



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Εκτίμηση Κατάστασης Δύο Σταδίων με Χρήση Συμβατικών
και Συγχρονισμένων Μετρήσεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ Ν. ΑΛΙΠΡΑΝΤΗ

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012



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

Εκτίμηση Κατάστασης Δύο Σταδίων με Χρήση Συμβατικών και Συγχρονισμένων Μετρήσεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΙΩΑΝΝΗ Ν. ΑΛΙΠΡΑΝΤΗ

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27^η Ιουνίου 2012.

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

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

.....
Πάυλος Γεωργιάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2012

.....
ΙΩΑΝΝΗΣ Ν. ΑΛΙΠΡΑΝΤΗΣ

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

Copyright © Ιωάννης Ν. Αλιπράντης, 2012
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.

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί ολοένα και καλύτερη εποπτεία του συστήματος. Η σημαντικότερη μέθοδος για αυτή τη λειτουργία είναι η εκτίμηση κατάστασης, η οποία παρέχει μια δυναμική απεικόνιση της κατάστασης του δικτύου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις μετρήσεις που μεταφέρουν συσκευές που βρίσκονται διασκορπισμένες σε διάφορα σημεία του δικτύου. Η βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων και η άμεση μεταφορά τους στα κέντρα ελέγχου έχει μεγάλη σημασία για το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται μεγάλη ανάπτυξη στην τεχνολογία των PMU, συσκευών που παίρνουν μετρήσεις τάσεως και ρεύματος με πολύ υψηλό ρυθμό, μεγάλη ακρίβεια και χρονική σήμανση. Ωστόσο, το υψηλό κόστος τους εμποδίζει την καθολική αντικατάσταση όλων των συμβατικών μετρήσεων SCADA με συγχρονισμένες μετρήσεις PMU. Έτσι, τοποθετείται μικρός αριθμός συσκευών PMU σε θέσεις στρατηγικής σημασίας του δικτύου, με αποτέλεσμα να συνυπάρχουν και τα δύο είδη μετρήσεων, και να προτείνονται πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι για την τροποποίηση του κλασικού εκτιμητή. Στη παρούσα εργασία, προτείνεται ένας τέτοιος υβριδικός αλγόριθμος 2 βημάτων, που επεξεργάζεται τις συγχρονισμένες μετρήσεις σε πρώτο στάδιο, και τις συμβατικές μετρήσεις στο δεύτερο. Ο αλγόριθμος αυτός αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab και εφαρμόστηκε στο δίκτυο των 118 και 2383 ζυγών της IEEE. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι βελτιώνεται κατά πολύ η ακρίβεια του υπολογισμού της κατάστασης του δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: εκτίμηση κατάστασης, μέθοδος WLS, μονάδες PMU, συγχρονισμένες μετρήσεις, συμβατικές μετρήσεις, υβριδικός εκτιμητής δύο βημάτων, περιορισμοί ισοτήτων, ανίχνευση και εντοπισμός σφαλμάτων

Abstract

The growing demand for electricity and the development of power systems requires better monitoring of the system. The most important method for this function is state estimation, which provides a dynamic display of network status. The method is based on measurements which many devices that are scattered in various parts of the network, are carrying to the control center. Improving the accuracy of measurements and direct transport to the control centers is of great importance for the outcome of the state estimation. For this reason, there is great progress in technology PMU, which are devices that take voltage and current measurements with very high rate, high accuracy and time stamp. However, their high cost prevents the universal replacement of all conventional SCADA measurements with measurements from PMU devices. So, a small number of PMU devices is placing in strategic locations of the network, thus coexist both types of measurements, and therefore many different algorithms for modifying the classical estimator have been proposed. This study introduces one two-step hybrid algorithm, which processes synchronized measurements initially, and conventional measurements secondly. The algorithm has been developed in Matlab environment and has been tested in networks with 118 and 2383 busses. The results show that there is a significant improvement for the accuracy of the calculation of network status.

Keywords: state estimation, WLS method, PMU devices, synchronized measurements, SCADA measurements, two-step hybrid state estimator, equality constraints, bad data detection

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Γεώργιο Κορρέ, τόσο για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για την πολύτιμη επιστημονική του βοήθεια.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τους συμμετέχοντες στην εξεταστική επιτροπή, κ. Βουρνά Κωνσταντίνο και κ. Γεωργιάκη Παύλο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Νικόλαο Μανουσάκη, υποψήφιο Διδάκτορα του ΕΜΠ, για τη συνεργασία του, την αμέριστη βοήθειά του και την υποστήριξη όλους αυτούς τους μήνες.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, Βαβουράκη Γεώργιο και Μακρίνα Γεώργιο, για τη συνεργασία που είχαμε.

Ακόμα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου και στους φίλους μου για την πολύτιμη υποστήριξη, κατανόηση και κάθε είδους βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

1. Εισαγωγή.....	17
1.1 Γενικά.....	17
1.2 Οργάνωση της εργασίας.....	19
2. Ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	21
2.1 Επεξεργασία τοπολογίας.....	22
2.2 Ανάλυση παρατηρησιμότητας.....	23
2.2.1 Αριθμητική παρατηρησιμότητα.....	24
2.2.2 Τοπολογική παρατηρησιμότητα.....	24
2.3 Εκτίμηση κατάστασης.....	25
2.3.1 Μοντέλο δικτύου και παραδοχές.....	25
2.3.2 Αναπαράσταση δικτύου.....	29
2.3.3 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας.....	30
2.3.4 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Γκαουσιανής κατανομής.....	31
2.3.5 Συνάρτηση Πιθανοφάνειας.....	32
2.3.6 Μοντέλο μετρήσεων και Παραδοχές.....	34
2.3.7 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	37
2.3.8 Η συνάρτηση των μετρήσεων $h(x)$	40
2.3.9 Η Ιακωβιανή μήτρα $H(x)$	41
2.3.10 Η μήτρα κέρδους $G(x)$	44
2.3.11 Παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους.....	45
2.4 Ανίχνευση και εντοπισμός σφαλμάτων.....	46
2.5 Μέθοδος εκτίμησης κατάστασης με περιορισμούς ισότητας.....	51
3. Η τεχνολογία των Phasor Measurement Units (PMU).....	54
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	54
3.2 Αναπαράσταση φασιθετών με μορφή ημιτόνου.....	56
3.3 Τα στοιχεία ενός PMU.....	58
3.4 Το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης (GPS).....	60
3.5 Η ιεραρχία των συστημάτων μέτρησης φασιθετών.....	61
3.6 Επιλογές επικοινωνίας για τα PMU.....	63
3.7 Λειτουργικές απαιτήσεις των PMUs και PDCs.....	67
3.7.1 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη.....	67

3.7.2	Μορφότυπο αρχείου της συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη.....	68
3.7.3	Τα αρχεία για τα PDC.....	70
3.8	Βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων PMU.....	70
3.8.1	Παράδειγμα 1ου αλγορίθμου για βέλτιστη τοποθέτηση PMU.....	71
3.8.2	Παράδειγμα 2ου αλγορίθμου για βέλτιστη τοποθέτηση PMU.....	72
3.9	Εφαρμογές των μονάδων PMU.....	73
3.10	Σύγκριση του συστήματος SCADA με τα PMUs.....	79
3.11	Εκτίμηση κατάστασης με συγχρονισμένες μετρήσεις.....	80
4.	Εφαρμογή Εκτίμησης Κατάστασης.....	90
4.1	Περιγραφή Προγράμματος.....	90
4.1.1	Εισαγωγή.....	90
4.1.2	Περιγραφή θεωρίας του αλγορίθμου.....	91
4.1.3	Αρχεία εισόδου.....	94
4.1.4	Περιγραφή αλγορίθμου – Κύριες συναρτήσεις.....	95
4.2	Σενάρια Εκτέλεσης Αλγορίθμου.....	100
4.2.1	Δίκτυο 118 ζυγών IEEE.....	102
4.2.2	Δίκτυο 2383 ζυγών IEEE.....	137
5.	Επίλογος.....	141
5.1	Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	141
5.2	Μελλοντική εργασία.....	148
6.	Βιβλιογραφία.....	150
7.	Παράρτημα.....	154
7.1	Μορφότυπο αρχείου συστήματος.....	154
7.2	Μορφότυπο αρχείου μετρήσεων.....	164
7.3	Παράμετροι του διανύσματος proportion.....	170
7.4	Αρχείο μετρήσεων για το δίκτυο των 2383 ζυγών IEEE.....	171

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.....	21
Σχήμα 2.2: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς.....	25
Σχήμα 2.3: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου.....	26
Σχήμα 2.4: Μοντέλο μετασχηματιστή.....	26
Σχήμα 2.5: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή.....	27
Σχήμα 2.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Κανονικής Κατανομής.....	31
Σχήμα 2.7: Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	38
Σχήμα 2.8: Μοντέλο «Π» για την αναπαράσταση κλάδου του δικτύου.....	39
Σχήμα 2.9: Διάγραμμα ροής της μεθόδου LNR.....	49
Σχήμα 3.1: Η πρώτη συσκευή μέτρησης φασιθετών (PMU).....	54
Σχήμα 3.2: Ένα ημιτονοειδές σήμα και η απεικόνισή του ως διάνυσμα.....	56
Σχήμα 3.3: Τα σημαντικότερα μέρη ενός σύγχρονου PMU.....	57
Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση της διάταξης των δορυφόρων για το σύστημα GPS.....	59
Σχήμα 3.5: Ιεραρχία των συστημάτων μέτρησης φασιθετών και τα επίπεδα των συσκευών συγκέντρωσης δεδομένων φασιθετών.....	61
Σχήμα 3.6: Τυπική κατασκευή ενός καλωδίου οπτικών ινών.....	63
Σχήμα 3.7: Περιπτώσεις τοποθέτησης οπτικών ινών στις γραμμές μεταφοράς.....	64
Σχήμα 3.8: Τύποι οπτικών ινών, οι διαστάσεις τους και ο τρόπος μετάδοσης του σήματος σε κάθε ένα.....	65
Σχήμα 3.9: Απόδοση των PMUs για εισόδους σημάτων οποιαδήποτε συχνότητας.....	67
Σχήμα 3.10: Δομή των αρχείων PMU.....	68
Σχήμα 3.11: Παρατηρήσιμες νησίδες για το σύστημα των 14 ζυγών.....	71
Σχήμα 3.12: Οι μετρήσεις ρευμάτων παρέχουν έμμεσα τα διανύσματα τάσεων των ζυγών που συνδέουν.....	73
Σχήμα 3.13: Εκτίμηση κατάστασης χωρίς πλήρη παρατηρησιμότητα.....	73
Σχήμα 3.14: Ελεγκτές με χρήση συμβατικών μετρήσεων και μοντέλων.....	75
Σχήμα 3.15: Ελεγκτές με συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών.....	76
Σχήμα 3.16: Εφαρμογές των PMUs στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	78
Σχήμα 3.17: Συγχρονισμένες μετρήσεις που παρέχει μια συσκευή PMU κατεστημένη σε τυχαίο ζυγό.....	79
Σχήμα 3.18: Αναπαράσταση τάσεων-ρευμάτων σε ένα κλάδο με το μοντέλο PMU.....	80

Σχήμα 3.19: Αναπαράσταση φασιθετών τάσης και ρεύματος.....	83
Σχήμα 4.1: Σενάριο με νησίδες PMU και ζυγούς μηδενικής έγχυσης.....	92
Σχήμα 4.2: Δίκτυο 118 ζυγών IEEE.....	102
Σχήμα 5.1: Δείκτης ακρίβειας για τις φασικές γωνίες τάσης.....	140
Σχήμα 5.2: Δείκτης ακρίβειας για τα μέτρα τάσης.....	141
Σχήμα 5.3: Κανονικοποιημένα σφάλματα για τις φασικές γωνίες τάσης.....	141
Σχήμα 5.4: Κανονικοποιημένα σφάλματα για τα μέτρα τάσης.....	142
Σχήμα 5.5: Συνολικός χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα.....	142
Σχήμα 5.6: Δείκτης ακρίβειας για τις φασικές γωνίες τάσης.....	144
Σχήμα 5.7: Δείκτης ακρίβειας για τα μέτρα τάσης.....	144
Σχήμα 5.8: Κανονικοποιημένα σφάλματα για τις φασικές γωνίες τάσης.....	145
Σχήμα 5.9: Κανονικοποιημένα σφάλματα για τα μέτρα τάσης.....	145
Σχήμα 5.10: Χρόνος εκτέλεσης 1 ^{ου} βήματος αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα.....	146
Σχήμα 5.11: Χρόνος εκτέλεσης 2 ^{ου} βήματος αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα.....	146

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.1: Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU.....	78
Πίνακας 4.1: Κατηγορίες μετρήσεων και συμβολισμός.....	90
Πίνακας 4.2: Συγχρονισμένες μετρήσεις σεναρίου 1Α.....	103
Πίνακας 4.3: Συμβατικές μετρήσεις σεναρίου 1Α.....	103
Πίνακας 4.4: Συγχρονισμένες μετρήσεις σεναρίου 1Β.....	105
Πίνακας 4.5: Πρόσθετες συγχρονισμένες μετρήσεις για το σενάριο 1Δ.....	106
Πίνακας 4.6: Πρόσθετες συγχρονισμένες μετρήσεις του σεναρίου 1ΣΤ.....	106
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα σεναρίου για τους 118 ζυγούς.....	107
Πίνακας 4.8: Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων.....	108
Πίνακας 4.9: Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων.....	111
Πίνακας 4.10: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Α.....	114
Πίνακας 4.11: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Β.....	115
Πίνακας 4.12: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Γ.....	116
Πίνακας 4.13: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Δ.....	118
Πίνακας 4.14: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Ε.....	120
Πίνακας 4.15: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1ΣΤ.....	122
Πίνακας 4.16: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Ζ.....	124
Πίνακας 4.17: Αποτελέσματα σεναρίου για τους 118 ζυγούς χωρίς equality constraints.....	126
Πίνακας 4.18 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints.....	127
Πίνακας 4.19 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints.....	130
Πίνακας 4.20: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Α.....	133
Πίνακας 4.21: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Β.....	133
Πίνακας 4.22: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Γ.....	134
Πίνακας 4.23: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Δ.....	134
Πίνακας 4.24: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Ε.....	135
Πίνακας 4.25: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1ΣΤ.....	136
Πίνακας 4.26: Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Ζ.....	136
Πίνακας 4.27: Αποτελέσματα σεναρίου για τους 2383 ζυγούς με equality constraints.....	138
Πίνακας 4.28: Αποτελέσματα σεναρίου για τους 2383 ζυγούς χωρίς equality constraints.....	139
Πίνακας 4.29: Περίσσεια μετρήσεων των 7 αρχείων για τους 2383 ζυγούς.....	140

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων.....	170
Πίνακας 7.2: Μετρήσεις έγχυσης ισχύος (ενεργής και άεργης) για όλα τα αρχεία μετρήσεων.....	180
Πίνακας 7.3: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για το πρώτο αρχείο μετρήσεων, οι οποίες θα αποτελούν τις συμβατικές μετρήσεις μέτρου τάσης στα αρχεία μετρήσεων 3,5,7.....	180
Πίνακας 7.4: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για το πρώτο αρχείο μετρήσεων, οι οποίες θα αποτελούν επιπλέον συμβατικές μετρήσεις ροής ισχύος στα αρχεία μετρήσεων 2~7.....	180
Πίνακας 7.5: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 2~7.....	181
Πίνακας 7.6: : Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 2~7.....	181
Πίνακας 7.7: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 4~7.....	181
Πίνακας 7.8: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 4~7.....	182
Πίνακας 7.9: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 6~7.....	182
Πίνακας 7.10: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 6~7.....	182

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Τα τελευταία 20 χρόνια, τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) σε πολλές χώρες υφίστανται θεμελιώδεις αλλαγές που οφείλονται κυρίως στην απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, κυριαρχεί η πεποίθηση ότι ο ανταγωνισμός στις αγορές θα έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την αύξηση των τεχνολογικών καινοτομιών και τελικά την μείωση τιμής της λιανικής πώλησης της ενέργειας. Σε ένα διασυνδεδεμένο σύστημα, υπάρχουν πολλές εταιρίες οι οποίες θα πρέπει να συνεργαστούν για την ομαλή λειτουργία του. Με την αύξηση του ανταγωνισμού και την είσοδο όλο και περισσότερων εταιριών στα ΣΗΕ υπάρχει η πιθανότητα κάποιες από αυτές να διστάζουν να ανταλλάξουν δεδομένα για λόγους ασφάλειας. Όλα αυτά έχουν σαν αποτέλεσμα τα ΣΗΕ να γίνονται όλο και μεγαλύτερα ενώ η ύπαρξη πολλών και διαφορετικών παραγωγών τα κάνει πιο πολύπλοκα.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, η λειτουργία του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης γίνεται όλο και πιο σημαντική επειδή είναι το κύριο εργαλείο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του συστήματος, με βάση τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνει από τις μονάδες μέτρησης. Για παράδειγμα, μια από τις αιτίες της κατάρρευσης του ΣΗΕ στη βορειοανατολική Αμερική του 2003 ήταν ο ελλιπής έλεγχος των δεδομένων και η αποτυχία της οργάνωσης του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος που δεν κατάφερε να την περιορίσει. Διαδικασίες όπως η ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ, ή οικονομική κατανομή φορτίου, εξαρτώνται ιδιαίτερα από την ακρίβεια που παρέχονται από την εκτίμηση κατάστασης. [1]

Η εκτίμηση κατάστασης (Ε.Κ.) είναι για δεκαετίες τώρα μια από τις απαραίτητες εφαρμογές στα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management System ή EMS), επιτρέποντας την ασφαλή λειτουργία των δικτύων μεταφοράς. Οι μετρήσεις που εισάγονται και επεξεργάζονται στον εκτιμητή κατάστασης, περιλαμβάνουν ροές ισχύος, εγχύσεις ισχύος και μέτρα τάσης και ρεύματος. Μια βασική παραδοχή για την εκτίμηση κατάστασης είναι ότι το σύνολο των μετρήσεων αποτελεί ένα στιγμιότυπο του συστήματος που επιτηρεί, το οποίο όμως δεν ισχύει στην πράξη διότι χρειάζεται αρκετός χρόνος για να παρθούν και να συγκεντρωθούν οι μετρήσεις ώστε να επεξεργαστούν από την Ε.Κ. Στην πραγματικότητα, θα ήταν πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να διασφαλίσουμε ότι όλες οι μετρήσεις είναι συγχρονισμένες. Ωστόσο, εφόσον ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας μέτρησης είναι αρκετά μικρός, συγκρινόμενος με την σταθερά χρόνου του φορτίου του συστήματος, αυτή η παραδοχή είναι αποδεκτή στη πράξη.

Σήμερα, υπάρχει μια σαφής τάση διεύρυνσης της γεωγραφικής εμβέλειας πολλών εκτιμητών κατάστασης, σύμφωνα πάντα με τις ανάγκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες θέλουν την μόνιμη και ακριβή παρακολούθηση της μεταφοράς ενέργειας και στο πιο απομακρυσμένο σημείο του δικτύου. Στο πλαίσιο αυτό, το έργο της συλλογής μετρήσεων σε μεγάλες περιοχές και ο συγχρονισμός των λύσεων που παρέχει κάθε κέντρο ελέγχου, θα είναι μια πρόκληση.

Πρόσφατα, η εισαγωγή πιο εξελιγμένων συσκευών μέτρησης και προστασίας, όπως είναι τα Intelligent Electronic Devices (IEDs), έδωσε την δυνατότητα μέτρησης διαφοράς φάσεως σε γειτονικούς φασιθέτες τάσεως και ρεύματος, σε επίπεδο υποσταθμού. Αυτό σίγουρα μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης σε ένα δίκτυο μεταφοράς, αλλά δεν είναι πολύ χρήσιμο σε σύνθετα και μεγάλα δίκτυα.

Μερικές φορές, μια φαινομενικά απλή τεχνολογική καινοτομία μπορεί να γίνει σημαντικός παράγοντας στην αλλαγή ολόκληρης της βιομηχανίας. Το τρανζίστορ, η ηλεκτρική λάμπα φωτισμού, το λέιζερ είναι μερικά ιστορικά παραδείγματα τέτοιων καινοτομιών. Στα παραπάνω μπορεί να συμπεριληφθεί και το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης, ή όπως είναι ευρύτερα γνωστό GPS (Global Positioning Satellite), το οποίο συστάθηκε αρχικά για μια μικρή ομάδα χρηστών, αλλά στη συνέχεια έγινε γρήγορα ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται σε όλο τον κόσμο από σχεδόν όλους τους ανθρώπους. Το σύστημα GPS λοιπόν, παρέχει δυο πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα τα οποία προηγουμένως είτε ήταν δύσκολο να αποκτηθούν, είτε δεν ήταν άμεσα. Το πρώτο είναι η δυνατότητα προσδιορισμού της ακριβής γεωγραφικής θέσης, και το δεύτερο είναι η παγκόσμια πρόσβαση σε ένα ακριβές ρολόι επιτρέποντας στις μετρήσεις να χαρακτηρίζονται και από την ακριβή ώρα που αυτές πάρθηκαν. Μετά την ανάπτυξη και την εγκατάσταση του συστήματος GPS, ακολούθησαν πολλές συσκευές οι οποίες αποτελούνταν κυρίως από ένα δέκτη και έναν επεξεργαστή. Η λειτουργία του δέκτη είναι να συλλάβει τα σήματα που μεταδίδονται από τους δορυφόρους και στη συνέχεια να τα επεξεργαστεί με διάφορους τρόπους ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Ένα τέτοιο παράδειγμα συσκευής είναι και η Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών ή PMU (Phasor Measurement Unit). Τέτοιες συσκευές εγκαθίστανται σε υποσταθμούς συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και σκοπός τους είναι προσδιορίσουν με ακρίβεια την συχνότητα των ρευμάτων και των τάσεων που μετράνε και στη συνέχεια παράγουν την αντίστοιχη διανυσματική τους αναπαράσταση με βάση πάντα το παγκόσμιο ρολόι.

Η ανάπτυξη των PMUs ξεκίνησε πριν περίπου μια δεκαετία με αργούς ρυθμούς, ωστόσο μετά την τεράστια επιτυχία που είχαν στα ΣΗΕ σε όλο τον κόσμο, η χρήση τους πλέον είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη.

Οι μετρήσεις φασιθετών συγχρονίζονται με βάση το παγκόσμιο ρολόι που παρέχεται από τους δορυφόρους και το GPS. Χάρης στην ακριβή αναφορά χρόνου λοιπόν, οι συγχρονισμένες μετρήσεις πλέον που λαμβάνονται από όλους τους υποσταθμούς, μπορούν να δημιουργήσουν μια ακριβή εικόνα τους συστήματος σε μια δεδομένη στιγμή, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη ορισμού γωνίας αναφοράς που υπήρχε στον συμβατικό εκτιμητή κατάσταση.

Η χρήση μετρήσεων από συσκευές PMU επηρεάζει με πολλούς διαφορετικούς τρόπους τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Από τη μια πλευρά, δεδομένου ότι ο αριθμός των PMU που έχουν εγκατασταθεί στα υπάρχοντα ΣΗΕ δεν είναι ακόμα επαρκής για την εκτέλεση του αλγορίθμου αποκλειστικά με μετρήσεις PMU, η εκτίμηση κατάστασης παραμένει μια μη γραμμική και επαναληπτική διαδικασία. Γενικά, έχουν προταθεί αρκετές διαφορετικές μορφές του αλγορίθμου Ε.Κ. στις οποίες επεξεργάζονται συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις (δηλαδή μετρήσεις από συσκευές PMU) σε δυο στάδια.

Από την άλλη πλευρά, η εκτίμηση κατάστασης σχετίζεται με θέματα όπως η παρατηρησιμότητα του δικτύου, η τοποθέτηση των μετρήσεων, η ακρίβεια της λύσης, η αξιοπιστία του δικτύου, η ανίχνευση και ο εντοπισμός των εσφαλμένων μετρήσεων κ.α., τα οποία θα πρέπει να αναθεωρηθούν με την είσοδο των συγχρονισμένων μετρήσεων στον αλγόριθμο. Τέλος, η υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας στην οποία μπορούν να δουλέψουν οι συσκευές PMU, δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης της δυναμικής κατάστασης του δικτύου για μερικές από τις κρίσιμες παραμέτρους του. [2]

1.2 Οργάνωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει οργανωθεί σε κεφάλαια που περιγράφουν τη θεωρία γύρω από τον κλασσικό εκτιμητή κατάστασης, καθώς και κάποια στοιχεία για την τεχνολογία των PMU και την εφαρμογή των συγχρονισμένων μετρήσεων. Επιπλέον, περιγράφεται αναλυτικά ένας υβριδικός αλγόριθμος δυο βημάτων που προτείνεται για επίλυση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης σε δίκτυα με συγχρονισμένες και συμβατικές μετρήσεις, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου σε διάφορα δίκτυα.

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική ιστορική παρουσίαση της εκτίμησης κατάστασης και των μέσων που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της λειτουργίας αυτής.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται όλη η θεωρία γύρω από τον κλασσικό εκτιμητή κατάστασης και διάφορες λειτουργίες γύρω από αυτόν όπως η παρατηρησιμότητα, η ανίχνευση και ο εντοπισμός σφαλμάτων, και οι περιορισμοί ισότητας, ενώ περιγράφονται κάποιες γνωστές μέθοδοι όπως η WLS και η LNR.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή της τεχνολογίας των μονάδων PMU και αναλύονται τα πλεονεκτήματα, οι εφαρμογές και ο τρόπος λειτουργίας τους ενώ στο τέλος δίνονται και οι εξισώσεις για τον εκτιμητή κατάστασης μόνο με συγχρονισμένες μετρήσεις.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος λειτουργίας του υβριδικού εκτιμητή 2 βημάτων και η θεωρία στην οποία βασίζεται η κατασκευή του, ενώ δίνονται και 2 εφαρμογές του στο δίκτυο των 118 και των 2383 ζυγών της IEEE.

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται ένας σύντομος σχολιασμός των αποτελεσμάτων και προτείνονται κάποια θέματα για βελτίωση του αλγορίθμου που προτείνεται, καθώς και θέματα για μελλοντική εργασία.

2. Ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

Ο αλγόριθμος της εκτίμησης κατάστασης είναι μια συνάρτηση των κέντρων ελέγχου που συνδέεται με το σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων ή σύστημα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Ο αλγόριθμος αυτός δέχεται τα δεδομένα που μεταφέρουν τα RTUs (Remote Telemetry Unit) μέσω του συστήματος SCADA και δίνει σε όλες τις άλλες εφαρμογές, όπως την ανάλυση ενδεχόμενων διαταραχών, αξιόπιστα στοιχεία για την κατάσταση του δικτύου. Οι μετρήσεις που χρησιμοποιεί η Ε.Κ. είναι ένα υποσύνολο της βάσης δεδομένων “πραγματικού χρόνου” του συστήματος SCADA και συνήθως περιλαμβάνει:

- Ροές ισχύος: οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος μετρούνται στα δυο άκρα μιας γραμμής μεταφοράς ή ενός μετασχηματιστή.
- Εγχύσεις ισχύος: ενεργή και άεργή ισχύς που εγχέεται στους ζυγούς του συστήματος.
- Μέτρο τάσης: μετρήσεις μέτρου τάσεως στους ζυγούς του συστήματος.
- Μέτρο ρεύματος: μετρήσεις μέτρου ρεύματος σε μια γραμμή μεταφοράς ή σε μετασχηματιστή.
- Κατάσταση διακόπτη: αν ένας διακόπτης είναι κλειστός/ανοιχτός.

Ο εκτιμητής κατάστασης χρειάζεται επίσης και δεδομένα για την συνδεσιμότητα και τις παραμέτρους του δικτύου, τα οποία ονομάζονται ‘στατική’ βάση δεδομένων και υπάρχουν σε όλα τα κέντρα ελέγχου, και περιλαμβάνουν τις εξής πληροφορίες:

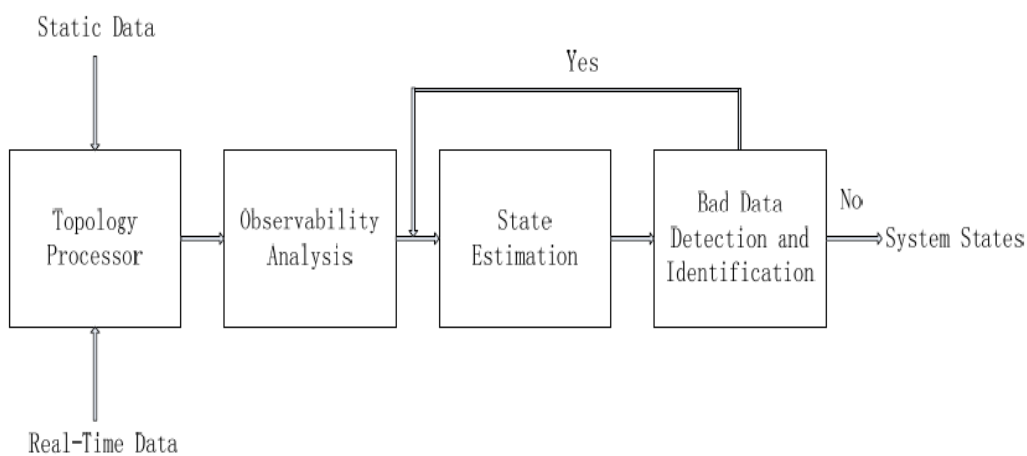
- Δεδομένα για τους διακόπτες των κλάδων του δικτύου: περιλαμβάνουν πληροφορίες για την σύνδεση των ζυγών του δικτύου.
- Δεδομένα για την συνδεσιμότητα των ζυγών: περιγράφουν τα στοιχεία του δικτύου που συνδέονται σε κάθε ζυγό.

Με την βάση δεδομένων ‘πραγματικού χρόνου’ και την ‘στατική’ βάση δεδομένων, ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης μπορεί να υπολογίσει την κατάσταση του συστήματος, εκτελώντας τις παρακάτω λειτουργίες με την σειρά που φαίνεται στο Σχήμα 2.1:

- Επεξεργασία τοπολογίας: συγκεντρώνει δεδομένα κατάστασης των αποζευκτών και διακοπών του δικτύου και παράγει το τρέχον διάγραμμα του συστήματος .
- Ανάλυση παρατηρησιμότητας: με δεδομένο το σύνολο των μετρήσεων, καθορίζει αν μπορεί να υπολογιστεί λύση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης για όλο το δίκτυο ή μέρος του δικτύου, και προσδιορίζει τους μη παρατηρήσιμους

κλάδους, καθώς και τις νησίδες παρατηρησιμότητας του δικτύου, εφόσον αυτοί υπάρχουν.

- Εκτίμηση κατάστασης: επεξεργάζεται τις μετρήσεις ‘πραγματικού χρόνου’ που δέχεται σαν είσοδο και υπολογίζει τη τάση (μέτρο και γωνία) όλων των ζυγών του συστήματος.
- Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων: ελέγχει την λύση του αλγορίθμου Ε.Κ. ώστε να βρει εσφαλμένες μετρήσεις, και εφόσον τις βρει, τις αφαιρεί.



Σχήμα 2.1 Διάγραμμα ροής αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης

2.1 Επεξεργασία τοπολογίας

Για την διαμόρφωση της τοπολογίας του δικτύου, χρησιμοποιούνται τόσο η κατάσταση των διακοπών των κλάδων, όσο και η συνδεσιμότητα του δικτύου. Δηλαδή, ανάλογα με το ποιοι διακόπτες είναι κλειστοί, καθορίζονται οι κλάδοι του δικτύου σύμφωνα με την ‘στατική’ βάση δεδομένων, και άρα καθορίζεται η μορφή του. Στη στατική βάση δεδομένων, υπάρχουν όλα τα στοιχεία του δικτύου όπως οι γεννήτριες, τα φορτία, οι πυκνωτές, οι μετασχηματιστές και οι γραμμές μεταφοράς, που είναι συνδεδεμένα με τους ζυγούς. Με την επεξεργασία τοπολογίας, υπολογίζονται ποιες γεννήτριες, φορτία ή πυκνωτές βρίσκονται σε κάθε ζυγό, και ποιοι μετασχηματιστές ή γραμμές μεταφοράς βρίσκονται στους κλάδους. Επίσης, η επεξεργασία τοπολογίας καθορίζει τις ‘νησίδες’ του δικτύου που τροφοδοτούνται, και αφαιρεί αυτές που δεν τροφοδοτούνται. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται τόσο σε επίπεδο υποσταθμών όσο και σε επίπεδο κέντρων ελέγχου, αποτελείται από τρία βήματα.

Στο πρώτο βήμα, κάθε τμήμα ζυγού θεωρείται ένας ξεχωριστός ζυγός. Στη συνέχεια εξετάζονται ένας-ένας όλοι οι διακόπτες που συνδέονται με αυτόν, κι αν ένας διακόπτης είναι κλειστός, οι δυο ζυγοί που συνδέονται ενώνονται σε έναν. Αυτό γίνεται για όλους τους ζυγούς με τη μορφή δέντρου, και στο τέλος, όλα τα τμήματα ζυγών που ενώνονται με κλειστούς διακόπτες, ενώνονται σε έναν. Το βήμα αυτό είναι αρκετά γρήγορο διότι ο αριθμός των διακοπών που η κατάσταση τους αλλάζει είναι σχετικά μικρός.

Στο δεύτερο βήμα, χρησιμοποιείται η τοπολογία που βρέθηκε στο πρώτο, για να προσδιοριστούν οι νησίδες που τροφοδοτούνται. Η διαδικασία που ακολουθείται εδώ είναι όμοια με το πρώτο βήμα, με τη διαφορά ότι αντί για τμήματα ζυγών που ενώνονται σε ζυγούς, εδώ έχουμε ζυγούς που ενώνονται σε νησίδες. Αφού καθοριστούν οι νησίδες, αυτές που δεν έχουν γεννήτρια αγνοούνται για το επόμενο βήμα.

Στο τρίτο βήμα, συνοψίζονται τα στοιχεία που ενώνονται στους ζυγούς. Εφόσον τα στοιχεία που συνδέονται με κάθε τμήμα ζυγού είναι γνωστά, και τα τμήματα ζυγών που απαρτίζουν τους ζυγούς έχουν βρεθεί στο πρώτο βήμα, μπορεί να βρεθεί η συνδεσιμότητα του δικτύου. Τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου συνθέτουν ένα πίνακα για εύκολη χρήση από άλλους αλγορίθμους που μπορεί να τα χρειαστούν. Επίσης σε αυτό το βήμα, προσδιορίζονται οι ζυγοί φορτίου και οι ζυγοί παραγωγής, ενώ για κάθε νησίδα προσδιορίζεται και ένας ζυγός αναφοράς.

Από τον αλγόριθμο της επεξεργασίας τοπολογίας, μπορούμε να δούμε ότι όλες οι λειτουργίες μπορούν να διανεμηθούν στους υποσταθμούς και στα κέντρα ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο βήμα και ένα μέρος του τρίτου, που περιλαμβάνει την ταξινόμηση των στοιχείων του κάθε ζυγού, μπορούν να γίνουν στους υποσταθμούς. Το δεύτερο βήμα και το υπόλοιπο μέρος του τρίτου, στο οποίο καθορίζονται οι ιδιότητες του κάθε ζυγού, μπορούν να γίνουν στα κέντρα ελέγχου. Έτσι λοιπόν, μερικοί υπολογισμοί του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης γίνονται στους υποσταθμούς, ώστε να μειώνεται ο όγκος των δεδομένων που επεξεργάζονται τα κέντρα ελέγχου, καθώς και η πολυπλοκότητα των υπολογισμών.

2.2 Ανάλυση παρατηρησιμότητας

Λαμβάνοντας υπόψη το διαθέσιμο σύνολο μετρήσεων, η ανάλυση παρατηρησιμότητας προσδιορίζει εάν ολόκληρο το διάνυμα κατάστασης, δηλαδή οι γωνίες και τα μέτρα των τάσεων των ζυγών του δικτύου, μπορεί να εκτιμηθεί ή κάποια τμήματά τους. Το δίκτυο είναι παρατηρήσιμο αν όλο το διάνυμα κατάστασης μπορεί να εκτιμηθεί, ειδικά τα μέρη του

δικτύου που μπορούν να εκτιμηθούν ονομάζονται παρατηρήσιμες 'νησίδες'. Ο αλγόριθμος της ανάλυσης παρατηρησιμότητας χωρίζεται σε δυο κατηγορίες: αριθμητική και τοπολογική παρατηρησιμότητα.

2.2.1 Αριθμητική παρατηρησιμότητα

Το δίκτυο είναι παρατηρήσιμο, αν ο αριθμός των ανεξάρτητων στηλών της Ιακωβιανής μήτρας $H(x)$ είναι ίσος με το μέγεθος του διανύσματος κατάστασης πλην ένα. Διαφορετικά, υπάρχουν παρατηρήσιμες νησίδες. Ένας ακόμα αριθμητικός τρόπος είναι ο έλεγχος της διαγωνίου της μήτρας κέρδους $G(x)$. Συγκεκριμένα, το δίκτυο είναι παρατηρήσιμο αν η μήτρα κέρδους μπορεί να υπολογιστεί χωρίς να προκύψουν μηδενικά στα διαγώνια στοιχεία της. Αλλιώς, εισάγονται ψευδομετρήσεις γωνίας τάσεως ή έγχυσης ισχύος στους μη παρατηρήσιμους ζυγούς ώστε να εξαλειφθούν τα αντίστοιχα μηδενικά στη διαγώνιο της $G(x)$ ή θεωρούνται μη παρατηρήσιμες νησίδες και εκτιμώνται οι υπόλοιποι ζυγοί.

Ο αλγόριθμος αυτός είναι πολύ απλός και εύκολος και χρησιμοποιείται στην εκτίμηση κατάστασης. Το μοναδικό του πρόβλημα είναι ότι πολύ μικρές τιμές συνήθως στρογγυλοποιούνται στο μηδέν στους υπολογισμούς, κι αυτό κάνει δύσκολη την επιλογή των σωστών μη παρατηρήσιμων νησίδων με βάση τα διαγώνια στοιχεία της μήτρας κέρδους.

2.2.2 Τοπολογική παρατηρησιμότητα

Χωρίς να χρησιμοποιεί τις αριθμητικές τιμές των μετρήσεων, ο αλγόριθμος της τοπολογικής παρατηρησιμότητας χρησιμοποιεί την συνδεσιμότητα του δικτύου σε συνδυασμό με την τοπολογία των μετρήσεων και καθορίζει αν το δίκτυο είναι παρατηρήσιμο ή προσδιορίζει τις παρατηρήσιμες νησίδες. Η επαρκής και απαραίτητη συνθήκη για να είναι παρατηρήσιμο το δίκτυο, είναι οι μετρήσεις να δημιουργούν τουλάχιστον ένα δέντρο που να περιέχει όλους τους ζυγούς (όχι απαραίτητα και όλους τους κλάδους). Αν όχι, τότε ο αλγόριθμος ψάχνει για παρατηρήσιμες νησίδες με την ίδια μέθοδο μικρών δέντρων, ή προσθέτει ψευδομετρήσεις για να δημιουργήσει δέντρο μετρήσεων και να κάνει παρατηρήσιμο το δίκτυο.

Τα παραπάνω υλοποιούνται με δυο βήματα. Όλοι οι αλγόριθμοι τοπολογικής παρατηρησιμότητας αρχικά φτιάχνουν θεμελιώδη δέντρα με βάση τις ροές ισχύος, και καθορίζουν τους οριακούς ζυγούς οι οποίοι είτε συνδέουν αυτά τα δέντρα μεταξύ τους είτε συνδέονται με μη παρατηρήσιμους κόμβους. Στη συνέχεια, οι περισσότεροι αλγόριθμοι

τοποθετούν μετρήσεις έγχυσης ισχύος σε γειτονικούς τους ζυγούς. Υπάρχουν και αρκετοί αλγόριθμοι που αντιμετωπίζουν το δεύτερο βήμα με διαφορετικό τρόπο. [3]

2.3 Εκτίμηση κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης αναφέρεται στην διαδικασία εύρεσης του μέτρου και της γωνίας της τάσεως όλων των ζυγών του δικτύου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί άμεσα με τη χρήση μέσων που περιλαμβάνουν πολύ ακριβείς και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών όλων των ζυγών. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν πολύ ευάλωτη σε εσφαλμένες μετρήσεις ή σε σφάλματα τηλεμετρίας. Για να το αντιμετωπίσει αυτό, η εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιεί παραπάνω μετρήσεις από αυτές που χρειάζονται ώστε να φιλτράρει και να αφαιρέσει τις εσφαλμένες, και να υπολογίσει στη συνέχεια τη βέλτιστη εκτίμηση. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν όχι μόνο συμβατικές μετρήσεις ισχύος και τάσης, αλλά επίσης και άλλες όπως μετρήσεις μέτρου ρεύματος και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης. Ταυτόχρονες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία του δικτύου είναι σχεδόν αδύνατο να γίνουν, επομένως μικρές διαφορές χρόνου μεταξύ των μετρήσεων είναι φυσιολογικές και ανεχτές. Αυτό δικαιολογείται και από το γεγονός ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας η κατάσταση του δικτύου αλλάζει πολύ αργά.

Δεδομένου ότι η εκτίμηση κατάστασης εκτιμά τους φασιθέτες τάσης στους ζυγούς του δικτύου, αυτό για να γίνει σωστά θα πρέπει η τοπολογία και όλοι οι παράμετροι του δικτύου να είναι γνωστά. Παρόλα αυτά, μπορεί να υπάρξουν σφάλματα και σε αυτά τα στοιχεία για διάφορους λόγους όπως μικρές βλάβες του συστήματος, προβλήματα στις γραμμές μεταφοράς τις θερμές μέρες κ.α. Η ανίχνευση και η εύρεση σφαλμάτων θα εξεταστεί αναλυτικά σε επόμενη ενότητα.

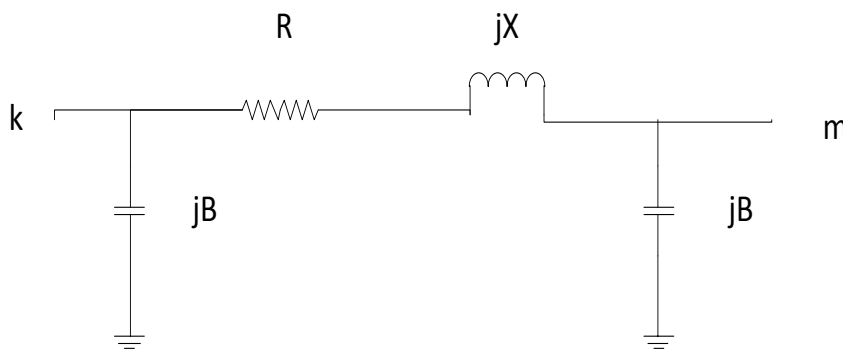
2.3.1 Μοντέλο δικτύου και παραδοχές

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρείται ότι λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση και υπό φυσιολογικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία και οι ροές ισχύος θεωρούνται τριφασικά, οι γραμμές μεταφοράς θα είναι γραμμές με αντιμετατεθειμένους αγωγούς και γενικά όλα τα στοιχεία (εγκάρσια ή σε σειρά) είναι συμμετρικά και τριφασικά. Οι παραπάνω

παραδοχές επιτρέπουν τη χρήση ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος θετικής ακολουθίας για την αναπαράσταση του δικτύου. Η λύση που θα προκύψει από αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, θα είναι επίσης μια συνιστώσα θετικής ακολουθίας της κατάστασης του δικτύου όταν αυτό λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης, όλες οι πληροφορίες και οι παράμετροι του δικτύου εκφράζονται σε ανά μονάδα σύστημα. Ακολουθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν διάφορα στοιχεία του δικτύου:

➤ **Γραμμές μεταφοράς**

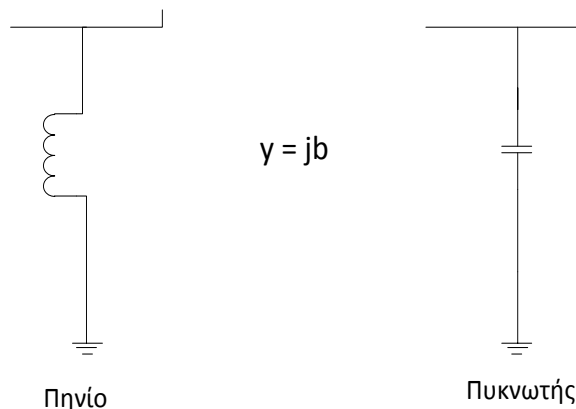
Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π» του οποίου οι παράμετροι αντιστοιχούν στο ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, μια γραμμή μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας $R + jX$ και συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα ίση με $j2B$ μοντελοποιείται στο εξής κύκλωμα:



Σχήμα 2.2 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς

➤ **Εγκάρσια στοιχεία**

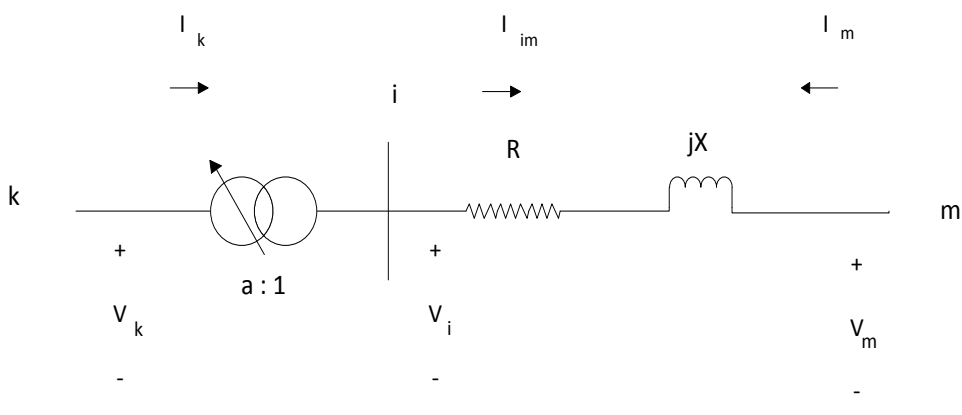
Τα εγκάρσια στοιχεία είναι πυκνωτές ή πηνία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ή της αέργου ισχύος, και αναπαρίστανται από την ανά φάση ισοδύναμη φανταστική αγωγιμότητα $y = jb$ στον αντίστοιχο ζυγό. Το πρόσημο της αγωγιμότητας δηλώνει το τύπο του στοιχείου. Δηλαδή, αν είναι θετική, είναι εγκάρσιος πυκνωτής, ενώ αν είναι αρνητική είναι εγκάρσιο πηνίο.



Σχήμα 2.3 Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου

➤ **Μετασηματιστές**

Οι μετασηματιστές αναπαρίστανται σαν ιδανικοί μετασηματιστές σε σειρά με την σύνθετη αντίστασή τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι δυο ζυγοί στους οποίους συνδέεται ένας μετασηματιστής m και k , είναι γνωστοί ως πλευρά αντίστασης και πλευρά ρύθμισης της τάσης αντίστοιχα.



Σχήμα 2.4 Μοντέλο μετασηματιστή

Οι εξισώσεις του κυκλώματος τους μετασηματιστή εκφράζονται μέσω των ρευμάτων που διαρρέουν τον κλάδο $i - m$, στον οποίο υπάρχει η σύνθετη αντίσταση. Ισχύει ότι $Z = R + jX$, και η αγωγιμότητα του κλάδου αντίστασης είναι ίση με $Y = 1/Z$, επομένως έχουμε:

$$\begin{bmatrix} I_{im} \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -Y \\ -Y & Y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_i \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Αντικαθιστώντας τα I_{im} και V_i με τις εξισώσεις:

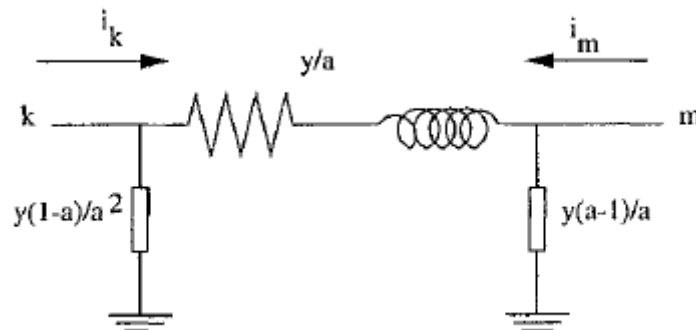
$$I_{im} = a * I_k$$

$$V_i = V_k/a$$

Παίρνουμε τη τελική μορφή της σχέσης (2.1):

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y/\alpha^2 & -Y/\alpha \\ -Y/\alpha & Y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

όπου a είναι η ρύθμιση τάσης του μετασχηματιστή. Στη συνέχεια φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το παραπάνω σύνολο εξισώσεων:



Σχήμα 2.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

➤ Γεννήτριες

Οι γεννήτριες αναπαρίστανται με ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος στους αντίστοιχους ζυγούς. Οι ισχύες αυτές έχουν τις παρακάτω εξισώσεις:

$$S = P + jQ \quad (2.3)$$

όπου P η ενεργός ισχύς και Q η άεργος ισχύς της γεννήτριας.

➤ **Φορτία**

Τα φορτία διακρίνονται σε σταθερής ισχύος και σταθερής αγωγιμότητας. Τα φορτία σταθερής ισχύος αναπαρίστανται ως ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος στους αντίστοιχους ζυγούς και δεν έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου σε αντίθεση με τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας που έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου και αναπαρίστανται ως εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες.

2.3.2 Αναπαράσταση δικτύου

Τα παραπάνω μοντέλα που εξετάστηκαν, χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ολόκληρου του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύνολο εξισώσεων που προέρχονται από την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff για το ρεύμα, σε κάθε ζυγό. Έστω λοιπόν ότι το σύνολο των εγχόμενων ρευμάτων κάθε ζυγού συμβολίζεται με I , και το σύνολο των τάσεων όλων των ζυγών με V , οι εξισώσεις παίρνουν την εξής μορφή:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = Y * V \quad (2.4)$$

όπου

I_k η έγχυση ρεύματος στον ζυγό k .

V_k η τάση του ζυγού k .

Y_{km} το (k,m) στοιχείο της μήτρας αγωγιμοτήτων Y .

Για τα παραπάνω, ισχύει η σύμβαση ότι τα εγχόμενα ρεύματα που εισέρχονται στον ζυγό, έχουν θετικό πρόσημο. Η μήτρα Y είναι η μήτρα αγωγιμοτήτων, η οποία έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι μιγαδική μήτρα, και μπορεί να γραφτεί στη μορφή $G + jB$.
- Είναι δομικά συμμετρική, και μερικές φορές και αριθμητικά συμμετρική ανάλογα με την απουσία κάποιων στοιχείων του δικτύου όπως συσκευές μετατόπισης φάσης.
- Είναι αραιή μήτρα.
- Η ορίζουσά της είναι διάφορη του μηδενός, με την προϋπόθεση ότι κάθε νησίδα του δικτύου έχει τουλάχιστον ένα εγκάρσιο στοιχείο προς τη γη.

Η αναπαράσταση του δικτύου με τη σχέση (2.4), διευκολύνει την τροποποίηση των εξισώσεων σε περίπτωση τοπολογικής αλλαγής. Η πρόσθεση ή η αφαίρεση ενός μέρους του δικτύου μπορεί εύκολα να γίνει αφαιρώντας ή προσθέτοντας τα αντίστοιχα στοιχεία του μήτρας αγωγιμοτήτων.

2.3.3 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Ο σκοπός της εκτίμησης κατάστασης είναι να προσδιορίσει την πιθανότερη κατάσταση του συστήματος με βάση τα δεδομένα από τις μετρήσεις που έχει. Ένας τρόπος να το πετύχει αυτό, είναι χρησιμοποιώντας την Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation ή MLE), μια μέθοδο που εφαρμόζεται ευρύτατα στη στατιστική. Τα σφάλματα των μετρήσεων, θεωρείται ότι ακολουθούν μια γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους. Η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όλων των μετρήσεων μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση παραμέτρων. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και μεγιστοποιείται όταν οι άγνωστοι παράμετροι βρίσκονται όσο πιο κοντά γίνεται στις πραγματικές τους τιμές. Ως εκ τούτου, μπορεί να οριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση πιθανοφάνειας. Η λύση θα δώσει την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας για τις ζητούμενες παραμέτρους.

Τα σφάλματα των μετρήσεων συνήθως θεωρείται ότι ακολουθούν την Γκαουσιανή (κανονική) κατανομή, και οι παράμετροι αυτής τη κατανομής είναι η μέση τιμή της μ , και η διασπορά της σ^2 . Το πρόβλημα της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας επιλύεται ως προς αυτές τις παραμέτρους.

2.3.4 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Γκαουσσιανής (Κανονικής) κατανομής

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κανονικής κατανομής για μια τυχαία μεταβλητή z ορίζεται ως εξής:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} * e^{-\frac{1}{2} * \left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.5)$$

όπου

z : η τυχαία μεταβλητή.

μ : η μέση τιμή της z .

σ : η τυπική απόκλιση της z .

Η συνάρτηση $f(z)$ αλλάζει τη μορφή της ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων μ και σ^2 . Παρόλα αυτά, η μορφή της μπορεί να σταθεροποιηθεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω αλλαγή μεταβλητών:

$$u = \frac{z - \mu}{\sigma} \quad (2.6)$$

η οποία συνεπάγεται τα εξής:

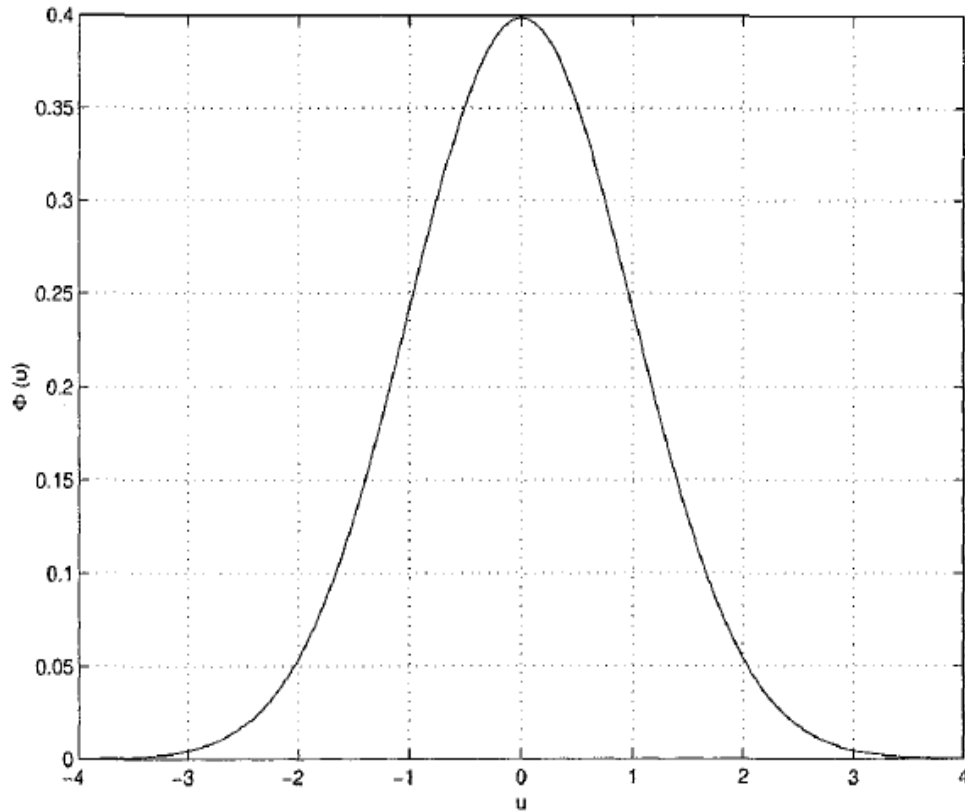
$$E(u) = \frac{1}{\sigma} * (E(z) - \mu) = 0 \quad (2.7)$$

$$Var(u) = \frac{1}{\sigma^2} * Var(z - \mu) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2} = 1 \quad (2.8)$$

Επομένως, η νέα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι η εξής:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (2.9)$$

Μια γραφική αναπαράσταση της Κανονικής Κατανομής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.6: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Κανονικής Κατανομής

2.3.5 Συνάρτηση Πιθανοφάνειας

Έστω μια κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που αντιπροσωπεύει την πιθανότητα μέτρησης m ανεξάρτητων μετρήσεων, έχοντας η καθεμία την ίδια κανονική κατανομή. Αυτή η συνάρτηση εκφράζεται σαν το γινόμενο των m ξεχωριστών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, εφόσον είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, ως εξής:

$$f_m(z) = f(z_1) * f(z_2) * \dots * f(z_m) \quad (2.10)$$

όπου z_i : η i -ιοστή μέτρηση.

z^T : το διάνυσμα μετρήσεων $[z_1, z_2, \dots, z_m]$.

