-4,r}, I_{18-19,r}, I_{22-21,r}, I_{22-23,r}, I_{22-38,r}, I_{56-40,r}, I_{56-41,r}, I_{56-42,r}, I_{56-57,r}$
	$I_{18-4,i}, I_{18-19,i}, I_{22-21,i}, I_{22-23,i}, I_{22-38,i}, I_{56-40,i}, I_{56-41,i}, I_{56-42,i}, I_{56-57,i}$
	$V_1, V_{6}, V_{11}, V_{24}, V_{41}, V_{49}$
	$P_{1-2}, P_{1-15}, P_{1-16}, P_{1-17}, P_{2-3}, P_{3-4}, P_{3-15}, P_{4-5}, P_{4-18}, P_{6-4}, P_{6-5}, P_{6-7}, P_{6-8}, P_{6-$
	$P_{7-8}, P_{7-29}, P_{8-9}, P_{9-10}, P_{9-12}, P_{9-13}, P_{9-55}, P_{10-12}, P_{10-51}, P_{11-9}, P_{11-13}, P_{11-41}, P_{11-43}, P_{12-13}, P_{13-13}, P_{13-13$
	$P_{12-16}, P_{12-17}, P_{13-14}, P_{13-15}, P_{14-15}, P_{14-46}, P_{15-45}, P_{18-19}, P_{19-20}, P_{21-20}, P_{21-22}, P_{22-23}, P_{22-38}, P_{23-38}, P_{33-16}, P_{33-16}$
	$P_{24-23}, P_{24-25}, P_{24-26}, P_{25-30}, P_{26-27}, P_{27-28}, P_{28-29}, P_{29-52}, P_{30-31}, P_{31-32}, P_{32-33}, P_{34-32}, P_{34-35}, P_{34-35}, P_{32-33}, P_{34-35}, P_{34-35}$
	$P_{35-36}, P_{36-37}, P_{36-40}, P_{37-38}, P_{37-39}, P_{38-44}, P_{38-48}, P_{39-57}, P_{40-56}, P_{41-42}, P_{41-43}, P_{41-11}, P_{41-56}, P_{41-44}, P_{41-44}$
	$P_{44-45}, P_{46-47}, P_{47-48}, P_{49-13}, P_{49-38}, P_{49-48}, P_{49-50}, P_{50-51}, P_{52-53}, P_{53-54}, P_{54-55}, P_{56-42}, P_{57-56}, P_{56-42}, P_{57-56}, P_{56-51}, P_{56-51}$
Συμβατικές	$Q_{1-2}, Q_{1-15}, Q_{1-16}, Q_{1-17}, Q_{2-3}, Q_{3-4}, Q_{3-15}, Q_{4-5}, Q_{4-18}, Q_{6-4}, Q_{6-5}, Q_{6-7},$
(SCADA)	$Q_{6-8}, Q_{7-8}, Q_{7-29}, Q_{8-9}, Q_{9-10}, Q_{9-12}, Q_{9-13}, Q_{9-55}, Q_{10-12}, Q_{10-51}, Q_{11-9}, Q_{11-13}, Q_{11-41}, Q_{11-41},$
	$Q_{11-43}, Q_{12-13}, Q_{12-16}, Q_{12-17}, Q_{13-14}, Q_{13-15}, Q_{14-15}, Q_{14-46}, Q_{15-45}, Q_{18-19}, Q_{19-20}, Q_{21-20}, Q_{21-20}$
	$Q_{21-22}, Q_{22-23}, Q_{22-38}, Q_{24-23}, Q_{24-25}, Q_{24-26}, Q_{25-30}, Q_{26-27}, Q_{27-28}, Q_{28-29}, Q_{29-52},$
	$Q_{30-31}, Q_{31-32}, Q_{32-33}, Q_{34-32}, Q_{34-35}, Q_{35-36}, Q_{36-37}, Q_{36-40}, Q_{37-38}, Q_{37-39}, Q_{38-44},$
	$Q_{38-48}, Q_{39-57}, Q_{40-56}, Q_{41-42}, Q_{41-43}, Q_{41-11}, Q_{41-56}, Q_{44-45}, Q_{46-47}, Q_{47-48}, Q_{49-13}, Q_{49-13}, Q_{41-43}, Q_{41-43}, Q_{41-43}, Q_{41-45}, Q_{44-45}, Q_{46-47}, Q_{47-48}, Q_{49-13}, Q_{49-13}, Q_{41-43}, Q_{41-43}, Q_{41-45}, Q_{44-45}, Q_{46-47}, Q_{47-48}, Q_{49-13}, Q_{49-13}$
	$Q_{49-38}, Q_{49-48}, Q_{49-50}, Q_{50-51}, Q_{52-53}, Q_{53-54}, Q_{54-55}, Q_{56-42}, Q_{57-56}$
	P_4
	Q_4
Περίσσεια Μετρήσεων	1,667

σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και συμβατικές μετρήσεις. Το μετρητικό σύστημα για το δίκτυο των 2383 ζυγών περιλαμβάνει 100 μονάδες μέτρησης φασιθετών, οι οποίες παρέχουν 100 μετρήσεις φασιθετών τάσης και 400 μετρήσεις φασιθετών ρεύματος. Στις συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνονται 50 μετρήσεις μέτρων τάσεων, 5806 μετρήσεις ενεργών και άεργων ροών ισχύος και 16 μετρήσεις ενεργών και άεργων εγχύσεων ζυγών. Τα αποτελέσματα του εκτιμητή και για τα δύο δίκτυα ελέγχονται μέσω των ποιοτικών δεικτών αξιολόγησης που αναφέρθηκαν παραπάνω (5.34 - 5.37) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.31. Οι δείκτες αυτοί δείχνουν ότι τα αποτελέσματα του προτεινόμενου εκτιμητή είναι πολύ κοντά σε αυτά της ροής φορτίου. Στον Πίνακα 5.32 παρουσιάζονται τα σφάλματα για το δίκτυο των 57 ζυγών. Η ανίχνευση και ο εντοπισμός τους για το δίκτυο των 2383 ζυγών παραλείπονται λόγω μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων και επαναλήψεων για την εκκαθάρισή τους. Ο χρόνος εκτέλεσης των επιμέρους σταδίων, όπως και ο συνολικός χρόνος για τα δύο δίκτυα, εμφανίζονται στον Πίνακα 5.33.

Πίνακας 5.31 Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγχρονισμένες

,	,	10		0.2	· ·	,		,
LICTON COLC CTO	- TO(0)TO	6770A10	1/1/1		nTCC	1/0705705	$n \sim c_1 c_{\pi} c_{\alpha}$	$\Delta \alpha \sigma = 11 c 1 c c$
	1111111111	-0 (10) (0)	NU.L	116.10117	VIII LE.			лланс.vс.
prote 10019 010		0.00000		pro corp.				
				• •				

Δίκτυο	E_{ang} (deg)	E_{mag} (V)	NE_{ang} (%)	NE_{mag} (%)
IEEE-57	0,0000005767	0,0000004674	0,0468780096	0,0091168285
Polish-2383	0,0000278000	0,0000119000	0,0244023882	0,0071175164

σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Πίνακας 5.32 Ανάλυση	εσφαλμένων	μετρήσεων για το	ο δίκτυο IEEE 57 ζυγών
----------------------	------------	------------------	------------------------

10	Στάδιο		20 Στ	άδιο	
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)
<i>I</i> _{4–18,r}	1,40125996	Q_{57-56}	3,49713245	V ₄₂	-2,75604938
<i>I</i> _{4–18,i}	-1,40125496	δ_{42}	-2,93001744	P ₄₉₋₄₈	2,65519487
<i>I</i> _{22–38,i}	-1,07984852	V ₅₇	-2,88232728	Q_{11-41}	-2,60528828
<i>I</i> _{22–38,r}	1,07920069	Q_{11-41}	-2,71075958	P ₄₉₋₁₃	-2,60367024
E ₂₂	0,84461948	P ₄₉₋₄₈	2,57772036	Q_{8-9}	-2,31657591

Πίνακας 5.33 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Δίκτυο	Χρόνος εκτέλεσης 1ου σταδίου (s)	Χρόνος εκτέλεσης 2ου σταδίου (s)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)
IEEE-57	0,199	0,206	0,559
Polish-2383	22,749	375,153	474,200

5.10.3.3 Εκτιμητής δύο σταδίων με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Η εναλλακτική αυτή προσέγγιση εφαρμόσθηκε στο δίκτυο 118 ζυγών του ΙΕΕΕ και σ' ένα Πολωνικό δίκτυο 2383 ζυγών. Η μετρητική διάταξη του πρώτου δικτύου παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.34.

Πίνακας 5.34 Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με

συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε

καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

	Μετρήσεις
	$V_{23,r}, V_{25,r}, V_{27,r}, V_{30,r}, V_{34,r}, V_{40,r}, V_{61,r}, V_{65,r}, V_{68,r}, V_{110,r}$
	$V_{23,i}, V_{25,i}, V_{27,i}, V_{30,i}, V_{34,i}, V_{40,i}, V_{61,i}, V_{65,i}, V_{68,i}, V_{110,i}$
	$I_{23-22,r}, I_{23-24,r}, I_{23-25,r}, I_{23-32,r}, I_{25-23,r}, I_{25-26,r}, I_{25-27,r}, I_{27-25,r},$
	$I_{27-28,r}, I_{27-32,r}, I_{27-115,r}, I_{30-8,r}, I_{30-17,r}, I_{30-26,r}, I_{30-38,r}, I_{34-19,r},$
Συγχρονισμένες	$I_{34-36,r}, I_{34-37,r}, I_{34-43,r}, I_{40-37,r}, I_{40-39,r}, I_{40-41,r}, I_{40-42,r}, I_{61-59,r},$
	$I_{61-60,r}, I_{61-62,r}, I_{61-64,r}, I_{65-38,r}, I_{65-64,r}, I_{65-66,r}, I_{65-68,r}, I_{68-65,r},$
(PMU)	$I_{68-69,r}, I_{68-81,r}, I_{68-116,r}, I_{110-103,r}, I_{110-109,r}, I_{110-111,r}, I_{110-112,r}$
	$I_{23-22,i}, I_{23-24,i}, I_{23-25,i}, I_{23-32,i}, I_{25-23,i}, I_{25-26,i}, I_{25-27,i}, I_{27-25,i},$
	$I_{27-28,i}, I_{27-32,i}, I_{27-115,i}, I_{30-8,i}, I_{30-17,i}, I_{30-26,i}, I_{30-38,i}, I_{34-19,i},$
	$I_{34-36,i}, I_{34-37,i}, I_{34-43,i}, I_{40-37,i}, I_{40-39,i}, I_{40-41,i}, I_{40-42,i}, I_{61-59,i},$
	$I_{61-60,i}, I_{61-62,i}, I_{61-64,i}, I_{65-38,i}, I_{65-64,i}, I_{65-66,i}, I_{65-68,i}, I_{68-65,i},$
	$I_{68-69,i}, I_{68-81,i}, I_{68-116,i}, I_{110-103,i}, I_{110-109,i}, I_{110-111,i}, I_{110-112,i}$

