



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

Βέλτιστη Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών με Χρήση
Ακέραιου Προγραμματισμού και Γενετικού Αλγορίθμου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελισάβετ Π. Σταμαδιάνου

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2014



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

Βέλτιστη Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών με Χρήση
Ακέραιου Προγραμματισμού και Γενετικού Αλγορίθμου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελισάβετ Π. Σταμαδιάνου

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ...η.

.....
Γ.Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ν.Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Π.Γεωργιλάκης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

.....
Ελισάβετ Π. Σταμαδιάνου

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

Copyright © Ελισάβετ Π. Σταμαδιάνου, 2014

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 παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (PMUs) με στόχο την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας των δικτύων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη τοποθέτηση PMUs αναφέρεται στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των υπό εγκατάσταση PMUs, που απαιτείται για να επιτευχθεί πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου.

Αρχικά, πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή από τη σύλληψη της ιδέας των συγχρονισμένων μετρήσεων μέχρι τη σημερινή εκδοχή των PMUs, τις βασικές ιδιότητες και τα μέρη μιας PMU, ενώ γίνεται και μια σύγκρισή τους με εκείνες της τεχνολογίας SCADA. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης ενός δικτύου με PMUs και οι κανόνες που πρέπει να πληρούνται για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας. Επίσης γίνεται μια σύντομη βιβλιογραφική αναφορά και ταξινόμηση των πιο γνωστών μεθόδων που έχουν δημοσιευτεί και αφορούν στην επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας. Κατόπιν παρουσιάζεται αναλυτικά η πιο διαδεδομένη μέθοδος βέλτιστης επίλυσης του προβλήματος με χρήση Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Στη συνέχεια εισάγεται και αναλύεται η έννοια του Γενικευμένου Ακέραιου Προγραμματισμού.

Έχοντας παρουσιάσει τις βασικές μεθόδους επίλυσης του προβλήματος, επιλέγονται τρεις μέθοδοι οι οποίες αναπτύσσονται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, η επίλυση με Δυαδικό Ακέραιο Προγραμματισμό (ΔΑΠ), η επίλυση με Μικτό Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (ΜΑΠ) και η επίλυση με το Γενετικό Αλγόριθμο (ΓΑ). Με τις μεθόδους αυτές δοκιμάζονται διάφορες περιπτώσεις για τέσσερα πρότυπα IEEE δίκτυα.

Συνολικά εξετάζονται τα δίκτυα 14, 30, 57 και 118 ζυγών της IEEE. Η μελέτη ολοκληρώνεται με λεπτομερή ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων, καθώς και διεξαγωγή συμπερασμάτων για τη βέλτιστη προσέγγιση και επίλυση του προβλήματος.

Λέξεις κλειδιά

Φασιθέτης, Συγχρονισμένες μετρήσεις Φασιθετών, Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών, Εκτίμηση Κατάστασης, Παρατηρησιμότητα, Βέλτιστη Τοποθέτηση Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών, Δυαδικός Ακέραιος Προγραμματισμός, Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός, Γενετικός Αλγόριθμος, Πολλαπλότητα Λύσεων.

Abstract

The present Diploma Thesis deals with the problem of Optimal Placement of Phasor Measurement Units (PMUs) in order to achieve full Observability within a Power Network. The term “Optimal Placement” refers to the minimum number of PMUs needed to achieve full Observability within the Network.

First of all the thesis presents the historical development, starting from the original concept of synchronized measurements until the modern standard of PMU device, the basic features and parts of a PMU. These features are also compared with the features of SCADA technology. Moreover the thesis examines the problem of State Estimation of a network observed by PMUs, and the rules that must be met for achieving full observability. Furthermore a brief literature review and classification of the most important and well known PMU placement methods is presented. Then the most common method of optimal solution to the PMU placement method is examined in detail. Additionally Generalized Integer Programming is introduced and described.

After having illustrated the basic solution methods to the problem, three methods are selected and developed in MATLAB, the method of Binary Integer Programming (BIP), the method of Mixed Integer Linear Programming (MILP) and the method of the Genetic Algorithm (GA). Those three methods are applied in different cases for four standard IEEE power networks.

All in all, the networks examined in this Thesis are the IEEE 14, 30, 57 and 118 buses systems. The Thesis ends with the detailed analysis and comparison of the results, including conclusions for an optimal approach and solution to the problem.

Key Words

Phasor, Synchronized Measurements, Phasor Measurement Unit, State Estimation, Power System Observability, Optimal PMU Placement, Binary Integer Programming, Mixed Integer Linear Programming, Genetic Algorithm, Multiple Solutions

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Κορρέ Γεώργιο, Καθηγητή της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., για την ανάθεσή της σε εμένα καθώς επίσης και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την διάρκεια εκπόνησής της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεοδορακάτο Νικόλαο, υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., για τις συμβουλές του και για τον χρόνο που αφιέρωσε σε εμένα, καθώς και τον κ. Μανουσάκη Νικόλαο, Διδάκτορα της σχολής Η.Μ.Μ.Υ. του Ε.Μ.Π..

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, την αδελφή και τον αδελφό μου, για τη στήριξη και τη συμπαράστασή τους καθ'όλη τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων.

Τέλος ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου στην Ελλάδα και την Ολλανδία, για τη συμπαράσταση και το συνεχές ενδιαφέρον τους όλο το χρονικό διάστημα της εκπόνησης αυτής της εργασίας .

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Συγχρονισμένοι Φασιθέτες και Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών	25
1.1 Εισαγωγή.....	25
1.2 Φασιθέτες	25
1.3 Συγχρονισμένη Μέτρηση Φασιθέτη	26
1.4 Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης GPS	27
1.5 Άλλα συστήματα εντοπισμού θέσης.....	28
1.5.1 GLONASS (GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema).....	28
1.5.2 GALILEO.....	29
1.5.3 COMPASS.....	29
1.6 Σύγκριση τεχνολογίας SCADA και PMU	29
1.6.1 Σύστημα SCADA/EMS	29
1.6.2 Τεχνολογία PMU.....	31
1.7 Διάρθρωση συστήματος PMU.....	33
1.7.1 Τα μέρη ενός συστήματος PMU	33
1.7.2 Μονάδα PMU.....	33
1.7.3 Σταθμός PDC	36
1.7.4 Σταθμός Super PDC	37
1.8 Πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων	37
1.8.1. Πρότυπο IRIG-B.....	37
1.8.2.Πρότυπο 1PPS.....	38
1.9 Μορφότυπα δεδομένων-Δομή αρχείου συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη	39
1.10 Έκδοση προτύπων	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Εκτίμηση κατάστασης	41
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.1.1 Καταστάσεις λειτουργίας Συστήματος.....	42
2.1.2 Ανάλυση ασφάλειας.....	43
2.1.3 Ορισμός Εκτίμησης Κατάστασης	43
2.2 Κλασικός Εκτιμητής κατάστασης	43
2.2.1 Λειτουργίες κλασικού εκτιμητή κατάστασης	43
2.2.2 Παραδοχές- Υποθέσεις	45
2.2.2.1 Γραμμές μεταφοράς.....	45
2.2.2.2 Εγκάρσια στοιχεία	46
2.2.2.3 Μετασχηματιστές	47
2.2.2.4 Γεννήτριες.....	48
2.2.2.5 Φορτία.....	48

2.2.3 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας	49
2.2.3.1 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Κανονικής Κατανομής	49
2.2.3.2 Συνάρτηση πιθανοφάνειας	50
2.3 Υβριδικός εκτιμητής κατάστασης	51
2.3.1 Παραδοχές - Υποθέσεις	52
2.3.1.1 Μοντέλο γενικευμένου ζυγού και κλάδου	52
2.3.1.2 Διατύπωση ρευμάτων	53
2.3.2 Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης	54
2.3.2.1 Συναρτήσεις Μέτρησης	54
2.3.2.2 Ιακωβιανή Μήτρα	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Παρατηρησιμότητα Δικτύου	61
3.1 Εισαγωγή	61
3.2 Ορισμοί	61
3.3 Μοντελοποίηση Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας για τοποθέτηση PMU	62
3.4 Τοπολογικός έλεγχος παρατηρησιμότητας	62
3.4.1 Πρώτος κανόνας παρατηρησιμότητας	62
3.4.2 Δεύτερος κανόνας παρατηρησιμότητας	63
3.4.3 Τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας	64
3.4.4 Τέταρτος κανόνας παρατηρησιμότητας	65
3.4.5 Δείκτες Παρατηρησιμότητας	65
3.5 Αριθμητικός Έλεγχος Παρατηρησιμότητας Σ.Η.Ε	67
3.5.1 Ιδιότητες Πινάκων	67
3.5.2 Αλγεβρικός Έλεγχος Παρατηρησιμότητας	68
3.5.2.1 Γραμμική Εκτίμηση	68
3.5.2.2 Στάθμιση ελαχίστων τετραγώνων	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ταξινόμηση μεθόδων για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας με χρήση PMU	72
4.1 Εισαγωγή	72
4.2 Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού	72
4.2.1 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	72
4.2.2 Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός	72
4.2.3 Ακέραιος Τετραγωνικός Προγραμματισμός	72
4.2.4 Καταχρηστικός Αλγόριθμος	73
4.3 Ακριβείς αλγόριθμοι	73
4.3.1 Αλγόριθμος Branch and Bound	73
4.3.2 Αλγόριθμος Branch and cut	75
4.3.3 Exhaustive Search	77
4.3.4 Δυναμικός Προγραμματισμός	77

4.4 Ευριστικές Μέθοδοι	77
4.4.1 Depth First Search (DeFS).....	77
4.4.2 Minimum Spanning Tree (MST).....	77
4.4.3 Recursive Security N Algorithm.....	78
4.4.4 Δέντρα αποφάσεων	78
4.4.5 Δέντρα αναζήτησης.....	78
4.4.6 Πρακτικοί ευριστικοί αλγόριθμοι	78
4.5 Μεταευριστικές μέθοδοι	78
4.5.1 Γενετικοί αλγόριθμοι (GA)	78
4.5.2 Tabu Search (TS).....	79
4.5.3 Simulated Annealing	79
4.5.4 Διαφορική Εξέλιξη.....	79
4.5.5 Particle Swarm Optimization (PSO).....	80
4.5.6 Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών	80
4.5.7 Βακτηριακός Αλγόριθμος Αναζήτησης Τροφής(BFA)	80
4.5.8 Ανοσοποιητικός αλγόριθμος	81
4.5.9 Επαναλαμβανόμενη Τοπική Αναζήτηση.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τη μέθοδο του Ακεραίου Προγραμματισμού	82
5.1 Δίκτυο χωρίς συμβατικές μετρήσεις	82
5.2 Δίκτυο με συμβατικές μετρήσεις.....	85
5.2.1 Δίκτυο με μετρήσεις ροών κλάδων	85
5.2.2 Δίκτυο με μετρήσεις ροών κλάδων και ζυγούς μηδενικής έγχυσης	86
5.2.3 Διατύπωση μη γραμμικών περιορισμών.....	86
5.2.4 Τοπολογικός μετασχηματισμός	87
5.3 Απώλεια PMU	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Γενικευμένος Γραμμικός Ακέραιος Προγραμματισμός.....	90
6.1 Εισαγωγή.....	90
6.2 Διατύπωση του προβλήματος	90
6.2.1 Χωρίς συμβατικές μετρήσεις.....	90
6.2.2 Με συμβατικές μετρήσεις	90
6.3 Εφαρμογή για το IEEE δίκτυο 14 ζυγών.....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Αλγόριθμοι και συναρτήσεις για την επίλυση του προβλήματος	98
7.1 Εισαγωγή.....	98
7.2 Επίλυση προβλημάτων δυαδικού ακεραίου προγραμματισμού- bintprog.....	98
7.2.1 Σύνταξη και Περιγραφή.....	98
7.2.2 Εσωτερικά Ορίσματα	99
7.2.3.Εξωτερικά Ορίσματα	100

7.2.4 Δομή των options	101
7.3 Coin-or Branch and Cut και Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	104
7.3.1 Εισαγωγή	104
7.3.2 CBC και Αλγόριθμος Branch-and-Cut	104
7.3.3 OPTI Toolbox	106
7.4 Γενετικός αλγόριθμος	106
7.4.1 Ορισμοί	106
7.4.2 Βήματα του αλγορίθμου	107
7.5 Βελτιστοποίηση Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού	114
7.5.1 Επίλυση Προβλημάτων Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού με το γενετικό αλγόριθμο	114
7.5.2 Ακέραιος GA αλγόριθμος	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Αποτελέσματα και συμπεράσματα	121
8.1 Εισαγωγή	121
8.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 14 ζυγών	122
8.2.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 14	122
8.2.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 14	122
8.2.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 14	123
8.2.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 14	124
8.2.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 14	124
8.2.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 14	125
8.2.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 14	126
8.2.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 14	127
8.2.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 14	127
8.2.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση	128
8.2.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 14	129
8.2.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 14	129
8.2.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 14	130
8.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 30 ζυγών	132
8.3.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 30	132
8.3.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 30	133
8.3.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 30	133

8.3.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 30	133
8.3.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 30	135
8.3.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 30	135
8.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 30	136
8.3.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP– Δίκτυο IEEE 30	136
8.3.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 30	137
8.3.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 30	138
8.3.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 30	139
8.3.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 30	140
8.3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 30	140
8.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 57 ζυγών	142
8.4.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 57	143
8.4.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 57	143
8.4.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 57	143
8.4.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 57	144
8.4.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 57	146
8.4.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 57	146
8.4.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 57	147
8.4.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 57	148
8.4.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 57	149
8.4.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 57	150
8.4.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 57	152
8.4.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 57	152
8.4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 57	153
8.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 118 ζυγών	155
8.5.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 118	156
8.5.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 118	156
8.5.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 118	156

8.5.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 118	157
8.5.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 118	159
8.5.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 118	159
8.5.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 118	160
8.5.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 118	161
8.5.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 118	162
8.5.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 118	163
8.5.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 118	165
8.5.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 118	166
8.5.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 118	166
8.6 Σχόλια και συμπεράσματα	169
8.7 Μελλοντική Έρευνα	170
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	171
Παράρτημα Α: Κώδικας στο MATLAB.....	177
Παράρτημα Β: Αποτελέσματα προσομοίωσης στο παράθυρο του MATLAB	191

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1: Μιγαδική Αναπαράσταση AC Σήματος	26
Σχήμα 2: Αναπαράσταση Διάταξης των δορυφόρων του GPS	28
Σχήμα 3: Λειτουργικό Διάγραμμα PMU	34
Σχήμα 4: Μορφότυπο Αρχείων PMU	39
Σχήμα 5: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας και Υποσυστήματα	41
Σχήμα 6: Καταστάσεις Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	42
Σχήμα 7: Λειτουργικό Διάγραμμα Ανάλυσης Ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο	45
Σχήμα 8: Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς	46
Σχήμα 9: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου	46
Σχήμα 10: Αναπαράσταση Μετασχηματιστή	47
Σχήμα 11: Μοντέλο Μετασχηματιστή	48
Σχήμα 12: Γενικευμένο ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών	53
Σχήμα 13: Ορισμός φασικών γωνιών τάσης και ρεύματος με κοινή αναφορά	56
Σχήμα 14: Δίκτυο 4 ζυγών, με PMU στο ζυγό A	63
Σχήμα 15: Δύο ζυγοί συνδεδεμένοι	63
Σχήμα 16: Δίκτυο 4 ζυγών, με το ζυγό A ζυγό μηδενικής έγχυσης και PMU στο C	64
Σχήμα 17: Δίκτυο 4 ζυγών, με το ζυγό A ζυγό μηδενικής έγχυσης	65
Σχήμα 18: Δίκτυο 6 ζυγών με PMUs στους ζυγούς 3 και 6	66
Σχήμα 19: Δίκτυο 6 ζυγών με PMUs στους ζυγούς 1 και 4	66
Σχήμα 20: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών	83
Σχήμα 21: Τροποποιημένο Δίκτυο IEEE 14 ζυγών	88
Σχήμα 22: Μέτρηση Ροής Ισχύος	91
Σχήμα 23: Μέτρηση Έγχυσης Ισχύος	91
Σχήμα 24: Μέτρηση Ροής Ισχύος και Μέτρηση Έγχυσης Ισχύος	92
Σχήμα 25: Παράδειγμα δικτύου με 7 ζυγούς	93
Σχήμα 26: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών με τον επαυξημένο ζυγό 7'	95
Σχήμα 27: Λογικό Διάγραμμα με τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου	108
Σχήμα 28: Παράδειγμα αρχικού πληθυσμού του GA	109
Σχήμα 29: Τύποι παιδιών για τη δημιουργία επόμενης γενιάς	110
Σχήμα 30: Παράδειγμα διαγράμματος GA για εύρεση ελαχίστου συνάρτησης	115
Σχήμα 31: Παράδειγμα διαγράμματος GA για τη σύγκλιση στη λύση	118
Σχήμα 32: Παράδειγμα διαγράμματος GA για τη σύγκλιση στη λύση- 2η λύση	119
Σχήμα 33: Δίκτυο IEEE 14 Ζυγών	122
Σχήμα 34: Δίκτυο IEEE 14 Ζυγών μετά την τοποθέτηση PMU-επίλυση με BIP	123
Σχήμα 35: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών με Μέτρηση Ροών Ισχύος	125
Σχήμα 36: Δίκτυο IEEE 30 Ζυγών	132
Σχήμα 37: Δίκτυο IEEE 57 Ζυγών	142
Σχήμα 38: Δίκτυο IEEE 118 Ζυγών	155

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU	32
Πίνακας 2: Βήματα του αλγορίθμου Branch and Bound	75
Πίνακας 3: Βήματα αλγορίθμου Branch and Cut	76
Πίνακας 4: Εσωτερικά ορίσματα συνάρτησης Bintprog	99
Πίνακας 5: Εξωτερικά ορίσματα συνάρτησης Bintprog	100
Πίνακας 6: Δομή των options της Bintprog	101
Πίνακας 7: Κλάσεις της C++ που συνδέονται με τη Cbc	104
Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 14	123
Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 14	124
Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 14	124
Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 14	125
Πίνακας 12: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 14	125
Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 14	126
Πίνακας 14: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 14	126
Πίνακας 15: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 14	126
Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 14	127
Πίνακας 17: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 14	127
Πίνακας 18: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 14	127
Πίνακας 19: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 14	128

Πίνακας 20: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 14	128
Πίνακας 21: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 14	129
Πίνακας 22: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 14	129
Πίνακας 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 14	129
Πίνακας 24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 14	131
Πίνακας 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 30	133
Πίνακας 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 30	133
Πίνακας 27: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 30	134
Πίνακας 28: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 30	135
Πίνακας 29: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 30	135
Πίνακας 30: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 30	135
Πίνακας 31: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 30	136
Πίνακας 32: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 30	136
Πίνακας 33: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 30	137
Πίνακας 34: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 30	137
Πίνακας 35: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 30	137
Πίνακας 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 30	138
Πίνακας 37: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 30	138

Πίνακας 38: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 30	139
Πίνακας 39: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 30	139
Πίνακας 40: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 30	140
Πίνακας 41: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 30	141
Πίνακας 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 57	143
Πίνακας 43: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 57	143
Πίνακας 44: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 57	144
Πίνακας 45: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 57	146
Πίνακας 46: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 57	146
Πίνακας 47: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 57	147
Πίνακας 48: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 57	147
Πίνακας 49: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 57	147
Πίνακας 50: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 57	148
Πίνακας 51: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 57	148
Πίνακας 52: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 57	149
Πίνακας 53: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 57	149
Πίνακας 54: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 57	150
Πίνακας 55: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 57	152

Πίνακας 56: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 57	152
Πίνακας 57: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 57	153
Πίνακας 58: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 57	154
Πίνακας 59: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 118	156
Πίνακας 60: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 118	157
Πίνακας 61: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 118	157
Πίνακας 62: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 118	159
Πίνακας 63: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 118	160
Πίνακας 64: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 118	160
Πίνακας 65: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 118	160
Πίνακας 66: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 118	161
Πίνακας 67: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 118	161
Πίνακας 68: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 118	162
Πίνακας 69: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 118	162
Πίνακας 70: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 118	163
Πίνακας 71: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 118	163
Πίνακας 72: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 118	165
Πίνακας 73: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 118	165

Πίνακας 74: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 118	166
Πίνακας 75: Συγκεντρικά αποτελέσματα για το IEEE 118	167

Ακρωνύμια

1PPS	One Pulse Per Second
A/D	Analog to Digital
BCD	Binary Coded Decimal
BIP	Binary Integer Programming
BOI	Bus Observability Index
CBC	Coin-or branch and cut
CF	Control Function
CGL	Cut Generation Library
CLP	Coin-or Linear Programming
DCLS	Direct Current Level Shift
DeFS	Depth First Search
DFR	Digital Fault Recorder
DFT	Discrete Fourier Transform
EMS	Energy Management System
FRACSEC	FRACTION of a SECond
ESA	European Space Agency
GA	Genetic Algorithm
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IRIG	Inter Range Instrumentation Group
LP	Linear Programming
MEX	Matlab Executable
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MST	Minimum Spanning Tree
OPTI	Optimization Interface
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit
PSO	Particle Swarm Optimization
PTI	Power Technologies Incorporated
RCC	Range Commanders Council
RTDMS	Real Time Dynamics Monitoring System
RTU	Remote Telemetry Unit
SA	Simulated Annealing
SBS	Straight Binary Seconds
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SOC	Second Of Century
SORI	System Observability Redundancy Index
SPDC	Super Phasor Data Concentrator
SVC	Static Var Compensator
TTG	Telecommunications and Timing Group
UTC	Universal Time Coordinated
WLS	Weighted Least Squares

Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε οκτώ κεφάλαια η δομή των οποίων περιγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν:

- ◆ **Κεφάλαιο 1:** Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του φασιθέτη και των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Επίσης γίνεται μια περιγραφή της δομής και λειτουργίας των Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών και του τρόπου συγχρονισμού τους με τη βοήθεια του Παγκόσμιου Συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS). Ταυτόχρονα γίνεται και μία σύγκριση των PMU με άλλα συστήματα μέτρησης φασιθετών.
- ◆ **Κεφάλαιο 2:** Στο δεύτερο κεφάλαιο θεμελιώνεται το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης ενός δικτύου με χρήση PMU. Πιο συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση των φασιθετών ρεύματος σε καρτεσιανές και πολικές συντεταγμένες, μελέτη των φασιθετών τάσης και αναπτύσσεται το μαθηματικό μοντέλο με τις σχέσεις που αφορούν στις συμβατικές και στις συγχρονισμένες μετρήσεις (ουσιαστικά παρουσιάζεται μια υβριδική Ιακωβιανή μήτρα, η οποία περιέχει και συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις).
- ◆ **Κεφάλαιο 3:** Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ορισμοί, οι βασικοί κανόνες και κάποιοι δείκτες που αφορούν στον έλεγχο παρατηρησιμότητας του δικτύου.
- ◆ **Κεφάλαιο 4:** Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ταξινόμησης των διαφορετικών μεθόδων τοποθέτησης PMU σε ένα δίκτυο μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, προκειμένου το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία οι μέθοδοι αυτοί ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού, Ακριβείς Αλγόριθμοι, Ευριστικές Μέθοδοι, Μεταευριστικές Μέθοδοι.
- ◆ **Κεφάλαιο 5:** Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μαθηματική θεμελίωση του Γραμμικού Προγραμματισμού στην περίπτωση της επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU σε ένα δίκτυο.
- ◆ **Κεφάλαιο 6:** Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο γενικευμένος γραμμικός ακέραιος αλγόριθμος τοποθέτησης PMU και περιγράφεται η εφαρμογή του για την εποπτεία Σ.Η.Ε. με και χωρίς συμβατικές μετρήσεις ροών ισχύος και έγχυσης ισχύος.
- ◆ **Κεφάλαιο 7:** Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την έκφραση και επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα Matlab. Για κάθε μια συνάρτηση-επιλυτή δίνεται μια περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί, του ορισμού και της σύνταξης της καθώς και των προβλημάτων που επιλύει.
- ◆ **Κεφάλαιο 8:** Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που διεξήχθησαν για κάθε περίπτωση που επιλύει το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs, στα δίκτυα IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57 και IEEE-118 ζυγών. Τέλος γίνεται σχολιασμός αυτών των αποτελεσμάτων και διεξαγωγή συμπερασμάτων για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU.

Συγχρονισμένοι Φασιθέτες και Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών**1.1 Εισαγωγή**

Η εφεύρεση των Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (PMU) στα μέσα της δεκαετίας του 1980, έδωσε τη δυνατότητα μέτρησης των φασιθετών τάσης και ρεύματος σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Οι μονάδες αυτές αποτελούν μέχρι σήμερα θεμέλιο λίθο στον τομέα των συγχρονισμένων μετρήσεων ευρείας περιοχής καθώς και στην προστασία και εποπτεία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια του φασιθέτη και των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Επίσης γίνεται μια περιγραφή της δομής και λειτουργίας των Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών και του τρόπου συγχρονισμού τους με τη βοήθεια του Παγκόσμιου Συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS). Ταυτόχρονα γίνεται και μία σύγκριση των PMU με άλλα συστήματα μέτρησης φασιθετών.

1.2 Φασιθέτες

Μια ημιτονοειδής κυματομορφή μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

όπου X_m : πλάτος σήματος

φ : φασική γωνία σε rad

ω : γωνιακή συχνότητα σε rad/sec

Η εξίσωση αυτή μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$x(t) = \text{Re}\{X_m e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \text{Re}\{e^{j\omega t} X_m e^{j\varphi}\} \quad (1.2)$$

Ο όρος $e^{j\omega t}$ μπορεί να παραληφθεί καθότι η συχνότητα ω σε ένα δίκτυο θεωρείται σταθερή. Σε πραγματικές ωστόσο συνθήκες, η συχνότητα του δικτύου μπορεί να μεταβάλλεται ελαφρώς λόγω των μεταβολών στη ζήτηση. Συνεπώς για τον ακριβή υπολογισμό της φασικής γωνίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συχνότητα του δικτύου κατά τη στιγμή της μέτρησης. Επίσης το πλάτος X_m διαιρείται με το $\sqrt{2}$ προκειμένου να προκύψουν οι RMS τιμές του ρεύματος και της τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για τον υπολογισμό της ενεργού και αέργου ισχύος του δικτύου. Έτσι η ημιτονοειδής κυματομορφή της εξίσωσης (1.1) αναπαρίσταται με ένα μιγαδικό αριθμό X , γνωστό και ως φασιθέτη.

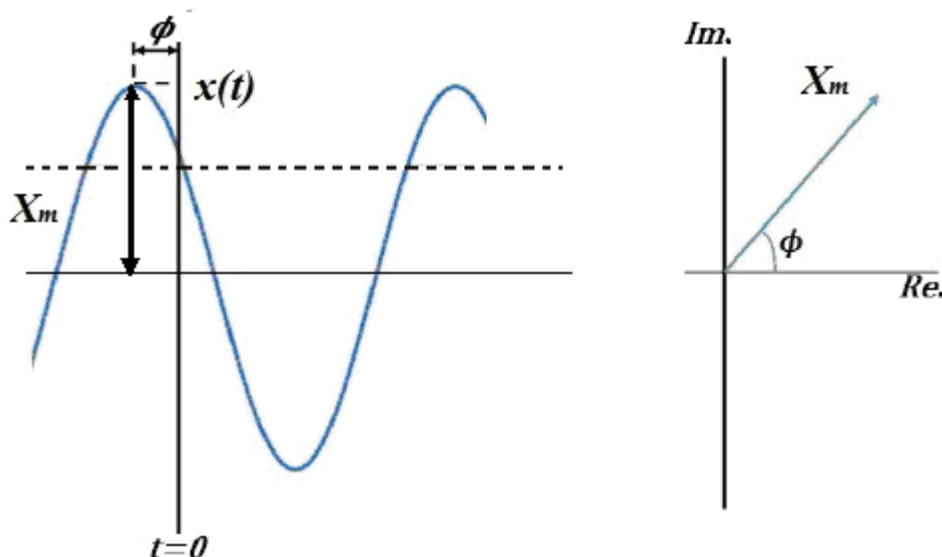
$$x(t) \leftrightarrow X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \angle \varphi \quad (1.3)$$

Με τον όρο φασιθέτης αναφερόμαστε σε μια ποσότητα η οποία διαθέτει μέτρο και φάση (ως προς μία αναφορά). Η ποσότητα αυτή χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση ενός ημιτονοειδούς σήματος. Το μέτρο του φασιθέτη σχετίζεται με το πλάτος του σήματος.

Η φάση αποτελεί την απόσταση ανάμεσα στην κορυφή του σήματος και σε μια ορισμένη αναφορά και έχει διαστάσεις γωνίας.

Σε μεταβατικές συνθήκες η κυματομορφή της τάσης περιέχει εκτός από τη θεμελιώδη και άλλες συχνότητες. Για την εξαγωγή της θεμελιώδους συχνότητας και την αναπαράσταση της με φασιθέτη χρησιμοποιείται ο μετασχηματισμός Fourier .

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται η μιγαδική αναπαράσταση ενός AC σήματος.



Σχήμα 1: Μιγαδική Αναπαράσταση AC Σήματος

1.3 Συγχρονισμένη Μέτρηση Φασιθέτη

Αν σε κάθε μέτρηση φασιθέτη προστεθεί η χρονική ετικέτα (ή αλλιώς χρονική σφραγίδα), τότε προκύπτει μια συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη (synchrophasor). Αυτή ουσιαστικά ορίζεται ως η ενεργός τιμή και η φασική γωνία ενός ημιτονοειδούς σήματος με αναφορά ως προς μια απόλυτη χρονική στιγμή. Ας σημειωθεί ότι η φασική γωνία παίρνει τιμές στο διάστημα $[-\pi, \pi]$ και η συχνότητα θεωρείται σταθερή κατά τον απειροελάχιστο χρόνο της μέτρησης.

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών παρέχουν ένα μέσο σύγκρισης των φασιθετών της τάσης και του ρεύματος σε διάφορα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος ως προς μια απόλυτη χρονική αναφορά. Για τη λήψη μετρήσεων φασιθετών από διαφορετικά σημεία του Σ.Η.Ε είναι αναγκαίο να συγχρονιστούν οι χρονικές σφραγίδες, έτσι ώστε όλοι οι φασιθέτες να μετρούνται ως προς την ίδια απόλυτη χρονική ετικέτα. Αυτό γίνεται εφικτό με τη χρήση χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας συγχρονισμένων από GPS. Μέσω αυτών των χρονομέτρων οι μονάδες μέτρησης των φασιθετών παράγουν ένα ημιτονοειδές κύμα αναφοράς. Αυτό το σήμα αναφοράς είναι ένα ημιτονοειδές κύμα θεμελιώδους συχνότητας του οποίου η μέγιστη τιμή προκύπτει ακριβώς στην αρχή κάθε δευτερολέπτου.

Ένα ιδανικό ηλεκτρικό δίκτυο λειτουργεί σε σταθερή συχνότητα. Σε πραγματικές συνθήκες όμως, η συχνότητα του δικτύου μπορεί να μεταβάλλεται ελαφρώς εξαιτίας των μεταβολών στη ζήτηση. Επομένως για τον ακριβή υπολογισμό της φασικής γωνίας πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η συχνότητα του δικτύου κατά τη στιγμή της μέτρησης.

1.4 Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης GPS

Το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (Global Positioning System-GPS) , το οποίο είναι ένα σύστημα βασισμένο στη χρήση δορυφόρων, είναι η κύρια πηγή συγχρονισμού και χρησιμοποιείται για να παρέχει μια χρονική αναφορά στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Η ιδέα για τη δημιουργία ενός δορυφορικού συστήματος πλοήγησης ξεκίνησε στις ΗΠΑ τη δεκαετία του '60 με στόχο τον ακριβέστερο έλεγχο στη ρίψη πυρηνικών όπλων (βαλλιστικών πυραύλων και βομβών). Θα μπορούσαμε να πούμε ότι το σύστημα αυτό απαρτίζεται από τρία διαφορετικά λειτουργικά τμήματα.

Διαστημικό τμήμα: Το GPS τέθηκε σε εφαρμογή με την εκτόξευση του δορυφόρου Block I το 1978 από το υπουργείο άμυνας των Η.Π.Α. Το 1994 είχε ολοκληρωθεί και περιλάμβανε 24 δορυφόρους σε τροχιά ενώ το 2007 οι ενεργοί δορυφόροι ανέρχονταν σε 30 παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στην εκτίμηση των χωρικών συντεταγμένων των δεκτών. Οι δορυφόροι αυτοί είναι διατεταγμένοι σε 6 τροχιακά επίπεδα τα οποία απέχουν μεταξύ τους 60° και έχουν κλίση 55° σε σχέση με το επίπεδο του ισημερινού όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Οι δορυφόροι έχουν ακτίνα τροχιάς περίπου 16500 μίλια (26500km) και περιστρέφονται γύρω από τη γη δύο φορές την ημέρα. Είναι διατεταγμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε τουλάχιστον έξι δορυφόροι να είναι ορατοί από τα περισσότερα σημεία της γης, ενώ μερικές φορές μέχρι και 10 δορυφόροι μπορεί να είναι διαθέσιμοι. Η πιο συνηθισμένη χρήση του GPS είναι ο καθορισμός των συντεταγμένων των δεκτών, αν και στην περίπτωση των PMU σημαντικό είναι το σήμα «ενός παλμού ανά δευτερόλεπτο» (one pulse-per-second (pps)). Αυτός ο παλμός όπως λαμβάνεται από ένα δέκτη στη γη, είναι ταυτόχρονος με τους υπόλοιπους παλμούς που φθάνουν στους δέκτες μέσα σε ένα διάστημα 1μs. Στην πράξη έχει επιτευχθεί και πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια συγχρονισμού της τάξης των μερικών εκατοντάδων ns.

Οι δορυφόροι του GPS διαθέτουν ακριβή ρολόγια που παρέχουν το σήμα «ενός παλμού ανά δευτερόλεπτο». Η ώρα που κρατάνε τα ρολόγια αυτά είναι γνωστή σαν ώρα GPS και δεν λαμβάνει υπόψη την περιστροφή της γης. Στους δέκτες του GPS γίνονται διορθώσεις της ώρας GPS ώστε αυτή η διαφορά να λαμβάνεται υπόψη και οι δέκτες να παρέχουν UTC (Coordinated Universal Time) ώρα. Η ταυτότητα του παλμού ορίζεται από τον αριθμό των δευτερολέπτων που πέρασαν από τότε που τα ρολόγια άρχισαν να μετράνε (6 Ιανουαρίου 1980).

Επίγειο τμήμα ελέγχου: Οι δορυφόροι, όπως είναι αναμενόμενο, είναι πολύ πιθανό να αντιμετωπίσουν ανά πάσα στιγμή προβλήματα στη σωστή λειτουργία τους. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται σε αυτούς αφορούν στη σωστή τους ταχύτητα και υψόμετρο και στην κατάσταση της επάρκειάς ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα, εφαρμόζονται όλες οι διορθωτικές ενέργειες που αφορούν στο σύστημα χρονομέτρησης των δορυφόρων, ώστε να αποτρέπεται η παροχή λανθασμένων πληροφοριών στους χρήστες του συστήματος. Το τμήμα επίγειου ελέγχου αποτελείται από ένα επανδρωμένο και τέσσερα μη επανδρωμένα κέντρα, εγκατεστημένα σε ισάριθμες περιοχές του πλανήτη.

Οι περιοχές αυτές είναι οι εξής:

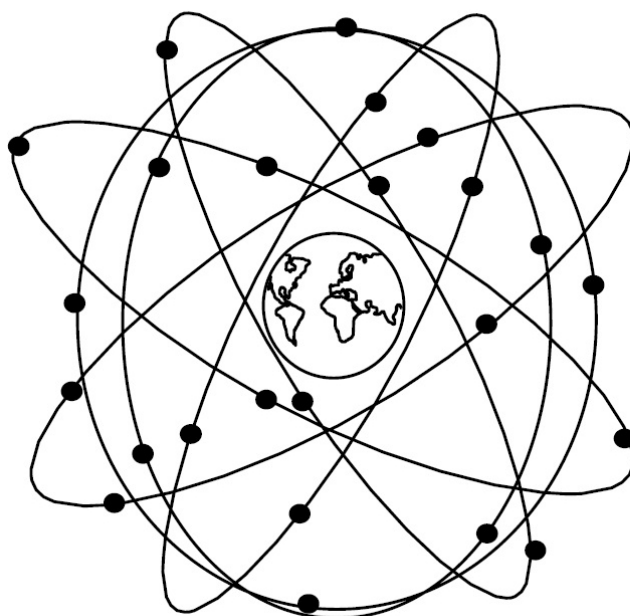
α) Κολοράντο (ΗΠΑ) β) Χαβάη (Ανατολικός Ειρηνικός Ωκεανός) γ) Ascension Island (Ατλαντικός Ωκεανός) δ) Diego Garcia (Ινδικός Ωκεανός) ε) Kwajalein (Δυτικός Ειρηνικός Ωκεανός)

Ο κυριότερος σταθμός βάσης είναι αυτός του Κολοράντο, ο οποίος είναι μάλιστα και ο μοναδικός που βρίσκεται στην ξηρά. Αναλαμβάνει τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας των εναπομεινάντων τεσσάρων σταθμών, καθώς και τον συντονισμό τους. Σημειώνοντας τη θέση των σταθμών αυτών πάνω σε έναν παγκόσμιο χάρτη, παρατηρεί κανείς ότι η

διάταξή τους δεν είναι τυχαία, αλλά ακολουθούν μια γραμμή παράλληλη με τα γεωγραφικά μήκη της Γης.

Το τμήμα τελικού χρήστη: Απαρτίζεται από τους χιλιάδες χρήστες δεκτών GPS ανά την υφήλιο. Οι δέκτες αυτοί αποτελούνται από μια κεραία συντονισμένη στις συχνότητες των δορυφόρων, επεξεργαστές και ένα ρολόι μεγάλης ακρίβειας (συνήθως κρυσταλλικό ταλαντωτή). Μπορεί επιπλέον να διαθέτουν οθόνη για να δίνουν πληροφορίες θέσης και ταχύτητας στο χρήστη. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των δεκτών GPS είναι ο αριθμός καναλιών, που εκφράζει το πλήθος των δορυφόρων, από τους οποίους μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα. Τα δεδομένα θέσης, χρόνου και ταχύτητας που παρέχει το σύστημα GPS αξιοποιούνται σε ποικίλες στρατιωτικές και πολιτικές εφαρμογές. Στρατιωτικού τύπου δέκτες χρησιμοποιούνται για επιχειρήσεις αναγνώρισης, πλοήγηση και συγχρονισμό μονάδων, ιχνηλάτηση στόχων, έρευνα και διάσωση (SAR) και ανίχνευση πυρηνικών εκρήξεων. Πολιτικού τύπου δέκτες χρησιμοποιούνται ευρέως στην πλοήγηση, στη γεωδαισία, στην κατασκευή χαρτών, στη σεισμολογία, στην κινητή τηλεφωνία, στην παροχή βοήθειας για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών ή εκτάκτων περιστατικών και στον υπολογισμό φασιθετών σε ηλεκτρικά δίκτυα.

Διάφορα συστήματα σαν το GPS αναπτύσσονται και από άλλα κράτη αλλά αναμένεται ότι το GPS θα παραμείνει η βασική πηγή συγχρονισμού των PMU και στο μέλλον.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση Διάταξης των δορυφόρων του GPS

1.5 Άλλα συστήματα εντοπισμού θέσης

1.5.1 GLONASS (GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema)

Το δορυφορικό σύστημα GLONASS διαχειρίζεται από το ρωσικό στρατό. Σύμφωνα με στοιχεία του 2010, όλη η ρώσικη επικράτεια καλύπτεται πλήρως από αυτό το σύστημα. Με δεδομένα του 2011, υπάρχουν 23 εν ενεργεία δορυφόροι και υπάρχει σχεδιασμός να αυξηθούν κατά 1 ακόμα με σκοπό την πλήρη παγκόσμια κάλυψη.

1.5.2 GALILEO

Διαχειριστής αυτού του εγχειρήματος είναι ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA). Αποτελεί εξέλιξη του συστήματος GNSS της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο σχεδιασμός προβλέπει ότι το σύστημα θα αποτελείται από 18 δορυφόρους που θα τεθούν σε τροχιά μέχρι το 2015 και σε τελική φάση θα φτάσει στο σύνολο των 30 δορυφόρων. Η μόνη διαφορά με τα άλλα δύο συστήματα είναι ότι το GALILEO δεν θα υπόκειται σε στρατιωτικό έλεγχο αλλά σε πολιτικό. Ενώ θα συνυπάρχει αρμονικά με τα άλλα δύο συστήματα.

1.5.3 COMPASS

Το σύστημα COMPASS αποτελεί εξέλιξη του τοπικού δορυφορικού συστήματος πλοήγησης BeiDou-1, το οποίο καλύπτει αποκλειστικά την κινεζική επικράτεια, και είναι γνωστό και ως BeiDou-2. Το σύστημα αυτό αποτελεί την κινέζικη εκδοχή του συστήματος GNSS. Ο αρχικός σχεδιασμός περιλαμβάνει 35 δορυφόρους, ενώ προγραμματίζεται να λειτουργήσει μέσα στο 2012 για την περιοχή Ασίας - Ειρηνικού και εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί το 2020, οπότε και θα προσφέρει παγκόσμια κάλυψη.

1.6 Σύγκριση τεχνολογίας SCADA και PMU

1.6.1 Σύστημα SCADA/EMS

Τα τελευταία χρόνια η λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων βασίστηκε στα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS) και στα Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (SCADA). Με τον όρο EMS αναφερόμαστε σε συστήματα υλικού και λογισμικού που αναλαμβάνουν την εποπτεία, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα EMS χρησιμοποιεί ένα κατανομημένο περιβάλλον επεξεργασίας το οποίο απαρτίζεται από έναν ή περισσότερους διασυνδεδεμένους κόμβους επεξεργασίας. Οι κόμβοι αυτοί έχουν πρόσβαση σε μια κοινή βάση δεδομένων. Έτσι το σύστημα αποκτά αρθρωτή δομή και παρέχει μεγάλη ευελιξία σε μια επιχείρηση ηλεκτρικής ενέργειας. Το λογισμικό ενός συστήματος EMS χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα:

1. το υποσύστημα Παραγωγής
2. το υποσύστημα Μεταφοράς
3. το υποσύστημα SCADA

Το υποσύστημα Παραγωγής είναι αρμόδιο για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ο έλεγχος της παραγωγής περιλαμβάνει την οικονομική κατανομή μεταξύ των μονάδων παραγωγής, τον προγραμματισμό όλων των μονάδων παραγωγής της ελεγχόμενης περιοχής, την προετοιμασία και τον καθορισμό ανταλλαγών με τις γειτονικές χώρες, τον προγραμματισμό των εφεδρειών καθώς και τον προσδιορισμό του κόστους καυσίμων. Το υποσύστημα παραγωγής είναι επίσης επιφορτισμένο και με άλλες διαδικασίες, όπως η ενεργειακή παρακολούθηση του συστήματος, η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου (για διάστημα μιας εβδομάδας), ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρονοδιαγράμματος έναυσης/σβέσης των μονάδων παραγωγής και η αξιολόγηση των ανταλλαγών.