Η συνάρτηση $f_m(z)$ ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας της τυχαίας μεταβλητής z . Ουσιαστικά, είναι ένα μέτρο πιθανότητας παρατήρησης του συγκεκριμένου συνόλου μετρήσεων στο διάνυσμα z .

Σκοπός της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της συνάρτησης πιθανότητας μ και σ^2 . Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, η συνάρτηση συνήθως αντικαθίσταται από τον λογάριθμό της προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης. Η νέα συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας, συμβολίζεται με L και δίνεται από το τύπο:

$$\begin{aligned} L = \log f_m(z) &= \sum_{i=1}^m \log f(z_i) \\ &= -\frac{1}{2} * \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} * \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

Η εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας μεγιστοποιεί τη συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας για ένα δεδομένο διάνυσμα z με τον εξής τρόπο:

$$\log f_m(z) = \max \quad (2.12)$$

ή ισοδύναμα:

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 = \min \quad (2.13)$$

Το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να επαναπροσδιοριστεί με την χρήση των υπολοίπων r_i των μετρήσεων, που ορίζονται ως εξής:

$$r_i = z_i - \mu_i = z_i - E(z_i) \quad i = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

όπου η μέση τιμή μ_i της μέτρησης z_i μπορεί να εκφραστεί ως $h_i(x)$, δηλαδή ως μια μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει το διάνυσμα κατάστασης x με την i -ιοστή μέτρηση. Το τετράγωνο κάθε υπολοίπου r_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος $W_{ii} = \sigma_i^{-2}$, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο της διασποράς σφάλματος της μέτρησης z_i . Έτσι λοιπόν, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της εξίσωσης (2.13), ανάγεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σταθμισμένου αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων:

$$\sum_{i=1}^m W_{ii} * r_i^2 = \min \quad (2.15)$$

όπου:

$$r_i = z_i - h_i(x) \quad i = 1, \dots, m \quad (2.16)$$

Η λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης ονομάζεται Εκτίμηση Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (Weighted Least Squares ή WLS) για το διάνυσμα κατάστασης x .

2.3.6 Μοντέλο μετρήσεων και Παραδοχές

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε το παρακάτω διάνυσμα z με όλες τις μετρήσεις:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (2.17)$$

όπου:

- $h^T = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$ η μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει την i -ιοστή μέτρηση με το διάνυσμα κατάστασης x .
- $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ το διάνυσμα κατάστασης.
- $e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ το διάνυσμα σφαλμάτων των μετρήσεων.

Επίσης, όσον αφορά τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων των μετρήσεων, γίνονται οι εξής παραδοχές:

- $E(e_i) = 0, i = 1, 2, \dots, m$
- Τα σφάλματα των μετρήσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους ($E[e_i e_j] = 0$). Επομένως, ισχύουν τα εξής:

$$\text{Cov}(e) = E[e * e^T] = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.18)$$

Η μήτρα R είναι διαγώνια και ονομάζεται μήτρα συνδιασποράς.

Η τυπική απόκλιση σ_i κάθε μέτρησης z_i εκφράζει την αναμενόμενη ακρίβεια της τιμής της μέτρησης που χρησιμοποιείται.

Ο εκτιμητής WLS ελαχιστοποιεί την ακόλουθη συνάρτηση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T * R^{-1} * [z - h(x)] \quad (2.19)$$

Για να πάρει η $J(x)$ την ελάχιστη τιμή της, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες πρώτης τάξεως, δηλαδή:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) * R^{-1} * [z - h(x)] = 0 \quad (2.20)$$

Η μήτρα $H(x)$ ονομάζεται Ιακωβιανή μήτρα, περιλαμβάνει τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης μέτρησης $h_i(x)$ ως προς το διάνυσμα κατάστασης x , και η αναλυτική της μορφή είναι η εξής:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Αναπτύσσοντας τη μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$ σε σειρά Taylor ως προς το διάνυσμα κατάστασης, έχουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k) * (x - x^k) + \dots = 0 \quad (2.22)$$

Απαλείφοντας τους όρους υψηλότερης τάξης της σειράς, οδηγούμαστε σε μια επαναληπτική διαδικασία γνωστή ως μέθοδος Gauss-Newton, με την οποία υπολογίζεται η λύση ως εξής:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} * g(x^k) \quad (2.23)$$

όπου k είναι η δείκτης επανάληψης και x^k το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k .

Ακόμα, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) * R^{-1} * H(x^k) \quad (2.24)$$

$$g(x^k) = -H^T(x^k) * R^{-1} * (z - h(x^k)) \quad (2.25)$$

Η μήτρα $G(x)$ ονομάζεται μήτρα κέρδους. Η μήτρα αυτή είναι αραιή, θετικά ορισμένη και συμμετρική, με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι παρατηρήσιμο. Η μήτρα κέρδους δεν μπορεί να αντιστραφεί, μπορεί όμως να παραγοντοποιηθεί σε άνω και κάτω τριγωνική μήτρα (τριγωνοποίηση LU), και με τη μέθοδο της ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης σε κάθε επανάληψη, προκύπτει η λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων.

Τελικώς, η λύση της εκτίμησης κατάστασης με τη μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει από την εξής επαναληπτική διαδικασία:

$$[G(x^k)] * \Delta x^{k+1} = H^T(x^k) * R^{-1} * (z - h(x^k)) \quad (2.26)$$

2.3.7 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης με τη μέθοδο WLS μας δίνει την λύση των εξισώσεων (2.26) μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Gauss – Newton. Το διάνυσμα κατάστασης αρχικοποιείται συνήθως στο επίπεδο διάνυσμα (flat start), στο οποίο όλα τα μέτρα των τάσεων έχουν τιμή 1 ανά μονάδα, και όλες οι γωνίες έχουν τιμή 0 μοίρες.

Τα βήματα για τη λύση της επαναληπτικής μεθόδου, φαίνονται αναλυτικά παρακάτω:

1. Αρχικά, ο δείκτης επαναλήψεων k τίθεται ίσος με 0, και αρχίζουν οι επαναλήψεις.
2. Αρχικοποιείται το διάνυσμα κατάστασης x^0 συνήθως όπως ειπώθηκε παραπάνω (flat start).
3. Υπολογίζεται η μήτρα κέρδους $G(x^k)$.
4. Υπολογίζεται το δεξί μέρος της εξίσωσης:

$$t^k = H(x^k)^T * R^{-1} * (z - h(x^k)) \quad (2.27)$$

5. Παραγοντοποιείται και επιλύεται η $G(x)$ (με την τριγωνοποίηση LU όπως περιγράφηκε παραπάνω), και υπολογίζεται η λύση για Δx^k .
6. Γίνεται έλεγχος για σύγκλιση, μέσω της σχέσης:

$$|\Delta x^k| \leq \varepsilon \quad (2.28)$$

όπου ε είναι το όριο ανοχής και συνήθως τίθεται ίσο με 10^{-3} .

7. Αν δεν έχουμε σύγκλιση, το διάνυσμα κατάστασης και ο δείκτης επαναλήψεων παίρνουν τις παρακάτω τιμές:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.29)$$

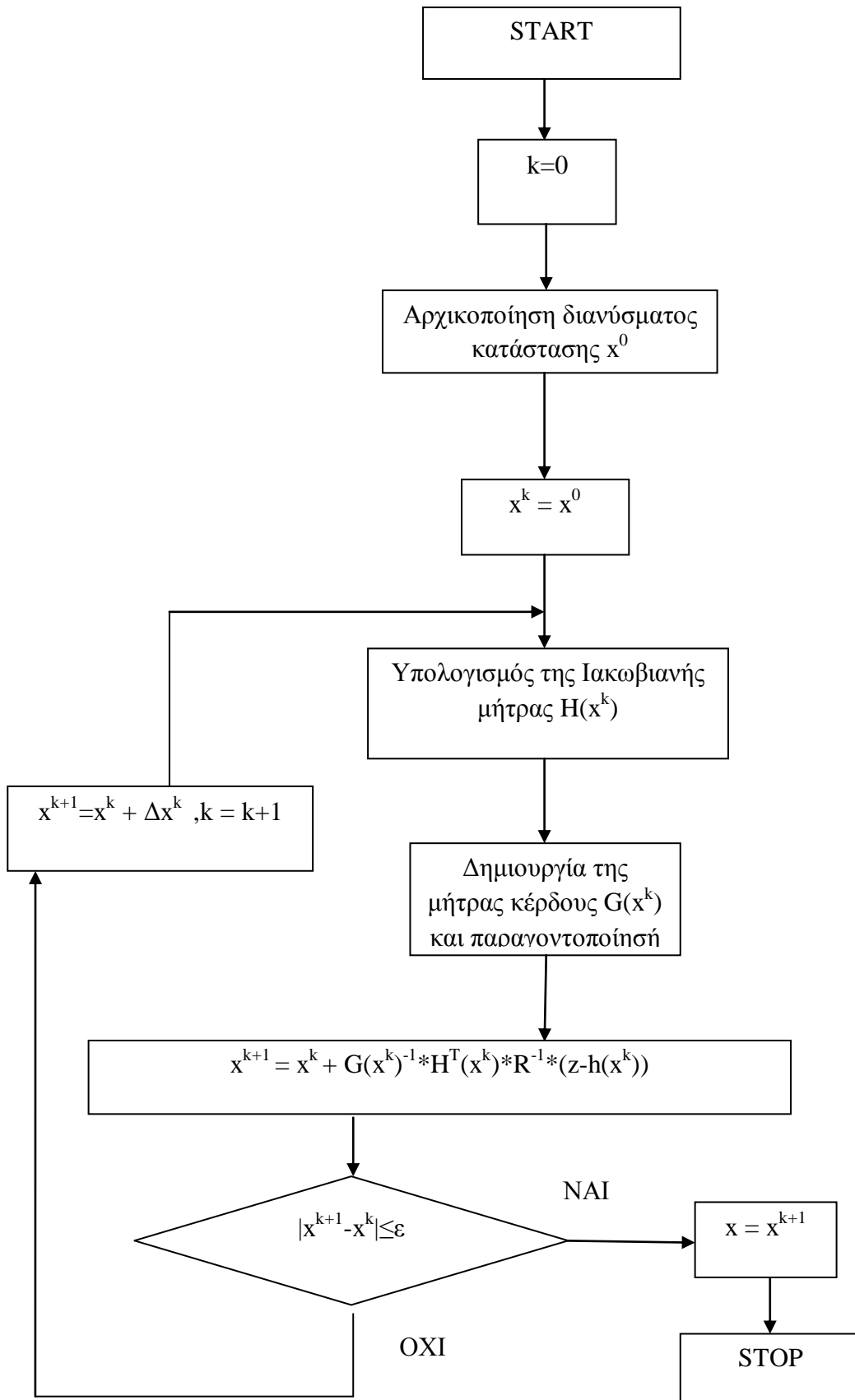
$$k = k + 1 \quad (2.30)$$

και στη συνέχεια, η μέθοδος επαναλαμβάνεται από το βήμα 3. Διαφορετικά, αν έχουμε σύγκλιση η μέθοδος τερματίζει.

Ο παραπάνω αλγόριθμος περιλαμβάνει τους εξής υπολογισμούς σε κάθε επανάληψη:

1. Υπολογισμός τους δεξιού μέρους της εξίσωσης (2.27)
 - Υπολογισμός του διανύσματος των συναρτήσεων μέτρησης $h(x^k)$.
 - Υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας $H(x^k)$.

2. Υπολογισμός της $G(x^k)$ και επίλυση της εξίσωσης (2.26)
 - Υπολογισμός της μήτρας κέρδους $G(x^k)$.
 - Παραγοντοποίηση της $G(x^k)$.
 - Εφαρμογή ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης για τον υπολογισμό του Δx^{k+1} .



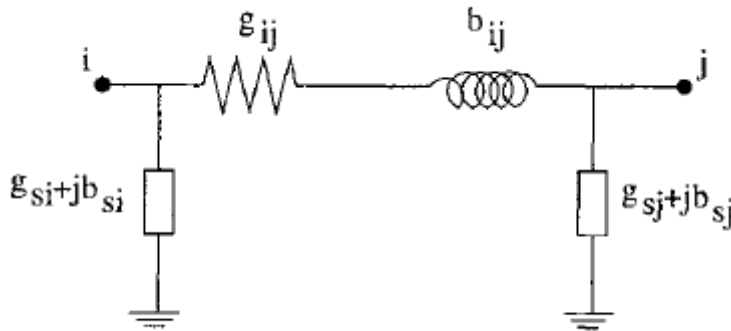
Σχήμα 2.7 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

2.3.8 Η συνάρτηση των μετρήσεων $h(x)$

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι πολλών διαφορετικών τύπων. Πιο συχνά ως μετρήσεις χρησιμοποιούνται οι ροές ισχύος, οι εγχύσεις ισχύος, τα μέτρα των τάσεων των ζυγών, και τα μέτρα των ρευμάτων των κλάδων. Αυτές οι μετρήσεις εκφράζονται συναρτήσει των στοιχείων του διάνυσματος κατάστασης, σε πολικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες. Όταν χρησιμοποιούνται οι πολικές συντεταγμένες για ένα σύστημα με N ζυγούς, το διάνυσμα κατάστασης έχει $2N-1$ στοιχεία, N μέτρα τάσεως και $N-1$ γωνίες τάσεως ζυγών, καθώς η γωνία του ζυγού αναφοράς τίθεται ίση με μια αυθαίρετη τιμή, συνήθως 0. Το διάνυσμα κατάστασης λοιπόν, παίρνει την εξής μορφή, θεωρώντας ότι ζυγός αναφοράς είναι ο ζυγός 1:

$$x^T = [\delta_2, \delta_3, \delta_4, \dots, \delta_N, V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_N] \quad (2.31)$$

Οι τύποι για όλους τους τύπους μετρήσεων φαίνονται παρακάτω. Για την αναπαράσταση των κλάδων του δικτύου, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο «Π» που φαίνεται στο σχήμα 2.8:



Σχήμα 2.8 Μοντέλο «Π» για την αναπαράσταση κλάδου του δικτύου

- Έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στον ζυγό i :

$$P_i = V_i^2 * \sum_{m \in a(i)} (g_{ij} + g_{sj}) + V_i^2 * g_i - V_i * \sum_{m \in a(i)} V_j * a_{ij} \quad (2.32)$$

$$Q_i = -V_i^2 * \sum_{m \in a(i)} (b_{ij} + b_{sj}) - V_i^2 * b_i - V_i * \sum_{m \in a(i)} V_j * \beta_{ij} \quad (2.33)$$

- Ροή ενεργού και αέργου ισχύος στον κλάδο που συνδέει τους ζυγούς i και j :

$$P_{ij} = V_i^2 * (g_{ij} + g_{sj}) - V_i * V_j * a_{ij} \quad (2.34)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 * (b_{ij} + b_{sj}) - V_i * V_j * \beta_{ij} \quad (2.35)$$

όπου: $a(i)$ το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό i .

Οι σταθερές a_{ij} και β_{ij} δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$a_{ij} = g_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.36)$$

$$\beta_{ij} = g_{ij} * \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} * \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2.37)$$

2.3.9 Η Ιακωβιανή μήτρα $\mathbf{H}(\mathbf{x})$

Η Ιακωβιανή μήτρα ορίζεται ως εξής:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Ουσιαστικά, τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας είναι οι μερικές παράγωγοι των μετρήσεων ως προς το διάνυσμα κατάστασης. Οι αναλυτικές εκφράσεις για κάθε ένα μέρος της μήτρας δίνονται παρακάτω: [4]

- Μερική παράγωγος ροών ενεργού ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i * V_j * \beta_{ij} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i * V_j * \beta_{ij} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = 2 * V_i * (g_{ij} + g_{sj}) - V_j * a_{ij} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i * a_{ij} \quad (2.42)$$

- Μερική παράγωγος ροών αέργου ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i * V_j * a_{ij} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i * V_j * a_{ij} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -2 * V_i * (b_{ij} + b_{sj}) - V_j * \beta_{ij} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i * \beta_{ij} \quad (2.46)$$

- Μερική παράγωγος εγχύσεως ενεργού ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i * \sum_{m \in a(i)} V_j * \beta_{ij} \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i * V_j * \beta_{ij} \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2 * V_i * \sum_{m \in a(i)} (g_{ij} + g_{sj}) + 2 * V_i * g_i - \sum_{m \in a(i)} V_j * a_{ij} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i * a_{ij} \quad (2.50)$$

- Μερική παράγωγος εγχύσεως αέργου ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i * \sum_{m \in a(i)} V_j * a_{ij} \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i * V_j * a_{ij} \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2 * V_i * \sum_{m \in a(i)} (b_{ij} + b_{sj}) - 2 * V_i * b_i - \sum_{m \in a(i)} V_j * \beta_{ij} \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i * \beta_{ij} \quad (2.54)$$

- Μερική παράγωγος μέτρου τάσεως ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (2.58)$$

2.3.10 Η μήτρα κέρδους $G(x)$

Για να υπολογιστεί η μήτρα κέρδους $G(x)$, χρησιμοποιείται η Ιακωβιανή μήτρα $H(x)$, και η μήτρα διασποράς R . Η μήτρα R είναι διαγώνια, και έχει σαν στοιχεία τις διασπορές των μετρήσεων. Η $G(x)$ δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G(x^k) = H^T(x^k) * R^{-1} * H(x^k) \quad (2.59)$$

και έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι συμμετρικός.
- Είναι αραιός, όχι τόσο όσο η $H(x)$.
- Είναι θετικά ορισμένος για πλήρως παρατηρήσιμα συστήματα.

Η μήτρα κέρδους υπολογίζεται και αποθηκεύεται σαν αραιή μήτρα για λόγους υπολογιστικής απόδοσης και εξοικονόμησης μνήμης. Επίσης, σχηματίζεται με υπολογισμό ενός στοιχείου κάθε φορά. Αυτό γίνεται με τον παρακάτω τρόπο.

Θεωρούμε ότι η Ιακωβιανή μήτρα και η μήτρα διασποράς για ένα σύνολο m μετρήσεων, κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί σε μια στήλη, έχουν την παρακάτω μορφή. [5]

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_m \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_{mm} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Έτσι, η μήτρα κέρδους σχηματίζεται ως εξής:

$$G = \sum_{i=1}^m H_i^T * R_{ii}^{-1} * H_i \quad (2.61)$$

2.3.11 Παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους

Η μήτρα κέρδους μπορεί να γραφεί ως γινόμενο δυο πινάκων, ενός άνω τριγωνικού U κι ενός κάτω τριγωνικού L . Επομένως ισχύει:

$$G = L * U \quad (2.62)$$

Στη συνέχεια, γίνεται η επίλυση της παρακάτω επαναληπτικής εξίσωσης, με χρήση της μεθόδου εμπρός και πίσω αντικατάστασης ως εξής:

$$L * U * \Delta x^{k+1} = t^k \quad (2.63)$$

1. Εμπρός αντικατάσταση: $U * \Delta x^{k+1} = z$ (2.64)

2. Πίσω αντικατάσταση: $L * z = t^k$ (2.65)

Επίσης, ένα άλλος τρόπος παραγοντοποίησης της G είναι η μέθοδος Cholesky. Η μήτρα κέρδους μπορεί να γραφεί ως το γινόμενο μιας κάτω τριγωνικής μήτρας L με την αντίστροφή της:

$$G = L * L^T \quad (2.66)$$

Αυτή η παραγοντοποίηση όμως, μπορεί να γίνει μόνο για πλήρως παρατηρήσιμα δίκτυα.

2.4 Ανίχνευση και εντοπισμός σφαλμάτων

Στο σύνολο των μετρήσεων, υπάρχουν σχεδόν πάντα εσφαλμένα δεδομένα για διάφορους λόγους, όπως τυχαία σφάλματα ή σφάλματα κατά τη μετάδοσή τους. Αυτά τα σφάλματα επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης, επομένως η ανίχνευση και ταυτοποίηση των εσφαλμένων μετρήσεων αποτελεί βασική λειτουργία του εκτιμητή. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης WLS, η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των ‘υπολοίπων’ των μετρήσεων. Η απόδοση αυτής της λειτουργίας εξαρτάται σημαντικά από την περίσσεια των μετρήσεων (περίσσεια είναι ο λόγος του αριθμού των μετρήσεων προς τον αριθμό των αγνώστων), καθώς και από τον αριθμό των εσφαλμένων μετρήσεων. Από την άλλη, αν οι μετρήσεις δεν είναι αρκετές, μπορεί να υπάρξουν ‘κρίσιμες’ μετρήσεις. Επίσης, εσφαλμένα δεδομένα εισέρχονται στις μετρήσεις με διάφορους τρόπους ανάλογα τον τύπο, την θέση και τον αριθμό τους. Μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: (1) μια εσφαλμένη μέτρηση, που σημαίνει ότι μόνο μία από τις μετρήσεις έχει μεγάλη σφάλμα, (2) πολλές εσφαλμένες μετρήσεις, δηλαδή παραπάνω από μία μέτρηση έχει σφάλμα. Η συνηθέστερη μέθοδος για την ανίχνευση των σφαλμάτων είναι το τεστ τετραγώνων (chi-square test ή χ^2 test), και η μέθοδος για τον εντοπισμό τους είναι η χρήση των κανονικοποιημένων υπολοίπων (Largest Normalized Residual ή LNR).

Γενικά, θεωρώντας ένα σύνολο από N τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_N κάθε μια εκ των οποίων ακολουθεί την Κανονική κατανομή $X_i \sim N(0,1)$, τότε η τυχαία μεταβλητή $Y = \sum_{i=1}^N X_i^2$ ακολουθεί την χ^2 κατανομή, με N βαθμούς ελευθερίας. Για τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης, σχηματίζουμε την εξής σχέση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{R_{ii}} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{e_i}{\sqrt{R_{ii}}} \right)^2 = \sum_{i=1}^m (e_i^N)^2 \quad (2.67)$$

όπου $e_i^N \sim N(0,1)$.

Η συνάρτηση $J(x)$ έχει μια κατανομή χ^2 , με $m-n$ βαθμούς ελευθερίας. $m-n$ είναι ο αριθμός των πλεονάζων μετρήσεων του συστήματος, m,n είναι ο αριθμός των μετρήσεων και των αγνώστων αντίστοιχα.

Έτσι, μαζί με την εκτίμηση κατάστασης με τη μέθοδο WLS, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παραπάνω λειτουργία για τις εσφαλμένες μετρήσεις. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

1. Επίλυση της μεθόδου WLS, και υπολογισμός της παρακάτω συνάρτησης:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\bar{x}))^2}{\sigma_i^2} \quad (2.68)$$

όπου \bar{x} είναι το διάνυσμα κατάστασης, με n στοιχεία.

2. Αναζήτηση μιας τιμής από το πίνακα κατανομής χ^2 που αντιστοιχεί σε βαθμό εμπιστοσύνης με πιθανότητα p (π.χ. 0.95), και $m-n$ βαθμούς ελευθερίας, έστω η $\chi_{m-n,p}^2$.
3. Αν $J(x) \geq \chi_{m-n,p}^2$ τότε υπάρχει εσφαλμένη μέτρηση, διαφορετικά δεν υπάρχουν σφάλματα στο σύνολο των μετρήσεων.

Από τη στιγμή που θα ανιχνευτεί εσφαλμένη μέτρηση, θα πρέπει να προσδιοριστεί και να αφαιρεθεί από το σύνολο των μετρήσεων. Η μέθοδος των κανονικοποιημένων υπόλοιπων χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα για τον προσδιορισμό των εσφαλμένων μετρήσεων. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε την εξής μορφή εξίσωσης μετρήσεων, όπως είδαμε και παραπάνω:

$$z = h(x) + e \quad (2.69)$$

Το αποτέλεσμα της μεθόδου WLS δίνεται από το τύπο:

$$\Delta x = (H^T * R^{-1} * H)^{-1} * H^T * R^{-1} * \Delta z \quad (2.70)$$

όπου $\Delta x = x^{k+1} - x^k$, $\Delta z = z - h(x)$ και $G = H^T * R^{-1} * H$.

Η εκτιμώμενη τιμή των μετρήσεων δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta \bar{z} = H * \Delta x = K * \Delta z \quad (2.71)$$

όπου $K = H * G^{-1} * H^T * R^{-1}$. Επίσης ισχύει η ιδιότητα $K * H = H * G^{-1} * H^T * R^{-1} * H = H$.

Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} r &= \Delta z - \Delta \bar{z} = (I - K) * \Delta z = (I - K) * (H * \Delta x + e) \\ &= (I - K) * e = S * e \end{aligned} \quad (2.72)$$

Η μήτρα S ονομάζεται μήτρα ευαισθησίας υπολοίπων. Επίσης, η μήτρα συσχετισμού του διανύσματος των υπολοίπων δίνεται από την:

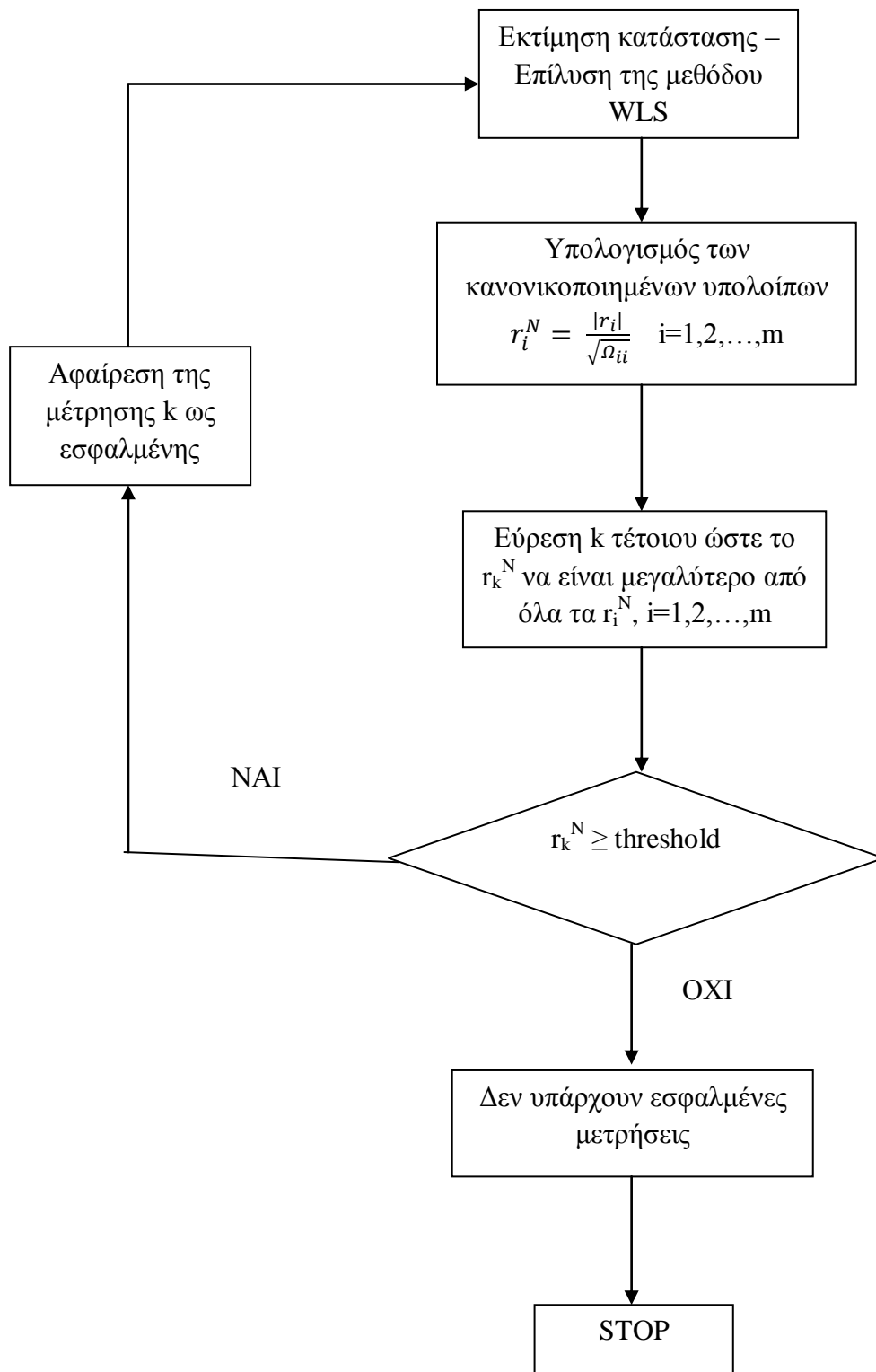
$$\Omega = Cov(r) = E[rr^T] = S * E[ee^T] * S^T = S * R * S^T = S * R \quad (2.73)$$

Επομένως, τα υπόλοιπα ακολουθούν την κατανομή $r \sim N(0, \Omega)$, και το κανονικοποιημένο υπόλοιπο της μέτρησης i δίνεται από τον τύπο:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{|r_i|}{\sqrt{R_{ii} * S_{ii}}} \quad (2.74)$$

που σημαίνει ότι $r_i^N \sim N(0,1)$. Έτσι, το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο υπόλοιπο μπορεί να συγκριθεί με ένα στατιστικό όριο (π.χ. 3) ώστε να καθοριστεί αν είναι εσφαλμένη μέτρηση ή όχι.

Τα βήματα της μεθόδου LNR φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα ροής της μεθόδου LNR

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου LNR είναι ότι βασίζεται στα υπόλοιπα τα οποία είναι πλήρως συσχετισμένα μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, σε περίπτωση πολλών εσφαλμένων μετρήσεων, τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των σωστών μετρήσεων είναι σε συγκρίσιμα μεγέθη με αυτά των εσφαλμένων. Επομένως, υπάρχουν κι άλλοι τρόποι προσδιορισμού των σφαλμάτων στις μετρήσεις, όπως η εκτίμηση των εσφαλμένων μετρήσεων άμεσα με την μέθοδο Ελέγχου Υποθέσεων.

2.5 Μέθοδος εκτίμησης κατάστασης με περιορισμούς ισότητας

Η χρήση μετρήσεων με μεγάλη βαρύτητα όπως είναι οι μετρήσεις τάσεως σε ζυγούς μηδενικής εγγύσεως δημιουργεί προβλήματα στον υπολογισμό της μήτρας κέρδους G . Ένας τρόπος να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα είναι να μοντελοποιηθούν τέτοιου είδους μετρήσεις ως ξεχωριστοί περιορισμοί στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS. Έτσι λοιπόν, ο τροποποιημένος αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης εκφράζεται με το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$z = h(x) + e \quad (2.75)$$

$$c(x) = 0 \quad (2.76)$$

όπου z το διάνυσμα των μετρήσεων με $m \times 1$ στοιχεία, h ένα διάνυσμα με $m \times 1$ εξισώσεις, x το διάνυσμα κατάστασης με $n \times 1$ στοιχεία που περιλαμβάνουν μέτρα και γωνίες τάσεων όλων των ζυγών, e το διάνυσμα σφαλμάτων των μετρήσεων με $m \times 1$ στοιχεία, c το διάνυσμα των συναρτήσεων που μοντελοποιούν τους περιορισμούς ισότητας για τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης με 1×1 στοιχεία, m ο αριθμός των μετρήσεων, N ο αριθμός των ζυγών και l ο αριθμός των ζυγών μηδενικής έγχυσης. Θεωρούμε ότι τα στοιχεία του διανύσματος e ακολουθούν την Κανονική Κατανομή, με $E(e) = 0$ 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 λοιπόν ελαχιστοποιεί τη παρακάτω εξίσωση:

$$\min J(x) = (z - h(x))^T * R^{-1} * (z - h(x)) \quad (2.77)$$

υπο τον όρο ότι $c(x) = 0$

Έτσι, το διάνυσμα κατάστασης x υπολογίζεται λύνοντας το παρακάτω σύστημα γραμμικών εξισώσεων σε κάθε επανάληψη:

$$\begin{pmatrix} G(x^k) & C^T(x^k) \\ C(x^k) & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x^{k+1} - x^k \\ \lambda^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^T(x^k) * R^{-1} * (z - h(x^k)) \\ -c(x^k) \end{pmatrix} \quad (2.78)$$

όπου k είναι ο δείκτης επανάληψης, x^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην k -οστή επανάληψη, λ^k είναι οι πολλαπλασιαστές Lagrange στην k -οστή επανάληψη, $H(x) = \frac{\partial h}{\partial x}$ και $C(x) = \frac{\partial c}{\partial x}$ είναι Ιακωβιανές μήτρες και $G(x^k) = H^T(x^k) * R^{-1} * H(x^k)$ είναι η μήτρα κέρδους. Οι επαναλήψεις αρχίζουν με μια αρχική τιμή του διανύσματος κατάστασης x^0 (συνήθως $V = 1$ και $\delta = 0$) και τελειώνουν όταν η διαφορά $x^{k+1} - x^k$ για όλες τις μεταβλητές γίνει μικρότερη από ένα δεδομένο κατώφλι.

Η μήτρα $F = \begin{pmatrix} G & C^T \\ C & 0 \end{pmatrix}$ είναι συμμετρική με διακρίνουσα διάφορη του μηδενός, δεδομένου ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Η μήτρα F δεν αντιστρέφεται αν και είναι αραιός, αλλά τριγωνοποιείται και το σύστημα λύνεται με ευθεία και αντίστροφη αντικατάσταση σε κάθε επανάληψη.

Παρακάτω δίνονται οι εξισώσεις πραγματικού και φανταστικού μέρους των εγχυόμενων ρευμάτων I_i σε ένα ζυγό μηδενικής έγχυσης ισχύος i , όταν το διάνυσμα κατάστασης είναι εκφρασμένο σε πολικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες:

➤ **Διάνυσμα κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες $\tilde{V} = V \angle \delta$**

$$0 = I_{i,r} = V_i * \cos\delta_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{si} + g_{ij}) - V_i * \sin\delta_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{si} + b_{ij}) - \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} * V_j * \cos\delta_j - b_{ij} * V_j * \sin\delta_j) \quad (2.79)$$

$$0 = I_{i,i} = V_i * \sin\delta_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{si} + g_{ij}) + V_i * \cos\delta_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{si} + b_{ij}) - \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} * V_j * \sin\delta_j + b_{ij} * V_j * \cos\delta_j) \quad (2.80)$$

➤ *Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες $\tilde{V} = E + jF$*

$$0 = I_{i,r} = E_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{si} + g_{ij}) - F_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{si} + b_{ij}) - \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} * E_j - b_{ij} * F_j) \quad (2.81)$$

$$0 = I_{i,i} = F_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{si} + g_{ij}) + E_i * \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{si} + b_{ij}) - \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} * F_j + b_{ij} * E_j) \quad (2.82)$$

όπου $\alpha(i)$ είναι το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό i . [10]

3. Η τεχνολογία των Phasor Measurement Units (PMU)

3.1 Ιστορική αναδρομή

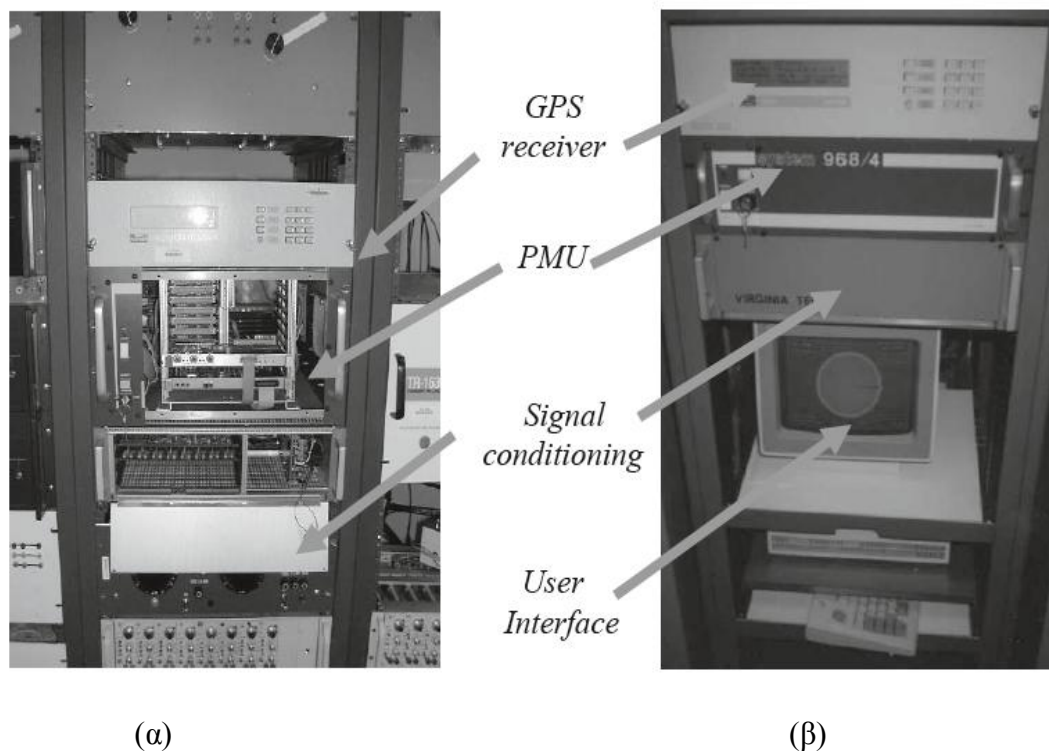
Οι γωνίες των φασιθετών τάσεως των ζυγών των ΣΗΕ ήταν ανέκαθεν ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα ανάμεσα στους μηχανικούς των δικτύων. Είναι γνωστό ότι η ενεργός (πραγματική) ροή ισχύος σε μια γραμμή μεταφοράς είναι ανάλογη του ημιτόνου της διαφοράς των γωνιών των τάσεων στα δυο άκρα της γραμμής. Καθώς πολλές από τις μεθόδους που εφαρμόζονται στα δίκτυα έχουν άμεση σχέση με τη ροή ενεργού ισχύος, η μέτρηση διαφοράς γωνιών αποτελεί ενδιαφέρον θέμα για πολλά χρόνια. Η πρώτη σύγχρονη εφαρμογή που περιλαμβάνει άμεση μέτρηση διαφοράς γωνιών αναφέρθηκε σε τρεις δημοσιεύσεις στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν πομπούς LORAN-C, μετάδοση με δορυφόρους GOES και ραδιοπομπούς HBG (κυρίως στην Ευρώπη) προκειμένου να επιτύχει συγχρονισμό του χρόνου αναφοράς σε διαφορετικές τοποθεσίες του δικτύου. Η επόμενη θετική εξέλιξη ήταν η μέτρηση της διαφοράς γωνιών μεταξύ δυο ζυγών σε διαφορετικές περιοχές του δικτύου αλλά με κοινή αναφορά χρόνου. Η ακρίβεια αυτών των συστημάτων ήταν της τάξης των 40μs. Επίσης, γίνονταν μετρήσεις μονοφασικών γωνιών τάσεως, ενώ δε λαμβανόταν υπόψη οι αρμονικές που υπήρχαν στις κυματομορφές της τάσης. Αυτοί οι μέθοδοι μέτρησης της διαφοράς γωνίας τάσεων δεν ήταν κατάλληλοι για μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα και έτσι δε χρησιμοποιούνται πλέον.

Η σύγχρονη εποχή της τεχνολογίας μέτρησης φασιθετών, έχει τις ρίζες της στην έρευνα για την εγκατάσταση μικροϋπολογιστών στις γραμμές μεταφοράς. Αρχικά, οι λειτουργίες που γίνονταν από μικροεπεξεργαστές στις γραμμές μεταφοράς, απαιτούσαν μεγαλύτερη τροφοδοσία από την διαθέσιμη για να εκτελεστούν.

Ένα σημαντικό μέρος των υπολογισμών αυτών ήταν αφιερωμένο στην επίλυση έξι εξισώσεων σε κάθε δειγματοληψία, ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποιο από τα 10 είδη σφαλμάτων σε τριφασικές γραμμές μεταφοράς. Επομένως, έπρεπε να βρεθούν μέθοδοι που δε θα χρειάζονταν να λύνουν αυτές τις εξισώσεις. Πράγματι, σε μια δημοσίευση του 1977 περιγράφηκε μια νέα τεχνική που βασιζόταν σε συμμετρική ανάλυση συνιστωσών των τάσεων και των ρευμάτων γραμμής, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μόνο μια εξίσωση για τον υπολογισμό των λαθών. Σε αυτή τη τεχνική, αναλύθηκαν κάποιοι αποδοτικοί αλγόριθμοι για τον υπολογισμό των συμμετρικών συνιστωσών των τριφασικών τάσεων και ρευμάτων, και ως εκ τούτου ο υπολογισμός της θετικής ακολουθίας τάσεων και ρευμάτων έδωσε την ώθηση για την ανάπτυξη των σύγχρονων συστημάτων μέτρησης φασιθετών. Σύντομα αναγνωρίστηκε και

η μεγάλη σημασία της μέτρησης θετικής ακολουθίας, η οποία αποτελεί το διάλυμα κατάστασης του ΣΗΕ, κάτι το οποίο είναι θεμελιώδους αξίας για την ανάλυση τους. Η πρώτη δημοσίευση που μιλάει για την σημασία της θετικής ακολουθίας έγινε το 1983 και αποτελεί την αφετηρία της σύγχρονης τεχνολογίας μέτρησης φασιθετών. Εκείνη την εποχή περίπου, αναπτύσσεται πλήρως και το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS), και έγινε σαφές ότι το σύστημα αυτό θα ήταν ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για τον συγχρονισμό των μετρήσεων φασιθετών σε μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Οι πρώτες πρότυπες συσκευές που χρησιμοποίησαν GPS, και σήμερα ονομάζονται PMU, κατασκευάστηκαν στο πανεπιστήμιο Virginia Tech στις αρχές της δεκαετίας του 1980, και 2 από τα πρωτότυπα φαίνονται στο σχήμα 3.1. Σήμερα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστών που διαθέτουν συσκευές PMU στην αγορά, και η ανάπτυξη της τεχνολογίας PMU στα ΣΗΕ γίνεται σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο. Η πρώτη εμπορική μονάδα PMU κατασκευάστηκε το 1991 από την εταιρεία Macrodyne σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο Virginia Tech.

Παράλληλα με την ανάπτυξη των PMU ως συσκευές μέτρησης, γινόταν και έρευνα για τις εφαρμογές στις οποίες μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις που αυτά παρείχαν, τις οποίες θα δούμε αναλυτικά παρακάτω. Πλέον, η τεχνολογία των PMU είναι ευρύτατα διαδεδομένη και πολλά σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο βρίσκονται στη διαδικασία εγκατάστασης συσκευών μέτρησης φασιθετών σε ένα μεγάλο μέρος του δικτύου τους.



Σχήμα 3.1 Η πρώτη συσκευή μέτρησης φασιθετών (PMU) κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Έρευνας ΣΗΕ στο Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια. Ο δέκτης χρονισμού του GPS

ήταν εξωτερικά του PMU, και με τον μικρό αριθμό δορυφόρων που υπήρχαν εκείνη την εποχή, το ρολόι έπρεπε να είναι εφοδιασμένο με εσωτερικό ταλαντωτή που ήταν υπεύθυνος για την ακρίβεια χρονισμού, κατά την απουσία ορατών δορυφόρων.

3.2 Αναπαράσταση φασιθετών με μορφή ημιτόνου

Ας υποθέσουμε ότι μια καθαρό ημιτονοειδές σήμα δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.1)$$

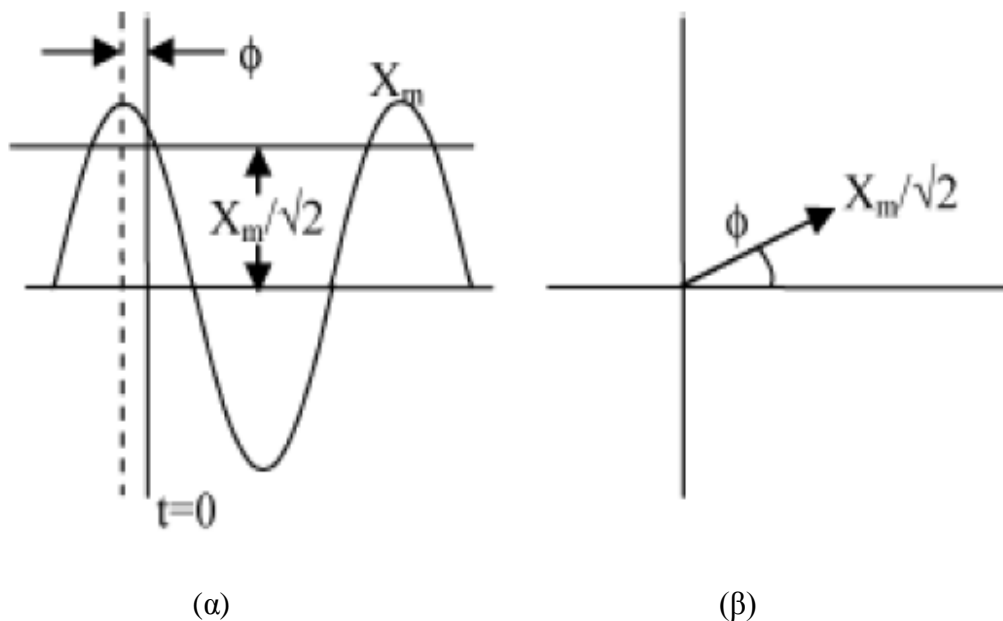
όπου ω η συχνότητα του ημιτόνου σε ακτίνια ανά δευτερόλεπτο, φ η φασική γωνία σε ακτίνια και X_m το μέγιστο πλάτος του σήματος. Η rms (Root Mean Square) τιμή του σήματος είναι $X_m/\sqrt{2}$. Είναι γνωστό από τη θεωρία μας ότι οι rms τιμές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για τον υπολογισμό ενεργού και άεργου ισχύος στα κυκλώματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Η εξίσωση 3.1 μπορεί επίσης να γραφεί ως εξής:

$$x(t) = \text{Re}\{X_m * e^{\omega t + \varphi}\} = \text{Re}\left[\{e^{j(\omega t)}\} * X_m * e^{j\varphi}\right] \quad (3.2)$$

Συνήθως, ο όρος $e^{j(\omega t)}$ παραλείπεται στη παραπάνω σχέση, καθώς η συχνότητα ω είναι σταθερή. Το ημιτονοειδές σήμα της εξίσωσης (3.1) εκφράζεται από τον μιγαδικό αριθμό X και την διανυσματική του αναπαράσταση:

$$x(t) \leftrightarrow X = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) * e^{j\varphi} = \left(\frac{X_m}{\sqrt{2}}\right) * [\cos\varphi + j * \sin\varphi] \quad (3.3)$$

Ένα ημιτονοειδές σήμα και η διανυσματική του απεικόνιση φαίνονται στο σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 (α) Ένα ημιτονοειδές σήμα και (β) η απεικόνισή του ως διάνυσμα. Η φασική γωνία του διανύσματος είναι αυθαίρετη, καθώς εξαρτάται από την επιλογή του άξονα $t=0$. Επίσης, το μέτρο του διανύσματος είναι ίσο με την rms τιμή του ημιτονοειδούς σήματος.

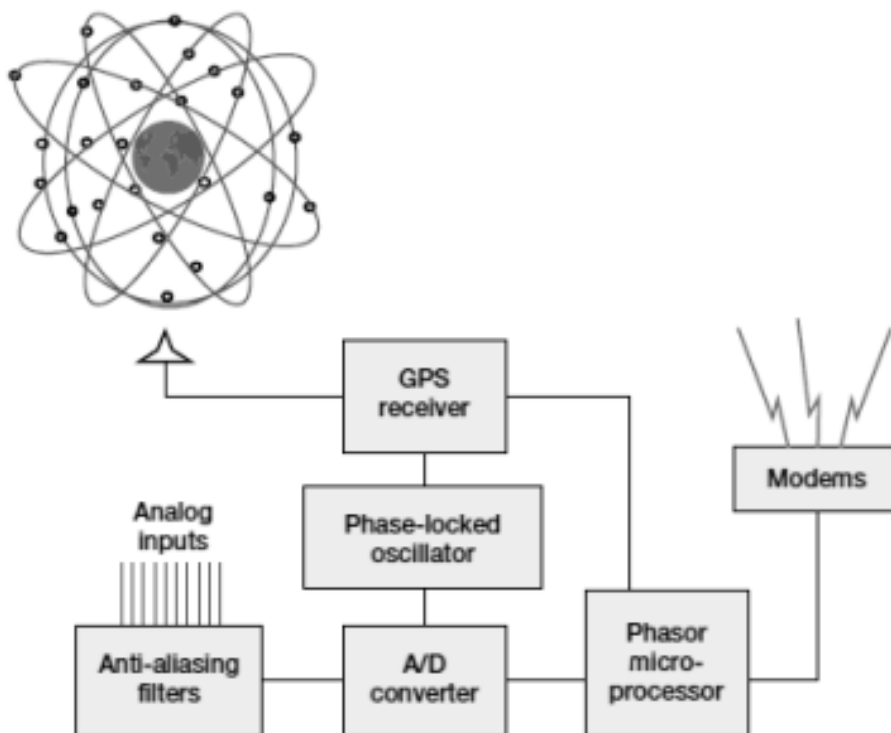
Αρχικά υποθέσαμε ότι η διανυσματική απεικόνιση ενός σήματος είναι δυνατή μόνο αν αυτό είναι καθαρό ημίτονο. Στην πράξη, μια κυματομορφή συχνά περιέχει κι άλλα σήματα με διαφορετικές συχνότητες. Επομένως, είναι απαραίτητο να βρεθεί μία κυρίαρχη συχνότητα (συνήθως η κύρια συνιστώσα του σήματος) ώστε αυτό να απεικονιστεί σε ένα διάνυσμα. Ο υπολογισμός αυτής της συνιστώσας γίνεται με τον μετασχηματισμό Fourier. Σε διακριτά συστήματα, αυτό γίνεται με τον Διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT ή Discrete Fourier Transform) ή με τον Γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform ή FFT).

Επίσης, η αναπαράσταση σε διάνυσμα προϋποθέτει ότι το σήμα παραμένει σταθερό για όλο το χρόνο. Ωστόσο, πρακτικά η μελέτη του διανύσματος γίνεται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το οποίο είναι πολύ σημαντικό στην εκτίμηση των διανυσμάτων των κυματομορφών.

3.3 Τα στοιχεία ενός PMU

Οι μονάδες μέτρησης φασιθετών κατασκευάζονται από πολλές διαφορετικές εταιρίες επομένως έχουν και πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, είναι δύσκολο να περιγραφεί γενικά η διαμόρφωση των επιμέρους στοιχείων που συνθέτουν ένα PMU. Ωστόσο, είναι δυνατό να εξεταστεί μια γενική μορφή της συσκευής αυτής, όπου μπορούν να αναλυθούν τα πιο σημαντικά συστατικά της.

Στο σχήμα 3.3 βλέπουμε την διαμόρφωση των πρώτων συσκευών PMU που κατασκευάστηκαν στον πανεπιστήμιο Virginia Tech. Φαίνεται καθαρά λοιπόν, ότι η τεχνολογία των PMU βασίστηκε στους ηλεκτρονόμους απόστασης συμμετρικών συνιστωσών. Τα εισερχόμενα αναλογικά δεδομένα, είναι τάσεις και ρεύματα που προέρχονται από τα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος. Όλα τα τριφασικά ρεύματα και τάσεις χρησιμοποιούνται ώστε να πραγματοποιηθεί η θετική ακολουθία των μετρήσεων. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτρονόμο, το PMU μπορεί να έχει μετρήσεις ρευμάτων σε πολλά σημεία ενός υποσταθμού, καθώς και μετρήσεις τάσεως σε διαφορετικούς ζυγούς του υποσταθμού.



Σχήμα 3.3 Τα σημαντικότερα μέρη ενός σύγχρονου PMU.

Τα σήματα ρευμάτων και τάσεως μετατρέπονται σε τάσεις εντός του εύρους ± 10 βολτ με τη χρήση κατάλληλων μετασχηματιστών τάσης, ώστε να ταιριάζουν στις απαιτήσεις των αναλογικών μετατροπών. Ο ρυθμός δειγματοληψίας που επιλέγεται για την διαδικασία της δειγματοληψίας, υπαγορεύει την απόκριση συχνότητας του φίλτρου αντιαναδίπλωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτά τα φίλτρα είναι αναλογικού τύπου με συχνότητα αποκοπής λιγότερη από τη μισή της αντίστοιχης συχνότητας δειγματοληψίας, ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο Nyquist. Επίσης, όπως γίνεται και σε πολλούς ηλεκτρονόμους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας (υπερδειγματοληψία) σε συνδυασμό με υψηλή συχνότητα αποκοπής για το αναλογικό φίλτρο αντιαναδίπλωσης. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα ψηφιακό «φίλτρο αποδεκατισμού» που μετατρέπει τα δεδομένα σε χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας και έτσι παρέχει ψηφιακό φίλτρο αντιαναδίπλωσης που συνδέει όλα τα αναλογικά φίλτρα. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας λειτουργίας είναι ότι τα anti-aliasing φίλτρα που αποτελούνται από ένα αναλογικό κι ένα ψηφιακό φίλτρο αποδεκατισμού είναι πολύ πιο σταθερά όσον αφορά τις διακυμάνσεις θερμοκρασίας και το χρόνο ζωής. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλα τα αναλογικά σήματα έχουν την ίδια μετατόπιση φάσης και εξασθένιση, εξασφαλίζοντας έτσι ότι οι διαφορές γωνιών φάσης και τα σχετικά μεγέθη των διαφόρων σημάτων παραμένουν αμετάβλητα.

Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της τεχνικής της υπερδειγματοληψίας, είναι ότι αν υπάρχει η δυνατότητα δεδομένων από τη δειγματοληψία των αναλογικών σημάτων, αυτά θα είχαν μεγάλη χρησιμότητα ως υψηλού εύρους ζώνης ψηφιακές συσκευές εγγραφής σφαλμάτων.

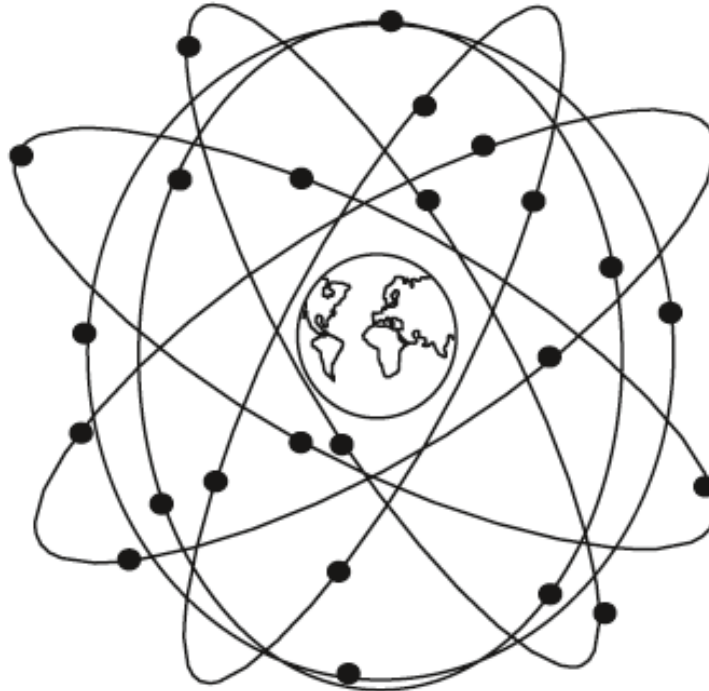
Το ρολόι δειγματοληψίας είναι πλήρως συγχρονισμένο με το παλμό του ρολογιού του GPS. Οι ρυθμοί δειγματοληψίας έχουν αυξηθεί σταθερά τα τελευταία χρόνια. Αρχικά, ο ρυθμός ήταν περίπου 12 δείγματα ανά κύκλο της ονομαστικής συχνότητας του δικτύου για τις πρώτες συσκευές μέτρησης φασιθετών, ενώ πλέον ο αριθμός αυτός έχει ανέβει στα 96 ή και στα 128 δείγματα ανά κύκλο στα περισσότερα σύγχρονα PMU, καθώς χρησιμοποιούνται γρήγοροι μετατροπείς αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά σήματα, και μικροεπεξεργαστές. Ακόμα υψηλότεροι ρυθμοί δειγματοληψίας στο μέλλον είναι πιθανό να οδηγήσουν σε πιο ακριβή εκτίμηση φασιθετών.

Ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει την θετική ακολουθία όλων των σημάτων ρεύματος και τάσης. Η χρονική σφραγίδα δημιουργείται από δύο σήματα που προέρχονται από τον δέκτη του GPS. Αυτό θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο, προς το παρόν αρκεί να πούμε ότι η χρονική σφραγίδα προσδιορίζει το ακριβές δευτερόλεπτο τη «Παγκόσμιας Συντονισμένης Ωρας» (Universal Time Coordinated ή UTC).

Τέλος, η κύρια έξοδος του PMU είναι η μέτρηση με την χρονική σφραγίδα, η οποία μεταφέρεται μέσω κατάλληλων μόντεμ σε ένα υψηλότερο επίπεδο στην ιεραρχία του συστήματος μετρήσεων. Οι προδιαγραφές αυτών των αρχείων εξόδου των PMU θα εξεταστούν σε επόμενη ενότητα.

3.4 Το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού θέσης (GPS)

Το σύστημα GPS μπήκε σε εφαρμογή για πρώτη φορά το 1978 με την εκτόξευση των πρώτων δορυφόρων τύπου Block I από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ. Ως το 1994, είχαν εκτοξευθεί και εγκατασταθεί 24 σύγχρονοι δορυφόροι (το 2007 υπήρχαν 30 ενεργοί δορυφόροι σε τροχιά, οι επιπλέον δορυφόροι παρείχαν μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των χωρικών συντεταγμένων των δεκτών. Οι δορυφόροι τύπου Block I και II έχουν αποσυρθεί). Είναι διατεταγμένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα (4 δορυφόροι σε κάθε ένα) μετατοπισμένα κατά 60° το ένα από το άλλο, και με τροχιακή κλίση 55° (με αναφορά το ισημερινό επίπεδο). Η τοποθέτησή τους είναι τέτοια ώστε τουλάχιστον 6 από αυτούς να είναι ορατοί σχεδόν από κάθε σημείο της επιφάνειας αυτής. Οι δορυφόροι έχουν μια τροχιακή ακτίνα γύρω στα 16500 μίλια, και κάνουν το κύκλο της γης δυο φορές τη μέρα. Η πιο κοινή χρήση του συστήματος GPS είναι ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του δέκτη, αν και για τα PMU, το σήμα που είναι πιο σημαντικό είναι ο παλμός ανά δευτερόλεπτο. Αυτός ο παλμός φτάνει σε όλους τους δέκτες στη γη με ακρίβεια ενός μικροδευτερολέπτου. Στην πράξη, έχουν επιτευχθεί πολύ καλύτερες ακρίβειες συγχρονισμού, της τάξης μερικών εκατοντάδων νανοδευτερολέπτων



Σχήμα 3.4 Αναπαράσταση της διάταξης των δορυφόρων για το σύστημα GPS.

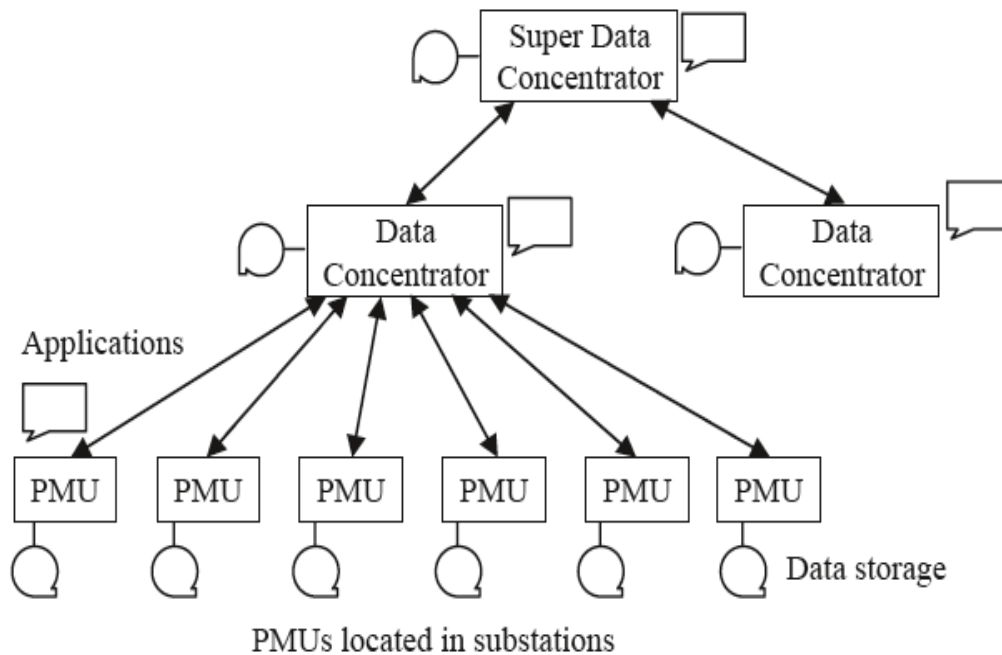
Οι δορυφόροι του συστήματος GPS είναι εφοδιασμένοι με ακριβή ρολόγια τα οποία παρέχουν ένα παλμό ανά δευτερόλεπτο. Ο χρόνος που κρατούν είναι γνωστός ως χρονισμός GPS και δεν λαμβάνει υπόψη την περιστροφή της γης. Οι κατάλληλες διορθώσεις γίνονται από τους δέκτες, ώστε αυτοί να υπολογίσουν τη διαφορά με την ώρα στη γη και να παρέχουν την σωστή ώρα σύμφωνα με το UTC. Η ταυτότητα του παλμού του GPS ορίζεται ως ο αριθμός των δευτερολέπτων που έχουν περάσει από την στιγμή που άρχισε το ρολόι να λειτουργεί (6 Ιανουαρίου 1980). Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι τα πρότυπα PMU χρησιμοποιούν τον μετρητή SOC (Second of Century) ή «Δευτερόλεπτο του Αιώνα», από το Unix, ο οποίος άρχισε να μετράει από τα μεσάνυχτα της 1^{ης} Ιανουαρίου του 1970.

Σήμερα, υπάρχουν πολλά συστήματα GPS που αναπτύσσονται από διαφορετικά κράτη αλλά έχουν τους ίδιους στόχους. Τα συστήματα GPS θα παραμείνουν η κύρια πηγή συγχρονισμού των συσκευών μέτρησης φασιθετών και για το προβλέψιμο μέλλον.

3.5 Η ιεραρχία των συστημάτων μέτρησης φασιθετών

Οι συσκευές μέτρησης φασιθετών εγκαθίστανται στους υποσταθμούς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή των υποσταθμών που αυτές τοποθετούνται εξαρτάται από την χρήση των μετρήσεων που αυτές παρέχουν. Η βέλτιστη τοποθέτηση των PMU παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Στις περισσότερες εφαρμογές, τα δεδομένα των φασιθετών χρησιμοποιούνται και επεξεργάζονται σε περιοχές μακριά από τα PMU. Για αυτό το λόγο, απαιτούνται κι άλλα στοιχεία στο δίκτυο όπως συνδέσεις επικοινωνίας και συσκευές συγκέντρωσης δεδομένων, ώστε να γίνει πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που προσφέρει το σύστημα μέτρησης PMU. Μια γενικώς αποδεκτή αρχιτεκτονική για ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.5 Ιεραρχία των συστημάτων μέτρησης φασιθετών και τα επίπεδα των συσκευών συγκέντρωσης δεδομένων φασιθετών.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 3.5, τα PMU βρίσκονται στους υποσταθμούς ΣΗΕ και παρέχουν μετρήσεις τάσεως θετικής ακολουθίας και με χρονική σφραγίδα, και μετρήσεις ρευμάτων όλων των ζυγών και των τροφοδοτών (όπως επίσης και μετρήσεις συχνότητας και ρυθμού αλλαγής συχνότητας). Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε τοπικές συσκευές αποθήκευσης δεδομένων, και μπορούν να προσπελαστούν από απομακρυσμένες τοποθεσίες για περαιτέρω επεξεργασία ή διαγνωστικούς σκοπούς. Ο αποθηκευτικός χώρος είναι αναγκαστικά περιορισμένος, επομένως τα δεδομένα που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα πρέπει με κάποιο τρόπο να σημαδεύονται ώστε να μην διαγραφούν σε περίπτωση που εξαντληθεί ο αποθηκευτικός χώρος. Τα δεδομένα από τις μετρήσεις φασιθετών είναι επίσης διαθέσιμα και για τις λειτουργίες πραγματικού χρόνου. Επίσης, μπορεί να υπάρξουν και ορισμένες λειτουργίες που γίνονται τοπικά στους υποσταθμούς, οπότε τα δεδομένα αυτά είναι διαθέσιμα και για τέτοιους υπολογισμούς.

Οι συσκευές στο επόμενο επίπεδο ιεραρχίας είναι γνωστές ως «συγκεντρωτής δεδομένων φασιθετών» (PDC ή Phasor Data Concentrator). Η λειτουργία μια συσκευής PDC είναι η συλλογή δεδομένων από πολλά PMU, η αφαίρεση των εσφαλμένων μετρήσεων, η ευθυγράμμιση των χρονικών σφραγίδων, η δημιουργία αρχείου για την καταγραφή των δεδομένων που στέλνονται ταυτόχρονα από ένα ευρύ τμήμα του ΣΗΕ. Επίσης και εδώ, υπάρχουν τοπικοί αποθηκευτικοί χώροι όπως και λειτουργίες που γίνονται στα PDC και χρειάζονται τα δεδομένα από τα PMU, τα οποία και μπορούν να πάρουν σε πραγματικό χρόνο (οι καθυστερήσεις στην μεταφορά και την διαχείριση των δεδομένων στα PDC δημιουργεί προβλήματα στις λειτουργίες πραγματικού χρόνου, αλλά πρακτικά αυτό μπορεί να ελεγχθεί αποτελεσματικά).

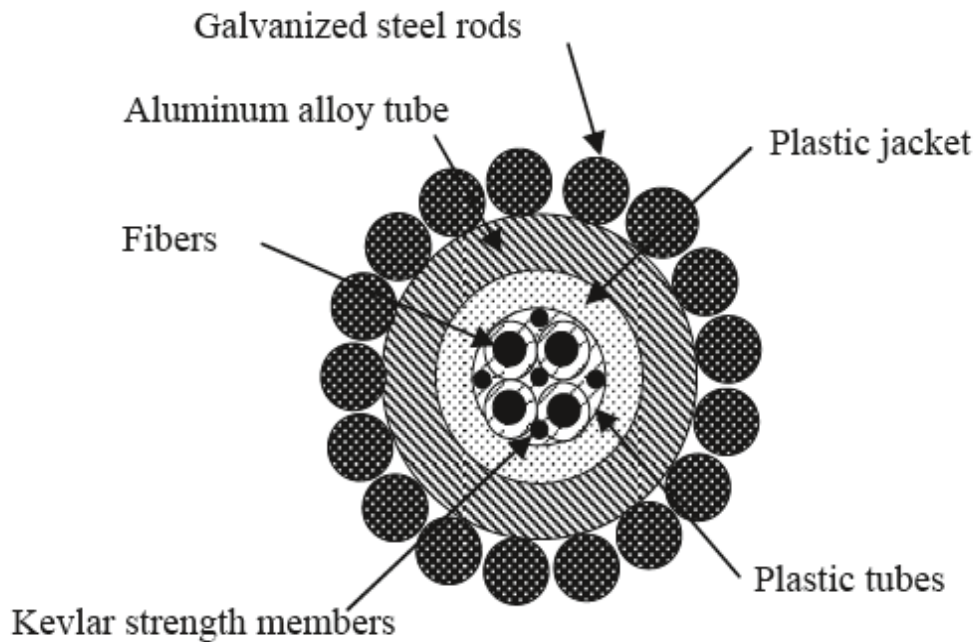
Το πρώτο ιεραρχικό επίπεδο των PDCs λοιπόν, είναι μια περιφερειακή συγκέντρωση δεδομένων από τις μετρήσεις των PMUs. Στο επόμενο επίπεδο, υπάρχει ένας κοινός κεντρικός σταθμός PDC, που ονομάζεται SPDC (Super Phasor Data Concentrator). Οι λειτουργίες που γίνονται σε αυτό το επίπεδο είναι όμοιες με αυτές στο επίπεδο των PDCs. Δηλαδή, υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων, τα οποία ταξινομούνται με βάση τη χρονική τους σφραγίδα, όπως επίσης δημιουργείται ένα αρχείο για την ροή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ώστε αυτά να χρησιμοποιηθούν από λειτουργίες που εφαρμόζονται για όλο το δίκτυο. Ακόμα, το παραπάνω σχήμα δείχνει ότι η επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων είναι αμφίδρομη. Πράγματι, ενώ το μεγαλύτερο μέρος τη ροής δεδομένων γίνεται προς τα πάνω, υπάρχουν εφαρμογές που απαιτούν την ικανότητα επικοινωνίας και προς την αντίστροφη κατεύθυνση. Γενικά όμως, η ικανότητα επικοινωνίας προς τα κάτω δεν είναι τόσο απαιτητική όσο η αντίστοιχη προς τα πάνω.

3.6 Επιλογές επικοινωνίας για τα PMU

Τα μέσα επικοινωνίας αποτελούν παράγοντα ουσιαστικής σημασίας για τις εφαρμογές που απαιτούν δεδομένα φασιθετών, σε απομακρυσμένες περιοχές. Η μεταφορά δεδομένων έχει δυο σημαντικές πτυχές για όλες τις επικοινωνίες. Πρώτον, η χωρητικότητα του μέσου, που είναι το μέτρο του ρυθμού δεδομένων (σε kilobits ανά δευτερόλεπτο ή σε megabits ανά δευτερόλεπτο) που μπορεί να διατηρήσει η διαθέσιμη σύνδεση επικοινωνίας. Και το δεύτερο, είναι η καθυστέρηση, δηλαδή το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την δημιουργία των δεδομένων, ως τη στιγμή που αυτά είναι διαθέσιμα για την επιθυμητή εφαρμογή. Ο όγκος των δεδομένων που στέλνουν τα PMUs είναι αρκετά μικρός, επομένως η χωρητικότητα δεν είναι περιοριστικός παράγοντας για τις περισσότερες εφαρμογές. Αντίθετα, υπάρχουν αρκετές εφαρμογές που απαιτούν σχετικά μικρή καθυστέρηση, ειδικά αυτές που έχουν σχέση με την κατάσταση πραγματικού χρόνου του δικτύου. Επίσης, υπάρχουν και κάποιες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν δεδομένα φασιθετών για την ανάλυση του δικτύου κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών. Σε επόμενη ενότητα, θα εξεταστούν κι άλλες εφαρμογές των PMU.

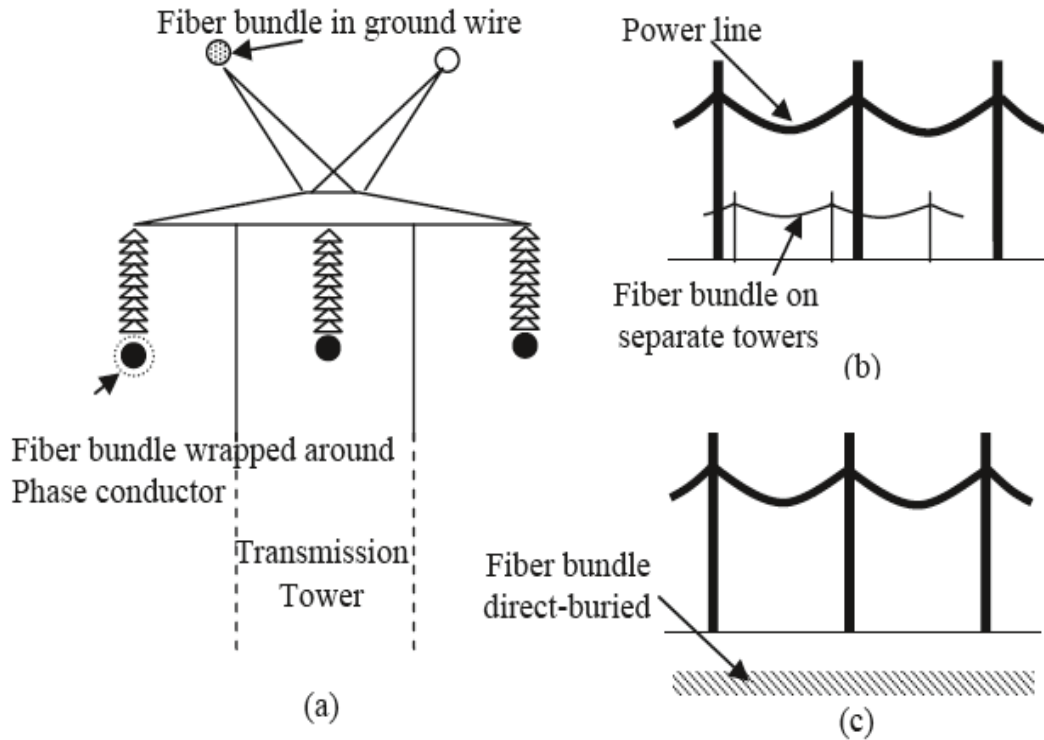
Οι επιλογές στη επικοινωνία που υπάρχουν για την μεταφορά δεδομένων από τα PMUs μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το φυσικό μέσο που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία. Ένα από τα πρώτα μέσα επικοινωνίας που χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό ήταν το μισθωμένο κύκλωμα τηλεφώνου. Ακόμα, τα κυκλώματα επιλεγόμενου τηλεφώνου μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις που η καθυστέρηση δεν έπαιζε σημαντικό ρόλο. Πολλά ηλεκτρικά μέσα επικοινωνίας όπως ο κομιστής γραμμής ρεύματος (power line carrier) και ζεύξεις μικροκυμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί και συνεχίζουν να χρησιμοποιούνται ακόμα από πολλές εφαρμογές. Σήμερα, το πιο κοινό μέσο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται είναι οι οπτικές ίνες οι οποίες έχουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα καναλιού, μεγάλους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων και δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Στο σχήμα

3.6 φαίνεται μια τυπική κατασκευή ενός καλωδίου οπτικών ινών, που χρησιμοποιείται ευρέως στη ηλεκτρικές εφαρμογές.



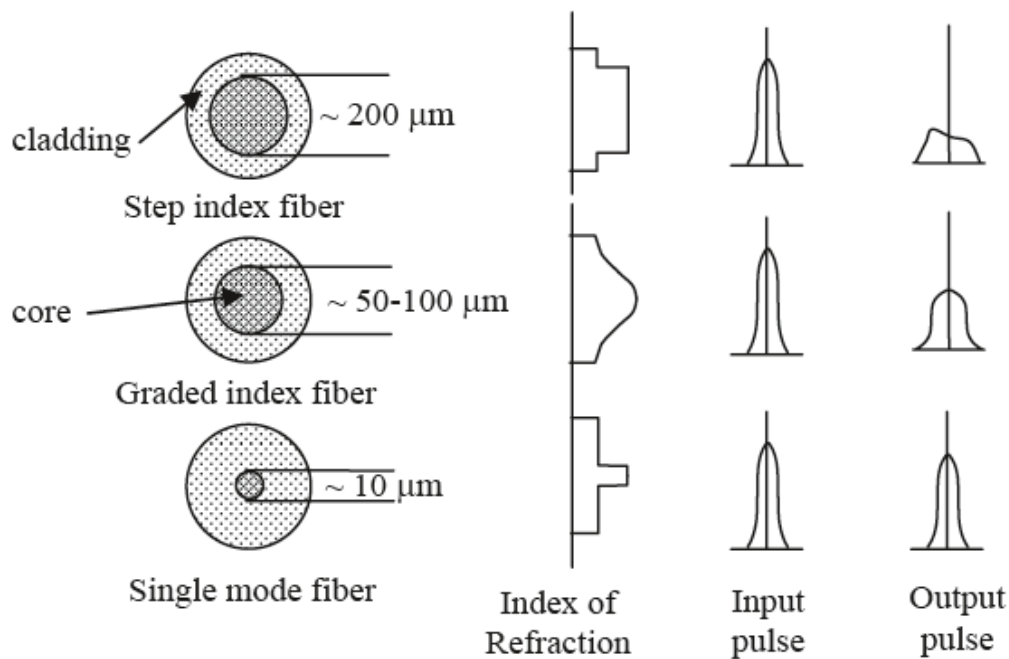
Σχήμα 3.6 Τυπική κατασκευή ενός καλωδίου οπτικών ινών.

Τα καλώδια οπτικών ινών συνήθως τοποθετούνται πάνω στους πυλώνες των γραμμών μεταφοράς. Τα καλώδια αυτά μπορούν να περιέχουν πολλές ίνες οι οποίες χρησιμοποιούνται για επικοινωνία, προστασία ή και για εφαρμογές ελέγχου του ΣΗΕ. Άλλες διατάξεις των καλωδίων οπτικών ινών μπορούν να περιλαμβάνουν ξεχωριστούς πυλώνες για τις οπτικές ίνες, ή τύλιγμα των καλωδίων αυτών γύρω από τους αγωγούς φάσης, όπως επίσης και τοποθέτηση καλωδίων μέσα στο έδαφος (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Περιπτώσεις τοποθέτησης οπτικών ινών στις γραμμές μεταφοράς. (a) Οπτικές ίνες στους πυλώνες των γραμμών. (b) Οπτικές ίνες σε ξεχωριστή γραμμή. (c) Οπτικές ίνες στο έδαφος.

Η τεχνολογία των οπτικών αναπτύσσεται πολύ γρήγορα. Οι ίνες μπορεί να είναι απλές (δηλαδή η οπτική ίνα σε όλο το μήκος του καλωδίου είναι από ομογενές υλικό) ή σύνθετο με διαβαθμισμένη ή βαθμωτή μεταβολή του δείκτη διάθλασης της ίνας και του υλικού επικάλυψης (Σχήμα 3.8). Οι σύνθετες ίνες τείνουν να έχουν μεγαλύτερες απώλειες ανά χιλιόμετρο εξαιτίας της απώλειας ενέργειας λόγω διάθλασης μεταξύ του πυρήνα της οπτικής ίνας και του περιβλήματος. Στις απλές οπτικές ίνες, τα κύματα διαδίδονται κατά μήκος του άξονα της ίνας και επομένως έχουν ελάχιστες απώλειες κατά την μετάδοση. Το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται σε αυτά τα συστήματα κυμαίνεται από 900nm έως 1800nm. Οι τυπικές απώλειες των οπτικών ινών κυμαίνονται από 0.5db ανά χιλιόμετρο (απλές οπτικές ίνες) έως 4db ανά χιλιόμετρο (σύνθετες οπτικές ίνες). Επίσης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και οι απώλειες κατά την σύνδεση και τις υποδοχές των οπτικών ινών. Έτσι, ο κατάλληλος τύπος οπτικής ίνας επιλέγεται ανάλογα με το μήκος της διαδρομής και τις επιτρεπτές απώλειες κατά τη μετάδοση, που επιβάλλει η εκάστοτε εφαρμογή.



Σχήμα 3.8 Τύποι οπτικών ινών, οι διαστάσεις τους και ο τρόπος μετάδοσης του σήματος σε κάθε ένα.

Επίσης, τα μέσα επικοινωνίας μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται. Και σε αυτό το επιστημονικό πεδίο, οι αλλαγές είναι ταχύτερες επομένως μπορούμε μόνο να αναφέρουμε κάποια από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές που απαιτούν μετρήσιμες φασιθετών όπως είναι το πρότυπο IEEE και το πρότυπο RS-232. Το σύστημα επικοινωνίας μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοδήποτε πρωτόκολλο, κρυπτογράφηση και αναδιάταξη των δεδομένων, αρκεί να αποκατασταθεί στην αρχική του μορφή όταν φτάσει στο δέκτη.

Τα μηνύματα των συσκευών PMU μπορούν να χαρτογραφηθούν με τη χρήση του πρωτοκόλλου ελέγχου μεταφοράς (Transmission Control Protocol ή TCP) ή του πρωτοκόλλου δεδομένων χρήστη (User Datagram Protocol ή UDT) και στη συνέχεια να προσπελαστούν με το κλασσικό πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol ή πιο κοινά IP). Η IP μπορεί να μεταφερθεί μέσω Ethernet ή άλλων μέσων μεταφοράς.

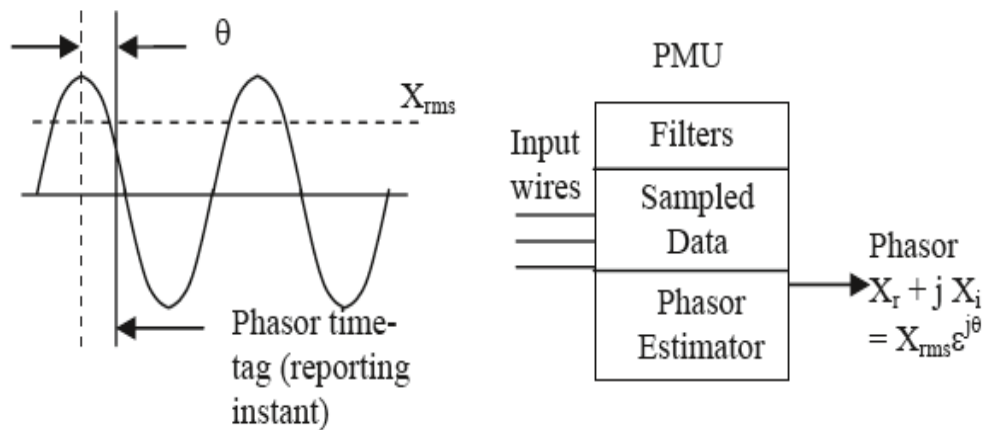
Τα τελευταία χρόνια, το πρότυπο IEC 61850 έχει προταθεί για την διευκόλυνση της προστασίας, του ελέγχου και άλλων λειτουργιών των υποσταθμών. Αυτό το πρότυπο δεν έχει αξιοποιηθεί ακόμα από την τεχνολογία PMU, μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον.

3.7 Λειτουργικές απαιτήσεις των PMUs και PDCs

3.7.1 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη

Προκειμένου να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ των PMU που κατασκευάζονται από διαφορετικές εταιρείες, είναι σημαντικό όλοι τα PMU να χρησιμοποιούν το ίδιο πρότυπο. Αυτό είναι το πρότυπο IEEE, του οποίου την εξέλιξη θα αναλύσουμε στη συνέχεια.

Ο όρος «συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη» εκδόθηκε για πρώτη φορά το 1995. Τα πρώτα PMUs που κατασκευάστηκαν και βασίζονταν σε αυτό το πρότυπο, εξετάστηκαν για τη διαλειτουργικότητα και διαπιστώθηκε ότι η απόδοσή τους σε μη ονομαστικές συχνότητες δεν ήταν ιδανική, κάτι που δεν ήταν αποδεκτό. Σύντομα βρέθηκε ότι το πρότυπο τότε δεν ήταν σαφές για τις αποδόσεις των PMU σε μη ονομαστικές συχνότητες. Έτσι, μια ομάδα επιστημόνων από το IEEE αναθεώρησε το πρότυπο, με αποτέλεσμα αυτό να υπάρχει έως και σήμερα, και να διευκρινίζει πλήρως τις απαιτήσεις για την απόκριση των PMU σε μη ονομαστικές συχνότητες. Οι απαιτήσεις αυτές μπορούν να εξηγηθούν με τη βοήθεια του σχήματος 3.9. Όπως ειπώθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ο ορισμός ενός διανύσματος είναι ανεξάρτητος από τη συχνότητά του. Έτσι, αν τα σήματα που εισέρχονται στα PMUs είναι καθαρά ημιτονοειδή σήματα οποιαδήποτε συχνότητας, και η εκτίμηση φάσης αναφέρεται όπως δείχνει το σχήμα, τότε το διάνυσμα εξόδου θα έχει μέτρο ίσο με την ενεργό τιμή του σήματος και η φασική γωνία θα είναι η γωνία θ . Επίσης, είναι γνωστό ότι τα PMU γενικά έχουν κάποια φίλτρα στην είσοδό τους, τα οποία προκαλούν μεταβολές στις φασικές γωνίες και πρέπει αυτές να ληφθούν υπόψη πριν την εκτίμηση του διανύσματος. Επιπλέον, η θετική ακολουθία των σημάτων που παρέχουν τα PMU θα πρέπει να είναι σωστή ανεξάρτητα από τις εισόδους, και για αυτό το λόγο το πρότυπο επιτρέπει μια απόκλιση συχνότητας $\pm 5\text{Hz}$ από την ονομαστική. Άλλα χαρακτηριστικά του προτύπου είναι ότι καθορίζει τις απαιτήσεις για την ακρίβεια των μετρήσεων, και ότι παρέχει μια τυποποιημένη ώρα αναφοράς για τις φάσεις των διανυσμάτων, η οποία είναι το 1PPS (παλμός ανά δευτερόλεπτο ή Pulse per Second) του συστήματος GPS, και τα πολλαπλάσια αυτού δίνουν τις ονομαστικές περιόδους των σημάτων.



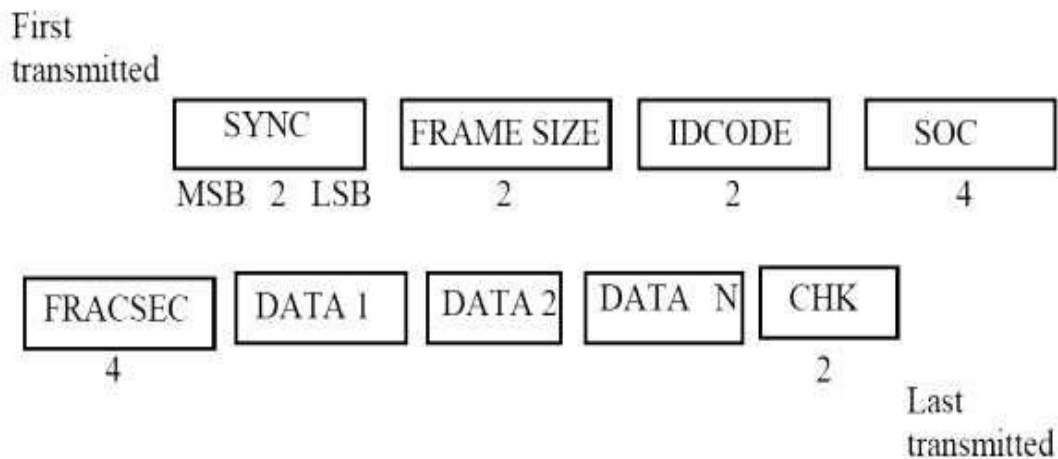
Σχήμα 3.9 Απόδοση των PMUs για εισόδους σημάτων οποιαδήποτε συχνότητας (α) Σήμα εισόδου στη συσκευή PMU (β) Η απαιτούμενη μορφή εξόδου της εκτίμησης φασιθέτη.

Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι το τωρινό πρότυπο δεν καθορίζει τις απαιτήσεις για την απόκριση των PMU στη μεταβατική κατάσταση του δικτύου. Κάτι τέτοιο λογικά θα γίνει σε μελλοντικές εκδόσεις του προτύπου.

3.7.2 Μορφότυπο αρχείου της συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη

Η δομή του αρχείου της συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη είναι όμοια με το πρότυπο COMTRADE, το οποίο καθορίζει ορίζει τα αρχεία για προσωρινή συλλογή και διάδοση των δεδομένων. Το πρότυπο αυτό έχει κατασκευαστεί από τη Διεθνή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνίας (International Electrotechnical Commission ή IEC), και σήμερα είναι το κύριο διεθνές πρότυπο μορφής αρχείου που χρησιμοποιείται από κέντρα υπολογιστών, ψηφιακές συσκευές εγγραφής σφαλμάτων και άλλες εφαρμογές που σχετίζονται με μεταφορά δεδομένων σε ένα ΣΗΕ.

Σύμφωνα με το πρότυπο, ορίζονται τέσσερις τύπου αρχείων μετάδοσης δεδομένων από και προς τα PMUs. Τα τρία από αυτά δημιουργούνται από τα PMU («Αρχεία επικεφαλίδας», «Αρχεία ρυθμίσεων» και «Αρχεία δεδομένων») και χρησιμοποιούνται για την επικοινωνίας τους με ανώτερα ιεραρχικά επίπεδα όπως πχ τις μονάδες PDC, ενώ το τέταρτο χρησιμοποιείται για επικοινωνία με την αντίστροφη φορά («Αρχεία εντολών»). Στο σχήμα 3.10 φαίνεται η κοινή δομή όλων των αρχείων.



Σχήμα 3.10 Δομή των αρχείων PMU. Οι αριθμοί κάτω από το κάθε τμήμα δηλώνουν τον αριθμό των bytes κάθε λέξης.

Η πρώτη λέξη των 2 bytes είναι για τον συγχρονισμό της μεταφοράς δεδομένων. Η δεύτερη λέξη ορίζει το συνολικό μέγεθος του αρχείου και η τρίτη λέξη προσδιορίζει την πηγή δεδομένων κατά μοναδικό τρόπο. Οι δύο επόμενες περιέχουν το δευτερόλεπτο του αιώνα (SOC) και το κλάσμα του δευτερολέπτου FRACSEC που δημιουργούνται τα δεδομένα. Τέλος, η τελευταία λέξη είναι το άθροισμα ελέγχου που βοηθάει στο προσδιορισμό λαθών κατά τη μετάδοση.

Το αρχείο επικεφαλίδας είναι ένα αρχείο αναγνώσιμο στον άνθρωπο με χρήσιμες πληροφορίες τις οποίες ο αποστολέας των δεδομένων μπορεί να επιθυμεί να μοιραστεί με τον αποδέκτη. Τα αρχεία ρυθμίσεων και δεδομένων είναι αρχεία αναγνώσιμα από μηχανή με σταθερές μορφές. Τα πρώτα παρέχουν πληροφορίες για την ερμηνεία των δεδομένων που περιέχουν τα αρχεία δεδομένων, ενώ τα δεύτερα παρέχουν δεδομένα φασιθετών όπως τη συχνότητα και το ρυθμό μεταβολής της συχνότητας που παράγονται στην έξοδο των συσκευών PMU και μπορεί να είναι είτε σε πολική είτε σε καρτεσιανή μορφή. Πρακτικά, τα αρχεία επικεφαλίδας και ρυθμίσεων αποστέλλονται από τα PMU, μόνο αν το περιεχόμενό τους ορίζεται για πρώτη φορά.

Τα αρχεία εντολών χρησιμοποιούνται από υψηλότερα επίπεδα της ιεραρχίας ενός συστήματος εποπτείας για να ελέγχουν την λειτουργία των συσκευών PMU. Σήμερα έχουν οριστεί πολλά διαφορετικά είδη εντολών, ενώ έχουν βρεθεί και κώδικες για ακόμα περισσότερα που μπορεί να χρειαστούν στο μέλλον.

3.7.3 Τα αρχεία για τα PDC

Τα PDC και τα Super PDC είναι σημαντικά στοιχεία της οργάνωσης του συστήματος PMU. Οι κύριες λειτουργίες τους είναι να συγκρίνουν τα δεδομένα που δέχονται από διαφορετικά PMU αλλά με όμοιες χρονικές σφραγίδες, να δημιουργούν αρχεία δεδομένων για μελλοντική χρήση, και να διαθέτουν τα δεδομένα στις εφαρμογές που τα χρειάζονται με την κατάλληλη ταχύτητα και καθυστέρηση. Προς το παρόν, δεν υπάρχουν βιομηχανικά πρότυπα για τα PDC. Παρόλα αυτά, η δομή των αρχείων που χρησιμοποιούν τα PDCs είναι όμοια με τα αντίστοιχα των PMUs. Επίσης, δεν υπάρχουν διαθέσιμες συσκευές PDC στο εμπόριο, και αυτές που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα έχουν κατασκευαστεί από ερευνητές ή κατασκευαστές συσκευών PMU. Όσο λοιπόν αυξάνεται η εφαρμογή της τεχνολογίας PMU γίνεται κατανοητό ότι θα δημιουργηθεί και κατάλληλο πρότυπο για αυτά τα σημαντικά μέρη του συστήματος PMU. [6]

3.8 Βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων PMU

Όταν ένα νέο σύστημα εκτίμησης κατάστασης τίθεται σε εφαρμογή ή αναβαθμίζει ένα προϋπάρχον, προκύπτει το πρόβλημα της σωστής και πιο αποδοτικής τοποθέτησης των μονάδων PMU, καθώς και του ελάχιστου αριθμού τους ώστε το δίκτυο να είναι παρατηρήσιμο. Αυτό γίνεται διότι οι μονάδες PMU κοστίζουν ακριβά, με αποτέλεσμα μόνο ένας μικρός αριθμός αυτών να είναι δυνατό να εγκατασταθούν σε ένα δίκτυο, όπως επίσης και γιατί ένα σύστημα δε μπορεί να μην έχει καθόλου συμβατικές μετρήσεις και να εκτιμάται μόνο από μετρήσεις συσκευών PMU. Επομένως, η σωστή κατανομή τους σε διάφορες θέσεις του δικτύου είναι πολύ σημαντική για την βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης ενός ΣΗΕ.

Κάθε συσκευή PMU μπορεί να καταμετρά το διάνυσμα τάσης στον ζυγό που τοποθετείται, καθώς και τα διανύσματα ρεύματος σε όλους τους κλάδους που συνδέονται με αυτόν. Πρακτικά, τα PMU που κατασκευάζονται σήμερα έχουν δυνατότητα μέτρησης ρεύματος σε 3 ~ 4 κλάδους το πολύ για κάθε ζυγό, επομένως περιορίζεται κάπως ο αριθμός των διαθέσιμων ζυγών. Αρχικά, εφοδιάζονται με συγχρονισμένες μετρήσεις ζυγοί που είναι σε σημαντικές θέσεις, όπως σε περιοχές οικονομικής σημασίας ή με πολλά φορτία, ή ζυγοί που θεωρούνται σημεία για μελλοντική επέκταση του δικτύου.

Αντίθετα, υπάρχουν αρκετοί ζυγοί που εξαιρούνται από τη λίστα πιθανών τοποθεσιών για εγκατάσταση PMU. Τέτοιο είναι οι ακτινικοί ζυγοί στους οποίους αν τοποθετηθεί μονάδα

PMU, θα έχουμε μετρήσεις τάσεως που αφορούν δύο ζυγούς, τον ακτινικό και αυτόν που συνδέεται, και με την ίδια λογική θα έχουμε μέτρηση ρεύματος μόνο σε έναν κλάδο, αυτόν που τους συνδέει. Επίσης, εξαιρούνται και οι ζυγοί μηδενικής εγχύσεως οι οποίοι συνδέονται με το πολύ 2 κλάδους.

Σήμερα, υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που υπολογίζουν την βέλτιστη κατανομή των μονάδων PMU στο δίκτυο καθώς και τον ελάχιστο αριθμό τους, ενώ επίσης υπάρχουν αλγόριθμοι που βρίσκουν την καλύτερη τοποθέτησή τους ώστε να βελτιώσουν την απόδοση κι άλλων εφαρμογών όπως η ανίχνευση σφαλμάτων και η εκτίμηση παραμέτρων. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε δυο από αυτούς, και θα δώσουμε ένα παράδειγμα εφαρμογής του στο δίκτυο των 14 ζυγών.

3.8.1 Παράδειγμα 1ου αλγορίθμου για βέλτιστη τοποθέτηση PMU

Για ένα σύστημα με n ζυγούς, το πρόβλημα τοποθέτησης PMU μπορεί να μοντελοποιηθεί με τον παρακάτω τρόπο:

$$\min \sum_{i=0}^n w_i * x_i \quad (3.4)$$

$$\text{υπο τον όρο ότι } f(X) \geq \hat{1}$$

όπου το X είναι ένα διάνυσμα μεταβλητών δυαδικής απόφασης, του οποίου τα στοιχεία διαμορφώνονται ως εξής:

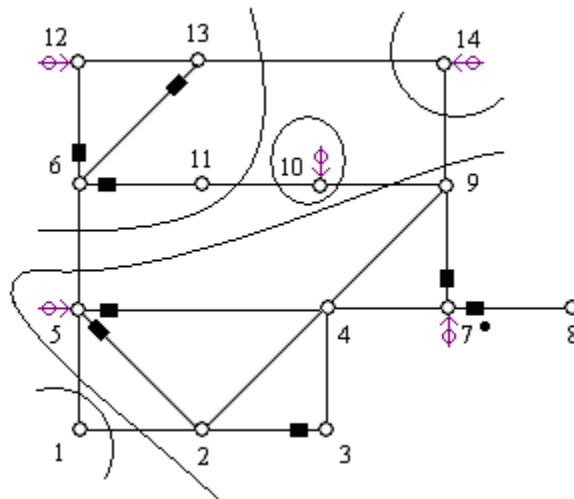
$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{αν ο ζυγός } i \text{ έχει εγκατεστημένη μια μονάδα PMU} \\ 0 & \text{αν ο ζυγός } i \text{ δεν έχει μονάδα PMU} \end{cases} \quad (3.5)$$

w_i είναι το κόστος της μονάδας PMU που είναι εγκατεστημένη στον ζυγό i .

$f(X)$ είναι ένα διάνυσμα συναρτήσεων του οποίου τα στοιχεία είναι μη μηδενικά, αν η τάση του αντίστοιχου ζυγού μπορεί να υπολογιστεί με το δεδομένο σύνολο μετρήσεων, ή μηδενικά σε διαφορετική περίπτωση. $\hat{1}$ είναι ένα διάνυσμα του οποίου τα στοιχεία είναι όλα ίσα με τη μονάδα.

Το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος μεταβλητών δυαδικής απόφασης και του διανύσματος κόστους δίνουν το συνολικό κόστος όλων των επιλεγμένων PMUs. Οι συναρτήσεις περιορισμού της σχέσης (3.5) εξασφαλίζουν πλήρη παρατηρησιμότητα στο δίκτυο ενώ ελαχιστοποιείται το κόστος των μονάδων PMUs.

3.8.2 Παράδειγμα 2^ο αλγορίθμου για βέλτιστη τοποθέτηση PMU



Σχήμα 3.13 Παρατηρήσιμες νησίδες για το σύστημα των 14 ζυγών

Ο προηγούμενος αλγόριθμος που ήταν βασισμένος σε προγραμματισμό ακέραιων αριθμών, είναι πολύ αποτελεσματικός στο να τοποθετεί μονάδες PMU σε συστήματα που έχουν από πριν πολύ λίγες μετρήσεις. Επίσης, χρησιμοποιείται για τοποθέτηση PMU σε συστήματα που ελέγχονται αποκλειστικά με PMUs. Ωστόσο, τα περισσότερα από τα σημερινά συστήματα έχουν ήδη έναν πολύ μεγάλο αριθμό συμβατικών μετρήσεων, και οι μονάδες PMU εγκαθίστανται για να βελτιώσουν το ήδη εγκατεστημένο σύστημα μετρήσεων. Για τέτοιου είδους συστήματα, τα οποία μπορεί να μην είναι παρατηρήσιμα και να έχουν μερικές παρατηρήσιμες νησίδες, χρησιμοποιείται περισσότερο μια μέθοδος βασισμένη στην τοπολογία του συστήματος. Η μέθοδος αυτή μπορεί να βρίσκει τις καλύτερες τοποθεσίες για εγκατάσταση PMU με το να ενώνει τις παρατηρήσιμες νησίδες. Αφού οι οριακοί ζυγοί είναι οι μόνοι που συνεισφέρουν στη διαδικασία ένωσης παρατηρήσιμων νησίδων, αυτοί θα είναι και οι υποψήφιοι για εγκατάσταση μονάδων PMU. Αρχικά, εφαρμόζεται μια ανάλυση αριθμητικής παρατηρησιμότητας ώστε να καθοριστούν οι παρατηρήσιμες νησίδες. Στη συνέχεια, ο οριακός

ζυγός που συνδέεται με τον μεγαλύτερο αριθμό νησίδων ή αυτός που έχει το μεγαλύτερο αριθμό κλάδων που συνδέονται με άλλες νησίδες επιλέγεται για εγκατάσταση μονάδας PMU. Τέλος, για την πλήρη εκμετάλλευση των μετρήσεων εγχύσεως, μετά την επιλογή μια τοποθεσίας για εγκατάσταση PMU, εκτελείται ξανά η ανάλυση αριθμητικής παρατηρησιμότητας ώστε να οριστούν εκ νέου οι παρατηρήσιμες νησίδες.

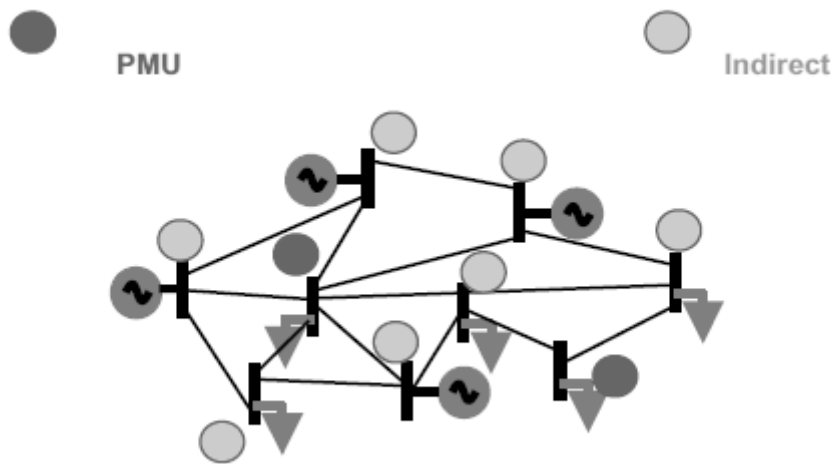
Έστω ότι έχουμε το σύστημα των 14 ζυγών που φαίνεται στο σχήμα 3.13, όπου αρχικά υπάρχουν 5 παρατηρήσιμες νησίδες. Οι οριακοί ζυγοί είναι οι 1,2,5,6,9,10,11,13 και 14. Από αυτούς, οι ζυγοί 9,10, και 14 συνδέονται με 2 διαφορετικές παρατηρήσιμες νησίδες αντίστοιχα, και συνδέονται με το μέγιστο αριθμό γειτονικών νησίδων. Επιλέγεται λοιπόν ο ζυγός 9 για εγκατάσταση PMU. Στη συνέχεια εκτελείται η ανάλυση αριθμητικής παρατηρησιμότητας και το σύστημα είναι πλέον παρατηρήσιμο. Αυτό σημαίνει ότι με την εγκατάσταση μια μονάδας PMU στον ζυγό 9, και οι 5 νησίδες ενώνονται σε ένα παρατηρήσιμο δίκτυο. Η λογική αυτή είναι απλή και εύκολη στην εκτέλεσή της, με δεδομένο ότι υπάρχουν σχετικά λίγες παρατηρήσιμες νησίδες και συνεπώς λίγοι οριακοί ζυγοί. [12]

3.9 Εφαρμογές των μονάδων PMU

Σήμερα, υπάρχουν πολλές εφαρμογές των PMUs που έχουν ήδη υλοποιηθεί ενώ παράλληλα υπάρχουν και αρκετές που έχουν προταθεί για το μέλλον. Οι πιο σημαντικές από αυτές που υπάρχουν στη σύγχρονη βιβλιογραφία και αναφέρονται εδώ είναι η εκτίμηση κατάστασης, αξιοπιστία συστήματος, ακρίβεια μετρήσεων, έλεγχος συστήματος, ευστάθεια, προστασία και καταγραφή σφαλμάτων. Ακολουθεί μια πιο λεπτομερή περιγραφή τους.

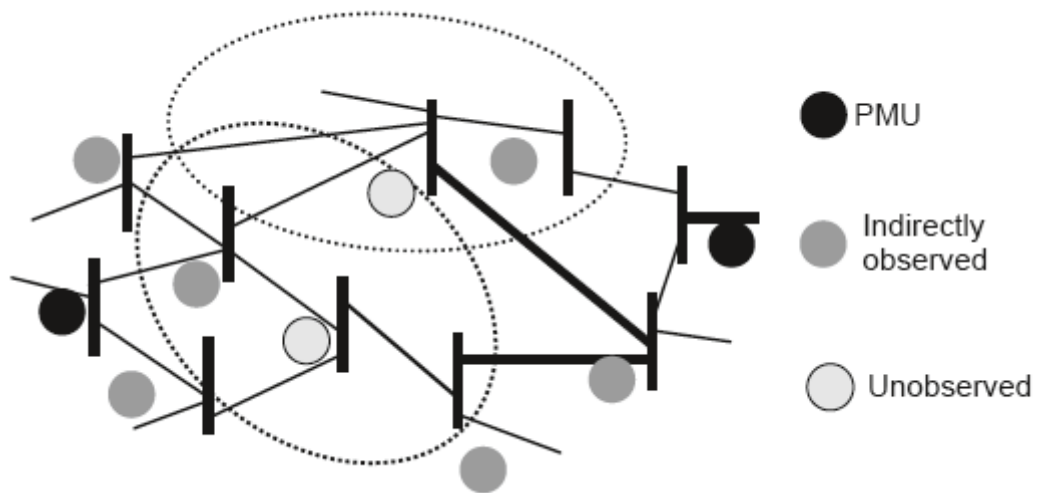
➤ *Εκτίμηση κατάστασης*

Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών της θετικής ακολουθίας τάσεων και ρευμάτων αποτελεί πλέον βασικό εργαλείο στην εκτίμηση κατάστασης. Για να γίνει όμως η εκτέλεση του αλγορίθμου κατάστασης με μετρήσεις PMU προϋποθέτει το δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Οι μονάδες PMU τοποθετούνται σε κομβικά σημεία του δικτύου και οι μετρήσεις που παρέχουν δίνουν σημαντικές πληροφορίες για τα κέντρα ελέγχου. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, μια συσκευή PMU μετράει τη τάση του ζυγού στον οποίο έχει εγκατασταθεί καθώς και τις τάσεις των ζυγών με τους οποίους συνδέεται αυτός έμμεσα, μέσω των μετρήσεων ρευμάτων στους κλάδους.



Σχήμα 3.14 Οι μετρήσεις ρευμάτων παρέχουν έμμεσα τα διανύσματα τάσεων των ζυγών που συνδέουν.

Επίσης, είναι δυνατό να χωριστεί το δίκτυο σε παρατηρήσιμες και μη παρατηρήσιμες νησίδες ώστε η εκτίμηση κατάστασης με συγχρονισμένες μετρήσεις να γίνει ξεχωριστά στα παρατηρήσιμα μέρη του δικτύου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.15:



Σχήμα 3.15 Εκτίμηση κατάστασης χωρίς πλήρη παρατηρησιμότητα

Όπως ειπώθηκε παραπάνω, τα σημερινά δίκτυα έχουν συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις επομένως υπάρχουν και διαφόρου τύπου υβριδικοί αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης. Σε αυτή τη περίπτωση, με τον συνδυασμό όλων των μετρήσεων προκύπτει ένα υβριδικό μη γραμμικό σύστημα. Υπάρχουν επίσης αλγόριθμοι δυο βημάτων όπως και αυτός που αναλύουμε σε αυτή την εργασία, όπου στο πρώτο βήμα γίνεται εκτίμηση κατάστασης μόνο των συγχρονισμένων μετρήσεων, και στη συνέχεια τα αποτελέσματα του πρώτου και οι συμβατικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται στο δεύτερο βήμα.

➤ ***Αξιοπιστία ΣΗΕ***

Πολλές πτυχές των εφαρμογών ΣΗΕ βασίζονται σε ανακριβή υπολογιστικά μοντέλα και προσομοιώσεις. Οι παράμετροι αυτών των μοντέλων θα πρέπει να εκτιμηθούν αν είναι άγνωστες. Αυτό επιτρέπει την πιθανότητα ύπαρξης σφαλμάτων κατά τη διάρκεια υπολογισμού των προσομοιώσεων. Πλέον είναι πιθανό να επαληθευθούν τα δεδομένα που λαμβάνονται από τέτοιες εφαρμογές χρησιμοποιώντας δεδομένα πραγματικού χρόνου. Στο παρελθόν, αυτή η λειτουργία ήταν χρονοβόρα ανέφικτη ή και αδύνατη. Αυτή η επαλήθευση μοντέλου είναι πολύ χρήσιμη σε παλαιότερα ΣΗΕ όπου πολλές συνιστώσες ίσως να μην ακολουθούν με ακρίβεια τις προδιαγραφές των κατασκευαστών. Πολλά σφάλματα μπορούν να προκύψουν όταν μικρές αλλαγές σε παραμέτρους όπως σταθερές χρόνου γεννητριών δεν εναρμονίζονται με τις προδιαγραφές με τις οποίες έχει μοντελοποιηθεί το σύστημα.