Πίνακας 5.34 (συνέχεια) Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

	Μετρήσεις
	$P_{1-2}, P_{1-3}, P_{2-12}, P_{3-12}, P_{4-5}, P_{5-6}, P_{6-7}, P_{7-12}, P_{8-5}, P_{8-9}, P_{8-30}, P_{9-10},$
	$P_{12-14}, P_{12-16}, P_{12-117}, P_{13-15}, P_{14-15}, P_{15-17}, P_{15-33}, P_{16-17}, P_{17-18}, P_{17-31},$
	$P_{17-113}, P_{20-21}, P_{21-22}, P_{22-23}, P_{23-24}, P_{23-25}, P_{32-32}, P_{24-70}, P_{24-72}, P_{25-27}, P_{25-27$
	$P_{26-25}, P_{26-30}, P_{27-28}, P_{27-32}, P_{27-115}, P_{28-29}, P_{29-31}, P_{30-17}, P_{30-38}, P_{31-32},$
	$P_{32-113}, P_{32-114}, P_{33-37}, P_{34-36}, P_{34-37}, P_{34-43}, P_{35-36}, P_{35-37}, P_{37-39}, P_{37-40},$
	$P_{38-37}, \ P_{38-65}, \ P_{39-40}, \ P_{40-41}, \ P_{43-44}, \ P_{44-45}, \ P_{45-46}, \ P_{45-49}, \ P_{46-47}, \ P_{46-48},$
5 0 ($P_{47-49}, \ P_{47-69}, \ P_{48-49}, \ P_{49-50}, \ P_{49-51}, \ P_{49-54}, \ P_{49-66}, \ P_{49-69}, \ P_{50-57}, \ P_{51-52},$
Συμβατικές (SCADA)	$P_{51-58}, P_{52-53}, P_{53-54}, P_{54-55}, P_{54-56}, P_{54-59}, P_{55-56}, P_{55-59}, P_{56-57}, P_{56-58},$
(SCIIDII)	$P_{56-59}, P_{59-60}, P_{59-61}, P_{60-61}, P_{63-59}, P_{63-64}, P_{64-61}, P_{64-65}, P_{65-66}, P_{65-68},$
	$P_{66-67}, P_{68-69}, P_{68-81}, P_{68-116}, P_{69-70}, P_{69-75}, P_{69-77}, P_{70-71}, P_{70-74}, P_{70-75},$
	$P_{71-72}, P_{71-73}, P_{74-75}, P_{75-77}, P_{75-118}, P_{76-77}, P_{76-118}, P_{77-78}, P_{77-80}, P_{77-82},$
	$P_{78-79}, P_{79-80}, P_{80-96}, P_{80-97}, P_{80-98}, P_{80-99}, P_{81-80}, P_{82-83}, P_{82-96}, P_{83-84},$
	$P_{83-85}, P_{84-85}, P_{85-86}, P_{85-88}, P_{85-89}, P_{86-87}, P_{88-89}, P_{89-90}, P_{89-92}, P_{90-91},$
	$P_{91-92}, P_{92-93}, P_{92-94}, P_{92-100}, P_{92-102}, P_{93-94}, P_{94-95}, P_{94-96}, P_{94-100}, P_{95-96},$
	$P_{96-97}, P_{98-100}, P_{99-100}, P_{100-101}, P_{100-104}, P_{100-106}, P_{101-102}, P_{104-105}, P_{105-106}, P_{105-$
	$P_{105-107}, P_{105-108}, P_{106-107}, P_{108-109}, P_{109-110}, P_{110-111}, P_{110-112}, P_{114-115}$
	$Q_{1-2}, Q_{1-3}, Q_{2-12}, Q_{3-12}, Q_{4-5}, Q_{5-6}, Q_{6-7}, Q_{7-12}, Q_{8-5}, Q_{8-9}, Q_{8-30}, Q_{9-10},$
	$Q_{12-14}, Q_{12-16}, Q_{12-117}, Q_{13-15}, Q_{14-15}, Q_{15-17}, Q_{15-33}, Q_{16-17}, Q_{17-18}, Q_{17-31},$
	$Q_{17-113}, Q_{20-21}, Q_{21-22}, Q_{22-23}, Q_{23-24}, Q_{23-25}, Q_{32-32}, Q_{24-70}, Q_{24-72}, Q_{25-27},$
	$Q_{26-25}, Q_{26-30}, Q_{27-28}, Q_{27-32}, Q_{27-115}, Q_{28-29}, Q_{29-31}, Q_{30-17}, Q_{30-38}, Q_{31-32},$
	$Q_{32-113}, Q_{32-114}, Q_{33-37}, Q_{34-36}, Q_{34-37}, Q_{34-43}, Q_{35-36}, Q_{35-37}, Q_{37-39}, Q_{37-40},$
	$Q_{38-37}, Q_{38-65}, Q_{39-40}, Q_{40-41}, Q_{43-44}, Q_{44-45}, Q_{45-46}, Q_{45-49}, Q_{46-47}, Q_{46-48},$
	$Q_{47-49}, Q_{47-69}, Q_{48-49}, Q_{49-50}, Q_{49-51}, Q_{49-54}, Q_{49-66}, Q_{49-69}, Q_{50-57}, Q_{51-52},$
$\Sigma_{m} = 0$	$Q_{51-58}, Q_{52-53}, Q_{53-54}, Q_{54-55}, Q_{54-56}, Q_{54-59}, Q_{55-56}, Q_{55-59}, Q_{56-57}, Q_{56-58},$
20μρατικές (SCADA)	$Q_{56-59}, Q_{59-60}, Q_{59-61}, Q_{60-61}, Q_{63-59}, Q_{63-64}, Q_{64-61}, Q_{64-65}, Q_{65-66}, Q_{65-68},$
(~~~~~~~~~)	$Q_{66-67}, Q_{68-69}, Q_{68-81}, Q_{68-116}, Q_{69-70}, Q_{69-75}, Q_{69-77}, Q_{70-71}, Q_{70-74}, Q_{70-75},$
	$Q_{71-72}, Q_{71-73}, Q_{74-75}, Q_{75-77}, Q_{75-118}, Q_{76-77}, Q_{76-118}, Q_{77-78}, Q_{77-80}, Q_{77-82},$
	$Q_{78-79}, Q_{79-80}, Q_{80-96}, Q_{80-97}, Q_{80-98}, Q_{80-99}, Q_{81-80}, Q_{82-83}, Q_{82-96}, Q_{83-84},$
	$Q_{83-85}, Q_{84-85}, Q_{85-86}, Q_{85-88}, Q_{85-89}, Q_{86-87}, Q_{88-89}, Q_{89-90}, Q_{89-92}, Q_{90-91},$
	$Q_{91-92}, Q_{92-93}, Q_{92-94}, Q_{92-100}, Q_{92-102}, Q_{93-94}, Q_{94-95}, Q_{94-96}, Q_{94-100}, Q_{95-96},$
	$Q_{96-97}, Q_{98-100}, Q_{99-100}, Q_{100-101}, Q_{100-104}, Q_{100-106}, Q_{101-102}, Q_{104-105}, Q_{105-106},$
	$Q_{105-107}, Q_{105-108}, Q_{106-107}, Q_{108-109}, Q_{109-110}, Q_{110-111}, Q_{110-112}, Q_{114-115}$
	P5
	Q_5
Περίσσεια Μετρήσεων	1,610

Το μετρητικό σύστημα για το δίκτυο των 2383 ζυγών περιλαμβάνει 10 μονάδες μέτρησης φασιθετών οι οποίες παρέχουν 10 μετρήσεις φασιθετών τάσης κα 52 μετρήσεις φασιθετών ρεύματος, αντίστοιχα. Στις συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνονται 5468 μετρήσεις ενεργών και άεργων ροών ισχύος και 1104 μετρήσεις ενεργών και άεργων εγχύσεων ζυγών. Η συνολική περίσσεια του συστήματος ισούται με 1,392.

Ο Πίνακας 5.35 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου εκτιμητή χρησιμοποιώντας και πάλι ποιοτικούς δείκτες αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης είναι πολύ κοντά σε αυτό της αληθούς τιμής του όπως αυτή προκύπτει από την ροή φορτίου.

Στον Πίνακα 5.36 παρουσιάζονται τα σφάλματα για το δίκτυο των 118 ζυγών. Τα αποτελέσματα της ανίχνευσης και του εντοπισμού για το δίκτυο των 2383 ζυγών δεν παρουσιάζονται για λόγους οικονομίας χώρου. Ο χρόνος εκτέλεσης των επιμέρους σταδίων, όπως και ο συνολικός χρόνος για τα δύο δίκτυα, εμφανίζονται στον Πίνακα 5.37.

Πίνακας 5.35 Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγχρονισμένες

μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και

μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Δίκτυο	E_{ang} (deg)	E_{mag} (V)	NE_{ang} (%)	NE_{mag} (%)
IEEE-57	0,0000034466	0,0000015287	0,0451966889	0,0115436940
Polish-2383	0,0000720487	0,0000209666	0,0385485991	0,0094335417

	1ο Σ	20	Στάδιο		
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)
V _{68,r}	-3,05883638	<i>I</i> _{23–25,i}	2,55781570	Q_{35-36}	2,94947347
I _{23–25,i}	2,58167157	I _{27–32,i}	2,39575367	<i>Q</i> _{35–37}	-2,94550778
<i>I</i> _{27–32,i}	2,36969980	I _{23-32,i}	-2,39463445	<i>Q</i> ₃₄₋₃₆	-2,93706684
<i>I</i> _{23–32,i}	-2,36846314	I _{25-27,i}	1,89386071	δ_{25}	-2,50090815
I _{25-27,i}	1,94589481	V _{30,r}	-1,61181218	δ_{41}	2,48182139

Πίνακας 5.36 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών

Πίνακας 5.37 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Δίκτυο	Χρόνος Εκτέλεσης 1ου Σταδίου(s)	Χρόνος Εκτέλεσης 2ου Σταδίου (s)	Συνολικός Χρόνος Εκτέλεσης (s)
IEEE-118	0,318	0,481	0,927
Polish-2383	7,233	12,117	83,256

5.10.4 Εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια παρουσία ισοτικών περιορισμών

Το μαθηματικό μοντέλο της εκτίμησης κατάστασης σε δύο στάδια, με ισοτικούς περιορισμολυς, βασίζεται στην ανάλυση που προηγήθηκε στις Ενότητες 5.5 και 5.10.3. Ας θεωρήσουμε το τυπικό μοντέλο π μίας γραμμής i - j που συνδέει το ζυγό i, στον οποίο είναι εγκατεστημένη μονάδα PMU, με το ζυγό j. Εάν, αρχικά, υπάρχει ένα σύνολο μονάδων PMU τοποθετημένο στο δίκτυο, το μετρητικό μοντέλο του πρώτου σταδίου μπορεί να είναι γραμμικό ή μη γραμμικό, ανάλογα με την έκφραση των συγχρονισμένων μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης.

Θεωρώντας ότι οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες (E_i, F_i) το μετρητικό μοντέλο είναι γραμμικό και δίνεται από τις σχέσεις:

$$z_1 = H_1 x_1 + e_1$$

$$C_1 x_1 = 0$$
(5.48)

όπου z_1 είναι το διάνυσμα των συγχρονισμένων μετρήσεων και x_1 το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης. Με H_1 συμβολίζεται η Ιακωβιανή μήτρα που συσχετίζει μετρήσεις με μεταβλητές κατάστασης, ενώ e_1 είναι το διάνυσμα του θορύβου των μετρήσεων και C_1 η Ιακωβιανή μήτρα των ζυγών μηδενικής έγχυσης ρεύματος που θεωρούνται ως ισοτικοί περιορισμοί. Το εκτιμώμενο διάνυσμα \hat{x}_1 υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$H_1^T R_1^{-1} H_1 \hat{x}_1 + C_1^T \hat{\lambda}_1 = H_1^T R_1^{-1} z_1$$

$$C_1 \hat{x}_1 = 0$$
(5.49)

Εάν το σύστημα είναι μη παρατηρήσιμο, η μήτρα $\begin{pmatrix} H_1 \\ C_1 \end{pmatrix}$ δε θα είναι πλήρους βαθμού. Προκειμένου η

 H_1 να καταστεί πλήρους βαθμού, προστίθεται μία συγχρονισμένη ψευδομέτρηση τάσης μηδενικής τιμής σε κάθε μη παρατηρήσιμο ζυγό του δικτύου. Αυτές οι ψευδομετρήσεις είναι κρίσιμες για την παρατηρησιμότητα του δικτύου, διασφαλίζοντας ότι το εκτιμώμενο διάνυσμα \hat{x}_1 παραμένει ανεπηρέαστο. Μόνον οι εκτιμώμενες καταστάσεις των παρατηρήσιμων ζυγών εισάγονται στο δεύτερο στάδιο.

Αντίστοιχα, όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες (V_i, δ_i) το μετρητικό μοντέλο είναι μη γραμμικό και δίνεται από τις σχέσεις:

$$z_{1} = h_{1}(x_{1}) + e_{1}$$

$$c_{1}(x_{1}) = 0$$
(5.50)

Με z_1 συμβολίζεται το διάνυσμα των μετρήσεων, με $h_1(x_1)$ το διάνυσμα των συναρτήσεων που συνδέουν μετρήσεις με μεταβλητές κατάστασης, e_1 το διάνυσμα θορύβου των μετρήσεων και $c_1(x_1)$ το διάνυσμα των συναρτήσεων των ψευδομετρήσεων στους ζυγούς μηδενικής έγχυσης που μοντελοποιούν τους ισοτικούς περιορισμούς. Για τον προσδιορισμό του διανύσματος κατάστασης επιλύεται επαναληπτικά το σύστημα:

$$G_{1}(x_{1}^{k})\Delta x_{1}^{k} + C_{1}^{T}(x_{1}^{k})\lambda_{1}^{k+1} = H_{1}^{T}(x_{1}^{k})R_{1}^{-1}\Delta z_{1}^{k}$$

$$C_{1}(x_{1}^{k})\Delta x_{1}^{k} = -c_{1}(x_{1}^{k})$$
(5.51)

όπου k είναι ο δείκτης κάθε επανάληψης, $\Delta x_1^k = x_1^{k+1} - x_1^k$, $\Delta z_1^k = z_1 - h_1(x_1^k)$, x_1^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k, λ_1^k είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange στην επανάληψη k, $H_1(x_1) = \frac{\partial h_1(x_1)}{\partial x_1}$ και $C_1(x_1) = \frac{\partial c_1(x_1)}{\partial x_1}$ είναι οι Ιακωβιανές μήτρες, $G_1(x_1^k) = H_1^T(x_1^k)R_1^{-1}H_1(x_1^k)$ η μήτρα κέρδους και R_1 η μήτρα διασποράς.