Το υποσύστημα Μεταφοράς καθορίζει το μοντέλο του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και παρέχει λειτουργίες τόσο σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου όσο και σε περιβάλλον μελέτης. Σε περιβάλλον πραγματικού χρόνου εκτελείται η εκτίμηση κατάστασης, από την οποία προκύπτουν οι συντελεστές απωλειών μεταφοράς και η ανάλυση ενδεχόμενων διαταραχών για τον εντοπισμό των διαταραχών εκείνων που μπορεί να προκαλέσουν ανωμαλία στην ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Τα δεδομένα πραγματικού χρόνου προέρχονται από το υποσύστημα SCADA και παρέχουν στους χειριστές πληροφορίες για την ασφαλή και οικονομική διακίνηση ενέργειας μέσω του δικτύου μεταφοράς. Σε περιβάλλον μελέτης μπορεί να εξεταστεί η ροή φορτίου με σκοπό την ανάλυση της μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς καθώς και η βέλτιστη ροή φορτίου, όπου ισχύουν ειδικοί περιορισμοί, έλεγχοι και αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο ίδιο περιβάλλον υπάρχει η δυνατότητα για εκτέλεση ανάλυσης ενδεχόμενων διαταραχών με δεδομένα από το πρόγραμμα ροής φορτίου.

Το υποσύστημα SCADA είναι ένα υπολογιστικό σύστημα που συλλέγει δεδομένα μετρήσεων από πολλαπλά σημεία ενός δικτύου και παρέχει στους χειριστές εποπτεία του δικτύου και δυνατότητα ελέγχου του. Τα δομικά στοιχεία που συνθέτουν ένα τέτοιο σύστημα είναι τα εξής:

- Κεντρικός υπολογιστικός σταθμός (Master Station Computer)
- Απομακρυσμένες Μονάδες Τηλεμετρίας (RTU)
- Γραμμές επικοινωνίας (ραδιοκύματα, τηλεφωνικές γραμμές, δίκτυο Ethernet)
- Ελεγχόμενο σύστημα (Field Instrumentation)

Βασικό στοιχείο ενός συστήματος SCADA είναι οι Απομακρυσμένες Μονάδες Τηλεμετρίας (RTU). Οι μονάδες RTU είναι αυτοδύναμες μονάδες συλλογής δεδομένων που εποπτεύουν και ελέγχουν τον εξοπλισμό του δικτύου σε τοποθεσίες που βρίσκονται μακριά από τον κεντρικό σταθμό. Η κύρια λειτουργία τους είναι να συλλέγουν δεδομένα από τα στοιχεία εξοπλισμού και να τα μεταδίδουν στον κεντρικό σταθμό μέσω ενσύρματου ή ασύρματου δικτύου. Επιπλέον μπορούν να λαμβάνουν σήματα ελέγχου από τον κεντρικό σταθμό για να αναλάβουν δράσεις όπως άνοιγμα βαλβίδων, άνοιγμα/κλείσιμο ηλεκτρονόμων και εκκίνηση/διακοπή κινητήρων. Το υλικό μιας μονάδας RTU περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- μικροεπεξεργαστή
- πτητική μνήμη
- μη πτητική μνήμη (για αποθήκευση προγραμμάτων και δεδομένων)
- τροφοδοτικό
- διεπαφή επικοινωνίας (ενσωματωμένο modem ή σειριακές θύρες)
- κάρτες αναλογικών και ψηφιακών εισόδων και εξόδων (AI, AO, DI, DO)

Τα δεδομένα των μετρήσεων που καταγράφονται σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αναλογικά ή ψηφιακά. Τα αναλογικά δεδομένα αναπαριστούν φυσικά μεγέθη που μετατρέπονται με τη βοήθεια μορφοτροπέων (transducers) ή μετασχηματιστών μέτρησης σε ηλεκτρικά σήματα. Τα ψηφιακά δεδομένα δηλώνουν την κατάσταση μιας συσκευής ή ενός στοιχείου του ηλεκτρικού εξοπλισμού με μια δυαδική ψηφιακή μεταβλητή που λαμβάνει τιμές 1(ON) ή 0 (OFF) και συνήθως περιγράφουν καταστάσεις διακοπών, αποζευκτών και γειωτών σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Τα ηλεκτρικά μεγέθη

καταγράφονται συνήθως είναι kV, A, MW, MVA_r και θέσεις του μεταγωγέα λήψεων των μετασχηματιστών. Το σύστημα μπορεί, επίσης, να συλλέγει μετρήσεις ενέργειας που αφορούν στην παραγωγή τόσο από εγχώριους σταθμούς όσο και από διεθνείς διασυνδέσεις. Οι μετρήσεις αφού μετατραπούν σε ηλεκτρικά σήματα, αποστέλλονται μέσω των RTU σε έναν κεντρικό υπολογιστικό σταθμό. Τα σήματα αυτά μπορεί να είναι αναλογικά ή ψηφιακά και η μετάδοσή τους γίνεται μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου ενσύρματα ή ασύρματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το υποσύστημα SCADA δίνει τη δυνατότητα διατήρησης αρχείου μετρήσεων, ώστε να μπορούν στο μέλλον να εξεταστούν διαταραχές που προέκυψαν και να αναζητηθούν τα αίτια εμφάνισής τους. Επιπλέον, υποστηρίζει λειτουργίες όπως επεξεργασία τοπολογίας υποσταθμών, αποκοπή φορτίου για την άμεση αντιμετώπιση διαταραχών στο δίκτυο και ανάρτηση προστατευτικών εικονικών πινακίδων στον εξοπλισμό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.6.2 Τεχνολογία PMU

Οι μεγάλες διακοπές ρεύματος που συνέβησαν σε διάφορες περιοχές τόσο της Ευρώπης όσο και των Η.Π.Α. την τελευταία δεκαετία* δημιούργησαν προβλήματα που κατέδειξαν τα μειονεκτήματα της χρήσης των συστημάτων SCADA/EMS. Τα προβλήματα αυτά οφείλονται κυρίως στην έλλειψη εποπτείας ευρείας περιοχής, στην έλλειψη συγχρονισμένων δεδομένων και στην αδυναμία παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε πραγματικό χρόνο που χαρακτηρίζουν τα συστήματα SCADA/EMS.

Στην προσπάθεια κάλυψης των αδυναμιών των συστημάτων SCADA/EMS αναπτύχθηκε η τεχνολογία λήψης συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών με μονάδες PMU. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές μεταξύ των συστημάτων SCADA και PMU.

Οι Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (PMU) σχεδιάστηκαν αρχικά στο Πανεπιστήμιο της Βιρτζίνια (Virginia Polytechnic Institute and State University-Virginia Tech), από τους Dr. Arun G. Phadke και Dr. James S. Thorp το 1988. Για το σχεδιασμό των μονάδων αυτών οι Phadke και Thorp βασίστηκαν στις μελέτες του μαθηματικού και ηλεκτρολόγου μηχανικού Charles Proteus Steinmetz για την αναπαράσταση κυματομορφών εναλλασσόμενου ρεύματος με φασιθέτες, οι οποίες είχαν δημοσιοποιηθεί από το 1893. Η πρώτη PMU κατασκευάστηκε το 1992 από την εταιρεία Macrodyne. Σήμερα η κατασκευή PMU γίνεται κυρίως από τις εταιρείες :

- Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)
- ABB
- Arbiter
- Areva
- General Electric

* στη δυτική διασύνδεση των Η.Π.Α. (Αύγουστος 1996), στην Ανατολική Διασύνδεση των Η.Π.Α. (Αύγουστος 2003) και στην Ευρώπη (καλοκαίρι του 2003 και του 2004).

Πίνακας 1: Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU

Χαρακτηριστικό	SCADA	PMU
Μετρήσεις	Αναλογικές	Ψηφιακές
Ανάλυση	2-4 δείγματα/sec	Μέχρι 60 δείγματα/sec
Ορατότητα	Μόνιμη Κατάσταση	Μόνιμη και Μεταβατική Κατάσταση
Εποπτεία	Τοπική	Ευρείας Περιοχής
Μέτρηση Φασικής Γωνίας	Όχι	Ναι
Μετρούμενες Ποσότητες	Μέτρο Τάσης (RMS), MW, MVar	Μέτρο Τάσης (RMS), MW, MVar, Φασική απόκλιση από κοινή αναφορά, Συχνότητα, Ρυθμός μεταβολής της συχνότητας

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

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

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

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

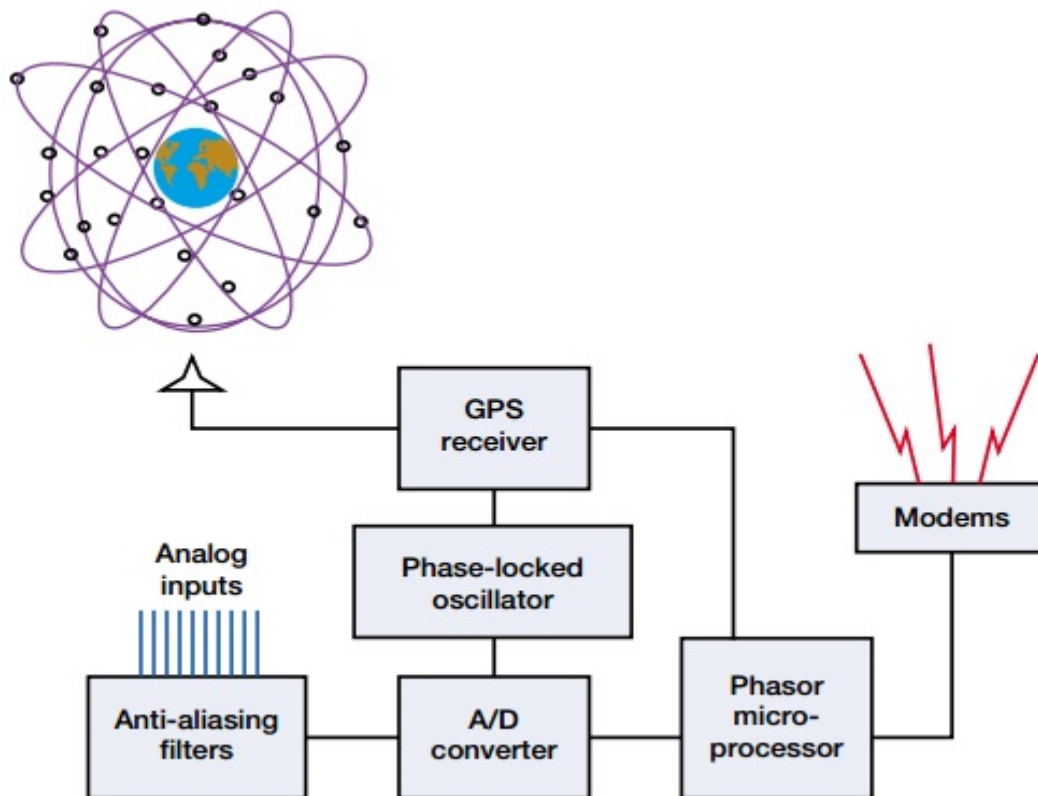
1.7 Διάρθρωση συστήματος PMU

1.7.1 Τα μέρη ενός συστήματος PMU

Ένα σύστημα PMU αποτελείται κυρίως από Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (PMU). Η τοποθέτηση των μονάδων αυτών για την λήψη μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί αντικείμενο μελέτης και επιδέχεται βελτιστοποιήσεις. Οι μονάδες αυτές συνδέονται με ένα σταθμό που βρίσκεται στο κέντρο της επιχείρησης ηλεκτρικής ενέργειας, με τον Συγκεντρωτή Δεδομένων Φασιθετών (PDC), ο οποίος συλλέγει όλα τα δεδομένα. Στην έξοδο του σταθμού PDC είναι συνδεδεμένος ένας προσωπικός υπολογιστής που παρέχει στους χειριστές του συστήματος πρόσβαση στο σύνολο των δεδομένων μέσω εξειδικευμένου λογισμικού (π.χ. RTDMS). Το λογισμικό υπολογίζει και εμφανίζει τις μετρούμενες συχνότητες, τάσεις, ρεύματα και ροές ενεργού και αέργου ισχύος. Στη συνέχεια, πολλοί σταθμοί PDC που ανήκουν σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές ή διαφορετικές επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας συνδέονται σε ένα κοινό κεντρικό σταθμό PDC, ο οποίος ονομάζεται Super PDC. Στον Super PDC συγκεντρώνονται όλα τα δεδομένα και σχηματίζεται μια εικόνα ολόκληρης της διασύνδεσης.

1.7.2 Μονάδα PMU

Μια τυπική μονάδα PMU αποτελείται από φίλτρα αντιαναδίπλωσης, ένα μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (A/D converter), ένα μικροεπεξεργαστή, ένα κρυσταλλικό ταλαντωτή, ένα δέκτη GPS και ένα διαποδιαμορφωτή (modem). Η μονάδα PMU συνήθως εγκαθίσταται σε έναν υποσταθμό του ηλεκτρικού δικτύου, όπου υπάρχουν μετασχηματιστές για τον υποβιβασμό της τάσης και του ρεύματος έτσι ώστε να μπορούν να μετρηθούν. Η μονάδα αυτή δέχεται στις αναλογικές εισόδους της ημιτονοειδή σήματα τάσης και ρεύματος από τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος αντίστοιχα. Τα σήματα αυτά λαμβάνονται και από τις τρεις φάσεις για να μπορεί αργότερα να υπολογιστεί η τάση και το ρεύμα θετικής ακολουθίας. Η μονάδα μπορεί επιπλέον να έχει αναλογικές εισόδους για μη ημιτονοειδή αναλογικά σήματα, όπως ενεργό ισχύ, θερμοκρασία μετασχηματιστών και ρύθμιση ελέγχου ευστάθειας, καθώς και ψηφιακές εισόδους για σήματα κατάστασης τύπου Boolean (0 ή 1).



Σχήμα 3: Λειτουργικό Διάγραμμα PMU

Αξίζει να σημειωθεί ότι αντίθετα με έναν ψηφιακό ηλεκτρονόμο, μια μονάδα PMU μπορεί να μετρά ταυτόχρονα ρεύματα από πολλαπλούς αγωγούς τροφοδότησης και τάσεις από πολλαπλούς ζυγούς ενός υποσταθμού. Για τις μετρήσεις αυτές διαθέτει ξεχωριστά κανάλια ο αριθμός των οποίων ποικίλει για τα διάφορα μοντέλα PMU. Στις περισσότερες μελέτες γίνεται η παραδοχή ότι ο αριθμός των καναλιών των εγκατεστημένων PMU επαρκεί για την καταγραφή του φασιθέτη της τάσης των ζυγών, του φασιθέτη του ρεύματος των κλάδων και όλων των μεγεθών του συστήματος που μελετώνται. Στην πραγματικότητα αυτό μπορεί να μην ισχύει. Σε Πολλές μονάδες μπορεί να έχουν μικρό αριθμό καναλιών καθώς ο μεγάλος αριθμός καναλιών αυξάνει σημαντικά το κόστος κάθε μονάδας.

Τα σήματα τάσης και ρεύματος μετατρέπονται σε τάσεις με χρήση παράλληλων αντιστάσεων ή μετασχηματιστών οργάνων, ώστε να συμφωνούν με τις προδιαγραφές του μετατροπέα A/D της μονάδας. Μετά τη λήψη των σημάτων ακολουθεί η επεξεργασία τους από τα φίλτρα αντιαναδίπλωσης. Τα φίλτρα αυτά είναι βαθυπερατά και χρησιμοποιούνται για να μην εμφανιστεί αναδίπλωση φάσματος στα σήματα κατά τη δειγματοληψία. Η απόκριση συχνότητας των φίλτρων καθορίζεται από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Συγκεκριμένα το κριτήριο του Nyquist ορίζει ότι η συχνότητα αποκοπής των φίλτρων πρέπει να είναι μικρότερη από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας. Το μειονέκτημά τους είναι ότι εισάγουν στα σήματα μια ολίσθηση φάσης εξαρτώμενη από τη συχνότητα, η οποία πρέπει να αντισταθμιστεί κατά τον υπολογισμό των φασιθετών στο μικροεπεξεργαστή.

Το επόμενο βήμα είναι η δειγματοληψία, που πραγματοποιείται στο μετατροπέα A/D. Η τιμή των σημάτων καταγράφεται σε χρονικές στιγμές που ορίζονται από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Με τη διαδικασία αυτή τα σήματα από αναλογικά (συνεχούς χρόνου)

μετατρέπονται σε ψηφιακά (διακριτού χρόνου), δηλαδή σε ακολουθίες δειγμάτων. Η συχνότητα δειγματοληψίας κυμαίνεται από 12 δείγματα ανά κύκλο της ονομαστικής συχνότητας δικτύου για τις πρώτες μονάδες PMU μέχρι 128 δείγματα ανά κύκλο για τις πιο σύγχρονες μονάδες PMU. Η μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας είναι σημαντική γιατί βελτιώνει την ακρίβεια στον υπολογισμό των φασιθετών.

Ο μικροεπεξεργαστής της μονάδας PMU δέχεται ως είσοδο τα ψηφιακά σήματα από το μετατροπέα και για κάθε μονοφασικό σήμα υπολογίζει τον αντίστοιχο φασιθέτη με χρήση του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (DFT). Για τον καθορισμό της φάσης των φασιθετών χρησιμοποιείται η χρονική σφραγίδα από το δέκτη GPS. Από τους φασιθέτες που εξάγονται, ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει την τάση και το ρεύμα της θετικής ακολουθίας, αν αυτός απαιτείται. Σε πολλές περιπτώσεις ωστόσο αρκεί ο υπολογισμός της μίας μόνο φάσης. Επιπλέον ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει και αναφέρει στην έξοδο του PMU τη συχνότητα και το ρυθμό μεταβολής της. Κάθε μέτρηση που παράγεται πρέπει να συνοδεύεται από μια χρονική σφραγίδα, την οποία ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει από δύο σήματα του δέκτη GPS.

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

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

Στο τμήμα χρονισμού υπεισέρχονται ορισμένα σφάλματα που προέρχονται από το δορυφορικό σύστημα GPS. Οι ατμοσφαιρικές διαταραχές (κυρίως στο στρώμα της ιονόσφαιρας) μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στο χρόνο άφιξης των δορυφορικών σημάτων, με συνέπεια μια βραχυπρόθεσμη αβεβαιότητα στο χρόνο του ρολογιού GPS της μονάδας. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να ελαττωθούν με τη χρήση του κρυσταλλικού ταλαντωτή. Πιο συγκεκριμένα όσο πιο σταθερός είναι ο ταλαντωτής τόσο πιο ακριβής είναι η χρονική αναφορά. Επίσης σφάλματα παρουσιάζονται και εξαιτίας του γεγονότος ότι ο δέκτης GPS για μια ακριβή μέτρηση του χρόνου UTC πρέπει να διατηρεί άμεση οπτική επαφή με τουλάχιστον τέσσερεις δορυφόρους. Η πιθανότητα να συμβαίνει αυτό συνεχώς εξαρτάται από τη θέση εγκατάστασης της κεραίας GPS και το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την εκπομπή ενός χαρακτηριστικού σήματος, το οποίο δηλώνει την επάρκεια ή όχι των δορυφορικών σημάτων που λαμβάνουν, από τους δέκτες GPS των μονάδων PMU. Επιπλέον οι

περισσότεροι δέκτες παρέχουν ένα δείκτη της έντασης του σήματος που λαμβάνουν από κάθε δορυφόρο.

1.7.3 Σταθμός PDC

Αφού παραχθούν από μια μονάδα PMU, τα δεδομένα μετρήσεων φασιθετών είναι άμεσα διαθέσιμα στην έξοδο της μονάδας. Από εκεί μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές που εκτελούνται σε αυτό το σημείο, σε πραγματικό χρόνο, είτε να αξιοποιηθούν σε ανώτερο επίπεδο, αφού προωθηθούν σε ένα σταθμό συλλογής που είναι γνωστός ως «συγκεντρωτής δεδομένων φασιθετών» (Phasor Data Concentrator- PDC). Ένας σταθμός PDC διεκπεραιώνει τις παρακάτω διαδικασίες:

- συγκεντρώνει δεδομένα φασιθετών και διακριτά δεδομένα συμβάντων από μονάδες PMU
- αφαιρεί τις εσφαλμένες μετρήσεις
- ευθυγραμμίζει τις χρονικές σφραγίδες, δηλαδή συσχετίζει τα δεδομένα φασιθετών με βάση τη χρονική σφραγίδα και τον αριθμό δείγματος της κυματομορφής και δημιουργεί ένα σύνολο συγχρονισμένων μετρήσεων ευρείας περιοχής
- διενεργεί ποιοτικούς ελέγχους στα δεδομένα φασιθετών και εισάγει κατάλληλες σημάνσεις ποιότητας σε κάθε σύνολο συσχετισμένων δεδομένων
- ελέγχει τις σημάνσεις και κατόπιν εγγράφει σε αρχεία τα δεδομένα που προορίζονται για ανάλυση από τις εφαρμογές
- εποπτεύει το συνολικό σύστημα μετρήσεων και δίνει μια εικόνα της επίδοσης του ΣΗΕ, την οποία και καταγράφει.

Για να επιτελέσει την ευθυγράμμισή τους καθώς και άλλες ζωτικές εργασίες ο PDC πρέπει να έχει αρκετή χωρητικότητα ώστε να διατηρεί στην προσωρινή μνήμη τα δεδομένα όσο απαιτείται. Επιπλέον ο σταθμός PDC πρέπει να διαθέτει και εγκαταστάσεις αποθήκευσης για μόνιμη διατήρηση των δεδομένων φασιθετών, αφού ολοκληρωθούν οι παραπάνω έλεγχοι. Βέβαια το σύστημα επικοινωνίας και το σύστημα διαχείρισης δεδομένων εισάγουν καθυστερήσεις και αυξάνουν το χρόνο αναμονής στα δεδομένα πραγματικού χρόνου, αλλά αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα βαθμό. Ο σταθμός μπορεί να διαθέτει ακόμη εξειδικευμένες εξόδους, όπως είναι η άμεση διεπαφή για σύνδεση με ένα σύστημα EMS και να έχει τη δυνατότητα να ανταλλάσσει εγγραφές δεδομένων με άλλους σταθμούς PDC.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας σταθμός PDC μπορεί να λαμβάνει δεδομένα φασιθετών από μονάδες PMU διαφορετικών κατασκευαστών. Η ευθυγράμμιση σε αυτή την περίπτωση είναι μια πολύπλοκη εργασία που απαιτεί γνώση των χαρακτηριστικών κάθε μονάδας. Η ομαδοποίηση των δεδομένων με κριτήριο τη χρονική τους σφραγίδα μπορεί να οδηγήσει σε αποκλίσεις της τάξης των μικροδευτερολέπτων. Αυτό το σφάλμα για εφαρμογές συνεχούς ροής δεδομένων και καταγραφής συμβάντων δεν είναι κρίσιμο, για ορισμένες άλλες εφαρμογές όμως είναι μη αποδεκτό.

1.7.4 Σταθμός Super PDC

Αφού γίνει η συγκέντρωση και επεξεργασία των δεδομένων σε κάθε σταθμό PDC, οι μετρήσεις από μια γεωγραφική έκταση που αντιστοιχεί σε μια περιφέρεια συγκεντρώνονται σε ένα κοινό κεντρικό σταθμό που ονομάζεται Super PDC (Super Phasor Data Concentrator- SPDC). Ο σταθμός αυτό παρέχει εποπτεία ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι λειτουργίες που γίνονται σε αυτό το επίπεδο είναι όμοιες με αυτές στο επίπεδο των σταθμών PDC. 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. Επίσης 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.

Συνήθως ένας σταθμός Super PDC συνδέεται με μια κεντρική βάση δεδομένων όπου γίνεται η μακροπρόθεσμη αρχειοθέτηση των δεδομένων του ηλεκτρικού δικτύου. Εδώ ανακύπτει το πρόβλημα της μόνιμης αποθήκευσης των πληροφοριών. Είναι φανερό ότι ακολουθώντας αυτή τη λογική οι μονάδες αποθήκευσης του σταθμού (πχ. σκληροί δίσκοι) γεμίζουν πολύ γρήγορα. Γι' αυτό τα αρχεία πρέπει να μεταφέρονται από τους πλήρεις δίσκους σε οπτικά μέσα (π.χ. DVD) για μόνιμη αποθήκευση. Η έννοια του πραγματικού χρόνου για τα δεδομένα που εισέρχονται σε ένα σταθμό PDC ή Super PDC δεν είναι απολύτως ακριβής. Τα κανάλια επικοινωνίας μέχρι το σταθμό και οι διαδικασίες ευθυγράμμισης και ελέγχου κατά τη λήψη των δεδομένων εισάγουν καθυστερήσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει κάποιος χρόνος αναμονής. Ο χρόνος αναμονής μάλιστα αυξάνεται όσο ανεβαίνει κανείς σε υψηλότερα επίπεδα ιεραρχίας.

1.8 Πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μεγάλη σημασία για την ορθή λειτουργία των μονάδων PMU έχει ο συγχρονισμός. Ο συγχρονισμός αυτός γίνεται με βάση τα πρότυπα μετάδοσης σημάτων IRIG-B και 1PPS.

1.8.1. Πρότυπο IRIG-B

Το πρότυπο IRIG αναπτύχθηκε από την ομάδα IRIG του συμβουλίου RCC του αμερικανικού στρατού. Δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά το 1960 και έκτοτε έχει αναθεωρηθεί αρκετές φορές από την Ομάδα Τηλεπικοινωνιών και Χρονισμού (TTG) του συμβουλίου RCC. Το IRIG-B είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρότυπα μετάδοσης χρονικών σημάτων σε υποσταθμούς ηλεκτρικών δικτύων και χρησιμοποιείται όταν οι μονάδες PMU δεν έχουν ενσωματωμένο δέκτη GPS. Η τελευταία έκδοση του προτύπου είναι το IRIG 200-04 που δημοσιεύτηκε το 2004. Το πρότυπο IRIG ορίζει μια οικογένεια κωδικών χρόνου (A, B, D, E, G, H), οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη συχνότητα παλμών (ή αλλιώς ρυθμό μετάδοσης bit). Η συχνότητα κυμαίνεται από έναν μέχρι 10000 παλμούς ανά δευτερόλεπτο (pps). Όλοι οι κωδικές χρησιμοποιούν κωδικοποίηση εύρους παλμού. Ορίζονται τρία διαφορετικά είδη παλμών:

- παλμός με διάρκεια ίση με το 20% της περιόδου (δυναμικό 0)

- παλμός με διάρκεια ίση με το 50% της περιόδου (δυναμικό 1)
- παλμός με διάρκεια ίση με το 80% της περιόδου (δείκτης θέσης P)

Ο πλήρης προσδιορισμός του κώδικα γίνεται με ένα γράμμα, το μορφότυπο κώδικα, και τρία ψηφία τα οποία ονομάζονται αριθμοί αναγνώρισης. Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται είναι ο εξής:

- Γράμμα: Μορφότυπο (A, B, D, E, G, H)
- 1ο ψηφίο: Είδος διαμόρφωσης
- 2ο ψηφίο: Συχνότητα φέροντος κύματος
- 3ο ψηφίο: Κωδικοποιημένες παραστάσεις

Οι κωδικοποιημένες παραστάσεις του IRIG μπορεί να είναι χρονική πληροφορία (BCD-TOY/BCD-YEAR), λειτουργίες ελέγχου (CF – bit δεσμευμένα για εφαρμογές χρηστών) και δευτερόλεπτα ημέρας σε δυαδική μορφή (SBS).

Ο κώδικας χρόνου IRIG-B είναι διαδομένος στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει συχνότητα 100 παλμούς ανά δευτερόλεπτο (pps), άρα σε κάθε χρονικό πλαίσιο που διαρκεί 1 δευτερόλεπτο υπάρχουν 100 παλμοί με περίοδο 10 ms. Η αρχή κάθε πλαισίου δηλώνεται με δύο συνεχόμενους δείκτες θέσης P (αναφορά πλαισίου R). Το πλαίσιο διαιρείται σε 10 ομάδες των 10 στοιχείων. Κάθε ομάδα περιέχει 2 αριθμούς BCD χωρισμένους με ένα μηδενικό και ένα δείκτη θέσης P για τερματισμό (σύνολο 10 στοιχεία).

Το σήμα IRIG-B μεταδίδεται είτε αδιαμόρφωτο (DCLS) είτε διαμορφωμένο κατά πλάτος με ημιτονικό φέρον (συχνότητας 1kHz συνήθως) είτε διαμορφωμένο με κωδικοποίηση Manchester. Το αδιαμόρφωτο σήμα είναι το πιο ακριβές, αλλά είναι κατάλληλο μόνο για αποστάσεις μέχρι 100 m περίπου. Το σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας από τις μονάδες PMU, χωρίς να απαιτείται η χρήση αποδιαμορφωτή. Το διαμορφωμένο σήμα με ημιτονικό φέρον μπορεί να μεταδοθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Όμως σε αυτή την περίπτωση η ακρίβεια μειώνεται σε 0,1 ms μέχρι αρκετά ms, τιμές που δεν πληρούν τις προδιαγραφές ενός συστήματος PMU. Επιπλέον επιβάλλει τη χρήση ενός αποδιαμορφωτή σε κάθε μονάδα PMU. Τέλος, η διαμόρφωση με κωδικοποίηση Manchester είναι διαμόρφωση φάσης με τετραγωνικό φέρον κύμα. Είναι καλύτερη μέθοδος από τις προηγούμενες, αφού δίνει μεγάλη ακρίβεια χάρη στον τετραγωνικό παλμό του φέροντος κύματος και προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις. Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, δε χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές PMU.

1.8.2.Πρότυπο 1PPS

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

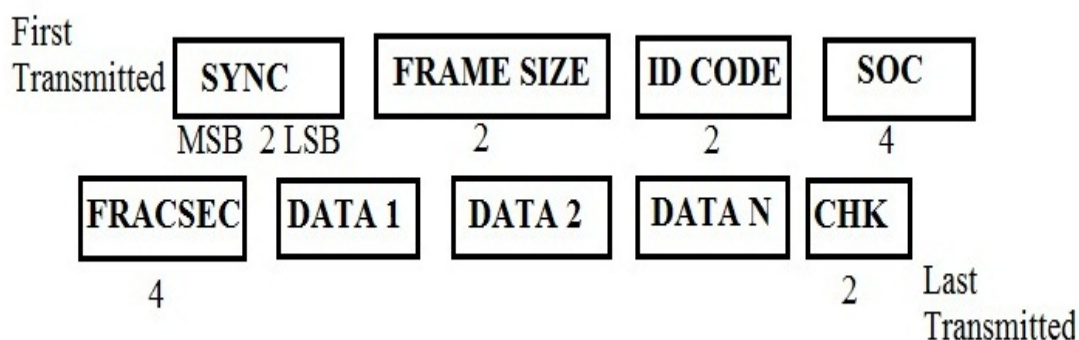
θα μεταδίδονται κατά την έναρξη κάθε δευτερολέπτου και κάθε 1/30 του δευτερολέπτου μεταξύ διαδοχικών δευτερολέπτων.

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

1.9 Μορφότυπα δεδομένων-Δομή αρχείου συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη

Τα μηνύματα που περιέχουν τις μετρήσεις φασιθετών οι οποίες προέρχονται από τις μονάδες PMU έχουν μια κοινή δομή η οποία ορίζεται στο πρότυπο IEEE C37.118.

Η δομή των μηνυμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Μορφότυπο Αρχείων PMU

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.

Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, ορίζονται τέσσερις τύπου αρχείων μετάδοσης δεδομένων από και προς τις μονάδες PMU. Τα τρία από αυτά δημιουργούνται από τα PMU («Αρχεία επικεφαλίδας», «Αρχεία ρυθμίσεων» και «Αρχεία δεδομένων») και χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία τους με ανώτερα ιεραρχικά επίπεδα όπως για παράδειγμα με τις μονάδες PDC, ενώ το τέταρτο χρησιμοποιείται για επικοινωνία με την αντίθετη φορά («Αρχεία εντολών»). Με το ίδιο σύστημα μπορεί να υλοποιηθεί και η αποστολή δεδομένων μεταξύ σταθμών PDC.

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.

1.10 Έκδοση προτύπων

Το 1995, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) εξέδωσε το πρότυπο IEEE 1344 για τους συγχρονισμένους φασιθέτες, το οποίο και επικύρωσε ξανά το 2001. Το 2005 αντικαταστάθηκε από το πρότυπο IEEE C37.118, το οποίο αναθεώρησε πλήρως το προηγούμενο και ρύθμισε θέματα που αφορούν στη χρήση των μονάδων PMU στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προδιαγραφές περιγράφουν τα πρότυπα μετρήσεων, τη μέθοδο ποσοτικοποίησης των μετρήσεων, τις απαιτήσεις δοκιμών και πιστοποίησης για εξασφάλιση ακρίβειας, το μορφότυπο μετάδοσης δεδομένων και το πρωτόκολλο μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο. Άλλα πρότυπα που χρησιμοποιούνται στη διασύνδεση των μονάδων PMU είναι:

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

Εκτίμηση κατάστασης

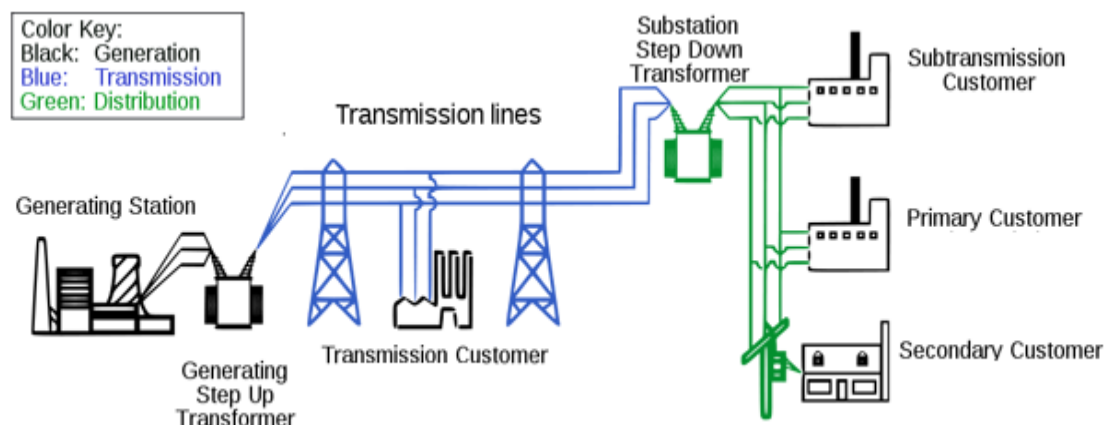
2.1 Εισαγωγή

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από τρία διακριτά υποσυστήματα, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής. Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει ένα σύνολο σταθμών παραγωγής .

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους Ενεργειακούς Πόρους, την Ενεργειακή Πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες αυτής. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται στις συμβατικές που βασίζονται σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο, στην πυρηνική ενέργεια και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούν διαχρονικές πηγές (άνεμος, ήλιος, νερό κλπ) και δεν εξαντλούν τα περιορισμένα ενεργειακά αποθέματα.

Το σύστημα Μεταφοράς, μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές Μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20 kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, αρχίζουν οι γραμμές διανομής, που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές.

Το δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) , που μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής, και το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές

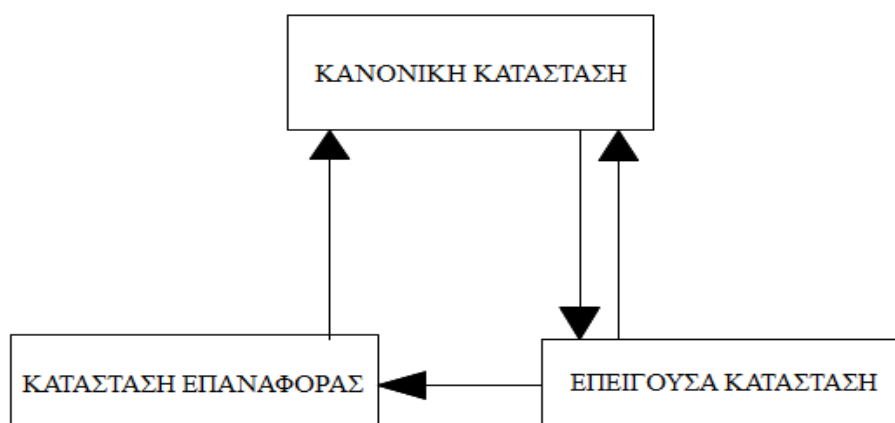


Σχήμα 5: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας και Υποσυστήματα

2.1.1 Καταστάσεις λειτουργίας Συστήματος

Βασικός σκοπός των χειριστών ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ρύθμιση της παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου ώστε να καλύπτεται η ζήτηση ανά πάσα στιγμή. Την προσπάθεια αυτή δυσχεραίνει το γεγονός ότι το σύστημα δεν είναι ποτέ στατικό. Οι συνθήκες λειτουργίας μεταβάλλονται με το χρόνο. Επιπλέον, στο δίκτυο εμφανίζονται διαταραχές, που είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν έγκαιρα, διότι τείνουν να απορρυθμίσουν το σύστημα και να το οδηγήσουν σε διακοπές ρεύματος μικρής ή μεγάλης έκτασης. Ο πλήρης προσδιορισμός των συνθηκών αυτών σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να γίνει με γνώση του μοντέλου του δικτύου και των μιγαδικών φασιθετών τάσης των ζυγών. Το σύνολο των μιγαδικών φασιθετών τάσης ονομάζεται στατική κατάσταση του συστήματος. Καθώς οι συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν, το σύστημα μπορεί να βρεθεί σε μια από τις τρεις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας: κανονική κατάσταση, επείγουσα κατάσταση ή κατάσταση επαναφοράς.

Ένα σύστημα βρίσκεται στην κανονική κατάσταση αν όλα του τα φορτία τροφοδοτούνται με την απαραίτητη ισχύ χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας. Τέτοιοι περιορισμοί είναι συνήθως τα όρια ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς και τα όρια των τάσεων των ζυγών. Η κανονική κατάσταση μπορεί να είναι ασφαλής, οπότε το σύστημα μπορεί να παραμένει στην κανονική κατάσταση μετά από μια διαταραχή, ή μη ασφαλής. Στη δεύτερη περίπτωση το σύστημα, με την εμφάνιση ορισμένων διαταραχών, μεταπίπτει σε επείγουσα κατάσταση. Η επείγουσα κατάσταση παρουσιάζεται αν, λόγω απρόσμενων συμβάντων, παραβιαστούν κάποιοι περιορισμοί λειτουργίας. Ωστόσο όλα τα φορτία εξακολουθούν να τροφοδοτούνται και αν σε αυτό το σημείο εφαρμοστούν άμεσα διορθωτικές κινήσεις από τους χειριστές, το σύστημα μπορεί να επανέλθει στην κανονική κατάσταση. Διαφορετικά, το σύστημα θα μεταβεί πλέον στην κατάσταση επαναφοράς προκειμένου να αποφευχθεί η ολική του κατάρρευση. Οι διορθωτικές ενέργειες στην κατάσταση αυτή περιλαμβάνουν την αποκοπή φορτίου και την αποσύνδεση γραμμών και εξοπλισμού με στόχο την επίτευξη της ευστάθειας, την ικανοποίηση των περιορισμών λειτουργίας και την τροφοδοσία όλων των φορτίων. Οι καταστάσεις ενός Σ.Η.Ε. και οι μεταβάσεις από τη μία στην άλλη απεικονίζονται στο Σχήμα 6 που ακολουθεί.



Σχήμα 6: Καταστάσεις Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

2.1.2 Ανάλυση ασφάλειας

Είναι ευνόητο ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βρίσκεται συνεχώς στην ασφαλή κανονική κατάσταση. Γι' αυτό απαιτείται συνεχής παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας από τους χειριστές του, αναγνώριση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται και εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών σε περίπτωση που η κατάσταση είναι μη ασφαλής. Αυτή η διαδικασία λέγεται ανάλυση ασφάλειας και περιλαμβάνει τη λήψη μετρήσεων από όλο το σύστημα και την επεξεργασία τους με στόχο τον προσδιορισμό της κατάστασης του συστήματος.

Η διαδικασία της εκτίμησης κατάστασης θα μπορούσε να επιτευχθεί άμεσα τοποθετώντας συσκευές μέτρησης φασιθετών σε όλους τους ζυγούς του συστήματος. Κάτι τέτοιο όμως δε συμβαίνει γιατί μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν ευάλωτη σε σφάλματα μετρήσεων, στο θόρυβο και σε σφάλματα τηλεμετρίας. Επίσης θα αυξανόταν κατά πολύ το κόστος του συστήματος. Ακόμη η τοποθέτηση συσκευών μέτρησης σε όλους τους ζυγούς δεν είναι τόσο αποδοτική λόγω του μειωμένου αριθμού καναλιών τηλεπικοινωνίας. Τέλος υπάρχουν περίοδοι που τα κανάλια τηλεπικοινωνίας δε δουλεύουν. Έτσι ο χειριστής του συστήματος δεν θα έχει πληροφορίες για μέρος του συστήματος σε αυτές τις περιόδους.