➤ ***Ακρίβεια Μετρήσεων***

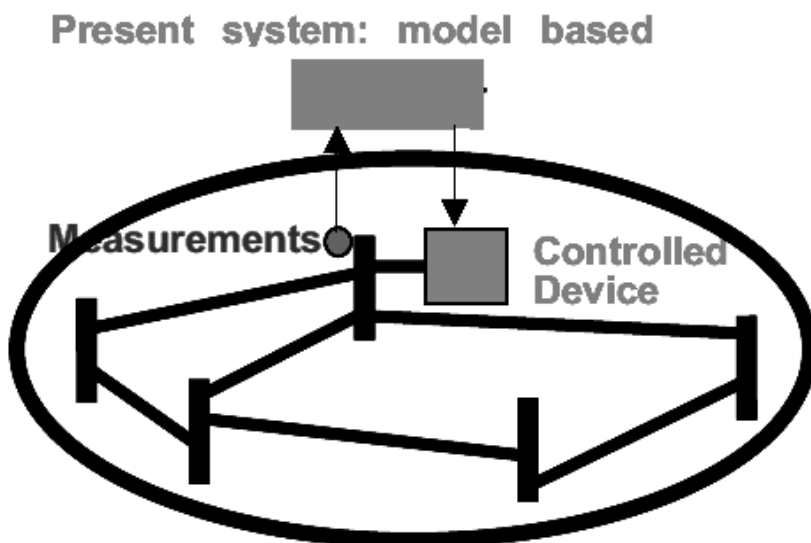
Η ακρίβεια των δεδομένων που παρέχουν οι μονάδες PMU είναι ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα στις εφαρμογές των ΣΗΕ. Αυτό φαίνεται και την επίδραση που έχει η τοποθέτηση σταθεροποιητή σε μια μεγάλη μονάδα γεννήτριας. Το μόνο διαθέσιμο μέσο που μπορεί να ελέγξει τον σταθεροποιητή είναι η συσκευή καταγραφής σφαλμάτων. Παρόλα αυτά, αυτός ο εξοπλισμός δεν έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει τις επιδράσεις στον σταθεροποιητή για μεταβολές μικρότερες του 1% του συστήματος. Ωστόσο η τεχνολογία PMU έδωσε μια πολύ ακριβής αναπαράσταση του δικτύου κατά τη διάρκεια μικρών μεταβολών και τις επακόλουθες επιδράσεις του σταθεροποιητή στο δίκτυο.

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, η ακρίβεια στους παραμέτρους του συστήματος επιτρέπουν στους χειριστές να τρέχουν το σύστημα πολύ κοντά στα όριά του ή να προβλέπει πότε πρέπει να τροφοδοτηθούν φορτία μεγαλύτερης ισχύος. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται σήμερα στη Σκανδιναβία, όπου χρησιμοποιείται «έξυπνος» έλεγχος με βάση τις συγχρονισμένες μετρήσεις ως εναλλακτικός τρόπος πρόσθεσης επιπλέον γραμμών μεταφοράς σε μια περιοχή του δικτύου με πολλά φορτία. Αν τα φορτία αυτά συνεχίσουν να αυξάνονται απαιτώντας νέες γραμμές να συνδεθούν, ο έξυπνος έλεγχος μπορεί να επέμβει παρέχοντας μια προσωρινή λύση για ένα υπερφορτωμένο κομμάτι δικτύου.

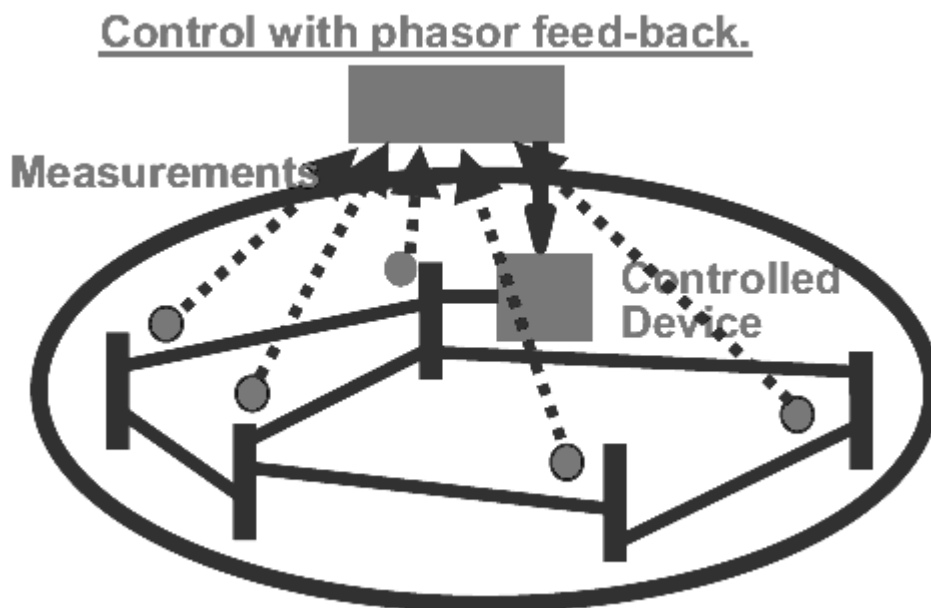
➤ **Έλεγχος ΣΗΕ**

Πριν την εισαγωγή των συγχρονισμένων μετρήσεων, ο συνολικός έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν με χρήση συμβατικών μετρήσεων και ενός μαθηματικού μοντέλου για μεγαλύτερα δίκτυα. Με αυτό τον τρόπο ο έλεγχος δεν ήταν ο βέλτιστος και τα αποτελέσματά του θα μπορούσαν να είναι εντελώς λανθασμένα όταν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνταν ήταν ανακριβή. Η ιδέα της χρήσης συγχρονισμένων μετρήσεων ώστε να βελτιωθεί ο έλεγχος ήταν υπό έρευνα για πολλά χρόνια.

Οι υψηλής ταχύτητας συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών που παρέχουν οι μονάδες PMU προσφέρουν μια πολύ ελκυστική εναλλακτική λύση στα προβλήματα του ελέγχου των ΣΗΕ. Μετρήσεις από απομακρυσμένες περιοχές μπορούν να μεταφέρονται στις συσκευές ελέγχου με πολύ μεγάλη ταχύτητα μέσω του συστήματος PMU. Τέτοιοι ελεγκτές μελετώνται εδώ και πολλά χρόνια για τη χρήση τους σε έλεγχο των σταθεροποιητών του ΣΗΕ, για την διέγερση των γεννητριών, συσκευές HVDC (High-Voltage Direct Current) κ.α.



Σχήμα 3.16 Ελεγκτές με χρήση συμβατικών μετρήσεων και μοντέλων



Σχήμα 3.17 Ελεγκτές με συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών.

➤ **Ευστάθεια ΣΗΕ**

Η ικανότητα μια μονάδας PMU να ελέγχει τάσεις και γωνίες σε πραγματικό χρόνο είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την ευστάθεια του δικτύου. Πολλές φορές όταν ένα σύστημα κινδυνεύει με αστάθεια, αυτό μπορεί να αναγνωριστεί μέσω των τιμών των γωνιών ή των μέτρων τάσεως, όταν αυτά προσεγγίζουν ένα κρίσιμο σημείο. Αν δοθεί στον χειριστή προειδοποίηση για αστάθεια, πρέπει να γίνουν άμεσες διορθωτικές κινήσεις για να αποφευχθεί μια πιθανώς επικίνδυνη κατάσταση για το δίκτυο. Οι αποκλίσεις στις φασικές γωνίες μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα από τα δεδομένα συγχρονισμένων μετρήσεων. Αντίθετα, η κατάρρευση τάσεως απαιτεί επιπλέον υπολογισμούς για να αναγνωριστεί. Στην περίπτωση απόκλισης συχνότητας, γίνονται διορθωτικές κινήσεις που περιλαμβάνουν διαίρεση του συστήματος σε τομείς με κοινή συχνότητα, που ονομάζονται «νησίδες». Ο σκοπός είναι η διαίρεση του συστήματος ενώ ακόμα διατηρείται η ισορροπία παραγωγής-κατανάλωσης ισχύος στο σύστημα. Ο καλύτερος τρόπος διαίρεσης επιτυγχάνεται μέσω της off-line ανάλυσης, η οποία βασίζεται σε υπολογισμούς για υποθετικές συμπεριφορές του δικτύου. Σε ένα σύστημα που γίνεται ασταθές, το θεωρητικό μοντέλο του δικτύου που υπολογίζεται μπορεί να είναι ανακριβές. Οι συγχρονισμένες μετρήσεις μπορούν να δώσουν στο χειριστή δεδομένα πραγματικού χρόνου από το σύστημα, δίνοντας μια πιο ξεκάθαρη εικόνα των συνεπειών της διαίρεσης του δικτύου σε νησίδες. Συχνά, όταν αποκαθίσταται η ευστάθεια στο δίκτυο, οι νησίδες επανασυνδέονται ώστε να επιστρέψει το δίκτυο στη κανονική του λειτουργία. Όταν δυο ζυγοί, που διαχωρίζονται από μία γραμμή με ανοιχτούς διακόπτες, πρόκειται να επανασυνδεθούν, είναι σημαντικό οι γωνίες των δυο ζυγών να είναι πανομοιότυπες. Αν η διαφορά γωνιών είναι αρκετά μεγάλη, το σύστημα είναι πιθανό να ξαναγίνει ασταθές. Οι

μονάδες PMU μπορούν να ελέγχουν τα δεδομένα των γωνιών από τους ζυγούς, κάνοντας την επανασύνδεση ασφαλέστερη και πιο αξιόπιστη

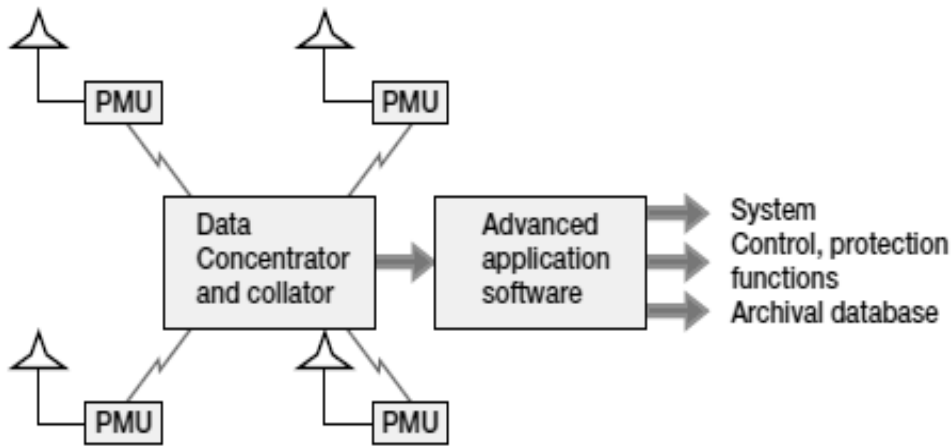
➤ **Προστασία ΣΗΕ**

Τομείς της προστασίας στους οποίους οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών μπορούν να παίξουν κάποιο ρόλο, είναι η ασφάλεια και η αξιοπιστία. Το υπάρχον σύστημα προστασίας χαρακτηρίζεται από ένα πολύ αποτελεσματικό πρωταρχικό πλάνο σε συνδυασμό με πολλά εφεδρικά. Έτσι είναι εξαιρετικά αξιόπιστο και σχεδόν όλα τα σφάλματα αντιμετωπίζονται επιτυχώς. Παρόλα αυτά, καθώς το σύστημα εξελίσσεται, βρέθηκε ότι κατά τη διάρκεια μεγάλων διαταραχών μπορεί να προκληθεί ακόμα και κατάρρευση του συστήματος. Οι μετρήσεις των PMU μπορούν να δώσουν λύση, βοηθώντας στη πρόβλεψη τέτοιων καταστάσεων.

Άλλη μια δημοφιλής καινοτομία στα σύγχρονα συστήματα προστασίας είναι η αυξανόμενη χρήση των Remedial Action Schemes (RAS), ή όπως έχουν τώρα μετονομαστεί System Integrity Protection Schemes (SIPS). Αυτά τα σχέδια χρησιμοποιούν μετρήσεις από μια ευρεία περιοχή ώστε να αναγνωριστούν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες πρέπει να γίνουν έκτακτες ενέργειες για την πρόληψη μεγάλων διαταραχών στο δίκτυο. Είναι γνωστό από τη θεωρία μας ότι κάτω από τέτοιες συνθήκες, αν ελαττωθούν τα φορτία του δικτύου τότε το σύστημα θα συνεχίσει να λειτουργεί ενώ αντίθετα αν τα φορτία συνεχίσουν να τροφοδοτούνται στη πλειονότητάς τους, τότε το σύστημα είναι πολύ πιθανό να οδηγηθεί σε μπλακάουτ. [7]

➤ **Καταγραφή Σφαλμάτων**

Οι μονάδες PMU μπορούν να παρέχουν κυματομορφές με συχνότητα 60Hz κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο δίκτυο, χρησιμοποιώντας ξεχωριστά κανάλια. Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει στο χειριστή μια γραφική αναπαράσταση πραγματικού χρόνου του συστήματος κατά τη διάρκεια σφαλμάτων, και επίσης επιτρέπει μεταβατικές αναλύσεις πραγματικού χρόνου. Οι μετρήσεις PMU μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον ακριβή καθορισμό της τοποθεσίας, του χρόνου και των συνεπειών κάθε σφάλματος που είναι δύσκολο να προσομοιωθεί, αποδεικνύοντας ότι οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν δεδομένα συγχρονισμένων μετρήσεων είναι πολύ σημαντικές για την ανάλυση του συστήματος κατά τη διάρκεια διαταραχών ^[11].



Σχήμα 3.18 Εφαρμογές των PMUs στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

3.10 Σύγκριση του συστήματος SCADA με τα PMUs

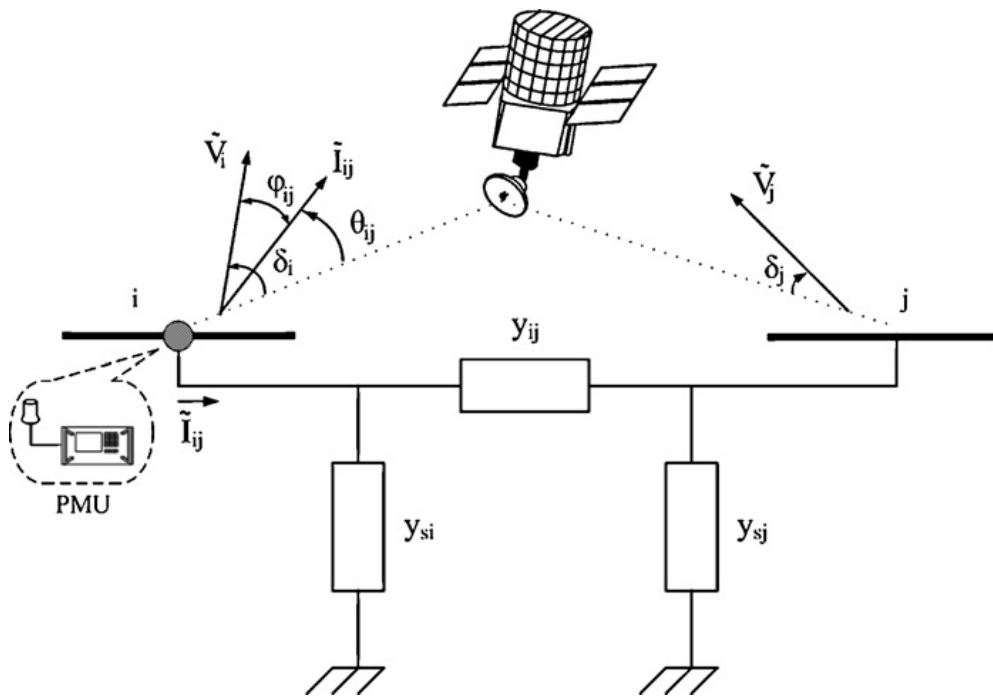
Στον παρακάτω πίνακα, γίνεται μια μικρή σύγκριση των ιδιοτήτων του συστήματος SCADA, με τις μονάδες PMU:

Attribute	SCADA	PMUs
Μετρήσεις	Αναλογικές	Ψηφιακές
Ανάλυση	2 ~ 4 δείγματα ανά δευτερόλεπτο	Έως 60 δείγματα το δευτερόλεπτο
Παρατηρησιμότητα	Μόνιμη Κατάσταση	Μόνιμη και Μεταβατική Κατάσταση
Εποπτεία	Τοπική	Ευρείας περιοχής
Μέτρηση φασικής γωνίας	Όχι	Ναι

Πίνακας 3.1 Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια μονάδα εγκατεστημένη σε ένα ζυγό, και μετράει τη τάση στο ζυγό αυτό καθώς και τα ρεύματα στους κλάδους που συνδέονται με αυτόν.

Για να κατασκευαστεί το μαθηματικό μοντέλο του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης, θα χρησιμοποιήσουμε εκ νέου το μοντέλο «Π» για να αναπαραστήσουμε τον κλάδο που συνδέει το ζυγό i που υπάρχει μονάδα PMU, με το ζυγό j χωρίς μονάδα PMU. Τα μοντέλο αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.20, όπου ορίζουμε την αντίσταση σειράς του κλάδου $i-j$ ως $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$, την εγκάρσια αντίσταση του ζυγού i ως $y_{si} = g_{si} + jb_{si}$, και με $\tilde{V}_i = V_i \angle \delta_i$ και $\tilde{V}_j = V_j \angle \delta_j$ τα διανύσματα τάσεως των ζυγών i και j αντίστοιχα.



Σχήμα 3.20 Αναπαράσταση τάσεων-ρευμάτων σε ένα κλάδο με το μοντέλο PMU.

Το ρεύμα \tilde{I}_{ij} είναι το ρεύμα που μετράει η μονάδα PMU και διαρρέει το κλάδο $i-j$ και διαιρείται σε δύο ρεύματα, τα \tilde{I}_{si} και \tilde{I}'_{ij} όπως φαίνεται στο σχήμα. Άρα ισχύει η σχέση:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_{si} + \tilde{I}'_{ij} \quad (3.26)$$

Τα δύο ρεύματα στο δεξί μέλος της εξίσωσης (3.24) μπορούν να γραφούν συναρτήσει των τάσεων των ζυγών και των χαρακτηριστικών της γραμμής όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_j * y_{si} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) * y_{ij} = \tilde{V}_i * (y_{si} + y_{ij}) - \tilde{V}_j * y_{ij} \quad (3.27)$$

Τα μιγαδικά μεγέθη μπορούν να γραφούν στις ακόλουθες μορφές:

$$\tilde{V}_i = V_i * \cos\delta_i + j * V_i * \sin\delta_i \quad (3.28)$$

$$\tilde{V}_j = V_j * \cos\delta_j + j * V_j * \sin\delta_j \quad (3.29)$$

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.30)$$

$$y_{si} = g_{si} + jb_{si} \quad (3.31)$$

Με αντικατάσταση λοιπόν των σχέσεων (3.28) ~ (3.31) στην εξίσωση (3.27) και κάνοντας τις πράξεις παίρνουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$\begin{aligned} \tilde{I}_{ij} = \{ & V_i * [(g_{ij} + g_{si}) * \cos\delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin\delta_i] - V_j \\ & * [g_{ij} * \cos\delta_j - b_{ij} * \sin\delta_j]\} + j \\ & * \{V_i * [(b_{ij} + b_{si}) * \cos\delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin\delta_i] - V_j \\ & * [b_{ij} * \cos\delta_j + g_{ij} * \sin\delta_j]\} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Η παραπάνω έκφραση είναι σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Στη παρούσα εργασία, ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται προϋποθέτει τις μετρήσεις ρευμάτων σε πολικές συντεταγμένες επομένως ισχύει:

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (3.33)$$

Επομένως το μέτρο του ρεύματος δίνεται από το τύπο:

$$I_{ij} = \sqrt{I_{ij,r}^2 + I_{ij,i}^2} \quad (3.34)$$

όπου

$$I_{ij,r} = V_i * [(g_{ij} + g_{si}) * \cos\delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin\delta_i] - V_j * [g_{ij} * \cos\delta_j - b_{ij} * \sin\delta_j] \quad (3.35)$$

$$I_{ij,i} = V_i * [(b_{ij} + b_{si}) * \cos\delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin\delta_i] - V_j * [b_{ij} * \cos\delta_j + g_{ij} * \sin\delta_j] \quad (3.36)$$

το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της εξίσωσης (3.32). Άρα:

$$I_{ij} = \sqrt{\left\{ \begin{array}{l} V_i * [(g_{ij} + g_{si}) * \cos\delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin\delta_i] - \\ V_j * [g_{ij} * \cos\delta_j - b_{ij} * \sin\delta_j] \end{array} \right\}^2 + \left\{ \begin{array}{l} V_i * [(b_{ij} + b_{si}) * \cos\delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin\delta_i] - \\ V_j * [b_{ij} * \cos\delta_j + g_{ij} * \sin\delta_j] \end{array} \right\}^2} \quad (3.37)$$

Η σχέση (3.35) μπορεί να απλοποιηθεί στην παρακάτω μορφή:

$$I_{ij} = \sqrt{\begin{array}{l} V_i^2 * [(g_{ij} + g_{si})^2 + (b_{ij} + b_{si})^2] + V_j^2 * (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) \\ -2 * V_i * V_j * \{ [g_{ij} * (g_{ij} + g_{si}) + b_{ij} * (b_{ij} + b_{si})] * \cos(\delta_i - \delta_j) \\ - [g_{ij} * (b_{ij} + b_{si}) - b_{ij} * (g_{ij} + g_{si})] * \sin(\delta_i - \delta_j) \} \end{array}} \quad (3.38)$$

Η παραπάνω εξίσωση γράφεται πιο απλουστευμένη ως εξής:

$$I_{ij} = \sqrt{A + B + C} \quad (3.39)$$

ή

$$I_{ij} = \sqrt{A_{ij} * V_i^2 + B_{ij} * V_j^2 + 2 * C_{ij} * V_i * V_j} \quad (3.40)$$

όπου

$$A_{ij} = [(g_{ij} + g_{si})^2 + (b_{ij} + b_{si})^2] \quad (3.41)$$

$$B_{ij} = (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) \quad (3.42)$$

$$C_{ij} = [(b_{ij} + b_{si}) * \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{si}) * \alpha_{ij}] \quad (3.43)$$

όπου α_{ij}, β_{ij} δίνονται από τους τύπους (2.36) και (2.37) του προηγούμενου κεφαλαίου.

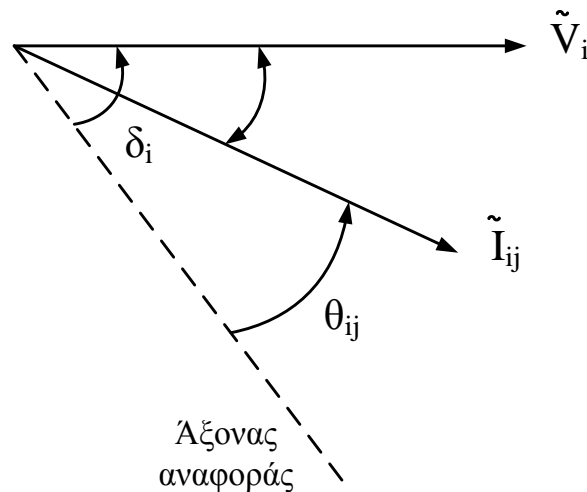
Ακόμα, η φάση του ρεύματος δίνεται από το τύπο:

$$\theta_{ij} = \arctan\left(\frac{I_{ij,i}}{I_{ij,r}}\right) \quad (3.44)$$

ή

$$\theta_{ij} = \arctan\left\{ \frac{V_i * [(b_{ij} + b_{si}) * \cos\delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin\delta_i] - V_j * [b_{ij} * \cos\delta_j + g_{ij} * \sin\delta_j]}{V_i * [(g_{ij} + g_{si}) * \cos\delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin\delta_i] - V_j * [g_{ij} * \cos\delta_j - b_{ij} * \sin\delta_j]} \right\} \quad (3.45)$$

Παραστατικά η παραπάνω γωνία φαίνεται στο σχήμα (3.21):



Σχήμα 3.21 Αναπαράσταση φασιθετών τάσης και ρεύματος

Για την περίπτωση των συγχρονισμένων μετρήσεων, όπως είναι λογικό, αλλάζει μορφή και η Ιακωβιανή μήτρα. Ουσιαστικά, τα στοιχεία της μήτρας H είναι πλέον οι μερικές παράγωγοι των μετρήσεων ρεύματος και τάσης προς τα στοιχεία του διανύσματος κατάστασης. Οι μετρήσεις ρευμάτων μπορούν να εκφραστούν είτε σε πολικές είτε σε καρτεσιανές συντεταγμένες, και η Ιακωβιανή μήτρα παίρνει τις παρακάτω μορφές ανά περίπτωση:

1. Ρεύματα σε καρτεσιανές συντεταγμένες

$$H_{rec} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Κάθε ένα από τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας δίνονται αναλυτικά παρακάτω:

➤ **Μερική παράγωγος μέτρου τάσεως ως προς το διάνυσμα κατάστασης:**

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (3.50)$$

➤ **Μερική παράγωγος γωνίας τάσεως ως προς το διάνυσμα κατάστασης:**

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} = 1 \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_i} = 0 \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_j} = 0 \quad (3.54)$$

➤ *Μερική παράγωγος πραγματικού μέρους ρεύματος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:*

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_i} = -V_i * [(b_{ij} + b_{si}) * \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin \delta_i] \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_j} = V_j * [b_{ij} * \cos \delta_j + g_{ij} * \sin \delta_j] \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_i} = (g_{ij} + g_{si}) * \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin \delta_i \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_j} = -g_{ij} * \cos \delta_j + b_{ij} * \sin \delta_j \quad (3.58)$$

➤ *Μερική παράγωγος φανταστικού μέρους ρεύματος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:*

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_i} = V_i * [(g_{ij} + g_{si}) * \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{si}) * \sin \delta_i] \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_j} = -V_j * [g_{ij} * \cos \delta_j - b_{ij} * \sin \delta_j] \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_i} = (b_{ij} + b_{si}) * \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{si}) * \sin \delta_i \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_j} = -b_{ij} * \cos \delta_j - g_{ij} * \sin \delta_j \quad (3.62)$$

2. Ρεύματα σε πολικές συντεταγμένες

$$H_{pol} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

Σε αυτή τη περίπτωση, οι εκφράσεις των μερικών παραγώγων είναι λίγο πιο πολύπλοκες επομένως ορίζουμε τις παρακάτω παραστάσεις που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια:

$$A_{ij} = (g_{ij} + g_{si})^2 + (b_{ij} + b_{si})^2 \quad (3.64)$$

$$B_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \quad (3.65)$$

$$C_{ij} = (b_{ij} + b_{si}) * \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{si}) * a_{ij} \quad (3.66)$$

$$D_{ij} = (b_{ij} + b_{si}) * a_{ij} + (g_{ij} + g_{si}) * \beta_{ij} \quad (3.67)$$

$$E_{ij} = A_{ij} * V_i^2 + B_{ij} * V_j^2 + 2 * C_{ij} * V_i * V_j \quad (3.68)$$

Οι μερικές παράγωγοι των γωνιών και μέτρων τάσεων παραμένουν ίδιες με τη προηγούμενη περίπτωση οπότε δίνονται παρακάτω αναλυτικά τα στοιχεία με τις μερικές παραγώγους ρευμάτων:

➤ *Μερική παράγωγος μέτρου ρεύματος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:*

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{D_{ij} * V_i * V_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{D_{ij} * V_i * V_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (3.70)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = \frac{A_{ij} * V_i + C_{ij} * V_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (3.71)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = \frac{C_{ij} * V_i + B_{ij} * V_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (3.72)$$

➤ *Μερική παράγωγος γωνίας ρεύματος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:*

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{A_{ij} * V_i^2 + C_{ij} * V_i * V_j}{E_{ij}} \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{B_{ij} * V_j^2 + C_{ij} * V_i * V_j}{E_{ij}} \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{D_{ij} * V_j}{E_{ij}} \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_j} = \frac{D_{ij} * V_i}{E_{ij}} \quad (3.76)$$

4. Εφαρμογή Κατάστασης

Εκτίμησης

4.1 Περιγραφή Προγράμματος

4.1.1 Εισαγωγή

Όπως είδαμε στα πρώτα κεφάλαια, η χρήση των μονάδων PMU στα δίκτυα για την εκτίμηση της κατάστασής τους είναι ολοένα και αυξανόμενη παγκοσμίως. Αυτό έχει οδηγήσει στην τροποποίηση του κλασσικού εκτιμητή ώστε αυτός να χρησιμοποιεί και τις συγχρονισμένες μετρήσεις. Έτσι, έχουν δημιουργηθεί πολλές παραλλαγές του εκτιμητή κατάστασης. Για παράδειγμα, υπάρχουν εκτιμητές δυο βημάτων που στο πρώτο βήμα χρησιμοποιούν τις συμβατικές μετρήσεις και στο δεύτερο παίρνουν το αποτέλεσμα του πρώτου και προσθέτουν τις μετρήσεις PMU για να εκτελέσουν εκ νέου τον εκτιμητή [14],[15], και εκτιμητές ενός βήματος όπου χρησιμοποιούνται συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις σε ένα βήμα για την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης [16].

Στη παρούσα εργασία, θα εξεταστεί ένα διαφορετικό είδος εκτιμητή κατάστασης, ο οποίος θα έχει σαν εισόδους τόσο συμβατικές όσο και συγχρονισμένες μετρήσεις, και θα εκτελείται σε δύο βήματα. Βασική του διαφορά από τους άλλους είναι ότι στο πρώτο βήμα έχουμε μόνο συγχρονισμένες μετρήσεις (μετρήσεις φασιθετών τάσης και φασιθετών ρεύματος) και μέσα από μια μη γραμμική διαδικασία γίνεται εκτίμηση μόνο των φασιθετών τάσης των ζυγών που ανήκουν σε νησίδες PMU και όχι όλου του διανύσματος κατάστασης. Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα του πρώτου βήματος εισάγεται σαν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας στο δεύτερο, και μαζί με τις συμβατικές μετρήσεις εκτελείται ο μη γραμμικός κλασσικός εκτιμητής κατάστασης που περιγράφηκε στη θεωρία σε παραπάνω ενότητα. Σκοπός αυτού του εγχειρήματος είναι να δείξουμε ότι αυτός ο εκτιμητής είναι το ίδιο αν όχι περισσότερο αποτελεσματικός από τους άλλους που υπάρχουν αυτή τη στιγμή.

Για τον εκτιμητή αυτόν, χρησιμοποιείται όλη η θεωρία που περιγράψαμε σε προηγούμενα κεφάλαια όπως η μέθοδος σταθμικών ελαχίστων τετραγώνων (WLS) για την εκτίμηση κατάστασης, η ανίχνευση και ο εντοπισμός σφαλμάτων με το τεστ τετραγώνων και τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα (LNR) αντίστοιχα, και οι περιορισμοί ισότητας (equality

constraints). Στη συνέχεια, θα αναλυθεί λεπτομερώς ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο υβριδικός εκτιμητής 2 βημάτων.

Εφόσον έχουμε υβριδικό εκτιμητή, οι μετρήσεις που θα έχουμε όπως αναφέρθηκε να είναι και από το σύστημα SCADA και από μονάδες PMU. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε μετρήσεις ροής ισχύος, έγχυσης ισχύος και μέτρου τάσης σαν συμβατικές μετρήσεις, και μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος σαν συγχρονισμένες μετρήσεις. Αυτά φαίνονται συνοπτικά και στο πίνακα 4.1. Να σημειωθεί εδώ ότι οι φασιθέτες ρεύματος είναι σε καρτεσιανή μορφή, ώστε να αποφεύγονται τυχόν απροσδιοριστίες κατά το σχηματισμό της Ιακωβιανής μήτρας, οι φασεθέτες τάσεως είναι σε πολική μορφή, ενώ και το διάνυσμα κατάστασης είναι σε πολικές συντεταγμένες.

Πίνακας 4.1 Κατηγορίες μετρήσεων και συμβολισμός

Κατηγορία μετρήσεων	Συμβολισμός
Ροή ενεργού ισχύος	P_{ij}
Ροή αέργου ισχύος	Q_{ij}
Έγχυση ενεργού ισχύος	P_i
Έγχυση αέργου ισχύος	Q_i
Μέτρο τάσης	V_i
Φασική γωνία τάσης	δ_i
Μέτρο ρεύματος	I_{ij}
Φασική γωνία ρεύματος	θ_{ij}

Σημειώνεται εδώ ότι ο υβριδικός εκτιμητής δέχεται σαν εισόδους δυο είδη μετρήσεων μέτρου τάσης, που μπορεί να είναι από το σύστημα SCADA σαν συμβατική μέτρηση μέτρου τάσης, ή από τις μονάδες PMU σαν συγχρονισμένη μέτρηση του μέτρου του φασιθέτη τάσης. Η διαφοροποίησή τους γίνεται με βάση την ακρίβεια που τους δίνεται από τα αρχεία μετρήσεων, καθώς όπως είναι λογικό η συγχρονισμένη μέτρηση έχει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια, κάτι που θα αναλυθεί και αργότερα.

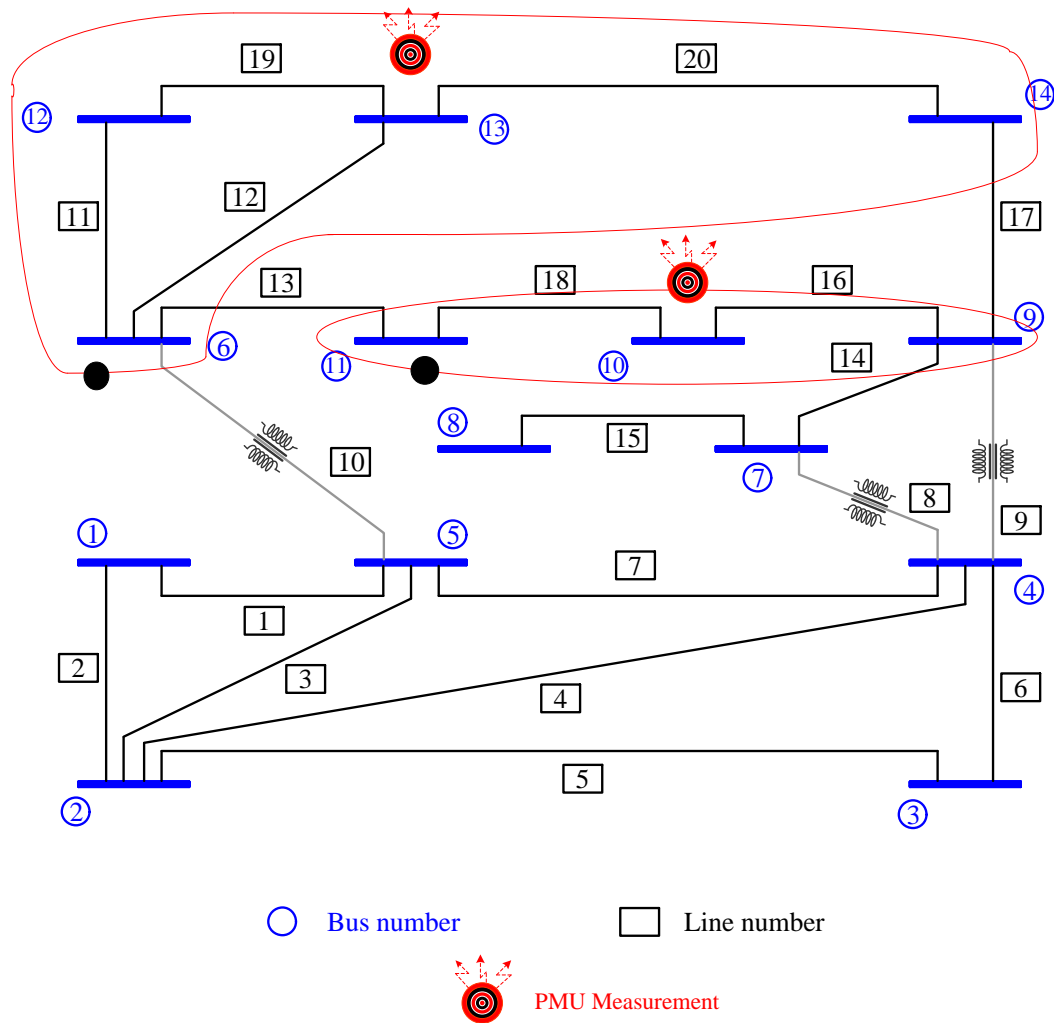
4.1.2 Περιγραφή θεωρίας του αλγορίθμου

Όπως είπαμε προηγουμένως, σε αυτή την εργασία δημιουργήθηκε ένα πρόγραμμα σε Matlab που υλοποιεί έναν υβριδικό εκτιμητή κατάστασης 2 βημάτων, με χρήση συμβατικών και συγχρονισμένων μετρήσεων. Στο πρώτο βήμα λοιπόν, το πρόγραμμα δέχεται σαν εισόδους τις συγχρονισμένες μετρήσεις μόνο, τις οποίες διαβάζει από το αντίστοιχο πεδίο του αρχείου μετρήσεων. Όσον αφορά τις μετρήσεις τάσεως, γίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ αυτών από το σύστημα SCADA και τα PMU με βάση τη στήλη fullscale του αρχείου μετρήσεων όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Επομένως, οι εισοδοί για το πρώτο βήμα είναι οι φασιθέτες ρεύματος και οι φασιθέτες τάσης από το σύστημα SCADA.

Στο βήμα αυτό, εκτιμώνται οι φασιθέτες τάσεως των ζυγών που ανήκουν στις νησίδες των PMU. Αυτό σημαίνει ότι ο αλγόριθμος κατάστασης εφαρμόζεται σε μερικά σημεία του δικτύου κι όχι σε όλο, και πιο συγκεκριμένα σε εκείνα που έχουν PMU. Εφαρμόζονται λοιπόν οι εξισώσεις που αναλύθηκαν στην ενότητα 3.11 και υπολογίζονται η Ιακωβιανή μήτρα από τη σχέση (3.46) και οι μερικοί παράγωγοι από τις σχέσεις (3.47) ~ (3.62). Σημειώνουμε εδώ ξανά, ότι οι μετρήσεις ρευμάτων είναι σε καρτεσιανές συντεταγμένες σε όλες τις επαναλήψεις του αλγορίθμου για να αποφύγουμε τυχόν απροσδιοριστίες κατά το σχηματισμό της Ιακωβιανής μήτρας. Το τελικό αποτέλεσμα αυτού του βήματος είναι ο υπολογισμός των φασιθετών τάσεως των ζυγών που έχουν εγκατεστημένες μονάδες PMU καθώς και όλων των ζυγών που συνδέονται με αυτούς, αφού έχουμε τις μετρήσεις ρεύματος των κλάδων που τους συνδέουν.

Σε αυτό το βήμα επίσης, γίνεται και ανίχνευση και εντοπισμός σφαλμάτων σύμφωνα με τη θεωρία που αναλύθηκε στο κεφαλαίο 2.4, η οποία εφαρμόζεται όμοια και σε συγχρονισμένες μετρήσεις.

Η θεωρία του αλγορίθμου για το πρώτο βήμα διαφοροποιείται κάπως όταν λαμβάνονται υπόψη και οι μετρήσεις μηδενικής εγχύσεως. Πλέον, οι νησίδες των ζυγών για τους οποίους γίνεται η εκτίμηση σχηματίζονται διαφορετικά. Συγκεκριμένα, εκτός από τους ζυγούς που έχουν μονάδες PMU ή συνδέονται με τέτοιους ζυγούς, εκτιμώνται και οι φασιθέτες τάσης των ζυγών μηδενικής έγχυσης που είναι εσωτερικοί σε τέτοιες νησίδες. Για να κατανοηθεί πλήρως αυτό, θα δούμε ένα παράδειγμα στο σύστημα των 14 ζυγών της IEEE.



Σχήμα 4.1 Σενάριο με νησίδες PMU και ζυγούς μηδενικής έγχυσης.

Έστω λοιπόν το παραπάνω σύστημα των 14 ζυγών, όπου έχουν εγκατασταθεί μονάδες PMU στους ζυγούς 10 και 13, ενώ οι ζυγοί 11 και 6 είναι ζυγοί μηδενικής έγχυσης. Όπως φαίνεται δημιουργούνται δύο παρατηρήσιμες νησίδες, η PMU#10 (9,10,11) και η PMU#13 (13,12,14,6). Οι κλάδοι 6-11 και 9-14 συνδέουν αυτές τις νησίδες. Οι τάσεις στα άκρα αυτών των κλάδων είναι έμμεσα γνωστές, από μετρήσεις ρεύματος των μονάδων PMU. Συγκεκριμένα, είναι γνωστά η τάση του ζυγού 13 και το ρεύμα στους κλάδους 13-6 και 13-14 από το PMU, επομένως υπολογίζονται οι τάσεις των ζυγών 6 και 14. Επίσης, είναι γνωστά η τάση του ζυγού 10 και το ρεύμα στους κλάδους 10-11 και 10-9 άρα υπολογίζονται και οι τάσεις των ζυγών 11 και 9.

Σύμφωνα με τη θεωρία μας, όταν έχουμε νησίδες οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με μια γραμμή και υπάρχει μέτρηση τάσης στο ένα από τα δύο άκρα της γραμμής, τότε οι νησίδες ενώνονται μεταξύ τους σε μια ισοδύναμη. Στο παράδειγμά μας, είναι γνωστές οι τάσεις σε όλα τα άκρα των κλάδων 6-11 και 9-14 επομένως, οι δυο νησίδες ενώνονται σε μια. Στη νέα ισοδύναμη νησίδα, ο ζυγός μηδενικής έγχυσης 11 είναι εσωτερικός, αφού οι ζυγοί με τους

οποίους συνδέονται ανήκουν όλοι στην νησίδα. Αντίθετα, ο ζυγός μηδενικής έγχυσης 6 δεν είναι εσωτερικός διότι συνδέεται με το ζυγό 5 που δεν ανήκει στη νησίδα. Για το πρώτο βήμα του προγράμματος λοιπόν, όσον αφορά το παραπάνω παράδειγμα, θα είχαμε σαν εισόδους τις μετρήσεις φασιθετών τάσεως των ζυγών 10 και 13, τις μετρήσεις φασιθετών ρεύματος στους κλάδους 13-6, 13-12,13-14 και 10-11,10-9 και τη μηδενική έγχυση ισχύος του ζυγού 11. Για την τελευταία μέτρηση, εφαρμόζεται η θεωρία των περιορισμών ισότητας που αναλύθηκε στην ενότητα 2.5. Σαν αποτέλεσμα του πρώτου βήματος, παίρνουμε τους φασιθέτες τάσης των ζυγών 6,9,10,11,12,13,14.

Στο δεύτερο βήμα του αλγορίθμου, γίνεται η κλασσική εκτίμηση κατάστασης που αναλύσαμε στην ενότητα 2.3 για συμβατικές μετρήσεις μόνο. Η διαφορά όμως είναι ότι οι φασιθέτες τάσεως που προέκυψαν από το πρώτο βήμα, εισάγονται σαν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας στο δεύτερο βήμα. Έτσι λοιπόν, για το δεύτερο βήμα έχουμε μετρήσεις ροής ισχύος, μετρήσεις έγχυσης ισχύος, μετρήσεις τάσεων (που μπορεί να είναι μικρής ακρίβειας αν προέρχονται από το σύστημα SCADA ή μεγάλης ακρίβειας αν είναι τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος) και μετρήσεις φασικής γωνίας τάσεων. Και σε αυτό το βήμα, εφαρμόζεται η ανίχνευση και ο εντοπισμός σφαλμάτων που αναλύθηκε, ενώ για όλους τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης είτε ανήκουν σε νησίδες PMU είτε όχι, (π.χ. ο ζυγός 6 αλλά και ο ζυγός 11 στο παράδειγμα που είδαμε παραπάνω) εφαρμόζεται και πάλι η θεωρία των περιορισμών ισότητας. Σε αυτό το βήμα λοιπόν, προκύπτουν οι φασιθέτες τάσεως όλων των ζυγών του συστήματος, με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο.

4.1.3 Αρχεία εισόδου

Το πρόγραμμα λαμβάνει τα δεδομένα του δικτύου και των μετρήσεων από δυο ξεχωριστά αρχεία, τα αρχεία συστήματος και τα αρχεία μετρήσεων. Επίσης, το πρόγραμμα περιέχει και μια ειδική συνάρτηση η οποία περιέχει ένα διάνυσμα παραμέτρων.

Το αρχείο συστήματος έχουν τυποποιημένα ονόματα “*case(N).m*” όπου N είναι κάθε φορά ο αριθμός των ζυγών του δικτύου (π.χ. *case14.m* για το σύστημα των 14 ζυγών). Το αρχείο αυτό είναι διαμορφωμένο κατά το μορφότυπο PTI (PTI format) και περιλαμβάνει όλα τα δεδομένα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως πληροφορίες για τους ζυγούς, τους κλάδους, τις γεννήτριες, τις γραμμές μεταφοράς, και τους μετασχηματιστές.

Τα αρχεία μετρήσεων είναι αρχεία διαμορφωμένα και αυτά κατά το μορφότυπο PTI και περιλαμβάνουν τις μετρήσεις που θα δοθούν σαν είσοδοι στην εκτίμηση κατάστασης. Όπως είπαμε και παραπάνω, το αρχείο μετρήσεων περιλαμβάνει και συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις. Τα αρχεία αυτά δε έχουν τις τιμές των μετρήσεων αλλά το είδος, την τοποθεσία, την ακρίβεια και το είδος σφάλματος της κάθε μιας. Οι τιμές των μετρήσεων δίνονται με βάση τα αποτελέσματα της ροής ισχύος.

Τέλος, στο πρόγραμμα όπως είπαμε, υπάρχει η συνάρτηση **“mpoptiom.m”** η οποία είναι ένα διάνυσμα όπου η τιμή κάθε στοιχείου καθορίζει και μία παράμετρο της εκτίμησης κατάστασης. Τέτοια παράμετρος μπορεί να είναι η τιμή που πρέπει να περάσουν τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα για να θεωρηθούν οι αντίστοιχες μετρήσεις εσφαλμένες, ή η μέθοδος παραγοντοποίησης της μήτρας κέρδους. Όλες οι παράμετροι έχουν μια αρχική τιμή εξ ορισμού. Το ακριβές μορφότυπο της παραπάνω συνάρτησης και των αρχείων εισόδου βρίσκεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

4.1.4 Περιγραφή αλγορίθμου – Κύριες συναρτήσεις

Το αλγόριθμος που προγραμματίστηκε σε περιβάλλον Matlab βασίστηκε στο πρόγραμμα **“Matpower 4.0”**, από το οποίο χρησιμοποιήθηκαν κάποιες συναρτήσεις και κυρίως αυτές που αφορούν τη ροή φορτίου, ενώ μερικές από αυτές τροποποιήθηκαν για τις ανάγκες της εκτίμησης κατάστασης. Οι συναρτήσεις αυτές θα αναφερθούν παρακάτω, καθώς και οι αλλαγές που έγιναν στο κώδικά τους. [13]

Το πρόγραμμα ξεκινάει με έλεγχο των παραμέτρων εισόδου. Καθορίζονται τα αρχεία συστήματος και μετρήσεων, το διάνυσμα παραμέτρων καθώς και επιλογές όσον αφορά την αποθήκευση των αποτελεσμάτων. Η συνάρτηση που εκτελεί τον αλγόριθμο εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα είναι η **“runse_2step_pol_eq.m”**. Όποια δεδομένα δεν δίνονται από το χρήστη, παίρνουν καθορισμένες τιμές από το πρόγραμμα. Επίσης, το πρόγραμμα ελέγχει αν πρέπει να τρέξει πρώτα τη ροή φορτίου για να πάρει τα αποτελέσματα που χρειάζεται, ή αν αυτά δίνονται απευθείας από το χρήστη. Τέλος, διαβάζονται και τα δεδομένα από το διάνυσμα παραμέτρων **“mpoptiom.m”** όπου καθορίζονται από το χρήστη οι παρακάτω επιλογές:

- Μέθοδος παραγοντοποίησης της μήτρας κέρδους.
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για να επιτευχθεί η σύγκλιση της εκτίμησης κατάστασης.
- Μέγιστος αριθμός εσφαλμένων μετρήσεων που ανιχνεύονται από τον αλγόριθμο.
- Εκτέλεση ή όχι της μεθόδου ανίχνευσης και εντοπισμού σφαλμάτων.
- Το κατώφλι ϵ που καθορίζει τον παρακάτω έλεγχο για σύγκλιση:

$$|x^{k+1}-x^k| \leq \epsilon$$

- Εφαρμογή της εκτίμησης κατάστασης WLS με equality constraints στο πρώτο ή στο δεύτερο βήμα, ή και στα δυο.

Έτσι, εκκινεί την επίλυση του αλγορίθμου με την συνάρτηση **“makeYbus.m”** ή οποία διαβάζει το αρχείο συστήματος και σχηματίζει τόσο την μήτρα αγωγιμοτήτων **Ybus** όσο και τη δυαδική της μορφή, που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα όπως θα δούμε για τον προσδιορισμό των κρίσιμων μετρήσεων. Επίσης, σχηματίζονται οι μήτρες **Yf** και **Yt** για τις οποίες ισχύουν

ότι η σχέση Yf^*V δίνει τα ρεύματα που εγχύονται στους ζυγούς “*from*”, και αντίστοιχα η σχέση Yt^*V τα ρεύματα που εγχύονται στους ζυγούς “*to*” (στο πρόγραμμα υπάρχει η σύμβαση ότι τα δυο άκρα ενός κλάδου χωρίζονται σε δυο είδη ζυγών, τους *from* και *to*, ανάλογα με το πώς ορίζεται η κατεύθυνση του φασιθέτη ρεύματος).

Το πρόγραμμα επίσης, λαμβάνει υπόψη του και το ενδεχόμενο οι ζυγοί του συστήματος να μην έχουν συνεχόμενη αρίθμηση, γεγονός που θα προξενούσε προβλήματα υπολογιστικής φύσης στον αλγόριθμο. Έτσι, υπάρχει το ζευγάρι συναρτήσεων “*ext2int.m*” και “*int2ext.m*” οι οποίες είναι υπεύθυνες για την μετατροπή από εξωτερική σε εσωτερική αρίθμηση των ζυγών και αντίστροφα, ώστε να μην στον αλγόριθμο ο κάθε ζυγός να έχει δικιά του αρίθμηση που να είναι συνεχόμενη, αλλά στο τέλος του αλγορίθμου, τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται με την αρίθμηση που είχαν από το αρχείο συστήματος.

Στη συνέχεια, εκτελείται η ροή φορτίου που είναι αλγόριθμος που πάρθηκε από το Matpower 4.0 και χρησιμοποιείται χωρίς τροποποίηση, επομένως δεν αναλύεται σε αυτή την εργασία. Τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου, όπως είδαμε και παραπάνω, μπορούν να δοθούν απευθείας στο πρόγραμμα (δηλαδή θα έχει εκτελεστεί η ροή φορτίου ξεχωριστά από το πρόγραμμα, και τα αποτελέσματα θα αποθηκεύονται σε αρχεία που θα εισάγονται στην εκτίμηση κατάστασης), ώστε να μειώνεται σημαντικά ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου, κάτι που είναι πολύ σημαντικό στην εκτέλεση για συστήματα άνω των 2000 ζυγών.

Ο υβριδικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τη θεωρία που αναλύσαμε παραπάνω για τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης. Επομένως υπάρχει μια συνάρτηση “*findzeroinjbus.m*” η οποία διαβάζει και αυτή το αρχείο συστήματος και υπολογίζει ποιοι ζυγοί δεν έχουν παραγωγή και κατανάλωση ισχύος ώστε να σχηματιστούν αργότερα οι περιορισμοί ισότητας και να λυθεί η μέθοδος WLS με equality constraints. Η συνάρτηση αυτή λοιπόν επιστρέφει ένα διάνυσμα με τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος του δικτύου.

Στη συνέχεια έχουμε το πρώτο βήμα του αλγορίθμου, το οποίο εκτελείται από τη συνάρτηση “*state_est_pol_step1_eq.m*”. Αρχικά, η συνάρτηση “*ses2matp_ulti.m*” είναι αυτή που διαβάζει το αρχείο μετρήσεων και δίνει σαν εισόδους στον αλγόριθμο τις μετρήσεις που θα χρησιμοποιήσει για την εκτίμηση κατάστασης. Όπως είπαμε και προηγουμένως, στο πρώτο βήμα γίνεται εκτίμηση των φασιθετών τάσεως των ζυγών που ανήκουν σε νησίδες των PMU. Αν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης, επειδή στο πρώτο βήμα υπάρχουν λίγες παρατηρήσιμες νησίδες και προφανώς το δίκτυο δεν είναι πλήρως παρατηρήσιμο μόνο με τα PMU, οι ζυγοί αυτοί μεταχειρίζονται διαφορετικά. Για την ακρίβεια, η μέθοδος WLS με equality constraints εφαρμόζεται μόνο για τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης, των οποίων όλοι οι γειτονικοί τους ζυγοί, καθώς και οι ίδιοι φυσικά, ανήκουν σε νησίδες των PMU όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη ενότητα. Οι υπόλοιποι ζυγοί που δεν ανήκουν σε τέτοιες νησίδες, λαμβάνονται υπόψη στο δεύτερο βήμα. Αυτός ο διαχωρισμός γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης “*zero_inj_border.m*” η οποία βρίσκει τις νησίδες των ζυγών μηδενικής έγχυσης ισχύος και ελέγχει αν αυτές είναι εσωτερικές σε νησίδες PMU.

Το πρόγραμμα έχει δημιουργηθεί ώστε να είναι αρκετά φιλικό με το χρήστη. Για αυτό το λόγο έχει προγραμματιστεί μια διαδικασία κατά την οποία όλες οι μετρήσεις που εισάγονται,

αντιπροσωπεύονται από μια συμβολοσειρά που δηλώνει τι μέτρηση είναι η κάθε μια, π.χ. για τη μέτρηση έγχυσης ισχύος στο ζυγό 2 δίνεται η συμβολοσειρά *Pinj2* η οποία και εκτυπώνεται στο χρήστη για να τον ενημερώσει αν αυτή είναι εσφαλμένη ή κρίσιμη μέτρηση κ.α. Αυτή η διαδικασία υλοποιείται από τη συνάρτηση **“name_meas_2step.m”** που διαβάζει το αρχείο μετρήσεων και δημιουργεί τη κατάλληλη συμβολοσειρά ανάλογα με το πεδίο του αρχείου που ανήκει η κάθε μέτρηση, και ανάλογα με τους ζυγούς που σχετίζεται.

Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι πίνακες που θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση της μεθόδου WLS. Αρχικά υπολογίζονται οι μερικές παράγωγοι των συγχρονισμένων μετρήσεων ως προς το διάνυσμα κατάστασης μέσω της συνάρτησης **“dlbr_dV.m”** που υπάρχει ήδη στο πρόγραμμα Matpower 4.0 και δεν έχει τροποποιηθεί. Επίσης, δημιουργούνται τα διανύσματα των τιμών των μετρήσεων και των εκτιμώμενων μετρήσεων, σύμφωνα πάντα με τη θεωρία που περιγράφηκε στην ενότητα 2.3, καθώς και η μήτρα διασποράς *R*.

Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τον παρακάτω τύπο για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης σ_i της *i*-οστής μέτρησης με τιμή *A*:

$$\sigma_i = \frac{0.02 * |A|}{fullscale} + 0.0001 \quad (4.1)$$

όπου η τιμή *fullscale* αντιστοιχεί στην ακρίβεια της μέτρησης που δίνεται από το αρχείο μετρήσεων (συνήθως 1 για συμβατικές μετρήσεις και 100 για τις συγχρονισμένες). Μέσω αυτών των τιμών, σχηματίζεται η μήτρα διασποράς των μετρήσεων *R*, που είναι διαγώνια και έχει σαν στοιχεία τα σ_{ii}^2 , όπως έχουμε πει και στη θεωρία. Επίσης, το είδος σφάλματος της κάθε μέτρησης, υπάρχει σαν παράμετρος στο αρχείο μετρήσεων και καθορίζεται από τη στήλη *SNM* του αρχείου. Το πιο σύνηθες είδος σφάλματος, το οποίο είναι και προκαθορισμένο στο πρόγραμμα που υλοποιήθηκε, είναι ο γκαουσιανός θόρυβος. Οποιοδήποτε είδος σφάλματος υλοποιείται από τη συνάρτηση **“err_snm.m”** η οποία διαβάζει τη στήλη *SNM* από το αρχείο μετρήσεων και ανάλογα την τιμή του κάθε στοιχείου προσθέτει το εκάστοτε σφάλμα στην αντίστοιχη μέτρηση. Οι τιμές της στήλης *SNM* και το τι σφάλμα καθορίζει η κάθε μια βρίσκονται αναλυτικά στο παράρτημα της εργασίας. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει ένα διάνυσμα με το σφάλμα της κάθε μέτρησης, το οποίο προστίθεται στο διάνυσμα μετρήσεων.

Ένα σημαντικό κομμάτι του προγράμματος είναι η εύρεση των κρίσιμων μετρήσεων, και το υλοποιεί η συνάρτηση **“find_critical_measurements.m”**. Υπάρχουν μετρήσεις στο δίκτυο των οποίων η αφαίρεση τους ως εσφαλμένες θα οδηγούσε το σύστημα σε μη παρατηρησιμότητα και επομένως η επίλυση της εκτίμησης κατάστασης θα ήταν αδύνατη. Αυτή η συνάρτηση εντοπίζει αυτές τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την δυαδική μορφή της μήτρας αγωγιμοτήτων, και τις εξαιρεί από την διαδικασία ανίχνευσης και εντοπισμού σφαλμάτων. Το

αποτέλεσμα αυτής της συνάρτησης είναι ο σχηματισμός δυο διανυσμάτων, το ένα περιέχει τις κρίσιμες μετρήσεις και το άλλο τις υπόλοιπες.

Ακόμη, πρέπει να τονίσουμε ότι ενώ το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη καρτεσιανή μορφή των μετρήσεων ρευμάτων, τα αρχεία μετρήσεων έχει το σφάλμα κάθε μέτρησης σε πολική μορφή, δηλαδή εισάγει σφάλμα στη μέτρηση είτε του μέτρου ρεύματος είτε της φασικής γωνίας του. Επομένως, γίνονται κάποιοι μετασχηματισμοί από πολική σε καρτεσιανή μορφή και αντίστροφα ώστε να εισαχθεί το σωστό σφάλμα στη κατάλληλη μορφή.

Σχηματίζοντας λοιπόν όλα τα δεδομένα που θα χρειαστούν για την επίλυση της εκτίμησης κατάστασης, αρχίζει η εκτέλεση της μεθόδου WLS. Υπολογίζονται οι Ιακωβιανές μήτρες Y και C μέσω των συναρτήσεων "*dlbr_dV.m*" και "*dlbus_dV.m*" που υπολογίζουν τις μερικές παραγώγους των ρευμάτων ως προς το διάνυσμα κατάστασης, καθώς και η μήτρα κέρδους G και επιλύεται το σύστημα εξισώσεων που περιγράφεται από την επαναληπτική διαδικασία της σχέσης (2.78) και φαίνεται στη συνέχεια:

$$\begin{pmatrix} G(x^k) & C^T(x^k) \\ C(x^k) & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x^{k+1} - x^k \\ \lambda^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H^T(x^k) * R^{-1} * (z - h(x^k)) \\ -c(x^k) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Στη περίπτωση που ο χρήστης δεν επιλέξει τη μέθοδο WLS με equality constraints, επιλύεται η επαναληπτική διαδικασία της σχέσης (2.26).

Όπως είναι λογικό, αφού έχουμε νησίδες παρατηρησιμότητας και το σύστημα δεν είναι πλήρως παρατηρήσιμο, ο υπολογισμός της $G(x)$ θα δημιουργούσε υπολογιστικά προβλήματα κατά την αντιστροφή της λόγω των μηδενικών στηλών που θα προέκυπταν από την σχέση $H^T * R^{-1} * H$. Αυτό αντιμετωπίζεται από το πρόγραμμα με εντοπισμό των μηδενικών στηλών, και μετατροπή των στοιχείων τους που είναι στη διαγώνιο από 0 σε 1. Έτσι επιτυγχάνεται η αντιστροφή και σχηματίζεται η μήτρα κέρδους. Έτσι, επιλύεται το σύστημα με την μέθοδο παραγοντοποίησης της μήτρας κέρδους που ο χρήστης επέλεξε και ελέγχεται εάν έχουμε σύγκλιση. Αν όχι, όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 2.7 ώσπου να επιτευχθεί σύγκλιση ή να γίνει ο μέγιστος αριθμός προσπαθειών για σύγκλιση που καθορίζεται όπως είδαμε από το διάνυσμα παραμέτρων.

Μετά γίνεται η ανίχνευση και ο εντοπισμός σφαλμάτων σύμφωνα με τις μεθόδους που αναλύσαμε στη θεωρία, υπολογίζονται τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα αφαιρείται η εσφαλμένη μέτρηση αν υπάρχει και επαναλαμβάνεται όλη η διαδικασία εκτίμησης κατάστασης από την αρχή χωρίς αυτή τη μέτρηση, με αρχικοποιημένο το διάνυσμα κατάστασης x^0 . Σημειώνεται ότι τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των κρίσιμων μετρήσεων εξαιρούνται από τη διαδικασία ανίχνευσης, ενώ για το σχηματισμό της μήτρας διασποράς υπολοίπων συνυπολογίζεται και η Ιακωβιανή μήτρα C .

Εάν δε βρεθεί εσφαλμένη μέτρηση, το πρώτο βήμα τερματίζεται και επιστρέφει τους φασιθέτες τάσεως όλων των ζυγών που ανήκουν στις νησίδες PMU. Επίσης, το πρώτο βήμα

μπορεί να τερματιστεί όταν ανιχνευθεί ο μέγιστος αριθμός εσφαλμένων μετρήσεων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι μήτρες αποθηκεύονται στην αραιή τους μορφή για εξοικονόμηση και χρόνου, ενώ ειδικά ο υπολογισμός της μήτρας διασποράς των υπολοίπων γίνεται με υπολογισμό ενός στοιχείου κάθε φορά και αποθήκευση μόνο των μη μηδενικών στοιχείων.

Στο δεύτερο βήμα όπως είπαμε, υπάρχουν μόνο οι συμβατικές μετρήσεις από το σύστημα SCADA καθώς και τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος, δηλαδή τα μέτρα τάσης και οι φασικές γωνίες τάσεων των ζυγών που ανήκουν στις νησίδες PMU, που εισέρχονται σαν μετρήσεις υψηλής ακρίβειας (fullscale ίσο με 100). Η διαδικασία και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται είναι ακριβώς οι ίδιες με το πρώτο βήμα, με τη διαφορά βέβαια ότι οι Ιακωβιανές μήτρες σχηματίζονται με συμβατικές μετρήσεις πλέον, επομένως χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις *“dSbus_dV.m”* και *“dSbr_dV.m”* οι οποίες υπολογίζουν τις μερικές παραγώγους όλων των ειδών συμβατικών μετρήσεων ως προς το διάνυσμα κατάστασης. Η συνάρτηση *“check_observability.m”* ελέγχει την παρατηρησιμότητα του συστήματος με βάση τον αριθμό των ανεξάρτητων στηλών του πίνακα που προκύπτει από την πρόσθεση όλων των γραμμών των 2 Ιακωβιανών μητρών H και C ως εξής:

$$\text{rank} \begin{pmatrix} H \\ C \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Αυτό φυσικά γίνεται μόνο όταν εφαρμόζεται η μέθοδος με equality constraints, διαφορετικά ελέγχονται μόνο οι στήλες της H.

Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε ότι για την διαδικασία της ανίχνευσης και του εντοπισμού σφαλμάτων, όταν υπάρχουν ζυγοί μηδενικής έγχυσης και επιλύεται η μέθοδος WLS με equality constraints, δε χρησιμοποιείται η κλασσική μήτρα κέρδους G, αλλά η μήτρα από το αριστερό μέλος της σχέσης (4.2):

$$F = \begin{pmatrix} G(x^k) & C^T(x^k) \\ C(x^k) & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Η παραπάνω μήτρα αντιστρέφεται, και ως μήτρα κέρδους χρησιμοποιείται το πάνω αριστερά στοιχείο της F, που έχει διαστάσεις ίδιες με της G. Αυτό γίνεται για να συμπεριληφθούν στην ανίχνευση σφαλμάτων και οι μετρήσεις έγχυσης των ζυγών μηδενικής εγχύσεως, καθώς όπως είδαμε στη θεωρία, οι εξισώσεις που αντιστοιχούν σε μηδενικές εγχύσεις βρίσκονται στη μήτρα C και όχι στην H.

Τέλος, θα πρέπει να πούμε ότι τα δυο βήματα χρονομετρούνται με κάποιες συγκεκριμένες συναρτήσεις της Matlab, ενώ το πρόγραμμα έχει υλοποιηθεί ώστε να γίνονται όλες οι διαδικασίες σε όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο, διότι μπορεί να εφαρμοσθεί και σε

συστήματα με πάνω από 2000 ζυγούς. Αναλυτικός σχολιασμός όλου του κώδικα υπάρχει στο πρόγραμμα που συνοδεύει την εργασία.

4.2 Σενάρια Εκτέλεσης Αλγορίθμου

Το πρόγραμμα που περιγράφεται στις προηγούμενες ενότητες εκτελέστηκε για ένα σενάριο μετρήσεων στο δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE και για ένα σενάριο στο δίκτυο των 2383 ζυγών της IEEE, ώστε να ελεγχθεί η αποδοτικότητα του υβριδικού αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης 2 βημάτων που αναλύθηκε στη θεωρία. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε και εκτελέστηκε σε περιβάλλον Matlab 7.10.0.499 – R2010a και σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel Core i5-2410M στα 2.3GHz και με μνήμη RAM 3GB. Επίσης, όλα τα σενάρια εκτελέστηκαν με τις εξής επιλογές του διανύσματος παραμέτρων “*mpropt.m*”:

- Για την εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (WLS). *mpropt(117) = 1*
- Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για να επιτευχθεί σύγκλιση ήταν 100. *mpropt(118) = 100*
- Το όριο ανοχής ϵ της σχέσης (2.28) τίθεται ίσο με 10^{-3} . *mpropt(122) = 0.001*

Τέλος, η αρχική τιμή του διανύσματος κατάστασης \mathbf{x}^0 περιείχε τις τιμές $\delta_i = 0$ και $V_i = 1$ (FLAT START), ενώ οι μέθοδοι κανονικοποιημένων υπολοίπων και περιορισμών ισότητας εφαρμόζονται σε κάποια σενάρια ενώ σε άλλα όχι ώστε να εξετάσουμε αν όντως βελτιώνουν το αποτέλεσμα του αλγορίθμου.

Η λογική με την οποία εκτελέστηκε το κάθε σενάριο είναι η παρακάτω:

Αρχικά, τοποθετήθηκαν στο δίκτυο σε τυχαίους ζυγούς (που όμως συνδέονταν με 4 κλάδους κυρίως) μικρός αριθμός μονάδων PMU. Έτσι υπήρχαν μετρήσεις ρεύματος σε όλους τους κλάδους των ζυγών αυτών, ενώ για όλους τους υπόλοιπους κλάδους είχαμε μετρήσεις ροών ισχύος. Τέλος, είχαμε μετρήσεις εγχύσεως ισχύος σε όλους τους ζυγούς μηδενικής έγχυσης του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίναμε οριακή περίσσεια των μετρήσεων, παρόλα αυτά όμως το δίκτυο είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Όπως έχουμε δει στη θεωρία, η περίσσεια (redundancy) των μετρήσεων δίνεται από τη σχέση:

$$r = \frac{m}{n} \quad (4.5)$$

όπου m το πλήθος των μετρήσεων και n το πλήθος των μεταβλητών του διάνυσματος κατάστασης, για το οποίο ισχύει ότι $n = 2N$ όπου N ο αριθμός των ζυγών του δικτύου. Έτσι, με αυτές τις μετρήσεις εκτελείται ο υβριδικός αλγόριθμος και παίρνουμε το τελικό διάνυσμα κατάστασης, το οποίο και συγκρίνουμε με το αποτέλεσμα της ροής φορτίου για το συγκεκριμένο δίκτυο.

Στη συνέχεια, παίρνουμε το ίδιο αρχείο μετρήσεων και όλες τις μετρήσεις ρεύματος τις αντικαθιστούμε με μετρήσεις ροών ισχύος για τους ίδιους κλάδους, ενώ αφαιρούμε τις μονάδες PMU που υπήρχαν ήδη στο δίκτυο. Έτσι έχουμε ένα πλήρως παρατηρήσιμο δίκτυο μόνο με συμβατικές μετρήσεις, οπότε τοποθετούμε εκ νέου μονάδες PMU τυχαία σε διαφορετικούς ζυγούς με αυτούς προηγουμένως, ώστε να αυξήσουμε την περίσσεια των μετρήσεων. Με το καινούριο αρχείο μετρήσεων εκτελείται ξανά ο υβριδικός αλγόριθμος ώστε να δούμε αν βελτιώνεται το αποτέλεσμα σε σχέση με το προηγούμενο σύνολο μετρήσεων. Επίσης, δημιουργούμε ένα τρίτο αρχείο μετρήσεων όμοιο με το προηγούμενο, στο οποίο όμως εκτός από συγχρονισμένες μετρήσεις τάσεως έχει και συμβατικές μετρήσεις τάσεως στους ζυγούς που υπήρχαν μονάδες PMU στο αρχικό αρχείο μετρήσεων. Έτσι εκτελούμε ξανά τον υβριδικό αλγόριθμο ώστε να δούμε την επίδραση των συμβατικών μετρήσεων τάσεως.

Άρα λοιπόν για κάθε σενάριο έχουμε αρχικά 3 αρχεία μετρήσεων, ένα με μικρή περίσσεια και ένα ζευγάρι αρχείων με μεγαλύτερη περίσσεια μετρήσεων, όπου η μοναδική διαφορά μεταξύ τους είναι ότι το ένα αρχείο έχει συμβατικές μετρήσεις τάσεως ενώ το άλλο όχι. Στη συνέχεια, με την ίδια ακριβώς λογική δημιουργούμε άλλα δύο ζευγάρια αρχείων μετρήσεων προσθέτοντας ολοένα και παραπάνω μονάδες PMU ώστε να δούμε κατά πόσο βελτιώνεται το αποτέλεσμα με την αύξηση των συγχρονισμένων μετρήσεων. Τελικώς, εκτελούμε τον υβριδικό εκτιμητή κατάστασης για 7 αρχεία μετρήσεων σε κάθε σενάριο και εξετάζουμε εάν και κατά πόσο βελτιώνεται το αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση.

Για να δούμε ποσοτικά αν και κατά πόσο βελτιώνεται το αποτέλεσμα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης, στο τέλος του προγράμματος για κάθε αρχείο μετρήσεων υπολογίζονται κάποιοι δείκτες ακρίβειας από τους οποίους φαίνεται πόσο αποκλίνει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης από το πραγματικό (αυτό που προκύπτει από τη ροή φορτίου). Ο πρώτος δείκτης ακρίβειας είναι τα δύο παρακάτω αθροίσματα (ένα για τα μέτρα και ένα για τις φασικές γωνίες τάσης):

$$E_{ang} = \sum_1^N (\delta_{i,est} - \delta_{i,pf})^2 \quad (4.6)$$

$$E_{mag} = \sum_1^N (V_{i,est} - V_{i,pf})^2 \quad (4.7)$$

όπου $\delta_{i,est}$: φασική γωνία ζυγού i του εκτιμώμενου διανύσματος κατάστασης
 $\delta_{i,pf}$: φασική γωνία ζυγού i του πραγματικού διανύσματος κατάστασης
 $V_{i,est}$: μέτρο τάσης ζυγού i του εκτιμώμενου διανύσματος κατάστασης
 $V_{i,pf}$: μέτρο τάσης ζυγού i του πραγματικού διανύσματος κατάστασης

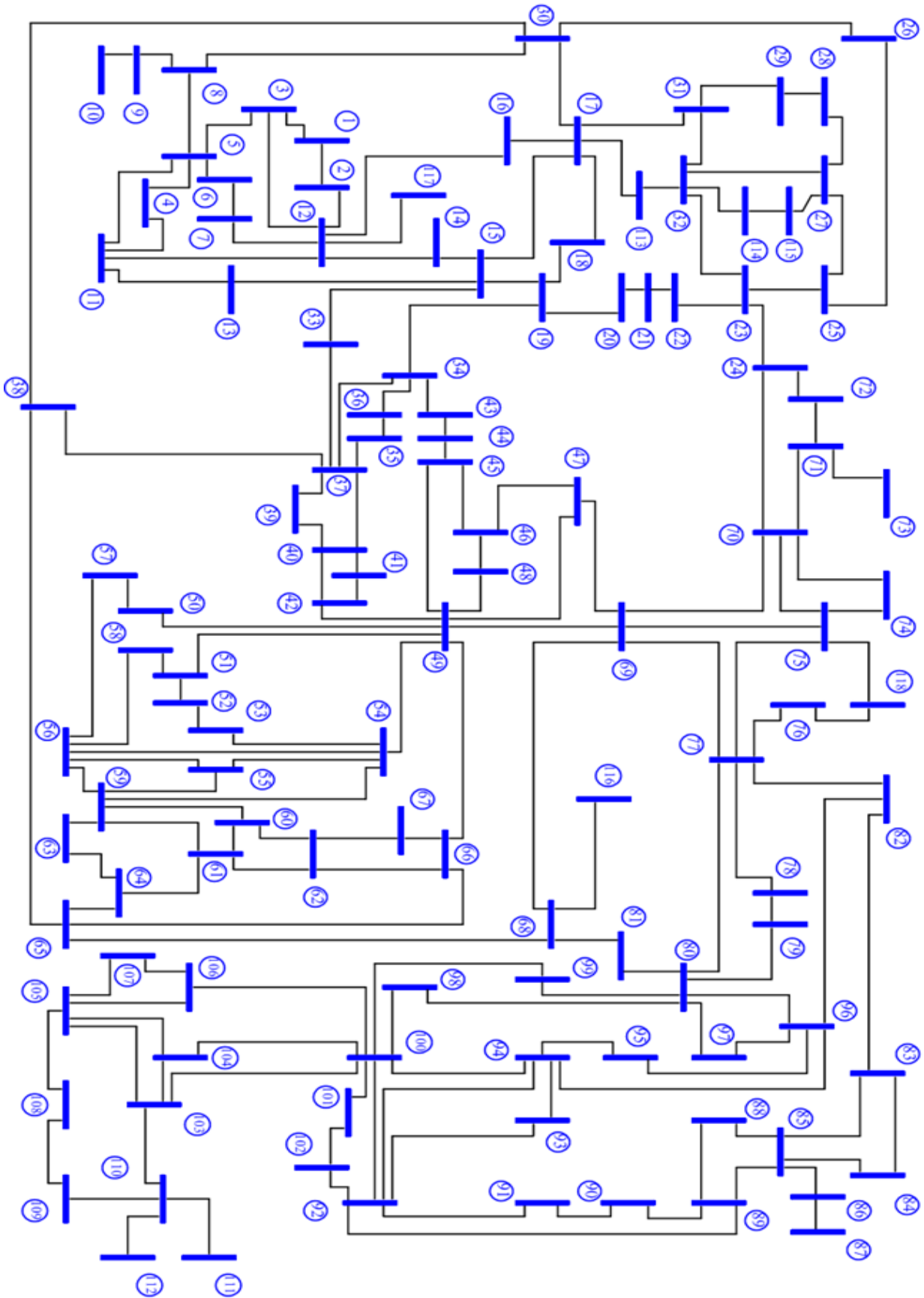
Επιπλέον υπολογίζεται και ένα πρόσθετο μέτρο ακρίβειας, το κανονικοποιημένο σφάλμα, το οποίο είναι ουσιαστικά το σχετικό σφάλμα του διανύσματος κατάστασης ως προς το πραγματικό διάνυσμα υπολογισμένο με την ευκλείδια νόρμα. Το σφάλμα αυτό δίνεται ξεχωριστά για τα μέτρα και τις φασικές γωνίες από τις παρακάτω σχέσεις:

$$NE_{ang} = \left(\frac{\sqrt{\sum_1^N (\delta_{i,est} - \delta_{i,pf})^2}}{\sqrt{\sum_1^N (\delta_{i,pf})^2}} \right) * 100\% \quad (4.8)$$

$$NE_{mag} = \left(\frac{\sqrt{\sum_1^N (V_{i,est} - V_{i,pf})^2}}{\sqrt{\sum_1^N (V_{i,pf})^2}} \right) * 100\% \quad (4.9)$$

4.2.1 Δίκτυο 118 ζυγών IEEE

Το διάγραμμα του δικτύου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.2 Δίκτυο 118 ζυγών IEEE

➤ Σενάριο 1^ο για τους 118 ζυγούς IEEE

Για το πρώτο σενάριο του δικτύου των 118 ζυγών, τοποθετούνται 5 μονάδες PMU, επομένως το 1^ο αρχείο μετρήσεων περιλαμβάνει τις παρακάτω συγχρονισμένες μετρήσεις:

Πίνακας 4.2 Συγχρονισμένες μετρήσεις σεναρίου 1A

Κατηγορία μετρήσεων	Μετρήσεις
Μέτρα τάσης	$V_{11}, V_{19}, V_{42}, V_{62}, V_{103}$
Φασικές γωνίες τάσης	$\delta_{11}, \delta_{19}, \delta_{42}, \delta_{62}, \delta_{103}$
Μέτρα ρεύματος	$I_{11-4}, I_{11-5}, I_{11-12}, I_{11-13}, I_{19-18}, I_{19-20}, I_{19-15}, I_{19-34}, I_{42-40}, I_{42-41}, I_{42-49}, I_{42-49}, I_{62-60}, I_{62-61}, I_{62-66}, I_{62-67}, I_{103-100}, I_{103-104}, I_{103-105}, I_{103-110}$
Φασικές γωνίες ρεύματος	$\theta_{11-4}, \theta_{11-5}, \theta_{11-12}, \theta_{11-13}, \theta_{19-18}, \theta_{19-20}, \theta_{19-15}, \theta_{19-34}, \theta_{42-40}, \theta_{42-41}, \theta_{42-49}, \theta_{42-49}, \theta_{62-60}, \theta_{62-61}, \theta_{62-66}, \theta_{62-67}, \theta_{103-100}, \theta_{103-104}, \theta_{103-105}, \theta_{103-110}$

Εκτός από τις παραπάνω μετρήσεις, όπως είπαμε έχουμε και συμβατικές μετρήσεις στο υπόλοιπο δίκτυο σε όλους τους κλάδους εκτός από αυτούς που συνδέονται με ζυγό που έχει εγκατεστημένο PMU. Αυτές οι μετρήσεις θα περιλαμβάνονται και στα 7 αρχεία μετρήσεων για το πρώτο σενάριο, και είναι οι εξής:

Πίνακας 4.3 Συμβατικές μετρήσεις σεναρίου 1A

Κατηγορία μετρήσεων	Μετρήσεις
Ενεργές ροές ισχύος	$P_{1-2}, P_{1-3}, P_{2-12}, P_{3-5}, P_{3-12}, P_{4-5}, P_{5-6}, P_{6-7}, P_{7-12}, P_{8-5}, P_{8-9}, P_{8-30}, P_{9-10}, P_{12-14}, P_{12-16}, P_{12-117}, P_{13-15}, P_{14-15}, P_{15-17}, P_{15-33}, P_{16-17}, P_{17-18}, P_{17-31}, P_{17-113}, P_{20-21}, P_{21-22}, P_{22-23}, P_{23-24}, P_{23-25}, P_{23-32}, P_{24-70}, P_{24-72}, P_{25-27}, P_{26-25}, P_{26-30}, P_{27-28}, P_{27-32}, P_{27-115}, P_{28-29}, P_{29-31}, P_{30-17}, P_{30-38}, P_{31-32}, P_{32-113}, P_{32-114}, P_{33-37}, P_{34-36}, P_{34-37}, P_{34-43}, P_{35-36}, P_{35-37}, P_{37-39}, P_{37-40}, P_{38-37}, P_{38-65}, P_{39-40}, P_{40-41}, P_{43-44}, P_{44-45}, P_{45-46}, P_{45-49}, P_{46-47}, P_{46-48}, P_{47-49}, P_{47-69}, P_{48-49}, P_{49-50}, P_{49-51}, P_{49-54}, P_{49-54}, P_{49-54}, P_{49-66}, P_{49-66}, P_{49-69}, P_{50-57}, P_{51-52}, P_{51-58}, P_{52-53}, P_{53-54}, P_{54-55}, P_{54-56}, P_{54-59}, P_{55-56}, P_{55-59}, P_{56-57}, P_{56-58}, P_{56-59}, P_{56-59}, P_{59-60}, P_{59-61}, P_{60-61}, P_{63-59}, P_{63-64}, P_{64-61}, P_{64-65}, P_{65-}$

	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 ₇₇₋₈₀ , 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 ₈₉₋₉₀ , P ₈₉₋₉₂ , 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
Άεργες ροές ισχύος	Q ₁₋₂ , Q ₁₋₃ , Q ₂₋₁₂ , Q ₃₋₅ , 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 ₂₃₋₃₂ , 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 ₄₉₋₅₄ , Q ₄₉₋₆₆ , 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 ₅₅₋₅₆ , Q ₅₅₋₅₉ , Q ₅₆₋₅₇ , Q ₅₆₋₅₈ , Q ₅₆₋₅₉ , 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 ₈₉₋₉₀ , Q ₈₉₋₉₂ , 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
Ενεργές εγχύσεις ισχύος	P ₅
Άεργες εγχύσεις ισχύος	Q ₅

Στο πρώτο σενάριο λοιπόν, με δεδομένο ότι το πλήθος των μεταβλητών του διανύσματος κατάστασης είναι $2*118=236$, η περίσσεια των μετρήσεων είναι $r = 384/236=1.627$. Εδώ να πούμε ότι η περίσσεια υπολογίζεται σε όλα τα αρχεία μετρήσεων με βάση τις μετρήσεις που υπάρχουν μόνο στο δεύτερο βήμα του υβριδικού αλγορίθμου.

Για το δεύτερο αρχείο μετρήσεων, όλες οι μετρήσεις ρεύματος του πίνακα 4.2 γίνονται συμβατικές μετρήσεις ροής ισχύος και προσθέτονται στις συμβατικές μετρήσεις του πίνακα

4.3. Στη συνέχεια αφαιρούνται οι 5 μονάδες PMU που υπήρχαν στο πρώτο αρχείο, και τοποθετούνται 10 καινούριες μονάδες PMU σε 10 διαφορετικούς ζυγούς, επομένως εκτός από τις συμβατικές μετρήσεις έχουμε επιπλέον και τις παρακάτω συγχρονισμένες μετρήσεις:

Πίνακας 4.4 Συγχρονισμένες μετρήσεις σεναρίου 1B

Κατηγορία μετρήσεων	Μετρήσεις
Μέτρα τάσης	$V_{23}, V_{25}, V_{27}, V_{30}, V_{34}, V_{40}, V_{61}, V_{65}, V_{68}, V_{110}$
Φασικές γωνίες τάσης	$\delta_{23}, \delta_{25}, \delta_{27}, \delta_{30}, \delta_{34}, \delta_{40}, \delta_{61}, \delta_{65}, \delta_{68}, \delta_{110}$
Μέτρα ρεύματος	$I_{23-22}, I_{23-24}, I_{23-25}, I_{23-32}, I_{25-23}, I_{25-26}, I_{25-27}, I_{27-25}, I_{27-28}, I_{27-32}, I_{27-115}, I_{30-17}, I_{30-8}, I_{30-26}, I_{30-38}, I_{34-19}, I_{34-36}, I_{34-37}, I_{34-43}, I_{40-37}, I_{40-39}, I_{40-41}, I_{40-42}, I_{61-59}, I_{61-60}, I_{61-62}, I_{61-64}, I_{65-38}, I_{65-64}, I_{65-66}, I_{65-68}, I_{68-65}, I_{68-69}, I_{68-81}, I_{68-116}, I_{110-103}, I_{110-109}, I_{110-111}, I_{110-112}$
Φασικές γωνίες ρεύματος	$\theta_{23-22}, \theta_{23-24}, \theta_{23-25}, \theta_{23-32}, \theta_{25-23}, \theta_{25-26}, \theta_{25-27}, \theta_{27-25}, \theta_{27-28}, \theta_{27-32}, \theta_{27-115}, \theta_{30-17}, \theta_{30-8}, \theta_{30-26}, \theta_{30-38}, \theta_{34-19}, \theta_{34-36}, \theta_{34-37}, \theta_{34-43}, \theta_{40-37}, \theta_{40-39}, \theta_{40-41}, \theta_{40-42}, \theta_{61-59}, \theta_{61-60}, \theta_{61-62}, \theta_{61-64}, \theta_{65-38}, \theta_{65-64}, \theta_{65-66}, \theta_{65-68}, \theta_{68-65}, \theta_{68-69}, \theta_{68-81}, \theta_{68-116}, \theta_{110-103}, \theta_{110-109}, \theta_{110-111}, \theta_{110-112}$

Για το δεύτερο αρχείο μετρήσεων, η περίσσεια παίρνει μεγαλύτερη τιμή και ίση με $r = 472/236 = 2$.

Το τρίτο αρχείο μετρήσεων είναι ακριβώς ίδιο με το δεύτερο, με τη διαφορά όμως ότι συγχρονισμένες μετρήσεις τάσης του πίνακα 4.2 προστίθενται τώρα σαν συμβατικές μετρήσεις τάσεις (μόνο μέτρα και όχι φασικές γωνίες). Επομένως στο τρίτο αρχείο μετρήσεων υπάρχουν 10 συγχρονισμένες μετρήσεις τάσης και 5 συμβατικές μετρήσεις τάσης. Η περίσσεια του τρίτου αρχείου είναι $r = 477/236 = 2.02$.

Όμοια λοιπόν, δημιουργούνται και τα άλλα δυο ζευγάρια αρχείων μετρήσεων προσθέτοντας επιπλέον 10 μονάδες PMU στο ένα και 20 μονάδες PMU στο άλλο. Έτσι, το τέταρτο αρχείο έχει συνολικά 20 PMU (10 από αυτά είναι στους ζυγούς που φαίνονται στο πίνακα 4.4, και τα υπόλοιπα τοποθετούνται τυχαία στο δίκτυο) και το πέμπτο αρχείο έχει 20 PMU αλλά και 5 συμβατικές μετρήσεις τάσεως, τις ίδιες με το δεύτερο αρχείο. Τέλος, το έκτο αρχείο έχει συνολικά 30 PMU (τα 20 από αυτά είναι τα ίδια με αυτά του τέταρτου αρχείου, και τα υπόλοιπα 10 τοποθετούνται τυχαία στο δίκτυο), και το έβδομο έχει τις ίδιες συγχρονισμένες μετρήσεις με το έκτο, και επιπλέον τις 5 συμβατικές μετρήσεις τάσεως που υπάρχουν και στο πέμπτο αρχείο μετρήσεων.

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις που προσθέτονται στον πίνακα 4.4 και βρίσκονται στο τέταρτο αρχείο μετρήσεων είναι οι εξής:

Πίνακας 4.5 Πρόσθετες συγχρονισμένες μετρήσεις για το σενάριο 1Δ

Κατηγορία μετρήσεων	Μετρήσεις
Μέτρα τάσης	$V_3, V_8, V_{24}, V_{38}, V_{45}, V_{46}, V_{51}, V_{71}, V_{90}, V_{106}$
Φασικές γωνίες τάσης	$\delta_3, \delta_8, \delta_{24}, \delta_{38}, \delta_{45}, \delta_{46}, \delta_{51}, \delta_{71}, \delta_{90}, \delta_{106}$
Μέτρα ρεύματος	$I_{3-1}, I_{3-5}, I_{3-12}, I_{8-9}, I_{8-5}, I_{8-30}, I_{24-23}, I_{24-70}, I_{24-72}, I_{38-37}, I_{38-30}, I_{38-65}, I_{45-44}, I_{45-46}, I_{45-49}, I_{46-45}, I_{46-47}, I_{46-48}, I_{51-49}, I_{51-52}, I_{51-58}, I_{71-70}, I_{71-72}, I_{71-73}, I_{90-89}, I_{90-89}, I_{90-91}, I_{106-100}, I_{106-105}, I_{106-107}$
Φασικές γωνίες ρεύματος	$\theta_{3-1}, \theta_{3-5}, \theta_{3-12}, \theta_{8-9}, \theta_{8-5}, \theta_{8-30}, \theta_{24-23}, \theta_{24-70}, \theta_{24-72}, \theta_{38-37}, \theta_{38-30}, \theta_{38-65}, \theta_{45-44}, \theta_{45-46}, \theta_{45-49}, \theta_{46-45}, \theta_{46-47}, \theta_{46-48}, \theta_{51-49}, \theta_{51-52}, \theta_{51-58}, \theta_{71-70}, \theta_{71-72}, \theta_{71-73}, \theta_{90-89}, \theta_{90-89}, \theta_{90-91}, \theta_{106-100}, \theta_{106-105}, \theta_{106-107}$

Η περίσσεια του τέταρτου αρχείου μετρήσεων είναι $r = 552/236 = 2.34$, ενώ για το πέμπτο αρχείο η περίσσεια μετρήσεων είναι $r = 557/236 = 2.36$.

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις που προσθέτονται στους πίνακες 4.4 και 4.5, και βρίσκονται στο τέταρτο αρχείο μετρήσεων είναι οι εξής:

Πίνακας 4.6 Πρόσθετες συγχρονισμένες μετρήσεις του σεναρίου 1ΣΤ

Κατηγορία μετρήσεων	Μετρήσεις
Μέτρα τάσης	$V_{22}, V_{31}, V_{47}, V_{55}, V_{60}, V_{64}, V_{67}, V_{82}, V_{83}, V_{104}$
Φασικές γωνίες τάσης	$\delta_{22}, \delta_{31}, \delta_{47}, \delta_{55}, \delta_{60}, \delta_{64}, \delta_{67}, \delta_{82}, \delta_{83}, \delta_{104}$
Μέτρα ρεύματος	$I_{22-21}, I_{22-23}, I_{31-17}, I_{31-29}, I_{31-32}, I_{47-46}, I_{47-49}, I_{47-69}, I_{55-54}, I_{55-56}, I_{55-59}, I_{60-59}, I_{60-61}, I_{60-62}, I_{64-63}, I_{64-61}, I_{64-65}, I_{67-62}, I_{67-66}, I_{82-77}, I_{82-83}, I_{82-96}, I_{83-82}, I_{83-84}, I_{83-85}, I_{104-100}, I_{104-103}, I_{104-105}$
Φασικές γωνίες ρεύματος	$\theta_{22-21}, \theta_{22-23}, \theta_{31-17}, \theta_{31-29}, \theta_{31-32}, \theta_{47-46}, \theta_{47-49}, \theta_{47-69}, \theta_{55-54}, \theta_{55-56}, \theta_{55-59}, \theta_{60-59}, \theta_{60-61}, \theta_{60-62}, \theta_{64-63}, \theta_{64-61}, \theta_{64-65}, \theta_{67-62}, \theta_{67-66}, \theta_{82-77}, \theta_{82-83}, \theta_{82-96}, \theta_{83-82}, \theta_{83-84}, \theta_{83-85}, \theta_{104-100}, \theta_{104-103}, \theta_{104-105}$

Η περίσσεια του έκτου αρχείου μετρήσεων είναι $r = 628/236 = 2.66$, ενώ για το έβδομο αρχείο η περίσσεια μετρήσεων είναι $r = 633/236 = 2.68$.

Στον παρακάτω πίνακα, φαίνονται οι δείκτες ακρίβειας για τα 7 αρχεία μετρήσεων, καθώς και οι χρόνοι εκτέλεσης του κάθε βήματος του υβριδικού εκτιμητή 2 βημάτων και ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος:

Πίνακας 4.7 Αποτελέσματα σεναρίου για τους 118 ζυγούς με equality constraints

	Αρχεία μετρήσεων			
	<i>IA</i>	<i>IB</i>	<i>IA</i>	<i>IΣΤ</i>
<i>PMUs</i>	5	10	20	30
E_{ang}	0.0000099104	0.0000048768	0.0000008399	0.0000007302
E_{mag}	0.0000019453	0.0000010617	0.0000007473	0.0000003197
NE_{ang} (%)	0.0766401172	0.0537623287	0.0223115602	0.0208027807
NE_{mag} (%)	0.0130216324	0.0096201706	0.0080708619	0.0052793142
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	1.04800	1.60900	2.26700	2.37200
Χρόνος εκτέλεσης 1 ^ο βήματος (s)	0.23795	0.39036	0.38464	0.41550
Χρόνος εκτέλεσης 2 ^ο βήματος (s)	0.67542	1.09351	1.77036	1.81187

	<i>IA</i>	<i>IF</i>	<i>IE</i>	<i>IZ</i>
<i>PMUs</i> (+ συμβατικές μετρήσεις)	5	10(+5)	20(+5)	30(+5)
E_{ang}	0.0000099104	0.0000059213	0.0000009313	0.0000009628
E_{mag}	0.0000019453	0.0000010404	0.0000005941	0.0000004186
NE_{ang} (%)	0.0766401172	0.0592405321	0.0234933678	0.0238873515
NE_{mag} (%)	0.0130216324	0.0095232466	0.0071964104	0.0060408055
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	1.04800	1.50500	2.53600	2.07900
Χρόνος εκτέλεσης 1 ^ο βήματος (s)	0.23795	0.29550	0.38056	0.40294
Χρόνος εκτέλεσης 2 ^ο βήματος (s)	0.67542	1.07953	1.96979	1.54824

Παρατηρούμε ότι η αύξηση του αριθμού των μονάδων PMU που τοποθετούνται στο δίκτυο συνεπάγονται και αρκετά μεγάλη μείωση όλων των δεικτών ακριβείας, ενώ ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του προγράμματος αυξάνεται ελαφρά αλλά δε ξεπερνά τα 2.5 δευτερόλεπτα. Όπως είναι λογικό, το δεύτερο βήμα είναι το πιο χρονοβόρο εφόσον έχει και τις περισσότερες μετρήσεις, ενώ η μικρή διαφορά των χρόνων των 2 βημάτων με το συνολικό χρόνο εκτέλεσης οφείλεται σε άλλες συναρτήσεις απαραίτητες για την εκτίμηση κατάστασης, όπως η συνάρτηση που σχηματίζει την μήτρα αγωγιμοτήτων. Τέλος, αξίζει να αναφέρουμε ότι η

πρόσθεση συμβατικών μετρήσεων στον αλγόριθμο έχει μια μικρή βελτίωση μόνο για τους δείκτες ακριβείας του μέτρου τάσης.

Στη συνέχεια, ο παρακάτω πίνακας έχει τα τελικά διανύσματα κατάστασης όλων των αρχείων μετρήσεων, σε σχέση πάντα με το διάνυσμα κατάστασης που προκύπτει από τη ροή φορτίου:

Πίνακας 4.8 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων

<i>Ζυγός</i>	<i>Ροή φορτίου</i>	<i>Αρχεία μετρήσεων</i>						
	δ_{pf}	<i>1A</i>	<i>1B</i>	<i>1Γ</i>	<i>1Δ</i>	<i>1E</i>	<i>1ΣΤ</i>	<i>1Ζ</i>
1	10,973	10,964	10,976	10,976	10,974	10,974	10,969	10,974
2	11,513	11,505	11,511	11,519	11,52	11,51	11,515	11,514
3	11,856	11,859	11,864	11,856	11,856	11,86	11,852	11,858
4	15,574	15,573	15,574	15,574	15,575	15,576	15,571	15,575
5	16,019	16,019	16,019	16,019	16,02	16,022	16,017	16,021
6	13,292	13,292	13,289	13,288	13,295	13,296	13,286	13,293
7	12,847	12,848	12,845	12,846	12,851	12,85	12,845	12,849
8	21,041	21,039	21,038	21,042	21,04	21,044	21,04	21,044
9	28,295	28,359	28,318	28,248	28,302	28,299	28,294	28,304
10	35,876	36,005	35,926	35,782	35,892	35,881	35,875	35,892
11	13,006	13,011	13,006	13,005	13,007	13,008	13,003	13,007
12	12,489	12,492	12,489	12,488	12,49	12,491	12,486	12,49
13	11,63	11,632	11,631	11,629	11,631	11,632	11,627	11,631
14	11,771	11,773	11,772	11,765	11,773	11,776	11,771	11,772
15	11,474	11,476	11,473	11,474	11,476	11,477	11,473	11,474
16	12,187	12,193	12,184	12,187	12,191	12,192	12,185	12,189
17	13,995	13,999	13,994	13,993	13,995	13,992	14,001	13,993
18	11,781	11,784	11,78	11,781	11,783	11,783	11,78	11,781
19	11,315	11,316	11,314	11,314	11,316	11,317	11,313	11,315
20	12,191	12,194	12,19	12,191	12,193	12,193	12,189	12,191
21	13,778	13,79	13,786	13,771	13,78	13,777	13,781	13,776
22	16,332	16,353	16,327	16,328	16,332	16,331	16,333	16,326
23	21,249	21,245	21,25	21,249	21,248	21,246	21,247	21,25
24	21,114	21,112	21,118	21,114	21,115	21,112	21,113	21,117
25	28,18	28,207	28,179	28,177	28,177	28,172	28,181	28,187
26	29,96	29,979	29,96	29,959	29,956	29,964	29,956	29,962
27	15,604	15,606	15,605	15,601	15,602	15,604	15,608	15,609
28	13,879	13,873	13,88	13,88	13,887	13,879	13,873	13,879
29	12,885	12,887	12,891	12,888	12,893	12,88	12,885	12,887
30	19,034	19,038	19,033	19,033	19,034	19,034	19,035	19,035
31	13,002	13,004	13,009	13,004	13,009	12,997	13,001	13,003
32	15,061	15,064	15,059	15,06	15,057	15,058	15,061	15,066
33	10,854	10,862	10,852	10,856	10,857	10,859	10,854	10,854
34	11,511	11,514	11,51	11,511	11,513	11,513	11,509	11,512
35	11,055	11,055	11,055	11,051	11,056	11,054	11,053	11,058
36	11,056	11,055	11,056	11,052	11,057	11,054	11,054	11,058
37	11,967	11,968	11,965	11,965	11,968	11,968	11,965	11,967

Πίνακας 4.8 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων
(συνέχεια)

38	17,108	17,11	17,107	17,106	17,109	17,109	17,107	17,108
39	8,577	8,566	8,573	8,575	8,583	8,574	8,576	8,579
40	7,496	7,489	7,495	7,494	7,498	7,497	7,494	7,498
41	7,052	7,053	7,05	7,051	7,053	7,052	7,05	7,054
42	8,653	8,65	8,652	8,652	8,655	8,654	8,652	8,655
43	11,46	11,463	11,459	11,458	11,461	11,463	11,458	11,46
44	13,943	13,962	13,942	13,911	13,943	13,941	13,942	13,946
45	15,773	15,715	15,773	15,741	15,775	15,766	15,775	15,773
46	18,576	18,564	18,56	18,575	18,576	18,576	18,573	18,577
47	20,799	20,796	20,795	20,8	20,799	20,803	20,8	20,801
48	20,019	20,008	20,017	20,017	20,02	20,018	20,022	20,018
49	21,022	21,018	21,018	21,02	21,023	21,023	21,02	21,025
50	18,983	18,992	18,958	18,995	18,993	18,991	19,009	18,978
51	16,364	16,344	16,371	16,358	16,363	16,366	16,36	16,366
52	15,411	15,388	15,421	15,411	15,408	15,412	15,415	15,413
53	14,436	14,422	14,44	14,442	14,425	14,438	14,442	14,435
54	15,348	15,333	15,362	15,341	15,344	15,347	15,346	15,346
55	15,058	15,044	15,073	15,051	15,054	15,058	15,056	15,055
56	15,245	15,23	15,258	15,238	15,242	15,246	15,242	15,243
57	16,449	16,428	16,456	16,434	16,447	16,458	16,445	16,448
58	15,592	15,577	15,607	15,582	15,59	15,596	15,59	15,594
59	19,448	19,436	19,449	19,454	19,448	19,45	19,452	19,446
60	23,23	23,224	23,232	23,227	23,234	23,233	23,228	23,231
61	24,121	24,118	24,123	24,118	24,126	24,125	24,119	24,123
62	23,505	23,501	23,506	23,502	23,509	23,508	23,502	23,506
63	22,827	22,821	22,828	22,828	22,829	22,83	22,828	22,827
64	24,593	24,59	24,594	24,592	24,596	24,596	24,592	24,594
65	27,719	27,719	27,72	27,715	27,723	27,721	27,717	27,72
66	27,559	27,558	27,558	27,556	27,562	27,56	27,556	27,559
67	24,919	24,914	24,92	24,916	24,923	24,922	24,916	24,921
68	27,598	27,598	27,598	27,594	27,602	27,6	27,595	27,599
69	30	29,991	29,995	30	30,003	30,002	29,995	29,997
70	22,618	22,611	22,624	22,62	22,618	22,619	22,616	22,62
71	22,207	22,203	22,215	22,209	22,207	22,209	22,205	22,208
72	21,109	21,108	21,115	21,11	21,108	21,107	21,109	21,108
73	21,995	21,993	22,007	21,997	21,996	21,999	21,994	21,996
74	21,669	21,653	21,68	21,65	21,677	21,68	21,662	21,69
75	22,93	22,924	22,937	22,931	22,931	22,932	22,93	22,933
76	21,799	21,802	21,796	21,788	21,797	21,795	21,786	21,781
77	26,751	26,753	26,754	26,746	26,751	26,758	26,748	26,749
78	26,447	26,45	26,448	26,439	26,447	26,453	26,446	26,448
79	26,745	26,749	26,749	26,734	26,746	26,756	26,746	26,748
80	28,99	28,99	28,995	28,99	28,991	28,991	28,986	28,994
81	28,145	28,145	28,147	28,143	28,148	28,146	28,142	28,147
82	27,272	27,274	27,272	27,266	27,272	27,277	27,267	27,269

Πίνακας 4.8 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων
(συνέχεια)

83	28,464	28,467	28,466	28,466	28,462	28,48	28,456	28,46
84	31	30,998	31,027	31,011	31,001	31,012	30,997	30,999
85	32,556	32,561	32,582	32,565	32,563	32,567	32,55	32,559
86	31,186	31,186	31,21	31,206	31,191	31,189	31,177	31,184
87	31,445	31,449	31,467	31,472	31,446	31,453	31,436	31,443
88	35,69	35,671	35,765	35,658	35,722	35,721	35,687	35,668
89	39,748	39,752	39,751	39,727	39,75	39,744	39,74	39,744
90	33,338	33,342	33,319	33,32	33,335	33,339	33,336	33,335
91	33,351	33,355	33,332	33,332	33,346	33,351	33,349	33,348
92	33,881	33,889	33,866	33,865	33,873	33,885	33,88	33,876
93	30,849	30,852	30,842	30,84	30,855	30,849	30,851	30,833
94	28,682	28,69	28,686	28,679	28,682	28,681	28,682	28,679
95	27,71	27,711	27,711	27,706	27,71	27,711	27,707	27,707
96	27,543	27,544	27,544	27,539	27,544	27,543	27,539	27,541
97	27,916	27,925	27,921	27,91	27,913	27,913	27,917	27,913
98	27,433	27,444	27,438	27,432	27,436	27,432	27,44	27,423
99	27,067	27,068	27,091	27,07	27,071	27,058	27,058	27,055
100	28,059	28,067	28,062	28,054	28,058	28,057	28,058	28,055
101	29,647	29,664	29,646	29,641	29,643	29,647	29,66	29,643
102	32,365	32,372	32,349	32,346	32,373	32,352	32,369	32,362
103	24,318	24,311	24,322	24,314	24,317	24,317	24,316	24,315
104	21,748	21,757	21,752	21,745	21,747	21,747	21,746	21,746
105	20,644	20,646	20,648	20,641	20,643	20,643	20,642	20,64
106	20,383	20,387	20,385	20,377	20,38	20,379	20,383	20,382
107	17,583	17,571	17,577	17,588	17,583	17,584	17,586	17,58
108	19,443	19,443	19,446	19,443	19,445	19,445	19,445	19,442
109	18,991	18,989	18,991	18,987	18,991	18,992	18,988	18,99
110	18,144	18,147	18,148	18,141	18,142	18,144	18,142	18,141
111	19,789	19,81	19,785	19,794	19,792	19,788	19,793	19,793
112	15,045	15,058	15,048	15,045	15,036	15,046	15,049	15,041
113	13,993	13,996	13,991	13,991	13,992	13,989	13,998	13,991
114	14,726	14,73	14,727	14,725	14,724	14,727	14,726	14,734
115	14,718	14,721	14,718	14,717	14,715	14,719	14,717	14,726
116	27,163	27,164	27,163	27,159	27,168	27,165	27,16	27,164
117	10,948	10,956	10,956	10,943	10,952	10,952	10,948	10,945
118	21,942	21,945	21,939	21,93	21,941	21,94	21,93	21,926

Πίνακας 4.9 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων

Ζυγός	Ροή φορτίου	Αρχεία μετρήσεων						
	V_{pf}	1A	1B	1Γ	1Δ	1Ε	1ΣΤ	1Ζ
1	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
2	0,971	0,971	0,971	0,972	0,971	0,971	0,971	0,971
3	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
4	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
5	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002
6	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
7	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
8	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
9	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043
10	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
11	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
12	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
13	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
14	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
15	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
16	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
17	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995
18	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
19	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962
20	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957
21	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958
22	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969
23	0,999	1	0,999	1	0,999	0,999	0,999	0,999
24	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
25	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
26	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
27	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
28	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962
29	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963
30	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
31	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
32	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963
33	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
34	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
35	0,98	0,981	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
36	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
37	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
38	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961
39	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
40	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
41	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
42	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
43	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977

Πίνακας 4.9 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων
(συνέχεια)

44	0,984	0,985	0,985	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
45	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986
46	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
47	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
48	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021
49	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025
50	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001
51	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
52	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957
53	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946
54	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
55	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952
56	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954
57	0,971	0,971	0,971	0,97	0,971	0,971	0,97	0,97
58	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959
59	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
60	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
61	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995
62	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
63	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969
64	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
65	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
66	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
67	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
68	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003
69	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
70	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
71	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987
72	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
73	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
74	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958
75	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
76	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943
77	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006
78	1,003	1,004	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,004
79	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009
80	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
81	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
82	0,989	0,989	0,989	0,989	0,988	0,989	0,989	0,989
83	0,984	0,984	0,984	0,985	0,984	0,984	0,984	0,985
84	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
85	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
86	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987
87	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
88	0,987	0,987	0,988	0,987	0,987	0,988	0,987	0,987

Πίνακας 4.9 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων
(συνέχεια)

89	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
90	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
91	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
92	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
93	0,985	0,986	0,985	0,986	0,985	0,985	0,985	0,985
94	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
96	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
97	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011
98	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,023	1,024
99	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
100	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
101	0,991	0,992	0,992	0,992	0,991	0,991	0,992	0,991
102	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
103	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
104	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
105	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965
106	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961
107	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952
108	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966
109	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
110	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
111	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
112	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
113	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
114	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
115	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
116	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
117	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974
118	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949

Και εδώ βλέπουμε ότι όσο αυξάνονται οι μονάδες PMU που εισάγονται στα αρχεία μετρήσεων, οι τιμές του διανύσματος κατάστασης προσεγγίζουν όλο και περισσότερο τις αντίστοιχες της ροής φορτίου. Ειδικά για τα μέτρα τάσης, φαίνεται ότι η χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων δίνει ακριβή εκτίμηση σχεδόν σε όλους τους ζυγούς από το πρώτο κιάλας σενάριο με την μικρή περίσσεια.