Το μετρητικό μοντέλο του δεύτερου σταδίου δίνεται από τις σχέσεις:

$$z_2 = h_2(x_2) + e_2$$

$$c_2(x_2) = 0$$
(5.52)

Το διάνυσμα z_2 περιλαμβάνει τις μη συγχρονισμένες μετρήσεις προερχόμενες από το σύστημα SCADA (ενεργές κα άεργες ροές και εγχύσεις, καθώς και μέτρα τάσεων) και τις εκτιμημούμενες τάσεις από το πρώτο βήμα. Το διάνυσμα x_2 είναι το διευρυμένο διάνυσμα κατάστασης, εκπεφρασμένο σε πολικές συντεταγμένες, ενώ $h_2(x_2)$ είναι το διάνυσμα των μη γραμμικών συναρτήσεων, e_2 είναι το διάνυσμα θορύβου των μετρήσεων και $c_2(x_2)$ το διάνυσμα των συναρτήσεων που μοντελοποιούν τις μηδενικές εγχύσεις ως ισοτικούς περιορισμούς. Οι εκτιμώμενες καταστάσεις του πρώτου σταδίου εισάγονται στο δεύτερο με πολύ μεγάλα βάρη ή εναλλακτικά μοντελοποιούνται ως περιορισμοί ισότητας (άπειρη ακρίβεια) και συμπεριλαμβάνονται στο διάνυσμα \hat{x}_2 υπολογίζεται από το ανακυκλωτικό σχήμα:

$$G_{2}(x_{2}^{k})\Delta x_{2}^{k} + C_{2}^{T}(x_{2}^{k})\lambda_{2}^{k+1} = H_{2}^{T}(x_{2}^{k})R_{2}^{-1}\Delta z_{2}^{k}$$

$$C_{2}(x_{2}^{k})\Delta x_{2}^{k} = -c_{2}(x_{2}^{k})$$
(5.53)

όπου k είναι ο δείκτης κάθε επανάληψης, $\Delta x_2^k = x_2^{k+1} - x_2^k$, $\Delta z_2^k = z_2 - h_2(x_2^k)$, x_2^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k, λ_2^k είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange στην επανάληψη

k,
$$H_2(x_2) = \frac{\partial h_2(x_2)}{\partial x_2}$$
 και
$$C_2(x_2) = \frac{\partial c_2(x_2)}{\partial x_2}$$
είναι οι Ιακωβιανές μήτρες,
$$G_2(x_2^{\ k}) = H_2^{\ T}(x_2^{\ k})R_2^{-1}H_2(x_2^{\ k})$$
είναι η μήτρα κέρδους και R_2 η μήτρα διασποράς. Στο δεύτερο στάδιο το σύστημα θεωρείται ότι είναι παρατηρήσιμο και η μήτρα $\begin{pmatrix} H_2 \\ C_2 \end{pmatrix}$ πλήρους βαθμού. Η δομή

των Ιακωβιανών μητρών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.38, όπου RC είναι οι καρτεσιανές και PC οι πολικές συντεταγμένες, αντίστοιχα. Τα στοιχεία κάθε Ιακωβιανής παρουσιάζονται στην Ενότητα 5.8. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο μπορεί να εφαρμοστεί ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τη βοήθεια του μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 5.4.2.

Στάδιο	Φασιθέτης Τάσης	Φασιθέτης Ρεύματος	Διάνυσμα Κατάστασης	Ιακωβιανή <i>Η</i>	Ιακωβιανή C
1	RC	RC	RC	$H_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_{i}}{\partial E} & \frac{\partial E_{i}}{\partial F} \\ \frac{\partial F_{i}}{\partial E} & \frac{\partial F_{i}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F} \end{pmatrix}$	$C_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_{i,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{i,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{i,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{i,i}}{\partial F} \end{pmatrix}$
1	PC	RC	PC	$H_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial V_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$	$C_{1} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_{i,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{i,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$
2	_	_	PC	$H_{2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{i}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{i}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{i}}{\partial V} \end{pmatrix}$	$C_{2} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I_{i,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{i,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{i,i}}{\partial V} \end{pmatrix}$

Πίνακας 5.38 Στοιχεία Ιακωβιανής μήτρας Η για τα δύο στάδια με ισοτικούς περιορισμούς

5.10.4.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο δίκτυο 57 ζυγών του ΙΕΕΕ, με τις συγχρονισμένες μετρήσεις και τις μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες, και στο δίκτυο 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με τις συγχρονισμένες μετρήσεις εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και στο δίκτυο 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με τις συγχρονισμένες μετρήσεις εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και τις μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες. Η απόδοση του αλγορίθμου εξετάστηκε επίσης για το δίκτυο Polish 2383 ζυγών [156]. Το όριο σύγκλισης τέθηκε ίσο προς 10^{-3} . Η μετρούμενη τιμή για την μέτρηση i (z_i^{meas}) καθορίζεται προσθέτοντας στην πραγματική τιμή της, έναν κανονικά κατανεμημένο (Γκαουσιανό) θόρυβο σύμφωνα με την εξίσωση $z_i^{meas} = z_i^{true} + rand \times \sigma_i$, όπου η τυπική της απόκλιση σ_i υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$3\sigma_i = \frac{0.02 \times z_i^{true}}{FS_i} + 10^{-4}$$

όπου $z_i^{true} z_i$ και FS_i η ακριβής τιμή και η ακρίβεια της μέτρησης i. Ως δείκτες αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου έχουν επιλεγεί αυτοί των εξισώσεων (5.34)-(5.37).

5.10.4.2 Εκτιμητής δύο σταδίων με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Η μετρητική διάταξη του δικτύου ΙΕΕΕ 57 ζυγών φαίνεται στον Πίνακα 5.39.

Πίνακας 5.39 Μετρητική διάταξη δικτύου ΙΕΕΕ 57 ζυγών με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

	Μετρήσεις
	$E_7, E_{18}, E_{22}, E_{25}, E_{48}, E_{56}$
Συγχρονισμένες	$F_7, F_{18}, F_{22}, F_{25}, F_{48}, F_{56}$
	$I_{7-6,r}, I_{7-8,r}, I_{7-29,r}, I_{18-4,r}, I_{18-19,r}, I_{22-21,r}, I_{22-23,r}, I_{22-38,r}, I_{25-24,r}, I_{25-30,r}, I_{48-38,r}, I_{48-47,r}, I_{48-47,$
(PMU)	$I_{48-49,r}, I_{56-40,r}, I_{56-41,r}, I_{56-42,r}, I_{56-57,r}$
	$I_{7-6,i}, I_{7-8,i}, I_{7-29,i}, I_{18-4,i}, I_{18-19,i}, I_{22-21,i}, I_{22-23,i}, I_{22-38,i}, I_{25-24,i}, I_{25-30,i}, I_{48-38,i}, I_{48-47,i}, I_{48-47,$
	$I_{48-49,i}, I_{56-40,i}, I_{56-41,i}, I_{56-42,i}, I_{56-57,i}$
	$V_1, V_6, V_{11}, V_{24}, V_{41}, V_{49}$
	$P_{1-2}, P_{1-15}, P_{1-16}, P_{1-17}, P_{2-3}, P_{3-4}, P_{3-15}, P_{4-5}, P_{6-4}, P_{6-5}, P_{6-8}, P_{8-9}, P_{9-10}, P_{9-12}, P_{1-15}, P_{1-15}, P_{1-16}, P_{1-17}, P_{2-3}, P_{3-4}, P_{3-15}, P_{4-5}, P_{6-4}, P_{6-5}, P_{6-8}, P_{8-9}, P_{9-10}, P_{9-12}, P_{1-15}, P_{1-15},$
	$P_{9-13}, P_{9-55}, P_{10-12}, P_{10-51}, P_{11-9}, P_{11-13}, P_{11-41}, P_{11-43}, P_{12-13}, P_{12-16}, P_{12-17}, P_{13-14}, P_{13-15}$
	$P_{14-15}, P_{14-46}, P_{15-45}, P_{19-20}, P_{21-20}, P_{24-23}, P_{24-26}, P_{26-27}, P_{27-28}, P_{28-29}, P_{29-52},$
	$P_{30-31}, P_{31-32}, P_{32-33}, P_{34-32}, P_{34-35}, P_{35-36}, P_{36-37}, P_{36-40}, P_{37-38}, P_{37-39}, P_{38-44},$
	$P_{39-57}, P_{41-11}, P_{41-42}, P_{41-43}, P_{44-45}, P_{46-47}, P_{49-13}, P_{49-38}, P_{49-50}, P_{50-51}, P_{52-53}, P_{53-54}, P_{54-55}$
Συμβατικές	$Q_{1-2}, Q_{1-15}, Q_{1-16}, Q_{1-17}, Q_{2-3}, Q_{3-4}, Q_{3-15}, Q_{4-5}, Q_{6-4}, Q_{6-5}, Q_{6-8}, Q_{8-9},$
(SCADA)	$Q_{9-10}, Q_{9-12}, Q_{9-13}, Q_{9-55}, Q_{10-12}, Q_{10-51}, Q_{11-9}, Q_{11-13}, Q_{11-41}, Q_{11-43}, Q_{12-13}, Q_{12-13}, Q_{12-13}, Q_{13-12}, Q_{13-13}, Q_{$
	$Q_{12-16}, Q_{12-17}, Q_{13-14}, Q_{13-15}, Q_{14-15}, Q_{14-46}, Q_{15-45}, Q_{19-20}, Q_{21-20}, Q_{24-23}, Q_{24-26},$
	$Q_{26-27}, Q_{27-28}, Q_{28-29}, Q_{29-52}, Q_{30-31}, Q_{31-32}, Q_{32-33}, Q_{34-32}, Q_{34-35}, Q_{35-36},$
	$Q_{36-37}, Q_{36-40}, Q_{37-38}, Q_{37-39}, Q_{38-44}, Q_{39-57}, Q_{41-11}, Q_{41-42}, Q_{41-43}, Q_{44-45},$
	$Q_{46-47}, Q_{49-13}, Q_{49-38}, Q_{49-50}, Q_{50-51}, Q_{52-53}, Q_{53-54}, Q_{54-55}$
	P_4
	Q_4
Ζυγοί	
μηδενικής	11, 21, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46
εγχυσης	
Μετρήσεων	1,561

Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και συμβατικές μετρήσεις. Το μετρητικό σύστημα για το δίκτυο των 2383 ζυγών περιλαμβάνει 50 μονάδες μέτρησης φασιθετών οι οποίες παρέχουν 50 μετρήσεις φασιθετών τάσης και 400 μετρήσεις φασιθετών ρεύματος, αντίστοιχα. Στις συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνονται, 6712 μετρήσεις ενεργών και άεργων ροών ισχύος και 58 μετρήσεις ενεργών και άεργων εγχύσεων ζυγών. Τέλος υπάρχουν 145 ζυγοί μηδενικής έγχυσης. Τα αποτελέσματα του εκτιμητή και για τα δύο δίκτυα ελέγχονται μέσω των ποιοτικών δεικτών αξιολόγησης που αναφέρθηκαν παραπάνω και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.40.

Πίνακας 5.40 Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Δίκτυο	E_{ang} (deg)	E_{mag} (V)	NE_{ang} (%)	NE_{mag} (%)
IEEE-57	0,0000005767	0,0000004674	0,0468780096	0,0091168285
Polish-2383	0,0000496900	0,0000188400	0,0320123628	0,0089056491

Πίνακας 5.41 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 57 ζυγών παρουσία ισοτικών περιορισμών

1ο Στάδιο							
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)				
E ₂₂	-7,47525513	<i>F</i> ₂₂		-0,86714758			
E ₄₈	6,44096676	F ₄₈		0,86522354			
F ₂₂	-0,86710796	<i>I</i> _{25-24,r}		0,15459219			
F ₄₈	0,86518401	<i>I</i> _{25-24,i}		-0,16479314			
<i>I</i> _{25–24,r}	0,15459219	<i>I</i> _{18-4,r}	-0,14420148				
	2ο Στάδιο						
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (3 ^η εκτέλεση)		
P ₉₋₁₂	-16,00226682	P ₅₆₋₄₂	6,29361459	P ₃₅₋₃₆	6,11794275		
P ₅₆₋₄₂	6,29284800	P ₃₅₋₃₆	6,07852871	Q_{7-8}	5,73864621		
P ₃₅₋₃₆	6,07784479	Q_{7-8}	5,58257489	δ_{47}	3,35458202		
Q_{7-8}	5,58298382	δ_{47}	4,28672466	δ_{29}	3,97961442		
δ_{47}	4,28845401	δ_4	-3,92406687	δ_7	-3,85500341		
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (4 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (5 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (6 ^η εκτέλεση)		
P ₁₉₋₂₀	3,73129545	δ_{23}	3,60485777	Q_{46-47}	-2,84651368		
δ_{23}	3,71167276	Q_{46-47}	-2,84613796	δ_{14}	-2,57591302		
Q_{46-47}	-2,84638212	δ_{14}	-2,55510391	δ_{38}	2,46684848		
δ_{14}	-2,55188712	P ₅₇₋₅₆	2,46751698	P ₅₇₋₅₆	2,42957291		
P ₅₇₋₅₆	2,45050472	δ_8	-2,38431562	δ_8	-2,40403314		

Οι δείκτες αυτοί δείχνουν ότι τα αποτελέσματα του προτεινόμενου εκτιμητή είναι πολύ κοντά σε αυτά της ροής φορτίου. Στον Πίνακα 5.41 παρουσιάζονται τα σφάλματα για το δίκτυο των 57 ζυγών. Η ανίχνευση και ο εντοπισμός τους για το δίκτυο των 2383 ζυγών παραλείπονται λόγω μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων και επαναλήψεων για την εκκαθάρισή τους. Ο χρόνος εκτέλεσης των επιμέρους σταδίων, όπως και ο συνολικός χρόνος για τα δύο δίκτυα, εμφανίζονται στον Πίνακα 5.42.