Για αυτούς τους λόγους η εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιεί ένα σύνολο μετρήσεων με περίσσεια ώστε να γίνεται φιλτράρισμα τέτοιων σφαλμάτων και να είναι δυνατό να ευρεθεί η βέλτιστη εκτίμηση του συστήματος. Οι διαθέσιμες μετρήσεις μπορεί να είναι το μέτρο της τάσης σε κάποιους ζυγούς, η ένταση, η ενεργός ισχύς και η άεργος ισχύς, η θέση των βηματικών διακοπών στους μετασχηματιστές (transformer taps) και η κατάσταση των διακοπών (ανοικτοί ή κλειστοί). Επειδή η ταυτόχρονη μέτρηση ποσοτήτων σε διαφορετικά μέρη του δικτύου είναι πρακτικά αδύνατη, ένα συγκεκριμένο ποσό χρονικής απόκλισης των μετρήσεων είναι ανεκτό. Αυτή η ανοχή δικαιολογείται από το γεγονός ότι λειτουργικές συνθήκες του συστήματος μεταβάλλονται αργά υπό κανονικές συνθήκες.

2.1.3 Ορισμός Εκτίμησης Κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης είναι η διαδικασία του ορισμού τιμών στις άγνωστες καταστάσεις (state variables) ενός συστήματος χρησιμοποιώντας μετρήσεις από το σύστημα. Σε αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούνται επίσης η τοπολογία του συστήματος και τυχόν γνώσεις για την ακρίβεια των συσκευών μέτρησης.

2.2 Κλασικός Εκτιμητής κατάστασης

2.2.1 Λειτουργίες κλασικού εκτιμητή κατάστασης

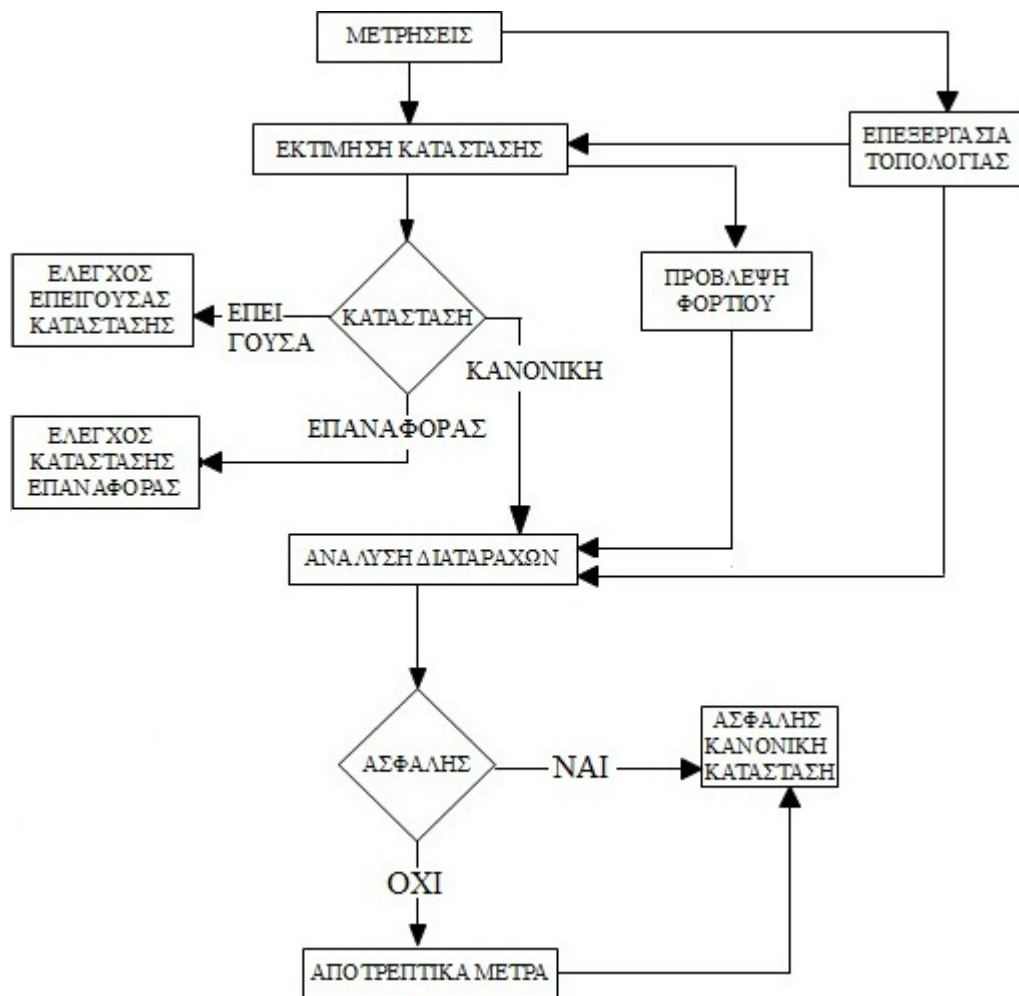
Για να έχουμε μια εικόνα του δικτύου σε μια χρονική στιγμή αρκεί να γνωρίζουμε τους φασιθέτες τάσης των ζυγών και γνωρίζοντας τους μπορούμε να υπολογίσουμε ροές, εγχύσεις και ρεύματα με δεδομένο φυσικά ότι είναι γνωστή η τοπολογία και οι παράμετροι του δικτύου. Ωστόσο υπάρχει η πιθανότητα ύπαρξης σφάλματος στις παραμέτρους του δικτύου ή στην τοπολογία λόγω διάφορων αιτιών όπως μη αναφερόμενες διακοπές.

Γενικά, οι λειτουργίες που πρέπει να επιτελεί ένας εκτιμητής κατάστασης είναι οι εξής:

- Επεξεργασία τοπολογίας: Ο εκτιμητής συγκεντρώνει τα δεδομένα από όλους τους διακόπτες και διαμορφώνει το μονογραμμικό σχέδιο του συστήματος.

- Ανάλυση παρατηρησιμότητας : Ο εκτιμητής προσδιορίζει αν είναι δυνατό να καθοριστεί η λύση της εκτίμησης κατάστασης με χρήση του διαθέσιμου συνόλου μετρήσεων. Επιπλέον καθορίζει τους μη παρατηρήσιμους κλάδους του συστήματος και τις παρατηρήσιμες νησίδες, αν υπάρχουν.
- Επίλυση εκτίμησης κατάστασης: Ο εκτιμητής, με βάση το μοντέλο του δικτύου και τις διαθέσιμες μετρήσεις στο σύστημα, καθορίζει τη βέλτιστη εκτίμηση για την κατάσταση του δικτύου που αποτελείται από τις μιγαδικές τάσεις των ζυγών σε όλο το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη παρέχει τις βέλτιστες εκτιμήσεις για όλες τις ροές των γραμμών, τα φορτία, τις μεταβλητές λήψεις (taps) μετασχηματιστών και τις παραγωγές γεννητριών.
- Εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων: Ο εκτιμητής ανιχνεύει την ύπαρξη σημαντικών σφαλμάτων στο διαθέσιμο σύνολο μετρήσεων. Προσδιορίζει και αποκλείει τις εσφαλμένες μετρήσεις με δεδομένο ότι υπάρχει επάρκεια μετρήσεων μετά την απόρριψή τους.
- Εντοπισμός σφαλμάτων παραμέτρων και δομικών σφαλμάτων: Ο εκτιμητής εκτιμά διάφορες παραμέτρους του δικτύου όπως παραμέτρους του μοντέλου των γραμμών μεταφοράς, μεταβλητές λήψεις (tap) μετασχηματιστών και χωρητικότητες ή αυτεπαγωγές εγκάρσιων στοιχείων. Ανιχνεύει δομικά σφάλματα στη διαμόρφωση του δικτύου και διακόπτες σε εσφαλμένη κατάσταση, με δεδομένο ότι υπάρχει επάρκεια μετρήσεων.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η εκτίμηση κατάστασης είναι ο πυρήνας της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο(online) του συστήματος και της ανάλυσης ασφάλειας του συστήματος. Λειτουργεί σαν φίλτρο μεταξύ των μετρήσεων που λαμβάνονται στο σύστημα και των εφαρμογών ενός κέντρου ελέγχου ενέργειας που απαιτούν τα πιο αξιόπιστα δεδομένα για την κατάσταση του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Στο Σχήμα 7 φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα της ανάλυσης ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο. Οι μετρήσεις που περιλαμβάνουν πληροφορίες για τις θέσεις των διακοπών στους υποσταθμούς επεξεργάζονται από τον επεξεργαστή τοπολογίας, ο οποίος με τη σειρά του δημιουργεί το μοντέλο ζυγών/κλάδων του συστήματος. Ωστόσο μπορεί να υπάρξει πρόβλημα μη παρατηρησιμότητας λόγω προσωρινής απώλειας τηλεμετρίας, αφαίρεσης εσφαλμένων δεδομένων ή λόγω άλλων απρόσμενων σφαλμάτων. Τέτοιο πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με χρήση ψευδομετρήσεων που βασίζονται σε βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου, ιστορικά δεδομένα ή άλλες προσεγγιστικές μεθόδους και οι οποίες έχουν μικρά βάρη(μεγάλη τυπική απόκλιση) ή θεωρούνται από τη αρχή σαν κρίσιμες μετρήσεις.



Σχήμα 7: Λειτουργικό Διάγραμμα Ανάλυσης Ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο

2.2.2 Παραδοχές- Υποθέσεις

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση όταν οι συνθήκες είναι συμμετρικές. Σε συμμετρικές συνθήκες αναφερόμαστε όταν όλα τα φορτία και οι ροές των γραμμών μεταφοράς είναι τριφασικές και συμμετρικές και όλες οι εν σειρά ή εγκάρσιως συνδεδεμένες συσκευές του συστήματος είναι συμμετρικές και στις τρεις φάσεις. Αυτές οι υποθέσεις επιτρέπουν την χρήση του μονοφασικού κυκλώματος θετικής ακολουθίας για τη μοντελοποίηση ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η λύση που θα βρεθεί χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο του δικτύου, θα είναι οι τάσεις θετικής ακολουθίας του συστήματος. Όλα τα δεδομένα και οι μεταβλητές του δικτύου, σε αυτή την περίπτωση, εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα μοντέλα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

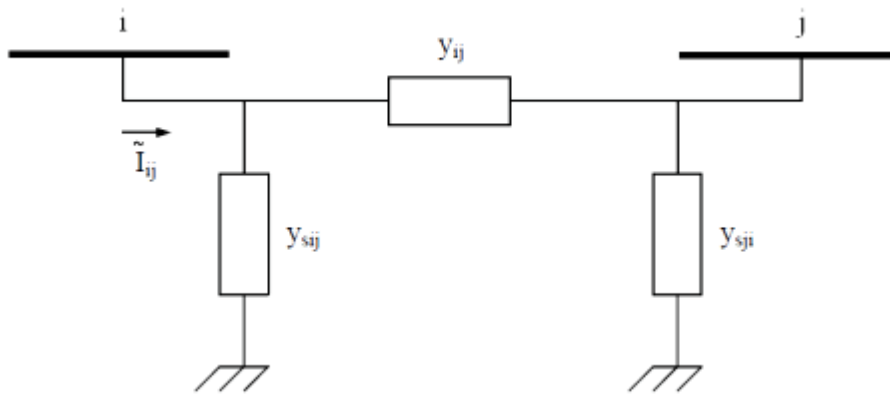
2.2.2.1 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π». Το μοντέλο αυτό, που συνδέει το ζυγό i με το ζυγό j , αποτελείται από μια εν σειρά σύνθετη αγωγιμότητα y_{ij} και δύο εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες y_{sij} και y_{sji} , μία συνδεδεμένη

στο ζυγό i και μία στο ζυγό j αντίστοιχα . Οι δύο εγκάρσιες αγωγιμότητες y_{sij} και y_{sji} , στο μοντέλο μας θεωρούνται ίσες.

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (2.1)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (2.2)$$



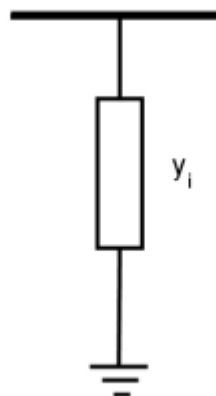
Σχήμα 8: Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς

2.2.2.2 Εγκάρσια στοιχεία

Τα εγκάρσια στοιχεία είναι πυκνωτές ή επαγωγικά πηνία και χρησιμοποιούνται συχνά για τον έλεγχο της τάσης ή της αέργου ισχύος. Αναπαρίστανται με μια εγκάρσια φανταστική αγωγιμότητα:

$$y_i = jb_i \quad (2.3)$$

Το πρόσημο της αγωγιμότητας καθορίζει τον τύπο του εγκάρσιου στοιχείου. Μια θετική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε εγκάρσιο πυκνωτή, ενώ μια αρνητική αντιστοιχεί σε εγκάρσιο επαγωγικό πηνίο.



Σχήμα 9: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου

2.2.2.3 Μετασχηματιστές

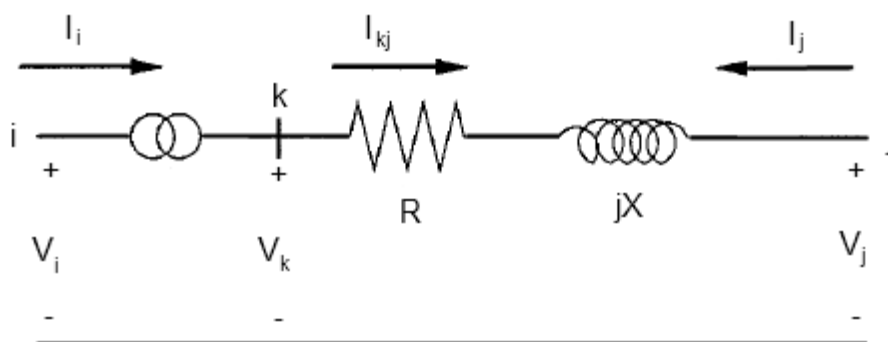
Οι μετασχηματιστές παριστάνονται με τα ισοδύναμα κυκλώματά τους των οποίων οι παράμετροι εξαρτώνται από τη λειτουργία την οποία εκτελούν. Γενικά οι μετασχηματιστές μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης
- Αυτομετασχηματιστές
- Μετασχηματιστές ρύθμισης

Οι μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης και οι αυτομετασχηματιστές παριστάνονται με μια αγωγιμότητα σειράς. Οι μετασχηματιστές ρύθμισης διακρίνονται σε μετασχηματιστές ρύθμισης μέτρου τάσεως και μετασχηματιστές φάσεως. Οι μετασχηματιστές ρύθμισης τάσεως οι οποίοι εμφανίζουν μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού αλλά συμφασικές λήψεις, παριστάνονται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής με λόγο μετασχηματισμού a σε σειρά με μια ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση:

$$Z = R + jX \quad (2.4)$$

Οι ακροδέκτες του πραγματικού μετασχηματιστή αντιστοιχούν στους ζυγούς i και j .



Σχήμα 10: Αναπαράσταση Μετασχηματιστή

Οι εξισώσεις κόμβων του δίθυρου δικτύου προκύπτουν αν εκφραστούν κατάλληλα τα ρεύματα I_{kj} και I_j στα άκρα του κλάδου της σύνθετης αντίστασης. Αν η σύνθετη αγωγιμότητα του κλάδου k - j είναι $y = 1/Z$, τότε τα ρεύματα συναρτήσκει των τάσεων V_k και V_j δίνονται από το σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} I_{kj} \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

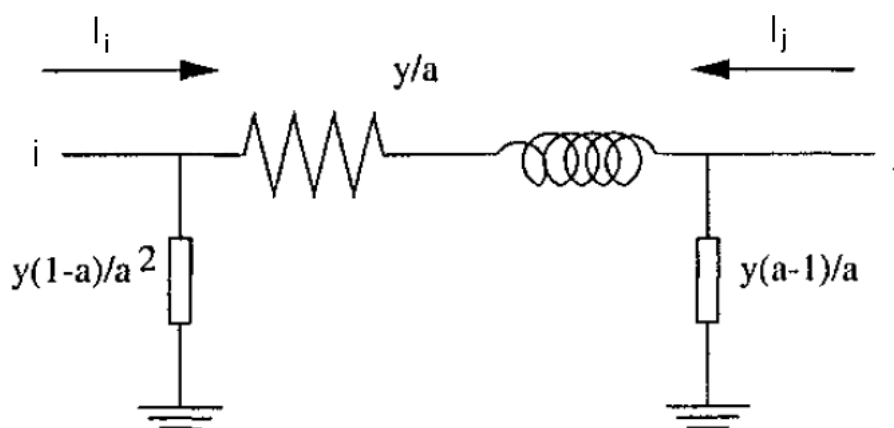
Αν αντικατασταθεί το ρεύμα I_{kj} και η τάση V_j με:

$$I_{kj} = aI_i \quad (2.6)$$

$$V_k = \frac{V_i}{a} \quad (2.7)$$

το σύστημα εξισώσεων γίνεται:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y}{a^2} & \frac{-y}{a} \\ \frac{-y}{a} & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (2.8)$$



Σχήμα 11: Μοντέλο Μετασχηματιστή

2.2.2.4 Γεννήτριες

Οι γεννήτριες αναπαρίστανται ως ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος με αναφορά σε κάποιο ζυγό. Η γεννήτρια έχει μιγαδική ισχύ:

$$\tilde{S}_{G_i} = P_{G_i} + jQ_{G_i} \quad (2.9)$$

όπου :

- P_{G_i} : ενεργός ισχύς γεννήτριας (θετική)
- Q_{G_i} : άεργος ισχύς γεννήτριας.

2.2.2.5 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. Αντίθετα, τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας αναπαρίστανται ως εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες και έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου. Η αναπαράσταση του φορτίου σταθερής ισχύος είναι:

$$\tilde{S}_{D_i} = P_{D_i} + jQ_{D_i} \quad (2.10)$$

όπου :

- P_{D_i} : ενεργός ισχύς φορτίου (αρνητική)
- Q_{D_i} : άεργος ισχύς φορτίου.

Η αναπαράσταση του φορτίου σταθερής αγωγιμότητας είναι:

$$y_i = g_i + jb_i \quad (2.11)$$

2.2.3 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Η εκτίμηση κατάστασης έχει στόχο τον προσδιορισμό της πιο πιθανής κατάστασης του συστήματος με βάση τις μετρούμενες ποσότητες. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι με χρήση μιας ιδιαίτερα διαδεδομένης μεθόδου στη στατιστική, της Εκτίμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας (MLE).

Θεωρούμε ότι τα σφάλματα των μετρήσεων είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν μια γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους. Η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όλων των μετρήσεων μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση των παραμέτρων. Η τελευταία ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν οι άγνωστες παράμετροι επιλεγούν ώστε να είναι πιο κοντά στις πραγματικές τους τιμές. Επομένως μπορεί να οριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση πιθανοφάνειας. Η λύση του προβλήματος θα μας δώσει

την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας για τις ζητούμενες παραμέτρους. Τα σφάλματα των μετρήσεων θεωρούμε ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή (Γκαουσιανή) με παραμέτρους μ (μέση τιμή) και σ^2 (διασπορά). Στη συνέχεια το πρόβλημα επιλύεται για αυτές τις δύο παραμέτρους.

2.2.3.1 Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Κανονικής Κατανομής

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

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left\{\frac{z-\mu}{\sigma}\right\}^2} \quad (2.12)$$

όπου

- z : τυχαία μεταβλητή
- μ : μέση τιμή της z (ίση με $E(z)$)
- σ : τυπική απόκλιση της z

Η συνάρτηση $f(z)$ αλλάζει σχήμα ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων μ και σ . Ωστόσο, μπορεί να κανονικοποιηθεί εφαρμόζοντας την αλλαγή μεταβλητής:

$$u = \frac{z - \mu}{\sigma} \quad (2.13)$$

Η νέα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (2.14)$$

2.2.3.2 Συνάρτηση πιθανοφάνειας

Έστω m ανεξάρτητες μετρήσεις με την ίδια κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των μετρήσεων μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο όλων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, αφού οι μετρήσεις είναι ανεξάρτητες:

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2)\cdots f(z_m) \quad (2.15)$$

όπου

z_i : η i -οστή 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 . Αποτελεί ένα μέτρο της πιθανότητας να παρατηρηθεί ένα συγκεκριμένο σύνολο μετρήσεων στο διάνυσμα z .

Ο στόχος της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας είναι να μεγιστοποιήσει αυτή τη συνάρτηση πιθανοφάνειας μεταβάλλοντας τις παραμέτρους μ_i (μέση τιμή) και σ_i (τυπική απόκλιση). Για διευκόλυνση η συνάρτηση αντικαθίσταται από το λογάριθμό της. Η νέα συνάρτηση λέγεται συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας, συμβολίζεται με L και δίνεται από τη σχέση:

$$L = \log f_m(z) = \sum_{i=1}^m \log f(z_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i \quad (2.16)$$

Για να μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας πρέπει:

$$\log f_m(z) = \max \quad (2.17)$$

που συνεπάγεται:

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 = \min \quad (2.18)$$

Η παραπάνω συνθήκη μπορεί να επαναδιατυπωθεί συναρτήσει των υπολοίπων r_i των μετρήσεων:

$$r_i = z_i - \mu_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2.19)$$

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 τη μέτρηση z_i . Το τετράγωνο κάθε υπολοίπου r_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος $W_{ii} = \sigma_i^{-2}$ που είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη διασπορά σφάλματος για τη μέτρηση z_i . Έτσι η ελαχιστοποίηση του παραπάνω αθροίσματος είναι ισοδύναμη με την ελαχιστοποίηση του σταθμικού αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων r_i :

$$\sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2 = \min \quad (2.20)$$

όπου:

$$r_i = z_i - h_i(x), \quad i = 1, \dots, m \quad (2.21)$$

Η λύση του παραπάνω προβλήματος βελτιστοποίησης λέγεται εκτιμήτρια σταθμικών ελαχίστων τετραγώνων (WLS) για το διάνυσμα κατάστασης x .

2.3 Υβριδικός εκτιμητής κατάστασης

Παρότι η χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών βελτίωσε την ακρίβεια και την αξιοπιστία του εκτιμητή κατάστασης, η μεγάλη πλειοψηφία των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται στους υπάρχοντες εκτιμητές είναι συμβατικές μετρήσεις οι οποίες προέρχονται από το σύστημα SCADA. Έτσι γίνεται κατανοητό ότι η πλήρης αντικατάστασή των συμβατικών μετρήσεων με συγχρονισμένες μετρήσεις οι οποίες θα λαμβάνονται από μονάδες PMU δε θα είναι εφικτή στο άμεσο μέλλον. Επομένως, είναι αναγκαία η δημιουργία ενός εργαλείου που θα συνδυάζει συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις. Το εργαλείο αυτό ονομάζεται υβριδικός εκτιμητής κατάστασης.

Ο υβριδικός εκτιμητής κατάστασης είναι μη γραμμικός γιατί περιλαμβάνει μη γραμμικές συναρτήσεις μέτρησης. Όπως και ο κλασικός εκτιμητής κατάστασης, βασίζεται στη μέθοδο των σταθμικών ελαχίστων τετραγώνων (WLS) και είναι σχεδιασμένος ώστε να δέχεται σαν είσοδο συμβατικές μετρήσεις ροών και εγχύσεων ισχύος καθώς και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος. Αρχικά ορίζεται μια αναφορά φάσης έτσι ώστε να είναι συγκρίσιμες οι φασικές γωνίες των ζυγών του δικτύου. Για το σκοπό αυτό διακρίνονται δύο περιπτώσεις:

- I. αν υπάρχουν μόνο συμβατικές μετρήσεις, επιλέγεται αυθαίρετα ένας ζυγός ως ζυγός αναφοράς με μηδενική φασική γωνία και με βάση αυτόν ορίζονται οι φασικές γωνίες όλων των ζυγών.
- II. αν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις φασιθετών, οι φασικές γωνίες των ζυγών υπολογίζονται σε σχέση με τη χρονική αναφορά που υπογορεύεται από το σύστημα GPS, χωρίς να έχει οριστεί κάποιος ζυγός αναφοράς.

Οι μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος λαμβάνονται συνήθως σε πολική μορφή, όπως ακριβώς παράγονται από τις μονάδες PMU. Η αναπαράσταση αυτή είναι προτιμότερη από την καρτεσιανή, γιατί το μέτρο και η φασική γωνία ενός φασιθέτη, όπως μετρώνται σε μια μονάδα PMU, είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητα μεγέθη και τα σφάλματά τους είναι ασυσχέτιστα. Ωστόσο, για την εκτίμηση κατάστασης, μπορεί να μετατραπούν σε καρτεσιανή μορφή στο κέντρο ελέγχου .

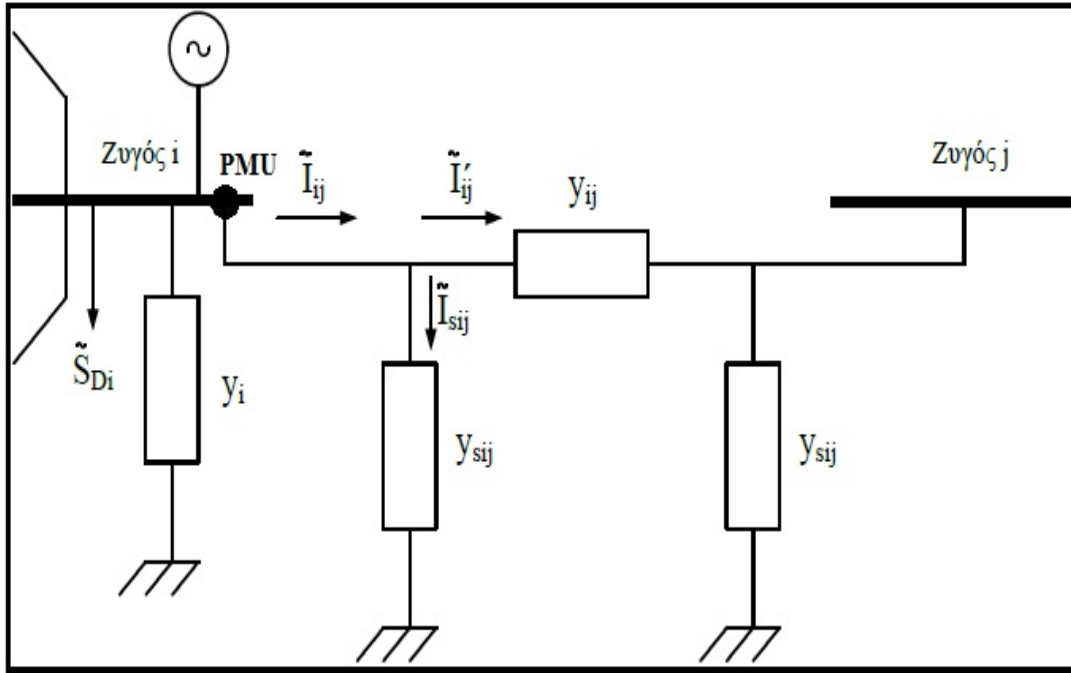
Στην παρούσα υλοποίηση του υβριδικού εκτιμητή οι φασιθέτες τάσης γράφονται σε πολική μορφή, ενώ οι φασιθέτες ρεύματος σε πολική ή καρτεσιανή μορφή. Οι μετρήσεις φασιθετών ρεύματος δημιουργούν ορισμένα αριθμητικά προβλήματα. Συγκεκριμένα, όταν η εκτίμηση κατάστασης εκτελείται με επίπεδο αρχικό διάνυσμα, τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας που αντιστοιχούν σε μετρήσεις φασιθετών ρεύματος γίνονται απροσδιόριστα. Απροσδιοριστία μπορεί να εμφανιστεί και στις συναρτήσεις μέτρησης των φασικών γωνιών ρεύματος. Η εξάλειψη των αριθμητικών προβλημάτων επιτυγχάνεται με την αναπαράσταση των ρευμάτων σε καρτεσιανή μορφή για την πρώτη επανάληψη και σε πολική μορφή για τις επόμενες επαναλήψεις.

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσεται ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης που εκτελείται από τον υβριδικό εκτιμητή.

2.3.1 Παραδοχές - Υποθέσεις

2.3.1.1 Μοντέλο γενικευμένου ζυγού και κλάδου

Το μοντέλο του δικτύου και των επιμέρους στοιχείων στο οποίο βασίζεται ο αλγόριθμος του υβριδικού εκτιμητή είναι όμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται από τον κλασικό εκτιμητή. Η γραμμή μεταφοράς (ή αλλιώς κλάδος) μεταξύ των ζυγών i και j ενός δικτύου παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π». Στο ζυγό i είναι συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_i που παριστάνει ένα εγκάρσιο στοιχείο ή ένα φορτίο σταθερής αγωγιμότητας. Στον ίδιο ζυγό έχει συνδεθεί μια γεννήτρια που εγχύει ρεύμα \tilde{I}_{G_i} και ένα φορτίο σταθερής ισχύος \tilde{S}_{D_i} που απορροφά ρεύμα \tilde{I}_{D_i} . Η τάση του ζυγού i συμβολίζεται με \tilde{V}_i και η τάση του ζυγού j με \tilde{V}_j . Το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή μεταξύ των ζυγών i και j συμβολίζεται με \tilde{I}_{ij} . Στην αρχή της γραμμής, κοντά στο ζυγό i , έχει τοποθετηθεί μια μονάδα PMU που μετρά την τάση \tilde{V}_i και το ρεύμα \tilde{I}_{ij} .



Σχήμα 12 : Γενικευμένο ισοδύναμο κύκλωμα δύο ζυγών

2.3.1.2 Διατύπωση ρευμάτων

Με βάση το προηγούμενο μοντέλο το ρεύμα διαιρείται σε δύο ρεύματα, το \tilde{I}_{ij}' και το \tilde{I}_{sij} . Επομένως μπορεί να γραφεί:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_{ij}' + \tilde{I}_{sij} \quad (2.22)$$

Τα δύο ρεύματα μπορούν να γραφούν συναρτήσει των τάσεων των ζυγών και των αγωγιμοτήτων ως εξής:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_i y_{sij} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) y_{ij} = \tilde{V}_i (y_{ij} + y_{sij}) - \tilde{V}_j y_{ij} \quad (2.23)$$

Για τις αγωγιμότητες και τις τάσεις των ζυγών θα χρησιμοποιηθεί η υβριδική μορφή: Αγωγιμότητες:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (2.24)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (2.25)$$

$$y_i = g_i + jb_i \quad (2.26)$$

Τάσεις ζυγών:

$$\tilde{V}_i = V_i e^{j\delta_i} = V_i \cos \delta_i + j V_i \sin \delta_i \quad (2.27)$$

$$\tilde{V}_j = V_j e^{j\delta_j} = V_j \cos \delta_j + j V_j \sin \delta_j \quad (2.28)$$

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2.24), (2.25), (2.27) και (2.28) στη σχέση (2.23) παίρνουμε την αναλυτική έκφραση του ρεύματος:

$$\begin{aligned}
\tilde{I}_{ij} &= V_i(\cos \delta_i + j \sin \delta_i)(g_{ij} + jb_{ij} + g_{sij} + jb_{sij}) \\
&\quad - V_j(\cos \delta_j + j \sin \delta_j)(g_{ij} + jb_{ij}) \Rightarrow \\
\tilde{I}_{ij} &= V_i(\cos \delta_i + j \sin \delta_i)((g_{ij} + g_{sij}) + j(b_{ij} + b_{sij})) \\
&\quad - V_j(\cos \delta_j + j \sin \delta_j)(g_{ij} + jb_{ij}) \Rightarrow \\
\tilde{I}_{ij} &= V_i\{(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i + j(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + j(g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i\} - \\
&\quad - V_j\{g_{ij} \cos \delta_j + jb_{ij} \cos \delta_j + jg_{ij} \sin \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j\} \Rightarrow \\
\tilde{I}_{ij} &= \{V_i[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j]\} + \\
&\quad + j\{V_i[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j]\} \quad (2.29)
\end{aligned}$$

2.3.2 Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης

Στην περίπτωση του υβριδικού εκτιμητή η εκτίμηση κατάστασης υλοποιείται με τη μέθοδο WLS λύνοντας τη γνωστή επαναληπτική εξίσωση, ακριβώς όπως και στον κλασικό εκτιμητή. Επομένως ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης είναι ο ίδιος. Δίνεται αρχικό διάνυσμα κατάστασης x^0 , που συνήθως είναι το επίπεδο διάνυσμα. Ο ορισμός του αρχικού διανύσματος δημιουργεί αριθμητικά προβλήματα, γεγονός που μας οδηγεί στη δυϊκή γραφή των ρευμάτων (σε καρτεσιανή και πολική μορφή). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι συναρτήσεις μέτρησης και τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας για τον υβριδικό εκτιμητή.

2.3.2.1 Συναρτήσεις Μέτρησης

Οι μετρήσεις στον υβριδικό εκτιμητή είναι συμβατικές από σύστημα SCADA και συγχρονισμένες από μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU). Οι συμβατικές μετρήσεις περιλαμβάνουν ροές ισχύος γραμμών και εγχύσεις ισχύος ζυγών. Οι συγχρονισμένες μετρήσεις μπορεί να είναι φασιθέτες τάσης ή ρεύματος.

Οι συναρτήσεις μέτρησης για τις ενεργές και άεργες ροές και εγχύσεις ισχύος έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο της κλασικής εκτίμησης κατάστασης. Παρακάτω γίνεται η παρουσίαση των συναρτήσεων μέτρησης μόνο για τις τάσεις και τα ρεύματα, δηλαδή μόνο για τους φασιθέτες των μονάδων PMU.

Οι συναρτήσεις μέτρησης για τους φασιθέτες τάσης είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών κατάστασης. Έτσι η συνάρτηση μέτρου τάσης ενός ζυγού είναι ίση με \tilde{V}_i και η συνάρτηση της αντίστοιχης φασικής γωνίας είναι ίση με δ_i .

Οι συναρτήσεις μέτρησης για τους φασιθέτες ρεύματος γράφονται σε καρτεσιανή και πολική μορφή.

Καρτεσιανή μορφή ρευμάτων

Με βάση τη σχέση (2.29) το ρεύμα ενός κλάδου του δικτύου έχει πραγματικό και φανταστικό μέρος με τις εξής αναλυτικές εκφράσεις:

$$\operatorname{Re}\{I_{ij}\} = V_i[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j] \quad (2.30)$$

$$\operatorname{Im}\{I_{ij}\} = V_i[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j] \quad (2.31)$$

Πολική μορφή ρευμάτων

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.30) και (2.31) υπολογίζουμε το μέτρο και τη φασική γωνία για την πολική αναπαράσταση του ρεύματος:

$$I_{ij} = \sqrt{\operatorname{Re}^2\{I_{ij}\} + \operatorname{Im}^2\{I_{ij}\}} \Rightarrow$$

$$I_{ij} = \sqrt{\left\{V_i[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j]\right\}^2 + \left\{V_i[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j]\right\}^2} \quad (2.32)$$

Η σχέση (2.32) μπορεί να απλοποιηθεί αν αναπτύξουμε την υπόρριζη ποσότητα ως εξής:

$$\begin{aligned} & \left\{V_i[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j]\right\}^2 + \\ & \left\{V_i[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i] - V_j[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j]\right\}^2 = \\ & = V_i^2 \left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] + V_j^2 (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) - \\ & - 2V_i V_j (g_{ij} + g_{sij}) \left[g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] - \\ & - 2V_i V_j (b_{ij} + b_{sij}) \left[b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] \end{aligned}$$

Θέτουμε:

$$a_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.33)$$

$$\beta_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.34)$$

Επομένως η σχέση (2.32) γίνεται:

$$I_{ij} = \sqrt{V_i^2 \left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] + V_j^2 (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) - 2V_i V_j \left[(g_{ij} + g_{sij}) a_{ij} - (b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} \right]} \Rightarrow$$

$$I_{ij} = \sqrt{V_i^2 \left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] + V_j^2 (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) + 2V_i V_j \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) a_{ij} \right]} \quad (2.35)$$

Το μέτρο του ρεύματος μπορεί να γραφεί:

$$I_{ij} = \sqrt{A_{ij}V_i^2 + B_{ij}V_j^2 + 2C_{ij}V_iV_j} \quad (2.36)$$

Όπου:

$$A_{ij} = (g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \quad (2.37)$$

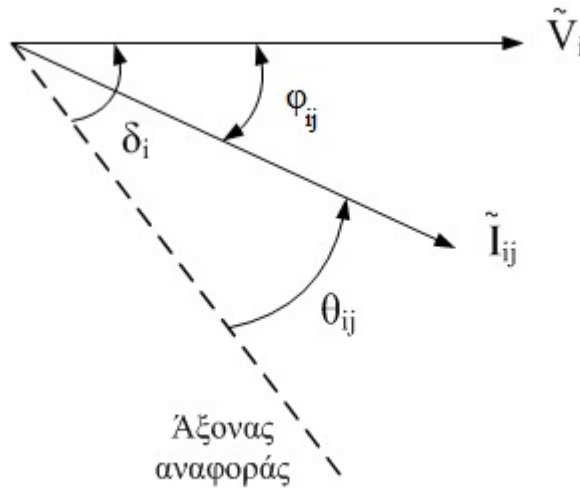
$$B_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \quad (2.38)$$

$$C_{ij} = (b_{ij} + b_{sij})\beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij})a_{ij} \quad (2.39)$$

Η φασική γωνία του ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\theta_{ij} = \arctan\left(\frac{\text{Im}\{I_{ij}\}}{\text{Re}\{I_{ij}\}}\right) \Rightarrow$$

$$\theta_{ij} = \arctan\left(\frac{V_i[(b_{ij} + b_{sij})\cos\delta_i + (g_{ij} + g_{sij})\sin\delta_i] - V_j[b_{ij}\cos\delta_j + g_{ij}\sin\delta_j]}{V_i[(g_{ij} + g_{sij})\cos\delta_i - (b_{ij} + b_{sij})\sin\delta_i] - V_j[g_{ij}\cos\delta_j - b_{ij}\sin\delta_j]}\right) \quad (2.40)$$



Σχήμα 13: Ορισμός φασικών γωνιών τάσης και ρεύματος με κοινή αναφορά

2.3.2.2 Ιακωβιανή Μήτρα

Η Ιακωβιανή μήτρα του υβριδικού εκτιμητή έχει δύο διαφορετικές διαμορφώσεις, μια για την περίπτωση όπου τα ρεύματα είναι σε καρτεσιανή μορφή και μια όπου τα ρεύματα είναι σε πολική μορφή. Στη συνέχεια παρουσιάζεται για κάθε περίπτωση η Ιακωβιανή μήτρα σε συνοπτική μορφή και δίνονται τα στοιχεία της αναλυτικά μόνο για τις μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων.

Καρτεσιανή μορφή ρευμάτων

$$H_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,re}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,re}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij,im}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij,im}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας δίνονται αναλυτικά:

Παράγωγοι μέτρων τάσης:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (2.45)$$

Παράγωγοι φασικών γωνιών τάσης:

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_i} = 1 \quad (2.46)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_i} = 0 \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial \delta_i}{\partial V_j} = 0 \quad (2.49)$$

Παράγωγοι πραγματικών μερών ρεύματος:

$$\frac{\partial I_{ij,re}}{\partial \delta_i} = -V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial I_{ij,re}}{\partial \delta_j} = V_j (b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j) \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial I_{ij,re}}{\partial V_i} = (g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial I_{ij,re}}{\partial V_j} = -g_{ij} \cos \delta_j + b_{ij} \sin \delta_j \quad (2.53)$$

Παράγωγοι φανταστικών μερών ρεύματος:

$$\frac{\partial I_{ij,im}}{\partial \delta_i} = V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial I_{ij,im}}{\partial \delta_j} = -V_j (g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j) \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial I_{ij,im}}{\partial V_i} = (b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial I_{ij,im}}{\partial V_j} = -b_{ij} \cos \delta_j - g_{ij} \sin \delta_j \quad (2.57)$$

Πολική μορφή ρευμάτων

$$H_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \frac{\partial \delta_i}{\partial \delta} & \frac{\partial \delta_i}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial I_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Για την καλύτερη παρουσίαση της Ιακωβιανής μήτρας ορίζουμε εδώ τις παρακάτω σχέσεις:

$$A_{ij} = (g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \quad (2.59)$$

$$B_{ij} = g_{ij}^2 + b_{ij}^2 \quad (2.60)$$

$$C_{ij} = (b_{ij} + b_{sij})\beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij})a_{ij} \quad (2.61)$$

$$D_{ij} = (g_{ij} + g_{sij})\beta_{ij} + (b_{ij} + b_{sij})a_{ij} \quad (2.62)$$

$$E_{ij} = A_{ij}V_i^2 + B_{ij}V_j^2 + 2C_{ij}V_iV_j \quad (2.63)$$

Στην περίπτωση αυτή τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας που διαφοροποιούνται είναι μόνο τα ρεύματα. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία παραμένουν ίδια. Τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας δίνονται αναλυτικά παρακάτω:

Παράγωγοι μέτρων ρεύματος:

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{D_{ij}V_iV_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (2.64)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{D_{ij}V_iV_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = \frac{A_{ij}V_i + C_{ij}V_j}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (2.66)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = \frac{B_{ij}V_j + C_{ij}V_i}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (2.67)$$

Παράγωγοι φασικών γωνιών ρεύματος:

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{A_{ij}V_i^2 + C_{ij}V_iV_j}{E_{ij}} \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{B_{ij}V_j^2 + C_{ij}V_iV_j}{E_{ij}} \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{D_{ij}V_j}{E_{ij}} \quad (2.70)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_j} = \frac{D_{ij}V_i}{E_{ij}} \quad (2.71)$$

Παρατηρησιμότητα Δικτύου

3.1 Εισαγωγή

Η ανάλυση της παρατηρησιμότητας αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την εκτίμηση κατάστασης ενός δικτύου σε πραγματικό χρόνο και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τις εφαρμογές πάνω στη διαχείριση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (Energy Management System - EMS). Η θεωρία για την παρατηρησιμότητα δικτύου μπορεί να χωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες μεθόδων : την αριθμητική και την τοπολογική μέθοδο. Οι τοπολογικές μέθοδοι βασίζονται στη δυνατότητα κατασκευής ενός συνδεδεμένου δέντρου (spanning tree) πλήρους βαθμού. Αντίθετα στις αριθμητικές μεθόδους για την εκτίμηση της παρατηρησιμότητας ενός δικτύου επιβάλλεται η κατάσχεση της Ιακωβιανής μήτρας και ο υπολογισμός των στοιχείων της. Για τις μεθόδους αυτές έχουν δημοσιευθεί πολλά επιστημονικά άρθρα στα οποία παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Βασικό μειονέκτημα των αριθμητικών μεθόδων είναι το ότι περιλαμβάνουν τον υπολογισμό πινάκων μεγάλων διαστάσεων και είναι υπολογιστικά χρονοβόρες. Επιπλέον η ακρίβεια της λύσης εξαρτάται σε μεγάλο από το υπολογιστικό σφάλμα.