Παρακάτω, φαίνονται και τα 5 μεγαλύτερα κανονικοποιημένα υπόλοιπα για κάθε επανάληψη της μεθόδου LNR και για τα δυο στάδια του αλγορίθμου:

Πίνακας 4.10 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Α

Σενάριο 1Α – 1^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 42-49	-0.00000615
Iaf 42-49	0.00000612
Imf 42-49	0.00000052
Imf 42-49	-0.00000050
Iat 103-100	0.00000000

Σενάριο 1Α – 2^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1^η		Επανάληψη 2^η		Επανάληψη 3^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 80-98	7.29567	Pff 63-64	5.87039	Pff 27-28	-4.53808
Pff 63-64	5.89412	Pff 27-28	-4.53041	Pff 44-45	-4.46073
Pff 27-28	-4.53047	Pff 44-45	-4.45302	Pff 46-48	4.43815
Pff 44-45	-4.45180	Pff 46-48	4.44492	Pff 80-96	3.46215
Pff 46-48	4.44639	Pff 80-96	3.49094	Pff 77-80	2.95545

Σενάριο 1Α – 2^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4^η		Επανάληψη 5^η		Επανάληψη 6^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 44-45	-4.46053	Pff 80-96	3.46509	Qff 49-51	3.14025
Pff 46-48	4.43785	Qff 49-51	3.12669	Pff 8-30	2.75481
Pff 80-96	3.46222	Pff 77-80	2.95499	Pff 77-80	2.69801
Pff 77-80	2.95543	Pff 8-30	2.75332	Pff 33-37	2.57625
Qff 49-51	2.88524	Pff 33-37	2.57539	Pff 30-38	-2.53263

Σενάριο 1Α – 2^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 7^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 8-30	2.75464
Pff 77-80	2.69569
Pff 33-37	2.57454
Pff 30-38	-2.53489
Pff 46-48	2.452182

Πίνακας 4.11 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1B

Σενάριο 1B – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 25	-0.00023523
Va 23	0.00013717
Vm 27	0.00012339
Vm 30	0.00011820
Vm 68	0.00009605

Σενάριο 1B – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 63-59	8.85438	Pff 80-97	-7.93398	Qff 81-80	-6.68751
Pff 80-97	-7.90982	Qff 81-80	-6.67246	Pff 70-74	-5.41660
Qff 81-80	-6.68044	Pff 70-74	-5.42383	Vm_pmu 62	4.80405
Pff 70-74	-5.42544	Vm_pmu 62	4.81044	Vm_pmu 66	-4.20839
Vm_pmu 62	4.79977	Vm_pmu 66	-4.20282	Pff 74-75	-4.18034

Σενάριο 1B – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 70-74	-5.41660	Vm_pmu 62	4.80710	Vm_pmu 66	-3.75542
Vm_pmu 62	4.80733	Vm_pmu 66	-4.20499	Qff 100-104	3.61252
Vm_pmu 66	-4.20509	Qff 100-104	3.61470	Vm_pmu 61	3.51573
Pff 74-75	-4.18033	Pff 110-111	-3.18871	Vm_pmu 38	3.19945
Qff 100-104	3.61494	Qff 8-5	-3.13037	Pff 110-111	-3.19184

Σενάριο 1B – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 100-104	3.61158	Vm_pmu 61	3.23541	Vm_pmu 38	3.21262
Vm_pmu 61	3.23567	Pff 110-111	-3.18971	Pff 110-111	-3.19247
Pff 110-111	-3.19035	Vm_pmu 38	3.13141	Qff 8-5	-3.12898
Vm_pmu 38	3.13165	Qff 8-5	-3.13024	Pff 33-37	-3.05619
Qff 8-5	-3.13024	Pff 33-37	-3.05754	Qff 68-69	2.83629

Σενάριο 1B – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 110-111	-3.19519	Qff 8-5	-3.13189	Pff 33-37	-3.07972
Qff 8-5	-3.13189	Pff 33-37	-3.08530	Qff 68-69	2.82090
Pff 33-37	-3.08559	Qff 68-69	2.82099	Pff 30-17	-2.69500
Qff 68-69	2.82221	Pff 30-17	-2.69346	Qff 64-65	-2.66120
Pff 30-17	-2.69343	Qff 64-65	-2.66051	Qff 69-75	2.50350

Σενάριο 1B – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 13 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 68-69	2.82118
Pff 30-17	-2.69536
Qff 64-65	-2.66070
Qff 69-75	2.50368
Qff 92-94	-2.4770

Πίνακας 4.12 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Γ

Σενάριο 1Γ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 30	-0.00015430
Vm 23	0.00014692
Vm 61	-0.00010901
Vm 40	0.00009746
Vm 27	0.00008122

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 65-66	-12.69378	Qff 81-80	10.74307	Pff 70-74	5.91894
Qff 81-80	10.68216	Pff 70-74	5.91895	Pff 74-75	4.82720
Pff 70-74	5.94474	Pff 74-75	4.82721	Pff 33-37	-4.75051
Pff 74-75	4.83598	Pff 33-37	-4.74967	Vm_pmu 68	4.14328
Pff 33-37	-4.73099	Vm_pmu 68	4.17156	Vm_pmu 32	3.50557

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 33-37	-4.75155	Vm_rpmu 68	4.14131	Vm_rpmu 32	3.51247
Vm_rpmu 68	4.14365	Vm_rpmu 32	3.50460	Pff 63-64	3.50972
Vm_rpmu 32	3.50490	Pff 63-64	3.49132	Qff 64-65	-3.39566
Pff 63-64	3.49167	Qff 100-106	-3.29648	Qff 100-106	-3.27400
Qff 100-106	-3.29651	Qff 3-12	3.26357	Qff 3-12	3.24834

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 63-64	3.51384	Qff 64-65	-3.39404	Qff 47-69	3.28705
Qff 64-65	-3.38610	Qff 100-106	-3.24774	Qff 100-106	-3.24717
Qff 100-106	-3.24762	Qff 47-69	3.24298	Qff 3-12	3.23710
Qff 3-12	3.24242	Qff 3-12	3.24247	Vm_rpmu 38	3.16260
Qff 47-69	3.24197	Vm_rpmu 38	3.13724	Pff 54-59	-2.84059

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 3-12	3.19942	Qff 100-106	-3.19677	Vm_rpmu 38	3.12126
Qff 100-106	-3.19678	Vm_rpmu 38	3.12099	Pff 54-59	-2.84316
Vm_rpmu 38	3.12558	Pff 54-59	-2.84315	Pff 110-112	-2.82566
Pff 54-59	-2.84323	Pff 110-112	-2.82507	Qff 80-97	2.60817
Pff 110-112	-2.82506	Qff 80-97	2.60862	Qff 100-104	2.57436

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 13 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 54-59	-2.84320
Pff 110-112	-2.82901
Qff 80-97	2.63069
Qff 100-104	2.57182
Pff 5-6	-2.52757

Πίνακας 4.13 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Δ

Σενάριο 1Δ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 61	-0.00022400
Vm 23	0.00020177
Vm 68	0.00017071
Vm 40	0.00015515
Va 23	-0.00010886

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 100-104	13.78099	Pff 80-97	-6.49403	Vm_pmu 105	-5.20143
Pff 80-97	-6.49416	Vm_pmu 105	-5.17750	Vm_pmu 65	5.01449
Vm_pmu 105	-5.17167	Vm_pmu 65	4.93759	Qff 65-66	-4.94285
Vm_pmu 65	4.93799	Qff 65-66	-4.87525	Vm_pmu 69	-4.31328
Qff 65-66	-4.87560	Vm_pmu 17	4.27312	Vm_pmu 17	4.27228

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 65	4.87194	Qff 65-66	-5.46731	Vm_pmu 107	-4.52472
Qff 65-66	-4.82224	Vm_pmu 107	-4.56549	Vm_pmu 17	4.25386
Vm_pmu 107	-4.66035	Vm_pmu 61	4.30809	Vm_pmu 61	4.23580
Vm_pmu 69	-4.43351	Vm_pmu 17	4.26820	Qff 83-84	4.12773
Vm_pmu 17	4.26962	Vm_pmu 69	-4.21209	Vm_pmu 69	-4.12347

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 17	4.25112	Vm_pmu 61	4.24251	Vm_pmu 44	4.25536
Vm_pmu 69	-4.24901	Vm_pmu 69	-4.23622	Vm_pmu 69	-4.18534
Vm_pmu 61	4.20850	Vm_pmu 44	4.17640	Qff 83-84	4.09779
Vm_pmu 44	4.09731	Qff 83-84	4.08645	Qff 100-106	-4.00804
Qff 83-84	4.08510	Qff 100-106	-4.00559	Vm_pmu 72	3.87976

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 69	-4.15770	Qff 100-106	-6.03975	Qff 80-97	-4.29023
Qff 83-84	4.10231	Qff 80-97	-4.29019	Qff 94-100	3.62246
Qff 100-106	-4.00892	Qff 94-100	3.62216	Vm_pmu 24	-3.57416
Vm_pmu 72	3.892890	Vm_pmu 24	-3.57419	Vm_pmu 72	3.57384
Vm_pmu 25	-3.76217	Vm_pmu 72	3.57380	Qff 83-84	3.53339

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 13 ^η		Επανάληψη 14 ^η		Επανάληψη 15 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 94-100	3.78586	Vm_pmu 24	-3.59079	Vm_pmu 25	-3.52742
Vm_pmu 24	-3.57662	Vm_pmu 72	3.53531	Vm_pmu 71	-3.52649
Vm_pmu 72	3.56781	Vm_pmu 25	-3.48200	Vm_pmu 47	-3.38768
Vm_pmu 25	-3.48539	Vm_pmu 47	-3.41196	Vm_pmu 37	-3.37409
Vm_pmu 47	-3.41083	Vm_pmu 37	-3.37499	Pff 71-72	3.15911

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 16 ^η		Επανάληψη 17 ^η		Επανάληψη 18 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 71	-3.56739	Vm_pmu 37	-3.32022	Vm_pmu 47	-3.34044
Vm_pmu 37	-3.42359	Vm_pmu 47	-3.27165	Vm_pmu 30	-3.05513
Vm_pmu 47	-3.40326	Pff 35-37	2.97798	Pff 35-37	2.97727
Pff 71-72	3.15833	Pff 71-72	2.96951	Pff 71-72	2.96897
Vm_pmu 72	3.09225	Vm_pmu 30	-2.94516	Vm_pmu 64	-2.84264

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)			
Επανάληψη 19 ^η		Επανάληψη 20 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 30	-3.09070	Pff 35-37	2.98251
Pff 35-37	2.97827	Pff 71-72	2.96775
Pff 71-72	2.96806	Vm_pmu 64	-2.94356
Vm_pmu 64	-2.90997	Pff 33-37	2.78991
Pff 33-37	2.78632	Qff 69-70	2.78044

Πίνακας 4.14 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1E

Σενάριο 1E – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 30	-0.00016010
Vm 38	-0.00011226
Vm 8	-0.00010296
Vm 71	-0.00009815
Vm 40	0.00009228

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 100-106	13.23518	Qff 100-104	8.52288	Vm_pmu 48	6.61307
Qff 100-104	8.54500	Vm_pmu 48	6.61309	Vm_pmu 105	-5.89575
Vm_pmu 48	6.61331	Vm_pmu 105	-5.89211	Pff 2-12	-5.36006
Vm_pmu 105	-5.89649	Pff 2-12	-5.36006	Qff 79-80	-5.25697
Pff 2-12	-5.36006	Qff 79-80	-5.25710	Vm_pmu 27	4.81219

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 105	-5.88424	Pff 2-12	-5.36639	Qff 79-80	-5.19226
Pff 2-12	-5.36967	Qff 79-80	-5.19273	Vm_pmu 45	4.87254
Qff 79-80	-5.26358	Vm_pmu 45	4.86489	Vm_pmu 27	4.82426
Vm_pmu 45	4.87704	Vm_pmu 27	4.82142	Pff 16-17	-4.24852
Vm_pmu 27	4.82558	Pff 16-17	-4.21916	Qff 66-67	4.04351

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 45	4.81174	Vm_pmu 27	4.77383	Qff 80-97	-4.37735
Vm_pmu 27	4.75829	Qff 80-97	-4.37190	Pff 16-17	-4.24029
Qff 80-97	-4.35986	Pff 16-17	-4.25842	Qff 66-67	4.01458
Pff 16-17	-4.25628	Qff 66-67	4.01606	Vm_pmu 65	3.97057
Qff 66-67	4.01221	Vm_pmu 65	3.96687	Vm_pmu 47	3.70199

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 16-17	-4.24065	Vm_pmu 65	4.07390	Qff 66-67	4.00678
Vm_pmu 65	4.07230	Qff 66-67	4.01301	Vm_pmu 47	3.74873
Qff 66-67	4.01296	Vm_pmu 47	3.70903	Pff 110-112	3.58050
Vm_pmu 47	3.70565	Pff 110-112	3.58728	Pff 74-75	-3.51769
Pff 110-112	3.58730	Pff 74-75	-3.51317	Pff 17-31	3.45456

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 13 ^η		Επανάληψη 14 ^η		Επανάληψη 15 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 47	3.75540	Pff 110-112	3.58008	Pff 74-75	-3.51806
Pff 110-112	3.58060	Pff 74-75	-3.51791	Pff 17-31	3.45270
Pff 74-75	-3.51771	Pff 17-31	3.45278	Qff 83-84	3.41080
Pff 17-31	3.45444	Qff 83-84	3.41205	Vm_pmu 81	3.31748
Qff 83-84	3.40614	Vm_pmu 81	3.35045	Pff 70-74	-3.21929

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 16 ^η		Επανάληψη 17 ^η		Επανάληψη 18 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 17-31	3.45399	Qff 83-84	3.40525	Vm_pmu 81	3.33695
Qff 83-84	3.40482	Vm_pmu 81	3.31538	Qff 23-25	3.20858
Vm_pmu 81	3.31370	Qff 23-25	3.21075	Pff 24-70	-3.14888
Qff 23-25	3.18183	Pff 24-70	-3.14728	Qff 69-75	-3.09313
Pff 24-70	-3.14744	Qff 3-12	-3.08161	Qff 3-12	-3.07006

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 19 ^η		Επανάληψη 20 ^η		Επανάληψη 21 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 23-25	3.20055	Vm_pmu 26	-3.44238	Vm_pmu 25	-4.66148
Pff 24-70	-3.15157	Vm_pmu 25	-3.18685	Pff 24-70	-3.13827
Qff 69-75	-3.14381	Pff 24-70	-3.13784	Qff 69-75	-3.12407
Qff 3-12	-3.04990	Qff 69-75	-3.12380	Vm_pmu 34	-3.05206
Vm_pmu 34	-3.00925	Qff 3-12	-3.01538	Qff 3-12	-2.92077

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 22 ^η		Επανάληψη 23 ^η		Επανάληψη 24 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 24-70	-3.13898	Vm_pmu 34	-3.13940	Qff 69-75	-3.12910
Vm_pmu 34	-3.13884	Qff 69-75	-3.12884	Vm_pmu 103	-2.83150
Qff 69-75	-3.12549	Vm_pmu 103	-2.82876	Qff 8-9	2.74351
Vm_pmu 103	-2.83110	Qff 3-12	-2.75029	Qff 3-12	-2.70439
Qff 3-12	-2.75687	Vm_pmu 22	2.73998	Vm_pmu 22	2.59376

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 25 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 54-59	-2.84320
Pff 110-112	-2.82901
Qff 80-97	2.63069
Qff 100-104	2.57182
Pff 5-6	-2.52757

Πίνακας 4.15 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1ΣΤ

Σενάριο 1ΣΤ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 8	0.00029589
Vm 67	-0.00021326
Vm 47	0.00018547
Vm 22	-0.00014140
Vm 60	0.00013921

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 100-104	10.92666	Qff 65-66	-9.38505	Vm_pmu 100	-6.25572
Qff 65-66	-9.38495	Vm_pmu 100	-6.33109	Qff 3-12	-6.05473
Vm_pmu 100	-6.33169	Qff 3-12	-6.06991	Pff 2-12	5.69636
Qff 3-12	-6.06991	Pff 2-12	5.69335	Vm_pmu 66	-5.42034
Pff 2-12	5.69335	Vm_pmu 66	-5.21039	Vm_pmu 26	-4.66409

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 3-12	-6.05075	Pff 2-12	5.64109	Vm_rpmu 66	-5.43504
Pff 2-12	5.69483	Vm_rpmu 66	-5.43033	Vm_rpmu 26	-4.64994
Vm_rpmu 66	-5.43560	Vm_rpmu 26	-4.63572	Vm_rpmu 39	4.45867
Vm_rpmu 26	-4.66654	Vm_rpmu 39	4.47004	Qff 100-106	4.28768
Vm_rpmu 39	4.45780	Qff 100-106	4.28768	Vm_rpmu 32	3.99024

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_rpmu 26	-4.66289	Vm_rpmu 39	4.34618	Qff 100-106	4.28954
Vm_rpmu 39	4.39882	Qff 100-106	4.28944	Vm_rpmu 32	3.94734
Qff 100-106	4.28837	Vm_rpmu 45	-3.99986	Vm_rpmu 45	-3.88144
Vm_rpmu 32	3.98588	Vm_rpmu 60	-3.97038	Vm_rpmu 60	-3.87840
Vm_rpmu 45	-3.97365	Vm_rpmu 32	3.92805	Vm_rpmu 65	-3.86103

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_rpmu 32	3.94733	Vm_rpmu 60	-3.86890	Vm_rpmu 45	-3.95964
Vm_rpmu 45	-3.88149	Vm_rpmu 45	-3.86734	Vm_rpmu 65	-3.93564
Vm_rpmu 60	-3.87852	Vm_rpmu 65	-3.85542	Qff 55-59	-3.75100
Vm_rpmu 65	-3.86194	Qff 55-59	-3.82087	Vm_rpmu 44	3.46194
Qff 55-59	-3.82104	Vm_rpmu 44	3.52903	Qff 8-5	-3.39550

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 13 ^η		Επανάληψη 14 ^η		Επανάληψη 15 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_rpmu 65	-3.96753	Qff 55-59	-3.71974	Qff 54-59	-3.59649
Qff 55-59	-3.72494	Vm_rpmu 67	-3.59325	Vm_rpmu 67	-3.47665
Vm_rpmu 67	-3.50386	Qff 8-5	-3.39475	Qff 8-5	-3.39495
Qff 8-5	-3.39457	Qff 54-59	-3.32938	Vm_rpmu 8	-3.29610
Qff 54-59	-3.33347	Vm_rpmu 8	-3.30662	Vm_rpmu 36	3.24163

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 16 ^η		Επανάληψη 17 ^η		Επανάληψη 18 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 8-5	-3.39521	Vm_rpmu 54	-3.34382	Vm_rpmu 67	-3.41942
Vm_rpmu 54	-3.34427	Vm_rpmu 67	-3.32814	Vm_rpmu 36	3.24555
Vm_rpmu 67	-3.32970	Vm_rpmu 36	3.26795	Vm_rpmu 44	3.19595
Vm_rpmu 8	-3.28285	Vm_rpmu 44	3.22724	Vm_rpmu 8	-3.15947
Vm_rpmu 36	3.26456	Vm_rpmu 8	-3.14653	Qff 83-85	3.00632

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 19 ^η		Επανάληψη 20 ^η		Επανάληψη 21 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_rpmu 36	3.20325	Vm_rpmu 44	3.26423	Vm_rpmu 24	3.01426
Vm_rpmu 8	-3.18367	Vm_rpmu 8	-3.07275	Qff 83-85	3.00591
Vm_rpmu 44	3.13622	Qff 83-85	3.00527	Vm_rpmu 8	-2.99318
Qff 83-85	3.00495	Vm_rpmu 24	2.99694	Pff 80-97	-2.87547
Vm_rpmu 24	2.97386	Pff 80-97	-2.87417	Qff 83-84	-2.85616

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 22 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 83-85	2.99360
Vm_rpmu 8	-2.93842
Pff 80-97	-2.90388
Pff 104-105	2.80954
Qff 83-84	-2.78103

Πίνακας 4.16 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Z

Σενάριο 1Z – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm 22	-0.00020757
Vm 34	0.00020482
Vm 8	-0.00019600
Va 65	-0.00018937
Vm 51	-0.00017623

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 100-106	-7.87920	Vm_pmu 100	6.22830	Qff 83-84	5.75552
Vm_pmu 100	6.22000	Qff 83-84	5.75285	Vm_pmu 9	4.90395
Qff 83-84	5.75282	Vm_pmu 9	4.90376	Vm_pmu 104	4.85686
Vm_pmu 9	4.90375	Vm_pmu 68	-4.86320	Vm_pmu 68	-4.74545
Vm_pmu 68	-4.86487	Vm_pmu 37	-4.67826	Vm_pmu 37	-4.67280

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 9	4.90339	Vm_pmu 104	4.85876	Vm_pmu 68	-4.59333
Vm_pmu 104	4.85820	Vm_pmu 68	-4.72781	Vm_pmu 37	-4.55938
Vm_pmu 68	-4.73048	Vm_pmu 37	-4.56572	Qff 64-65	4.16574
Vm_pmu 37	-4.67155	Qff 64-65	4.20913	Vm_pmu 115	-3.75850
Qff 64-65	4.20249	Vm_pmu 115	-3.76017	Vm_pmu 47	3.58830

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 7 ^η		Επανάληψη 8 ^η		Επανάληψη 9 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 37	-4.57452	Qff 64-65	4.31873	Vm_pmu 115	-3.77916
Qff 64-65	4.32716	Vm_pmu 115	-3.78020	Vm_pmu 47	3.50077
Vm_pmu 115	-3.75807	Vm_pmu 47	3.47312	Qff 54-59	-3.33856
Vm_pmu 47	3.55409	Vm_pmu 83	3.33111	Vm_pmu 83	3.31378
Vm_pmu 83	3.33401	Qff 54-59	-3.29415	Qff 3-12	3.13548

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 10 ^η		Επανάληψη 11 ^η		Επανάληψη 12 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 47	3.48876	Qff 54-59	-3.35045	Vm_pmu 83	3.31268
Qff 54-59	-3.33604	Vm_pmu 83	3.31234	Qff 3-12	3.11784
Vm_pmu 83	3.30933	Qff 3-12	3.12403	Pff 64-65	-3.10877
Qff 3-12	3.14311	Pff 64-65	-3.10882	Pff 74-75	-3.03833
Pff 64-65	-3.10867	Pff 74-75	-3.03834	Pff 84-85	-3.01892

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 13 ^η		Επανάληψη 14 ^η		Επανάληψη 15 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 64-65	-3.10826	Qff 3-12	3.10340	Pff 74-75	-3.04030
Qff 3-12	3.10350	Pff 74-75	-3.04031	Pff 84-85	-3.02901
Pff 74-75	-3.04025	Pff 84-85	-3.02901	Vm_pmu 44	3.01337
Pff 84-85	-3.02897	Vm_pmu 44	3.01970	Pff 70-74	-3.01114
Vm_pmu 44	3.01916	Pff 70-74	-3.01114	Pff 71-72	-2.99076

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 16 ^η		Επανάληψη 17 ^η		Επανάληψη 18 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 84-85	-3.02959	Vm_pmu 44	3.01174	Pff 71-72	-2.98890
Vm_pmu 44	3.01180	Pff 71-72	-2.98920	Vm_pmu 106	2.94377
Pff 71-72	-2.98920	Vm_pmu 106	2.94117	Vm_pmu 111	-2.83708
Vm_pmu 106	2.94496	Vm_pmu 111	-2.83986	Qff 79-80	2.65426
Vm_pmu 111	-2.83604	Qff 79-80	2.65555	Pff 92-94	-2.46970

Στη συνέχεια, εκτελέστηκε ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης 2 βημάτων χωρίς όμως να εφαρμόζεται η μέθοδος των περιορισμών ισοτήτων, ώστε να δούμε κατά πόσο αυτή η μέθοδος βελτιώνει ή όχι το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια 7 σενάρια που περιγράφηκαν παραπάνω, και τα αποτελέσματα τόσο των δεικτών ακριβείας όσο και του διανύσματος κατάστασης φαίνονται στους επόμενους πίνακες.

Πίνακας 4.17 Αποτελέσματα σεναρίου για τους 118 ζυγούς χωρίς equality constraints

	Αρχεία μετρήσεων			
	1A	1B	1A	1ΣΤ
PMUs	5	10	20	30
E_{ang}	0.0000048270	0.0000034466	0.0000038519	0.0000006900
E_{mag}	0.0000020112	0.0000015287	0.0000009432	0.0000003613
NE_{ang} (%)	0.0534868819	0.0451966889	0.0477803172	0.0202225507
NE_{mag} (%)	0.0132404143	0.0115436940	0.0090670889	0.0056121816
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	0.74300	0.92700	1.04500	1.27300
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 1 ^ο	0.23794	0.31821	0.44538	0.60311
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 2 ^ο	0.37206	0.48084	0.46855	0.54164

	<i>IA</i>	<i>IG</i>	<i>IE</i>	<i>IZ</i>
<i>PMUs</i> (+ συμβατικές μετρήσεις)	5	10(+5)	20(+5)	30(+5)
E_{ang}	0.0000048270	0.0000028682	0.0000015569	0.0000016613
E_{mag}	0.0000020112	0.0000007444	0.0000003587	0.0000004916
NE_{ang} (%)	0.0534868819	0.0412303703	0.0303768489	0.0313782434
NE_{mag} (%)	0.0132404143	0.0080551078	0.0055919120	0.0065461101
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	0.74300	0.86600	1.17000	1.23000
Χρόνος εκτέλεσης 1 ^ο βήματος (s)	0.23794	0.34877	0.49984	0.58441
Χρόνος εκτέλεσης 2 ^ο βήματος (s)	0.37206	0.37802	0.54183	0.53876

Πίνακας 4.18 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints

Ζυγός	Ροή φορτίου	Αρχεία μετρήσεων						
	δ_{pf}	<i>IA</i>	<i>IB</i>	<i>IG</i>	<i>IA</i>	<i>IE</i>	<i>IST</i>	<i>IZ</i>
1	10,973	10,967	10,953	10,98	10,971	10,975	10,97	10,974
2	11,513	11,506	11,499	11,526	11,51	11,513	11,51	11,513
3	11,856	11,858	11,845	11,865	11,854	11,856	11,856	11,854
4	15,574	15,577	15,574	15,576	15,574	15,578	15,575	15,573
5	16,019	16,02	16,019	16,022	16,019	16,022	16,019	16,018
6	13,292	13,297	13,292	13,299	13,287	13,297	13,29	13,288
7	12,847	12,85	12,849	12,85	12,847	12,849	12,847	12,842
8	21,041	21,031	21,043	21,042	21,042	21,043	21,04	21,042
9	28,295	28,268	28,285	28,342	28,295	28,293	28,286	28,295
10	35,876	35,847	35,809	35,901	35,778	35,902	35,893	35,931
11	13,006	13,009	13,006	13,008	13,005	13,009	13,006	13,005
12	12,489	12,489	12,489	12,491	12,488	12,492	12,489	12,488
13	11,63	11,626	11,63	11,632	11,63	11,633	11,63	11,629
14	11,771	11,77	11,775	11,772	11,77	11,771	11,774	11,77
15	11,474	11,47	11,475	11,476	11,473	11,475	11,474	11,474
16	12,187	12,185	12,19	12,192	12,184	12,19	12,185	12,189
17	13,995	13,999	13,996	13,996	13,995	13,999	13,993	13,995
18	11,781	11,782	11,782	11,783	11,78	11,782	11,781	11,781
19	11,315	11,314	11,316	11,317	11,314	11,316	11,315	11,315
20	12,191	12,193	12,192	12,193	12,19	12,193	12,191	12,191
21	13,778	13,77	13,785	13,774	13,778	13,785	13,773	13,774
22	16,332	16,33	16,331	16,333	16,329	16,33	16,327	16,33

Πίνακας 4.18 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints (συνέχεια)

23	21,249	21,242	21,25	21,252	21,251	21,248	21,247	21,247
24	21,114	21,108	21,114	21,114	21,115	21,113	21,114	21,113
25	28,18	28,155	28,18	28,178	28,183	28,186	28,177	28,185
26	29,96	29,927	29,957	29,961	29,966	29,96	29,958	29,966
27	15,604	15,608	15,605	15,609	15,605	15,606	15,605	15,604
28	13,879	13,88	13,879	13,878	13,879	13,883	13,879	13,881
29	12,885	12,878	12,879	12,873	12,894	12,891	12,883	12,885
30	19,034	19,057	19,028	19,031	19,033	19,041	19,034	19,039
31	13,002	12,994	12,995	12,99	13,008	13,006	13	13,001
32	15,061	15,06	15,06	15,062	15,059	15,063	15,063	15,058
33	10,854	10,845	10,854	10,854	10,853	10,855	10,853	10,853
34	11,511	11,512	11,512	11,514	11,511	11,513	11,511	11,512
35	11,055	11,056	11,055	11,06	11,053	11,055	11,056	11,059
36	11,056	11,056	11,055	11,061	11,054	11,056	11,056	11,06
37	11,967	11,964	11,969	11,97	11,966	11,966	11,966	11,967
38	17,108	17,119	17,105	17,108	17,106	17,113	17,1	17,106
39	8,577	8,578	8,579	8,582	8,575	8,579	8,572	8,578
40	7,496	7,499	7,496	7,497	7,497	7,493	7,495	7,498
41	7,052	7,052	7,053	7,054	7,052	7,049	7,05	7,054
42	8,653	8,652	8,654	8,655	8,654	8,651	8,652	8,655
43	11,46	11,46	11,462	11,463	11,462	11,464	11,458	11,462
44	13,943	13,942	13,956	13,938	13,95	13,943	13,945	13,94
45	15,773	15,782	15,778	15,758	15,773	15,776	15,77	15,771
46	18,576	18,578	18,578	18,588	18,578	18,575	18,577	18,57
47	20,799	20,802	20,805	20,801	20,801	20,795	20,8	20,799
48	20,019	20,024	20,034	20,018	20,02	20,021	20,015	20,019
49	21,022	21,023	21,022	21,025	21,024	21,019	21,02	21,022
50	18,983	18,978	18,975	18,991	18,961	18,962	18,986	18,984
51	16,364	16,381	16,357	16,359	16,369	16,364	16,364	16,371
52	15,411	15,429	15,402	15,407	15,413	15,409	15,411	15,412
53	14,436	14,466	14,439	14,434	14,433	14,436	14,438	14,432
54	15,348	15,377	15,341	15,348	15,344	15,346	15,345	15,345
55	15,058	15,088	15,051	15,059	15,057	15,056	15,056	15,055
56	15,245	15,274	15,239	15,245	15,242	15,243	15,243	15,242
57	16,449	16,462	16,43	16,453	16,447	16,446	16,45	16,455
58	15,592	15,62	15,582	15,59	15,593	15,591	15,587	15,593
59	19,448	19,469	19,45	19,449	19,447	19,438	19,442	19,448
60	23,23	23,226	23,229	23,23	23,231	23,22	23,23	23,229
61	24,121	24,121	24,12	24,121	24,122	24,111	24,122	24,12
62	23,505	23,51	23,504	23,505	23,506	23,494	23,505	23,504
63	22,827	22,842	22,822	22,827	22,826	22,799	22,823	22,827
64	24,593	24,594	24,595	24,592	24,593	24,58	24,594	24,596
65	27,719	27,727	27,717	27,721	27,719	27,718	27,719	27,717
66	27,559	27,564	27,558	27,56	27,559	27,559	27,559	27,558
67	24,919	24,916	24,918	24,918	24,92	24,909	24,919	24,919

Πίνακας 4.18 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints (συνέχεια)

68	27,598	27,605	27,596	27,599	27,598	27,596	27,597	27,597
69	30	29,969	29,988	29,999	30,002	30,004	29,999	29,998
70	22,618	22,604	22,622	22,626	22,614	22,62	22,614	22,617
71	22,207	22,196	22,215	22,214	22,203	22,206	22,209	22,205
72	21,109	21,102	21,109	21,109	21,111	21,108	21,106	21,106
73	21,995	21,985	22,004	22,002	21,992	21,994	21,997	21,995
74	21,669	21,664	21,669	21,67	21,656	21,659	21,678	21,661
75	22,93	22,918	22,935	22,939	22,927	22,93	22,926	22,929
76	21,799	21,786	21,802	21,81	21,798	21,799	21,785	21,802
77	26,751	26,752	26,741	26,741	26,75	26,75	26,753	26,754
78	26,447	26,447	26,436	26,436	26,443	26,443	26,447	26,448
79	26,745	26,743	26,736	26,733	26,741	26,744	26,74	26,745
80	28,99	28,997	28,986	28,988	28,994	28,991	28,988	28,988
81	28,145	28,155	28,143	28,14	28,146	28,146	28,146	28,144
82	27,272	27,272	27,263	27,265	27,273	27,274	27,273	27,271
83	28,464	28,457	28,454	28,465	28,458	28,473	28,468	28,462
84	31	30,996	31,009	30,964	30,999	31,024	31,001	31,001
85	32,556	32,553	32,574	32,538	32,55	32,55	32,556	32,551
86	31,186	31,191	31,207	31,184	31,174	31,185	31,185	31,181
87	31,445	31,452	31,471	31,445	31,435	31,446	31,452	31,434
88	35,69	35,706	35,688	35,675	35,714	35,688	35,695	35,657
89	39,748	39,755	39,709	39,726	39,751	39,742	39,752	39,747
90	33,338	33,312	33,339	33,34	33,335	33,343	33,333	33,34
91	33,351	33,325	33,351	33,352	33,348	33,356	33,346	33,353
92	33,881	33,855	33,875	33,878	33,881	33,885	33,883	33,883
93	30,849	30,837	30,857	30,875	30,864	30,868	30,838	30,843
94	28,682	28,684	28,681	28,684	28,68	28,683	28,679	28,679
95	27,71	27,707	27,703	27,702	27,709	27,71	27,707	27,709
96	27,543	27,541	27,537	27,537	27,543	27,543	27,541	27,543
97	27,916	27,924	27,909	27,907	27,92	27,917	27,91	27,915
98	27,433	27,432	27,431	27,435	27,432	27,435	27,432	27,434
99	27,067	27,064	27,064	27,075	27,063	27,053	27,061	27,071
100	28,059	28,057	28,057	28,059	28,056	28,059	28,055	28,059
101	29,647	29,642	29,639	29,637	29,638	29,648	29,64	29,632
102	32,365	32,355	32,363	32,358	32,356	32,383	32,354	32,366
103	24,318	24,311	24,316	24,318	24,315	24,318	24,313	24,317
104	21,748	21,747	21,746	21,748	21,745	21,749	21,742	21,747
105	20,644	20,641	20,642	20,644	20,641	20,644	20,64	20,642
106	20,383	20,383	20,384	20,386	20,383	20,382	20,38	20,384
107	17,583	17,59	17,598	17,603	17,581	17,586	17,586	17,575
108	19,443	19,443	19,439	19,443	19,44	19,452	19,44	19,441
109	18,991	18,991	18,987	18,989	18,984	18,995	18,988	18,991
110	18,144	18,145	18,144	18,144	18,139	18,146	18,14	18,142
111	19,789	19,784	19,787	19,784	19,779	19,789	19,785	19,787
112	15,045	15,056	15,047	15,044	15,037	15,047	15,033	15,046

Πίνακας 4.18 Τελικά αποτελέσματα φασικών γωνιών τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints (συνέχεια)

113	13,993	13,996	13,993	13,993	13,992	13,997	13,99	13,992
114	14,726	14,73	14,73	14,729	14,726	14,73	14,728	14,721
115	14,718	14,721	14,722	14,72	14,718	14,722	14,719	14,713
116	27,163	27,174	27,155	27,162	27,159	27,162	27,16	27,161
117	10,948	10,952	10,944	10,93	10,932	10,952	10,935	10,936
118	21,942	21,928	21,945	21,953	21,944	21,938	21,928	21,942

Πίνακας 4.19 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints

<i>Ζυγός</i>	<i>Ροή φορτίου</i>	<i>Αρχεία μετρήσεων</i>						
	<i>V_{pf}</i>	<i>1A</i>	<i>1B</i>	<i>1Γ</i>	<i>1Δ</i>	<i>1E</i>	<i>1ΣΤ</i>	<i>1Ζ</i>
1	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
2	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
3	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
4	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
5	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002
6	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
7	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
8	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
9	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043
10	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
11	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
12	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
13	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
14	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
15	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
16	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
17	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995
18	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
19	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962
20	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957
21	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958
22	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969
23	0,999	1	1	0,999	1	0,999	0,999	0,999
24	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
25	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
26	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
27	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968	0,968
28	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962	0,962
29	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963
30	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985

Πίνακας 4.19 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints (συνέχεια)

31	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
32	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963	0,963
33	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
34	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
35	0,98	0,981	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
36	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
37	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
38	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961
39	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
40	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
41	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
42	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
43	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977	0,977
44	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
45	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986
46	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
47	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
48	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021	1,021
49	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025	1,025
50	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001	1,001
51	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
52	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957	0,957
53	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946	0,946
54	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
55	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952
56	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954	0,954
57	0,971	0,971	0,97	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
58	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959	0,959
59	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
60	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
61	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995
62	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998	0,998
63	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969	0,969
64	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
65	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
66	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
67	1,02	1,019	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02
68	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003
69	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035	1,035
70	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
71	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987
72	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
73	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
74	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958
75	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967

Πίνακας 4.19 Τελικά αποτελέσματα μέτρων τάσης για όλα τα αρχεία μετρήσεων χωρίς equality constraints (συνέχεια)

76	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943
77	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006	1,006
78	1,003	1,003	1,004	1,003	1,003	1,003	1,003	1,003
79	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009	1,009
80	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
81	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997
82	0,989	0,988	0,989	0,988	0,988	0,988	0,988	0,989
83	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984	0,984
84	0,98	0,98	0,98	0,979	0,98	0,98	0,98	0,98
85	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
86	0,987	0,987	0,987	0,987	0,986	0,987	0,987	0,987
87	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015	1,015
88	0,987	0,987	0,988	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987
89	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
90	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985	0,985
91	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
92	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
93	0,985	0,985	0,986	0,986	0,985	0,985	0,985	0,985
94	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
96	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992	0,992
97	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011	1,011
98	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,023	1,023
99	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
100	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
101	0,991	0,991	0,992	0,991	0,991	0,991	0,991	0,991
102	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989	0,989
103	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
104	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971	0,971
105	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965	0,965
106	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961
107	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952	0,952
108	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966	0,966
109	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967	0,967
110	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973	0,973
111	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
112	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975	0,975
113	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993	0,993
114	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
115	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
116	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005	1,005
117	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974	0,974
118	0,949	0,949	0,95	0,949	0,95	0,949	0,949	0,949

Στη συνέχεια, φαίνονται τα 5 μεγαλύτερα κανονικοποιημένα υπόλοιπα για κάθε επανάληψη της μεθόδου LNR και για τα δυο στάδια του αλγορίθμου χωρίς equality constraints:

Πίνακας 4.20 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1A

Σενάριο 1A – 1^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Imf 42-49	-1.93120765
Imf 42-49	1.92986842
Iaf 42-49	1.51151560
Iaf 42-49	-1.50744182
Iat 103-100	0.00000000

Σενάριο 1A – 2^ο στάδιο αλγορίθμου			
Επανάληψη 1^η		Επανάληψη 2^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 7-12	3.11861669	Qff 45-46	-2.69858660
Qff 6-7	3.11458338	Pff 39-40	2.67118597
Qff 5-6	3.08324434	Vm_pmu 64	2.63267815
Vm_pmu 12	2.74662636	Qff 23-24	2.47089519
Qff 23-24	2.72478298	Vm_pmu 40	2.46057497

Πίνακας 4.21 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1B

Σενάριο 1B – 1^ο στάδιο αλγορίθμου			
Επανάληψη 1^η		Επανάληψη 2^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 68	-3.05883638	Iaf 23-25	2.55781570
Iaf 23-25	2.58167157	Iaf 27-32	2.39575367
Iaf 27-32	2.36969980	Iaf 23-32	-2.39463445
Iaf 23-32	-2.36846314	Iaf 25-27	1.89386071
Iaf 25-27	1.94589481	Vm_pmu 30	-1.61181218

Σενάριο 1B – 2^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 35-36	2.94947347
Qff 35-37	-2.94550778
Qff 34-36	-2.93706684
Va_pmu 25	-2.50090815
Va_pmu 41	2.48182139

Πίνακας 4.22 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Γ

Σενάριο 1Γ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 23-25	-9.30479456	Iat 27-25	4.21676989	Iat 25-23	-2.55723324
Iat 25-23	-7.17577936	Iaf 25-27	4.10241139	Iaf 25-27	2.42966417
Iat 27-25	6.12798636	Imf 30-38	-1.80805288	Iaf 23-32	-2.28342543
Iaf 27-32	-3.78811687	Va_pmu 27	1.80316872	Iaf 27-32	2.27330865
Iaf 23-32	3.78486824	Imt 65-38	1.80256866	Va_pmu 27	1.90465749

Σενάριο 1Γ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου	
Επανάληψη 1 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qff 80-96	2.94181999
Pff 34-36	-2.77118861
Qff 77-80	2.68945934
Pff 15-17	-2.54648955
Pff 95-96	2.50469017

Πίνακας 4.23 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Δ

Σενάριο 1Δ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 23-25	7.69006608	Iat 25-26	4.25390180	Iat 46-45	3.86808776
Iat 25-23	5.14551766	Iat 30-26	-4.24047001	Iaf 45-46	3.83395270
Iat 25-26	4.76956182	Iat 46-45	3.86808776	Vm_pmu 71	-2.79639231
Iat 30-26	-4.75796753	Iaf 45-46	3.83395270	Iaf 8-30	2.69860731
Iat 46-45	3.86808776	Vm_pmu 27	2.98211597	Va_pmu 51	2.65854121

Σενάριο 1Δ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)	
Επανάληψη 4 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 71	-2.79639231
Iaf 8-30	2.69860731
Iat 30-8	2.64804223
Va_pmu 51	2.58742781
Imt 51-49	-2.36712739

Σενάριο 1Δ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου			
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 107	3.15407126	Qff 77-78	2.83825433
Qff 77-78	2.91983393	Qff 8-30	2.81960772
Qff 78-79	2.89211666	Qff 78-79	2.81005247
Qff 79-80	2.86907751	Qff 79-80	2.78672879
Qff 8-30	2.81948782	Qff 91-92	2.47610171

Πίνακας 4.24 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1E

Σενάριο 1E – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 8-30	-5.58551893	Iaf 38-65	5.19395286	Iat 90-89	3.59215686
Iat 30-8	-5.50841149	Iat 65-38	5.01931522	Iat 90-89	-3.55457735
Iaf 38-65	5.32174924	Iat 90-89	3.57336710	Imt 65-64	-3.19451248
Iat 65-38	5.25988163	Iat 90-89	-3.57336710	Va_pmu 61	-2.73579440
Iat 90-89	3.57336710	Imt 65-64	-3.06433447	Imt 61-64	2.48539759

Σενάριο 1E – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)			
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iat 90-89	-3.77601871	Iaf 30-38	2.49264087
Imt 65-64	-3.19451248	Iat 38-30	2.44028346
Va_pmu 61	-2.73579440	Iat 27-25	2.27277422
Imt 61-64	2.48539759	Iaf 23-25	-2.17340310
Iaf 30-38	2.47060240	Va_pmu 71	1.88717135

Σενάριο 1E – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Pff 62-66	3.94378450	Vm_pmu 65	3.29775852	Qff 91-92	2.96587609
Pff 65-66	-3.82800008	Qff 91-92	2.97465921	Pff 95-96	2.92153464
Vm_pmu 65	3.35297749	Pff 95-96	2.93108435	Pff 94-95	2.89728783
Qff 91-92	2.97487955	Pff 94-95	2.90658642	Pff 26-30	2.86567346
Pff 95-96	2.86834700	Pff 26-30	2.86544092	Qff 92-93	2.74132786

Πίνακας 4.25 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1ΣΤ

Σενάριο 1ΣΤ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 23-25	-8.30741985	Iat 25-26	-4.83948409	Iat 23-22	-3.84674497
Iat 25-26	-6.06425289	Iat 30-26	4.82124069	Iaf 22-23	-3.79648839
Iat 30-26	6.05216447	Iaf 30-17	-4.78451766	Iaf 64-61	3.57118415
Iaf 30-17	-5.89106029	Iaf 31-32	-4.71496824	Iat 61-64	3.32031963
Iaf 31-32	-5.81881795	Iat 31-17	4.63007608	Iaf 64-65	-3.21951561

Σενάριο 1ΣΤ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 64-61	3.57107164	Iaf 64-65	-3.12829597	Iaf 25-27	2.85883876
Iat 61-64	3.32042882	Iaf 25-27	2.86746254	Iaf 45-46	2.84180516
Iaf 64-65	-3.22023811	Iat 65-64	-2.85094776	Iat 27-25	2.75572686
Iaf 25-27	2.86611353	Iaf 45-46	2.84394191	Iaf 60-61	2.49429924
Iaf 45-46	2.84361499	Iat 27-25	2.75911965	Iaf 47-49	2.31794576

Σενάριο 1ΣΤ – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου			
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Qft 61-62	-3.74647227	Vm_pmu 77	-2.97327369
Qft 60-62	3.65028775	Pff 94-96	2.78098354
Qff 60-61	3.48401235	Qff 92-94	-2.75817494
Vm_pmu 77	-2.97195498	Qff 39-40	-2.60741200
Pff 94-96	2.78106963	Vm_pmu 22	2.49505703

Πίνακας 4.26 Κανονικοποιημένα υπόλοιπα για το αρχείο 1Ζ

Σενάριο 1Ζ – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου					
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η		Επανάληψη 3 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 64-65	-14.94559796	Iaf 23-25	12.62880918	Iaf 38-65	4.95295117
Iat 65-64	-13.26411295	Iat 25-23	8.79329257	Iaf 25-27	-4.41460134
Iaf 23-25	12.65166134	Iat 27-25	-6.20826785	Iat 65-38	4.38882693
Iat 25-23	8.80176234	Iaf 23-32	-5.57824555	Iat 27-25	-4.17949500
Iat 27-25	-6.18638648	Iaf 38-65	4.98365583	Iaf 104-105	-3.32574012

Σενάριο 1Z – 1 ^ο στάδιο αλγορίθμου (συνέχεια)					
Επανάληψη 4 ^η		Επανάληψη 5 ^η		Επανάληψη 6 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Iaf 25-27	-4.47424716	Iaf 104-105	-3.32538290	Iaf 47-49	2.88438680
Iat 27-25	-4.12297089	Iat 106-105	3.32436147	Iat 25-23	-2.76299369
Iaf 104-105	-3.32538290	Iat 104-100	3.31426649	Imt 90-89	-2.75122603
Iat 106-105	3.32436147	Iat 106-100	-3.30544896	Iaf 45-49	-2.71442692
Iat 104-100	3.31426649	Iaf 47-49	2.88438680	Iat 27-25	-2.69020247

Σενάριο 1Z – 2 ^ο στάδιο αλγορίθμου			
Επανάληψη 1 ^η		Επανάληψη 2 ^η	
Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου	Είδος μέτρησης	Τιμή υπολοίπου
Vm_pmu 81	3.44669657	Vm_pmu 5	-2.94144403
Vm_pmu 5	-2.94552487	Pff 66-67	-2.92143717
Pff 66-67	-2.92162663	Qff 46-47	2.54117818
Qff 68-81	2.66687137	Pff 48-49	2.33633952
Qff 46-47	2.54680080	Pff 49-54	2.29912655

4.2.2 Δίκτυο 2383 ζυγών IEEE

Με την ίδια λογική που σχηματίστηκαν τα αρχεία μετρήσεων για το δίκτυο των 118 ζυγών IEEE, φτιάχτηκε ένα σενάριο για το δίκτυο των 2383 ζυγών IEEE και με αυτό εξετάσαμε την αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου 2 βημάτων για τα πολύ μεγάλα δίκτυα. Για λόγους οικονομίας χώρου, δεν θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των διανυσμάτων κατάστασης για κάθε αρχείο, ενώ και το σύστημα των μετρήσεων φαίνεται συνοπτικά στο παράρτημα. Επίσης, το παρακάτω σενάριο εκτελέστηκε χωρίς την μέθοδο ανίχνευσης και εντοπισμού σφαλμάτων. Οι δείκτες ακριβείας και οι χρόνοι εκτέλεσης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.27 Αποτελέσματα σεναρίου για τους 2383 ζυγούς με equality constraints

	Αρχεία μετρήσεων			
	<i>IA</i>	<i>IB</i>	<i>IA</i>	<i>IST</i>
<i>PMUs</i>	10	30	50	70
E_{ang}	0.0000440390	0.0000406551	0.0000356923	0.0000284736
E_{mag}	0.0000160239	0.0000142848	0.0000134557	0.0000092987
NE_{ang} (%)	0.0301379850	0.0289569646	0.0271320436	0.0242335209
NE_{mag} (%)	0.0082469915	0.0077865944	0.0075572529	0.0062823664
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	80.41600	82.08200	80.55700	82.14400
Χρόνος εκτέλεσης βήματος $1^{οο}$ (s)	7.21215	7.85170	8.16223	9.16106
Χρόνος εκτέλεσης βήματος $2^{οο}$ (s)	11.54489	12.07200	12.24525	12.49679

	<i>IA</i>	<i>IF</i>	<i>IE</i>	<i>IZ</i>
<i>PMUs</i> (+ συμβατικές μετρήσεις)	10	30(+10)	50(+10)	70(+10)
E_{ang}	0.0000440390	0.0000304684	0.0000300411	0.0000253596
E_{mag}	0.0000160239	0.0000122424	0.0000116713	0.0000105898
NE_{ang} (%)	0.0301379850	0.0250680323	0.0248916152	0.0228700187
NE_{mag} (%)	0.0082469915	0.0072085016	0.0070383364	0.0067043343
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	80.41600	79.64100	81.37800	81.41000
Χρόνος εκτέλεσης βήματος $1^{οο}$ (s)	7.21215	7.80609	8.12823	8.98363
Χρόνος εκτέλεσης βήματος $2^{οο}$ (s)	11.54489	12.06975	12.09365	12.68437

Τα ίδια ακριβώς αρχεία μετρήσεων εκτελέστηκαν με τον υβριδικό αλγόριθμο 2 βημάτων χωρίς όμως τη μέθοδο των περιορισμών ισοτήτων και τα αποτελέσματα δίνονται παρακάτω:

Πίνακας 4.28 Αποτελέσματα σεναρίου για τους 2383 ζυγούς χωρίς equality constraints

	Αρχεία μετρήσεων			
	<i>IA</i>	<i>IB</i>	<i>IA</i>	<i>IST</i>
<i>PMUs</i>	10	30	50	70
E_{ang}	0.0000720487	0.0000932217	0.0000538373	0.0000331632
E_{mag}	0.0000209666	0.0000203640	0.0000159812	0.0000112016
NE_{ang} (%)	0.0385485991	0.0438484143	0.0333224750	0.0261531449
NE_{mag} (%)	0.0094335417	0.0092969889	0.0082360043	0.0068952582
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	83.25600	85.37300	86.46100	87.06200
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 1 ^ο	7.23344	8.16815	8.53489	9.08512
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 2 ^ο	12.11723	12.72122	12.88529	13.48907

	<i>IA</i>	<i>IF</i>	<i>IE</i>	<i>IZ</i>
<i>PMUs</i> (+ συμβατικές μετρήσεις)	10	30(+10)	50(+10)	70(+10)
E_{ang}	0.0000720487	0.0000421917	0.0000517492	0.0000458784
E_{mag}	0.0000209666	0.0000149999	0.0000142102	0.0000117906
NE_{ang} (%)	0.0385485991	0.0294991175	0.0326698712	0.0307609364
NE_{mag} (%)	0.0094335417	0.0079791165	0.0077662481	0.0070742193
Συνολικός χρόνος εκτέλεσης (s)	83.25600	85.00200	86.35500	87.04300
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 1 ^ο	7.23344	7.96254	8.32171	9.37703
Χρόνος εκτέλεσης βήματος (s) 2 ^ο	12.11723	12.58818	12.88218	13.54880

Τέλος, η περίσσεια των μετρήσεων και για τα 7 αρχεία παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.29 Περίσσεια μετρήσεων των 7 αρχείων για τους 2383 ζυγούς

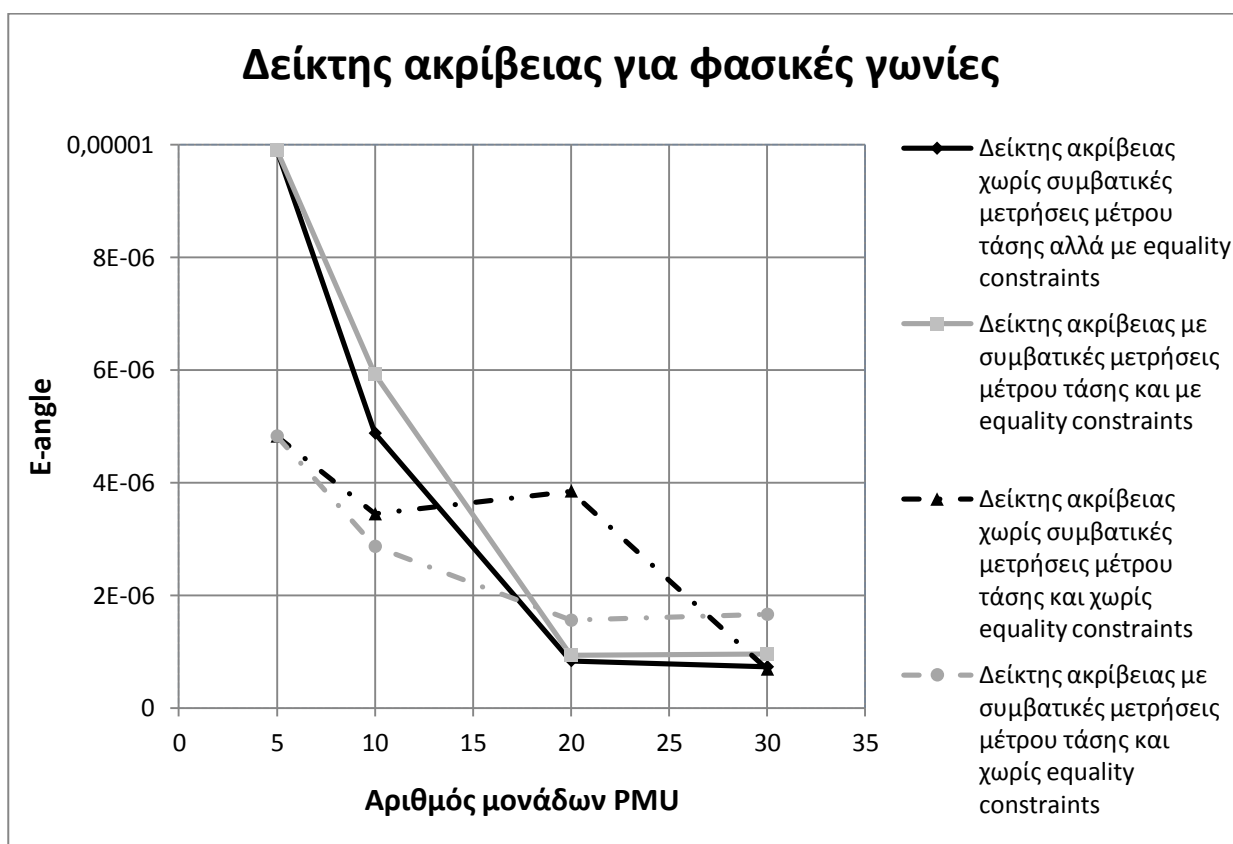
Αρχεία	1Α	1Β	1Γ	1Δ	1Ε	1ΣΤ	1Ζ
Περίσσεια	1,220	1,280	1,281	1,321	1,323	1,363	1,365

5. Επίλογος

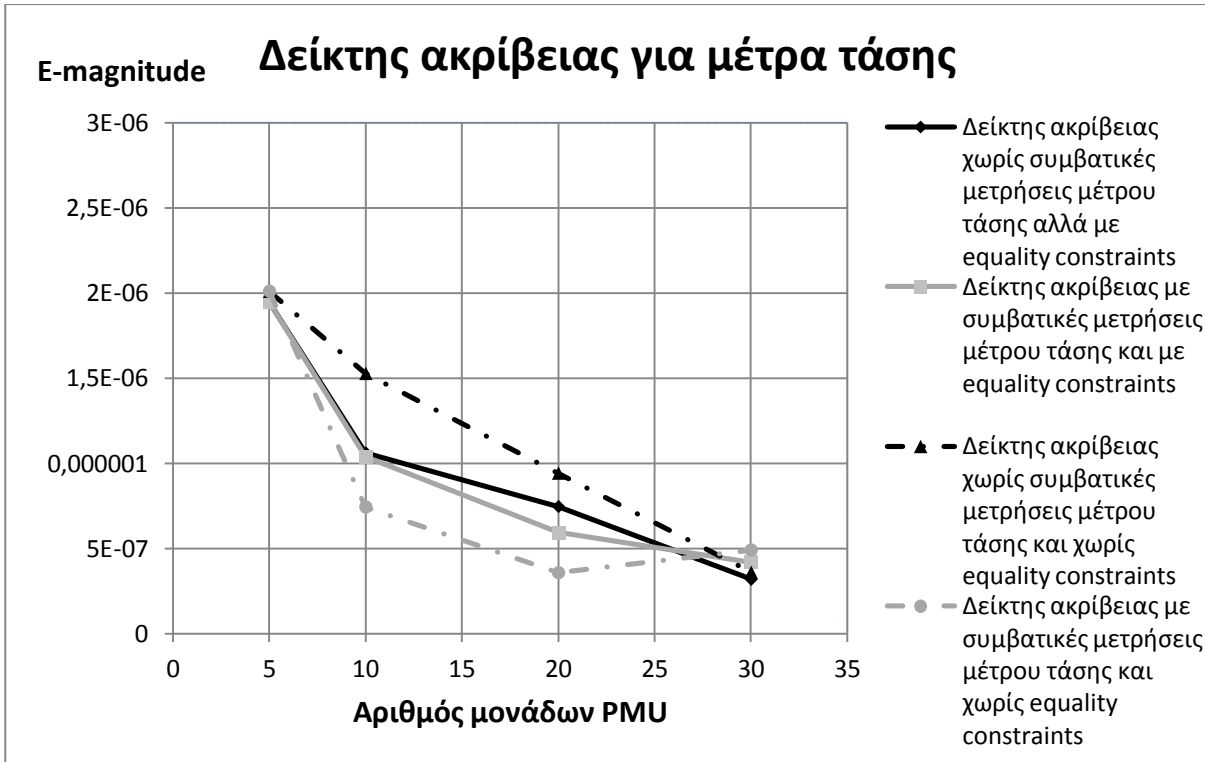
5.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο κεφάλαιο 4 έγινε η παρουσίαση του υβριδικού αλγορίθμου 2 βημάτων που φτιάχτηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, και χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση ενός σεναρίου για το δίκτυο των 118 ζυγών της IEEE και ενός σεναρίου για το δίκτυο των 2383 ζυγών της IEEE. Όπως είδαμε, κάθε σενάριο είχε 7 αρχεία μετρήσεων, και αυτό που θέλαμε να δούμε ήταν η επίδραση που θα έχει η αύξηση της περισσειας των μετρήσεων, η χρήση συμβατικών μετρήσεων μέτρου τάσης και η χρήση της μεθόδου των περιορισμών ισότητας στο αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης.