Πίνακας 5.42 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς

περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο και μεταβλητές κατάστασης εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Δίκτυο	Χρόνος εκτέλεσης 1ου σταδίου (s)	Χρόνος εκτέλεσης 2ου σταδίου (s)	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)
IEEE-57	0,810	0,308	1,166
Polish-2383	9,914	10,242	23,759

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια παρουσία ισοτικών περιορισμών είναι πολύ ικανοποιητική. Η χρήση αραιών μητρών επιτρέπει την ταχύτερη εξαγωγή αποτελεσμάτων, εξοικονομώντας παράλληλα υπολογιστική μνήμη. Επίσης η ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων πραγματοποιήθηκε επιτυχώς.

5.10.4.3 Εκτιμητής δύο σταδίων με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Η μετρητική διάταξη του δικτύου ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.43. Το μετρητικό σύστημα για το δίκτυο Polish-2383 περιλαμβάνει 50 μονάδες μέτρησης φασιθετών οι οποίες παρέχουν 50 μετρήσεις φασιθετών τάσης κα 174 μετρήσεις φασιθετών ρεύματος, αντίστοιχα. Στις συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνονται 5468 μετρήσεις ενεργών και άεργων ροών ισχύος και 104 μετρήσεις ενεργών και άεργων εγχύσεων ζυγών. Ακόμη το δίκτυο περιλαμβάνει 112 ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Η συνολική περίσσεια του συστήματος ισούται με 1,263.

Ο Πίνακας 5.44 παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου εκτιμητή χρησιμοποιώντας και πάλι ποιοτικούς δείκτες αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης είναι πολύ κοντά σε αυτό της αληθούς τιμής του όπως αυτή προκύπτει από την ροή φορτίου.

Στον Πίνακα 5.45 παρουσιάζονται τα σφάλματα για το δίκτυο των 118 ζυγών. Τα αποτελέσματα της ανίχνευσης και του εντοπισμού για το δίκτυο των 2383 ζυγών δεν παρουσιάζονται για λόγους οικονομίας χώρου. Ο χρόνος εκτέλεσης των επιμέρους σταδίων, όπως και ο συνολικός χρόνος για τα δύο δίκτυα εμφανίζονται στον Πίνακα 5.46.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η εκτίμηση κατάστασης σε δύο στάδια παρουσία ισοτικών περιορισμών είναι αρκετά ικανοποιητική. Η χρήση αραιών μητρών επιτρέπει την ταχύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων, εξοικονομώντας παράλληλα υπολογιστική μνήμη. Επίσης η ανίχνευση και εντοπομός εσφαλμένων μετρήσεων πραγματοποιήθηκαν επιτυχώς.

Πίνακας 5.43 Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Μετρήσεις				
	$V_{23,r}, V_{25,r}, V_{27,r}, V_{30,r}, V_{34,r}, V_{40,r}, V_{61,r}, V_{65,r}, V_{68,r}, V_{110,r}$			
	$V_{23,i}, V_{25,i}, V_{27,i}, V_{30,i}, V_{34,i}, V_{40,i}, V_{61,i}, V_{65,i}, V_{68,i}, V_{110,i}$			
	$I_{23-22,r}, I_{23-24,r}, I_{23-25,r}, I_{23-32,r}, I_{25-23,r}, I_{25-26,r}, I_{25-27,r}, I_{27-25,r},$			
	$I_{27-28,r}, I_{27-32,r}, I_{27-115,r}, I_{30-8,r}, I_{30-17,r}, I_{30-26,r}, I_{30-38,r}, I_{34-19,r},$			
	$I_{34-36,r}, I_{34-37,r}, I_{34-43,r}, I_{40-37,r}, I_{40-39,r}, I_{40-41,r}, I_{40-42,r}, I_{61-59,r},$			
Συγχρονισμένες	$I_{61-60,r}, I_{61-62,r}, I_{61-64,r}, I_{65-38,r}, I_{65-64,r}, I_{65-66,r}, I_{65-68,r}, I_{68-65,r},$			
(PMU)	$I_{68-69,r}, I_{68-81,r}, I_{68-116,r}, I_{110-103,r}, I_{110-109,r}, I_{110-111,r}, I_{110-112,r}$			
	$I_{23-22,i}, I_{23-24,i}, I_{23-25,i}, I_{23-32,i}, I_{25-23,i}, I_{25-26,i}, I_{25-27,i}, I_{27-25,i},$			
	$I_{27-28,i}, I_{27-32,i}, I_{27-115,i}, I_{30-8,i}, I_{30-17,i}, I_{30-26,i}, I_{30-38,i}, I_{34-19,i},$			
	$I_{34-36,i}, I_{34-37,i}, I_{34-43,i}, I_{40-37,i}, I_{40-39,i}, I_{40-41,i}, I_{40-42,i}, I_{61-59,i},$			
	$I_{61-60,i}, I_{61-62,i}, I_{61-64,i}, I_{65-38,i}, I_{65-64,i}, I_{65-66,i}, I_{65-68,i}, I_{68-65,i},$			
	$I_{68-69,i}, I_{68-81,i}, I_{68-116,i}, I_{110-103,i}, I_{110-109,i}, I_{110-111,i}, I_{110-112,i}$			
	$P_{1-2}, P_{1-3}, P_{2-12}, P_{3-12}, P_{4-5}, P_{5-6}, P_{6-7}, P_{7-12}, P_{8-5}, P_{8-9}, P_{8-30},$			
	$P_{9-10}, P_{12-14}, P_{12-16}, P_{12-117}, P_{13-15}, P_{14-15}, P_{15-17}, P_{15-33}, P_{16-17},$			
	$P_{17-18}, P_{17-31}, P_{17-113}, P_{20-21}, P_{21-22}, P_{22-23}, P_{23-24}, P_{23-25},$			
	$P_{32-32}, P_{24-70}, P_{24-72}, P_{25-27}, P_{26-25}, P_{26-30}, P_{27-28}, P_{27-32},$			
	$P_{27-115}, P_{28-29}, P_{29-31}, P_{30-17}, P_{30-38}, P_{31-32}, P_{32-113}, P_{32-114},$			
	$P_{33-37}, P_{34-36}, P_{34-37}, P_{34-43}, P_{35-36}, P_{35-37}, P_{37-39}, P_{37-40},$			
	$P_{38-37}, P_{38-65}, P_{39-40}, P_{40-41}, P_{43-44}, P_{44-45}, P_{45-46}, P_{45-49},$			
	$P_{46-47}, P_{46-48}, P_{47-49}, P_{47-69}, P_{48-49}, P_{49-50}, P_{49-51}, P_{49-54},$			
	$P_{49-66}, P_{49-69}, P_{50-57}, P_{51-52}, P_{51-58}, P_{52-53}, P_{53-54}, P_{54-55},$			
Συμβατικές	$P_{54-56}, P_{54-59}, P_{55-56}, P_{55-59}, P_{56-57}, P_{56-58}, P_{56-59}, P_{59-60},$			
(SCADA)	$P_{59-61}, P_{60-61}, P_{63-59}, P_{63-64}, P_{64-61}, P_{64-65}, P_{65-66}, P_{65-68},$			
	$P_{66-67}, P_{68-69}, P_{68-81}, P_{68-116}, P_{69-70}, P_{69-75}, P_{69-77}, P_{70-71},$			
	$P_{70-74}, P_{70-75}, P_{71-72}, P_{71-73}, P_{74-75}, P_{75-77}, P_{75-118}, P_{76-77},$			
	$P_{76-118}, P_{77-78}, P_{77-80}, P_{77-82}, P_{78-79}, P_{79-80}, P_{80-96}, P_{80-97},$			
	$P_{80-98}, P_{80-99}, P_{81-80}, P_{82-83}, P_{82-96}, P_{83-84}, P_{83-85}, P_{84-85},$			
	$P_{85-86}, P_{85-88}, P_{85-89}, P_{86-87}, P_{88-89}, P_{89-90}, P_{89-92}, P_{90-91},$			
	$P_{91-92}, P_{92-93}, P_{92-94}, P_{92-100}, P_{92-102}, P_{93-94}, P_{94-95}, P_{94-96},$			
	$P_{94-100}, P_{95-96}, P_{96-97}, P_{98-100}, P_{99-100}, P_{100-101}, P_{100-104},$			
	$P_{100-106}, P_{101-102}, P_{104-105}, P_{105-106}, P_{105-107}, P_{105-108},$			
	$P_{106-107}, P_{108-109}, P_{109-110}, P_{110-111}, P_{110-112}, P_{114-115}$			

Πίνακας 5.43 (συνέχεια) Μετρητική διάταξη για το δίκτυο των 118 ζυγών του ΙΕΕΕ με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Μετρήσεις		
Συμβατικές (SCADA)	$\begin{array}{c} Q_{1-2}, \ Q_{1-3}, \ Q_{2-12}, \ Q_{3-12}, \ Q_{4-5}, \ Q_{5-6}, \ Q_{6-7}, \ Q_{7-12}, \ Q_{8-5}, \ Q_{8-9}, \\ Q_{8-30}, \ Q_{9-10}, \ Q_{12-14}, \ Q_{12-16}, \ Q_{12-117}, \ Q_{13-15}, \ Q_{14-15}, \ Q_{15-17}, \\ Q_{15-33}, \ Q_{16-17}, \ Q_{17-18}, \ Q_{17-13}, \ Q_{17-113}, \ Q_{20-21}, \ Q_{21-22}, \ Q_{22-23}, \\ Q_{23-24}, \ Q_{23-25}, \ Q_{32-32}, \ Q_{24-70}, \ Q_{24-72}, \ Q_{25-27}, \ Q_{26-25}, \ Q_{26-30}, \\ Q_{27-28}, \ Q_{27-32}, \ Q_{27-115}, \ Q_{28-29}, \ Q_{29-31}, \ Q_{30-17}, \ Q_{30-38}, \ Q_{31-32}, \\ Q_{32-113}, \ Q_{32-114}, \ Q_{33-37}, \ Q_{34-36}, \ Q_{34-37}, \ Q_{34-43}, \ Q_{35-36}, \ Q_{35-37}, \\ Q_{37-39}, \ Q_{37-40}, \ Q_{38-37}, \ Q_{38-65}, \ Q_{39-40}, \ Q_{40-41}, \ Q_{43-44}, \ Q_{44-45}, \\ Q_{45-46}, \ Q_{45-49}, \ Q_{46-47}, \ Q_{46-48}, \ Q_{47-49}, \ Q_{47-69}, \ Q_{48-49}, \ Q_{49-50}, \\ Q_{49-51}, \ Q_{49-54}, \ Q_{49-66}, \ Q_{49-69}, \ Q_{50-57}, \ Q_{51-52}, \ Q_{51-58}, \ Q_{52-53}, \\ Q_{49-51}, \ Q_{49-54}, \ Q_{49-66}, \ Q_{49-69}, \ Q_{50-57}, \ Q_{51-52}, \ Q_{51-58}, \ Q_{52-53}, \\ Q_{53-54}, \ Q_{54-55}, \ Q_{54-56}, \ Q_{54-59}, \ Q_{63-61}, \ Q_{63-61}, \ Q_{63-61}, \ Q_{64-61}, \ Q_{64-65}, \\ Q_{65-68}, \ Q_{65-68}, \ Q_{66-67}, \ Q_{68-69}, \ Q_{68-81}, \ Q_{68-71}, \ Q_{76-75}, \ Q_{75-77}, \\ Q_{75-118}, \ Q_{70-71}, \ Q_{70-75}, \ Q_{71-72}, \ Q_{71-73}, \ Q_{74-75}, \ Q_{75-77}, \\ Q_{75-118}, \ Q_{76-77}, \ Q_{76-118}, \ Q_{77-78}, \ Q_{77-80}, \ Q_{77-82}, \ Q_{78-79}, \ Q_{79-80}, \\ Q_{80-96}, \ Q_{80-97}, \ Q_{80-98}, \ Q_{80-99}, \ Q_{81-80}, \ Q_{82-83}, \ Q_{82-96}, \ Q_{83-84}, \\ Q_{83-85}, \ Q_{84-85}, \ Q_{85-86}, \ Q_{85-88}, \ Q_{85-89}, \ Q_{86-87}, \ Q_{88-89}, \ Q_{89-90}, \\ Q_{89-92}, \ Q_{90-91}, \ Q_{91-92}, \ Q_{92-93}, \ Q_{92-100}, \ Q_{92-102}, \ Q_{93-94}, \\ Q_{94-95}, \ Q_{94-96}, \ Q_{94-100}, \ Q_{95-96}, \ Q_{96-97}, \ Q_{88-10}, \ Q_{92-100}, \ Q_{92-101}, \ Q_{100-101}, \\ Q_{100-104}, \ Q_{100-106}, \ Q_{100-102}, \ Q_{104-105}, \ Q_{105-106}, \ Q_{105-107}, \ Q_{105-108}, \\ Q_{106-107}, \ Q_{108-109}, \ Q_{109-110$	
τησενικές εγχύσεις	9, 10, 26, 37, 38, 63, 64, 69, 71, 81, 87, 89, 111	
Περίσσεια	1,763	