3.2 Ορισμοί

Παρατηρήσιμο θεωρείται ένα δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αν ο αριθμός και η θέση των διαθέσιμων μετρήσεων είναι επαρκείς προκειμένου να είναι δυνατή η εκτίμηση της κατάστασής του. Η τοποθέτηση μιας μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) σε κάθε ζυγό ενός δικτύου θα μπορούσε να παρέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για τις τάσεις και τα ρεύματα όλων των ζυγών του δικτύου. Ωστόσο κάτι τέτοιο είναι όχι μόνο οικονομικά ασύμφορο, αλλά και αμφίβολης χρησιμότητας.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται κάποιοι **ορισμοί** οι οποίοι χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη για την παρατηρησιμότητα ενός δικτύου:

- Άμεσα παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός στον οποίο έχει τοποθετηθεί μονάδα PMU.
- Έμμεσα παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός στον οποίο δεν έχει τοποθετηθεί PMU, αλλά οι φασιθέτες τάσης και ρεύματος των συνδεδεμένων κλάδων μπορούν να υπολογιστούν από ένα PMU που είναι τοποθετημένο σε κάποιον άλλο ζυγό.
- Πλήρως παρατηρήσιμο χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο όταν όλοι οι ζυγοί του είναι παρατηρήσιμοι είτε άμεσα είτε έμμεσα.
- Μη παρατηρήσιμος ορίζεται ένας ζυγός του οποίου η τάση και το ρεύμα δεν μπορούν να υπολογιστούν.
- Μη παρατηρήσιμο χαρακτηρίζεται ένα δίκτυο όταν έστω και ένας ζυγός είναι μη παρατηρήσιμος.
- Βέλτιστη τοποθέτηση PMU θεωρείται μια τοποθέτηση PMU με την οποία επιτυγχάνεται πλήρης παρατηρησιμότητα του δικτύου με τον ελάχιστο αριθμό PMU.

3.3 Μοντελοποίηση Δικτύου Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας για τοποθέτηση PMU

Ένα από τα βασικά θέματα που πρέπει να σημειωθούν είναι το πώς ένα πραγματικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να αναπαρασταθεί για ένα αλγόριθμο τοποθέτησης PMU.

Για ένα αλγόριθμο τοποθέτησης PMU, οι πληροφορίες που απαιτούνται για ένα δίκτυο είναι:

- μία λίστα των ζυγών του δικτύου
- οι συνδέσεις των ζυγών ή η μήτρα πρόσπτωσης
- μία λίστα των ζυγών στους οποίους υπάρχει έγχυση ισχύος.

Οι αλγόριθμοι τοποθέτησης PMU δεν λαμβάνουν υπόψη τη φυσική τοποθεσία των ζυγών, την κατάσταση των στοιχείων του δικτύου ή τον αριθμό των μετασχηματιστών σε ένα υποσταθμό. Για αυτό το λόγο ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός, που θα κληθεί να προσδιορίσει την κατάλληλη τοποθέτηση PMU για την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, πρέπει να μετατρέψει το πραγματικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο.

Σκοπός ενός αλγορίθμου τοποθέτησης PMU δεν είναι ο υπολογισμός της ροής ισχύος μεταξύ των ζυγών. Ως εκ τούτου, ένα απλοποιημένο μοντέλο δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παρέχει στον αλγόριθμο τοποθέτησης PMU τις πληροφορίες που χρειάζεται, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί γρήγορα και εύκολα να βρει μια τοποθέτηση PMU που να καθιστά το δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο δικτύου, όπως και ένας αλγόριθμος τοποθέτησης, πρέπει να περιέχει τρία είδη στοιχείων που αναφέρθηκαν παραπάνω: τους ζυγούς του δικτύου, τις συνδέσεις των ζυγών και τις εγχύσεις στους ζυγούς. Συνδέσεις μεταξύ των ζυγών είναι οι γραμμές μεταφοράς μεταξύ των ζυγών με γνωστή σύνθετη αντίσταση, ενώ έγχυση ισχύος είναι μια μονάδα παραγωγής ισχύος ή ένα φορτίο, που μπορούν να μεταβάλλουν τη γωνία της τάσης στο συνδεδεμένο ζυγό.

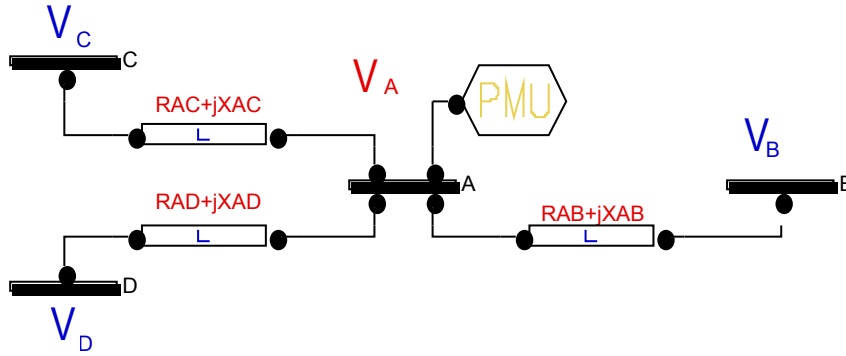
3.4 Τοπολογικός έλεγχος παρατηρησιμότητας

Στην παρούσα διπλωματική, θεωρείται ότι με την τοποθέτηση ενός PMU σε ένα ζυγό οι ακόλουθοι παράμετροι μπορούν να μετρηθούν :

- Το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού.
- Οι φασιθέτες ρεύματος όλων των κλάδων που συνδέονται με το ζυγό.

3.4.1 Πρώτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση που ο φασιθέτης τάσης ενός ζυγού είναι γνωστός και ο φασιθέτης ρεύματος ενός συνδεδεμένου κλάδου στο ζυγό αυτό είναι γνωστός, τότε ο φασιθέτης τάσης του ζυγού που βρίσκεται στο άλλο άκρο του συνδεδεμένου κλάδου μπορεί να υπολογιστεί μέσω του νόμου του Ohm. Έτσι με την τοποθέτηση PMU σε ένα ζυγό, όλοι οι φασιθέτες τάσης των γειτονικών ζυγών μπορούν να υπολογιστούν. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 14, με την τοποθέτηση PMU στο ζυγό A, η τάση στο ζυγό A, το ρεύμα I_A καθώς και τα ρεύματα των γραμμών A-B, A-C και A-D θεωρούνται γνωστά.



Σχήμα 14: Δίκτυο 4 ζυγών, με PMU στο ζυγό A

Στο Σχήμα 14 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν. Εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm στο δίκτυο του σχήματος προκύπτουν οι εξισώσεις (3.1) έως (3.3) από τις οποίες υπολογίζονται η τάση στους ζυγούς B, C και D.

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A - \vec{I}_{AB}(R_{AB} + jX_{AB}) \quad (3.1)$$

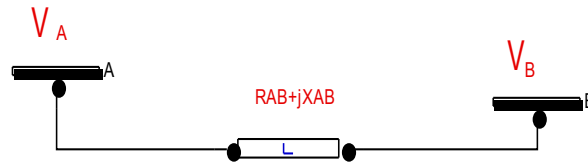
$$\vec{V}_C = \vec{V}_A - \vec{I}_{AC}(R_{AC} + jX_{AC}) \quad (3.2)$$

$$\vec{V}_D = \vec{V}_A + \vec{I}_{AD}(R_{AD} + jX_{AD}) \quad (3.3)$$

3.4.2 Δεύτερος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου σε ένα κλάδο οι φασιθέτες τάσεις των άκρων του είναι γνωστοί, τότε ο φασιθέτης ρεύματος στον κλάδο αυτό μπορεί να υπολογιστεί. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 15, το ρεύμα της γραμμής A-B μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο του Ohm ως εξής:

$$\vec{I}_{AB} = \frac{\vec{V}_A - \vec{V}_B}{(R_{AB} + jX_{AB})} \quad (3.4)$$

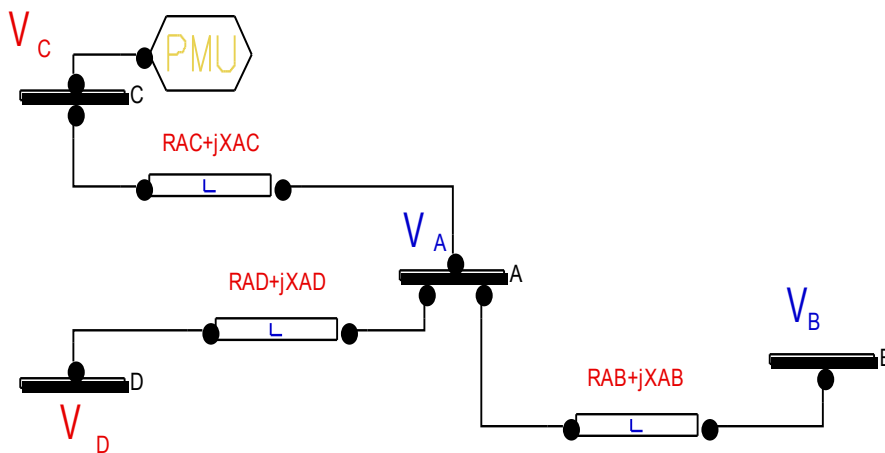


Σχήμα 15: Δύο ζυγοί συνδεδεμένοι

Στο παραπάνω σχήμα οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν.

3.4.3 Τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου ένας ζυγός μηδενικής έγχυσης είναι έμμεσα παρατηρήσιμος και το ρεύμα μόνο ενός συνδεδεμένου κλάδου είναι άγνωστο, τότε με την εφαρμογή του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff το ρεύμα στον κλάδο αυτό μπορεί να υπολογιστεί και με εφαρμογή του πρώτου κανόνα παρατηρησιμότητας μπορεί να υπολογιστεί και η τάση του ζυγού στο άλλο άκρο του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 16, θεωρώντας το ζυγό A ως ζυγό μηδενικής έγχυσης, την τάση στο ζυγό D γνωστή και τοποθέτηση PMU στο ζυγό C, μπορούν να υπολογιστούν αρχικά το ρεύμα της γραμμής D-A μέσω του νόμου του Ohm, ύστερα το ρεύμα της γραμμής A-B μέσω του νόμου ρευμάτων του Kirchhoff και τέλος η τάση του ζυγού B μέσω του νόμου του Ohm.



Σχήμα 16: Δίκτυο 4 ζυγών, με το ζυγό A ζυγό μηδενικής έγχυσης και PMU στο C

Στο παραπάνω σχήμα οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν. Για τον υπολογισμό των αγνώστων τιμών στο δίκτυο του σχήματος γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί [εξισώσεις (3.5) έως (3.8)]:

$$\vec{V}_A = \vec{V}_C + \vec{I}_{AC}(R_{AC} + jX_{AC}) \quad (3.5)$$

$$\vec{I}_{DA} = \frac{\vec{V}_D - \vec{V}_A}{(R_{AD} + jX_{AD})} \quad (3.6)$$

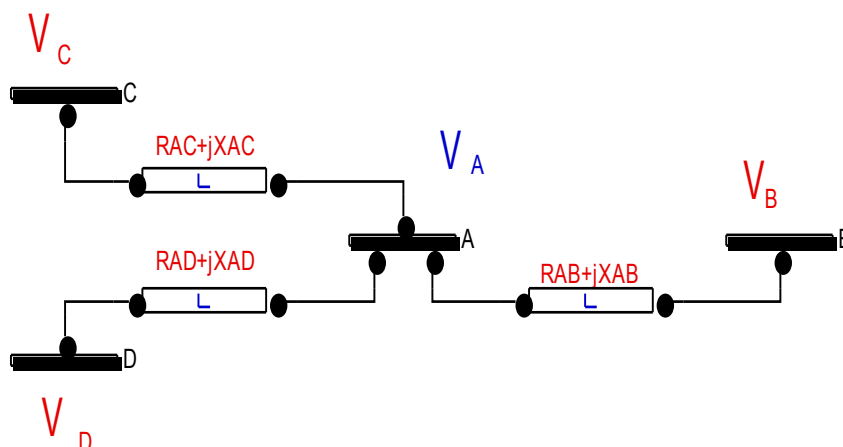
$$\vec{I}_{DA} - \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{AC} = 0 \quad (3.7)$$

$$\vec{V}_B = \vec{V}_A - \vec{I}_{AB}(R_{AB} + jX_{AB}) \quad (3.8)$$

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι σε περίπτωση όπου υπάρξει αλλαγή στην κατάσταση παρατηρησιμότητας έστω και σε ένα ζυγό του δικτύου, ο τρίτος κανόνας παρατηρησιμότητας πρέπει να εφαρμοστεί ξανά.

3.4.4 Τέταρτος κανόνας παρατηρησιμότητας

Στην περίπτωση όπου όλοι οι γειτονικοί ζυγοί ενός μη παρατηρήσιμου ζυγού μηδενικής έγχυσης είναι παρατηρήσιμοι, τότε σύμφωνα με το νόμο ρευμάτων του Kirchhoff ο ζυγός μηδενικής έγχυσης γίνεται παρατηρήσιμος. Στο δίκτυο του Σχήματος 17, αν ο ζυγός A θεωρηθεί μηδενικής έγχυσης και η τάση στου ζυγούς B,C και D γνωστή, τότε σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.9) έως (3.12) η τάση στο ζυγό A καθώς και τα ρεύματα των γραμμών A-B, A-C και A-D μπορούν να υπολογιστούν.



Σχήμα 17: Δίκτυο 4 ζυγών, με το ζυγό A ζυγό μηδενικής έγχυσης

Στο σχήμα 17 οι τιμές με κόκκινο χρώμα είναι γνωστές ενώ οι τιμές με μπλε χρώμα μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$\vec{V}_A = \vec{V}_C + \vec{I}_{AC}(R_{AC} + jX_{AC}) \quad (3.9)$$

$$\vec{V}_A = \vec{V}_B + \vec{I}_{AB}(R_{AB} + jX_{AB}) \quad (3.10)$$

$$\vec{V}_A = \vec{V}_D - \vec{I}_{DA}(R_{AD} + jX_{AD}) \quad (3.11)$$

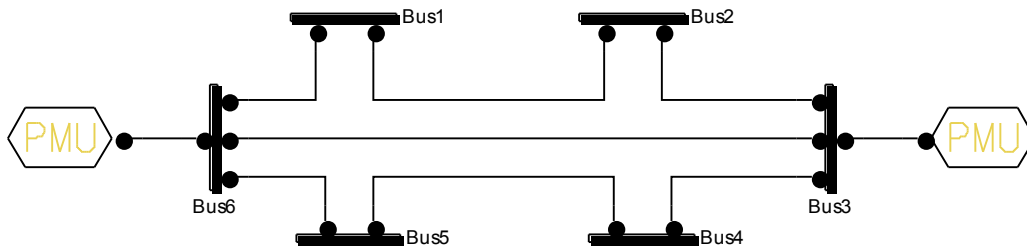
$$\vec{I}_{DA} - \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{AC} = 0 \quad (3.12)$$

3.4.5 Δείκτες Παρατηρησιμότητας

Με βάση την αναφορά [68] υιοθετούνται οι ακόλουθοι δείκτες παρατηρησιμότητας:

- **BOI (Bus Observability Index):** Η τιμή του δίνει τον αριθμό των PMUs που παρατηρούν ένα συγκεκριμένο ζυγό. Αν ισχύει $BOI = 0$ τότε ο ζυγός είναι μη παρατηρήσιμος. Αν ένας ζυγός είναι παρατηρήσιμο εξαιτίας 1 PMU τότε $BOI = 1$, αν είναι παρατηρήσιμος εξαιτίας 2 PMUs, τότε $BOI = 2$ κ.ο.κ.
- **SORI (System Observability Redundancy Index):** Δίνει το άθροισμα όλων των δεικτών BOI σε ένα δίκτυο.

Για να γίνουν πιο κατανοητές οι έννοιες αυτές θεωρούμε το δίκτυο του σχήματος 18.



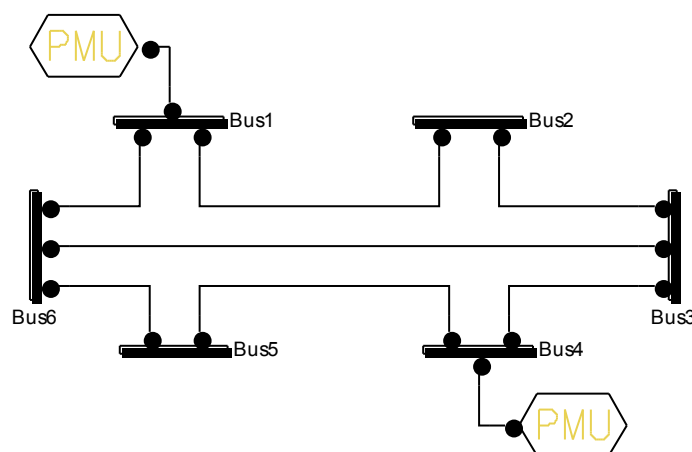
Σχήμα 18: Δίκτυο 6 ζυγών με PMUs στους ζυγούς 3 και 6

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από έξι ζυγούς και δύο PMUs τοποθετημένες στους ζυγούς 3 και 6. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό για τους δύο δείκτες εύκολα υπολογίζουμε ότι:

- $BOI = 1,1,2,1,1,2$
- $SORI = 1+1+2+1+1+2 = 8$

Σε περίπτωση απώλειας μίας PMU δύο ζυγοί του δικτύου παύουν να είναι παρατηρήσιμοι.

Έστω τώρα το ίδιο δίκτυο με τη διαφορά ότι τώρα οι PMUs είναι τοποθετημένες στους ζυγούς 1 και 4, όπως φαίνεται στο σχήμα.



Σχήμα 19: Δίκτυο 6 ζυγών με PMUs στους ζυγούς 1 και 4

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

- $BOI = 1,1,1,1,1,1$

- $SORI = 1+1+1+1+1+1 = 6$

Σε περίπτωση απώλειας μίας PMU τρεις ζυγοί του δικτύου παύουν να είναι παρατηρήσιμοι. Επομένως επιλέγουμε την πρώτη τοποθέτηση (Σχήμα 18) γιατί μας δίνει μέγιστη περίσσεια παρατηρησιμότητας.

3.5 Αριθμητικός Έλεγχος Παρατηρησιμότητας Σ.Η.Ε

3.5.1 Ιδιότητες Πινάκων

Πριν γίνει η παρουσίαση του αλγεβρικού ελέγχου παρατηρησιμότητας ενός δικτύου, αναφέρονται επιγραμματικά κάποιοι ορισμοί και κάποιες ιδιότητες της άλγεβρας πινάκων που είναι απαραίτητες για την κατανόηση αυτού του κεφαλαίου:

- Ο βαθμός ενός πίνακα A ορίζεται σαν ο μεγαλύτερος δυνατός αριθμός ανεξάρτητων στηλών του A ή ισοδύναμα γραμμικά ανεξάρτητων σειρών του A .
- Ο βαθμός του πίνακα δε μπορεί να υπερβεί την μικρότερη από τις διαστάσεις του.
- Όταν για ένα τετραγωνικό πίνακα A διαστάσεων $n \times n$ ισχύει $rank(A) = n$, τότε ο πίνακας A είναι πλήρους βαθμού.
- Για ένα τετραγωνικό πίνακα A διαστάσεων $n \times n$ πλήρους βαθμού οι παρακάτω προτάσεις είναι ισοδύναμες :

1. Υπάρχει ο αντίστροφος A^{-1} του A

2. $\det(A) \neq 0$

3. $rank(A) = n$

4. Το ομογενές σύστημα $A \cdot x = 0$ έχει μοναδική λύση την προφανή λύση $x = 0$.

- Έστω ο $n \times m$ πίνακας A , όταν $n \geq m$ και $rank(A) = m$, ο πίνακας A έχει πλήρη βαθμών στηλών.

Ιδιότητες του βαθμού

- Ο βαθμός ενός πίνακα A δεν μεταβάλλεται αν ο πίνακας πολλαπλασιαστεί με τον ανάστροφο του :

$$rank(A) = rank(A^T A) = rank(AA^T) \quad (3.13)$$

Άμεση συνέπεια της σχέσης (3.13), είναι :

- Αν ο $n \times m$ πίνακας A με $n > m$ έχει πλήρη βαθμό στηλών $rank(A) = m$, ο $m \times m$ πίνακας $A^T A$ έχει πλήρη βαθμό $rank(A^T A) = m$ και κατά συνέπεια είναι ομαλός :

$$\det(A^T A) \neq 0 \quad (3.14)$$

3.5.2 Αλγεβρικός Έλεγχος Παρατησιμότητας

Ένα ουσιώδες θέμα που τίθεται στην εκτίμηση κατάστασης είναι αν το σύνολο των μετρήσεων που λαμβάνονται καθιστούν το Σ.Η.Ε παρατηρήσιμο. Διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις :

- Λήψη συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών (PMU).
- Λήψη μετρήσεων SCADA & PMU.

Το Σ.Η.Ε που εποπτεύεται αποκλειστικά από λήψη συγχρονισμένων μετρήσεων θα είναι παρατηρήσιμο αν και μόνο αν ο αριθμός των PMUs είναι αυτός που προκρίνει ο αλγόριθμος τοποθέτησης.

Ένας από τους αλγόριθμους τοποθέτησης PMU είναι ο ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός. Ο ακέραιος προγραμματισμός εγγυάται τοπολογική παρατηρησιμότητα στην περίπτωση που το Σ.Η.Ε εποπτεύεται με λήψη συγχρονισμένων μετρήσεων PMUs. Το σύνολο των PMUs καθιστά το Σ.Η.Ε πλήρως παρατηρήσιμο καθώς ικανοποιεί τους περιορισμούς παρατηρησιμότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης. Εντούτοις, είναι πιθανόν το Σ.Η.Ε να μην είναι πλήρως παρατηρήσιμο χρησιμοποιώντας μόνο συγχρονισμένες μετρήσεις λόγω οικονομοτεχνικών περιορισμών.

Όταν το Σ.Η.Ε εποπτεύεται με λήψη μετρήσεων SCADA & PMU πρέπει να ελεγχθεί αν το σύνολο αυτών καθιστούν το Σ.Η.Ε πλήρως παρατηρήσιμο. Για τον έλεγχο της παρατηρησιμότητας υιοθετείται η γραμμική εκτίμηση.

3.5.2.1 Γραμμική Εκτίμηση

Θεωρείται ένα σύστημα στο οποίο λαμβάνεται ένα διάνυσμα z αποτελούμενο από m , στον αριθμό μετρήσεις. Οι μεταβλητές κατάστασης αναπαριστώνται από ένα διάνυσμα x . Οι εξισώσεις παρατήρησης δίνονται στην ακόλουθη μορφή :

$$\underline{z} = H\underline{x} + \underline{r} \quad (3.15)$$

όπου :

- \underline{z} : διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τις μετρούμενες ποσότητες, διάστασης m
- \underline{r} : διάνυσμα που αντιπροσωπεύει το θόρυβο των μετρήσεων
- \underline{x} : διάνυσμα που αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές κατάστασης, διαστάσεως n
- H : μήτρα διαστάσεων $m \cdot n$, θεωρείται γνωστή μήτρα.

Ο αριθμός των μετρήσεων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των μεταβλητών κατάστασης ($m > n$).

Ορίζεται το σφάλμα :

$$\underline{r} = \underline{z} - H\underline{x} \quad (3.16)$$

Ζητείται να ευρεθεί η εκτίμηση x που ελαχιστοποιεί το σφάλμα. Χρησιμοποιείται η θεωρία ελαχίστων τετραγώνων.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων εκφράζεται ως εξής :

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^n r_i^2 = r^T r = (z - Hx)^T (z - Hx) \quad (3.17)$$

$$J(x) : R^n \rightarrow R \quad (3.18)$$

Η εκτίμηση \hat{x} που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $J(x)$ ονομάζεται εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων.

Εφαρμόζουμε τις συνθήκες βέλτιστου πρώτης τάξης :

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial J(x)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial J(x)}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial J(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [zz^T - z^T Hx - x^T H^T z + x^T H^T Hx] = 0 \quad (3.20)$$

όπου

- $z^T Hx$: βαθμωτό μέγεθος
- $z^T Hx = (z^T Hx)^T = x^T H^T z$

Θα θεωρήσουμε τις ταυτότητες:

$$\nabla(x^T A) = A \quad (3.21)$$

$$\nabla(x^T Ax) = (A + A^T)x \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (zz^T) - 2 \frac{\partial}{\partial x} (x^T H^T z) + \frac{\partial}{\partial x} (x^T H^T Hx) = 0 \rightarrow \\ -2H^T z + 2H^T H \hat{x} = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$(H^T H) \hat{x} = H^T z \rightarrow \hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (3.24)$$

Τα παραπάνω ισχύουν αν και μόνο αν η μήτρα $H^T H$ είναι αντιστρέψιμη.

Ικανή συνθήκη για να αποκτηθεί μοναδική λύση \hat{x} είναι ο βαθμός της μήτρας H να είναι n . Γενικά, η μήτρα H δεν είναι τετραγωνική. Ο βαθμός της μήτρας H ευρίσκεται από την σχέση :

$$\text{rank}(H^T H) = \text{rank}(H) = n \quad (3.25)$$

Η εύρεση του βαθμού της μήτρας H μπορεί να γίνει με την ανάλυση σε παράγοντες L & U (factorization L & U).

$$H^T H = LU \quad (3.26)$$

όπου :

- L : κάτω τριγωνικός πίνακας
- U : άνω τριγωνικός πίνακας

Σημειώνεται ότι :

$$\det(H^T H) = \det(L) \det(U) = \prod_i l_{ii} \prod_i u_{ii} \quad (3.27)$$

όπου :

- \prod : συμβολίζει το γινόμενο
- l_{ii} : i στοιχείο της κυρίας διαγωνίου της κάτω τριγωνικής μήτρας
- u_{ii} : i στοιχείο της κυρίας διαγωνίου της άνω τριγωνικής μήτρας

Η μήτρα $H^T H$ είναι πλήρους βαθμού αν και μόνο αν τα στοιχεία της κυρίας διαγωνίου των μητρώων L και U είναι μη μηδενικά .

3.5.2.2 Στάθμιση ελαχίστων τετραγώνων

Μια παραλλαγή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων είναι η μέθοδος σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων. Σε αυτή τη μέθοδο χρησιμοποιούνται διαφορετική βάρη στις μετρήσεις, ανάλογα με την ακρίβειά τους.

$$\min J(\underline{x}) = (\underline{z} - H\underline{x})^T W (\underline{z} - H\underline{x}) \quad (3.28)$$

Όπου:

$$\text{▪ } W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & \vdots & \vdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & w_n \end{bmatrix}$$

- w : βάρος του υπολοίπου r_i

Έτσι προκύπτει ο εκτιμητής κατάστασης:

$$\hat{\underline{x}} = (H^T W H)^{-1} H^T W \underline{z} \quad (3.29)$$

Για την διαμόρφωση του γραμμικού πρότυπου υιοθετούνται οι παρακάτω παραδοχές:

- Ο έλεγχος της παρατηρησιμότητας είναι ανεξάρτητος τόσο από τις παραμέτρους των γραμμών μεταφοράς όσο και από την κατάσταση λειτουργίας του Σ.Η.Ε
- Το Σ.Η.Ε θεωρείται ότι λειτουργεί στην μόνιμη συμμετρική κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία, οι ροές ισχύος, οι γραμμές μεταφοράς και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες του δικτύου θα είναι τριφασικά και συμμετρικά.

Τα μοντέλα στοιχείων που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση του δικτύου έχουν περιγραφεί στο κεφάλαιο του υβριδικού εκτιμητή κατάστασης.

Ταξινόμηση μεθόδων για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας με χρήση PMU

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια ταξινόμησης των διαφορετικών μεθόδων τοποθέτησης PMU σε ένα δίκτυο Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, προκειμένου το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία οι μέθοδοι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες:

1. Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού
2. Ακριβείς Αλγόριθμοι
3. Ευριστικές Μέθοδοι
4. Μεταευριστικές Μέθοδοι

4.2 Μέθοδοι Μαθηματικού Προγραμματισμού

4.2.1 Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος βελτιστοποίησης ενός προβλήματος το οποίο υπόκειται σε περιορισμούς. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να εκφραστεί σε κανονική μορφή ως εξής:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= c^T x \\ \text{s.t. } Ax &\leq b \end{aligned} \quad (4.1)$$

όπου x : διάνυσμα μεταβλητών απόφασης

f : αντικειμενική συνάρτηση

b, c : διανύσματα συντελεστών της f (θεωρούνται σταθερά και γνωστά)

A : μήτρα συντελεστών

Ο γραμμικός προγραμματισμός στον οποίο όλες οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν ακέραιες τιμές ονομάζεται ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός.

4.2.2 Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο μη γραμμικός προγραμματισμός διαφέρει από τον γραμμικό στο ότι οι συνθήκες που εκφράζουν τους περιορισμούς είναι μη γραμμικές. Στην περίπτωση που όλες οι μεταβλητές παίρνουν μόνο ακέραιες τιμές, τότε η μέθοδος ονομάζεται Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός [13]-[14].

4.2.3 Ακέραιος Τετραγωνικός Προγραμματισμός

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός ασχολείται με τη βελτιστοποίηση μιας τετραγωνικής αντικειμενικής συνάρτησης, της οποίας οι περιορισμοί είναι γραμμικής μορφής:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= \frac{1}{2} x^T Q x + c^T x \\ \text{s.t. } A x &\leq b, \quad E x = d \end{aligned} \quad (4.2)$$

όπου x : διάνυσμα μεταβλητών απόφασης
 f : αντικειμενική συνάρτηση
 b, c, d : διανύσματα συντελεστών της f
 A, E : μήτρα συντελεστών

Η μήτρα Q είναι συμμετρική. Υποθέτοντας ότι η Q είναι θετικά ημικαθορισμένη, η αντίστοιχη αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$ είναι κυρτή. Αν η μήτρα Q είναι μηδενική το πρόβλημα γίνεται γραμμικό. Τέλος, στον Ακέραιο Τετραγωνικό Προγραμματισμό όλες οι μεταβλητές παίρνουν ακέραιες τιμές. [7]-[9]

4.2.4 Καταχρηστικός Αλγόριθμος

Καταχρηστικός ονομάζεται οποιοσδήποτε αλγόριθμος λύνει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ακολουθώντας τον εξής τρόπο σκέψης:
« Κάθε βήμα του γενικού προβλήματος λύνεται με τον φαινομενικά βέλτιστο τρόπο εκείνη τη χρονική στιγμή».

Στην ουσία ο καταχρηστικός αλγόριθμος κάνει διαδοχικές καταχρηστικές επιλογές, ελαττώνοντας σε κάθε βήμα την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Ο τρόπος αυτός επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης εξάγει σωστά αποτελέσματα σε ορισμένα μαθηματικά προβλήματα. Ωστόσο σε πολλά άλλα αποτυγχάνει να υπολογίσει τη βέλτιστη λύση γιατί δεν αναθεωρεί ποτέ τις επιμέρους επιλογές του. [10]-[12].

4.3 Ακριβείς αλγόριθμοι

4.3.1 Αλγόριθμος Branch and Bound

Ο αλγόριθμος διακλάδωσης και φραγμού επιλύει προβλήματα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.
Θεωρείται το πρόβλημα (Papadimitriou & Steiglitz 1982) [4]

$$\begin{aligned} \min Z &= c^T x \\ \text{s.t. : } A x &\leq b \\ x_j &\geq 0 \text{ και ακέραιοι.} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Επιλύοντας το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς ακεραιότητας λαμβάνεται η λύση x^0 η οποία δεν είναι γενικά ακέραια. Η ποσότητα $Z(x^0)$ αποτελεί ένα κάτω όριο της βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Θεωρείται το μη ακέραιο στοιχείο x_i^0 του διανύσματος x^0 . Το αρχικό πρόβλημα διακλαδίζεται σε δύο υποπροβλήματα με εισαγωγή συμπληρωματικών περιορισμών.

Υποπρόβλημα 1:

$$\begin{aligned}
\min Z &= c^T x \\
s.t. : Ax &\leq b \\
x_i &\leq [x_i^0] \\
x_j &\geq 0 \text{ και ακέραιοι.}
\end{aligned}
\tag{4.4}$$

Υποπρόβλημα 2:

$$\begin{aligned}
\min Z &= c^T x \\
s.t. : Ax &\leq b \\
x_i &\geq [x_i^0] + 1 \\
x_j &\geq 0 \text{ και ακέραιοι.}
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

Οι περιορισμοί $x_i \leq [x_i^0]$ και $x_i \geq [x_i^0] + 1$ είναι αλληλοαποκλειόμενοι για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός ακεραιότητας της μεταβλητής x_i με την ρητή τιμή. Με διαδοχικές διαμερίσεις κάθε προβλήματος δημιουργείται ένα είδος δέντρου. Κάθε κόμβος του δέντρου αυτού αντιπροσωπεύει ένα υποπρόβλημα στο οποίο αντιστοιχεί μια χαλαρή λύση (relaxed solution) x_i και ένα κατώτατο όριο της αντικειμενικής συνάρτησης.

Για κάθε υποσύνολο λύσεων, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της βέλτιστης μη ακέραιης λύσης ορίζεται ως το **άνω φράγμα**. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της καλύτερης μέχρι τώρα ακέραιης λύσης ορίζεται ως **κάτω φράγμα**. Εκείνα τα υποσύνολα των οποίων τα άνω φράγματα είναι κατώτερα από το ισχύον κάτω φράγμα δεν εξετάζονται για περαιτέρω διακλάδωση. Εάν υπάρχει πραγματοποιήσιμη ακέραιη λύση με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης ίση ή μεγαλύτερη του άνω φράγματος κάθε υποσυνόλου, η λύση αυτή αποτελεί τη βέλτιστη λύση του ακέραιου Γ.Π. Εάν όχι, επιλέγεται ένα υποσύνολο με το καλύτερο άνω φράγμα για περαιτέρω διακλάδωση.

Εάν το αρχικό πρόβλημα ΓΑΠ έχει πεπερασμένη δυνατή λύση το δένδρο δεν μπορεί να επεκταθεί απεριόριστα, εφόσον η διαδοχική εισαγωγή ακεραίων περιορισμών οδηγεί σε βέλτιστη ακέραια λύση [16].

Η δημιουργία νέου κλάδου σε κάποιο κόμβο μπορεί να διακοπεί εάν:

- η λύση του προβλήματος ΓΠ είναι ακέραια (integer node)
- η λύση του προβλήματος ΓΠ είναι μη επιτρεπτή (empty node)
- η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μεγαλύτερη από το τρέχον κατώτατο όριο (fathomed node).

Τα βήματα του αλγορίθμου περιγράφονται συνοπτικά στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2: Βήματα του αλγορίθμου Branch and Bound

Αρχικό βήμα: Θεωρείται ένα αρχικό σύνολο το οποίο περιλαμβάνει όλες τις δυνατές λύσεις. Τίθεται άνω όριο $Z_u = \infty$.

Βήμα κλάδου (branch step): Χρησιμοποιώντας έναν κανόνα κλάδου (branch rule), επιλέγεται ένα από τα εναπομείναντα σύνολα (remaining subset) και διαχωρίζεται σε δύο ή περισσότερα υποσύνολα δυνατών λύσεων.

Βήμα ορίου (bound step): Για κάθε νέο σύνολο δυνατών λύσεων λαμβάνεται ένα κατώτερο όριο Z_L της τιμής της ΑΣ.

Βήμα παύσης (fathoming step): Δε γίνεται περαιτέρω διερεύνηση εφόσον ισχύει ένα εκ των:

1. $Z_L \geq Z_u$
2. Περιέχονται μη δυνατές λύσεις
3. Εντοπίστηκε η βέλτιστη λύση του συνόλου, δηλαδή το κατώτατο όριο Z_L αντιστοιχεί στην τιμή της ΑΣ. Εάν $Z_L < Z_u$ τίθεται $Z_L = Z_u$, η λύση θεωρείται επιβεβλημένη (incumbent solution) και συνεχίζεται η διερεύνηση σε άλλα σύνολα.

Κανόνας διακοπής: Ο αλγόριθμος διακόπτεται όταν δεν υπάρχει περιοχή που να μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω (όλες οι λύσεις είναι τύπου fathomed) και η τρέχουσα επιβεβλημένη λύση είναι η βέλτιστη. Διαφορετικά επαναλαμβάνεται το βήμα κλάδου.

4.3.2 Αλγόριθμος Branch and cut

Θεωρούμε το ακόλουθο πρόβλημα μικτού ακεραίου γραμμικού προγραμματισμού:

$$\begin{aligned} \min Z &= c^T x \\ \text{s.t.} : Ax &\leq b \\ x_i &\geq 0 \text{ και ακέραιοι, } i=1, \dots, p \end{aligned} \quad (4.6)$$

όπου x : διανύσματα διάστασης n
 f : αντικειμενική συνάρτηση
 b : διανύσμα διάστασης m
 A : μήτρα διάστασης $m \times n$

Οι πρώτες p μεταβλητές παίρνουν υποχρεωτικά μόνο ακέραιες τιμές, ενώ οι υπόλοιπες μπορεί να είναι κλασματικές. Αν ισχύει η σχέση $p = n$ τότε πρόκειται για ένα πρόβλημα

ακεραίου προγραμματισμού. Επίσης αν μία μεταβλητή παίρνει υποχρεωτικά μόνο τις τιμές 0 ή 1 τότε είναι μια δυαδική μεταβλητή. Τέλος αν όλες οι μεταβλητές είναι δυαδικές τότε το πρόβλημα είναι ένα δυαδικό πρόγραμμα.

Ο αλγόριθμος branch and cut περιγράφεται στα ακόλουθα βήματα. Πριν παραθέσουμε τα βήματα σημειώνουμε ότι το L ορίζεται ως το σύνολο των ενεργών κόμβων στο δέντρο branch and cut. Η τιμή του βέλτιστου εφικτού σημείου για το (ILP) είναι \bar{z} και παρέχει ένα άνω φράγμα για τη βέλτιστη τιμή του (ILP) . Επιπλέον το \underline{z}_l είναι ένα κάτω φράγμα για τη βέλτιστη τιμή του υποπροβλήματος που εξετάζεται. Η τιμή της χαλαρής λύσης του υποπροβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δώσει νέα τιμή στο \underline{z}_l .

Πίνακας 3: Βήματα αλγόριθμου branch and cut

1. **Αρχικοποίηση:** Δηλώνουμε το αρχικό πρόβλημα ακεραίου προγραμματισμού ως ILP^0 και θέτουμε τους ενεργούς κόμβους ίσους με $L = \{ILP^0\}$. Επίσης θέτουμε το άνω όριο ίσο με $\bar{z} = +\infty$. Τέλος θέτουμε $\underline{z}_l = -\infty$, για κάθε πρόβλημα για το οποίο ισχύει $l \in L$.

2. **Τερματισμός:** Αν $L = \emptyset$, τότε η λύση x^* , η οποία απέδωσε την αντικειμενική τιμή \bar{z} , είναι βέλτιστη. Αν δεν υπάρχει τέτοια λύση x^* , για παράδειγμα αν $\bar{z} = +\infty$, τότε ο ILP δεν είναι εφικτό να εφαρμοστεί.

3. **Επιλογή Προβλήματος:** Επιλεγούμε ένα πρόβλημα ILP^l από το σύνολο L .

4. **Εύρεση Χαλαρής Λύσης:** Βρίσκουμε μια χαλαρή λύση του ILP^l . Αν η εύρεση χαλαρής λύσης δεν είναι εφικτή, τότε θέτουμε $\bar{z} = +\infty$ και πηγαίνουμε στο βήμα 6. Ορίζουμε την \underline{z}_l έτσι ώστε να υποδηλώνει μια βέλτιστη αντικειμενική τιμή της χαλαρής λύσης, αν είναι πεπερασμένη, και τη x^{LR} έτσι ώστε να είναι μια βέλτιστη λύση. Αλλιώς θέτουμε $\underline{z}_l = -\infty$.

5. **Πρόσθεση των cutting planes:** Αν είναι επιθυμητό, ψάχνουμε για cutting planes τα οποία μπορεί να παραβιάζονται από την x^{LR} . Αν βρεθούν τα προσθέτουμε στη χαλαρή λύση και επιστρέφουμε στο βήμα 4.

6. **Βολιδοσκόπηση και «κλάδεμα»:**

A) Αν $\underline{z}_l \geq \bar{z}$ πηγαίνουμε στο βήμα 2.

B) Αν $\underline{z}_l < \bar{z}$ και η x^{LR} είναι ολοκληρωτικά εφικτή, θέτουμε $\bar{z} = \underline{z}_l$, διαγράφουμε από το L όλα τα προβλήματα για τα οποία ισχύει $\underline{z}_l \geq \bar{z}$ και πηγαίνουμε στο βήμα 2.

7. **Διαμερισμός:** Ορίζουμε το $\{S^{lj}\}_{j=1}^{j=k}$ έτσι ώστε να είναι ένας διαμερισμός του συνόλου περιορισμών S^l του προβλήματος ILP^l . Προσθέτουμε τα προβλήματα $\{ILP^{lj}\}_{j=1}^{j=k}$ στο L , όπου το ILP^{lj} είναι το ILP^l με την περιοχή εφικτών λύσεων περιορισμένη στο S^{lj} , και θέτουμε \underline{z}_{lj} (με $j=1, \dots, k$) ίσο με την τιμή του \underline{z}_l στο αρχικό πρόβλημα l . Πηγαίνουμε στο βήμα 2.

Σε μερικές περιπτώσεις, ένας πολύ μεγάλος αριθμός cutting planes παραβιάζονται στο βήμα 5. Σε αυτή την περίπτωση συχνά τα cutting planes ταξινομούνται με κάποιο τρόπο και προστίθεται μόνο ένα αποδεκτό υποσύνολο από αυτά. Τα υποπροβλήματα που σχηματίζονται στο βήμα 7 καλούνται «child subproblems» και το προηγούμενο ILP^l πρόβλημα θεωρείται ο «γονέας» τους. Συνήθως ο διαμερισμός παίρνει τη μορφή μιας πρότασης με δύο σκέλη, της οποίας κάθε σκέλος ικανοποιείται μόνο όταν ισχύει μια από τις δύο υποθέσεις: $x_i \leq a$ ή $x_i \geq a + 1$, για κάποια μεταβλητή x_i και κάποιον ακέραιο a .