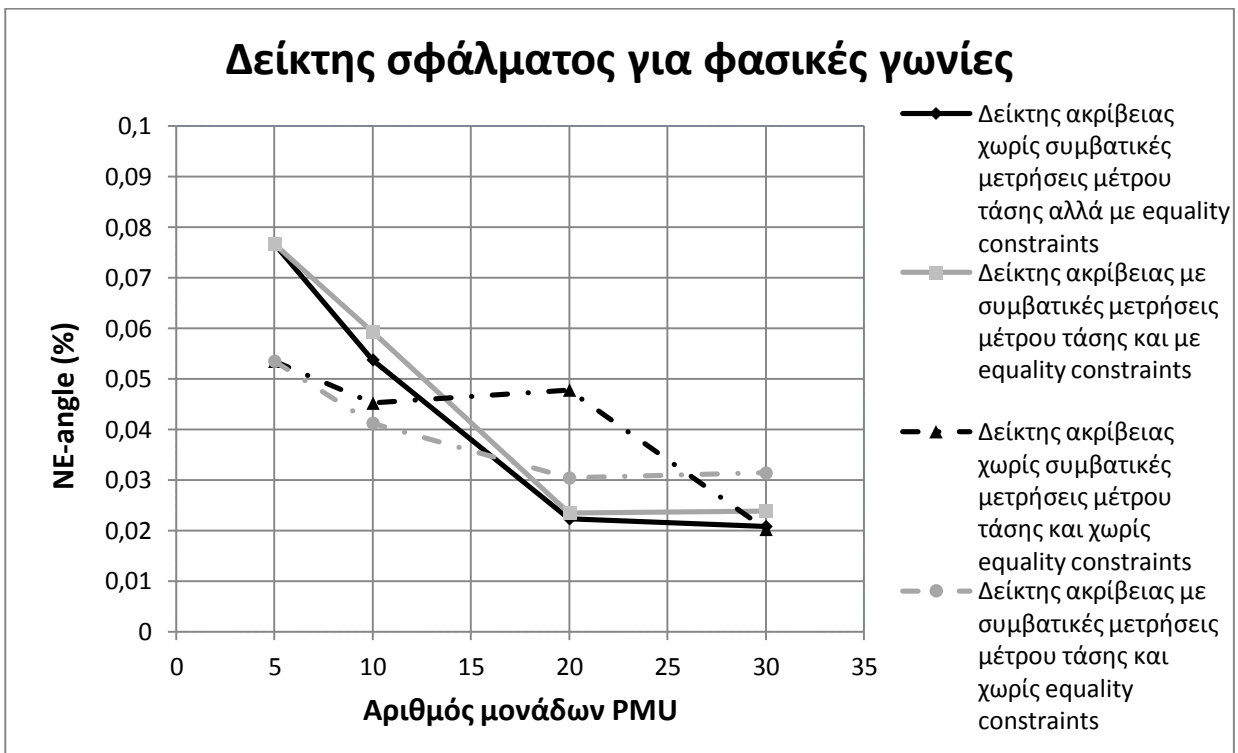
Για την σύγκριση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιήσουμε τα παρακάτω διαγράμματα που δείχνουν τους δείκτες ακρίβειας και τους χρόνους εκτέλεσης σε όλες τις περιπτώσεις:



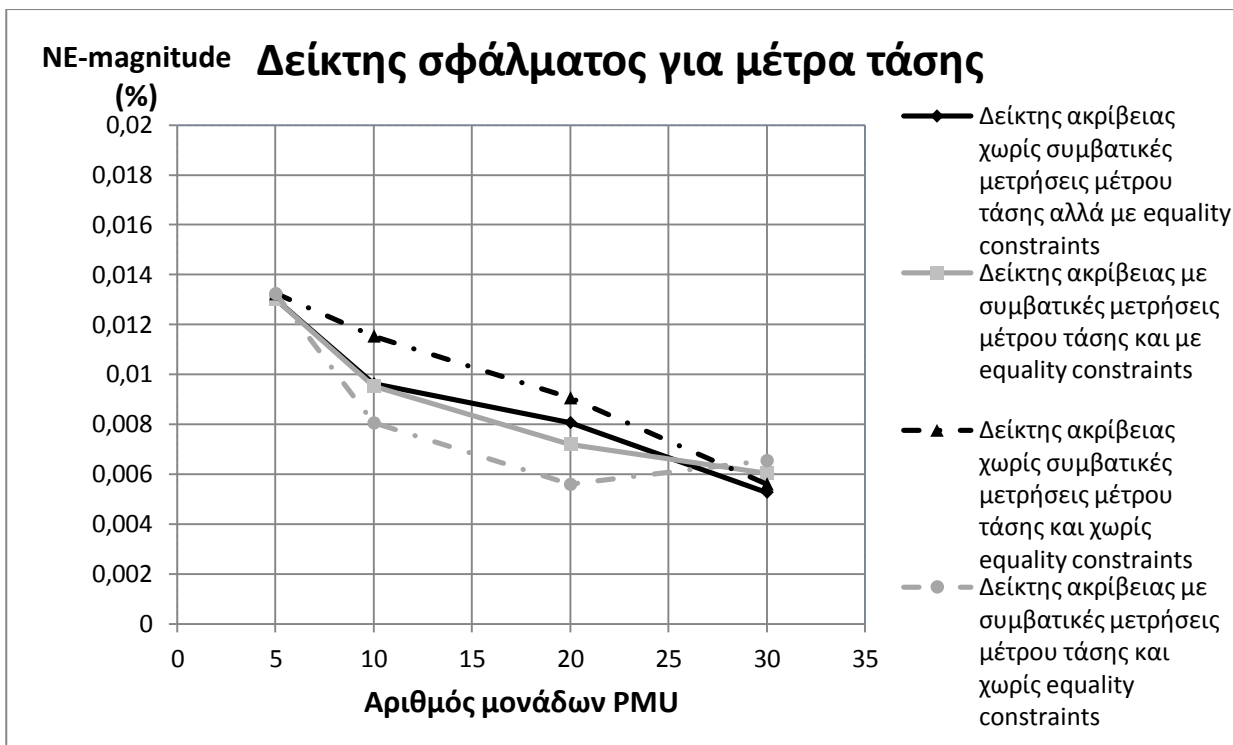
Σχήμα 5.1 Δείκτης ακρίβειας για τις φασικές γωνίες τάσης



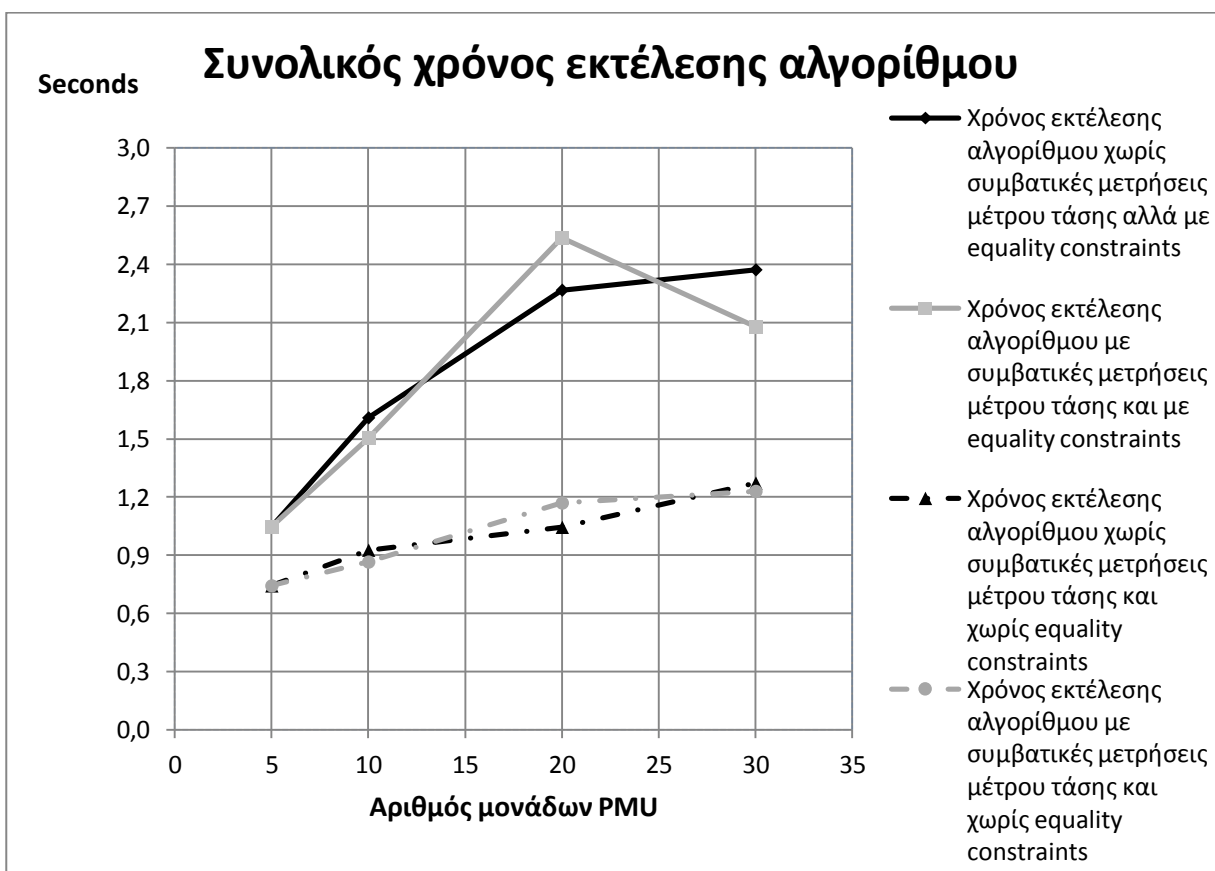
Σχήμα 5.2 Δείκτης ακρίβειας για τα μέτρα τάσης



Σχήμα 5.3 Κανονικοποιημένα σφάλματα για τις φασικές γωνίες τάσης



Σχήμα 5.4 Κανονικοποιημένα σφάλματα για τα μέτρα τάσης



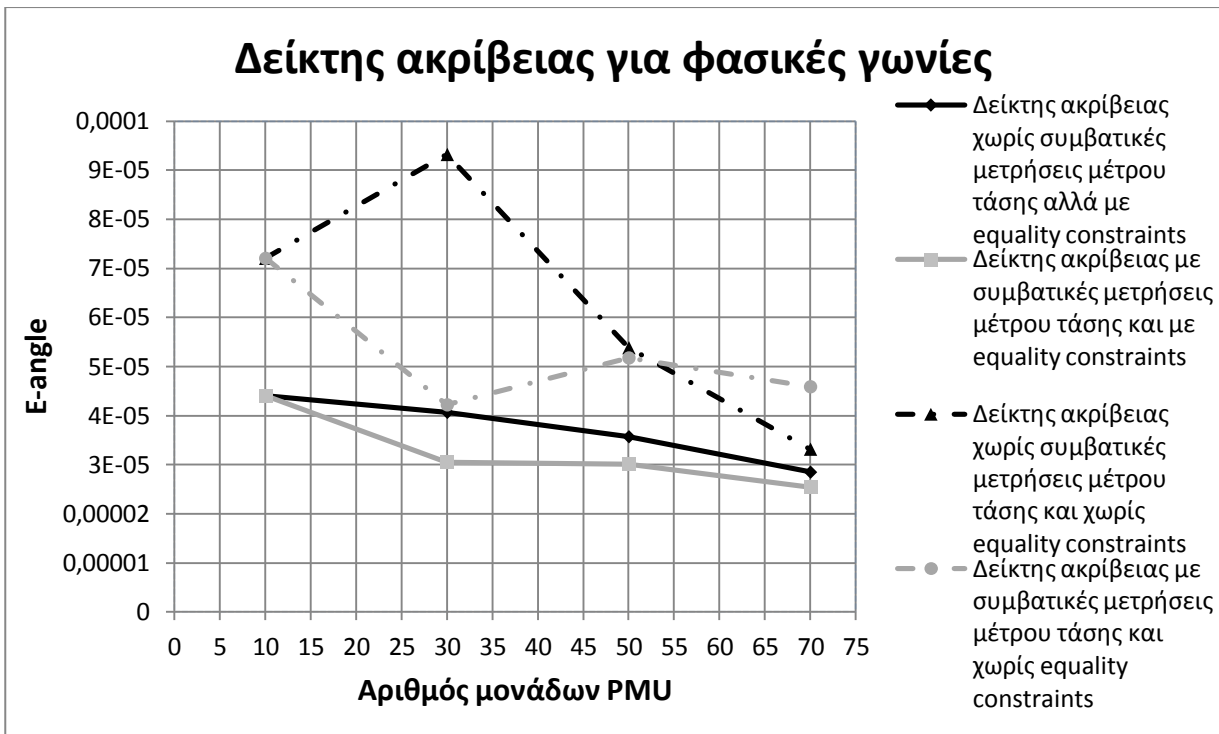
Σχήμα 5.5 Συνολικός χρόνος εκτέλεσης αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα

Βλέπουμε λοιπόν ότι η αύξηση των μονάδων PMU που τοποθετούνται στο δίκτυο συνεπάγεται, όπως είναι λογικό, και μείωση των δεικτών ακρίβειας, που σημαίνει ότι το αποτέλεσμα του διανύσματος κατάστασης είναι πιο ακριβές, και άρα πιο κοντά στο αντίστοιχο της ροής φορτίου. Ενδιαφέρον επίσης έχει το γεγονός ότι η χρήση των περιορισμών ισότητας βελτιώνει στις περισσότερες περιπτώσεις το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης, ενώ φαίνεται να παίζει μεγαλύτερο ρόλο όσο αυξάνεται η περίσσεια των μετρήσεων και ο αριθμός των μονάδων PMU. Τέλος, η χρήση συμβατικών μετρήσεων παρατηρούμε ότι βελτιώνει το αποτέλεσμα μόνο για τα μέτρα τάσης και κυρίως όταν έχουμε σχετικά λίγες μονάδες PMU, ενώ σε διαφορετικές περιπτώσεις και κυρίως στους δείκτες ακρίβειας των φασικών γωνιών τάσης, δεν φαίνεται να έχει καμία βελτίωση, όπως ήταν αναμενόμενο.

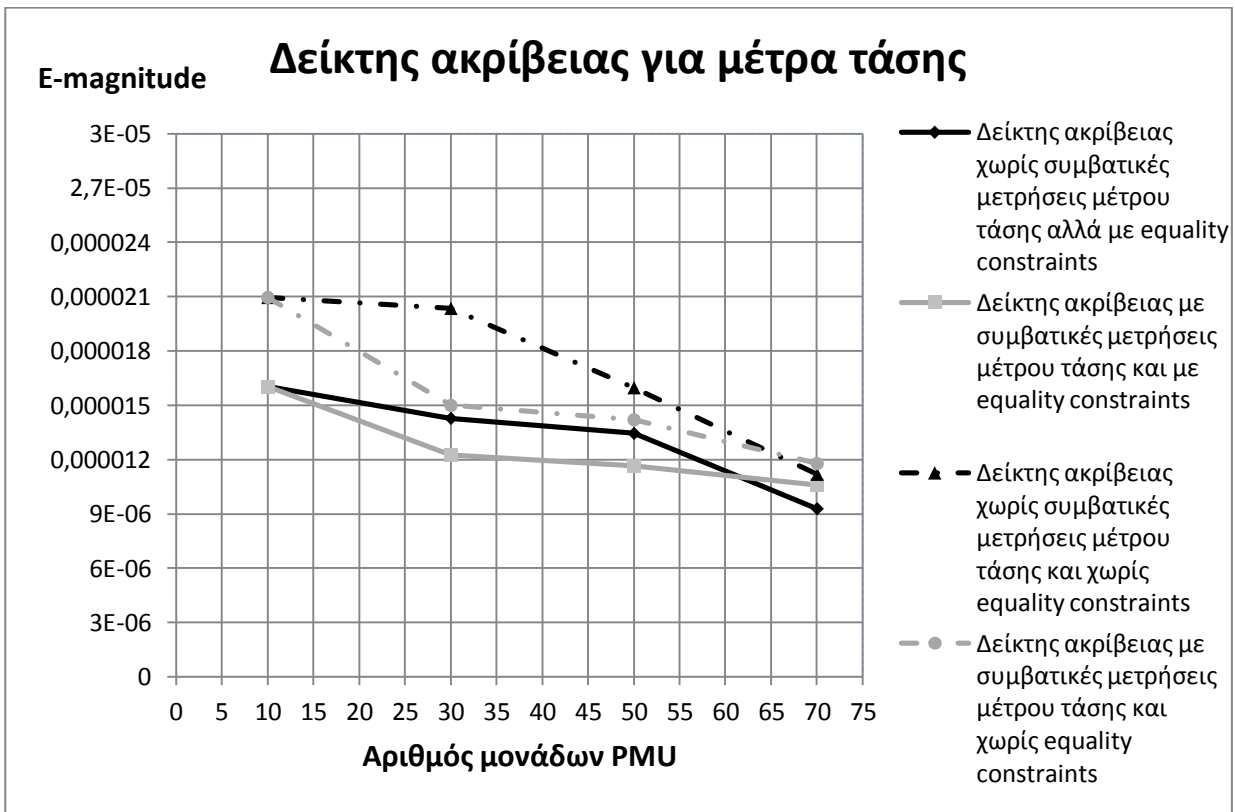
Επίσης, παρατηρούμε ότι ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου αυξάνεται όσο αυξάνεται και η περίσσεια των μετρήσεων, ενώ τα equality constraints φαίνεται να επιβαρύνουν σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης. Γενικά όμως, ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι αρκετά μικρός (κάτω από 2,5 δευτερόλεπτα σε όλες τις περιπτώσεις) αν αναλογιστούμε ότι εφαρμόζεται τόσο η μέθοδος ανίχνευσης και εντοπισμού σφαλμάτων LNR όσο και η μέθοδος περιορισμών ισότητων, ενώ ο χρόνος εκτέλεσης του πρώτου βήματος είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο του δεύτερου, και δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση τα 0,45 δευτερόλεπτα.

Τέλος, όπως είπαμε στο κεφάλαιο 4, το πρώτο αρχείο μετρήσεων σχηματίστηκε ώστε να έχει τη λιγότερο δυνατή περίσσεια μετρήσεων και το δίκτυο να είναι οριακά παρατηρήσιμο, ενώ στο δεύτερο (και στη συνέχεια όλα τα υπόλοιπα) έχουμε αντικαταστήσει όλες τις μετρήσεις ρευμάτων με μετρήσεις ροών ισχύος για να εξασφαλίσουμε την παρατηρησιμότητα, και επιπλέον τοποθετούμε μερικές μονάδες PMU σε τυχαία σημεία για να δούμε πόσο επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Πράγματι, όπως φαίνεται και από όλους τους δείκτες ακριβείας και από τα διαγράμματα παραπάνω, η αύξηση της περισσειας και η τοποθέτηση μονάδων PMU σε ένα οριακό δίκτυο βελτιώνει αισθητά το τελικό αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης.

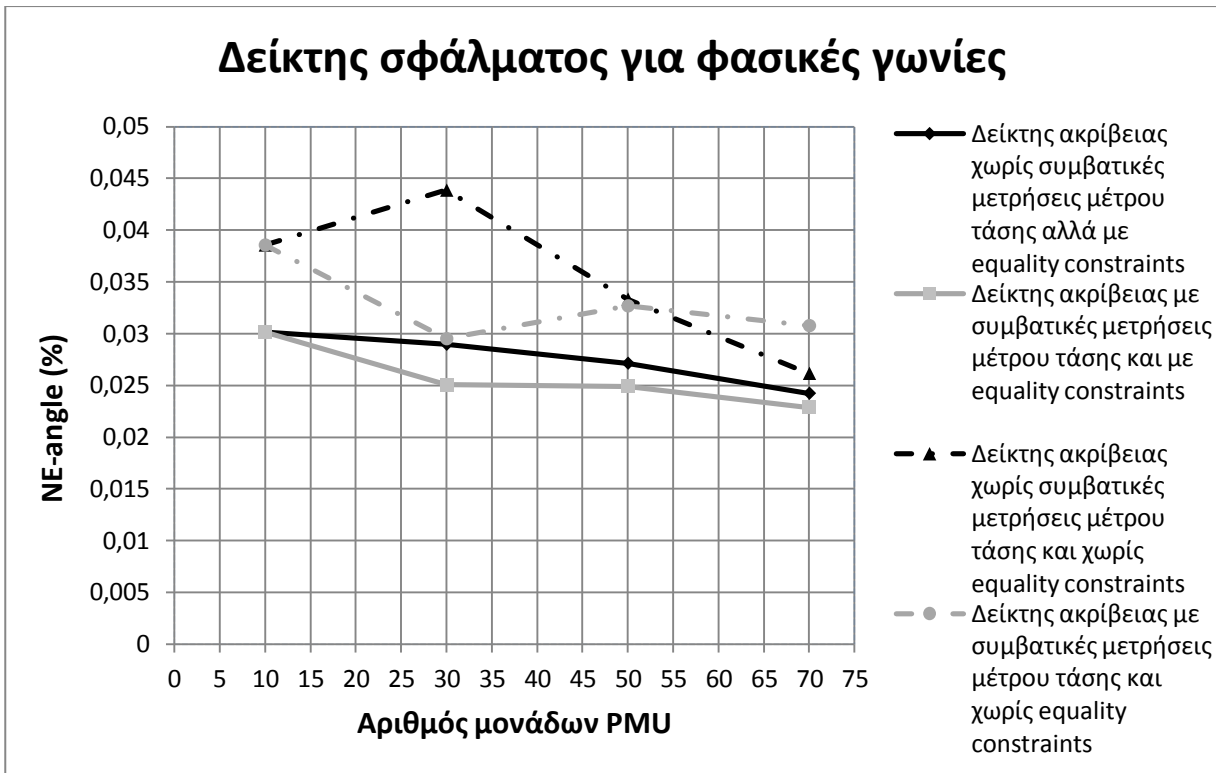
Στη συνέχεια, ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα για το δίκτυο των 2383 ζυγών της IEEE:



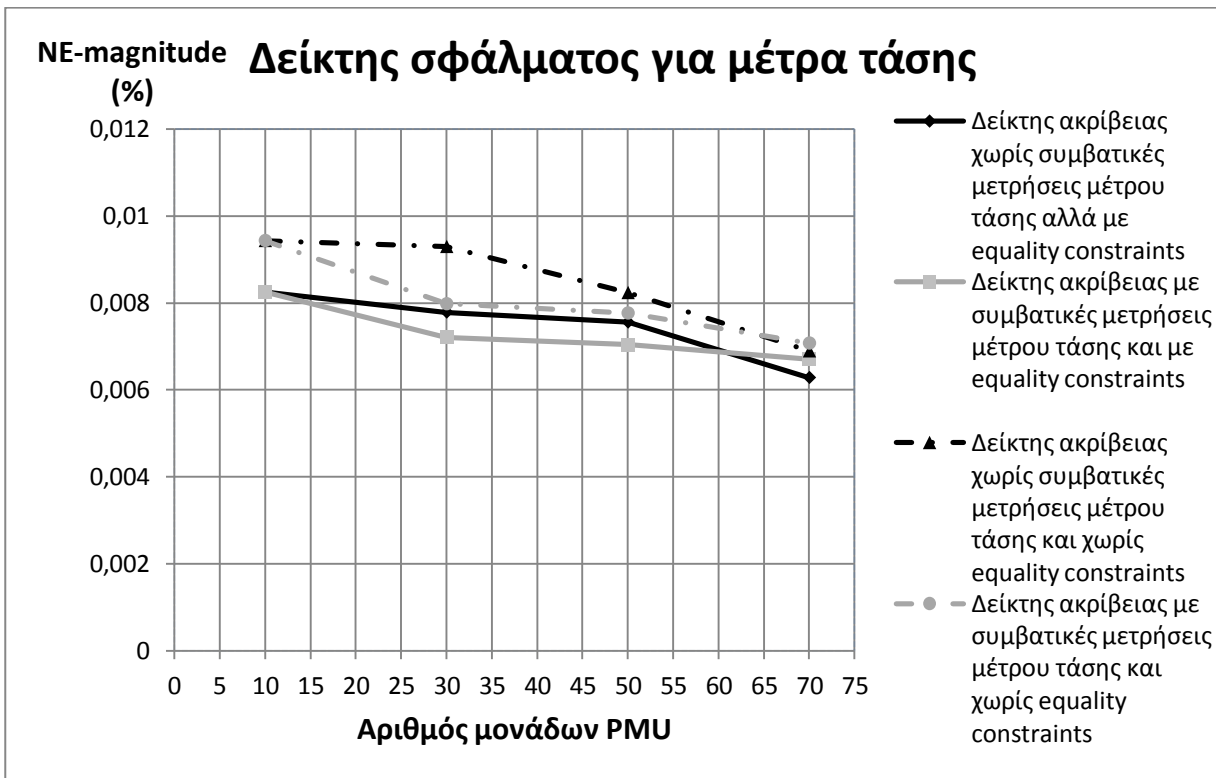
Σχήμα 5.6 Δείκτης ακρίβειας για φασικές γωνίες τάσης



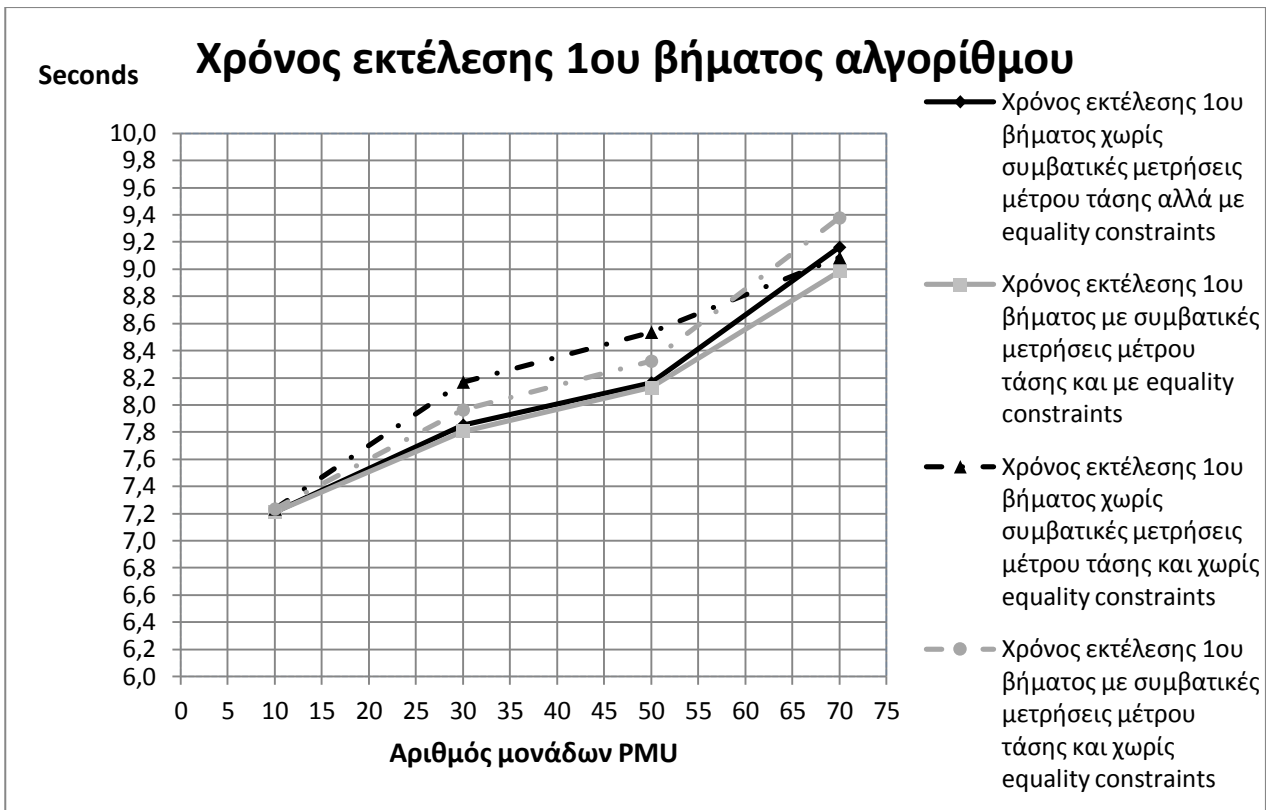
Σχήμα 5.7 Δείκτης ακρίβειας για τα μέτρα τάσης



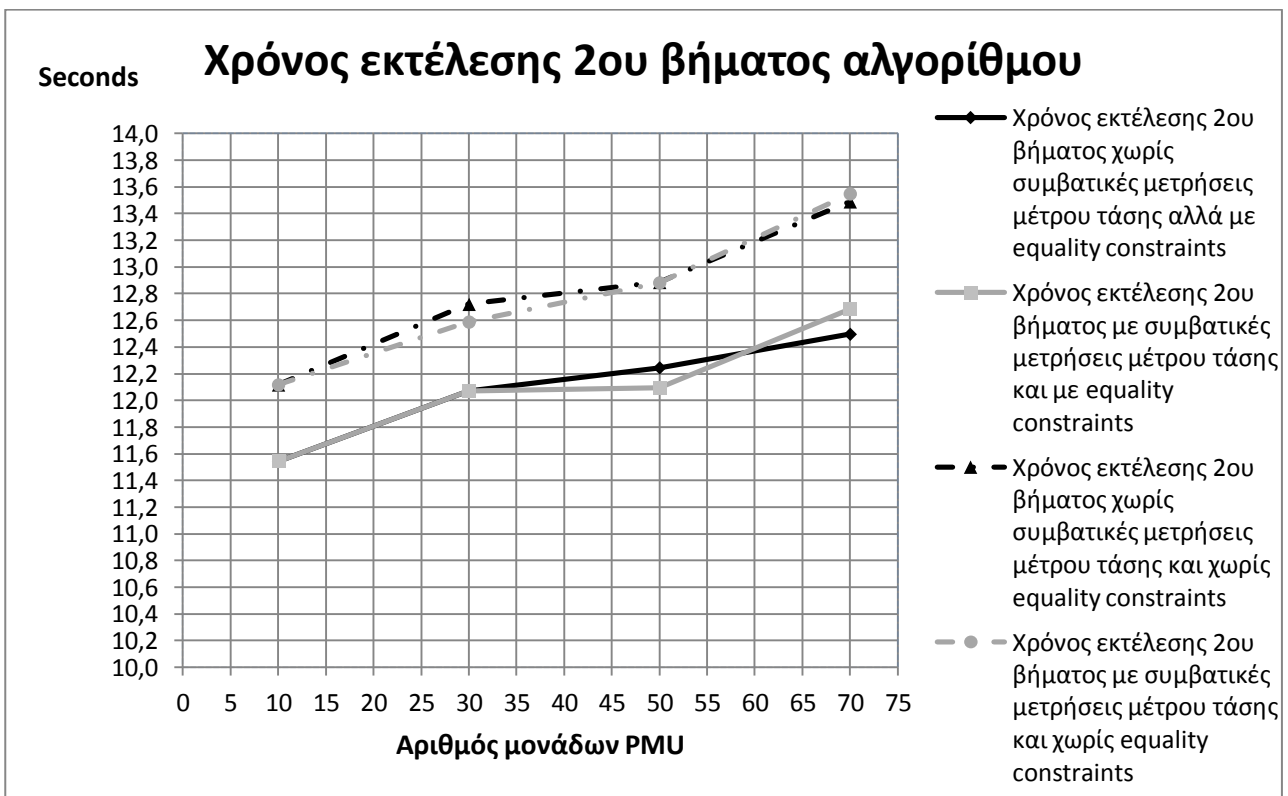
Σχήμα 5.8 Κανονικοποιημένα σφάλματα για τις φασικές γωνίες τάσης



Σχήμα 5.9 Κανονικοποιημένα σφάλματα για τα μέτρα τάσης



Σχήμα 5.10 Χρόνος εκτέλεσης 1^{ου} βήματος αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα



Σχήμα 5.11 Χρόνος εκτέλεσης 2^{ου} βήματος αλγορίθμου σε δευτερόλεπτα

Και για το δίκτυο των 2383 ζυγών, παρατηρούμε ότι η αύξηση των μονάδων PMU και συνεπώς η αύξηση της περίσσειας συνεπάγεται και βελτίωση του αποτελέσματος της εκτίμησης κατάστασης. Επίσης, εδώ παρατηρούμε ότι οι δείκτες ακρίβειας βελτιώνονται ξεκάθαρα σε όλες τις περιπτώσεις όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος των περιορισμών ισοτήτων, ενώ η χρήση των συμβατικών μετρήσεων των μέτρων τάσης, σε αντίθεση με το δίκτυο των 118 ζυγών, βελτιώνει όλους τους δείκτες ακρίβειας για τις φασικές γωνίες τάσης και τους περισσότερους δείκτες ακρίβειας των μέτρων τάσης.

Τέλος, βλέπουμε ότι ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι σημαντικά αυξημένος (περίπου 80 δευτερόλεπτα για όλα τα αρχεία μετρήσεων), αλλά αυτό οφείλεται κυρίως στον σχηματισμό της Ιακωβιανής μήτρας (χρειάζονται περίπου 60 δευτερόλεπτα). Από τα διαγράμματα παραπάνω που δείχνουν τους χρόνους εκτέλεσης μόνο των δυο βημάτων του αλγορίθμου, παρατηρούμε μικρή αύξηση του χρόνου εκτέλεσης όσο αυξάνεται η περίσσεια των μετρήσεων, ενώ το δεύτερο βήμα είναι πιο χρονοβόρο από το πρώτο όπως είναι αναμενόμενο. Ακόμα, η μη χρήση των equality constraints φαίνεται να επιβαρύνουν χρονικά τον υβριδικό αλγόριθμο και στα δύο βήματα.

5.2 Μελλοντική εργασία

Με την έρευνα που έγινε σε αυτή τη διπλωματική, και την κατασκευή του υβριδικού εκτιμητή 2 βημάτων, αποδείξαμε ότι η πρόσθεση μονάδων PMU σε ένα δίκτυο βελτιώνει κατά πολύ το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης του δικτύου, όπως επίσης ότι η χρήση συμβατικών μετρήσεων μέτρου τάσης και η χρήση της μεθόδου των περιορισμών ισοτήτων βελτιώνει την ακρίβεια υπολογισμού του διανύσματος κατάστασης. Ακόμα, είδαμε ότι ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης που διαχειρίζεται συγχρονισμένες μετρήσεις στο πρώτο βήμα και συμβατικές μετρήσεις στο δεύτερο είναι αρκετά αποτελεσματικός και πολύ γρήγορος ιδιαίτερα για τα μεγάλα δίκτυα, αφού χρησιμοποιεί αραιές μήτρες.

Ένα σημείο στο οποίο θα μπορούσε να βελτιωθεί ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης είναι η χρήση κάποιας μεθόδου για βέλτιστη τοποθέτηση των μονάδων PMU, αφού στον συγκεκριμένο αλγόριθμο η τοποθέτηση αυτή γίνεται εντελώς τυχαία. Επίσης, ένα θέμα που θα μπορούσε να είναι μελλοντική εργασία είναι η εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου.

6. Βιβλιογραφία

- [1] Yeo Jun Yoon, *Study of the Utilization and Benefits of Phasor Measurement Units for Large Scale Power System State Estimation*, M.S. Thesis, Dept. Elect. Eng., Korea University, South Korea, 2005
- [2] Antonio Gómez-Expósito, Ali Abur, Patricia Rousseaux, Antonio de la Villa Jaen, Catalina Gómez-Quiles, *On the Use of PMUs in Power System State Estimation*
- [3] Tao Yang, *Design of a two-level power system linear state estimator*, Ph.D. dissertation, Dept Philosophy, Washington State University, School of Electrical Engineering and Computer Science, 2011.
- [4] Γ. Κονταξής κα Ν. Χατζηαργυρίου, “Εκτίμηση Κατάστασης” στα *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*, ΕΜΠ, Αθήνα, 2003.
- [5] A. Abur and A.G. Exposito, *Power System State Estimation. Theory and implementation*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [6] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized phasor measurements and their applications*. New York: Springer Science and Business Media, 2008.
- [7] A.G. Phadke, J. S. Thorp, *History and applications of phasor measurements*, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA.
- [8] Bindeshwar Singh, N.K. Sharma, A.N. Tiwari, K.S. Verma, S.N. Singh, *Applications of phasor measurement units (PMUs) in electric power system networks incorporated with FACTS controllers*, International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 3, No. 3, 2011, pp. 64-82, 2011.

- [9] George N. Korres and Nikolaos M. Manousakis, *State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements*, Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 7, pp. 1514-1524, 2011.
- [10] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems," IET Gener. Transm. Distrib., DOI:10.1049/iet-gtd.2011.0492
- [11] Megan Vutsinas, *Contingency analysis using synchrophasor measurements*, M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Clemson University, 2008
- [12] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," PSERC Publication 05-20, Oct. 2005.
- [13] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez, and R. J. Thomas, "Matpower: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 26, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2011.
- [14] Loosli Alain and Sauvain Hubert and Zima Marija and Andersson Goran and Nuqui Reynaldo, "An implementation of two-stage hybrid state estimation with limited number of PMU", Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change, 10th IET International Conference on, College of Engineering and Architecture Fribourg, University of Applied Sciences HES-SO, 2010
- [15] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Hybrid Linear State Estimation Utilizing Synchronized Phasor Measurements", Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, 2007

- [16] Ming Zhou and Virgilio A. Centeno and James S. Thorp and Arun G. Phadke, “An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators”, Power Systems, IEEE Transactions on, Virginia Polytech. Inst. & State Univ., Blacksburg, VA, 2006

7. Παράρτημα

Στο παράρτημα δίνεται η μορφή των αρχείων εισόδου του προγράμματος (PTI format) καθώς και οι παράμετροι που καθορίζει το διάλυμα *mporption*.

7.1 Μορφότυπο αρχείου συστήματος

Partial Description of the IEEE Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data

The complete description can be found in the paper "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, _IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems_, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pp. 1916-1925.

The data file has lines of up to 128 characters. The lines are grouped into sections with section headers. Data items are entered in specific columns. No blank items are allowed, enter zeros instead. Floating point items should have explicit decimal point. No implicit decimal points are used.

Data type codes: A - Alphanumeric (no special characters)

I - Integer

F - Floating point

* - Mandatory item

Title Data

=====

First card in file.

Columns 2- 9 Date, in format DD/MM/YY with leading zeros. If no date provided, use 0b/0b/0b where b is blank.

Columns 11-30 Originator's name (A)

Columns 32-37 MVA Base (F*)

Columns 39-42 Year (I)

Column 44 Season (S - Summer, W - Winter)

Column 46-73 Case identification (A)

Bus Data *

=====

Section start card *:

Columns 1-16 BUS DATA FOLLOWS (not clear that any more than BUS in
1-3 is significant) *

Columns ?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Bus data cards *:

Columns 1- 4 Bus number (I) *

Columns 7-17 Name (A) (left justify) *

Columns 19-20 Load flow area number (I) Don't use zero! *

Columns 21-23 Loss zone number (I)

Columns 25-26 Type (I) *

0 - Unregulated (load, PQ)

1 - Hold MVAR generation within voltage limits, (PQ)

2 - Hold voltage within VAR limits (gen, PV)

3 - Hold voltage and angle (swing, V-Theta) (must always
have one)

Columns 28-33 Final voltage, p.u. (F) *

Columns 34-40 Final angle, degrees (F) *

Columns 41-49 Load MW (F) *

Columns 50-59 Load MVAR (F) *

Columns 60-67 Generation MW (F) *

Columns 68-75 Generation MVAR (F) *

Columns 77-83 Base KV (F)

Columns 85-90 Desired volts (pu) (F) (This is desired remote voltage if
this bus is controlling another bus.

Columns 91-98 Maximum MVAR or voltage limit (F)

Columns 99-106 Minimum MVAR or voltage limit (F)

Columns 107-114 Shunt conductance G (per unit) (F) *

Columns 115-122 Shunt susceptance B (per unit) (F) *

Columns 124-127 Remote controlled bus number

Section end card:

Columns 1- 4 -999

Branch Data *

=====

Section start card *:

Columns 1-16 BRANCH DATA FOLLOWS (not clear that any more than BRANCH
is significant) *

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Branch data cards *:

Columns 1- 4 Tap bus number (I) *

For transformers or phase shifters, the side of the model
the non-unity tap is on

Columns 6- 9 Z bus number (I) *

For transformers and phase shifters, the side of the model
the device impedance is on.

Columns 11-12 Load flow area (I)

Columns 13-14 Loss zone (I)

Column 17 Circuit (I) * (Use 1 for single lines)

Column 19 Type (I) *

- 0 - Transmission line
- 1 - Fixed tap
- 2 - Variable tap for voltage control (TCUL, LTC)
- 3 - Variable tap (turns ratio) for MVAR control
- 4 - Variable phase angle for MW control (phase shifter)

Columns 20-29 Branch resistance R, per unit (F) *

Columns 30-40 Branch reactance X, per unit (F) * No zero impedance lines

Columns 41-50 Line charging B, per unit (F) * (total line charging, +B)

Columns 51-55 Line MVA rating No 1 (I) Left justify!

Columns 57-61 Line MVA rating No 2 (I) Left justify!

Columns 63-67 Line MVA rating No 3 (I) Left justify!

Columns 69-72 Control bus number

Column 74 Side (I)

- 0 - Controlled bus is one of the terminals
- 1 - Controlled bus is near the tap side
- 2 - Controlled bus is near the impedance side (Z bus)

Columns 77-82 Transformer final turns ratio (F)

Columns 84-90 Transformer (phase shifter) final angle (F)

Columns 91-97 Minimum tap or phase shift (F)

Columns 98-104 Maximum tap or phase shift (F)

Columns 106-111 Step size (F)

Columns 113-119 Minimum voltage, MVAR or MW limit (F)

Columns 120-126 Maximum voltage, MVAR or MW limit (F)

Section end card:

Columns 1- 4 -999

Loss Zone Data

=====

Section start card

Columns 1-16 LOSS ZONES FOLLOWS (not clear that any more than LOSS
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Loss Zone Cards:

Columns 1- 3 Loss zone number (I)

Columns 5-16 Loss zone name (A)

Section end card:

Columns 1- 3 -99

Interchange Data *

=====

Section start card

Columns 1-16 INTERCHANGE DATA FOLLOWS (not clear that any more than
first word is significant).

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Interchange Data Cards *:

Columns 1- 2 Area number (I) no zeros! *

Columns 4- 7 Interchange slack bus number (I) *

Columns 9-20 Alternate swing bus name (A)

Columns 21-28 Area interchange export, MW (F) (+ = out) *

Columns 30-35 Area interchange tolerance, MW (F) *

Columns 38-43 Area code (abbreviated name) (A) *

Columns 46-75 Area name (A)

Section end card:

Columns 1- 2 -9

Tie Line Data

=====

Section start card

Columns 1-16 TIE LINES FOLLOW (not clear that any more than TIE
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Tie Line Cards:

Columns 1- 4 Metered bus number (I)

Columns 7-8 Metered area number (I)

Columns 11-14 Non-metered bus number (I)

Columns 17-18 Non-metered area number (I)

Column 21 Circuit number

Section end card:

Columns 1-3 -999

7.2 Μορφότυπο αρχείου μετρήσεων

Description of the State Estimation Data Format (Data file SES)

=====

Case Identification Data

=====

Record 1 - one line of heading, up to 60 characters

Voltage Magnitude Measurement Data

=====

Voltage magnitude measurement data records, terminated by a record with a bus number of zero.

I,SNM,FS,ST,RTU

- | | |
|-----|--|
| I | - Bus number (1 to 29997) |
| SNM | - Error multiplier |
| FS | - The full scale of the meter |
| ST | - Measurement status, 1 - in service, 0 - out of service |
| RTU | - Index of the RTU where this measurement is assigned |

Voltage Angle Measurement Data

=====

Similar data structure as that of the voltage magnitude measurement data.

Active Flow Measurement Data

=====

Active flow measurement data records, terminated by a record with from bus of zero.

I,J,CKT,SNM,FS,ST,RTU

- I - From bus number
- J - To bus number
- CKT - Circuit identifier (integer)
- SNM - Error multiplier
- FS - The full scale of the meter
- ST - Measurement status, 1 - in service, 0 - out of service
- RTU - Index of the RTU where this measurement is assigned

Reactive Flow Measurement Data

=====

Similar data structure as that of the active flow measurement data.

Active Injection Measurement Data

=====

Active injection measurement data records, terminated by a record with a bus number of zero.

I,SNM,FS,ST,RTU

- I - Bus number (1 to 29997)
- SNM - Error multiplier
- FS - The full scale of the meter
- ST - Measurement status, 1 - in service, 0 - out of service
- RTU - Index of the RTU where this measurement is assigned

Similar data records are assumed for reactive flow and injection measurements.

Reactive Injection Measurement Data

=====

Similar data structure as that of the active injection measurement data.

Current Magnitude Measurement Data

=====

Current magnitude measurement data records, terminated by a record with from bus of zero.

I,J,CKT,SNM,FS,ST,RTU

- I - From bus number
- J - To bus number
- CKT - Circuit identifier (integer)
- SNM - Error multiplier
- FS - The full scale of the meter
- ST - Measurement status, 1 - in service, 0 - out of service
- RTU - Index of the RTU where this measurement is assigned

Current Angle Measurement Data

=====

Similar data structure as that of the current magnitude measurement data.

Description of the Switching Device Data Format (Data file REC)

=====

Switching Device Data

=====

Switching device records, ending with a record with from bus of zero.

I,J,ST

I - From bus number

J - To bus number

ST - Initial Switching device status, 1 - in service, 0 - out of service

The error multiplier variable may have one of the following values:

$SNM = 0$: Load flow (exact) value is used (no error is added)

$|SNM| < 1$: Predefined measurement value ($= SNM * 100$) is used

$|SNM| = 1$: Gaussian random error is added at load flow value

$|SNM| > 1$: Gross error ($= SNM * \sigma$) is added at load flow value, where σ
is the measurement standard deviation.

All measurement values or errors are in per unit. Multiplier SNM is always positive for voltage measurements.