Πίνακας 5.44 Ποιοτικοί δείκτες αποτελεσμάτων για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Δίκτυο	E_{ang} (deg)	E_{mag} (V)	NE_{ang} (%)	NE_{mag} (%)
IEEE-118	0,0000048768	0,0000010617	0,0537623287	0,0096201706
Polish-2383	0,0000356923	0,0000134557	0,0271320436	0,0075572529

1ο Στάδιο					
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)		
V _{25,r}	-3,165429187	V _{23,i}		-2,86544758	
V _{23,i}	-2,140137170	V _{27,r}		2,08653540	
V _{27,r}	2,010123396	I _{25-23,r}		1,98152196	
I _{25-23,r}	1,998118201	I _{25-27,i}		-1,79564734	
I _{25-27,i}	1,943095954	V _{68,r}		1,66530146	
		2ο Σ	τάδιο		
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (1 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (2 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (3 ^η εκτέλεση)
δ_{61}	3,33541149	V ₃₈	3,29362629	<i>P</i> ₁₁₀₋₁₁₁	-3,19735195
P ₁₁₀₋₁₁₁	-3,18971294	<i>P</i> ₁₁₀₋₁₁₁	-3,17582861	Q_{8-5}	-3,13116896
V ₃₈	3,16143847	Q_{8-5}	-3,15129894	<i>P</i> ₃₃₋₃₇	-3,08563421
Q_{8-5}	-3,13002938	P ₃₃₋₃₇	-3,05629463	Q_{68-69}	2,82156589
P ₃₃₋₃₇	-3,05754662	Q_{68-69}	$2,83460629 \qquad P_{30-17} \qquad -2,69345472$		
Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (4 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (5 ^η εκτέλεση)	Μέτρηση	Κανονικ. υπόλοιπα (6 ^η εκτέλεση)
Q_{8-5}	-3,13146155	P ₃₃₋₃₇	-3,07972777	Q_{68-69}	2,84118368
P ₃₃₋₃₇	-3,08530896	Q_{68-69}	2,82090794	P ₃₀₋₁₇	2,67893302
Q_{68-69}	2,82099342	P ₃₀₋₁₇	-2,69550491	Q_{64-65}	-2,56783412
P ₃₀₋₁₇	-2,69346565	Q_{64-65}	-2,66427508	Q_{69-75}	2,41503681
Q_{64-65}	-2,66051934	Q ₆₉₋₇₅	2,53085062	Q_{92-94}	-2,37701654

Πίνακας 5.45 Ανάλυση εσφαλμένων μετρήσεων για το δίκτυο ΙΕΕΕ 118 ζυγών παρουσία ισοτικών περιορισμών

Πίνακας 5.46 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμου για τα εξεταζόμενα δίκτυα με ισοτικούς περιορισμούς και συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο στάδιο εκπεφρασμένες σε καρτεσιανές και μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες

Δίκτυο	Χρόνος εκτέλεσης 1ου σταδίου	Χρόνος εκτέλεσης 2ου σταδίου	Συνολικός χρόνος εκτέλεσης
	(s)	(s)	<i>(s)</i>
IEEE-118	0,390	1,093	1,609
Polish-2383	8,162	12,245	30,557

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και Προοπτικές της Εργασίας

6.1 Συμπεράσματα της εργασίας

Η παρούσα εργασία ερευνά εφαρμογές σχετικές με την παρακολούθηση και τον έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Εστιάζει σε τεχνικές εκτίμησης κατάστασης και ανάλυσης παρατηρησιμότητας παρουσία μετρήσεων προερχόμενων από μονάδες μέτρησης φασιθετών, πιο γνωστών ως συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών, όπως επίσης και σε τεχνικές τοποθέτησης των μονάδων αυτών στα δίκτυα. Τα αποτέλεσμα της έρευνας αυτής συνοψίζονται σε μια σειρά δημοσιεύσεων και ανακοινώσεων σε έγκριτα διεθνή περιοδικά και συνέδρια με κριτές [76], [158]-[170].

Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι για την επίλυση και την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας δικτύου, οι οποίες περιλαμβάνουν συστήματα μετρήσεων αποτελούμενα από συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ή μόνον συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ή από συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και μηδενικές εγχύσεις εκπεφρασμένες σε μορφή ισοτικών Οι τεχνικές τοποθέτησης μονάδων PMU περιλαμβάνουν πρακτικές μεθόδους περιορισμών. εγκατάστασης των μονάδων αυτών σε στρατηγικούς ζυγούς ενός δικτύου, θεωρώντας ή αμελώντας την ύπαρξη μηδενικών εγχύσεων. Το ίδιο πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση μιας αριθμητικής μεθόδου, θεωρώντας ότι το υπό εξέταση δίκτυο δεν έχει καθόλου μετρήσεις ή φέρει ένα σύνολο συμβατικών μετρήσεων ροής και έγχυσης. Στα πλαίσια των αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης έχει αναπτυχθεί μία νέα μέθοδος επίλυσης του προβλήματος, η οποία ενσωματώνει απευθείας στους κλασσικούς εκτιμητές τις συγγρονισμένες μετρήσεις φασιθετών σε πολική μορφή. Παράλληλα αναπτύχθηκαν μοντέλα εκτιμητών, οι οποίοι περιλαμβάνουν μόνο συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και ταυτόχρονα χειρίζονται τις μηδενικές εγχύσεις των ζυγών ως ισοτικούς περιορισμούς. Επίσης παρουσιάζονται μοντέλα εκτιμητών δύο σταδίων, οι οποίοι, αρχικά, ενσωματώνουν μόνον τις συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών, ενώ στη συνέχεια συνδυάζουν τις συμβατικές μετρήσεις με τα αποτελέσματα του αρχικού σταδίου.

Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται παρατηρήσιμο όταν ο αριθμός και η διάταξη των μετρήσεων που διαθέτει καθιστούν εφικτή την επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης. Σε αντίθετη περίπτωση, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως μη παρατηρήσιμο και χωρίζεται, αρχικά, σε ροονησίδες και εν τέλει σε μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες. Ο έλεγχος και η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας συνοψίζεται στον γαρακτηρισμό του συστήματος ως παρατηρήσιμου ή μη, στον προσδιορισμό των ροονησίδων ή μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων όταν το σύστημα είναι μη παρατηρήσιμο και στην επιλογή ενός κατάλληλου συνόλου μετρήσεων (αριθμός και θέσεις) ώστε να αποκατασταθεί η παρατηρησιμότητα. Σ' αυτή την εργασία παρουσιάζεται ένας άμεσος αριθμητικός αλγόριθμος για τον προσδιορισμό των μέγιστων παρατηρήσιμων νησίδων και την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, για ένα μετρητικό σύστημα που περιλαμβάνει PMUs και συμβατικές μετρήσεις. Οι ροές ισχύος και οι φασιθέτες ρεύματος χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των ροονησίδων και ένα αντίστοιχο μοντέλο μειωμένης τάξης του συστήματος. Οι μέγιστες παρατηρήσιμες νησίδες, όποτε αυτές προσδιορίζονται, εντοπίζονται κατά έναν μη επαναληπτικό τρόπο, πραγματοποιώντας αντίστροφες αντικαταστάσεις στους τριγωνικούς παράγοντες της μήτρας κέρδους που σχετίζεται με το μοντέλο μειωμένης τάξης. Για το σχηματισμό της μήτρας κέρδους, επεξεργαζόμαστε όλες τις μετρήσεις φασιθετών τάσης και τις οριακές εγχύσεις στις ροονησίδες. Οι πρόσθετες μετρήσεις που καθιστούν το δίκτυο πλήρως παρατηρήσιμο παρέχονται μέσω μίας άμεσης μεθόδου, χρησιμοποιώντας τους τριγωνικούς παράγοντες μιας μήτρας Gram που σχετίζεται με την Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων του μοντέλου μειωμένης τάξης, η οποία περιλαμβάνει όλες τις υπάρχουσες μετρήσεις φασιθετών τάσης και τις οριακές εγχύσεις στις παρατηρήσιμες νησίδες και τις υποψήφιες προς τοποθέτηση μετρήσεις έγχυσης αλλά και μονάδες PMU στους οριακούς ζυγούς των

παρατηρήσιμων νησίδων. Οι διαστάσεις των μητρών κέρδους και Gram είναι ίσες προς τον αριθμό των ροονησίδων και των οριακών μετρήσεων στις παρατηρήσιμες νησίδες, αντίστοιχα, και επομένως τυπικά αποτελούν ένα μικρό κλάσμα του συνολικού αριθμού των ζυγών. Αυτό καθιστά την μέθοδο υπολογιστικά πιο ελκυστική και πιο εύκολη να εφαρμοστεί εξαιτίας της χρήσης προϋπαρχουσών ρουτινών παραγοντοποίησης και αντικατάστασης.

Ένας παρεμφερής υβριδικός (τοπολογικός-αριθμητικός) προτείνεται για τον έλεγχο και αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας, χρησιμοποιώντας μόνο μετρήσεις φασιθετών ρεύματος γραμμών και σχηματίζοντας τοπολογικά τις poovησίδες και κατ' επέκταση το μοντέλο ελαττωμένης τάξης. Οι οριακές μηδενικές εγχύσεις στις poovησίδες και οι φασιθέτες τάσης χρησιμοποιούνται για το σχηματισμό της Ιακωβιανής μήτρας του μοντέλου ελαττωμένης τάξης και η παρατηρησιμότητα ελέγχεται αναλύοντας τα στοιχεία οδήγησης (pivots) στους τριγωνικούς παράγοντες της σχετιζόμενης μήτρας Gram. Η αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας γίνεται μέσω μιας άμεσης μεθόδου χρησιμοποιώντας τους τριγωνικούς παράγοντες της ελαττωμένης μήτρας Gram που σχετίζεται με τις υπάρχουσες μετρήσεις φασιθετών τάσης, τις υπάρχουσες μηδενικές οριακές εγχύσεις στις pooνησίδες, και τις υποψήφιες ψευδομετρήσεις έγχυσης ή τις υποψήφιες μονάδες PMU στους οριακούς ζυγούς των pooνησίδων. Οι διαστάσεις των μητρών Gram είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με το συνολικό αριθμό των ζυγών του συστήματος, καθιστώντας τη μέθοδο πολύ γρήγορη και αποτελεσματική.

Με τη ραγδαία αύξηση του ρυθμού τοποθέτησής PMUs στους υποσταθμούς, υπάρχει απαίτηση οι σχεδιαστές των δικτύων να προτείνουν τις βέλτιστες θέσεις στις οποίες θα πρέπει αυτές να εγκατασταθούν. Το πρόβλημα αυτό είναι γνωστό ως πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων μέτρησης φασιθετών. Η λύση του προβλήματος δίνει τον ελάχιστο αριθμό και τις αντίστοιχες θέσεις τοποθέτησης των PMUs ώστε το δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επαναδιατυπωθεί και να διευρυνθεί ώστε να συμπεριλάβει και άλλους περιορισμούς ή ενδεχόμενα.