Η χαλαρή λύση μπορεί να βρεθεί χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού. Τυπικά, η χαλαρή λύση βρίσκεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο simplex [6].

Αν η αντικειμενική συνάρτηση και/ή οι περιορισμοί στο (ILP) είναι μη γραμμικά, το πρόβλημα μπορεί και πάλι να αντιμετωπιστεί με μια προσέγγιση branch and cut.

4.3.3 Exhaustive Search

Η μέθοδος αυτή αποτελεί ένα γενικό τρόπο επίλυσης, ο οποίος εξετάζει όλες τις πιθανές λύσεις για το κάθε πρόβλημα. Ωστόσο ο αλγόριθμος αυτός έχει αρκετά χαμηλή απόδοση, ιδιαίτερα όσο αυξάνει το εύρος αναζήτησης [15].

4.3.4 Δυναμικός Προγραμματισμός

Ο δυναμικός προγραμματισμός είναι μία μέθοδος επίλυσης κατά την οποία το γενικότερο προς επίλυση πρόβλημα αναλύεται σε μικρότερα υποπροβλήματα. Η λύση του προβλήματος προσδιορίζεται από την επίλυση των επιμέρους υποπροβλημάτων [17]-[18].

4.4 Ευριστικές Μέθοδοι

4.4.1 Depth First Search (DeFS)

Στη μέθοδο βάθους πρώτης αναζήτησης (DeFS) η αναζήτηση ξεκινά από μία αρχική κορυφή και στη συνέχεια αναζητούνται όλες οι γειτονικές κορυφές οι οποίες είναι προσβάσιμες από την κορυφή αυτή. Η βασική ιδέα στηρίζεται στη μεθοδική αξιοποίηση κάθε άκρου, ξεκινώντας κάθε φορά από διαφορετικές κορυφές. Πιο συγκεκριμένα, κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου διασχίζεται ένα συνδεδεμένο στοιχείο ενός δεδομένου γράφου και ορίζεται ένα συνδεδεμένο δέντρο. Κάθε φορά που ο αλγόριθμος βρίσκει μια κορυφή, ξεκινά την αναζήτηση από την κορυφή αυτή. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο κριτήριο του βάθους και δεν είναι επαναληπτική. Ο αλγόριθμος αυτός είναι υπολογιστικά αποδοτικός, αλλά η λύση που επιστρέφει δεν είναι βέλτιστη [19]-[20].

4.4.2 Minimum Spanning Tree (MST)

Πρόκειται για έναν αλγόριθμο ο οποίος καθορίζεται από έναν σταθμισμένο γράφο το υποδέντρο εκείνο με το ελάχιστο βάρος, που περιέχει όλες τις κορυφές του γράφου. Ο χρόνος εκτέλεσης αυτού του αλγορίθμου είναι μικρότερος και βελτιώνει το μειονέκτημα της ανεπαρκούς σύγκλισης του αλγορίθμου DeFS. Ο αλγόριθμος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί επανειλημμένα στην υλοποίηση δικτύων 14 και 30 ζυγών της IEEE καθώς και σε πραγματικά δίκτυα διανομής στην Κίνα [21].

4.4.3 Recursive Security N Algorithm

Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί μια τροποποιημένη προσέγγιση της μεθόδου DeFS, που περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, επαναλαμβανόμενη πολλές φορές, χρησιμοποιώντας σαν αρχικό σημείο ένα διαφορετικό ζυγό κάθε φορά. Η μέθοδος αυτή είναι ένας αλγόριθμος αναζητήσεων σε συνδεδεμένα δέντρα, όπου κάθε αναζήτηση οδηγεί σε διαφορετική λύση. Πιο συγκεκριμένα, για ένα δίκτυο ο αλγόριθμος υπολογίζει τα ελάχιστα συνδεδεμένα δέντρα του δικτύου, χρησιμοποιώντας σαν αρχικό σημείο ένα διαφορετικό ζυγό του δικτύου. Μέσω των διαδοχικών αναζητήσεων προσπαθεί να εντοπίσει το ελάχιστο υποδέντρο και επομένως το βέλτιστο σύνολο PMU, το οποίο εξασφαλίζει πλήρη παρατηρησιμότητα [22]-[23].

4.4.4 Δέντρα αποφάσεων

Δέντρο απόφασης καλείται ένα δέντρο, του οποίου κάθε κόμβος αναπαριστά μια επιλογή ανάμεσα σε έναν αριθμό από εναλλακτικές, ενώ τα φύλλα του αναπαριστούν μια ταξινόμηση ή μια απόφαση [24]-[25].

4.4.5 Δέντρα αναζήτησης

Τα δέντρα αναζήτησης ακολουθούν παρόμοια βήματα με τα δέντρα αποφάσεων. Ειδικότερα, τα δέντρα αναζήτησης αναζητούν τη βέλτιστη λύση σε ένα δεδομένο πρόβλημα, αποφεύγοντας βρόχους οι οποίοι μπορεί να οδηγήσουν σε διαστρέβλωση των αποτελεσμάτων [26].

4.4.6 Πρακτικοί ευριστικοί αλγόριθμοι

Οι αλγόριθμοι αυτοί αποτελούν μια ομάδα μεθόδων, οι οποίες είναι εξειδικευμένες για το εκάστοτε πρόβλημα και σε καμία περίπτωση δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση διαφορετικών προβλημάτων. Συνήθως στερούνται μεγάλου επιστημονικού υποβάθρου και η μεθοδολογία τους απορρέει από τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε προβλήματος [27]-[36].

4.5 Μεταευριστικές μέθοδοι

4.5.1 Γενετικοί αλγόριθμοι (GA)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν σε έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων ενός δοθέντος προβλήματος και οι οποίες είναι συνήθως κωδικοποιημένες σαν δυαδικές σειρές καθορισμένου μήκους. Ύστερα από τον τυχαίο ή τον ευριστικό καθορισμό του αρχικού πληθυσμού, ο αλγόριθμος εξελίσσει τον πληθυσμό μέσω διαδοχικών επιλογών, διασταυρώσεων και μεταλλάξεων. Ένας νέος πληθυσμός σχηματίζεται στο τέλος κάθε επανάληψης. Περισσότερες πληροφορίες για τον γενετικό αλγόριθμο παρατίθενται στο κεφάλαιο 7.4 [37]-[41].

4.5.2 Tabu Search (TS)

Η μέθοδος Tabu Search (TS) πραγματοποιεί μια σειρά αλλαγών με στόχο την εύρεση βέλτιστων λύσεων ή ένα πλήθος μη βέλτιστων λύσεων. Πρόκειται για μια συνδυαστική τεχνική τοπικής αναζήτησης. [42]-[43]. Η Tabu Search λύνει προβλήματα, τα οποία διατυπώνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t. } x \in X \end{aligned} \quad (4.7)$$

Όπου:

- x : μεταβλητές απόφασης
- f : αντικειμενική συνάρτηση
- X : εύρος αναζήτησης

4.5.3 Simulated Annealing

Η μέθοδος της προσομοιωμένης απόπτωσης είναι μία από τις πιο ευέλικτες μεθόδους που υπάρχουν για την επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων. Η λογική της λειτουργίας του στηρίζεται στην εύρεση λύσεων, δοκιμάζοντας τυχαίες παραλλαγές μιας γνωστής λύσης και αποτελείται από δύο μηχανισμούς: τη δημιουργία εναλλακτικών λύσεων και έναν κανόνα αποδοχής. Η αντίστοιχη πιθανότητα κάθε υποψήφιας λύσης υπολογίζεται με βάση το παρακάτω κριτήριο:

$$P_T \left\{ \text{Accept } S_j \right\} = \begin{cases} 1 & \text{if } f(S_j) \leq f(S_i) \\ \exp\left(\frac{f(S_i) - f(S_j)}{T_k}\right) & \text{if } f(S_j) > f(S_i) \end{cases} \quad (4.8)$$

όπου :

- S_i : παρούσα κατάσταση με κόστος $f(S_i)$
- S_j : «γειτονική» λύση που υπολογίζεται από το μηχανισμό εύρεσης λύσεων με κόστος $f(S_j)$
- T_k : παράμετρος ελέγχου

Η στρατηγική ελέγχου μοντελοποιείται με ένα χρονοδιάγραμμα ψύξης και χρησιμοποιείται από την αρχή του αλγορίθμου μέχρι και τη σύγκλιση του. Χαρακτηρίζεται από μια αρχική θερμοκρασία T_0 , την τελική θερμοκρασία T_f , η οποία είναι και το κριτήριο σύγκλισης, τον αριθμό των μεταβάσεων, N_k , σε θερμοκρασία T_k και τον ρυθμό μεταβολής θερμοκρασίας που δίνεται από τη σχέση: $T_{k+1} = g(T_k) T_k$, όπου g η συνάρτηση ελέγχου της θερμοκρασίας. Η μέθοδος αυτή είναι από τις πιο δημοφιλείς μεταευσριστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης τοποθέτησης των PMU [44]-[49].

4.5.4 Διαφορική Εξέλιξη

Η διαφορική εξέλιξη είναι μια μέθοδος εκτίμησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ελαχιστοποίηση γραμμικών και μη διαφορίσιμων συναρτήσεων συνεχούς χρόνου με πραγματικές τιμές. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τα τυχαία δειγματοληπτούμενα ζεύγη

διαφορών των αντικειμενικών διανυσμάτων για την καθοδήγηση της διαδικασίας μετάλλαξης, αντί των συναρτήσεων κατανομής πιθανοτήτων [50]-[51].

4.5.5 Particle Swarm Optimization (PSO)

Η βελτιστοποίηση ευφυΐας σμηνών είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης στην οποία τα σωματίδια ή πράκτορες που απαρτίζουν έναν πληθυσμό, αλλάζουν θέση με το χρόνο. Τα σωματίδια αυτά «πετούν» σε ένα πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης. Κατά τη διάρκεια της πτήσης, κάθε σωματίδιο ρυθμίζει τη θέση του σύμφωνα με τη δική του εμπειρία και την εμπειρία των γειτονικών σωματιδίων, κάνοντας χρήση της καλύτερης θέσης που συνάντησε είτε το ίδιο το σωματίδιο είτε κάποιο γειτονικό του. Η κατεύθυνση σμήνους ενός σωματιδίου καθορίζεται από το σύνολο των σωματιδίων που συνορεύουν με αυτόν και την εμπειρία του [52]-[53].

Η δυσδιάστατη ταχύτητα του κάθε σωματιδίου μπορεί να τροποποιηθεί από την ακόλουθη εξίσωση:

$$v_i^{k+1} = w \cdot v_i^k + c_1 \text{rand}_1(pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand}_2(gbest - s_i^k) \quad (4.9)$$

όπου:

- v_i^{k+1} : ταχύτητα του σωματιδίου i κατά την επανάληψη k
- w : συνάρτηση στάθμισης
- c_j : συντελεστές στάθμισης, $j=1,2$
- rand_j : τυχαίοι αριθμοί μεταξύ 0 και 1, $j=1,2$
- s_i^k : παρούσα θέση του σωματιδίου i κατά την επανάληψη k
- $pbest_i$: η καλύτερη τιμή του σωματιδίου i
- $gbest$: η καλύτερη τιμή στο σύνολο των καλύτερων τιμών

4.5.6 Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών

Η βελτιστοποίηση με αποικίας μυρμηγκιών είναι εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών κατά την αναζήτηση τροφής. Ένα σύνολο τεχνητών μυρμηγκιών συνεργάζονται για να βρουν τη λύση σε ένα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με την αλλαγή των πληροφοριών μέσω φερομονών που βρίσκονται στα τεχνητά μονοπάτια. Ο μηχανισμός της προσαρμογής της επίδρασης του συντελεστή φερομόνης και των στοχαστικών διαταραχών, βελτιώνει την ικανότητα του αλγορίθμου να αποφεύγει συμπεριφορές στασιμότητας και κατά συνέπεια να βελτιώνει το χρόνο σύγκλισης [54]-[55].

4.5.7 Βακτηριακός Αλγόριθμος Αναζήτησης Τροφής(BFA)

Ο βακτηριακός αλγόριθμος αναζήτησης τροφής αποτελεί έναν πρωτότυπο εξελικτικό αλγόριθμο υπολογισμού, ο οποίος βασίζεται στη συμπεριφορά αναζήτησης τροφής των βακτηρίων [56].

4.5.8 Ανοσοποιητικός αλγόριθμος

Ο ανοσοποιητικός αλγόριθμος είναι μια στρατηγική αναζήτησης με βάση τις αρχές των γενετικών αλγορίθμων και εμπνέεται από τους μηχανισμούς προστασίας των έμβιων οργανισμών ενάντια σε βακτηρίδια και ιούς [57].

4.5.9 Επαναλαμβανόμενη Τοπική Αναζήτηση

Ο αλγόριθμος της επαναλαμβανόμενης τοπικής αναζήτησης δειγματοληπτεί στην ευρύτερη περιοχή των υποψηφίων λύσεων και χρησιμοποιεί μια τοπική τεχνική αναζήτησης για να βελτιώσει τις λύσεις στα τοπικά βέλτιστά τους. Επίσης διερευνά μια σειρά από λύσεις που αποτελούν διαταραχές της τρέχουσας βέλτιστης λύσης, τα αποτελέσματα της οποίας εκκαθαρίζονται χρησιμοποιώντας άλλες ενσωματωμένες ευριστικές μεθόδους [58].

Διατύπωση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τη μέθοδο του Ακεραίου Προγραμματισμού

5.1 Δίκτυο χωρίς συμβατικές μετρήσεις

Το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου αριθμού των PMUs ώστε το ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος να είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU χρησιμοποιείται ο ακεραίος προγραμματισμός.

Το πρόβλημα αυτό μπορεί να εκφραστεί σε κανονική μορφή ως εξής:

$$\begin{aligned} \min f(x) &= c^T x \\ \text{s.t. } Ax &\geq I \end{aligned} \tag{5.1}$$

όπου x : διάνυσμα μεταβλητών απόφασης του οποίου τα στοιχεία x_i ορίζονται ως εξής:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{αν τοποθετηθεί PMU στο ζυγό } i, i=1, \dots, n \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

f : αντικειμενική συνάρτηση

c : διανύσματα συντελεστών της f (θεωρούνται σταθερά και γνωστά)

A : δυαδική μήτρα σύνδεσης, τα στοιχεία της οποίας ορίζονται ως εξής:

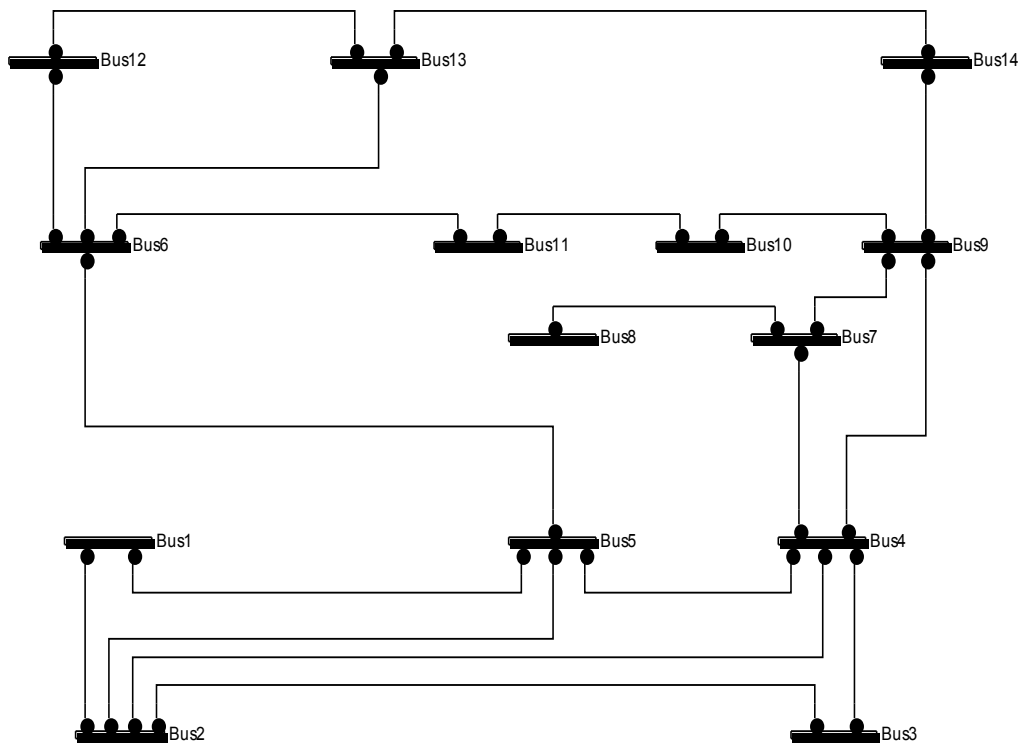
$$a_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{αν } m = n \\ 1 & \text{αν οι ζυγοί } m, n \text{ συνδέονται} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

n : Αριθμός ζυγών του δικτύου

Ax : Διανυσματική συνάρτηση της οποίας τα στοιχεία είναι μη μηδενικά, αν η τάση του αντίστοιχου ζυγού είναι προσδιορίσιμη από το σύνολο των PMUs, ειδάλως είναι μηδέν.

Η διατύπωση του ακεραίου προγραμματισμού υποθέτει ότι το PMU έχει απεριόριστο αριθμό καναλιών μέτρησης φασιθετών.

Η περιγραφή της μεθόδου βελτιστοποίησης θα γίνει χρησιμοποιώντας το IEEE δίκτυο των 14 ζυγών.



Σχήμα 20: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών

Το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU έχει ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{i=1}^{14} x_i \\
 & \text{s.t. : } Ax \geq b \\
 & x = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{14}]^T \\
 & x_i \in \{0 \quad 1\} \\
 & b = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1]_{14 \times 1}^T
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

Η δυαδική μήτρα σύνδεσης ζυγού σε ζυγό του δικτύου είναι:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Κάθε βαθμωτή συνάρτηση $f_i(x)$ της διανυσματικής συνάρτησης $f(x) = A \cdot x$ είναι μεγαλύτερη ή ίση με τη μονάδα, αν μια τουλάχιστον μεταβλητή x_i λάβει την τιμή 1.

$$f(x) = Ax \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} f_1(x) = x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ f_2(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ f_3(x) = x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ f_4(x) = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 \geq 1 \\ f_5(x) = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 \geq 1 \\ f_6(x) = x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ f_7(x) = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1 \\ f_8(x) = x_7 + x_8 \geq 1 \\ f_9(x) = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} \geq 1 \\ f_{10}(x) = x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ f_{11}(x) = x_6 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ f_{12}(x) = x_6 + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ f_{13}(x) = x_9 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ f_{14}(x) = x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Ο τελεστής (+) λειτουργεί σαν την λογική πράξη (OR). Η μονάδα στο δεξί μέλος της ανίσωσης εξασφαλίζει ότι μία τουλάχιστον μεταβλητή x_i θα είναι μη μηδενική.

Για παράδειγμα επισημαίνονται οι ανισώσεις :

$$f_1(x) = x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \quad (5.5)$$

$$f_2(x) = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \quad (5.6)$$

Η ανίσωση $f_1(x) \geq 1$ εξασφαλίζει ότι ένα τουλάχιστον PMU πρέπει να τοποθετηθεί σε οποιονδήποτε από τους ζυγούς 1, 2 ή 5 (ή και σε όλους) ώστε ο ζυγός 1 να είναι παρατηρήσιμος.

Παρόμοια, η ανίσωση $f_2(x) \geq 1$ υπαγορεύει ότι ένα τουλάχιστον PMU πρέπει να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε από τους ζυγούς 1, 2, 3, 4 ή 5 ώστε ο ζυγός 2 να είναι παρατηρήσιμος.

5.2 Δίκτυο με συμβατικές μετρήσεις

Στην πράξη, τα PMUs εγκαθίστανται σε Σ.Η.Ε που ήδη εποπτεύονται μέσω του συστήματος SCADA. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το SCADA είναι μετρήσεις ροών και/ ή μετρήσεις έγχυσης ισχύος. Το πρόβλημα του ακέραιου προγραμματισμού τροποποιείται ώστε να συμπεριληφθούν οι μετρήσεις ροών ισχύος και / ή μετρήσεις έγχυσης ισχύος.

5.2.1 Δίκτυο με μετρήσεις ροών κλάδων

Έστω ότι στο IEEE δίκτυο των 14 ζυγών (σχήμα 20), υπάρχει μέτρηση ροής ισχύος στην γραμμή 5-6. Η μέτρηση ροής επιτρέπει τον υπολογισμό του φασιθέτη της τάσης του ενός ζυγού όταν ο φασιθέτης τάσης στο άλλο άκρο της γραμμής είναι γνωστός.

Η μέτρηση ροής στην γραμμή 5-6 συνενώνει τους περιορισμούς παρατηρησιμότητας $f_5(x)$ και $f_6(x)$ στην $f_{5-new}(x)$:

$$f_{5-new}(x) = f_5 + f_6 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \quad (5.7)$$

Οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας $f_i(x)$ γράφονται:

$$f(x) = Ax = \left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_4 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1 \\ x_7 + x_8 \geq 1 \\ x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{array} \right. \quad (5.8)$$

5.2.2 Δίκτυο με μετρήσεις ροών κλάδων και ζυγούς μηδενικής έγχυσης

Θεωρείται δίκτυο, που περιέχει εγχύσεις και μετρήσεις ροών κλάδων. Πρέπει να σημειωθεί ότι, οι εγχύσεις ισχύος αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο είτε πρόκειται για ζυγούς μηδενικής έγχυσης είτε όχι. Για το IEEE δίκτυο 14 ζυγών, ο ζυγός μηδενικής έγχυσης 7 συνδέεται με τους ζυγούς 4, 8 και 9. Αν οι τάσεις τριών εκ των τεσσάρων ζυγών είναι γνωστές, τότε η άγνωστη τάση μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή του νόμου ρευμάτων Kirchhoff στον ζυγό 7.

Αναφέρονται οι εξής τρόποι χειρισμού των μετρήσεων έγχυσης :

- Διατύπωση μη γραμμικών περιορισμών.
- Τοπολογικός μετασχηματισμός του δικτύου.

5.2.3 Διατύπωση μη γραμμικών περιορισμών

Η παρουσία ζυγών έγχυσης στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση των περιορισμών παρατηρησιμότητας.

Θεωρείται το δίκτυο των 14 ζυγών (σχήμα 20). Ο ζυγός 7 είναι ζυγός μηδενικής έγχυσης. Ο ζυγός 7 συνδέεται με τους ζυγούς 4, 8 και 9. Οι περιορισμοί που αφορούν τους ζυγούς 4, 8 και 9 διατυπώνονται ως εξής :

$$f_4(x) = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + f_7 f_8 f_9 \geq 1 \quad (5.9)$$

$$f_8(x) = x_7 + x_8 + f_4 f_7 f_9 \geq 1 \quad (5.10)$$

$$f_9(x) = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + f_4 f_7 f_8 \geq 1 \quad (5.11)$$

Ο τελεστής (+) λειτουργεί ως η λογική πράξη OR και η απουσία τελεστή μεταξύ των f_i λειτουργεί ως η λογική πράξη (AND). Για παράδειγμα ο περιορισμός $f_8(x) \geq 1$

εξασφαλίζει ότι ο ζυγός 8 είναι παρατηρήσιμος αν τοποθετηθεί PMU είτε στο ζυγό 7, είτε ζυγό 8 ή οι ζυγοί 4, 7 και 9 είναι ταυτόχρονα παρατηρήσιμοι.

Οι περιορισμοί παρατηρησιμότητας $f_i(x) \geq 1$, $i=4, 8, 9$ απλοποιούνται χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες των λογικών πράξεων (AND) και (OR) και τις ιδιότητες της θεωρίας συνόλων ($A + B = B$, $AB = A$, $A \subseteq B$).

Οι περιορισμοί $f_i(x)$, $i=4, 8, 9$ διαμορφώνονται ως εξής :

$$f_4(x) = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + x_8x_{10} + x_8x_{14} \geq 1 \quad (5.12)$$

$$f_8(x) = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1 \quad (5.13)$$

$$f_9(x) = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + x_8x_2 + x_8x_3 + x_8x_5 \geq 1 \quad (5.14)$$

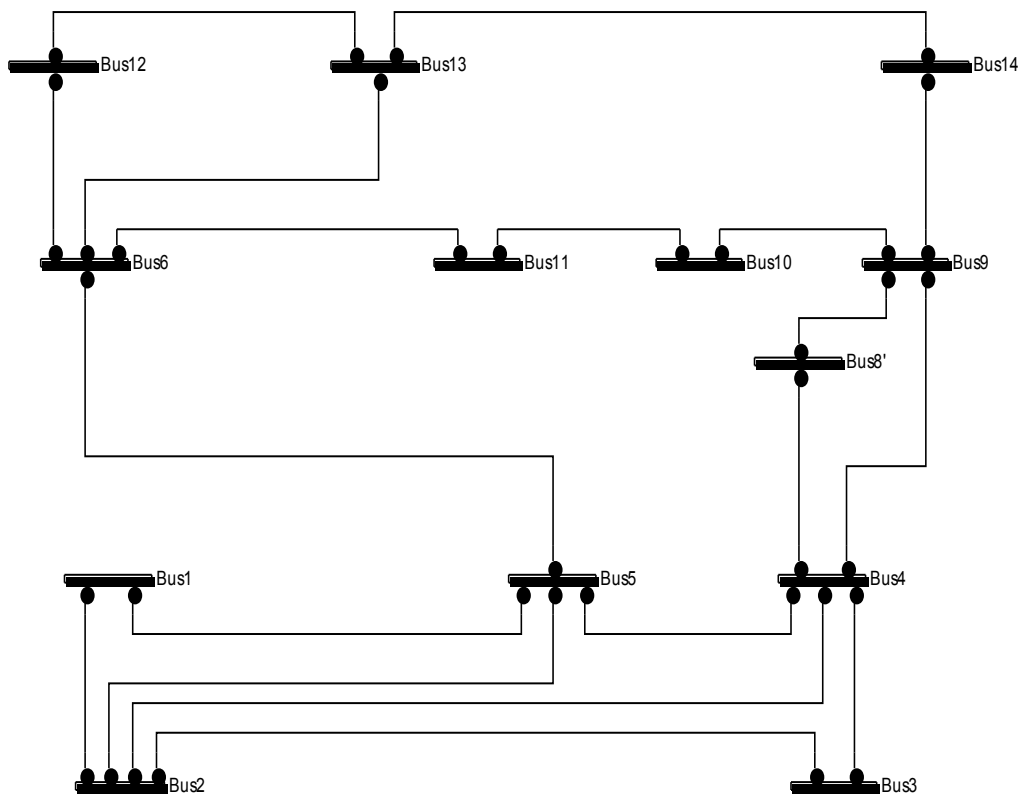
Ο περιορισμός $f_7(x)$ απουσιάζει από το τροποποιημένο σύνολο των περιορισμών, επειδή συμπεριλαμβάνεται στις ανισώσεις $f_i(x)$, $i=4, 8, 9$.

$$f(x) = A \cdot x = \begin{cases} x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 + x_8x_{10} + x_8x_{14} \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_4 + x_7 + x_8 + x_9 \geq 1 \\ x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} + x_2x_8 + x_3x_8 + x_5x_8 \geq 1 \\ x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{cases} \quad (5.15)$$

5.2.4 Τοπολογικός μετασχηματισμός

Η τοπολογική μέθοδος δεν εισάγει μη γραμμικούς όρους στην διατύπωση των περιορισμών παρατηρησιμότητας. Στην αναφορά [58] προτείνεται η συνένωση του ζυγού έγχυσης με οποιονδήποτε από τους γειτονικούς ζυγούς. Αυτή η ιδέα βασίζεται στην παρατήρηση ότι αν οι φασιθέτες των γειτονικών ζυγών είναι γνωστοί, τότε ο φασιθέτης της τάσης του ζυγού έγχυσης μπορεί να προσδιοριστεί αφού υπολογιστεί το ρεύμα που εγχύεται στο ζυγό έγχυσης με εφαρμογή του νόμου ρευμάτων Kirchoff (KCL). Η συνένωση των ζυγών έχει ως αποτέλεσμα να αλλάξει η τοπολογία του δικτύου.

Στο IEEE δίκτυο των 14 ζυγών (σχήμα 20), ο ζυγός 7 συνενώνεται με τον ζυγό 8. Προκύπτει στη θέση τους ο ζυγός 8'. Ο κλάδος 7-9 αντικαθίσταται από τον κλάδο 8'-9 (σχήμα 21).



Σχήμα 21: Τροποποιημένο Δίκτυο IEEE 14 ζυγών

Οι γραμμικοί περιορισμοί γράφονται ως εξής.

$$f(x) = A \cdot x = \left\{ \begin{array}{l} x_1 + x_2 + x_5 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 \geq 1 \\ x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 \geq 1 \\ x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_4 + x_8 + x_9 \geq 1 \\ x_4 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{10} + x_{11} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} \geq 1 \\ x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} \geq 1 \\ x_9 + x_{13} + x_{14} \geq 1 \end{array} \right. \quad (5.16)$$

Αν στο βέλτιστο σύνολο PMU περιέχεται ζυγός που έχει προκύψει από συνένωση δυο πραγματικών ζυγών τότε ενδεχομένως να τοποθετηθεί PMU σε έναν από τους δύο ή και στους δύο ζυγούς. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται έλεγχος της παρατηρησιμότητας.

5.3 Απώλεια PMU

Σε περίπτωση απώλειας PMU διατρέχεται ο κίνδυνος κάποιοι ζυγοί του δικτύου να μην είναι πλέον παρατηρήσιμοι. Για να αποφευχθεί αυτός ο κίνδυνος κάθε ζυγός του δικτύου θα πρέπει να παρατηρείται τουλάχιστον από δύο PMUs, δηλαδή για κάθε ζυγό θα πρέπει να ισχύει: $BOI \geq 2$.

Σε αυτήν περίπτωση η απώλεια PMU δεν οδηγεί σε απώλεια της παρατηρησιμότητας του δικτύου, δηλαδή το δίκτυο εξακολουθεί να είναι πλήρως παρατηρήσιμο.

Για το δίκτυο n - ζυγών, το πρόβλημα του δυαδικού ακέραιου προγραμματισμού γράφεται στην μητρική μορφή :

$$\begin{aligned} \min J(x) &= w^T x \\ \text{s.t. } Ax &\geq 2e \end{aligned} \tag{5.17}$$

όπου το e είναι μοναδιαίο διάνυσμα.

Γενικευμένος Γραμμικός Ακέραιος Προγραμματισμός

6.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται ο γενικευμένος γραμμικός ακέραιος αλγόριθμος τοποθέτησης PMU για την εποπτεία Σ.Η.Ε. με και χωρίς συμβατικές μετρήσεις ροών ισχύος και έγχυσης ισχύος, με βάση τα όσα παρουσιάζονται στις αναφορές [2] και [59].

6.2 Διατύπωση του προβλήματος

6.2.1 Χωρίς συμβατικές μετρήσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, μια PMU μπορεί να μετρά το φασιθέτη τάσης του ζυγού στον οποίο είναι εγκατεστημένη και τους φασιθέτες των ρευμάτων όλων των ζυγών που συνδέονται με αυτό. Με αυτό τον τρόπο η PMU καθιστά το ζυγό στον οποίο είναι εγκατεστημένη και τους παρακείμενους ζυγούς παρατηρήσιμους.

Επομένως το πρόβλημα τοποθέτησης των PMUs μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα εύρεσης του ελάχιστου συνόλου PMUs έτσι ώστε κάθε ζυγός να είναι παρατηρήσιμος τουλάχιστον από μια PMU. Με αυτά τα δεδομένα, ορίζουμε ένα πίνακα T_{PMU} .

Τώρα το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα Γραμμικού Ακέραιου Προγραμματισμού ως εξής:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k=1}^N x_k \\ \text{s.t.} \quad & T_{PMU} X \geq b_{PMU} \\ & X = [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_N]^T \\ & x_i \in \{0, 1\} \end{aligned} \tag{6.1}$$

όπου

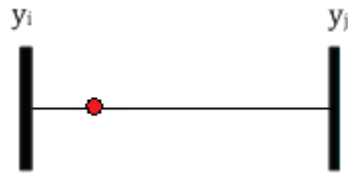
$$b_{PMU} = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]_{N \times 1}^T \text{ και } x_i \text{ είναι μεταβλητή τοποθέτησης των PMUs.}$$

6.2.2 Με συμβατικές μετρήσεις

Σε αυτό το κεφάλαιο θεωρούμε ότι έχουμε μόνο μετρήσεις ροών ισχύος και έγχυσης ισχύος και συμπεραίνουμε ότι είναι ανά ζεύγη.

Ορίζουμε ένα διάνυσμα $Y = T_{PMU} X$. Το στοιχείο $y_i = T_{PMU,i} x_i$ του Y υποδεικνύει πόσες φορές είναι ο ζυγός i παρατηρήσιμος, όπου $T_{PMU,i}$ είναι η i -οστή σειρά του T_{PMU} και x_i είναι το i -οστό στοιχείο του X . Για μια μέτρηση ροής ισχύος ή έγχυσης ισχύος, το στοιχείο του Y που αντιστοιχεί σε ένα από τους ζυγούς που σχετίζονται με τη μέτρηση μπορεί να είναι 0, ενώ το υπόλοιπο πρέπει να είναι τουλάχιστον 1.

Για περισσότερη κατανόηση, αναλύονται οι παρακάτω τρεις περιπτώσεις:



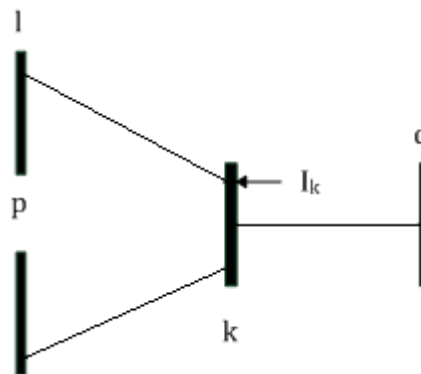
Σχήμα 22: Μέτρηση Ροής Ισχύος

i) Αν υπάρχει μέτρηση ροής ισχύος στη γραμμή i - j , τότε πρέπει να ισχύει η παρακάτω ανίσωση:

$$y_i + y_j \geq 1 \quad (6.2)$$

που σημαίνει ότι ο φασιθέτης τάσης του ενός ζυγού μπορεί να βρεθεί από τη μέτρηση ροής ισχύος στη γραμμή i - j , ενώ ο φασιθέτης τάσης του άλλου ζυγού βρίσκεται από μέτρηση PMU.

ii) Υποθέτουμε ότι υπάρχει μέτρηση έγχυσης ισχύος στο ζυγό k , όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

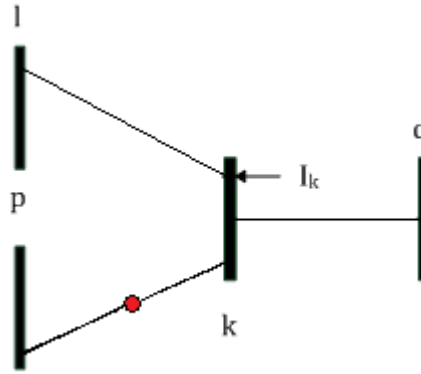


Σχήμα 23: Μέτρηση Έγχυσης Ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η ακόλουθη ανίσωση:

$$y_l + y_p + y_k + y_q \geq 3 \quad (6.3)$$

iii) Συνδυάζουμε τη μέτρηση ροής ισχύος στη γραμμή i - j με τη μέτρηση έγχυσης ισχύος στο ζυγό k .



Σχήμα 24: Μέτρηση Ροής Ισχύος και Μέτρηση Έγχυσης Ισχύος

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα των i) και ii) ισχύουν ταυτόχρονα οι εξής ανισότητες:

$$\left. \begin{array}{l} y_p + y_k \geq 1 \\ y_l + y_p + y_k + y_q \geq 3 \end{array} \right\} \Rightarrow y_l + y_p + y_k + y_q - y_p - y_k \geq 3 - 1 \Rightarrow y_l + y_q \geq 2 \quad (6.4)$$

Αν ένας ζυγός δε συνδέεται με συμβατικές μετρήσεις, τότε ο αντίστοιχος περιορισμός του προβλήματος ελαχιστοποίησης A παραμένει:

$$y_s \geq 1 \quad (6.5)$$

Επομένως, με βάση τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις, αν ξεκινήσουμε από τους ζυγούς που δε συνδέονται με συμβατικές μετρήσεις, τότε ο περιορισμός που αφορά τις συμβατικές μετρήσεις γίνεται:

$$\begin{bmatrix} I_{M \times M} & 0 \\ 0 & T_{meas} \end{bmatrix} (PY) = T_{con} PY = T_{con} P T_{PMU} X \geq b_{con} \quad (6.6)$$

όπου

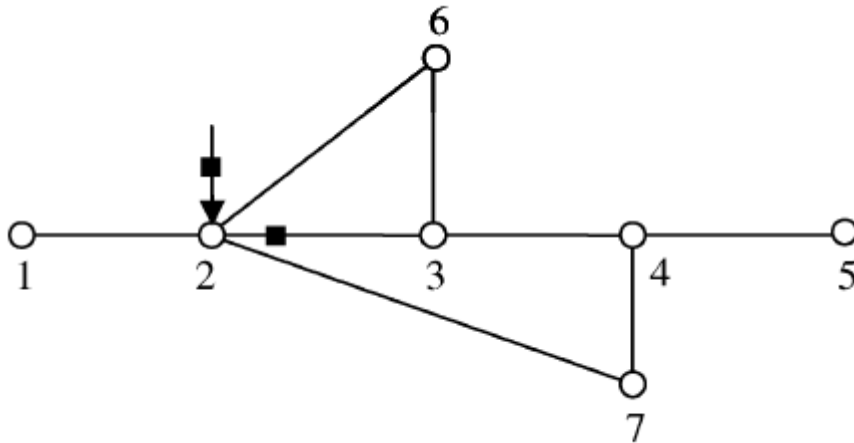
- T_{meas} και b_{con} : σχηματίζονται με βάση τις ανισώσεις που προκύπτουν από τις τρεις παραπάνω περιπτώσεις.
- P : είναι ο πίνακας μετάθεσης, που είναι ένας δυαδικός πίνακας που έχει ένα μη μηδενικό στοιχείο σε κάθε γραμμή ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία της γραμμής είναι μηδενικά.
- M : είναι ο αριθμός των ζυγών που δε συνδέονται με συμβατικές μετρήσεις.

Συνεπώς, στην περίπτωση ύπαρξης ζυγών μηδενικής έγχυσης, το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs διατυπώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{k=1}^N x_k \\
& s.t. \quad T_{con} P T_{PMU} X \geq b_{con} \\
& \quad \quad X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_N]^T \\
& \quad \quad x_i \in \{0,1\}
\end{aligned} \tag{6.7}$$

Παράδειγμα

Στην παράγραφο αυτή δίνεται ένα παράδειγμα που επεξηγεί την παραπάνω μέθοδο επίλυσης του προβλήματος για την περίπτωση πλήρους παρατηρησιμότητας.



Σχήμα 25: Παράδειγμα δικτύου με 7 ζυγούς

Έστω ότι υπάρχει μέτρηση ροής ισχύος στη γραμμή 2-3 και έγχυσης ισχύος στο ζυγό 2. Οι ζυγοί 1, 2, 3, 6 και 7 σχετίζονται με αυτές τις συμβατικές μετρήσεις. Σύμφωνα με τον ορισμό που δόθηκε πιο πάνω ισχύει:

$$T_{PMU} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.8}$$

Οι ζυγοί 4 και 5 δεν εμπλέκονται στις συμβατικές μετρήσεις. Οι δύο ανισοτικοί περιορισμοί που αφορούν τις συμβατικές μετρήσεις είναι:

$$y_2 + y_3 \geq 1 \quad (6.9)$$

$$y_1 + y_6 + y_7 \geq 2 \quad (6.10)$$

Επομένως προκύπτει:

$$T_{meas} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{Μέτρηση_ροής_στον_κλάδο2-3} \\ \text{Μέτρηση_έγχυσης_στο_ζυγό_2} \end{array} \quad (6.11)$$

Ο παραπάνω πίνακας αφορά τους ζυγούς 1, 2, 3, 6, 7.

Συνεπώς ο πίνακας T_{con} σχηματίζεται ως εξής:

$$T_{con} = \begin{bmatrix} I_{M \times M} & 0 \\ 0 & T_{meas} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Και ο πίνακας μετάθεσης είναι:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

Επομένως το πρόβλημα μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\min \sum_{k=1}^7 x_k$$

s.t.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

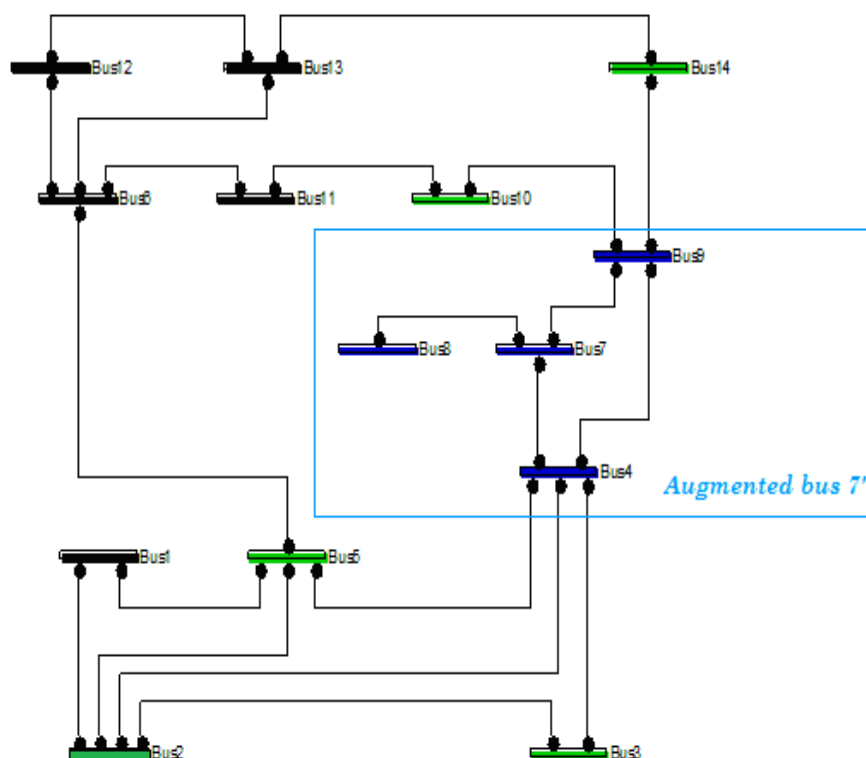
$$x_k \in \{0, 1\}, k=1, \dots, 7$$

Η βέλτιστη λύση είναι η $X = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, που σημαίνει ότι πρέπει να τοποθετηθεί μια PMU στο ζυγό 2 και μία στο ζυγό 5.