7.4 Αρχείο μετρήσεων για το δίκτυο των 2383 ζυγών IEEE

Στη συνέχεια φαίνονται συνοπτικά οι μετρήσεις για το σενάριο του δικτύου των 2383 ζυγών IEEE:

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων

Μετρήσεις ενεργής / άεργης ροής ισχύος στους κλάδους:
5 - 6, 6 - 8, 6 - 9, 7 - 4, 7 - 5, 8 - 18, 10 - 3, 10 - 5, 11 - 4, 12 - 7, 13 - 7, 14 - 4, 15 - 6, 15 - 165, 16 - 1, 16 - 4, 16 - 11, 16 - 18, 16 - 73, 17 - 2, 17 - 11, 17 - 14, 17 - 18, 17 - 74, 18 - 15, 18 - 76, 18 - 101, 19 - 7, 20 - 18, 21 - 7, 22 - 4, 27 - 74, 28 - 27, 28 - 88, 29 - 7, 29 - 13, 29 - 32, 30 - 29, 31 - 6, 32 - 31, 33 - 27, 34 - 51, 35 - 34, 36 - 32, 37 - 23, 38 - 26, 38 - 37, 39 - 31, 40 - 39, 41 - 25, 41 - 43, 42 - 41, 44 - 40, 44 - 43, 45 - 29, 46 - 23, 46 - 30, 46 - 45, 47 - 28, 47 - 42, 48 - 27, 48 - 29, 49 - 30, 49 - 45, 49 - 48, 50 - 44, 51 - 50, 53 - 23, 53 - 25, 53 - 52, 54 - 24, 54 - 25, 54 - 42, 55 - 38, 60 - 85, 62 - 61, 63 - 59, 64 - 61, 64 - 69, 65 - 91, 66 - 67, 66 - 68, 67 - 20, 68 - 78, 70 - 73, 71 - 63, 72 - 71, 73 - 75, 74 - 56, 74 - 76, 74 - 108, 75 - 18, 76 - 75, 76 - 105, 78 - 103, 79 - 64, 80 - 41, 80 - 58, 80 - 96, 81 - 57, 81 - 80, 82 - 59, 82 - 62, 83 - 69, 84 - 77, 84 - 83, 85 - 77, 86 - 71, 86 - 85, 86 - 108, 87 - 73, 88 - 79, 88 - 87, 89 - 94, 90 - 65, 91 - 63, 92 - 106, 93 - 64, 93 - 81, 94 - 63, 94 - 87, 94 - 93, 95 - 64, 96 - 63, 96 - 95, 98 - 50, 99 - 43, 99 - 98, 100 - 50, 100 - 92, 101 - 99, 101 - 100, 102 - 89, 102 - 95, 103 - 83, 103 - 106, 104 - 60, 104 - 90, 104 - 103, 105 - 185, 106 - 105, 106 - 180, 107 - 70, 108 - 107, 109 - 61, 110 - 62, 111 - 11, 112 - 22, 112 - 111, 113 - 114, 114 - 131, 116 - 115, 119 - 118, 123 - 111, 124 - 19, 124 - 111, 124 - 123, 125 - 120, 126 - 118, 126 - 125, 126 - 127, 128 - 127, 129 - 148, 130 - 120, 130 - 132, 130 - 154, 131 - 133, 132 - 131, 132 - 134, 133 - 115, 134 - 133, 135 - 125, 136 - 135, 138 - 67, 138 - 116, 138 - 137, 139 - 124, 140 - 12, 140 - 117, 140 - 123, 140 - 139, 142 - 118, 142 - 135, 143 - 117, 143 - 129, 143 - 145, 144 - 123, 144 - 141, 144 - 143, 144 - 147, 145 - 128, 146 - 145, 147 - 131, 148 - 132, 148 - 147, 149 - 143, 150 - 132, 151 - 113, 151 - 131, 151 - 150, 152 - 66, 152 - 150, 153 - 152, 154 - 147, 156 - 158, 157 - 127, 158 - 157, 159 - 165, 159 - 176, 161 - 166, 162 - 161, 162 - 179, 163 - 165, 163 - 172, 164 - 163, 164 - 167, 166 - 139, 166 - 155, 167 - 140, 167 - 166, 169 - 168, 170 - 174, 171 - 10, 171 - 170, 173 - 172, 173 - 175, 174 - 139, 175 - 174, 176 - 158, 177 - 176, 178 - 141, 179 - 156, 179 - 178, 181 - 55, 182 - 133, 182 - 134, 183 - 34, 183 - 35, 184 - 61, 184 - 84, 186 - 125, 186 - 126, 193 - 192, 193 - 332, 194 - 192, 197 - 247, 200 - 428, 201 - 255, 202 - 187, 202 - 332, 203 - 459, 204 -

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

526, 205 - 527, 207 - 191, 208 - 326, 208 - 342, 209 - 211, 217 - 346, 219 - 3, 219 - 201, 219 - 218, 220 - 3, 224 - 206, 225 - 510, 226 - 348, 227 - 219, 227 - 226, 230 - 221, 231 - 365, 232 - 366, 233 - 211, 236 - 384, 236 - 385, 238 - 361, 239 - 202, 240 - 221, 240 - 401, 241 - 287, 245 - 4, 246 - 4, 247 - 427, 248 - 194, 249 - 294, 250 - 349, 251 - 235, 252 - 319, 253 - 245, 254 - 245, 256 - 194, 257 - 363, 259 - 250, 260 - 365, 261 - 272, 261 - 353, 262 - 222, 265 - 258, 267 - 519, 268 - 527, 270 - 246, 271 - 446, 272 - 353, 273 - 215, 275 - 280, 275 - 534, 276 - 299, 279 - 215, 280 - 267, 281 - 245, 281 - 274, 282 - 210, 283 - 265, 284 - 239, 284 - 308, 285 - 195, 286 - 285, 286 - 337, 287 - 318, 288 - 274, 291 - 282, 292 - 277, 293 - 277, 294 - 290, 296 - 293, 297 - 353, 298 - 297, 299 - 245, 299 - 289, 301 - 229, 302 - 295, 304 - 246, 304 - 273, 305 - 212, 306 - 243, 308 - 192, 309 - 5, 309 - 5, 309 - 243, 309 - 520, 310 - 6, 312 - 310, 312 - 311, 315 - 341, 317 - 468, 318 - 467, 319 - 517, 320 - 256, 321 - 7, 321 - 467, 321 - 530, 322 - 7, 322 - 475, 322 - 478, 323 - 263, 323 - 312, 324 - 242, 327 - 217, 332 - 9, 332 - 194, 332 - 269, 333 - 211, 333 - 213, 334 - 209, 336 - 255, 336 - 290, 338 - 254, 339 - 246, 340 - 218, 340 - 240, 341 - 233, 342 - 445, 343 - 213, 344 - 346, 345 - 305, 346 - 10, 346 - 294, 346 - 344, 347 - 10, 347 - 336, 347 - 345, 348 - 320, 349 - 309, 350 - 283, 351 - 198, 351 - 322, 352 - 11, 352 - 253, 352 - 288, 352 - 316, 353 - 11, 353 - 210, 354 - 2, 354 - 207, 354 - 228, 354 - 234, 355 - 1, 355 - 190, 355 - 235, 358 - 380, 359 - 12, 360 - 12, 360 - 331, 360 - 356, 361 - 222, 361 - 328, 362 - 373, 364 - 326, 365 - 13, 366 - 13, 367 - 14, 368 - 14, 369 - 255, 369 - 335, 370 - 354, 370 - 367, 371 - 325, 372 - 223, 372 - 311, 373 - 237, 374 - 15, 374 - 330, 374 - 361, 375 - 325, 375 - 329, 375 - 359, 376 - 190, 376 - 368, 377 - 337, 377 - 343, 378 - 359, 378 - 371, 379 - 337, 381 - 314, 381 - 344, 383 - 488, 384 - 206, 386 - 211, 386 - 347, 387 - 314, 388 - 518, 389 - 322, 389 - 385, 391 - 316, 392 - 228, 393 - 359, 393 - 373, 394 - 338, 395 - 334, 395 - 374, 396 - 245, 402 - 355, 403 - 517, 404 - 392, 404 - 400, 405 - 444, 406 - 277, 406 - 352, 407 - 431, 408 - 266, 410 - 380, 411 - 263, 412 - 411, 413 - 412, 414 - 240, 415 - 213, 415 - 387, 416 - 365, 417 - 408, 419 - 339, 420 - 310, 422 - 265, 423 - 187, 423 - 411, 425 - 19, 425 - 198, 425 - 203, 425 - 224, 425 - 295, 425 - 438, 426 - 411, 428 - 374, 429 - 291, 429 - 353, 430 - 300, 431 - 229, 432 - 356, 432 - 379, 433 - 199, 433 - 368, 434 - 188, 434 - 401, 435 - 310, 436 - 259, 437 - 188, 437 - 220, 438 - 262, 439 - 364, 440 - 242, 440 - 365, 441 - 279, 442 - 214, 442 - 303, 443 - 189, 444 - 199, 445 - 367, 446 - 405, 447 - 20, 447 - 216, 447 - 417, 448 - 20, 449 - 445, 450 - 446, 451 - 321, 451 - 416, 452 - 322, 453 - 192, 454 - 321, 455 - 322, 458 - 213, 458 - 257, 459 - 418, 460 - 305, 462 - 307, 464 - 382, 464 - 455, 465 - 462, 466 - 230, 468 - 531, 469 - 448, 470 - 923, 471 - 246, 471 - 282, 472 - 281, 472 - 289, 473 - 213, 473 - 286, 474 - 248, 474 - 249, 476 - 457, 477 - 310, 477 - 363, 477 - 420, 478 - 531, 479 - 475, 480 - 530, 481 - 388, 481 - 398, 482 - 448, 482 - 1078, 483 - 502, 484 - 366, 485 - 321, 486 - 244, 487 - 443, 487 - 481, 488 - 483, 489 - 485, 490 - 322, 490 - 456, 491 - 490, 492 - 238, 492 - 425, 493 - 260, 493 - 306, 494 - 456, 494 - 465, 494 - 484, 494 - 491, 495 - 494, 496 - 493, 497 - 463, 497 - 506, 498 - 456, 500 - 489, 500 -
--

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

493, 501 - 477, 502 - 21, 502 - 455, 502 - 499, 503 - 241, 504 - 366, 504 - 452, 505 - 489, 505 - 493, 506 - 321, 507 - 476, 507 - 486, 508 - 307, 508 - 461, 509 - 357, 510 - 220, 511 - 212, 511 - 269, 512 - 305, 512 - 397, 512 - 509, 513 - 189, 514 - 195, 514 - 317, 514 - 457, 514 - 463, 515 - 461, 515 - 464, 515 - 501, 515 - 503, 516 - 237, 516 - 264, 516 - 421, 517 - 234, 518 - 477, 518 - 522, 519 - 296, 520 - 244, 521 - 476, 523 - 344, 523 - 357, 524 - 294, 524 - 511, 525 - 266, 525 - 298, 525 - 410, 525 - 528, 526 - 22, 526 - 278, 526 - 350, 526 - 396, 526 - 407, 526 - 519, 527 - 22, 527 - 441, 528 - 427, 529 - 191, 529 - 390, 532 - 394, 532 - 409, 533 - 200, 533 - 214, 534 - 278, 535 - 426, 535 - 460, 536 - 425, 537 - 264, 537 - 295, 538 - 324, 538 - 536, 540 - 23, 540 - 539, 541 - 685, 544 - 540, 544 - 696, 545 - 24, 546 - 545, 550 - 549, 551 - 750, 553 - 552, 555 - 693, 555 - 785, 558 - 557, 559 - 539, 559 - 556, 560 - 543, 564 - 25, 568 - 26, 568 - 561, 568 - 566, 569 - 562, 569 - 563, 569 - 568, 571 - 563, 571 - 566, 573 - 548, 575 - 546, 576 - 721, 578 - 366, 579 - 558, 580 - 644, 581 - 577, 582 - 579, 584 - 585, 585 - 778, 587 - 545, 588 - 552, 591 - 596, 592 - 593, 592 - 738, 594 - 573, 595 - 588, 596 - 742, 597 - 778, 598 - 564, 602 - 615, 604 - 602, 604 - 603, 605 - 615, 606 - 670, 606 - 926, 607 - 583, 609 - 680, 612 - 413, 612 - 424, 613 - 29, 613 - 223, 613 - 430, 613 - 573, 613 - 612, 614 - 626, 615 - 33, 616 - 619, 618 - 616, 619 - 583, 620 - 618, 622 - 621, 624 - 342, 624 - 622, 625 - 1348, 626 - 605, 627 - 613, 628 - 587, 630 - 601, 631 - 547, 633 - 539, 634 - 540, 634 - 632, 634 - 633, 636 - 740, 637 - 635, 639 - 638, 639 - 653, 640 - 644, 643 - 413, 643 - 552, 643 - 588, 644 - 36, 644 - 641, 645 - 36, 645 - 630, 645 - 631, 645 - 633, 645 - 641, 645 - 644, 646 - 770, 647 - 641, 649 - 632, 649 - 647, 650 - 540, 650 - 638, 650 - 639, 650 - 644, 650 - 645, 651 - 648, 652 - 540, 652 - 648, 653 - 540, 653 - 640, 655 - 564, 655 - 654, 656 - 569, 658 - 300, 658 - 553, 659 - 703, 659 - 703, 660 - 409, 660 - 548, 661 - 578, 663 - 37, 663 - 623, 663 - 662, 665 - 615, 666 - 570, 667 - 591, 667 - 629, 668 - 610, 669 - 564, 669 - 600, 670 - 607, 670 - 1469, 671 - 549, 672 - 547, 672 - 568, 674 - 556, 674 - 695, 675 - 598, 675 - 758, 676 - 439, 676 - 665, 677 - 609, 678 - 642, 679 - 40, 679 - 677, 679 - 678, 680 - 688, 680 - 701, 682 - 39, 682 - 681, 683 - 611, 683 - 679, 684 - 678, 684 - 679, 685 - 577, 685 - 679, 686 - 644, 687 - 747, 688 - 582, 689 - 42, 689 - 664, 689 - 688, 689 - 1402, 690 - 557, 690 - 608, 690 - 625, 691 - 627, 691 - 692, 694 - 572, 694 - 599, 694 - 610, 694 - 693, 695 - 696, 696 - 668, 697 - 584, 698 - 702, 699 - 628, 699 - 703, 700 - 567, 701 - 655, 702 - 703, 703 - 554, 703 - 667, 703 - 704, 704 - 698, 706 - 47, 706 - 603, 706 - 665, 707 - 47, 707 - 614, 707 - 666, 707 - 706, 708 - 300, 708 - 601, 709 - 705, 710 - 342, 710 - 574, 710 - 700, 712 - 542, 712 - 568, 712 - 569, 712 - 623, 713 - 594, 714 - 711, 715 - 1190, 716 - 49, 716 - 567, 716 - 709, 717 - 48, 717 - 589, 717 - 716, 718 - 692, 719 - 717, 719 - 718, 720 - 709, 720 - 713, 722 - 424, 722 - 572, 724 - 714, 725 - 546, 726 - 50, 726 - 723, 727 - 51, 727 - 545, 727 - 600, 727 - 628, 727 - 711, 727 - 726, 728 - 705, 728 - 717, 729 - 711, 729 - 726, 730 - 546, 730 - 724, 731 - 678, 732 - 576, 732 - 635, 733 - 557, 733 - 570, 734 - 644, 735 - 734, 736 - 717, 737 - 539, 737 - 542, 737 - 735, 739 - 546, 739 - 715, 740 - 543, 741 - 575, 742 - 635, 743 - 637, 743 - 726, 744 - 554, 744 -

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

636, 745 - 687, 746 - 551, 746 - 621, 748 - 723, 748 - 725, 749 - 582, 749 - 689, 750 - 611, 750 - 673, 750 - 678, 750 - 716, 751 - 542, 751 - 547, 752 - 740, 752 - 741, 753 - 589, 753 - 750, 754 - 52, 754 - 671, 754 - 731, 755 - 546, 755 - 581, 755 - 590, 755 - 721, 756 - 545, 756 - 619, 757 - 551, 758 - 759, 759 - 754, 760 - 549, 760 - 662, 761 - 550, 762 - 586, 763 - 629, 764 - 763, 765 - 581, 765 - 586, 766 - 697, 767 - 763, 768 - 744, 769 - 612, 769 - 661, 770 - 686, 771 - 552, 771 - 595, 771 - 770, 772 - 593, 772 - 707, 773 - 646, 773 - 656, 774 - 615, 774 - 757, 775 - 1133, 775 - 1414, 776 - 539, 776 - 651, 777 - 736, 777 - 747, 778 - 55, 778 - 663, 778 - 764, 778 - 766, 779 - 740, 779 - 768, 780 - 590, 780 - 663, 781 - 556, 781 - 755, 782 - 662, 783 - 778, 783 - 782, 784 - 551, 784 - 745, 785 - 642, 785 - 716, 793 - 1514, 795 - 1520, 796 - 56, 797 - 796, 798 - 1299, 799 - 798, 799 - 996, 799 - 1300, 800 - 1356, 801 - 1356, 802 - 1586, 805 - 1592, 806 - 807, 807 - 1328, 807 - 1479, 808 - 971, 808 - 1227, 811 - 812, 812 - 860, 813 - 877, 813 - 1054, 816 - 817, 817 - 1079, 819 - 818, 819 - 954, 820 - 838, 821 - 59, 822 - 821, 825 - 823, 825 - 1232, 826 - 824, 826 - 1003, 827 - 911, 828 - 829, 829 - 1268, 830 - 883, 830 - 1334, 833 - 831, 833 - 1230, 834 - 60, 836 - 60, 836 - 1365, 837 - 1097, 840 - 839, 840 - 887, 841 - 1095, 842 - 1096, 843 - 821, 844 - 822, 845 - 870, 846 - 871, 847 - 871, 848 - 870, 849 - 1320, 851 - 1328, 852 - 1589, 853 - 855, 854 - 856, 855 - 997, 856 - 997, 857 - 1169, 858 - 945, 858 - 1205, 859 - 946, 859 - 1362, 860 - 1556, 864 - 856, 864 - 863, 866 - 1196, 867 - 869, 869 - 914, 872 - 1384, 873 - 874, 875 - 876, 876 - 1389, 879 - 878, 879 - 1325, 880 - 796, 881 - 797, 882 - 1503, 885 - 884, 885 - 890, 886 - 834, 887 - 1178, 888 - 869, 890 - 836, 891 - 1057, 893 - 892, 894 - 1077, 896 - 871, 897 - 898, 898 - 1289, 899 - 797, 901 - 1561, 903 - 902, 903 - 916, 904 - 809, 905 - 1372, 905 - 1569, 906 - 905, 907 - 1201, 908 - 1203, 910 - 1156, 910 - 1251, 911 - 67, 911 - 979, 911 - 1478, 912 - 67, 912 - 965, 912 - 1572, 917 - 1413, 918 - 812, 919 - 822, 919 - 1049, 920 - 821, 920 - 1343, 921 - 1207, 921 - 1344, 922 - 923, 923 - 899, 924 - 822, 924 - 1071, 925 - 926, 926 - 1190, 927 - 928, 928 - 815, 929 - 1139, 929 - 1240, 932 - 931, 932 - 1381, 933 - 915, 934 - 916, 935 - 936, 936 - 1565, 937 - 938, 938 - 1531, 939 - 1416, 940 - 944, 941 - 944, 942 - 1096, 944 - 1117, 944 - 1591, 947 - 862, 947 - 1229, 948 - 1199, 949 - 1422, 950 - 979, 951 - 978, 953 - 952, 953 - 1075, 954 - 968, 957 - 942, 960 - 961, 961 - 901, 963 - 1331, 964 - 1345, 965 - 973, 966 - 838, 966 - 1149, 966 - 1215, 967 - 966, 967 - 982, 967 - 1324, 967 - 1502, 969 - 971, 971 - 1382, 972 - 970, 972 - 1235, 974 - 919, 974 - 1431, 976 - 1415, 977 - 1415, 978 - 68, 978 - 962, 978 - 1024, 979 - 68, 979 - 968, 979 - 973, 979 - 1501, 981 - 980, 981 - 1292, 982 - 1470, 985 - 983, 985 - 1306, 986 - 895, 986 - 984, 987 - 989, 988 - 990, 989 - 996, 990 - 864, 991 - 834, 992 - 1459, 993 - 819, 994 - 993, 994 - 1289, 995 - 69, 996 - 69, 996 - 888, 997 - 955, 997 - 956, 998 - 978, 999 - 1311, 1000 - 1556, 1001 - 1556, 1002 - 1003, 1003 - 1491, 1004 - 797, 1005 - 1007, 1006 - 1008, 1007 - 1010, 1008 - 1004, 1011 - 796, 1013 - 892, 1014 - 1017, 1015 - 1019, 1016 - 1018, 1017 - 995, 1018 - 1401, 1019 - 1191, 1020 - 835, 1020 - 872, 1020 - 1522, 1021 - 1136, 1025 - 912, 1025 - 968, 1025 - 1024, 1031 - 1030, 1040 - 1039, 1041 - 1043, 1043 - 1217, 1044 - 1042, 1044 - 1217, 1046 - 1050, 1047 - 1050, 1048 - 1049, 1049

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

- 1450, 1050 - 877, 1055 - 1079, 1056 - 1057, 1057 - 1083, 1058 - 909, 1058 - 985, 1059 - 71, 1059 - 1331, 1060 - 71, 1061 - 1063, 1062 - 1095, 1063 - 957, 1064 - 1065, 1065 - 1284, 1066 - 851, 1067 - 1069, 1069 - 1390, 1070 - 1068, 1070 - 1326, 1071 - 1051, 1072 - 915, 1073 - 916, 1076 - 821, 1076 - 889, 1077 - 919, 1080 - 1081, 1081 - 1385, 1082 - 1266, 1083 - 896, 1083 - 1053, 1084 - 1343, 1086 - 1328, 1087 - 802, 1087 - 850, 1087 - 949, 1087 - 1557, 1088 - 1182, 1088 - 1219, 1088 - 1593, 1090 - 1092, 1091 - 1093, 1092 - 1489, 1093 - 1489, 1094 - 1491, 1095 - 77, 1095 - 906, 1095 - 915, 1095 - 916, 1095 - 938, 1095 - 1532, 1096 - 77, 1096 - 1403, 1096 - 1492, 1096 - 1510, 1097 - 1471, 1099 - 1082, 1100 - 1101, 1101 - 1232, 1102 - 920, 1102 - 1585, 1103 - 796, 1104 - 1190, 1105 - 836, 1106 - 78, 1106 - 835, 1107 - 861, 1107 - 1343, 1108 - 795, 1108 - 1107, 1108 - 1451, 1111 - 997, 1111 - 1109, 1112 - 995, 1112 - 1110, 1113 - 859, 1113 - 1511, 1114 - 80, 1114 - 1267, 1114 - 1354, 1114 - 1409, 1115 - 81, 1115 - 1181, 1117 - 1538, 1118 - 1119, 1119 - 1082, 1120 - 216, 1120 - 1078, 1120 - 1097, 1121 - 1231, 1121 - 1553, 1125 - 989, 1126 - 990, 1127 - 997, 1127 - 1124, 1128 - 1129, 1129 - 399, 1130 - 1131, 1131 - 1383, 1132 - 1195, 1133 - 1074, 1134 - 798, 1135 - 799, 1138 - 82, 1138 - 930, 1138 - 1084, 1139 - 82, 1140 - 1188, 1141 - 83, 1142 - 1043, 1142 - 1426, 1143 - 1122, 1143 - 1745, 1145 - 995, 1145 - 1274, 1146 - 1318, 1147 - 1050, 1151 - 1150, 1151 - 1216, 1153 - 1026, 1153 - 1152, 1154 - 832, 1156 - 815, 1157 - 1158, 1158 - 1222, 1161 - 1054, 1161 - 1159, 1162 - 858, 1162 - 1160, 1163 - 798, 1164 - 1166, 1165 - 1167, 1166 - 1106, 1167 - 1105, 1168 - 959, 1169 - 1122, 1170 - 1106, 1172 - 1539, 1173 - 858, 1174 - 859, 1175 - 834, 1175 - 1580, 1176 - 1178, 1177 - 1580, 1178 - 834, 1181 - 1190, 1182 - 85, 1182 - 1448, 1182 - 1449, 1183 - 786, 1183 - 992, 1183 - 1315, 1183 - 1460, 1183 - 1488, 1184 - 86, 1184 - 787, 1184 - 903, 1184 - 953, 1184 - 1081, 1187 - 1189, 1188 - 1186, 1188 - 1256, 1189 - 1141, 1191 - 1017, 1191 - 1141, 1191 - 1141, 1192 - 84, 1192 - 1018, 1192 - 1282, 1192 - 1288, 1192 - 1578, 1193 - 1012, 1193 - 1154, 1194 - 1183, 1195 - 1278, 1199 - 821, 1199 - 1197, 1200 - 1198, 1200 - 1355, 1201 - 904, 1202 - 1201, 1202 - 1338, 1203 - 1345, 1204 - 1279, 1205 - 1380, 1206 - 892, 1207 - 889, 1208 - 1209, 1209 - 1192, 1210 - 1345, 1211 - 1346, 1212 - 1144, 1212 - 1582, 1213 - 87, 1213 - 1212, 1213 - 1593, 1214 - 870, 1214 - 1504, 1216 - 809, 1216 - 1027, 1216 - 1028, 1216 - 1031, 1216 - 1035, 1216 - 1039, 1217 - 89, 1217 - 1029, 1217 - 1034, 1217 - 1036, 1219 - 1218, 1219 - 1505, 1220 - 928, 1220 - 1096, 1222 - 997, 1222 - 1221, 1223 - 1053, 1224 - 1226, 1225 - 1227, 1226 - 1383, 1227 - 1260, 1228 - 1155, 1228 - 1368, 1229 - 1139, 1230 - 900, 1230 - 1022, 1231 - 1023, 1232 - 1131, 1233 - 1085, 1233 - 1312, 1233 - 1382, 1235 - 936, 1236 - 915, 1236 - 1184, 1237 - 1059, 1237 - 1099, 1239 - 1238, 1239 - 1535, 1240 - 792, 1241 - 999, 1243 - 1053, 1243 - 1242, 1244 - 90, 1244 - 1086, 1244 - 1311, 1244 - 1326, 1244 - 1330, 1245 - 909, 1245 - 1425, 1246 - 1248, 1249 - 1215, 1250 - 1223, 1250 - 1271, 1250 - 1403, 1251 - 1243, 1251 - 1250, 1251 - 1487, 1253 - 1544, 1256 - 948, 1256 - 1254, 1257 - 1140, 1257 - 1255, 1258 - 1149, 1259 - 1336, 1259 - 1563, 1260 - 1261, 1261 - 1226, 1263 - 966, 1264 - 1265, 1265 - 1503, 1266 - 1053, 1268 - 967, 1269 - 1171, 1270 - 1271, 1271 - 1119, 1272 - 1274, 1273 - 1275, 1274 - 943, 1275 - 1112, 1277 - 1339, 1279 - 914, 1280 - 1212, 1281 -
--

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

<p>1213, 1282 - 961, 1283 - 1122, 1284 - 1137, 1285 - 1116, 1285 - 1408, 1286 - 1288, 1287 - 1019, 1288 - 868, 1290 - 1250, 1290 - 1495, 1291 - 1245, 1291 - 1435, 1292 - 1267, 1293 - 857, 1293 - 912, 1293 - 978, 1294 - 886, 1294 - 912, 1295 - 1328, 1296 - 1284, 1297 - 1298, 1298 - 1285, 1301 - 1120, 1302 - 1141, 1303 - 1598, 1305 - 1307, 1306 - 1045, 1306 - 1304, 1307 - 986, 1308 - 1024, 1308 - 1420, 1309 - 1562, 1309 - 1802, 1310 - 1250, 1311 - 1329, 1312 - 893, 1313 - 1149, 1313 - 1265, 1315 - 815, 1315 - 1314, 1318 - 978, 1318 - 1316, 1319 - 979, 1319 - 1317, 1320 - 878, 1321 - 1323, 1322 - 1476, 1323 - 876, 1325 - 1203, 1327 - 1245, 1330 - 1587, 1333 - 1335, 1334 - 794, 1334 - 1332, 1335 - 1075, 1336 - 1213, 1337 - 827, 1337 - 1262, 1338 - 964, 1340 - 1261, 1341 - 1468, 1342 - 1123, 1342 - 1301, 1343 - 91, 1344 - 1343, 1345 - 804, 1347 - 1234, 1348 - 1217, 1349 - 839, 1350 - 959, 1352 - 1353, 1353 - 1196, 1354 - 975, 1355 - 822, 1356 - 1070, 1356 - 1390, 1357 - 1140, 1357 - 1155, 1358 - 859, 1358 - 1161, 1359 - 688, 1359 - 1104, 1360 - 1323, 1362 - 1361, 1362 - 1570, 1363 - 1233, 1363 - 1499, 1364 - 1365, 1365 - 1180, 1366 - 975, 1367 - 1185, 1368 - 1138, 1369 - 1601, 1371 - 1009, 1371 - 1370, 1372 - 858, 1373 - 1201, 1374 - 1101, 1374 - 1335, 1376 - 1392, 1376 - 1538, 1377 - 1378, 1378 - 995, 1379 - 797, 1380 - 1189, 1381 - 1512, 1382 - 92, 1382 - 1148, 1383 - 1382, 1383 - 1482, 1384 - 92, 1384 - 972, 1384 - 1179, 1384 - 1565, 1385 - 794, 1387 - 908, 1388 - 1379, 1389 - 1170, 1390 - 1248, 1391 - 1392, 1392 - 1276, 1393 - 820, 1394 - 1393, 1395 - 1397, 1396 - 1140, 1397 - 1141, 1398 - 1544, 1400 - 1401, 1401 - 996, 1402 - 981, 1406 - 1407, 1407 - 994, 1410 - 929, 1410 - 1601, 1411 - 870, 1411 - 1408, 1412 - 1413, 1413 - 1556, 1415 - 1453, 1416 - 1398, 1416 - 1440, 1417 - 1151, 1417 - 1284, 1417 - 1548, 1418 - 93, 1418 - 870, 1418 - 871, 1418 - 1298, 1419 - 796, 1420 - 912, 1421 - 1423, 1422 - 1421, 1423 - 1463, 1424 - 895, 1425 - 1066, 1426 - 96, 1426 - 804, 1426 - 849, 1426 - 879, 1426 - 917, 1426 - 1346, 1426 - 1386, 1427 - 97, 1427 - 1249, 1428 - 1092, 1429 - 1093, 1430 - 738, 1430 - 1133, 1430 - 1414, 1431 - 1089, 1431 - 1427, 1432 - 865, 1432 - 1367, 1432 - 1427, 1432 - 1431, 1435 - 1138, 1435 - 1518, 1436 - 1052, 1436 - 1054, 1439 - 1052, 1439 - 1437, 1440 - 1051, 1440 - 1438, 1441 - 1443, 1443 - 1397, 1444 - 657, 1444 - 1217, 1445 - 1424, 1448 - 892, 1448 - 1446, 1449 - 893, 1449 - 1447, 1450 - 1054, 1451 - 1139, 1452 - 932, 1452 - 1127, 1452 - 1166, 1452 - 1351, 1453 - 1158, 1453 - 1167, 1454 - 913, 1454 - 1283, 1455 - 1504, 1456 - 1504, 1457 - 1459, 1459 - 891, 1460 - 963, 1460 - 1458, 1462 - 814, 1462 - 1310, 1463 - 1182, 1464 - 1063, 1465 - 1399, 1466 - 1482, 1467 - 834, 1467 - 1293, 1468 - 1021, 1469 - 958, 1469 - 1515, 1469 - 1554, 1470 - 882, 1470 - 1469, 1470 - 1555, 1473 - 1190, 1474 - 1190, 1475 - 1295, 1475 - 1435, 1476 - 885, 1476 - 1168, 1476 - 1360, 1477 - 817, 1477 - 1574, 1478 - 978, 1479 - 1209, 1480 - 973, 1481 - 973, 1482 - 900, 1483 - 789, 1483 - 790, 1483 - 791, 1483 - 803, 1483 - 1114, 1484 - 788, 1484 - 1115, 1485 - 1147, 1485 - 1162, 1486 - 657, 1488 - 814, 1489 - 829, 1489 - 1055, 1489 - 1185, 1489 - 1426, 1489 - 1431, 1490 - 883, 1490 - 1153, 1491 - 1490, 1492 - 1487, 1493 - 1494, 1494 - 1351, 1495 - 1096, 1496 - 1498, 1497 - 1499, 1498 - 1230, 1499 - 1231, 1500 - 1115, 1500 - 1277, 1501 - 991, 1502 - 98, 1502 - 810, 1502 - 1366, 1502 - 1394, 1502 - 1484, 1503 - 918, 1503 - 1339, 1503 - 1483, 1503 - 1502, 1504 - 100, 1505 - 101, 1505 - 1557, 1507 - 1303, 1508 -</p>
--

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

1257, 1508 - 1506, 1509 - 1511, 1511 - 1095, 1512 - 1136, 1513 - 921, 1513 - 939, 1513 - 1439, 1514 - 894, 1514 - 1252, 1514 - 1253, 1514 - 1416, 1515 - 1502, 1516 - 968, 1517 - 1200, 1517 - 1506, 1517 - 1507, 1517 - 1584, 1518 - 1241, 1519 - 1520, 1520 - 1344, 1521 - 1522, 1522 - 1179, 1523 - 1033, 1523 - 1037, 1523 - 1044, 1523 - 1202, 1524 - 102, 1524 - 1030, 1524 - 1032, 1524 - 1038, 1524 - 1040, 1524 - 1203, 1524 - 1373, 1525 - 792, 1525 - 1138, 1526 - 1233, 1526 - 1498, 1527 - 1201, 1527 - 1346, 1528 - 1123, 1528 - 1262, 1529 - 1531, 1530 - 1532, 1531 - 866, 1532 - 1132, 1533 - 1369, 1533 - 1461, 1534 - 1194, 1534 - 1504, 1535 - 1111, 1536 - 103, 1536 - 1045, 1536 - 1163, 1536 - 1204, 1536 - 1276, 1537 - 1389, 1537 - 1415, 1537 - 1494, 1538 - 104, 1538 - 851, 1538 - 1307, 1538 - 1329, 1539 - 943, 1539 - 995, 1539 - 1353, 1539 - 1404, 1539 - 1442, 1540 - 1378, 1540 - 1405, 1540 - 1443, 1541 - 1518, 1542 - 1505, 1543 - 878, 1543 - 1269, 1545 - 1094, 1545 - 1275, 1546 - 1069, 1546 - 1244, 1548 - 1547, 1548 - 1579, 1549 - 1065, 1549 - 1486, 1550 - 1418, 1551 - 1416, 1552 - 107, 1552 - 837, 1552 - 874, 1552 - 1008, 1552 - 1011, 1552 - 1074, 1552 - 1371, 1552 - 1388, 1553 - 107, 1553 - 833, 1553 - 1007, 1553 - 1012, 1553 - 1129, 1553 - 1347, 1556 - 1171, 1558 - 821, 1559 - 822, 1560 - 852, 1561 - 862, 1562 - 840, 1563 - 1564, 1564 - 1234, 1565 - 1239, 1565 - 1573, 1566 - 825, 1566 - 826, 1567 - 1569, 1568 - 1570, 1569 - 1278, 1570 - 906, 1571 - 1103, 1571 - 1120, 1572 - 998, 1573 - 855, 1574 - 1089, 1574 - 1343, 1575 - 865, 1575 - 920, 1576 - 1148, 1576 - 1193, 1576 - 1383, 1576 - 1433, 1577 - 913, 1577 - 1293, 1577 - 1294, 1577 - 1434, 1578 - 1560, 1579 - 1346, 1580 - 1319, 1581 - 962, 1581 - 1146, 1581 - 1407, 1581 - 1580, 1583 - 1026, 1583 - 1540, 1584 - 1399, 1585 - 861, 1586 - 1582, 1587 - 1329, 1588 - 1589, 1589 - 1066, 1590 - 1592, 1592 - 1560, 1594 - 850, 1594 - 1213, 1595 - 1144, 1595 - 1430, 1596 - 796, 1597 - 797, 1598 - 1140, 1599 - 1206, 1599 - 1233, 1600 - 1138, 1600 - 1461, 1602 - 380, 1603 - 111, 1604 - 1605, 1605 - 1603, 1606 - 1673, 1611 - 1610, 1613 - 1859, 1616 - 2071, 1618 - 1617, 1619 - 1618, 1620 - 2059, 1621 - 1620, 1622 - 1894, 1622 - 2076, 1623 - 113, 1623 - 1610, 1624 - 113, 1624 - 1898, 1626 - 2113, 1627 - 2087, 1631 - 1647, 1632 - 1664, 1633 - 1874, 1633 - 1906, 1634 - 2113, 1636 - 1635, 1639 - 2103, 1641 - 1612, 1645 - 1650, 1647 - 114, 1648 - 1647, 1649 - 115, 1649 - 1642, 1650 - 116, 1650 - 2077, 1651 - 1618, 1655 - 117, 1655 - 1646, 1656 - 1614, 1657 - 2002, 1658 - 2078, 1659 - 1629, 1662 - 1612, 1663 - 1652, 1664 - 1775, 1665 - 1664, 1667 - 1661, 1667 - 1666, 1668 - 1743, 1669 - 1654, 1670 - 1669, 1671 - 2060, 1673 - 1656, 1674 - 1646, 1675 - 1917, 1680 - 118, 1681 - 1680, 1683 - 1682, 1684 - 1675, 1684 - 1683, 1686 - 120, 1687 - 120, 1687 - 1608, 1689 - 1702, 1689 - 2062, 1690 - 1878, 1692 - 1642, 1693 - 1632, 1693 - 1658, 1695 - 1694, 1696 - 1697, 1697 - 1686, 1698 - 1814, 1700 - 1609, 1700 - 1669, 1702 - 1687, 1705 - 1814, 1706 - 2112, 1707 - 2113, 1710 - 1884, 1711 - 1885, 1715 - 2022, 1717 - 1954, 1717 - 1967, 1717 - 2108, 1718 - 1717, 1720 - 1686, 1722 - 1844, 1725 - 1882, 1727 - 1726, 1729 - 1602, 1731 - 1647, 1731 - 1723, 1734 - 1624, 1735 - 1639, 1735 - 1733, 1736 - 196, 1737 - 1660, 1737 - 1733, 1738 - 1883, 1739 - 1716, 1740 - 2064, 1741 - 1882, 1743 - 1635, 1743 - 1742, 1746 - 2085, 1748 - 1637, 1748 - 1715, 1749 - 1755, 1750 - 1919, 1751 - 2072, 1752 - 1649, 1753 - 258, 1754 - 1920, 1755 - 1773, 1756 - 1726, 1757 - 1679, 1758 - 1669, 1759

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

- 1603, 1760 - 123, 1761 - 124, 1761 - 1644, 1762 - 123, 1763 - 124, 1763 - 1761, 1764 - 123, 1764 - 1760, 1765 - 1883, 1766 - 1726, 1767 - 1647, 1767 - 1734, 1768 - 1919, 1769 - 1919, 1770 - 1920, 1771 - 2066, 1772 - 1753, 1772 - 1801, 1773 - 2066, 1775 - 125, 1776 - 1645, 1777 - 1619, 1777 - 1776, 1782 - 1778, 1783 - 1752, 1783 - 1782, 1784 - 1919, 1787 - 283, 1787 - 1729, 1788 - 1662, 1788 - 1703, 1790 - 1789, 1791 - 1774, 1791 - 1786, 1792 - 1919, 1793 - 1699, 1794 - 1756, 1795 - 1724, 1796 - 1793, 1796 - 1794, 1796 - 1843, 1797 - 1668, 1798 - 1797, 1800 - 1747, 1801 - 1759, 1802 - 2092, 1803 - 1802, 1804 - 1652, 1804 - 1661, 1805 - 1660, 1808 - 1734, 1809 - 1607, 1810 - 1635, 1811 - 1810, 1813 - 1812, 1814 - 129, 1815 - 1814, 1816 - 2068, 1817 - 2061, 1818 - 2068, 1819 - 1818, 1820 - 1625, 1820 - 1814, 1822 - 130, 1822 - 1758, 1823 - 130, 1823 - 1609, 1823 - 1629, 1824 - 1906, 1825 - 1727, 1825 - 2101, 1826 - 1608, 1826 - 1662, 1827 - 1686, 1828 - 1822, 1829 - 1807, 1830 - 1623, 1830 - 1734, 1832 - 1623, 1832 - 1694, 1834 - 1681, 1835 - 1688, 1838 - 1723, 1838 - 1830, 1839 - 131, 1839 - 1619, 1839 - 1807, 1842 - 2054, 1845 - 135, 1845 - 1658, 1845 - 1821, 1846 - 135, 1846 - 1643, 1846 - 1831, 1847 - 1716, 1848 - 1616, 1849 - 2071, 1851 - 1673, 1854 - 1674, 1855 - 1761, 1857 - 1822, 1858 - 1998, 1859 - 1681, 1860 - 1634, 1861 - 1691, 1862 - 1746, 1862 - 1860, 1863 - 1760, 1864 - 1676, 1864 - 1831, 1865 - 1812, 1865 - 1812, 1866 - 1865, 1867 - 1615, 1870 - 1728, 1871 - 1637, 1871 - 1721, 1872 - 1025, 1873 - 2070, 1874 - 1691, 1876 - 1875, 1877 - 1869, 1877 - 1875, 1877 - 1880, 1878 - 1796, 1878 - 1876, 1879 - 1690, 1880 - 138, 1880 - 1868, 1881 - 138, 1881 - 1873, 1882 - 140, 1883 - 1761, 1884 - 1649, 1884 - 1730, 1884 - 2061, 1885 - 1799, 1885 - 1819, 1886 - 1647, 1887 - 1647, 1888 - 1760, 1889 - 1624, 1890 - 1889, 1892 - 1891, 1893 - 1674, 1894 - 1795, 1896 - 2060, 1897 - 1620, 1897 - 1988, 1899 - 1898, 1900 - 1895, 1901 - 1655, 1901 - 1744, 1901 - 1924, 1902 - 141, 1902 - 2002, 1903 - 141, 1903 - 1640, 1903 - 1900, 1904 - 142, 1904 - 1681, 1905 - 142, 1906 - 145, 1906 - 1724, 1906 - 1744, 1906 - 1928, 1907 - 144, 1907 - 1677, 1907 - 1906, 1907 - 1929, 1908 - 1920, 1909 - 1919, 1910 - 1823, 1912 - 1701, 1913 - 1658, 1914 - 1907, 1915 - 1914, 1916 - 1651, 1917 - 1656, 1918 - 1653, 1918 - 1674, 1918 - 1852, 1919 - 147, 1919 - 1778, 1919 - 1789, 1920 - 148, 1920 - 1779, 1920 - 1781, 1920 - 1785, 1921 - 1613, 1921 - 1680, 1922 - 1701, 1922 - 1921, 1923 - 1893, 1924 - 1854, 1925 - 149, 1925 - 1847, 1926 - 1678, 1926 - 1824, 1926 - 1853, 1927 - 1895, 1930 - 1650, 1930 - 2074, 1931 - 1650, 1932 - 1637, 1932 - 1880, 1933 - 1925, 1934 - 1885, 1935 - 1766, 1935 - 1878, 1936 - 2044, 1937 - 2045, 1938 - 2091, 1939 - 1845, 1939 - 1848, 1940 - 1625, 1941 - 2105, 1942 - 1776, 1942 - 1829, 1943 - 1888, 1944 - 1835, 1945 - 1676, 1945 - 1757, 1945 - 1845, 1945 - 1850, 1946 - 1867, 1947 - 1880, 1948 - 1649, 1948 - 1947, 1949 - 1865, 1950 - 1654, 1951 - 1703, 1951 - 1950, 1952 - 1822, 1953 - 1952, 1953 - 2093, 1956 - 1649, 1956 - 1704, 1956 - 1955, 1957 - 1987, 1958 - 1957, 1959 - 1739, 1959 - 1906, 1960 - 1680, 1960 - 1834, 1961 - 1886, 1962 - 1686, 1962 - 1837, 1964 - 1760, 1964 - 1809, 1966 - 2090, 1968 - 2113, 1969 - 1739, 1969 - 1814, 1971 - 1644, 1974 - 1705, 1975 - 1836, 1975 - 1914, 1976 - 1833, 1976 - 1974, 1977 - 1931, 1978 - 1869, 1978 - 2013, 1979 - 2074, 1980 - 2077, 1981 - 1730, 1982 - 1981, 1983 -
--

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

1666, 1983 - 1687, 1984 - 1618, 1985 - 1659, 1985 - 1827, 1986 - 1673, 1986 - 1853, 1986 - 1856, 1987 - 150, 1987 - 1610, 1987 - 1889, 1987 - 1967, 1987 - 1981, 1987 - 2014, 1988 - 151, 1988 - 1934, 1988 - 2108, 1990 - 1638, 1990 - 2079, 1991 - 1850, 1991 - 1989, 1992 - 1663, 1992 - 1846, 1993 - 1737, 1993 - 1943, 1994 - 1873, 1995 - 1921, 1996 - 1911, 1997 - 1680, 1998 - 1679, 1999 - 1744, 1999 - 1970, 2000 - 1843, 2000 - 1881, 2001 - 1602, 2006 - 2004, 2007 - 2005, 2008 - 2006, 2009 - 2007, 2010 - 1839, 2010 - 2006, 2010 - 2007, 2011 - 2003, 2011 - 2010, 2012 - 1680, 2012 - 1922, 2013 - 1873, 2014 - 1898, 2015 - 1640, 2015 - 1684, 2015 - 1946, 2016 - 1882, 2018 - 1653, 2018 - 1929, 2019 - 2018, 2020 - 1641, 2020 - 1664, 2021 - 1891, 2023 - 1863, 2023 - 2001, 2024 - 1643, 2025 - 1949, 2026 - 2025, 2027 - 1647, 2027 - 1732, 2028 - 1647, 2029 - 1682, 2029 - 2064, 2030 - 1619, 2031 - 1617, 2032 - 1841, 2033 - 1881, 2033 - 1955, 2035 - 1881, 2035 - 2022, 2036 - 2039, 2038 - 1667, 2038 - 1914, 2038 - 1970, 2040 - 2021, 2041 - 1747, 2041 - 1892, 2042 - 1748, 2043 - 482, 2043 - 1745, 2044 - 1638, 2044 - 1747, 2045 - 1637, 2046 - 1709, 2047 - 1833, 2047 - 1856, 2047 - 1971, 2048 - 1965, 2048 - 1968, 2049 - 1944, 2049 - 1989, 2050 - 1880, 2050 - 2034, 2051 - 2079, 2052 - 2045, 2053 - 2042, 2055 - 1748, 2056 - 1714, 2056 - 1747, 2056 - 2021, 2057 - 2052, 2058 - 2021, 2058 - 2034, 2059 - 1672, 2059 - 2091, 2060 - 1957, 2061 - 1748, 2063 - 1984, 2064 - 1883, 2065 - 1736, 2065 - 1806, 2065 - 1877, 2066 - 1920, 2067 - 1780, 2067 - 1784, 2067 - 2107, 2068 - 1650, 2069 - 1685, 2069 - 1814, 2069 - 2046, 2070 - 1638, 2070 - 1844, 2071 - 1720, 2072 - 1920, 2073 - 1900, 2073 - 1902, 2073 - 1927, 2074 - 2072, 2075 - 1902, 2075 - 2032, 2076 - 1923, 2077 - 1781, 2078 - 1995, 2079 - 1881, 2080 - 1846, 2080 - 1922, 2081 - 2076, 2082 - 1747, 2083 - 1024, 2084 - 1823, 2084 - 1965, 2085 - 1719, 2085 - 1996, 2086 - 1688, 2086 - 1913, 2087 - 1609, 2087 - 1719, 2089 - 898, 2089 - 2088, 2090 - 152, 2090 - 1810, 2090 - 1865, 2091 - 1972, 2091 - 2090, 2092 - 2088, 2093 - 1861, 2094 - 2078, 2095 - 1606, 2095 - 1933, 2096 - 1681, 2096 - 1912, 2097 - 1910, 2098 - 1828, 2099 - 2097, 2099 - 2098, 2100 - 1839, 2100 - 1916, 2101 - 1855, 2102 - 1836, 2102 - 1837, 2103 - 1603, 2104 - 1728, 2104 - 1903, 2105 - 1868, 2106 - 1657, 2106 - 2038, 2107 - 1628, 2109 - 2108, 2110 - 1884, 2111 - 1885, 2112 - 154, 2112 - 1628, 2112 - 1704, 2112 - 1709, 2112 - 1911, 2113 - 154, 2113 - 1708, 2113 - 1786, 2113 - 1790, 2114 - 1748, 2114 - 1966, 2115 - 2080, 2116 - 2167, 2117 - 2235, 2118 - 2131, 2118 - 2134, 2119 - 2220, 2119 - 2311, 2120 - 2365, 2121 - 2158, 2121 - 2380, 2122 - 2121, 2122 - 2315, 2123 - 2119, 2124 - 303, 2124 - 2129, 2124 - 2308, 2125 - 2377, 2126 - 2132, 2127 - 2284, 2128 - 2365, 2129 - 2193, 2130 - 2137, 2131 - 2306, 2132 - 2196, 2134 - 155, 2134 - 2133, 2135 - 2268, 2136 - 2282, 2137 - 2142, 2137 - 2348, 2138 - 2169, 2138 - 2377, 2139 - 2138, 2139 - 2304, 2140 - 2339, 2141 - 2357, 2142 - 2316, 2143 - 2187, 2145 - 2144, 2145 - 2328, 2146 - 2137, 2147 - 2233, 2148 - 2374, 2150 - 2322, 2151 - 2323, 2152 - 2260, 2154 - 2200, 2154 - 2303, 2155 - 2362, 2156 - 2157, 2157 - 157, 2158 - 2157, 2159 - 2165, 2159 - 2251, 2160 - 2159, 2161 - 2375, 2162 - 2195, 2163 - 2196, 2164 - 2135, 2164 - 2151, 2165 - 159, 2165 - 2263, 2166 - 2116, 2166 - 2168, 2167 - 2169, 2167 - 2287, 2167 - 2371, 2168 - 2275, 2168 - 2370, 2169 - 162, 2169 - 2147, 2170 - 161,

Πίνακας 7.1: Μετρήσεις ροής ισχύος (ενεργής και άεργης) για το πρώτο αρχείο μετρήσεων (συνέχεια)

<p>2170 - 2327, 2171 - 2166, 2172 - 2341, 2172 - 2356, 2173 - 2138, 2173 - 2172, 2173 - 2179, 2173 - 2332, 2174 - 2257, 2175 - 2186, 2176 - 2247, 2177 - 2232, 2178 - 2199, 2179 - 2299, 2180 - 2172, 2181 - 2339, 2182 - 2340, 2183 - 2235, 2184 - 2286, 2185 - 2175, 2186 - 164, 2187 - 165, 2188 - 163, 2188 - 2186, 2189 - 2146, 2190 - 2382, 2191 - 2276, 2191 - 2335, 2192 - 2237, 2193 - 2186, 2194 - 2126, 2194 - 2134, 2195 - 166, 2196 - 167, 2196 - 2195, 2197 - 2333, 2198 - 2258, 2198 - 2272, 2199 - 2121, 2200 - 2361, 2202 - 2201, 2202 - 2376, 2203 - 2205, 2204 - 2196, 2205 - 2170, 2206 - 2170, 2207 - 2209, 2208 - 2255, 2209 - 2178, 2209 - 2351, 2210 - 2204, 2211 - 2214, 2212 - 2195, 2213 - 2158, 2214 - 2157, 2215 - 2217, 2216 - 2117, 2218 - 225, 2218 - 2216, 2219 - 2251, 2220 - 2196, 2221 - 2187, 2221 - 2188, 2221 - 2238, 2222 - 2227, 2222 - 2352, 2223 - 2221, 2224 - 2211, 2224 - 2213, 2224 - 2318, 2225 - 2187, 2226 - 1607, 2227 - 2339, 2228 - 2191, 2229 - 2125, 2229 - 2150, 2230 - 2229, 2231 - 2236, 2232 - 2362, 2233 - 2165, 2233 - 2259, 2233 - 2259, 2234 - 1761, 2234 - 2361, 2235 - 2257, 2236 - 2359, 2237 - 2217, 2238 - 2298, 2239 - 2380, 2240 - 2223, 2241 - 2170, 2242 - 2280, 2244 - 1883, 2245 - 313, 2245 - 2120, 2245 - 2218, 2246 - 2242, 2246 - 2258, 2247 - 2237, 2248 - 2054, 2248 - 2269, 2249 - 214, 2249 - 315, 2249 - 2262, 2250 - 2124, 2250 - 2191, 2251 - 2136, 2252 - 2311, 2253 - 2274, 2254 - 2380, 2255 - 2139, 2256 - 2283, 2257 - 2260, 2258 - 169, 2258 - 2257, 2258 - 2261, 2260 - 170, 2261 - 171, 2261 - 2260, 2262 - 2257, 2263 - 2168, 2264 - 2271, 2265 - 2378, 2266 - 2261, 2267 - 2174, 2267 - 2228, 2268 - 2239, 2269 - 2133, 2270 - 2264, 2271 - 2260, 2272 - 2261, 2272 - 2270, 2273 - 1882, 2273 - 2237, 2274 - 2192, 2274 - 2197, 2274 - 2273, 2275 - 2170, 2276 - 2225, 2277 - 2366, 2278 - 1883, 2278 - 2215, 2279 - 2160, 2280 - 2279, 2281 - 2334, 2282 - 2166, 2283 - 2326, 2284 - 2159, 2285 - 2190, 2285 - 2314, 2286 - 2167, 2287 - 2256, 2288 - 2344, 2288 - 2345, 2290 - 2127, 2290 - 2152, 2291 - 2305, 2292 - 2232, 2293 - 2330, 2294 - 2143, 2295 - 2212, 2296 - 2165, 2296 - 2184, 2297 - 2166, 2298 - 2161, 2299 - 2169, 2300 - 2353, 2301 - 2218, 2302 - 2196, 2303 - 2343, 2304 - 2300, 2305 - 2316, 2306 - 2123, 2307 - 2169, 2308 - 2292, 2309 - 2186, 2309 - 2243, 2310 - 2244, 2310 - 2273, 2310 - 2289, 2312 - 2313, 2313 - 2149, 2313 - 2381, 2316 - 2210, 2317 - 2350, 2318 - 2321, 2319 - 2313, 2320 - 2203, 2321 - 2323, 2322 - 2323, 2323 - 2254, 2323 - 2329, 2323 - 2380, 2324 - 2188, 2324 - 2243, 2324 - 2379, 2325 - 2185, 2326 - 2367, 2327 - 2293, 2328 - 2165, 2328 - 2203, 2329 - 2317, 2330 - 2171, 2331 - 335, 2331 - 2260, 2332 - 2180, 2333 - 1882, 2334 - 2231, 2335 - 2240, 2336 - 2195, 2336 - 2294, 2337 - 2134, 2338 - 2166, 2338 - 2241, 2338 - 2281, 2339 - 172, 2340 - 173, 2340 - 2339, 2341 - 2208, 2342 - 2339, 2342 - 2343, 2343 - 2339, 2344 - 2342, 2345 - 2141, 2346 - 2244, 2347 - 2342, 2347 - 2342, 2348 - 2379, 2349 - 2140, 2349 - 2140, 2350 - 2366, 2351 - 2157, 2352 - 2177, 2352 - 2187, 2353 - 2378, 2354 - 2300, 2354 - 2377, 2355 - 2230, 2355 - 2265, 2356 - 2206, 2357 - 174, 2357 - 175, 2357 - 2363, 2357 - 2372, 2357 - 2372, 2358 - 2357, 2358 - 2361, 2359 - 2324, 2360 - 2155, 2362 - 2226, 2362 - 2361, 2363 - 2360, 2364 - 2367, 2365 - 2261, 2366 - 2156, 2367 - 2170, 2368 - 2119, 2368 - 2119, 2368 - 2195, 2369 - 2119, 2373 - 2372, 2374 - 2153, 2374 - 2319, 2375 - 2159, 2376 - 2273, 2377 - 176, 2378 - 176, 2378 - 2377, 2379 - 2295,</p>
--

2380 - 178, 2381 - 179, 2381 - 2380, 2382 - 2381, 2383 - 1623, 2383 - 1624
--

Πίνακας 7.2: Μετρήσεις έγχυσης ισχύος (ενεργής και άεργης) για όλα τα αρχεία μετρήσεων

Μετρήσεις ενεργής / άεργης ροής ισχύος στους ζυγούς:
1

Πίνακας 7.3: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για το πρώτο αρχείο μετρήσεων, οι οποίες θα αποτελούν τις συμβατικές μετρήσεις μέτρου τάσης στα αρχεία μετρήσεων 3,5,7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης στους ζυγούς:
121, 160, 565, 617, 1098, 1375, 1712, 1840, 1963, 2037

Πίνακας 7.4: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για το πρώτο αρχείο μετρήσεων, οι οποίες θα αποτελούν επιπλέον συμβατικές μετρήσεις ροής ισχύος στα αρχεία μετρήσεων 2~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ρεύματος στους κλάδους:
121-122, 121-151, 121-1747, 121-1748, 160-159, 160-168, 160-177, 160-2166, 565-654, 565-655, 565-664, 565-762, 617-35, 617-543, 617-560, 617-620, 1098-874, 1098-1097, 1098-1419, 1098-1472, 1375-1247, 1375-1248, 1375-1376, 1375-1445, 1712-1713, 1712-1760, 1712-1762, 1712-2017, 1840-132, 1840-1617, 1840-1630, 1840-2010, 1963-1694, 1963-1742, 1963-1865, 1963-1973, 2037-1977, 2037-2022, 2037-2036, 2037-2055

Πίνακας 7.5: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 2~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης στους ζυγούς:
12, 25, 42, 106, 133, 150, 211, 411, 502, 552, 612, 799, 915, 919, 1212, 1251, 1328, 1356, 1432, 1505, 1523, 1576, 1580, 1603, 1902, 2091, 2121, 2124, 2172, 2188

Πίνακας 7.6: : Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 2~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ρεύματος στους κλάδους:
12-7, 12-140, 12-359, 12-360, 25-41, 25-53, 25-54, 25-564, 42-41, 42-47, 42-54, 42-689, 106-92, 106-103, 106-105, 106-180, 133-115, 133-131, 133-134, 133-182, 150-132, 150-151, 150-152, 150-1987, 211-209, 211-233, 211-333, 211-386, 411-263, 411-412, 411-423, 411-426, 502-21, 502-455, 502-483, 502-499, 552-553, 552-588, 552-643, 552-771, 612-413, 612-424, 612-613, 612-769, 799-798, 799-996, 799-1135, 799-1300, 915-933, 915-1072, 915-1095, 915-1236, 919-822, 919-974, 919-1049, 919-1077, 1212-1144, 1212-1213, 1212-1280, 1212-1582, 1251-910, 1251-1243, 1251-1250, 1251-1487, 1328-807, 1328-851, 1328-1086, 1328-1295, 1356-800, 1356-801, 1356-1070, 1356-1390, 1432-865, 1432-1367, 1432-1427, 1432-1431, 1505-101, 1505-1219, 1505-1542, 1505-1557, 1523-1033, 1523-1037, 1523-1044, 1523-1202, 1576-1148, 1576-1193, 1576-1383, 1576-1433, 1580-1175, 1580-1177, 1580-1319, 1580-1581, 1603-111, 1603-1605, 1603-1759, 1603-2103, 1902-141, 1902-2002, 1902-2073, 1902-2075, 2091-1938, 2091-1972, 2091-2059, 2091-2090, 2121-2122, 2121-2158, 2121-2199, 2121-2380, 2124-303, 2124-2129, 2124-2250, 2124-2308, 2172-2173, 2172-2180, 2172-2341, 2172-2356, 2188-163, 2188-2186, 2188-2221, 2188-2324

Πίνακας 7.7: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 4~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης στους ζυγούς:
23, 61, 68, 96, 107, 113, 145, 159, 347, 359, 551, 836, 1106, 1115, 1517, 1540, 1618, 2038, 2138, 2191

Πίνακας 7.8: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 4~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ρεύματος στους κλάδους:
23-37, 23-46, 23-53, 23-540, 61-62, 61-64, 61-109, 61-184, 68-66, 68-78, 68-978, 68-979, 96-63, 96-80, 96-95, 96-1426, 107-70, 107-108, 107-1552, 107-1553, 113-114, 113-151, 113-1623, 113-1624, 145-128, 145-143, 145-146, 145-1906, 159-160, 159-165, 159-176, 159-2165, 347-10, 347-336, 347-345, 347-386, 359-12, 359-375, 359-378, 359-393, 551-746, 551-750, 551-757, 551-784, 836-60, 836-890, 836-1105, 836-1365, 1106-78, 1106-835, 1106-1166, 1106-1170, 1115-81, 1115-1181, 1115-1484, 1115-1500, 1517-1200, 1517-1506, 1517-1507, 1517-1584, 1540-1378, 1540-1405, 1540-1443, 1540-1583, 1618-1617, 1618-1619, 1618-1651, 1618-1984, 2038-1667, 2038-1914, 2038-1970, 2038-2106, 2138-2139, 2138-2169, 2138-2173, 2138-2377, 2191-2228, 2191-2250, 2191-2276, 2191-2335

Πίνακας 7.9: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας τάσης για τα αρχεία μετρήσεων 6~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης στους ζυγούς:
76, 101, 120, 163, 344, 527, 798, 916, 944, 1024, 1025, 1050, 1669, 1673, 1796, 1877, 1921, 2173, 2313, 2361

Πίνακας 7.10: Συγχρονισμένες μετρήσεις μέτρου / φασικής γωνίας ρεύματος για τα αρχεία μετρήσεων 6~7

Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ρεύματος στους κλάδους:
76-18, 76-74, 76-75, 76-105, 101-18, 101-99, 101-100, 101-1505, 120-125, 120-130, 120-1686, 120-1687, 163-164, 163-165, 163-172, 163-2188, 344-346, 344-346, 344-381, 344-523, 527-22, 527-205, 527-268, 527-441, 798-799, 798-1134, 798-1163, 798-1299, 916-903, 916-934, 916-1073, 916-1095, 944-940, 944-941, 944-1117, 944-1591, 1024-978, 1024-1025, 1024-1308, 1024-2083, 1025-912, 1025-968, 1025-1024, 1025-1872, 1050-877, 1050-1046, 1050-1047, 1050-1147, 1669-1654, 1669-1670, 1669-1700, 1669-1758, 1673-1606, 1673-1656, 1673-1851, 1673-1986, 1796-1793, 1796-1794, 1796-1843, 1796-1878, 1877-1869, 1877-1875, 1877-1880, 1877-2065, 1921-1613, 1921-1680, 1921-1922, 1921-1995, 2173-2138, 2173-2172, 2173-2179, 2173-2332, 2313-2149, 2313-2312, 2313-2319, 2313-2381, 2361-2200, 2361-2234, 2361-2358, 2361-2362