Η παρούσα εργασία εξετάζει την επίλυση του βασικού προβλήματος τοποθέτησης όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Αρχικά, προτάθηκαν δύο πρακτικοί αλγόριθμοι τοποθέτησης οι οποίοι βασίστηκαν σε τοπολογικούς κανόνες τοποθέτησης μονάδων PMU. Εξετάστηκαν περιπτώσεις με ή χωρίς την ύπαρξη μηδενικών εγχύσεων. Προς επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων, αυτά συγκρίθηκαν με άλλα ήδη γνωστά από την βιβλιογραφία. Η σύγκριση έδειξε ότι οι μέθοδοι είναι αποτελεσματικές είτε αμεληθούν οι μηδενικές εγχύσεις, είτε αυτές ληφθούν υπόψη. Το πλεονέκτημα των μεθόδων αυτών βασίζεται στην γρήγορη επισκόπηση των εξεταζόμενων δικτύων παρέχοντας αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μία εναλλακτική πρόταση προτείνει την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs για επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας μέσω ενός αριθμητικού αλγορίθμου. Η βασική συνεισφορά αυτής της μεθόδου εστιάζεται στην ικανότητά της να χρησιμοποιεί μια μη γραμμική προσέγγιση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων με συνεχείς μεταβλητές απόφασης για να αποδώσει τη βέλτιστη λύση. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί πολύ εύκολα, χρησιμοποιώντας ήδη διαθέσιμες ρουτίνες των υπαρχόντων εκτιμητών κατάστασης, αποφεύγοντας εξειδικευμένες βιβλιοθήκες μαθηματικής βελτιστοποίησης. Επίσης το αρχικό μοντέλο έχει διευρυνθεί για να ενσωματώσει συμβατικές μετρήσεις ροής και έγχυσης ως πρόσθετους περιορισμούς στην αρχική διατύπωση του προβλήματος.

Σε σχέση με τους εκτιμητές κατάστασης που αναπτύχθηκαν αρχικά, προτείνεται μία διατύπωση σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων για το πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης σε δίκτυα που περιλαμβάνουν τόσο συμβατικές όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος επιλύει τα όποια αριθμητικά προβλήματα ανακύπτουν κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων της εκτίμησης κατάστασης. Επεξεργάζεται τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος απευθείας, και επομένως εξουδετερώνει τον πολλαπλασιασμό της αβεβαιότητας των μετρήσεων που παρατηρείται εξαιτίας του μετασχηματισμού των μετρήσεων φασιθετών από πολικές σε καρτεσιανές συντεταγμένες, όπως προτείνεται από πολλές μεθόδους στη βιβλιογραφία.

Επίσης προτείνονται τρείς διαφορετικές διατυπώσεις εκτιμητών κατάστασης που περιλαμβάνουν μετρήσεις προερχόμενες μόνο από PMUs και μοντελοποιούν τις μηδενικές εγχύσεις ως ισοτικούς

περιορισμούς. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί καρτεσιανές συντεταγμένες τόσο για τους φασιθέτες τάσης και ρεύματος όσο και για τις μεταβλητές κατάστασης, οδηγώντας σε ένα γραμμικό μοντέλο. Η δεύτερη και τρίτη μέθοδος εκφράζουν και οι δύο τις μεταβλητές κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες, ενώ χρησιμοποιούν καρτεσιανές συντεταγμένες για τους φασιθέτες ρεύματος η δεύτερη, και πολικές συντεταγμένες η τρίτη. Η απόδοσή τους εξετάζεται μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι παρά το γεγονός ότι η πρώτη μέθοδος έχει καλύτερη απόδοση από άποψη ταχύτητας, με τη δεύτερη μέθοδο να παρέχει παρεμφερή αποτελέσματα με την πρώτη, η τρίτη μέθοδος δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από άποψη ακρίβειας. Σημειώνεται ότι για όλες τις περιπτώσεις οι εκτιμητές κατάστασης συγκλίνουν επιτυχώς.

Τέλος προτείνονται εκτιμητές κατάστασης δύο σταδίων, για συστήματα τα οποία περιλαμβάνουν μετρητικές διατάξεις αποτελούμενες από συμβατικές μετρήσεις (ή/και μηδενικές εγχύσεις) και μετρήσεις προερχόμενες από PMUs και τα οποία είναι πλήρως παρατηρήσιμα. Οι μετρήσεις μηδενικές έγγυσης συμπεριλαμβάνονται στα μοντέλα των εκτιμητών ως περιορισμοί ισότητας. Στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται μόνο μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU και μετρήσεις μηδενικής έγχυσης, εφόσον αυτές υπάρχουν, και πραγματοποιείται μία τοπική εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης των ζυγών που περιέχονται στις ροονησίδες που δημιουργούνται από το σύνολο των μετρήσεων που εμπλέκονται στο πρώτο στάδιο του εκτιμητή. Στο δεύτερο στάδιο οι μεταβλητές κατάστασης του προηγούμενου σταδίου ενσωματώνονται ως μετρήσεις υψηλής ακρίβειας ή ισοτικοί περιορισμοί σε έναν εκτιμητή, ο οποίος περιλαμβάνει μόνο τις συμβατικές μετρήσεις (ή/και μηδενικές εγγύσεις) της αργικής μετρητικής διάταξης. Όταν οι μεταβλητές κατάστασης και οι συγχρονισμένες μετρήσεις ρεύματος εκφράζονται σε καρτεσιανή μορφή, τότε ο εκτιμητής του πρώτου σταδίου καθίσταται γραμμικός. Αντίστοιχα, όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε καρτεσιανή μορφή και οι συγχρονισμένες μετρήσεις ρεύματος σε πολική μορφή, τότε ο εκτιμητής του πρώτου σταδίου καθίσταται μη γραμμικός. Σε κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο εφαρμόστηκε επιτυχώς η διαδικασία ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι προτεινόμενοι εκτιμητές είναι πολύ γρήγοροι και το εκτιμώμενο διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης προσεγγίζει την αληθή του τιμή, όπως αυτή προκύπτει από την ροή φορτίου.

6.2 Προοπτικές της εργασίας

- Οι προτεινόμενες μέθοδοι του τρίτου κεφαλαίου, μπορούν να τροποποιηθούν ως προς τον τρόπο αποκατάστασης της παρατηρησιμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας τεχνικής βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU η οποία θα αποκαθιστά την παρατηρησιμότητα χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αριθμό PMUs και θα αυξάνει την περίσσεια των μετρήσεων.
- 2) Όλες οι μέθοδοι τοποθέτησης μονάδων PMU, θα πρέπει να δοκιμαστούν και να επιβεβαιωθούν κάνοντας χρήση δικτύων μεγάλης κλίμακας. Ακόμη η αριθμητική μέθοδος επίλυσης μπορεί να διευρυνθεί περιλαμβάνοντας επιπρόσθετους περιορισμούς και ενδεχόμενα, όπως το κόστος εγκατάστασης, τα σφάλματα επικοινωνίας, ο περιορισμένος αριθμός καναλιών επικοινωνίας, η απώλεια ενός ή περισσοτέρων μονάδων PMU, η απώλεια μίας ή περισσοτέρων γραμμών, όρια τιμών μέτρων και φασικών γωνιών φασιθετών, περιβαλλοντικές συνθήκες κλπ. Παράλληλα, τα προτεινόμενα μοντέλα μπορούν να εφαρμοστούν θεωρώντας το μοντέλο μειωμένης τάξης. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αυτό, μπορεί να επιτευχθεί μείωση του αριθμού των μεταβλητών τοποθέτησης και συνεπώς να αυξηθεί η ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου με ταυτόχρονη μείωση του υπολογιστικού χρόνου.
- 3) Οι προτεινόμενοι εκτιμητές κατάστασης δύο σταδίων μπορούν περαιτέρω να βελτιωθούν, εξασφαλίζοντας μία αλληλεπίδραση των προγραμμάτων με τον χρήστη κατά την ανίχνευση των σφαλμάτων. Έτσι ο χρήστης θα έχει τη δυνατότητα να επιλέγει ποιές μετρήσεις επιθυμεί να αφαιρεθούν και ποιές όχι. Επίσης η παράλληλη επεξεργασία στο πρώτο στάδιο θα μπορούσε να βελτιώσει τον επιμέρους και το συνολικό υπολογιστικό χρόνο της εκτίμησης κατάστασης.
- 4) Όλες οι προτεινόμενες μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης, θα μπορούσαν να τροποποιηθούν λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των συνθηκών επικοινωνίας τόσο σε κατώτερο επίπεδο

ιεραρχίας, επικοινωνία μεταξύ PMUs, όσο και σε ανώτερο επίπεδο, επικοινωνία μεταξύ PMUs και PDCs. Ακόμη τα μοντέλα των εκτιμητών μπορούν να διευρυνθούν, περιλαμβάνοντας τον εντοπισμό των θέσεων τοποθέτησης μονάδων PMU και παρέχοντας έτσι καλύτερα αποτελέσματα εκτίμησης.

ПАРАРТНМА

Ιδιότητες βαθμού του μοντέλου μειωμένης τάξης

Έστω ένα σύστημα αποτελούμενο από n ζυγούς το οποίο χωρίζεται σε r μη αλληλοεπικαλυπτόμενες παρατηρήσιμες νησίδες S_i , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Κάθε υποσύστημα έχει n_i ζυγούς έτσι ώστε $n = \sum_{i=1}^r n_i$. Η Ιακωβιανή μήτρα H με κατάλληλη αναδιάταξη γραμμών και στηλών μπορεί να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$H = \begin{pmatrix} H_{1} & & \\ H_{2} & & \\ & \ddots & \\ & & H_{r} \\ \hline & & H_{b} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{1} & & \\ H_{2} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \\ \hline & & & \\ H_{b1} & H_{b2} & \cdots & H_{br} \end{pmatrix}$$
(II.1)

όπου

$$H_{i} = \begin{pmatrix} H_{i,e} \\ H_{i,v} \end{pmatrix} \tag{\Pi.2}$$

Η διαστάσεων $m_b \times n$ Ιακωβιανή υπομήτρα H_b αντιστοιχεί στις οριακές μετρήσεις των παρατηρήσιμων υποσυστημάτων (εγχύσεις ισχύος στους οριακούς ζυγούς και ροές ισχύος και ρεύματος στις διασυνδετικές γραμμές), η Ιακωβιανή υπομήτρα $H_{i,e}$ διαστάσεων $m_{i,e} \times n_i$ αντιστοιχεί στις εσωτερικές μετρήσεις του υποσυστήματος S_i (εγχύσεις και ροές ισχύος και ρεύματος), και τέλος η Ιακωβιανή υπομήτρα $H_{i,v}$ διαστάσεων $m_{i,v} \times n_i$ αντιστοιχεί στις τάσεις των ζυγών του υποσυστήματος S_i . Ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων στο υποσύστημα S_i είναι $m_i = m_{i,e} + m_{i,v}$. Ένα υποσύστημα S_i θα είναι παρατηρήσιμο εάν και μόνο εάν:

- Η απώλεια βαθμού της μήτρας H_i είναι ίση με μηδέν, $nullity(H_i) = 0$, όταν το υποσύστημα S_i περιλαμβάνει τουλάχιστον μία μέτρηση τάσης ζυγού ($m_{i,v} \neq 0$ και $H_{i,v} \neq \emptyset$)
- Η απώλεια βαθμού της μήτρας H_i είναι ίση με την μονάδα, $nullity(H_i) = 1$, όταν το υποσύστημα S_i δεν περιλαμβάνει καμία μέτρηση τάσης ζυγού ($m_{i,v} = 0$ και $H_{i,v} = \emptyset$).