Το παράδειγμα αυτό αποδεικνύει ότι οι συμβατικές μετρήσεις δεν επηρεάζουν την απόφαση για τη βέλτιστη τοποθέτηση των PMUs εξαιτίας της σύνθεσης του δικτύου και της θέσης των συμβατικών μετρήσεων.

6.3 Εφαρμογή για το IEEE δίκτυο 14 ζυγών

Θεωρούμε το IEEE δίκτυο 14 ζυγών όπου ο ζυγός 7 θεωρείται ζυγός μηδενικής έγχυσης. Ο ζυγός 7 μαζί με τους παρακείμενους ζυγούς 4, 8 και 9 αποτελούν τον επαυξημένο ζυγό 7'.



Σχήμα 26: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών με τον επαυξημένο ζυγό 7'

Συνεπώς το σύνολο των ζυγών που σχετίζονται με το ζυγό μηδενικής έγχυσης είναι ,κατά αύξουσα σειρά: {4, 7 , 8 , 9} και το σύνολο των ζυγών που δε συνδέονται με το ζυγό μηδενικής έγχυσης είναι: {1, 2, 3, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14}.

Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ο πίνακας:

$$T_{con} = \begin{bmatrix} I_{10 \times 10} & 0_{10 \times 4} \\ 0_{1 \times 10} & T_{meas} \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Ο πίνακας T_{meas} αναφέρεται στους ζυγούς που συνδέονται με το ζυγό μηδενικής έγχυσης και είναι :

$$T_{meas} = [1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (6.16)$$

Το πρόβλημα διατυπώνεται σε μητρική μορφή ως εξής:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^N x_k \\ \text{s.t. } T_{con} P T_{PMU} X \geq b_{con} \\ X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N]^T \\ x_i \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (6.17)$$

Για τον πίνακα μετάθεσης ισχύει:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Οπότε προκύπτει ο πίνακας:

$$T = T_{con}PT_{pmu} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 4 & 2 & 3 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Και για το b ισχύει :

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Για το τροποποιημένο δίκτυο, όπως προαναφέρθηκε, οι ζυγοί 4, 7, 8, 9 αποτελούν τον επαυξημένο ζυγό 7' (σχήμα 26, περιοχή μέσα στο γαλάζιο πλαίσιο) και οι ζυγοί 2, 3, 5, 10 και 14 (σχήμα 26, ζυγοί με πράσινο χρώμα) είναι οι γειτονικοί ζυγοί του 7'.

Οπότε προκύπτει ο περιορισμός:

$$x_2 + x_3 + 3x_4 + x_5 + 4x_7 + 2x_8 + 3x_9 + x_{10} + x_{14} \geq 3 \quad (6.21)$$

Οι συντελεστές των x_i , με $i = 4, 7, 8, 9$ αντιστοιχούν στο πόσες φορές είναι παρατηρήσιμος ο φασιθέτης τάσης του αντίστοιχου ζυγού i . Για παράδειγμα ο ζυγός 9 γίνεται παρατηρήσιμος αν τοποθετηθεί PMU στο ζυγό 4 ή στο ζυγό 7 ή στον ίδιο το Ζυγό 9.

Αλγόριθμοι και συναρτήσεις για την επίλυση του προβλήματος

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την έκφραση και επίλυση του προβλήματος με το πρόγραμμα Matlab. Για κάθε μια συνάρτηση-επιλυτή δίνεται μια περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιεί, του ορισμού και της σύνταξης της καθώς και των προβλημάτων που επιλύει.

7.2 Επίλυση προβλημάτων δυαδικού ακεραίου προγραμματισμού- bintprog

Η bintprog επιλύει προβλήματα δυαδικού ακεραίου προγραμματισμού της μορφής:

$$\min_x f^T x \text{ τέτοια ώστε } \begin{cases} Ax \leq b \\ Aeqx = beq \\ x \text{ διάνυσμα δυαδικών στοιχείων} \end{cases} \quad (7.1)$$

όπου τα f , b , b_{eq} είναι διανύσματα, τα A και A_{eq} είναι μήτρες και η λύση x είναι υποχρεωτικά ένα διάνυσμα δυαδικών ακεραίων, δηλαδή τα στοιχεία του παίρνουν τιμές 0 ή 1 [60].

7.2.1 Σύνταξη και Περιγραφή

Ακολουθούν κάποια παραδείγματα για τον τρόπο σύνταξης της bintprog καθώς και μια σύντομη περιγραφή των προβλημάτων που επιλύονται με αυτό τον τρόπο:

- $x = \text{bintprog}(f)$

Επιλύει το πρόβλημα δυαδικού ακεραίου προγραμματισμού:

$$\min_x f^T x$$

- $x = \text{bintprog}(f, A, b)$

Επιλύει το πρόβλημα δυαδικού ακεραίου προγραμματισμού:

$$\min_x f^T x \text{ τέτοια ώστε } A \cdot x \leq b$$

- $x = \text{bintprog}(f, A, b, Aeq, beq)$

Επιλύει το παραπάνω πρόβλημα με ένα επιπλέον περιορισμό ισότητας:

$$Aeq \cdot x = beq$$

- $x = \text{bintprog}(f, A, b, Aeq, beq, x0)$

Θέτει το αρχικό σημείο για τον αλγόριθμο στο $x0$. Σε περίπτωση που το σημείο αυτό δεν ανήκει στην περιοχή εφικτών λύσεων, η bintprog χρησιμοποιεί το προεπιλεγμένο αρχικό σημείο.

- `x = bintprog(f,A,b,Aeq,Beq,x0,options)`
Ελαχιστοποιεί τις προεπιλεγμένες επιλογές βελτιστοποίησης, που αντικαθίστανται από τις τιμές στις επιλογές (options) τις οποίες μπορούμε να δημιουργήσουμε χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `optimoptions`.
- `x = bintprog(problem)`
Βρίσκει το ελάχιστο για το `problem`, μία δομή η οποία εξηγείται παρακάτω στα εσωτερικά ορίσματα.
Για τη δημιουργία της δομής `problem` εξάγουμε ένα πρόβλημα από το Optimization app.
- `[x,fval] = bintprog(...)`
Επιστρέφει την τιμή της `fval`, της αντικειμενικής συνάρτησης στο `x`.
- `[x,fval,exitflag] = bintprog(...)`
Επιστρέφει την `exitflag`, που περιγράφει τη συνθήκη εξόδου από την `bintprog`.
- `[x,fval,exitflag,output] = bintprog(...)`
Επιστρέφει τη δομή `output` που περιέχει πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση.

7.2.2 Εσωτερικά Ορίσματα

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα εσωτερικά ορίσματα της `bintprog`:

Πίνακας 4: Εσωτερικά ορίσματα συνάρτησης `Bintprog`

<code>f</code>	Διάνυσμα το οποίο περιέχει τους συντελεστές της γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης (n στοιχεία).
<code>A</code>	Μήτρα που περιέχει τους συντελεστές των γραμμικών ανισωτικών περιορισμών $Ax \leq b$.
<code>b</code>	Διάνυσμα το οποίο περιέχει τις σταθερές των γραμμικών ανισωτικών περιορισμών $Ax \leq b$ (n στοιχεία).
<code>Aeq</code>	Μήτρα που περιέχει τους συντελεστές των γραμμικών ισωτικών περιορισμών $Ax = b$.
<code>beq</code>	Διάνυσμα το οποίο περιέχει τις σταθερές των γραμμικών ισωτικών περιορισμών $Ax = b$ (n στοιχεία).
<code>x0</code>	Αρχικό σημείο του αλγορίθμου.
<code>options</code>	Δομή που περιέχει τις πληροφορίες για τον αλγόριθμο.

Πίνακας 4: Εσωτερικά ορίσματα συνάρτησης Bintprog (συνέχεια)

problem	f	Διάνυσμα γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης
	Aineq	Πίνακας γραμμικών ανισωτικών περιορισμών
	bineq	Διάνυσμα γραμμικών ανισωτικών περιορισμών
	Aeq	Πίνακας γραμμικών περιορισμών ισότητας
	beq	Διάνυσμα γραμμικών περιορισμών ισότητας
	x0	Αρχικό σημείο για το x
	Solver	‘bintprog’
	Options	Επιλογές που δημιουργούνται με την optimoptions.

7.2.3.Εξωτερικά Ορίσματα

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα εξωτερικά ορίσματα της bintprog:

Πίνακας 5: Εξωτερικά ορίσματα συνάρτησης Bintprog

exitflag	Ακέραιος που εντοπίζει το λόγο για τον οποίο ο αλγόριθμος τερματίζει	
	1	Ο αλγόριθμος συγκλίνει σε μία λύση x.
	0	Ο αριθμός των επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί. options.MaxIter.
	-2	Η λύση είναι μη εφικτή.
	-4	Ο αριθμός των μέγιστων κόμβων προς εξέταση έχει ξεπεραστεί. options.MaxNodes.
	-5	Ο χρόνος αναζήτησης έχει ξεπεραστεί. options.MaxTime.
	-6	Ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν από τον LP-solver ένα κόμβο για να λυθεί το LP relaxation-problem έχει ξεπεραστεί. options.MaxRLP

Πίνακας 5: Εξωτερικά ορίσματα συνάρτησης Bintprog (συνέχεια)

output	Δομή που παρέχει πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση με τα εξής πεδία:	
	iterations	Ο αλγόριθμος συγκλίνει σε μία λύση x.
	nodes	Ο αριθμός των επαναλήψεων έχει ξεπεραστεί. options.MaxIter.
	time	Η λύση είναι μη εφικτή.
	algorithm	Ο αριθμός των μέγιστων κόμβων προς εξέταση έχει ξεπεραστεί. options.MaxNodes.
	branchStrategy	Ο χρόνος αναζήτησης έχει ξεπεραστεί. options.MaxTime.
	nodeSearchStrategy	Ο αριθμός των επαναλήψεων που έγιναν από τον LP-solver ένα κόμβο για να λυθεί το LP relaxation-problem έχει ξεπεραστεί. options.MaxRLP
	message	Μήνυμα περάτωσης του αλγορίθμου

7.2.4 Δομή των options

Πίνακας 6: Δομή των options της Bintprog

BranchStrategy	<p>Στρατηγική επιλογής της μεταβλητής κλάδου στο δέντρο αναζήτησης.</p> <p>‘minifeas’ : Επιλογή μεταβλητής της οποίας η τιμή είναι κοντά στο 0 ή 1 αλλά όχι ίση με 0 ή 1.</p> <p>‘maxifeas’ : Επιλογή μεταβλητής της οποίας η τιμή είναι κοντά στο 0.5 (προεπιλεγμένη τιμή)</p>
Diagnostics	<p>Προβολή πληροφοριών σχετικά με τη συνάρτηση. Οι επιλογές είναι ‘on’ ή (η προεπιλεγμένη επιλογή) ‘off’</p>

Πίνακας 6: Δομή των options της Bintprog (συνέχεια)

Display	<p>off : Δεν δείχνει την έξοδο iter : Δείχνει την έξοδο σε κάθε επανάληψη και δίνει το προεπιλεγμένο μήνυμα εξόδου</p> <p>final (default) : δείχνει την τελική έξοδο και δίνει το προεπιλεγμένο μήνυμα εξόδου</p>
MaxIter	<p>Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (θετικός ακέραιος) Προεπιλογή : 100000*numberOfVariables</p>
MaxNodes	<p>Μέγιστος αριθμός κόμβων (θετικός ακέραιος) Προεπιλογή : 1000*numberOfVariables</p>
MaxRLPIter	<p>Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων χαλαρών Γ.Π (θετικός ακέραιος) Προεπιλογή : 100*numberOfVariables</p>
MaxTime	<p>Μέγιστο χρόνος CPU (σε δευτερόλεπτα) Προεπιλογή : 7200</p>
NodeDisplayInterval	<p>Δίνει τον αριθμό των κόμβων προς αναζήτηση μεταξύ των αναφορών Προεπιλογή: 20</p>
NodeSearchStrategy	<p>Στρατηγική που ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί για την επιλογή του επόμενου κόμβου στο δέντρο αναζήτησης</p>
TolFun	<p>Ανοχή στην τιμή της συνάρτησης Προεπιλογή : 1.0e-3</p>
TolXInteger	<p>Ανοχή με την οποία η τιμή μιας μεταβλητής θεωρείται ακέραιος (θετικό βαθμωτό μέγεθος). Προεπιλογή: 1.0e-8</p>
TolRLPFun	<p>Ανοχή με την οποία η τιμή της συνάρτησης του χαλαρού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού τερματίζει (θετικό βαθμωτό μέγεθος). Προεπιλογή : 1.0e-6</p>

Παράδειγμα

Έστω ότι θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε την:

$$\begin{aligned} f(x) &= -9x_1 - 5x_2 - 6x_3 - 4x_4 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{bmatrix} 6 & 3 & 5 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 9 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7.2)$$

όπου x_1, x_2, x_3, x_4 δυαδικοί ακέραιοι. Εισάγουμε τις ακόλουθες οδηγίες:

```
>> f=[-9; -5; -6; -4];
>> A=[6 3 5 2; 0 0 1 1; -1 0 1 0; 0 -1 0 1];
>> b=[9; 1; 0; 0];
>> [x,fval,exitflag,output]=bintprog(f,A,b);
Optimization terminated.
>> x

x =

     1
     1
     0
     0

>> fval

fval =

    -14

>> exitflag

exitflag =

     1

>> output

output =

    iterations: 12
      nodes: 5
      time: 1.2948
    algorithm: 'LP-based branch-and-bound'
  branchStrategy: 'maximum integer infeasibility'
 nodeSrchStrategy: 'best node search'
      message: 'Optimization terminated.'
```

7.3 Coin-or Branch and Cut και Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός

7.3.1 Εισαγωγή

Η CBC (Coin-or branch and cut) είναι ένας επιλυτής ανοικτού κώδικα που επιλύει προβλήματα Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού, γραμμένα σε C++. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιβλιοθήκη (callable library) ή ως αυτόνομο εκτελέσιμο πρόγραμμα (stand-alone executable) [61]. Η CBC απαιτεί ένα LP solver. Επίσης χρησιμοποιεί την διεπαφή ανοικτού κώδικα COIN-OR (OSI) για την επικοινωνία με τον LP solver που έχει επιλέξει ο χρήστης. Η CBC μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε LP solver με OSI. Κατά κανόνα χρησιμοποιεί τον CLP, ο οποίος διατίθεται δωρεάν. Η CBC μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως branch-and-bound ή branch-and-cut solver. Στην περίπτωση των cut generators, η CBC στηρίζεται στην COIN-Or Cut Generation Library (CGL). Γενικότερα μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε cut generator γραμμένη σύμφωνα με τα πρότυπα CGL.

Η CBC αναπτύχθηκε από τον John J.H. Forrest, ο οποίος ανήκε στο ερευνητικό τμήμα της IBM, ενώ σήμερα διοικείται επίσης από τον Ted Ralphs και την υπόλοιπη ομάδα CBC [62]-[63].

7.3.2 CBC και Αλγόριθμος Branch-and-Cut

Στην παράγραφο αυτή γίνεται μια συνοπτική περιγραφή του αλγόριθμου branch-and-cut και παρουσιάζονται βήμα βήμα οι βασικές C++ classes που συνδέονται με τη CBC (Πίνακας 7).

Πίνακας 7: Κλάσεις της C++ που συνδέονται με τη Cbc

	Όνομα Κλάσης	Περιγραφή
(A)	CbcBranch	Αυτές οι κλάσεις καθορίζουν τη φύση της ασυνέχειας του Μ.Α.Π. Η πιο απλή ασυνέχεια είναι μια μεταβλητή η οποία πρέπει να πάρει μια ολοκληρωτική τιμή.
(B)	CbcNode	Αυτή η κλάση αποφασίζει πια μεταβλητή θα είναι η επόμενη στη διακλάδωση.
(C)	CbcTree	Όλα τα μοντέλα που δεν επιλύονται μπορούν να θεωρηθούν σαν κόμβοι σε ένα δέντρο όπου κάθε κόμβος (μοντέλο) μπορεί να διακλαδωθεί δύο ή περισσότερες φορές.
(D)	CbcCompare	Αυτές οι κλάσεις χρησιμοποιούνται για να αποφασιστεί ποιος ανεξερεύνητος κόμβος του δέντρου θα είναι ο επόμενος που θα εξεταστεί. Αυτές είναι πολύ μικρές και απλές κλάσεις που μπορούν να προσαρμοστούν έτσι ώστε να ταιριάζουν στο πρόβλημα.
(E)	CglCutGenerators	Οποιαδήποτε cut generator του CGL μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη CBC. Όλες οι cut generators θα πρέπει να δοκιμαστούν ώστε να βρεθεί η πιο αποτελεσματική.

Πίνακας 7: Κλάσεις της C++ που συνδέονται με τη Cbc (συνέχεια)

(F)	CbcHeuristics	Τα heuristics είναι πολύ σημαντικά για να βρεθεί γρήγορα έγκυρη λύση. Μερικά είναι διαθέσιμα αλλά είναι χρήσιμο και ενδιαφέρον να γραφούν εξειδικευμένα για κάθε πρόβλημα.
-----	---------------	--

Βήμα 1: Οριοθέτηση (Bound). Με δεδομένο ένα μοντέλο Μ.Α.Π. για να ελαχιστοποιήσουμε πού ορισμένες μεταβλητές πρέπει να λάβουν ακέραιες τιμές (π.χ. 0, 1, ή 2) χαλαρώνουμε τις απαιτήσεις συνέχειας (π.χ. θεωρούμε ότι κάθε ακέραιη μεταβλητή είναι συνεχής με κάτω όριο 0 και άνω όριο 2). Λύνουμε το γραμμικό μοντέλο που προκύπτει με ένα LP solver για να αποκτήσουμε ένα κάτω όριο για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης Μ.Α.Π. Αν η βέλτιστη λύση Γ.Π. παίρνει ακέραιες τιμές έχουμε τελειώσει. Οποιαδήποτε εφικτή λύση Μ.Α.Π παρέχει ένα άνω όριο για την αντικειμενική συνάρτηση. Όταν το άνω όριο εξισώνεται με το κάτω όριο η λύση είναι βέλτιστη.

Βήμα 2: Διακλάδωση (Branch). Επιλέγουμε μια μη ακέραιη μεταβλητή (π.χ. τιμή 1,3) (A) (B) και διακλαδώνουμε. Δημιουργούμε δύο κόμβους. Στον ένα κόμβο η μεταβλητή διακλάδωσης έχει άνω όριο 1,0 και στον δεύτερο έχει κάτω όριο 2,0. Προσθέτουμε τους δύο κόμβους στο δέντρο αναζήτησης.

Βήμα 3: Επιλογή κόμβου (Choose Node). Επιλέγουμε ένα κόμβο από το δέντρο (C)(D).

Βήμα 4: Βελτιστοποίηση LP (Reoptimize LP). Δημιουργούμε ένα χαλαρό πρόβλημα Α.Π. και το λύνουμε.

Βήμα 5: Οριοθέτηση (Bound). Εξετάζουμε την βέλτιστη λύση Α.Π. και προσπαθούμε να «κλαδέψουμε» τον κόμβο με βάση ένα από τα επόμενα κριτήρια.

- Αν η λύση του Α.Π. είναι μη εφικτή, κλαδεύουμε τον κόμβο.
- Αν η βέλτιστη τιμή της λύσης Α.Π. ξεπερνά το άνω όριο, κλαδεύουμε τον κόμβο.
- Αν η βέλτιστη λύση Α.Π. δεν ξεπερνά το άνω όριο και η λύση είναι εφικτή στον Μ.Α.Π., ανανεώνουμε το άνω όριο και την καλύτερη γνωστή λύση Μ.Α.Π και κλαδεύουμε τον κόμβο, με βελτιστοποίηση.

Βήμα 6: Διακλάδωση (Branch). Αν δεν έχουμε καταφέρει να κλαδέψουμε τον κόμβο κάνουμε διακλάδωση. Επιλέγουμε μια μη ακέραιη τιμή για τη διακλάδωση (A)(B). Δημιουργούμε δύο κόμβους και τους προσθέτουμε στο δέντρο.

Τα παραπάνω αποτελούν μια σκιαγράφιση του αλγόριθμου branch-and-bound. Αν κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης χρησιμοποιούμε cuts για να περιορίσουμε τη χαλάρωση Α.Π. (E)(F), τότε έχουμε αλγόριθμο branch-and-cut. (Σημειώνεται ότι αν τα cuts χρησιμοποιούνται μόνο στο βήμα 1, η μέθοδος ονομάζεται cut-and-branch αλγόριθμος.

7.3.3 OPTI Toolbox

Για την επίλυση προβλημάτων με τη CBC χρειάζεται να επιστρατεύσουμε το OPTimization Interface Toolbox. Το OPTI Toolbox είναι μια δωρεάν εργαλειοθήκη του MATLAB για την κατασκευή και επίλυση γραμμικών, μη γραμμικών, συνεχών και διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η βασική του συνεισφορά είναι ότι οι συναρτήσεις-επιλυτές που παρέχει έχουν ήδη συνταχθεί, με διεπαφές MEX (Matlab Executable interfaces). Έτσι ο χρήστης μπορεί να τις καλέσει όπως θα καλούσε οποιαδήποτε άλλη συνάρτηση του MATLAB [78].

7.4 Γενετικός αλγόριθμος

7.4.1 Ορισμοί

- Συναρτήσεις ικανότητας (Fitness functions) : Η συνάρτηση ικανότητας είναι η συνάρτηση που επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Για συγκεκριμένους αλγόριθμους βελτιστοποίησης αυτή είναι γνωστή ως αντικειμενική συνάρτηση. Το λογισμικό του toolbox προσπαθεί να βρει το ελάχιστο αυτής της συνάρτησης.
- Άτομα (Individuals) : Ένα άτομο είναι οποιοδήποτε σημείο στο οποίο μπορεί να εφαρμοστεί η συνάρτηση ικανότητας. Η τιμή της συνάρτησης ικανότητας είναι το αποτέλεσμα (score) του. Για παράδειγμα αν η συνάρτηση ικανότητας είναι:

$$f(x_1, x_2, x_3) = (2x_1 + 1)^2 + (3x_2 + 4)^2 + (x_3 - 2)^2 \quad (7.3)$$

το διάνυσμα (2,-3,1) , του οποίου το μήκος είναι ο αριθμός μεταβλητών του προβλήματος, είναι ένα άτομο. Το score του ατόμου αυτού είναι $f(2, -3, 1) = 51$.

Πολλές φορές αναφερόμαστε στο άτομο με τον όρο γονιδίωμα (genome) και στις μεταβλητές του διανύσματος με τον όρο γονίδια (genes).

- Πληθυσμοί και γενιές (Populations and Generations): ένας πληθυσμός είναι ένας πίνακας από άτομα. Για παράδειγμα αν το μέγεθος του πληθυσμού είναι 100 και αριθμός των μεταβλητών στη συνάρτηση ικανότητας είναι 3, ο πληθυσμός αναπαριστάται με ένα πίνακα 100×3 . Το ίδιο άτομο μπορεί να εμφανιστεί περισσότερες από μια φορές στον πληθυσμό. Για παράδειγμα το άτομο (2, -3, 1) μπορεί να εμφανιστεί σε περισσότερες από μια σειρές του πίνακα. Σε κάθε επανάληψη ο Γ.Α. κάνει μια σειρά από υπολογισμούς στον τρέχοντα πληθυσμό για τη δημιουργία του επόμενου πληθυσμού. Κάθε διαδοχικός πληθυσμός ονομάζεται νέα γενιά (new generation).
- Ποικιλία (Diversity): Η ποικιλία αναφέρεται στη μέση απόσταση μεταξύ δύο ατόμων σε ένα πληθυσμό. Ένας πληθυσμός έχει μεγάλη ποικιλία αν η μέση απόσταση μεταξύ δύο ατόμων είναι μεγάλη. Σε αντίθετη περίπτωση η ποικιλία είναι μικρή. Η έννοια της ποικιλίας είναι πολύ σημαντική για τον Γ.Α. γιατί του δίνει τη δυνατότητα να ψάξει μια μεγαλύτερη περιοχή χώρου.
- Τιμές ικανότητας και βέλτιστες τιμές ικανότητας (Fitness values and Best fitness values): Η fitness value για ένα άτομο είναι η τιμή της συνάρτησης ικανότητας για αυτό το άτομο. Επειδή το λογισμικό της εργαλειοθήκης βρίσκει το ελάχιστο της

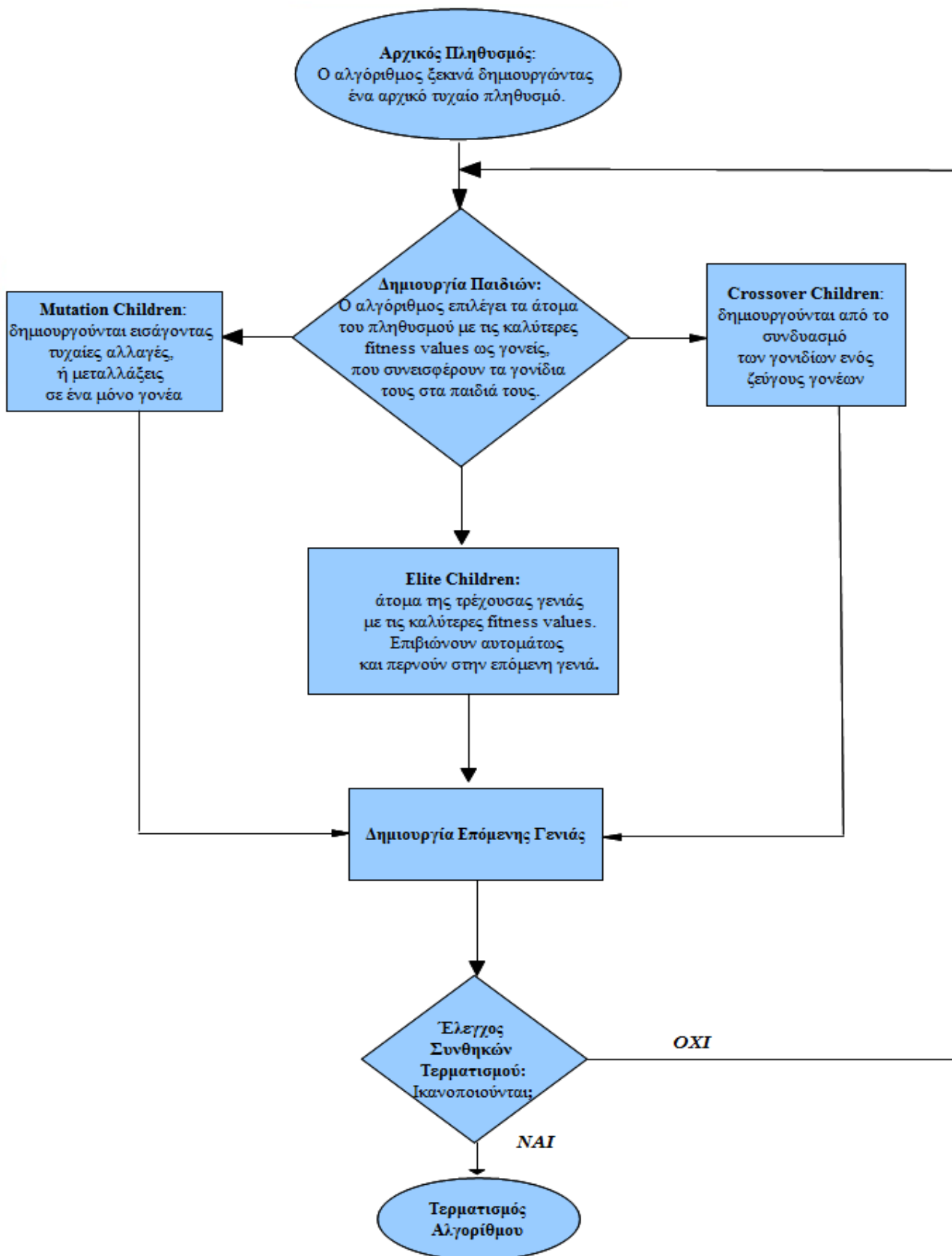
συνάρτησης ικανότητας, η best fitness value είναι η ελάχιστη τιμή της fitness value για κάθε άτομο του πληθυσμού.

- Γονείς και παιδιά (Parents and children): για τη δημιουργία της επόμενης γενιάς ο Γ.Α. διαλέγει συγκεκριμένα άτομα στον παρόντα πληθυσμό, τους γονείς και τα χρησιμοποιεί για να δημιουργήσει τα άτομα της επόμενης γενιάς, τα παιδιά. Τυπικά ο αλγόριθμος είναι πιο πιθανό να επιλέξει παιδιά με τις καλύτερες fitness values.

7.4.2 Βήματα του αλγορίθμου

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται συνοπτικά τα βήματα που ακολουθεί ο γενετικός αλγόριθμος [77]:

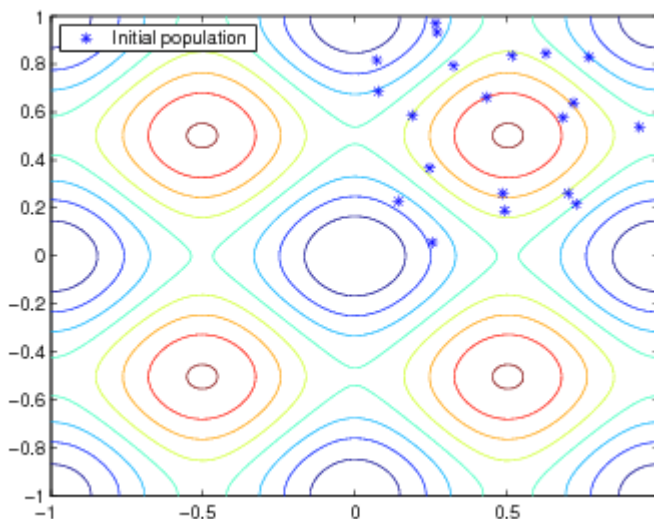
1. Ο αλγόριθμος ξεκινά δημιουργώντας ένα αρχικό τυχαίο πληθυσμό.
2. Στη συνέχεια δημιουργεί μια ακολουθία καινούργιων πληθυσμών. Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τα άτομα (λύσεις) της τρέχουσας γενιάς για να δημιουργήσει τον επόμενο πληθυσμό. Για τη δημιουργία του νέου πληθυσμού ο αλγόριθμος ακολουθεί τα εξής βήματα:
 - a) Εξετάζει κάθε μέλος, υπολογίζοντας την τιμή της ικανότητας του (fitness value).
 - b) Κλιμακώνει τις τιμές της καθαρής ικανότητας για να τις μετατρέψει σε ένα πιο εύχρηστο σύνολο τιμών.
 - c) Διαλέγει μέλη, τα οποία αποκαλούνται γονείς (parents) , με βάση την ικανότητα τους.
 - d) Μερικά από τα άτομα στον τρέχοντα πληθυσμό που έχουν μικρότερη ικανότητα επιλέγονται ως elite. Τα άτομα της elite είναι αυτά που θα περάσουν στον επόμενο πληθυσμό.
 - e) Παράγει παιδιά από τους γονείς. Τα παιδιά παράγονται είτε κάνοντας τυχαίες αλλαγές σε ένα γονέα-μετάλλαξη (mutation)- είτε συνδυάζοντας τα διανύσματα δύο γονέων-διασταύρωση (crossover).
 - f) Αντικαθιστά τον τρέχοντα πληθυσμό με τα παιδιά για να σχηματίσει την επόμενη γενιά.
3. Ο αλγόριθμος σταματά όταν εκπληρωθεί κάποιο από τα κριτήρια τερματισμού τα οποία θα δούμε παρακάτω.



Σχήμα 27: Λογικό Διάγραμμα με τα βήματα του γενετικού αλγορίθμου

Αρχικός πληθυσμός

Ο αλγόριθμος ξεκινάει δημιουργώντας ένα αρχικό πληθυσμό όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 28: Παράδειγμα αρχικού πληθυσμού του GA

Στο παράδειγμα αυτό ο αρχικός πληθυσμός περιέχει 20 άτομα, που είναι η προκαθορισμένη τιμή του Population size στις επιλογές για την παράμετρο population. Παρατηρούμε ότι όλα τα άτομα του αρχικού πληθυσμού βρίσκονται στο πάνω δεξιά τεταρτημόριο του διαγράμματος, καθώς οι συντεταγμένες τους κινούνται μεταξύ του 0 και του 1 επειδή η προκαθορισμένη τιμή της **Initial Range** στην επιλογή του **Population** είναι $[0; 1]$.

Σε περίπτωση που γνωρίζουμε κατά προσέγγιση που κινείται το ελάχιστο σημείο της συνάρτησης, πρέπει να θέσουμε το **Initial Range** έτσι ώστε το σημείο να βρίσκεται στο μέσο αυτού του διαστήματος. Για παράδειγμα αν πιστεύουμε ότι το ελάχιστο σημείο για τη συνάρτηση Rastrigin είναι κοντά στο $[0 0]$ μπορούμε να θέσουμε το **Initial Range** να είναι $[-1; 1]$. Ωστόσο όπως δείχνει αυτό το παράδειγμα, ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βρει το ελάχιστο ακόμη και με μια λιγότερο βέλτιστη επιλογή του **Initial Range**.

Δημιουργία της επόμενης γενιάς

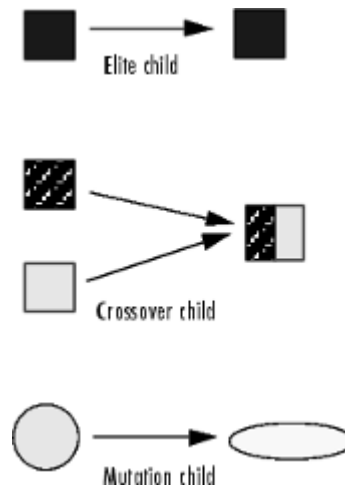
Σε κάθε βήμα ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον τρέχοντα πληθυσμό για να δημιουργήσει το παιδί που θα αποτελέσει την επόμενη γενιά. Ο αλγόριθμος επιλέγει μια ομάδα ατόμων από τον τρέχοντα πληθυσμό, τους αποκαλούμενους γονείς, που συνεισφέρουν τα γονίδια τους, δηλαδή τις τιμές των διανυσμάτων τους, στα παιδιά τους. Ο αλγόριθμος συνήθως διαλέγει παιδιά τα οποία έχουν καλύτερες fitness values ως γονείς. Μπορούμε να συγκεκριμενοποιήσουμε την συνάρτηση που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για την επιλογή των γονέων στο πεδίο **Selection Function** στις επιλογές για το **Selection**.

Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τρεις τύπους παιδιών για την επόμενη γενιά:

- Εκλεκτά παιδιά (elite children): είναι τα άτομα της τρέχουσας γενιάς με τις καλύτερες fitness values. Αυτά τα παιδιά επιβιώνουν αυτομάτως και περνούν στην επόμενη γενιά.

- Παιδιά που προέρχονται από διασταύρωση (crossover children): δημιουργούνται από το συνδυασμό των γονιδίων ενός ζεύγους γονέων.
- Παιδιά που προέρχονται από μετάλλαξη (mutation children): δημιουργούνται εισάγοντας τυχαίες αλλαγές, ή μεταλλάξεις σε ένα μόνο γονέα.

Οι τρεις τύποι παιδιών παρουσιάζονται σχηματικά στην επόμενη εικόνα:



Σχήμα 29: Τύποι παιδιών για τη δημιουργία επόμενης γενιάς

Δημιουργία παιδιών από διασταύρωση και μετάλλαξη

❖ Διασταύρωση (Crossover)

Ο αλγόριθμος δημιουργεί παιδιά από διασταύρωση συνδυάζοντας τα ζευγάρια γονέων του τρέχοντος πληθυσμού. Για κάθε συντεταγμένη του διανύσματος παιδιού, η προκαθορισμένη συνάρτηση διασταύρωσης διαλέγει τυχαία ένα γονίδιο από έναν από τους δύο γονείς, της ίδιας συντεταγμένης, και το αναθέτει στο παιδί. Για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς η προκαθορισμένη συνάρτηση διασταύρωσης δημιουργεί ένα παιδί ως τυχαίο σταθμισμένο μέσο όρο των δυο γονέων.

❖ Μετάλλαξη (mutation)

Ο αλγόριθμος δημιουργεί παιδιά από μετάλλαξη αλλάζοντας τυχαία τα γονίδια ενός γονέα. Εξ' ορισμού, για προβλήματα χωρίς περιορισμούς, ο αλγόριθμος προσθέτει ένα τυχαίο διάνυσμα από μια κατανομή Gauss στον γονέα. Για προβλήματα με γραμμικούς περιορισμούς, η δημιουργία του παιδιού παραμένει εφικτή.

Οι δύο αυτές διαδικασίες είναι ζωτικής σημασίας για το γενετικό αλγόριθμο. Η διασταύρωση δίνει τη δυνατότητα στον αλγόριθμο να επιλέξει τα καλύτερα γονίδια από διαφορετικά άτομα και να τα συνδυάσει έτσι ώστε να δημιουργηθούν ανώτερα παιδιά (superior children). Η μετάλλαξη συμβάλλει στην ποικιλομορφία ενός πληθυσμού και συνεπώς αυξάνει την πιθανότητα να γεννηθούν άτομα με καλύτερες ικανότητες (fitness values).

Συνθήκες τερματισμού για τον αλγόριθμο

Ο γενετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες για να καθορίσει το πότε θα τερματίσει:

- **Generations:** Ο αλγόριθμος σταματά όταν ο αριθμός γενιών γίνει ίσως με την τιμή της μεταβλητής **Generations**
- **Time limit:** Ο αλγόριθμος σταματά αφού τρέξει για ένα χρονικό διάστημα σε δευτερόλεπτα ίσο με το **Time limit**
- **Fitness limit:** Ο αλγόριθμος σταματά όταν η τιμή της συνάρτησης ικανότητας (fitness function) για το βέλτιστο σημείο στον τρέχοντα πληθυσμό είναι μικρότερη ή ίση με την τιμή του **Fitness limit**
- **Stall generations:** Ο αλγόριθμος σταματά όταν ο μέσος όρος της σχετικής αλλαγής στην τιμή της συνάρτησης ικανότητας των **Stall generations** είναι μικρότερος από το **Function tolerance**
- **Stall time limit:** Ο αλγόριθμος σταματά αν δεν υπάρχει βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος σε δευτερόλεπτα ισούται με το **Stall time limit**
- **Stall test:** Η συνθήκη για την καθυστέρηση (stall) είναι είτε average change είτε geometric weighted. Για τη geometric weighted, οι συναρτήσεις βάρους είναι $\frac{1}{2^n}$, όπου n είναι ο αριθμός των γενιών πριν από την τρέχουσα γενιά. Και οι δύο συνθήκες καθυστέρησης εφαρμόζονται στη σχετική αλλαγή της συνάρτησης ικανότητας για το **Stall generations**.
- **Function tolerance:** Ο αλγόριθμος τρέχει μέχρι που ο μέσος όρος της σχετικής αλλαγής στην τιμή της συνάρτησης ικανότητας των **Stall generations** είναι μικρότερος από το **Function tolerance**
- **Nonlinear constraint tolerance:** Το **Nonlinear constraint tolerance** δε χρησιμοποιείται ως κριτήριο τερματισμού. Χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί αν η επίλυση του προβλήματος είναι εφικτή με χρήση μη γραμμικών περιορισμών. Επιπλέον ένα σημείο είναι εφικτό με γραμμικούς περιορισμούς όταν η απόκλιση από τους περιορισμούς είναι μικρότερη της τετραγωνικής ρίζας της **Nonlinear constraint tolerance**

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν εκπληρώνεται οποιαδήποτε από τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Οι επιλογές των **Stall time limit** και **time limit** εμποδίζουν τον αλγόριθμο από το να τρέχει για πολύ χρόνο. Αν ο αλγόριθμος σταματήσει εξαιτίας μιας από αυτές τις συνθήκες, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε τα αποτελέσματα αυξάνοντας τις τιμές των **Stall time limit** και **time limit**.

Επιλογή (Selection)

Η συνάρτηση επιλογής γονέων για την επόμενη γενιά βασίζεται στις κλιμακούμενες τιμές τους από την κλιμακούμενη συνάρτηση ικανότητας. Ένα άτομο

μπορεί να επιλεγεί περισσότερες από μια φορές ως γονέας και σε αυτή την περίπτωση συνεισφέρει τα γονίδια του σε περισσότερα από ένα παιδιά. Η εξ' ορισμού επιλογή, η stochastic uniform, καθορίζει μια γραμμή στην οποία κάθε γονέας αντιστοιχίζεται σε ένα τμήμα της γραμμής με μήκος ανάλογο της κλιμακούμενης τιμής του. Ο αλγόριθμος μετακινείται κατά μήκος της γραμμής με σταθερού μεγέθους βήματα. Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος αναθέτει ένα γονέα από το τμήμα που κινείται.

Μια πιο ντετερμινιστική επιλογή είναι η Remainder, η οποία ακολουθεί δύο βήματα:

1. Στο πρώτο βήμα, η συνάρτηση επιλέγει γονείς ντετερμινιστικά σύμφωνα με το ακέραιο μέρος της κλιμακούμενης τιμής για κάθε άτομο. Για παράδειγμα αν η κλιμακούμενη τιμή ενός ατόμου είναι 2,3, η συνάρτηση επιλέγει αυτό το άτομο ως γονέα δύο φορές.
2. Στο δεύτερο βήμα, η συνάρτηση επιλογής επιλέγει επιπλέον γονείς χρησιμοποιώντας τα κλασματικά μέρη της κλιμακούμενης τιμής των ατόμων και μετακινείται κατά μήκος της γραμμής με σταθερά βήματα για την επιλογή των γονέων.

Σημειώνεται ότι αν τα κλασματικά μέρη της κλιμακούμενης τιμής είναι μηδενικά, πράγμα το οποίο μπορεί να συμβεί με τη χρήση του Top Scaling, η επιλογή είναι αποκλειστικά ντετερμινιστική.

Επιλογές αναπαραγωγής (Reproduction options)

Οι επιλογές αναπαραγωγής ελέγχουν πως ο γενετικός αλγόριθμος δημιουργεί τη νέα γενιά. Οι επιλογές είναι:

- **Elite count** : ο αριθμός των ατόμων με τις καλύτερες τιμές ικανότητας της τρέχουσας γενιά, που είναι εγγυημένο ότι θα επιβιώσουν και στην επόμενη γενιά. Αυτά τα άτομα καλούνται elite children. Η εξ' ορισμού τιμή του **Elite count** είναι 2. Όταν η **Elite count** είναι τουλάχιστον 1, η καλύτερη τιμή της ικανότητας μπορεί μόνο να μειωθεί από τη μια γενιά στην επόμενη. Αυτό είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα, από τη στιγμή που ο γενετικός αλγόριθμος ελαχιστοποιεί την συνάρτηση ικανότητας. Θέτοντας την **Elite count** σε ψηλή τιμή, τα πιο ικανά άτομα καταλήγουν να γίνονται κυρίαρχα, πράγμα το οποίο κάνει την αναζήτηση λιγότερο αποτελεσματική.
- **Crossover fraction**: το κλάσμα των ατόμων στην επόμενη γενιά, εκτός από τα elite children, που δημιουργούνται από διασταύρωση.

Μπορούμε να καθορίσουμε το πόσα παιδιά θα δημιουργήσει ο αλγόριθμος από κάθε είδος από τις τιμές των παραμέτρων **Elite count** και **Crossover fraction** που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Για περισσότερη κατανόηση αυτών των εννοιών παραθέτουμε ένα παράδειγμα :
Αν η **Population size** τεθεί ίση με 20, η **Elite count** είναι 2 και η **Crossover fraction** είναι 0,8 ο αριθμός των παιδιών από κάθε είδος στην επόμενη γενιά προκύπτει ως εξής:

- Υπάρχουν 2 elite children.
- Υπάρχουν 18 individuals, εκτός από τα elite children, οπότε ο αλγόριθμος στρογγυλοποιείται σε $0,8 \cdot 18 = 14,4 \rightarrow 14$ που μας δίνει τον αριθμό των crossover children

- Τα εναπομείναντα 4 individuals , εκτός από τα elite children, είναι τα mutation children.

7.5 Βελτιστοποίηση Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού

7.5.1 Επίλυση Προβλημάτων Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού με το γενετικό αλγόριθμο

Ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να επιλύσει προβλήματα όταν συγκεκριμένες μεταβλητές λαμβάνουν ακέραιες τιμές [64]-[65]. Δίνεται η `IntCon`, ένα διάνυσμα θετικών ακεραίων που περιέχει x στοιχεία τα οποία είναι ακέραια.

```
[x,fval,exitflag] = ga(fitnessfcn,nvars,A,b,[],[],...  
lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
```

Έστω ότι θέλουμε να περιορίσουμε τα $x(2)$ και τα $x(10)$ έτσι ώστε να παίρνουν ακέραιες τιμές. Σε αυτή την περίπτωση θέτουμε το `Intcon` στο `[2,10]`.

Βελτιστοποίηση της συνάρτησης Rastrigin με MILP

Το παράδειγμα που ακολουθεί περιγράφει τον τρόπο εύρεσης του ελάχιστου της συνάρτησης Rastrigin, με τον περιορισμό το πρώτο στοιχείο του x να είναι ακέραιο. Τα στοιχεία του x είναι επιπλέον περιορισμένα έτσι ώστε να βρίσκονται στην περιοχή $5\pi \leq x(1) \leq 20\pi, -20\pi \leq x(2) \leq -4\pi$

Οριοθέτηση του προβλήματος

```
lb = [5*pi,-20*pi];  
ub = [20*pi,-4*pi];
```

Ορισμός συνάρτησης για την κατασκευή διαγράμματος με σκοπό την παρακολούθηση της προόδου του Γ.Α.

```
opts = gaoptimset('PlotFcns',@gaplotbestf);
```

Κλήση του ga solver όπου το $x(1)$ παίρνει ακέραιες τιμές

```
rng(1,'twister') % for reproducibility  
IntCon = 1;  
[x,fval,exitflag] = ga(@rastriginsfcn,2,[],[],[],[],...  
lb,ub,[],IntCon,opts)  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
  
x =
```

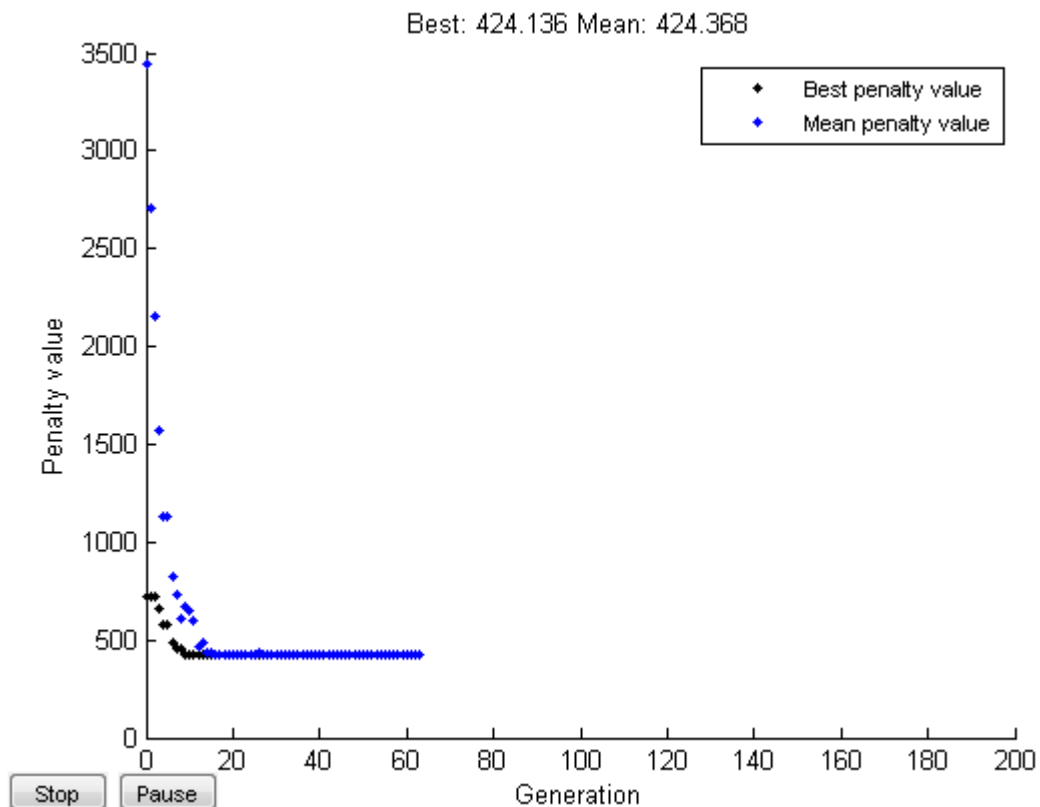
```
16.0000 -12.9325

fval =

424.1355

exitflag =

1
```



Σχήμα 30: Παράδειγμα διαγράμματος GA για εύρεση ελαχίστου συνάρτησης

Ο Γ.Α. συγκλίνει γρήγορα στη λύση.

Χαρακτηριστικά του ακέραίου ga solver

Υπάρχουν μερικοί περιορισμοί στους τύπους προβλημάτων που μπορεί να λύσει ο Γ.Α., όταν συμπεριλαμβάνονται γραμμικοί περιορισμοί.

- Χωρίς γραμμικούς περιορισμούς ισότητας. Πρέπει να έχουμε $A_{eq} = []$ και $b_{eq} = []$.
- Χωρίς μη γραμμικούς περιορισμούς ισότητας. Οποιαδήποτε συνάρτηση με μη γραμμικούς περιορισμούς πρέπει να επιστρέφει $[]$ για το μη γραμμικό περιορισμό ισότητας.

- Μόνο τύπος πληθυσμού doubleVector
- Χωρίς custom creation function (CreationFcn option), crossover function (CrossoverFcn option), mutation function (MutationFcn option), ή initial scores (InitialScores option). Αν παρέχουμε οποιαδήποτε από αυτές τις συναρτήσεις, ο Γ.Α. καταπατά τις ρυθμίσεις τους.
- Ο Γ.Α. χρησιμοποιεί μόνο την binary tournament selection function (SelectionFcn option), και καταπατά τις υπόλοιπες ρυθμίσεις.
- Χωρίς hybrid function. Ο Γ.Α. καταπατά οποιαδήποτε ρύθμιση της επιλογής για την HybridFcn .
- Ο Γ.Α. αγνοεί τις επιλογές για τις ParetoFraction, DistanceMeasureFcn, InitialPenalty, και PenaltyFactor.

Οι περιορισμοί της λίστας είναι κυρίως φυσικοί, όχι αυθαίρετοι. Για παράδειγμα:

- Υπάρχουν μη υβριδικές συναρτήσεις που υποστηρίζουν ακέραιους περιορισμούς. Συνεπώς ο Γ.Α. δε χρησιμοποιεί υβριδικές συναρτήσεις όταν υπάρχουν ακέραιοι περιορισμοί.
- Για να αποκτήσει ακέραιες μεταβλητές ο Γ.Α. χρησιμοποιεί ειδικές συναρτήσεις creation, crossover, και mutation.

Χωρίς περιορισμούς ισότητας

Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν περιορισμοί ισότητας και ακέραιοι περιορισμοί στο ίδιο πρόβλημα. Μπορούμε να προσπαθήσουμε να εργαστούμε γύρω από αυτό τον περιορισμό συμπεριλαμβάνοντας δύο ανισοτικούς περιορισμούς για κάθε ισोटικό περιορισμό. Για παράδειγμα στην προσπάθεια μας να εντάξουμε τον περιορισμό :

$$3x_1 - 2x_2 = 5 \quad (7.4)$$

Δημιουργούμε δύο ανισοτικούς περιορισμούς:

$$3x_1 - 2x_2 \geq 5 \quad (7.5)$$

$$3x_1 - 2x_2 \leq 5 \quad (7.6)$$

Για να γράψουμε αυτούς τους περιορισμούς στη μορφή $Ax \leq b$ πολλαπλασιάζουμε την πρώτη ανισότητα με -1:

$$-3x_1 + 2x_2 \leq -5 \quad (7.7)$$

Μπορούμε να προσπαθήσουμε να εντάξουμε τον περιορισμό ισότητας χρησιμοποιώντας $A = [3, -2; -3, 2]$ και $b = [5; -5]$.

Ωστόσο αυτή η διαδικασία μπορεί να αποτύχει, καθώς ο Γ.Α. συναντά δυσκολίες με ταυτόχρονα ακέραιους και γραμμικούς περιορισμούς.

Παράδειγμα: Ακέραιο Πρόβλημα με μη γραμμικούς περιορισμούς ισότητας

Αυτό το παράδειγμα επιχειρεί να εντοπίσει το ελάχιστο της συνάρτησης Ackley σε πέντε διαστάσεις με αυτούς τους περιορισμούς:

- Τα $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$ είναι ακέραιοι
- $norm(x) = 4$

Η συνάρτηση Ackley είναι δύσκολο να ελαχιστοποιηθεί. Προσθέτοντας ακέραιους και ισοτικούς περιορισμούς η δυσκολία αυτή αυξάνεται.

Για να εισάγουμε τους μη γραμμικούς ισοτικούς περιορισμούς, δίνουμε μια μικρή ανοχή tol που επιτρέπει στη $norm(x) = 4$ να είναι ανάμεσα στην tol 4. Χωρίς την ανοχή ο μη γραμμικός ισοτικός περιορισμός δεν ικανοποιείται, και ο solver δεν το συνειδητοποιεί όταν έχει εφικτή λύση.

1. Αντικαθιστούμε την έκφραση $norm(x) = 4$, με δύο ανισότητες της μορφής « \leq ».
$$norm(x) - 4 \leq 0$$
$$-(norm(x) - 4) \leq 0$$
(7.8)

2. Εισάγουμε στις ανισότητες τον όρο tol που αντιπροσωπεύει μια μικρή ανοχή (tolerance).
$$norm(x) - 4 - tol \leq 0$$
$$-(norm(x) - 4) - tol \leq 0$$
(7.9)

3. Γράφουμε μια συνάρτηση ανισοτικών περιορισμών που εφαρμόζει αυτές τις ανισώσεις:

```
function [c, ceq] = eqCon(x)

ceq = [];
rad = 4;
tol = 1e-3;
confcnval = norm(x) - rad;
c = [confcnval - tol; -confcnval - tol];
```

4. Θέτουμε τις επιλογές:

- `StallGenLimit = 50` –Επιτρέπει στον solver να προσπαθήσει για λίγο.
- `TolFun = 1e-10` –Συγκεκριμενοποιεί ένα πιο αυστηρό κριτήριο τερματισμού από ότι συνήθως.
- `Generations = 300` –Επιτρέπει περισσότερες γενιές από ότι συνήθως.
- `PlotFcns = @gaplotbestfun` –Παρακολούθηση της βελτιστοποίησης
- `opts = gaoptimset('StallGenLimit',50,'TolFun',1e-10,...`
`'Generations',300,'PlotFcns',@gaplotbestfun);`

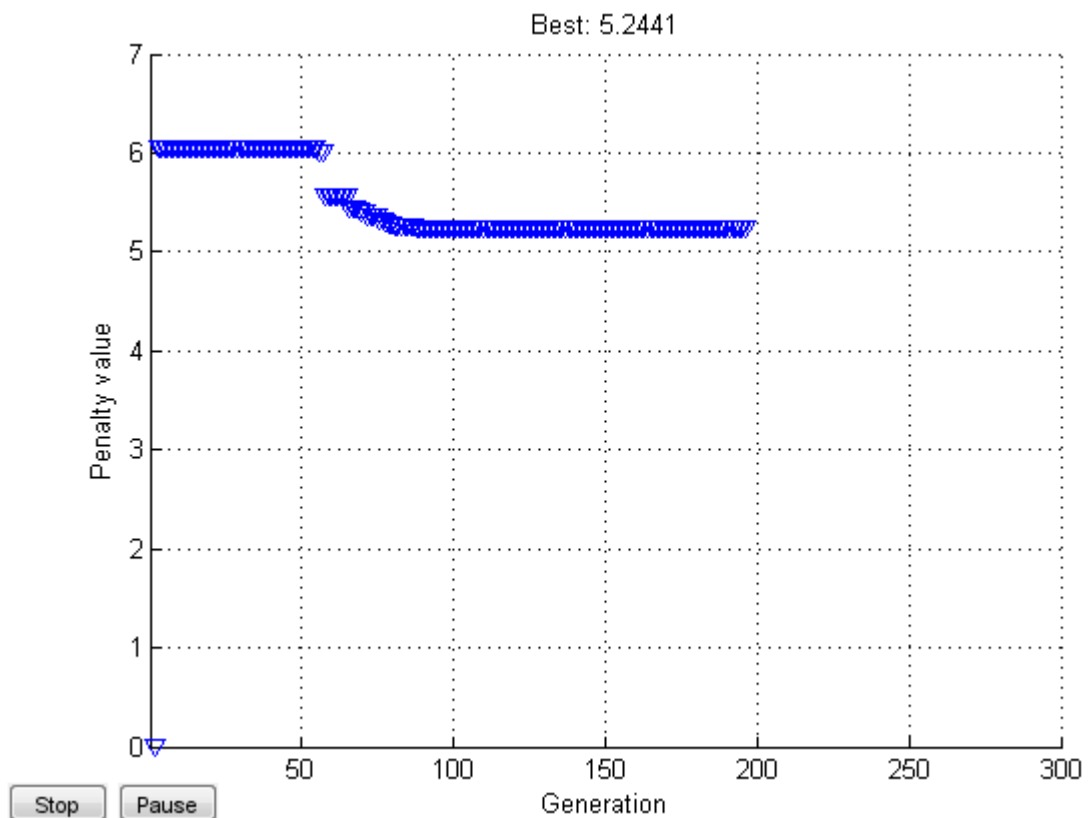
5. Θέτουμε τα άνω και κάτω όρια για να διευκολύνουμε το solver:

```
nVar = 5;  
lb = -5*ones(1,nVar);  
ub = 5*ones(1,nVar);
```

6. Επιλύουμε το πρόβλημα:

```
rng(2,'twister') % for reproducibility  
[x,fval,exitflag] = ga(@ackleyfcn,nVar,[],[],[],[], ...  
    lb,ub,@eqCon,[1 3 5],opts);
```

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun and constraint violation is less than options.TolCon.



Σχήμα 31: Παράδειγμα διαγράμματος GA για τη σύγκλιση στη λύση

7. Εξετάζουμε τη λύση:

```
x, fval, exitflag, norm(x)
```

```

x =
    0    0.0000   -2.0000   -1.7344    3.0000

fval =
    5.2441

exitflag =
    1

ans =
    4.0010

```

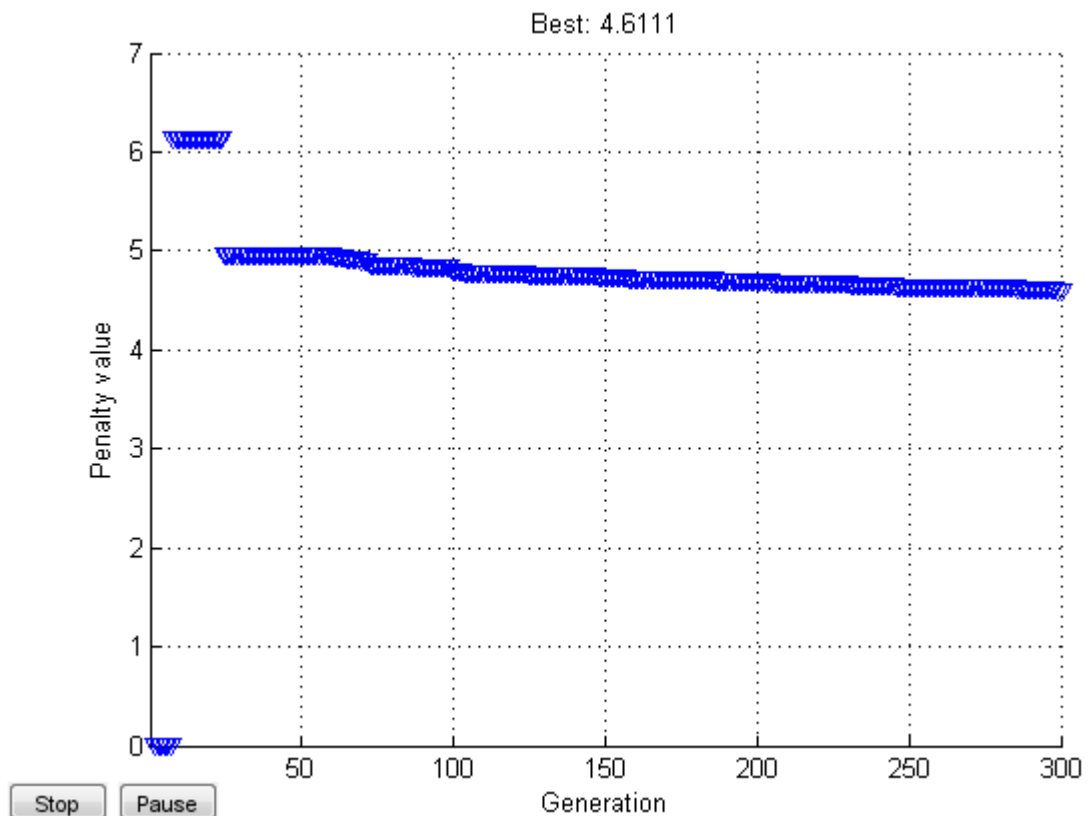
Τα περιττά στοιχεία του x είναι ακέραια, όπως έχει διευκρινιστεί και η $norm(x) = 4$ είναι εντός της δεδομένης ανοχής $1e-3$.

8. Παρότι $exitflag = 1$, η λύση δεν είναι global optimum. Τρέχουμε το πρόβλημα ξανά και εξετάζουμε τη λύση:

```

opts = gaoptimset(opts,'Display','off');
[x2,fval2,exitflag2] = ga(@ackleyfcn,nVar,[],[],[],[], ...
    lb,ub,@eqCon,[1 3 5],opts);

```



Σχήμα 32: Παράδειγμα διαγράμματος GA για τη σύγκλιση στη λύση- 2^η λύση

Εξετάζουμε τη δεύτερη λύση:

```
x2, fval2, exitflag2, norm(x2)

x2 =
    1.0000    3.1545    2.0000    1.0207    0

fval2 =
    4.6111

exitflag2 =
    0

ans =
    3.9991
```

Η δεύτερη επανάληψη δίνει καλύτερη λύση (χαμηλότερη τιμή στη συνάρτηση ικανότητας).

Και πάλι τα περιττά στοιχεία του x είναι ακέραια, όπως έχει διευκρινιστεί. Η $norm(x) = 4$ είναι εντός της δεδομένης ανοχής $1e-3$.

Σημειώνεται ότι αυτή η διαδικασία μπορεί να αποτύχει, καθώς ο Γ.Α. συναντά δυσκολίες με ταυτόχρονα ακέραιους και γραμμικούς περιορισμούς.

7.5.2 Ακέραιος GA αλγόριθμος

Για την επίλυση προβλημάτων ακεραίου προγραμματισμού με το γενετικό αλγόριθμο, πρέπει να γίνουν κάποιες τροποποιήσεις στο βασικό αλγόριθμο που έχει περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, για ακέραιο προγραμματισμό:

- Ειδικές συναρτήσεις δημιουργίας, μετάλλαξης και διασταύρωσης επιβάλλουν στις μεταβλητές να είναι ακέραιες [66].
- Ο γενετικός αλγόριθμος επιχειρεί να ελαχιστοποιήσει μια penalty function και όχι τη fitness function. [67]. Η penalty function περιέχει και έναν όρο για την περίπτωση που η λύση δεν είναι εφικτή (infeasibility). Αυτή η penalty function συνδυάζεται με μια δυαδική διαδικασία επιλογής των ατόμων των επόμενων γενιών (binary tournament selection) . Η τιμή της penalty function για ένα μέλος του πληθυσμού είναι:
 - Αν το μέλος δίνει εφικτή λύση, η penalty function είναι η fitness function.
 - Αν το μέλος δε δίνει εφικτή λύση, η penalty function είναι η μέγιστη τιμή της fitness function μεταξύ των ατόμων που δίνουν εφικτή λύση, αυξημένη κατά ένα άθροισμα των παραβιάσεων των περιορισμών που σχετίζονται με τα σημεία που δε δίνουν εφικτή λύση.

Αποτελέσματα και συμπεράσματα

8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που διεξήχθησαν για κάθε περίπτωση που επιλύει το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMUs. Πιο συγκεκριμένα τα υπό μελέτη δίκτυα είναι τα εξής : IEEE-14, IEEE-30, IEEE-57, IEEE-118 ζυγών.

Τα δεδομένα των δικτύων εισάγονται με την έκδοση του matpower 5.01b (Παράρτημα Α). Στις παραγράφους που ακολουθούν υπάρχουν και τα αναλυτικά κυκλώματα των προς μελέτη δικτύων.

Κατά την επίλυση του προβλήματος εξετάζονται οι εξής περιπτώσεις :

- Χωρίς δεδομένα συμβατικών μετρήσεων SCADA
- Με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος
- Με μηδενικές εγχύσεις ισχύος
- Απώλεια PMU

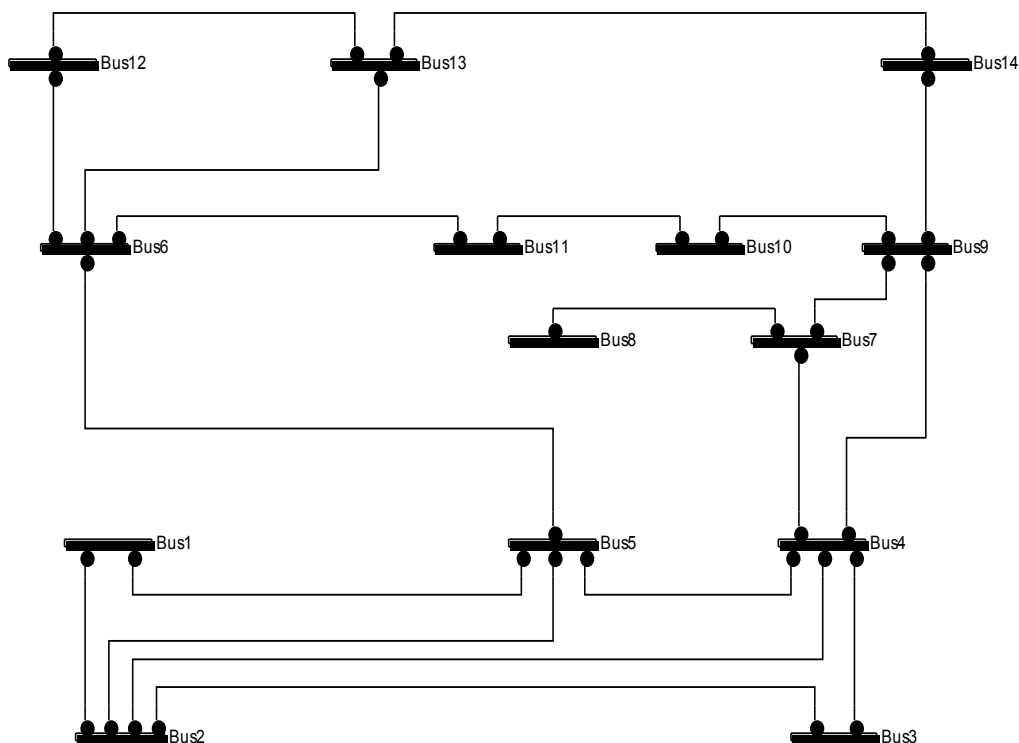
Η εκτέλεση των παραπάνω προγραμμάτων πραγματοποιήθηκε σε φορητό υπολογιστή με τα εξής χαρακτηριστικά :

- Επεξεργαστής : Intel® Core™ 2 Duo
- Μνήμη RAM : 4 GB
- Λειτουργικό Σύστημα: Windows 7, Service Pack 1, 32-bit
- Πρόγραμμα υλοποίησης των δοκιμών : MATLAB έκδοση 7.14.0.739– R2012a (win32-32 bit)
- Η σχεδίαση των κυκλωμάτων έγινε με το εργαλείο PSAT: Power Systems Analysis Toolbox του Federico Milano, έκδοση 2.1.6 [76].

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί μελέτη κάθε μίας περίπτωσης ξεχωριστά, εξαγωγή των αποτελεσμάτων και απεικόνιση τους σε πίνακες.

8.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 14 ζυγών

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 14 ζυγών, το μονογραμμικό κύκλωμα του οποίου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 14 ζυγούς και 20 κλάδους.



Σχήμα 33: Δίκτυο IEEE 14 Ζυγών

8.2.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 14

Αρχικά εξετάζουμε την περίπτωση που έχουμε μόνο μετρήσεις PMU και δεν έχουμε δεδομένα από μετρήσεις SCADA. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

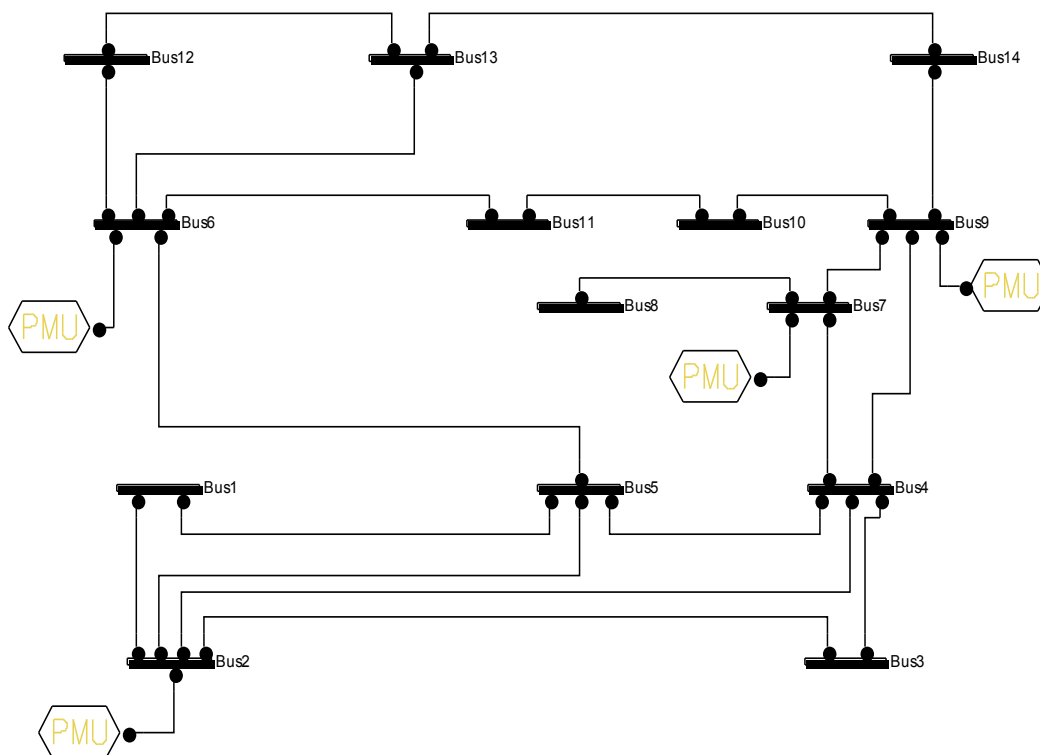
8.2.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 14 ζυγών με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση binprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 8: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	4	2, 6, 7, 9	19

Το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 4 PMUs στους ζυγούς 2, 6, 7 και 9.



Σχήμα 34: Δίκτυο IEEE 14 Ζυγών μετά την τοποθέτηση PMU-επίλυση με BIP

8.2.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 14 ζυγών με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 9: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	4	2, 8, 10, 13	14

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 4 PMUs στους ζυγούς 2, 8,10 και 13.

8.2.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 14 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	4	2, 6, 7, 9	19
		2, 8, 10, 13	14
		2, 7, 11, 13	16
		2, 7, 10, 13	16
		2, 6, 8, 9	17

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 4 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU [68].

8.2.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 14

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 11: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 14

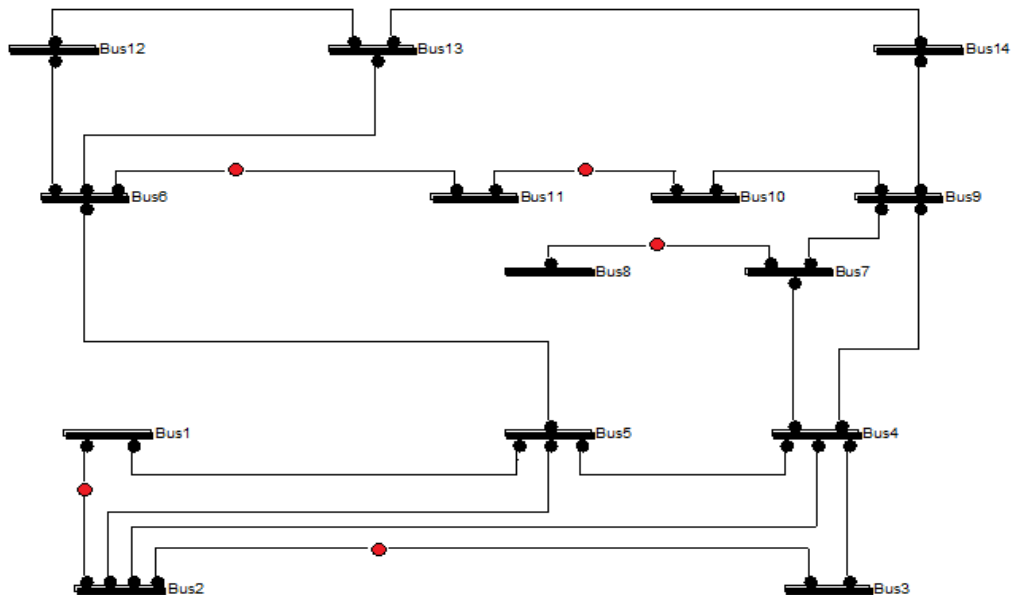
Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
14	Αριθμός PMUs	4	4	4
	Θέσεις PMUs	2, 6, 7, 9	2, 8, 10, 13	2, 6, 7, 9
	Δείκτης SORI	19	14	19

8.2.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 14

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 14 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήσεις ροής ισχύος στις γραμμές που βρίσκονται στη δεξιά στήλη του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 12: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Ροές Ισχύος Στις Γραμμές
14	1-2, 2-3, 6-11, 7-8, 10-11



Σχήμα 35: Δίκτυο IEEE 14 ζυγών με Μέτρηση Ροών Ισχύος

Πίνακας 13: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 14

Δίκτυο IEEE	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs
14	2	4, 13

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 2 PMUs τοποθετημένες στους ζυγούς 4 και 13. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις ροής ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 14: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ροές Ισχύος
14	Αριθμός PMUs	4	2
	Θέσεις PMUs	2, 6, 7, 9	4, 13

8.2.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 14

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 14 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήση μηδενικής έγχυσης ισχύος. Συγκεκριμένα το δίκτυο περιλαμβάνει ένα ζυγό μηδενικής έγχυσης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός Ζυγών Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος	Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος
14	1	7

Για την επίλυση του προβλήματος υιοθετείται ο Γενικευμένος Ακέραιος Προγραμματισμός που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

8.2.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 16: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 14

Δίκτυο IEEE	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	3	2, 6, 9	15

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 3 PMUs τοποθετημένες στους ζυγούς 2, 6 και 9. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 17: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
14	Αριθμός PMUs	4	3
	Θέσεις PMUs	2, 6, 7, 9	2, 6, 9
	Δείκτης SORI	19	15

8.2.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 18: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 14

Δίκτυο IEEE	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	3	2, 6, 9	15

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 3 PMUs τοποθετημένες στους ζυγούς 2, 6 και 9. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 19: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
14	Αριθμός PMUs	4	3
	Θέσεις PMUs	2, 8, 10, 13	2, 6, 9
	Δείκτης SORI	14	15

8.2.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 14

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 14 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 20: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 14

Δίκτυο IEEE	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	3	2, 6, 9	15

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options». Για τις διάφορες τιμές των «options» παίρνουμε την ίδια λύση.

Ωστόσο για άλλη μια φορά ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 21: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
14	Αριθμός PMUs	4	3
	Θέσεις PMUs	2, 6, 7, 9	2, 6, 9
	Δείκτης SORI	19	15

8.2.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 14

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 22: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 14

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
14	Αριθμός PMUs	3	3	3
	Θέσεις PMUs	2, 6, 9	2, 6, 9	2, 6, 9
	Δείκτης SORI	15	15	15

8.2.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 14

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μιας PMU.

Πίνακας 23: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 14

Δίκτυο IEEE	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
14	9	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13	39

Σε αυτή την περίπτωση για να παραμείνει το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο πρέπει ο αριθμός των PMUs να αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα εδώ ο αριθμός αυξάνεται από 4 PMUs, στην περίπτωση χωρίς συμβατικές μετρήσεις, σε 9 PMUs.

8.2.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 14

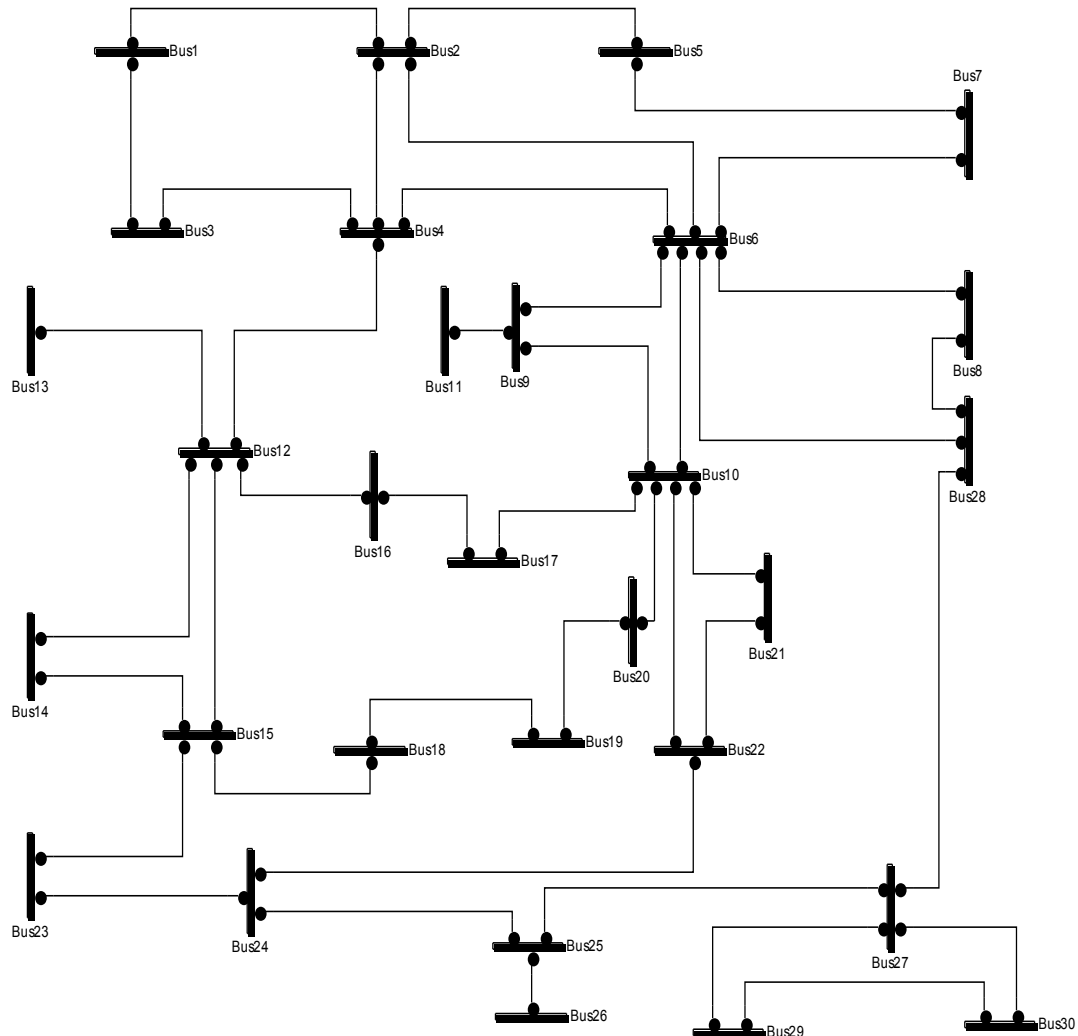
Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 24: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 14

# Ζυγών Δικτύου	Περίπτωση	BIP			MILP			GA		
		# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI
14	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	4	2, 6, 7, 9	19	4	2, 8, 10, 13	14	4	2,6,7,9	19
	Με Ροές Ισχύος	2	4, 13	10	-	-	-	-	-	-
	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης	3	2, 6, 9	15	3	2, 6, 9	15	3	2, 6, 9	15
	Απώλεια PMU	9	2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 13	39	-	-	-	-	-	-

8.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 30 ζυγών

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 30 ζυγών, το μονογραμμικό κύκλωμα του οποίου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 30 ζυγούς και 41 κλάδους.



Σχήμα 36: Δίκτυο IEEE 30 Ζυγών

8.3.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 30

Αρχικά εξετάζουμε την περίπτωση που έχουμε μόνο μετρήσεις PMU και δεν έχουμε δεδομένα από μετρήσεις SCADA. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

8.3.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 30 ζυγών με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	10	1, 7, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 27, 28	43

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 10 PMUs.

8.3.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 30 ζυγών με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	10	1, 7, 8, 10, 11, 12, 19, 23, 26, 29	35

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 10 PMUs.

8.3.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 30 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	10	3, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 24, 26, 29	43
		1, 2, 6, 10, 11, 12, 18, 24, 26, 30	43
		3, 5, 8, 9, 10, 12, 19, 24, 26, 29	38
		3, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 23, 26, 30	42
		1, 2, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27	50
		3, 5, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 28, 30	41
		3, 6, 7, 10, 11, 12, 19, 24, 25, 30	43
		1, 5, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 28, 30	42
		2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27	52
		1, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 19, 25, 29	44
1, 7, 8, 10, 11, 12, 15, 20, 25, 27	41		
3, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 19, 25, 30	44		

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 10 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

8.3.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 30

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 28: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
30	Αριθμός PMUs	10	10	10
	Θέσεις PMUs	1, 7, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 27, 28	1, 7, 8, 10, 11, 12, 19, 23, 26, 29	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27
	Δείκτης SORI	43	35	52

8.3.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 30

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 30 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήσεις ροής ισχύος στις γραμμές που βρίσκονται στη δεξιά στήλη του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 29: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Ροές Ισχύος Στις Γραμμές
30	1-2, 1-3, 2-4, 2-5, 2-6, 6-8, 9-10, 10-17, 12-4, 12-13, 12-14, 12-15, 12-16, 18-19, 20-19, 21-22, 23-24, 24-25, 27-29, 29-30

Πίνακας 30: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs
30	4	6, 9, 10, 15

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 4 PMUs τοποθετημένες στους ζυγούς 6, 9, 10 και 15. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις ροής ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 31: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ροές Ισχύος
30	Αριθμός PMUs	10	4
	Θέσεις PMUs	1, 7, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 27, 28	6, 9, 10, 15

8.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 30

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 30 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήση μηδενικής έγχυσης ισχύος. Συγκεκριμένα το δίκτυο περιλαμβάνει 5 ζυγούς μηδενικής έγχυσης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 32: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός Ζυγών Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος	Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος
30	5	6, 9, 11, 25, 28

Για την επίλυση του προβλήματος υιοθετείται ο Γενικευμένος Ακέραιος Προγραμματισμός που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα

8.3.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP– Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 33: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	7	1, 7, 10, 12, 19, 24, 29	29

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 7 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 34: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
30	Αριθμός PMUs	10	7
	Θέσεις PMUs	1, 7, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 27, 28	1, 7, 10, 12, 19, 24, 29
	Δείκτης SORI	43	29

8.3.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 35: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	7	1, 5, 10, 12, 19, 24, 27	31

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 7 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
30	Αριθμός PMUs	10	7
	Θέσεις PMUs	1, 7, 8, 10, 11, 12, 19, 23, 26, 29	1, 5, 10, 12, 19, 24, 27
	Δείκτης SORI	35	31

8.3.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 30

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 30 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 37: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	7	2, 4, 10, 12, 19, 24, 29	33
		2, 3, 10, 12, 19, 23, 27	32
		1, 7, 10, 12, 18, 24, 27	31
		3, 7, 10, 12, 19, 24, 27	31
		2, 3, 10, 12, 18, 23, 27	32
		2, 4, 10, 12, 18, 24, 27	35
		1, 2, 10, 12, 19, 24, 27	33
		2, 3, 10, 12, 18, 24, 27	33
		2, 3, 10, 12, 19, 24, 27	33
		3, 7, 10, 12, 18, 24, 27	31
		2, 3, 10, 12, 19, 24, 29	31
		1, 7, 10, 12, 19, 24, 29	29
		1, 2, 10, 12, 18, 24, 27	33
		2, 4, 10, 12, 19, 24, 27	35
		3, 5, 10, 12, 19, 23, 27	30
2, 4, 10, 12, 19, 24, 29	33		

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 7 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI* (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

Πίνακας 38: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
30	Αριθμός PMUs	10	7
	Θέσεις PMUs	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27	2, 4, 10, 12, 19, 24, 27
	Δείκτης SORI	52	35

8.3.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 30

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 39: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
30	Αριθμός PMUs	7	7	7
	Θέσεις PMUs	1, 7, 10, 12, 19, 24, 29	1, 5, 10, 12, 19, 24, 27	2, 4, 10, 12, 19, 24, 27
	Δείκτης SORI	29	31	35

* Στην περίπτωση που είχαμε περισσότερες από μια λύσεις με τον ίδιο δείκτη SORI επιλέξαμε μια ενδεικτικά η οποία τοποθετήθηκε στους επόμενους πίνακες σύγκρισης.