Έστω η μήτρα Β διαστάσεων n×r η οποία ορίζεται ως εξής:

$$B = \begin{pmatrix} \frac{1}{1} & \frac{2}{0} & \cdots & \frac{r}{0} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{cases} n_{2} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1} & 2 & \cdots & r \\ 1_{n_{1} \times 1} & & \\ 1_{n_{2} \times 1} & & \\ & \ddots & \\ & & 1_{n_{r} \times 1} \end{pmatrix}$$
(II.3)

όπου $\mathbf{1}_{n_i \times 1}$ είναι ένα μοναδιαίο διάνυσμα. Από τις (Π.1), (Π.2), και (Π.3) έχουμε:

όπου $H_{i,e}\mathbf{1}_{n_i\times 1} = \mathbf{0}_{m_{i,e}\times 1}$ και $H_{i,\nu}\mathbf{1}_{n_i\times 1} = \mathbf{1}_{m_{i,\nu}\times 1}$, εξαιτίας της δομής (3.15)-(3.16) της Ιακωβιανής μήτρας H και $w_{bi} = H_{bi}\mathbf{1}_{n_i\times 1}$ είναι το άθροισμα των στηλών της μήτρας H_{bi} . Από την εξίσωση (Π.4) προκύπτει:

$$rank(HB) = rank \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{m_{1,e} \times 1} \\ \mathbf{1}_{m_{1,v} \times 1} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{m_{2,e} \times 1} \\ \mathbf{1}_{m_{2,v} \times 1} \end{pmatrix} \\ & \ddots \\ & & \ddots \\ & & \begin{pmatrix} \mathbf{0}_{m_{r,e} \times 1} \\ \mathbf{1}_{m_{r,v} \times 1} \end{pmatrix} \\ \hline w_{b1}(m_{b} \times 1) \quad w_{b2}(m_{b} \times 1) \quad \cdots \quad w_{br}(m_{b} \times 1) \end{pmatrix}$$
(II.5)

και

Ορίζουμε την μήτρα W_b ως:

όπου $w_{vi} = 0$ εάν το υποσύστημα S_i δεν περιέχει μέτρηση τάσης $(m_{i,v} = 0)$ και $w_{vi} = 1$ εάν το υποσύστημα S_i έχει τουλάχιστον μία μέτρηση τάσης $(m_{i,v} \neq 0)$. Από τις εξισώσεις (Π.6) και (Π.7) έχουμε:

Από την γραμμική άλγεβρα έχουμε την ιδιότητα [149]:

$$rank(HB) = rank(B) - \dim N(H) \cap R(B) \tag{II.9}$$

όπου N(H)είναι ο μηδενοχώρος της H, R(B) είναι ο χώρος στηλών της B, και dim $N(H) \cap R(B)$ είναι η διάσταση της τομής των χώρων N(H) και R(B). Η μήτρα B στην εξίσωση (A.3) έχει rγραμμικά ανεξάρτητες στήλες. Έτσι:

$$rank(B) = r \tag{(\Pi.10)}$$

Από τις (Π.9), (Π.10) προκύπτει:

$$nullity(HB) = r - rank(HB) = \dim N(H) \cap R(B)$$
(II.11)

Ένα διάνυσμα $a \in N(H)$ διαστάσεων $n \times 1$ θα ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$Ha = 0 \tag{(\Pi.12)}$$

Το διάνυσμα α μπορεί να γραφεί ως:

$$a = \begin{pmatrix} a_1^T & a_2^T & \cdots & a_r^T \end{pmatrix}^T \tag{II.13}$$

όπου το διάνυσμα a_i είναι διαστάσεων $n_i \times 1$. Από τις (A.1)–(A.13) έχουμε:

$$H_i a_i = 0 \tag{(\Pi.14)}$$

που δείχνει ότι $a_i \in N(H_i)$. Αφού κάθε υποσύστημα S_i είναι παρατηρήσιμο, η λύση της (Π.14) θα είναι της μορφής [67]:

$$a_i = b_i \mathbf{1} = b_i \begin{pmatrix} 1\\1\\\vdots\\1 \end{pmatrix} \tag{II.15}$$

όπου το b_i είναι βαθμωτή σταθερά. Όταν $m_{i,v} \neq 0$ τότε $b_i = 0$. Από τις (Π.3), (Π.13), και (Π.15) έχουμε:

$$a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \mathbf{1} \\ b_2 \mathbf{1} \\ \vdots \\ b_r \mathbf{1} \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_r \end{pmatrix}$$
(II.16)

Επομένως $a \in R(B)$, το οποίο υποδηλώνει ότι $N(H) \subseteq R(B)$ και $N(H) \cap R(B) = N(H)$. Τότε:

$$\dim N(H) \cap R(B) = \dim N(H) = nullity(H)$$
(II.17)

Από τις (Π.8), (Π.11), και (Π.17) προκύπτει:

$$nullity(W_h) = nullity(H)$$
 (II.18)

Λήμμα Π.1: Εάν δύο γειτονικά παρατηρήσιμα υποσυστήματα έχουν μετρήσεις τάσης, συνενώνονται σε μία μεγαλύτερη παρατηρήσιμη νησίδα. Απόδειζη: Η συνθήκη (Π.18) για δύο παρατηρήσιμα υποσυστήματα (r = 2, $W_b = I_{2\times 2}$) υποδηλώνει ότι $nullity(W_b) = nullity(H) = 0$. Επομένως τα δύο παρατηρήσιμα υποσυστήματα συνενώνονται σε ένα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*. New York: Springer Science and Business Media, 2008.
- [2] A. G. Phadke, T. Helibka, and M. Ibrahim, "Fundamentals basis for distance relaying with symmetrical components," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 96, no. 2, pp. 635-646, Mar./Apr. 1977.
- [3] A. G. Phadke, J. S. Thorp, and M. J. Adamiak, "A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no.5, pp. 1025-1038, May 1983.
- [4] Available: http://www.gpsworld.com
- [5] "Macrodyne model 1690 PMU disturbance recorder," Macrodyne Inc. 4 Chelsea place, Clifton Park, New York, 12065.
- [6] "Blackout in the United States and Canada: Causes and recommendations," U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Apr. 2004.
- [7] "Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy," Union for the Coordination of the Transmission of Electricity (UCTE), Apr. 2004.
- [8] D. Novosel, K. Vu, V. Centeno, S. Skok, and M. Begovic, "Benefits of synchronizedmeasurement technology for power-grid applications," in *Proc. Hawaii Int. Conf. System Sciences*, 2007.
- [9] M. Zima, T. Krause, and G. Anderson, "Evaluation of system protection scheme, wide area monitoring and control system," in *Int. Conf. on Advances in Power System Control, Operation and Management Conf.*, 2003, pp. 754-759.
- [10] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer relaying for power systems*. New York: Research Studies Press, John Wiley and Sons Inc., 1988.
- [11] J. Postel, "Internet Protocol DARPA Internet Program Protocol Specification," RFC 791, USC/Information Sciences Institute, Sep. 1981.
- [12] *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE Standard 1344-1995, 1995.
- [13] J. Depablos, V. Centeno, A. G. Phadke and M. Ingram, "Comparative testing of synchronized phasor measurement units," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2004, pp. 948–954.
- [14] *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE Standard C37.118-2005, Jun. 2005.
- [15] K. E. Martin, "Synchrophasor Standards Development IEEE C37.118 & IEC 61850," in *Proc. Hawaii Int. Conf. System Sciences*, 2011.
- [16] IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, IEEE Standard C37.111-1991, 1991.
- [17] J.Bertsch, M. Zima, A. Suranyi, C. Carnal, and C. Rehtanz, "Experiences with and perspectives of the system for wide area monitoring of power systems," in *Int. Symp. CIGRE/PES Quality and security of electric power delivery systems*, 2003, pp. 5-9.
- [18] Z. Jizhong, D. Hwang, and A. Sadjadpour, "Real-time congestion monitoring and management of power systems," in *IEEE/PES Transmission and distribution conference and exhibition : Asia and Pacific*, 2005, pp. 1-5.
- [19] T. Van Cutsem, "Voltage instability: Phenomena, countermeasure, and analysis methods," *IEEE Proceedings*, vol. 88, no. 2, pp. 208-227, Feb. 2000.
- [20] "Voltage stability of power systems: concepts, analytical tools, and industry experience," *IEEE publication*, 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [21] A. Kurita and T. Sakurai, "The power system failure on July, 1987 in Tokyo," in *Proc. IEEE Conf. Decision and Control*, vol. 3, 1988, pp. 2093-2097.
- [22] P. Kundur, *Power system stability and control*. New York: EPRI Power system Engineering series, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [23] M. Begovic, *The electric power engineering handbook*. Florida: CRC Press, 2000.
- [24] C. W. Taylor, *Power system voltage stability*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [25] S. H. Horowitz and A. G. Phadke, *Power system relaying* 2^{*nd*} *ed*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1995.
- [26] J. Allemong, "State Estimation fundamentals for successful deployment," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2005.
- [27] K. Uhlen, M. T. Pallson, J. O. Gjerde, K. Vu, and O. Kirkeluten, "Voltage monitoring and control for enhanced utilization of power grids," in *Power Systems Conference and Exposition*, vol. 1, 2004, pp. 342-347.
- [28] A. Mao, J. Yu, and Z. Guo, "PMU placement and data processing in WAMS that complements SCADA," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2005, pp. 690-693.
- [29] "Memorandum from Keith Casey, director, market monitoring to California ISO operation committee," pp. 2-3, Mar. 2006.
- [30] O. Breidablik, F. Giaver, and I. Glende, "Innovative measures to increase the utilization of Norwegian transmission," in *Proc. IEEE Power Tech*, vol. 1, 2003.
- [31] I. Hiskins, "Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements," IEEE *Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 702-710, Nov. 2001.
- [32] S. Sterpu, Y. Besanger, and N. Hadjsaid, "Ancillary service performance control in deregulated power systems," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2005, pp. 722-728.
- [33] M. M. Adibi, *Power system restoration*. New Jersey : Wiley-IEEE Press, 2000.
- [34] D. Novosel, "Phasor measurement application study," Final Report, 2007.
- [35] "Development of a real-time monitoring/dynamic rating system for overhead lines," Consultant Report for CEC, 2003.
- [36] G. D. Rockefeller, C. L. Wagner, J. R. Linders, K. L. Hicks, and D. T. Rizy, "Adaptive transmission relaying concept for improved performance," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 3, no. 4, pp. 1446-1458, Oct. 1988.
- [37] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, and J. S. Thorp, "Adaptive transmission system relaying," *IEEE Trans. Power Del.*, vol.3, no. 4, pp. 1436-1445, Oct. 1988.
- [38] S. Maram, "A new special protection scheme for power system controlled separation," Master thesis, Virginia Polytechnic, 2007.
- [39] F. L. Alvarado, "Detection of external system topology errors," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 100, no. ll, pp. 4553-4561, Nov. 1981.
- [40] S. Massoud Amin, "Toward a smart grid: power delivery for the 21st century," *IEEE Power* and Energy Magazine, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, Sep.-Oct. 2005.
- [41] 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. 99, no. 4, pp. 1534–1542, Jul. 1980.
- [42] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, "Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no. 9, pp. 3044–3052, Sep. 1982.
- [43] 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. 102, no. 7, pp. 2012–2020, Jul. 1983.

- [44] T. Van Cutsem, "Power system observability and related functions Derivation of appropriate strategies and algorithms," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 7, no.3, pp. 175-187, Jul. 1985.
- [45] V. H. Quintana, A. Simoes-Costa, and A. Mandel, "Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no.3 pp. 617-626, Mar. 1982.
- [46] R. R. Nucera and M. L. Gilles, "Observability analysis: A new topological algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 466-475, May 1991.
- [47] F. F. Wu and A. Monticelli, "Network Observability: Theory," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, no. 5, pp. 1042–1048, May 1985.
- [48] A. Monticelli and F. F. Wu, "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, no. 5, pp. 1035-1041, May 1985.
- [49] A. Monticelli and F. F. Wu, "Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 201–206, Feb. 1986.
- [50] 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.
- [51] G. N. Korres, "A robust method for equality constrained state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 305–314, May 2002.
- [52] F. F. Wu, W-H. E. Liu, L. Holten, A. Gjelsvik, and S. Aam, "Observability analysis and bad data processing for state estimation using Hachtel's augmented matrix method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 604–611, May 1988.
- [53] R. R. Nucera, V. Brandwajn, and M. L. Gilles, "Observability analysis and bad data analysis using augmented blocked matrices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 426–433, May 1993.
- [54] B. Gou, "Observability analysis for state estimation using Hachtel's augmented matrix method," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 77, no.7, pp. 865–875, May 2007.
- [55] D. M. Falcao and M. A. Arias, "State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 979–987, May 1994.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] B. Gou, "Jacobian matrix-based observability analysis for state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 348–356, Feb. 2006.
- [59] M. C. de Almeida, E. N. Asada, and A. V. Garcia, "On the use of Gram matrix in observability analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 249–251, Feb. 2008.
- [60] M. C. de Almeida, E. N. Asada, and A. V. Garcia, "Power system observability analysis based on gram matrix and minimum norm solution," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 4, pp. 1611–1618, Nov. 2008.
- [61] 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.
- [62] R. E. Pruneda, C. Solares, A. J. Conejo, and E. Castillo, "An efficient algebraic approach to observability analysis in state estimation," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 3, pp. 277– 286, Mar. 2010.

- [63] C. Solares, A. J. Conejo, E. Castillo, and R. E. Pruneda, "A binary-arithmetic approach to observability checking in state estimation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 3, no. 4, pp. 336–345, Apr. 2009.
- [64] N. G. Bretas, "Network observability: Theory and algorithms based on triangular factorisation and path graph concepts," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 1, pp. 123–128, Jan. 1996.
- [65] J. B. A. London Jr., L. F. C. Alberto, and N. G. Bretas, "Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 1 pp. 39-45, Jan. 2007.
- [66] B. Dönmez and A. Abur, "A Computationally Efficient Method to Place Critical Measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 2, pp. 924–931, May 2011.
- [67] G. C. Contaxis and G. N. Korres, "A reduced model for power system observability analysis and restoration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 4, pp. 1411–1417, Nov. 1988.
- [68] 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.
- [69] G. N. Korres and P. J. Katsikas, "A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 295–304, Feb. 2003.
- [70] G. N. Korres, "A Gram matrix-based method for observability restoration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2569–2571, Nov. 2011.
- [71] G. N. Korres, "Observability analysis based on Echelon form of a reduced dimensional Jacobian matrix", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 2572–2573, Nov. 2011.
- [72] I. W. Slutsker and J. M. Scudder, "Network observability analysis through measurement Jacobian matrix reduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 331–338, May 1987.
- [73] 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.
- [74] G. W. Stewart, Introduction to Matrix Computations. New York: Academic Press, 1973.
- [75] L. Pursell and S. Y. Trimble, "Gram-Schmidt orthogonalization by Gauss elimination," *Amer. Math. Monthly*, vol. 98, no. 6, pp. 544-549, Jun.-Jul. 1991.
- [76] 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.
- [77] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. García, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. New York: Wiley, 2001.
- [78] B. Xu, and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Systems Conf. Exposition, Oct. 2004, pp. 943– 946.
- [79] J. Chen and A. Abur, "Improved bad data processing via strategic placement of PMUs," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, 2005, pp. 509–513.
- [80] 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.
- [81] R. Sodhi, S.C. Srivastava, and S.N. Singh, "Optimal PMU placement to ensure system observability under contingencies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no.2, pp. 1–6, Oct. 2009.
- [82] F. Aminifar, A. Khodaei, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Shahidehpour, "Contingencyconstrained PMU placement in power networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no.1, pp. 516–523, Feb. 2010.
- [83] B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement,"

IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 3, pp. 1099–1104, Aug. 2008.

- [84] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, Sep. 2008.
- [85] 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.
- [86] R. Sodhi, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "Optimal PMU placement method for complete topological and numerical observability of power system," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 80, no. 9, pp. 1154–1159, Sep. 2010.
- [87] R. Emami and A. Abur, "Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 38–43, Feb. 2010.
- [88] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A unified approach for the optimal PMU location for power system state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no.2, pp. 806–813, May 2009.
- [89] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, 2009.
- [90] M. Korkali and A. Abur, "Impact of network sparsity on strategic placement of phasor measurement units with fixed channel capacity," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Syst.* (ISCAS), 2010, pp. 3445–3448.
- [91] R. Kavasseri and S. K. Srinivasan, "Joint optimal placement of PMU and conventional measurements in power systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. on Circuits and Syst.* (ISCAS), 2010, pp. 3449–3452.
- [92] F. Aminifar, M. Fotuhi-Firuzabad, M. Shahidehpour, and A. Khodaei, "Probabilistic multistage PMU placement in electric power systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 2, pp. 841–849, Apr. 2011.
- [93] S. Chakrabarti, D. Eliades, E. Kyriakides, and M. Albu, "Measurement Uncertainty Considerations in Optimal Sensor Deployment for State Estimation," in *Proc. IEEE Int. Symposium Intelligent Signal Processing*, 2007.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi, *Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems*. New York: Wiley–IEEE Press, 2008.
- [97] B. Milosevic and M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 69–75, Feb. 2003.
- [98] X. Bian, and J. Qiu, "Adaptive clonal algorithm and its application for optimal PMU placement," in *Proc. Communications, Circuits and Syst. Int. Conf.*, 2006, pp. 2102–2106.
- [99] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 223–231, May 2006.
- [100] K.-S. Cho, J.-R. Shin, and S. Ho Hyun, "Optimal placement of phasor measurement units with GPS receiver," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, 2001, pp. 258–262.
- [101] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen Jr., and R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 707– 715, May 1993.

- [102] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.
- [103] H.-S. Zhao, Y. Li, Z.-Q. Mi, and L. Yu, "Sensitivity constrained PMU placement for complete observability of power systems," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf. Exhibition*, 2005.
- [104] C. Peng, H. Sun, and J. Guoa, "Multi-objective optimal PMU placement using a nondominated sorting differential evolution algorithm," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 886–892, Oct. 2010.
- [105] 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.
- [106] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi, and M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 7263–7269, 2011.
- [107] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, no. 3, pp. 1014–1020, Jul. 2009.
- [108] M. Hurtgen and J.-C. Maun, "Optimal PMU placement using iterated local search," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 32, no. 8, pp. 857–860, Oct. 2010.
- [109] G. B. Denegri, M. Invernizzi, and F. Milano, "A security oriented approach to PMU positioning for advanced monitoring of a transmission grid," in *Proc. IEEE Int. Conf. Power Systems Technology*, 2002, pp. 798–803.
- [110] M. Zhou, V. A. Centeno, A. G. Phadke, Y. Hu, D. Novosel, and H. A. R. Volskis, "A preprocessing method for effective PMU placement studies," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electric Utility Deregulation Restructuring Power Technologies*, 2008, pp. 2862–2867.
- [111] T. T. Kim, and H. V. Poor, "Strategic protection against data injection attacks on power grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 326–333, Jun. 2011.
- [112] 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.
- [113] R. F. Nuqui, A. G. Phadke, R. P. Schulz, and N. Bhatt, "Fast on-line voltage security monitoring using synchronized phasor measurements and decision trees," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting*, 2001, pp. 1347–1352.
- [114] 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.
- [115] K.-P. Lien, C.-W. Liu, C.-S. Yu, and J.-A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 3, pp. 1128–1136, Jul. 2006.
- [116] 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.
- [117] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," PSERC Publication 05-20, Oct. 2005.
- [118] T. E. Dy Liacco, "Real-Time Computer Control of Power Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no.7, pp. 884-891, Jul. 1974.
- [119] F. C. Schweppe and J. Wildes, "Power system static-state estimation, Part I: Exact model," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 89, no.1, pp. 120-125, Jan. 1970.

- [120] F. C. Schweppe and D. B. Rom, "Power system static-state estimation, Part II: Approximation model," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 89, no. 1, pp. 125-130, Jan. 1970.
- [121] 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. 104, no. 11, pp. 3098–3106, Nov. 1985.
- [122] 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.
- [123] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Hybrid linear state estimation utilizing synchronized phasor measurements," in *Proc. IEEE Power Tech*, 2007, pp. 1665–1669.
- [124] Z. Jun and A. Abur, "Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2004, pp. 1–5.
- [125] 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.
- [126] 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.
- [127] Z. Jun and A. Abur, "Bad Data Identification When Using Phasor Measurements," in *Proc. Power Tech*, 2007, pp.1676 1681.
- [128] T. S. Bi, X. H. Qin, and Q. X. Yang, "A novel hybrid state estimator for including synchronized phasor measurements," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 8, pp. 1343-1352, Aug. 2008.
- [129] M. Hurtgen, J.-C. Maun, "Advantages of power system state estimation using Phasor Measurement Units," in *Proc. Power Syst. Comp. Conf. (PSCC)*, 2008.
- [130] L. Vanfretti, J. H. Chow, S. Sarawgi, D. Ellis, and B. Fardanesh, "A framework for estimation of power systems based on synchronized phasor measurement data," in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2009, pp. 1–6.
- [131] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Valverde, and V. Terzija, "State Estimation Including Synchronized Measurements," in *Proc. Power Tech*, 2009.
- [132] 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.
- [133] R. Sodhi, S. C. Srivastava, S. N. Singh, "Phasor-assisted Hybrid State Estimator," *Elec. Power Comp. Syst.*, vol. 38, no. 5, pp. 533–544, Mar. 2010.
- [134] I. W. Slutsker, S. Mokhtari, L. A. Jaques, J. M. G. Provost, M. B. Perez, J. B. Sierra, F. G. Gonzalez, and J. M. M. Figueroa, "Implementation of phasor measurements in state estimator at Sevillana de Electricidad," in *Proc. IEEE Power Industry Computer Application Conf.*, May 1995, pp. 392–398.
- [135] B. Fardanesh, Use of Phasor Measurements in a Commercial (or Industrial) State Estimator, EPRI, Palo Alto, CA, 2004, Final Rep. 1011002.
- [136] M. Parashar, N. Tripathi, and L. Kondragunta, Implementation of Phasor Measurements in SDG&E State Estimator, California Energy Commission, Tech. Rep., 2008, PIER Program Energy Commission-1500-02-04 MR053.
- [137] 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 and Energy Soc. General Meeting*, 2009.
- [138] H. M. Merril and F. C. Schweppe, "Bad data suppression in power system static state estimation," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 90, no.6, pp. 2718-2725, Nov.-Dec. 1971.
- [139] E. Handschin, F. C. Schweppe, J. Kohlas, and A. Fiechter, "Bad data analysis for power system state estimation," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 94, no. 2, pp. 329-337, Mar.-

Apr. 1975.

- [140] A. Monticelli and A. Garcia, "Reliable bad data processing for real-time state estimation," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no. 3, pp. 1126-1139, May 1983.
- [141] P. A. Machado, G. P. Azevedo, and A. J. Monticelli, "A mixed pivoting approach to the factorization of indefinite matrices in power system state estimation," vol.6, no. 2, pp. 676–682, May 1991.
- [142] I. S. Duff, N. I. M. Gould, J. K. Reid, J. A. Scott, and K. Turner, "The factorization of sparse symmetric indefinite matrices," *IMA J. Numer. Anal.*, vol. 11, no.2, pp. 181–204, 1991.
- [143] K. Martin, J. Hauer, and T. Faris, "PMU testing and installation considerations at the Bonneville power administration," in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting*, 2007, pp. 1–6.
- [144] A. Abur and A.G. Exposito, *Power System State Estimation. Theory and implementation*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [145] 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.
- [146] M. G. Cox, M. P. Dainton, P. M. Harris, and N. M. Ridler, "The evaluation of uncertainties in the analysis of calibration data," *in Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, 1999.
- [147] G. N. Korres, "A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1531–1541, Aug. 2010.
- [148] R. Bridson, "An ordering method for the direct solution of saddle-point matrices," Available: <u>http://www.cs.ubc.ca/~rbridson/kktdirect/kktdirect.pdf</u>.
- [149] C. D. Meyer, *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra*, SIAM Publisher, 2000, ISBN-10: 0-89871-454-0.
- [150] C. Rakpenthai, S. Permrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "PMU-based two stages state estimation for power system with nonlinear devices," in *Proc. 8th Inter. Power Engineering Conf.*, 2007.
- [151] W. Jiang, V. Vittal, and G. T. Heyd, "A distributed state estimator utilizing synchronized phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 563–571, May 2007.
- [152] M. Zhou, V. A. Centeno, J. S. Thorp and 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.
- [153] R. Baltensperger, A. Loosli, H. Sauvain, M. Zima, G. Andersson, and R. Nuqui, "An implementation of two-stage hybrid state estimation with limited number of PMU," in *Proc.* 10th IET Inter. Conf. on Developments in power system protection, 2010.
- [154] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator—Part I: Architecture," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 46–53, Feb. 2011.
- [155] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator—Part II: Algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 1, pp. 54–62, Feb. 2011.
- [156] R. Christie, Power system test archive. [Online]. http://www.ee.washington.edu/research/pstca, Aug. 1999.
- [157] [Online]. Available: http://www.pserc.cornell.edu/matpower.
- [158] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Observability Analysis for Power Systems including Conventional and Phasor Measurements," in *Proc. Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2010.
- [159] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp.

1514-1524, Jul. 2011.

- [160] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," in *Proc. Int. Conf. Intelligent System Applications to Power Systems*, Sep. 2011.
- [161] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "A state estimator including conventional and synchronized phasor measurements," J. Comp. Electrical Engin., vol. 38, no. 2, pp. 294-305, Mar. 2012.
- [162] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 6, no. 9, pp. 902-913, Sep. 2012.
- [163] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Combining conventional and synchronized phasor measurements in a hybrid state estimator," in *Proc. Int. MARINELIVE Conf. on "All Electric Ship"*, Jun. 2012.
- [164] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal placement of phasor measurement units in power systems," in *Proc. Int. MARINELIVE Conf. on "All Electric Ship"*, Jun. 2012.
- [165] G. N. Korres and N. M. Manousakis, 'Observability analysis and restoration for systems with conventional and phasor measurements', *Euro. Trans. Elect. Power*, DOI: 10.1002/etep.1684.
- [166] G. N. Korres and N. M. Manousakis, 'Observability Analysis and Restoration for State Estimation Using SCADA and PMU Data', *Proc. 2012 IEEE PES General Meeting*.
- [167] G. N. Korres and N. M. Manousakis, 'State Estimation Techniques for Monitoring Topology Changes in Distribution Systems', in *Proc. 2012 IEEE PES General Meeting*.
- [168] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "A weighted least squares algorithm for optimal PMU placement," accepted for publication in *IEEE Trans. Power Syst.*
- [169] N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis, and G. N. Korres, "Numerical Observability Method for Optimal PMU Placement using Recursive Tabu Search Method," accepted for publication in *IET Gener. Transm. Distrib.*
- [170] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, and G. N. Korres, "Optimal Placement of Phasor Measurement Unit in Power System using Sequential Quadratic Programming," in *Proc. Int. MARINELIVE Workshops on "Prime Movers and Ship Automation and Control"*, Nov. 2012.