8.3.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 30

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μιας PMU.

Πίνακας 40: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 30

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
30	21	1, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30	74

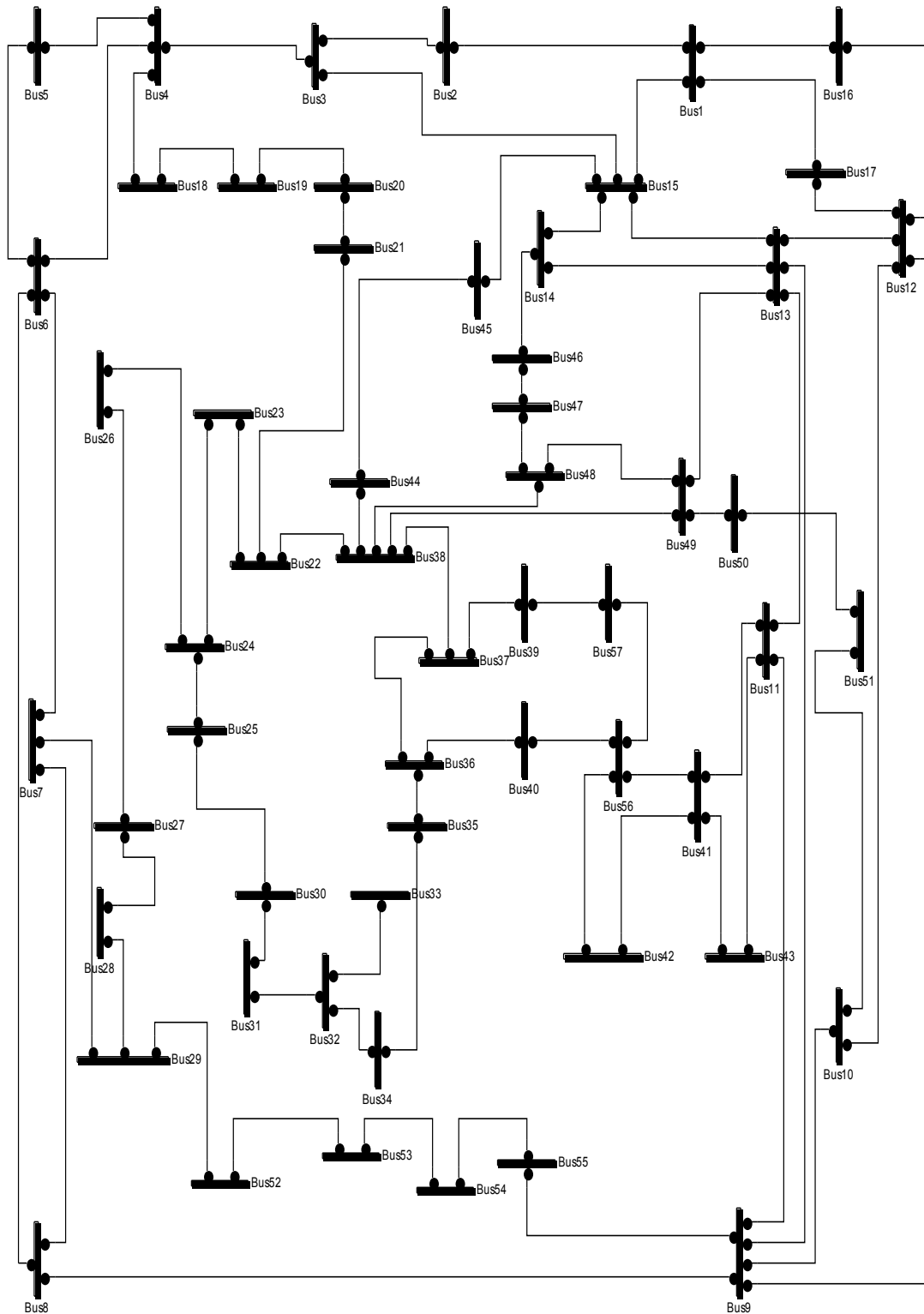
Σε αυτή την περίπτωση για να παραμείνει το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο πρέπει ο αριθμός των PMUs να αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα εδώ ο αριθμός αυξάνεται από 10 PMUs, στην περίπτωση χωρίς συμβατικές μετρήσεις, σε 21 PMUs.

8.3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 30

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

8.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 57 ζυγών

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 57 ζυγών, το μονογραμμικό κύκλωμα του οποίου παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 57 ζυγούς και 78 κλάδους.



Σχήμα 37: Δίκτυο IEEE 57 Ζυγών

8.4.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 57

Αρχικά εξετάζουμε την περίπτωση που έχουμε μόνο μετρήσεις PMU και δεν έχουμε δεδομένα από μετρήσεις SCADA. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα

8.4.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 57

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 57 ζυγών με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 42: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	17	1, 4, 6, 13, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	67

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 17 PMUs.

8.4.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 57

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 57 ζυγών με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 43: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	17	1, 4, 9, 14, 20, 23, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 47, 50, 54	65

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 17 PMUs.

8.4.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 57

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 57 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 44: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	17	1, 4, 9, 14, 19, 22, 25, 26, 29, 32, 36, 41, 44, 47, 50, 53, 57	66
		1, 4, 9, 20, 24, 26, 29, 31, 32, 36, 38, 41, 44, 46, 51, 54, 57	68
		1, 4, 9, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 54	68
		1, 4, 9, 20, 24, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 41, 45, 46, 51, 54, 57	68
		1, 4, 9, 10, 20, 23, 26, 29, 30, 32, 36, 39, 41, 45, 46, 49, 54	67
		1, 4, 9, 20, 24, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 51, 54	68
		1, 4, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 53	71
		1, 4, 9, 19, 22, 26, 29, 30, 32, 36, 39, 41, 45, 46, 49, 50, 54	67

Πίνακας 44: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 57 (συνέχεια)

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	17	1, 6, 9, 15, 19, 21, 24, 25, 28, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53	67
		1, 4, 9, 20, 24, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 44, 46, 50, 54	68
		1, 4, 9, 20, 24, 28, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 44, 46, 50, 54	68
		1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 39, 41, 47, 51, 54	71
		1, 4, 9, 20, 24, 28, 29, 31, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 50, 54	68
		1,4,9,20,24,27,29, 31,32,36,38,41, 45,46,51,54,57	68
		1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 47, 51, 53, 57	71
		1, 4, 9, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 51, 54	68
		1, 4, 9, 15, 20, 24, 27, 29, 30, 32, 36, 38, 41, 46, 51, 54, 57	71
		1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 51, 54	71
1, 4, 9, 20, 24, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 45, 46, 51, 53	68		

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 17 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τις λύσεις με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύσεις με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

8.4.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 57

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 45: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
57	Αριθμός PMUs	17	17	17
	Θέσεις PMUs	1, 4, 6, 13, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	1, 4, 9, 14, 20, 23, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 47, 50, 54	1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 51, 54
	Δείκτης SORI	67	65	71

8.4.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 57

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 57 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήσεις ροής ισχύος στις γραμμές που βρίσκονται στη δεξιά στήλη του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 46: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Ροές Ισχύος Στις Γραμμές
57	1-2, 1-15, 1-16, 1-17, 3-15, 4-5, 4-6, 4-18, 7-29, 8-9, 9-10, 10-12, 10-51, 11-41, 11-43, 12-13, 14-46, 19-20, 20-21, 22-38, 23-24, 24-25, 24-26, 27-26, 28-27, 29-52, 30-31, 32-34, 34-35, 36-35, 38-37, 38-44, 38-48, 40-36, 41-42, 42-56, 47-46, 49-38, 51-50, 53-54

Πίνακας 47: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs
57	6	8, 15, 22, 32, 55, 57

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 6 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις ροής ισχύος μείωσε σημαντικά τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 48: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ροές Ισχύος
57	Αριθμός PMUs	17	6
	Θέσεις PMUs	1, 4, 6, 13, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	8, 15, 22, 32, 55, 57

8.4.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 57

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 57 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήση μηδενικής έγχυσης ισχύος. Συγκεκριμένα το δίκτυο περιλαμβάνει 15 ζυγούς μηδενικής έγχυσης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 49: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός Ζυγών Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος	Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος
57	15	4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48

Για την επίλυση του προβλήματος υιοθετείται ο Γενικευμένος Ακέραιος Προγραμματισμός που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

8.4.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 57

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 50: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	13	1, 4, 13, 20, 25, 26, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	53

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 13 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 51: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
57	Αριθμός PMUs	17	13
	Θέσεις PMUs	1, 4, 6, 13, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	1, 4, 13, 20, 25, 26, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56
	Δείκτης SORI	67	53

8.4.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 57

Πίνακας 52: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	13	1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	53

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 13 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 53: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
57	Αριθμός PMUs	17	13
	Θέσεις PMUs	1, 4, 9, 14, 20, 23, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 47, 50, 54	1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56
	Δείκτης SORI	65	53

8.4.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 57

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 57 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 54: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	13	1, 4, 13, 20, 24, 29, 31, 32, 37, 48, 51, 54, 56	54
		1, 4, 13, 20, 23, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	52
		1, 6, 9, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 46, 51, 53, 56	54
		1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 42, 51, 53	53
		1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 51, 53, 56	55
		1, 4, 13, 20, 25, 27, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	53
		1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 50, 53, 56	55
		1, 4, 13, 19, 23, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	52
		1, 6, 13, 19, 23, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	52

Πίνακας 54: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 57 (συνέχεια)

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	13	1, 4, 13, 20, 24, 29, 30, 32, 37, 47, 51, 54, 56	53
		1, 5, 13, 19, 23, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	50
		1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	54
		1, 4, 13, 20, 23, 25, 29, 32, 37, 46, 51, 54, 56	52
		1, 6, 13, 19, 23, 25, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	53
		1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	53

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 13 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

Πίνακας 55: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
57	Αριθμός PMUs	17	13
	Θέσεις PMUs	1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 51, 54	1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 50, 53, 56
	Δείκτης SORI	71	55

8.4.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 57

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 56: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγορίθμους στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
57	Αριθμός PMUs	13	13	13
	Θέσεις PMUs	1, 4, 13, 20, 25, 26, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 51, 53, 56
	Δείκτης SORI	53	53	55

8.4.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 57

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μιας PMU.

Πίνακας 57: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 57

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
57	33	1, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 41, 43, 45, 46, 47, 50, 51, 53, 54, 56, 57	127

Σε αυτή την περίπτωση για να παραμείνει το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο πρέπει ο αριθμός των PMUs να αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα εδώ ο αριθμός αυξάνεται από 17 PMUs, στην περίπτωση χωρίς συμβατικές μετρήσεις, σε 33 PMUs.

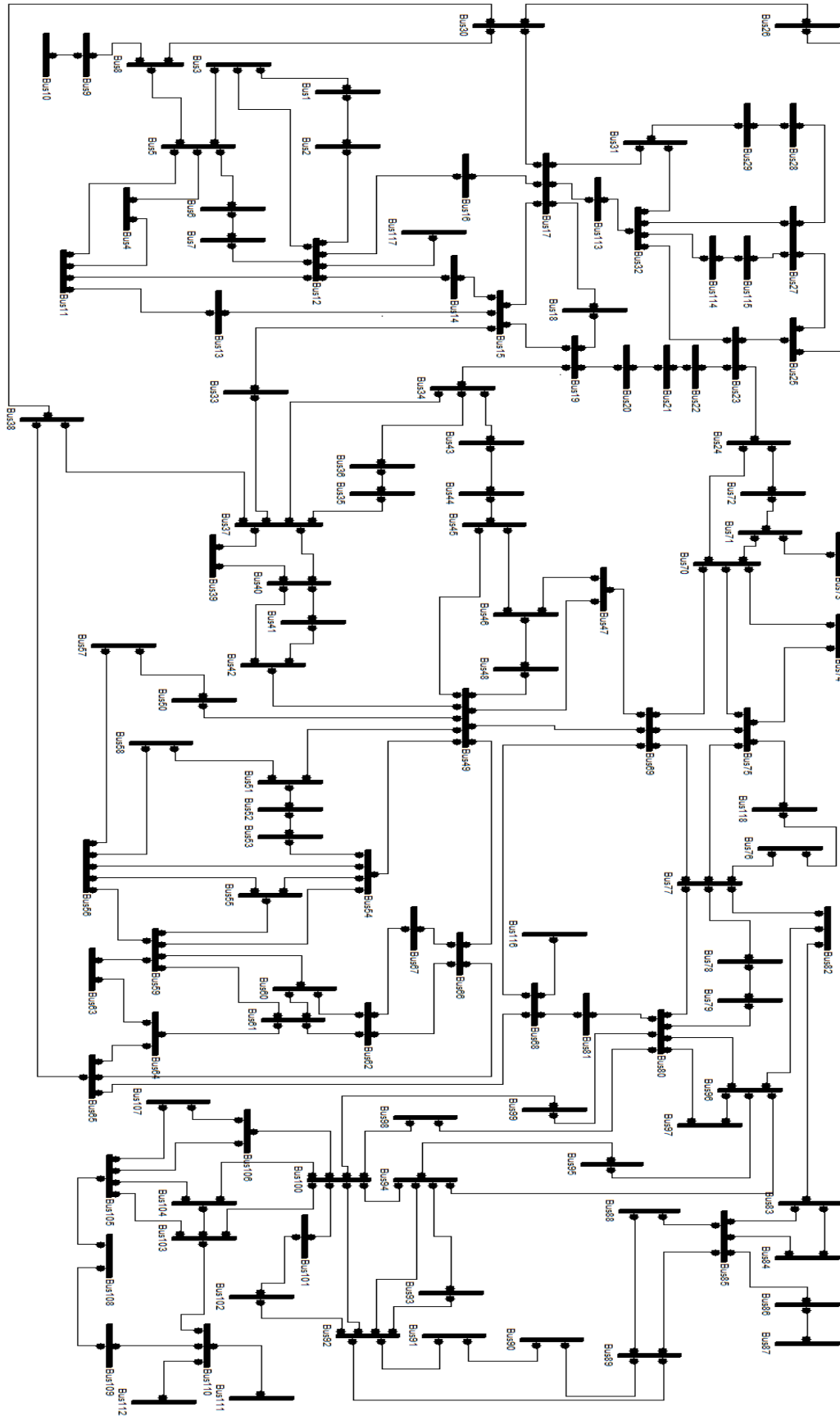
8.4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 57

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 58: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 57

# Ζυγών Δικτύου	Περίπτωση	BIP			MILP			GA		
		# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI
57	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	17	1, 4, 6, 13, 20, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 39, 41, 45, 47, 51, 54	67	17	1, 4, 9, 14, 20, 23, 25, 26, 29, 32, 36, 39, 41, 44, 47, 50, 54	65	17	1, 6, 9, 15, 19, 22, 25, 27, 29, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 51, 54	71
	Με Ροές Ισχύος	6	8, 15, 22, 32, 55, 57	24	-	-	-	-	-	-
	Με Ζυγούς Μηδενικής Έγχυσης	13	1, 4, 13, 20, 25, 26, 29, 32, 37, 48, 51, 54, 56	53	13	1, 4, 13, 20, 24, 25, 29, 32, 37, 47, 51, 54, 56	53	13	1, 6, 9, 14, 19, 25, 27, 32, 37, 38, 51, 53, 56	55
	Απώλεια PMU	33	1, 3, 4, 6, 9, 12, 15, 19, 20, 22, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 38, 39, 41, 43, 45, 46, 47, 50, 51, 53, 54, 56, 57	127	-	-	-	-	-	-

8.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης στο δίκτυο IEEE 118 ζυγών



Σχήμα 38: Δίκτυο IEEE 118 Ζυγών

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 118 ζυγών, το μονογραμμικό κύκλωμα του οποίου παρουσιάζεται στο προηγούμενο σχήμα. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από 118 ζυγούς και 179 κλάδους.

8.5.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις – Δίκτυο IEEE 118

Αρχικά εξετάζουμε την περίπτωση που έχουμε μόνο μετρήσεις PMU και δεν έχουμε δεδομένα από μετρήσεις SCADA. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

8.5.1.1 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 118 ζυγών με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση `binprog`, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 59: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με BIP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	32	3, 7, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 53, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114	157

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 32 PMUs.

8.5.1.2 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 118 ζυγών με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση `cbc`, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 60: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με MILP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	32	2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 24, 26, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 73, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 114	153

Το αποτέλεσμα ώστε το σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο είναι η τοποθέτηση 32 PMUs.

8.5.1.3 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 118 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 61: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	32	1, 6, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 53, 56, 62, 64, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110, 114, 116	155
		2, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114, 116	158

Πίνακας 61: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με GA στο IEEE 118 (συνέχεια)

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	32	1, 5, 10, 11, 12, 17, 21, 23, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 102, 105, 110, 115	159
		2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 23, 26, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110, 115	160
		1, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110, 115	161
		1, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114	162
		1, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110, 114	161
		2, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 23, 25, 29, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 71, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 115	161

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 32 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

8.5.1.4 Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 118

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 62: Αποτελέσματα προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις με τους 3 αλγορίθμους στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
118	Αριθμός PMUs	32	32	32
	Θέσεις PMUs	3, 7, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 53, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114	2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 24, 26, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 73, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 114	1, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114
	Δείκτης SORI	157	153	162

8.5.2 Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος – Δίκτυο IEEE 118

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 118 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήσεις ροής ισχύος στις γραμμές που βρίσκονται στη δεξιά στήλη του παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 63: Μετρήσεις Ροής Ενεργού Ισχύος στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Ροές Ισχύος Στις Γραμμές
118	1-3, 5-6, 11-13, 16-17, 20-21, 22-23, 23-25, 27-28, 29-31, 34-43, 35-36, 41-42, 44-45, 46-48, 50-57, 51-52, 53-54, 56-58, 60-62, 65-66, 66-67, 68-81, 71-73, 75-118, 76-77, 77-82, 78-89, 86-87, 90-91, 95-96, 100-101, 114-115

Πίνακας 64: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ροές ισχύος στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs
118	18	9, 11, 12, 19, 24, 30, 32, 37, 49, 59, 65, 68, 70, 80, 85, 92, 105, 110

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 18 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις ροής ισχύος μείωσε σημαντικά τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 65: Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με μετρήσεις ροής ισχύος, με BIP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ροές Ισχύος
118	Αριθμός PMUs	32	18
	Θέσεις PMUs	3, 7, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 53, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114	9, 11, 12, 19, 24, 30, 32, 37, 49, 59, 65, 68, 70, 80, 85, 92, 105, 110

8.5.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος – Δίκτυο IEEE 118

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το δίκτυο IEEE 118 ζυγών με τη διαφορά ότι εκτός από μετρήσεις PMUs τώρα έχουμε και μετρήση μηδενικής έγχυσης ισχύος.

Συγκεκριμένα το δίκτυο περιλαμβάνει 10 ζυγούς μηδενικής έγχυσης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 66: Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός Ζυγών Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος	Ζυγοί Μηδενικής Έγχυσης Ισχύος
118	10	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81

Για την επίλυση του προβλήματος υιοθετείται ο Γενικευμένος Ακέραιος Προγραμματισμός που περιγράφηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 6. Επιλύουμε το πρόβλημα βέλτιστης τοποθέτησης PMU με τρεις διαφορετικές μεθόδους και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα.

8.5.3.1 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με BIP – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του BIP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση bintprog, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 67: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	28	3, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114	143

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 28 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 68: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με BIP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
118	Αριθμός PMUs	32	28
	Θέσεις PMUs	3, 7, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 53, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114	3, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114
	Δείκτης SORI	157	143

8.5.3.2 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με MILP – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου με τη μέθοδο του MILP και συγκεκριμένα με τη συνάρτηση cbc, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 69: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	28	3, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 115	140

Η προσομοίωση έδωσε αποτέλεσμα 28 PMUs. Επομένως ο συνδυασμός μετρήσεων PMUs με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος μείωσε τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται ώστε να είναι το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο.

Πίνακας 70: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με MILP στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
118	Αριθμός PMUs	32	28
	Θέσεις PMUs	2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 24, 26, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 73, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 114	3, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 115
	Δείκτης SORI	153	140

8.5.3.3 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος, επίλυση με GA – Δίκτυο IEEE 118

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του δικτύου 118 ζυγών με τη μέθοδο του γενετικού αλγορίθμου, η οποία περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 71: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	28	1, 8, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 114	143
		1, 8, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 114	146
		1, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 28, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110	149

Πίνακας 71: Αποτελέσματα προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 118 (συνέχεια)

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	28	1, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 29, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110	148
		2, 8, 12, 13, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110, 115	140
		3, 9, 12, 15, 17, 21, 27, 29, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 66, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110	149
		3, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 29, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 101, 105, 110	149
		3, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 91, 94, 101, 105, 110, 115	144
		1, 9, 11, 12, 17, 21, 27, 29, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110	144
		3, 8, 12, 15, 17, 21, 23, 29, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 87, 91, 94, 102, 105, 110, 115	146

Στην συγκεκριμένη περίπτωση επαναλαμβάνουμε την εκτέλεση του αλγορίθμου για διάφορες τιμές των παραμέτρων «options» με αποτέλεσμα να

πάρουμε διαφορετικές εκδοχές τοποθέτησης, με ελάχιστο αριθμό 28 PMUs. Από αυτές τις λύσεις επιλέγουμε τη λύση με το μεγαλύτερο δείκτη SORI (λύση με έντονη γραφή), δηλαδή τη λύση που εξασφαλίζει μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Η λύση αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μεγαλύτερο μέρος του δικτύου παραμένει παρατηρήσιμο σε περίπτωση απώλειας μιας PMU.

Πίνακας 72: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης χωρίς συμβατικές μετρήσεις και με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με GA στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης
118	Αριθμός PMUs	32	28
	Θέσεις PMUs	1, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114	1, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 28, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110
	Δείκτης SORI	162	149

8.5.3.4 Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος. Σύγκριση αποτελεσμάτων – Δίκτυο IEEE 118

Στον πίνακα που ακολουθεί συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τις τρεις διαφορετικές μεθόδους.

Πίνακας 73: Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης, με τους τρεις αλγόριθμους στο IEEE 118

# Ζυγών Δικτύου	Μέθοδος	BIP	MILP	GA
118	# PMUs	28	28	28
	Θέσεις PMUs	3, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114	3, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 115	1, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 28, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110
	Δείκτης SORI	143	140	149

8.5.4 Περίπτωση απώλειας PMU – Δίκτυο IEEE 118

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε περίπτωση που έχουμε απώλεια μιας PMU.

Πίνακας 74: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίπτωση απώλειας PMU στο IEEE 118

Αριθμός Ζυγών Δικτύου	Αριθμός PMUs	Θέσεις PMUs	Δείκτης SORI
118	68	2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 40, 42, 44, 45, 46, 49, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 62, 64, 65, 67, 68, 70, 71, 73, 75, 77, 79, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 91, 92, 94, 96, 100, 102, 105, 107, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 118	299

Σε αυτή την περίπτωση για να παραμείνει το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο πρέπει ο αριθμός των PMUs να αυξηθεί σημαντικά. Συγκεκριμένα εδώ ο αριθμός αυξάνεται από 32 PMUs, στην περίπτωση χωρίς συμβατικές μετρήσεις, σε 68 PMUs.

8.5.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το δίκτυο IEEE 118

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν από όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 75: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 118

# Ζυγών Δικτύου	Περίπτωση	BIP			MILP			GA		
		# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI
118	Χωρίς Συμβατικές Μετρήσεις	32	3, 7, 9, 11, 12, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 53, 56, 62, 63, 68, 70, 71, 76, 79, 85, 86, 89, 92, 96, 100, 105, 110, 114	157	32	2, 5, 10, 12, 15, 17, 21, 24, 26, 28, 34, 37, 41, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 73, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 114	153	32	1, 5, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 68, 70, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 102, 105, 110, 114	162
	Με Ροές Ισχύος	18	9, 11, 12, 19, 24, 30, 32, 37, 49, 59, 65, 68, 70, 80, 85, 92, 105, 110	108	-	-	-	-	-	
	Με Ζυγούς Μηδενικής έγχυσης	28	3, 9, 12, 15, 17, 21, 25, 28, 34, 40, 45, 49, 53, 56, 61, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114	143	28	3, 9, 12, 15, 17, 21, 23, 28, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 64, 71, 75, 77, 80, 85, 87, 90, 94, 101, 105, 110, 115	140	28	1, 8, 12, 15, 17, 21, 27, 28, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 59, 62, 70, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 102, 105, 110	149

Πίνακας 75: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το IEEE 118 (συνέχεια)

# Ζυγών Δικτύου	Περίπτωση	BIP			MILP			GA		
		# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI	# PMUs	Θέσεις PMUs	SORI
118	Απώλεια PMU	68	2, 3, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 15, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 34, 36, 37, 40, 42, 44, 45, 46, 49, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 62, 64, 65, 67, 68, 70, 71, 73, 75, 77, 79, 80, 84, 85, 86, 87, 89, 91, 92, 94, 96, 100, 102, 105, 107, 109, 110, 111, 112, 115, 116, 117, 118	299	-	-	-	-	-	-

8.6 Σχόλια και συμπεράσματα

Στις παραγράφους 8.2 – 8.5.5 έγινε μια εκτενής παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις διάφορες δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα οδηγούμαστε σε κάποια συμπεράσματα για την επιλογή της βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης του αριθμού των PMUs έτσι ώστε ένα σύστημα να είναι πλήρως παρατηρήσιμο.

Αρχικά, όπως προέκυψε από όλες τις δοκιμές, ο συνδυασμός μετρήσεων από PMUs με συμβατικές μετρήσεις από SCADA μειώνει σημαντικά τον αριθμό των PMUs που απαιτούνται για την επίτευξη πλήρους παρατηρησιμότητας. Πιο συγκεκριμένα ο ελάχιστος αριθμός PMUs προέκυψε για όλα τα δίκτυα στην περίπτωση όπου συμπεριλαμβάνονται μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος σε κάποιες από τις γραμμές του εκάστοτε δικτύου. Αντίθετα στην περίπτωση που θέλαμε το δίκτυο να παραμένει πλήρως παρατηρήσιμο μετά από απώλεια μιας PMU, ο αριθμός PMUs που απαιτούνται ήταν υπερδιπλάσιος με αποτέλεσμα να αυξάνεται σημαντικά και το κόστος.

Όσον αφορά στη σύγκριση των τριών αλγορίθμων, BIP, MILP και GA, παρατηρούμε ότι και οι τρεις αλγόριθμοι δίνουν τον ίδιο ελάχιστο αριθμό PMUs σε κάθε ερώτημα. Για να αποφανθούμε ποια από αυτές τις λύσεις είναι βέλτιστη θα πρέπει να εξετάσουμε τα κριτήρια με τα οποία θα προκύψει αυτή η λύση. Αν έχουμε ως κριτήριο το πόσο γρήγορα συγκλίνει στη λύση ο αλγόριθμος, τότε θα εστιάσουμε στις λύσεις των BIP και MILP, η εύρεση των οποίων διαρκεί από κλάσματα του δευτερολέπτου ως και λίγα δευτερόλεπτα. Αντίθετα ο GA, ειδικά στην περίπτωση του δικτύου IEEE 118, απαιτεί ακόμη και μερικά λεπτά για την εύρεση λύσης. Αν έχουμε ως κριτήριο την περίσσεια παρατηρησιμότητας τότε βέλτιστη λύση είναι αυτή με το μεγαλύτερο δείκτη SORI. Ωστόσο στην τοποθέτηση των PMUs σημαντικό ρόλο παίζουν και οι φυσικές συνθήκες και περιορισμοί που προκύπτουν σε ένα δίκτυο και οι οποίες μας εμποδίζουν να τοποθετήσουμε τις PMUs οπουδήποτε επιθυμούμε. Για παράδειγμα στο δίκτυο 14 ζυγών εξετάζοντας την περίπτωση χωρίς συμβατικές μετρήσεις και εφαρμόζοντας BIP καταλήξαμε στη λύση 2, 6, 7, 9. Η λύση αυτή έδωσε δείκτη $SORI = 19$, ο οποίος είναι ο μέγιστος. Παρ'όλα αυτά στην πράξη μπορεί να μην μπορούμε να τοποθετήσουμε PMU στο ζυγό 7 λόγω περιορισμών που προκύπτουν από το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Σε αυτό το σημείο αναδεικνύεται η χρησιμότητα των πολλαπλών λύσεων που προέκυψαν από τις διάφορες δοκιμές στο GA. Αυτή η πολλαπλότητα λύσεων μας δίνει τη δυνατότητα να επιλέξουμε τη λύση που να μην δίνει ελάχιστο αριθμό PMUs και ένα μεγάλο δείκτη SORI, αλλά ταυτόχρονα είναι και επιτρεπτή από τους φυσικούς περιορισμούς του δικτύου. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μπορούμε να επιλέξουμε τη λύση 2, 6, 8, 9 η οποία έχει μεγαλύτερο δείκτη SORI από τη λύση 2, 8, 10, 13 του MILP και ταυτόχρονα δεν επηρεάζεται από τον περιορισμό του τηλεπικοινωνιακού δικτύου που αφορά το ζυγό 7.

Ανακεφαλαιώνοντας, η εργασία αυτή στοχεύει στο να αναδείξει την δυνατότητα εύρεσης πολλαπλών λύσεων για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU. Με την ύπαρξη πολλαπλών λύσεων γινόμαστε πιο ευέλικτοι στην επιλογή των θέσεων τοποθέτησης των PMUs. Έτσι προτείνεται η εξής προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος: Αρχικά εξετάζουμε την ύπαρξη ή μη συμβατικών μετρήσεων. Σε περίπτωση ύπαρξης συμβατικών μετρήσεων τις συνδυάζουμε με τις μετρήσεις από PMUs καθώς μειώνουν σημαντικά τον ελάχιστο αριθμό PMUs και κατά συνέπεια το κόστος για τη συλλογή μετρήσεων. Στη συνέχεια

εξετάζουμε τις φυσικές συνθήκες και περιορισμούς που επικρατούν στο δίκτυο. Αν δεν υπάρχουν περιορισμοί που να εμποδίζουν την τοποθέτηση PMU σε κάποιους ζυγούς, τότε επιλέγουμε τη λύση με τη μέγιστη περίσσεια παρατηρησιμότητας. Σε περίπτωση που έχουμε περισσότερες από μια λύσεις με την ίδια περίσσεια παρατηρησιμότητας επιλέγουμε τη λύση που προκύπτει γρηγορότερα. Αντίθετα αν υπάρχουν λόγοι που δεν επιτρέπουν την τοποθέτηση PMU σε κάποιους ζυγούς, τότε επιλέγουμε τη λύση με τη μεγαλύτερη περίσσεια παρατηρησιμότητας μεταξύ των λύσεων που δεν συγκρούονται με τους περιορισμούς.

8.7 Μελλοντική Έρευνα

Για την εξέλιξη και τον εμπλουτισμό αυτής της διπλωματικής εργασίας προτείνεται:

- **Εφαρμογή των μεθόδων σε μεγαλύτερα δίκτυα:** στην παρούσα διπλωματική έγινε μελέτη των δικτύων IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118, καθώς τα δίκτυα αυτά εμφανίζονται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία. Ωστόσο πρέπει να δοκιμαστούν οι αλγόριθμοι σε πραγματικά δίκτυα χιλιάδων ζυγών, για να εξεταστεί η συνολική συμπεριφορά τους.
- **Υιοθέτηση άλλων μοντέλων για τη μελέτη με ζυγούς μηδενικής έγχυσης ισχύος:** όπως ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, στην παρούσα διπλωματική υιοθετήθηκε το μοντέλο των αναφορών [2], [59] για την εκτέλεση των αλγορίθμων με συνδυασμό μετρήσεων PMU με μετρήσεις μηδενικής έγχυσης ισχύος. Ωστόσο το ίδιο ερώτημα θα μπορούσε να υλοποιηθεί και με άλλα μοντέλα και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά της παρούσας διπλωματικής [1], [58], [71].
- **Επίλυση του προβλήματος περιορισμένου αριθμού καναλιών στις μονάδες PMU (limited channel problem):** στην παρούσα διπλωματική έγινε η παραδοχή ότι ο αριθμός των καναλιών των PMU επαρκεί για τη λήψη των μετρήσεων και δεν αποτελεί ένα επιπλέον περιορισμό. Στην πράξη οι PMU περιέχουν έναν ορισμένο αριθμό καναλιών για να λαμβάνουν μετρήσεις φασιθετών ρεύματος. Ο αριθμός των καναλιών κυμαίνεται από 3 έως και 6, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής του, την ποιότητα του αλλά και το κόστος της μονάδας PMU. Ένα επόμενο θέμα για μελλοντική μελέτη είναι να τροποποιηθεί ο αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων φασιθετών, έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνει την παράμετρο του αριθμού καναλιών που διαθέτει η μονάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. H. Abbasy and H. M. Ismail, "A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 2, pp. 806-813, May 2009.
- [2] B. Gou, "Optimal placement of PMUs by integer linear programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1525–1526, Sep. 2008.
- [3] G. Venugopal, R. Veilumuthu, C. Arumugam, "Optimal Location of PMUs for Complete Observability of Power System Sub Network", *ACEEE International Journal on Control System and Instrumentation*, Vol. 1, No. 1, July 2010, pp. 26-30.
- [4] Papadimitriou C., K. Steiglitz, 1982. "Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity". Prentice-Hall, Inc. ISBN 0-13-152462-3.
- [5] M.R. Mosavi, A.L. Akhyani, A. Rahmati, "A PMU Placement Optimal Method in Power Systems using Modified ACO Algorithm and GPS Timing", *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)*, ISSN 0033-2097, R. 88 NR 8/2012, pp. 346-349.
- [6] John E. Mitchel, "Branch-and-Cut Algorithms for Combinatorial Optimization Problems", 1999.
- [7] T. Xu, P. Wang, R. He, and D. Xu, "Phasor measurement placement for transient stability analysis of power systems," in 2004 Int. Conf. on Power System Tech., vol. 2, pp. 1428-1431.
- [8] K. Mazlumi, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and S. S. Geramian, "Determination of optimal PMU placement for fault-location observability," 3rd IEEE Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 1938-1942, Apr. 2008.
- [9] M. Zhou, V. A. Centeno, A. G. Phadke, Y. Hu, D. Novosel, and H. A. R. Volskis, "A preprocessing method for effective PMU placement studies," 3rd IEEE Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, pp. 2862-2867, Apr. 2008.
- [10] T. T. Kim, and H. V. Poor, "Strategic protection against data injection attacks on power grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, no. 99, pp. 1-8, Apr. 2011.
- [11] A. Aazami and M. D. Stilp, "Approximation algorithms and hardness for domination with propagation," *APPROXIMATION, RANDOMIZATION, AND COMBINATORIAL OPTIMIZATION AND TECHNIQUES Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4627, pp. 1-15, 2007.
- [12] M. Shiroie and S. H. Hosseini, "Observability and estimation of transformer tap setting with minimal PMU placement," in 2008 IEEE PES Gen. Meeting World Cong. - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-4.
- [13] K. Mazlumi, H. Vahedi, and S. M. Ezzati, "Optimal placement of PMUs in power systems using heuristic algorithms and mixed integer non linear programming methods," in 2010 Int. Conf. on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology, pp. 805-809.
- [14] S. Chakrabarti and E. Kyriakides, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1433-1440, Aug. 2008.

- [15] T. Xu, P. Wang, R. He, and D. Xu, "Phasor measurement placement for transient stability analysis of power systems," in 2004 Int. Conf. on Power System Tech., vol. 2, pp. 1428-1431.
- [16] A. Aazami, "Domination in graphs with bounded propagation: algorithms, formulations and hardness results," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 19, no. 4, pp. 429–456, 2010.
- [17] J. Guo, R. Niedermeier, and D. Raible, "Improved algorithms and complexity results for power domination in graphs," *Algorithmica*, vol. 52, no. 2, pp. 177–202, 2008.
- [18] M. Farsadi, H. Golahmadi, and H. Shojaei, "Phasor measurement unit (PMU) allocation in power system with different algorithms," in 2009 Int. Conf. on Electrical and Electronics Engineering, pp. 396-400.
- [19] G. Venugopal, R. Veilumuthu, and P. Avila Theresa, "Optimal PMU placement and observability of power system using PSAT," in 2010 Int. JointJournalConf.onEngineeringandTechnology, pp. 67-71.
- [20] D. Xu, R. He, P. Wang, and T. Xu, "Comparison of several PMU placement algorithms for state estimation," in 2004 IEE Int. Conf. on Developments in Power SystemProtection, vol. 1, pp. 32-35.
- [21] T.-T. Cai and Q. Ai, "Research of PMU optimal placement in power systems," in 2005 World Scientific and Engineering Academy and Society Int.Conf., pp. 38-43.
- [22] K. Ben Kilani, H. Ben Hamouda, and M. Elleuch, "Detection of inter area oscillations in the Tunisian interconnected power system using phasor measurement units," in 2009 Int. Multi-Conf. on Systems, Signals and Devices, pp. 1-6.
- [23] Y. Yang, H. Shu, and L. Yue, "Engineering practical method for PMU placement of 2010 Yunnan power grid in China," in 2009 Int. Conf. on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-6.
- [24] F. Mahmoodianfard, M. Mohammadi, G. B. Gharehpetian, and H.AskarianAbyaneh, "Optimal PMU placement for voltage security assessment using decision tree," in Proc. IEEE PowerTech, 2009.
- [25] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement techniques for complete and incomplete observability," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 4, pp. 2381–2388, Oct. 2005.
- [26] R. F. Nuqui and A. G. Phadke, "Phasor measurement unit placement based on incomplete observability," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, 2002, pp. 888–893.
- [27] M. Hurtgen, P. Praks, P. Zajac, and J.-C. Maun, "Comparison of measurement placement algorithms for state estimation based on theoretic and eigen vector centrality procedures," in Proc 16th Power Systems Computation Conf., 2008.
- [28] A. Mao, J. Yu, and Z. Guo, "PMU placement and data processing in WAMS that complements SCADA," in Proc.IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 2005, pp. 780–783.
- [29] K. Zhu, L. Nordström, and L. Ekstam, "Application and analysis of optimum PMU placement methods with application to state estimation accuracy," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 2009.
- [30] Y. Song, S. Ma, L. Wu, Q. Wang, and H. He, "PMU placement based on power system characteristics," in Proc. Int. Conf. Sustainable Power Generation Supply, 2009.

- [31] G. Mueller, P. Komarnicki, I. Golub, Z. Styczynski, C. Dzienis, and J. Blumschein, "PMU placement method based on decoupled Newton power flow and sensitivity analysis," in Proc. Int. Conf. Electrical Power Quality Utilisation, 2007.
- [32] A. M. Almutairi and J. V. Milanovic, "Comparison of different methods for optimal placement of PMUs," in Proc. IEEE PowerTech, 2009.
- [33] A. M. Almutairi and J. V. Milanovic, "Comparison of different methods for optimal placement of PMUs," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, 2009.
- [34] K.-P. Lien, C.-W. Liu, C.-S. Yu, and J.-A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1128–1136, Jul. 2006.
- [35] W. Jiang and V. Vittal, "Optimal placement of phasor measurements for the enhancement of state estimation," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Systems Conf. Exposition, 2006, pp. 1550–1555.
- [36] Y. Li, X. Zhou, and J. Zhou, "A new algorithm for distributed power system state estimation based on PMUs," in Proc. Int. Conf. Power System Technology, 2006.
- [37] B. Milosevic and M. Begovic, "Nondominated sorting genetic algorithm for optimal phasor measurement placement," IEEE Power Eng. Review, vol. 22, no. 12, pp. 61-67, Dec. 2002.
- [38] P.S. SrinivasaReddy, S.P. Chowdhury, and S. Chowdhury, "PMU placement- A comparative survey and review," in 2010 IET Int. Conf. on Developments in Power System Protection, vol. 1, pp. 1-4.
- [39] P.S. SrinivasaReddy, L. Ramesh, S.P. Chowdhury, and S. Chowdhury, "Power system PMU placement- A comparative survey report," in 2007 IET-UK Int. Conf. on Information and Communication Technology in Electrical Sciences, pp. 249-255.
- [40] F. J. Marín, F. García-Lagos, G. Joya, and F. Sandoval, "Optimal phasor measurement unit placement using genetic algorithms," Computational Methods in Neural Modeling, vol. 2686, pp. 486-493, 2003.
- [41] X. Bian and J. Qiu, "General solutions to multi-objective optimization of PMU placement," in 2006 World Cong. On Intelligent Control and Automation, pp. 7641-7645.
- [42] R. A. F. Pereira, L. G. W. da Silva, and J. R. S. Mantovani, "PMUs optimized allocation using a tabu search algorithm for fault location in electric power distribution system," in 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Exposition: Latin America, pp. 143-148.
- [43] J. Peng, Y. Sun, and H. F. Wang, "Optimal PMU placement for full network observability using Tabu search algorithm," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 28, no. 4, pp. 223-231, May 2006.
- [44] T.-T. Cai and Q. Ai, "Research of PMU optimal placement in power systems," in 2005 World Scientific and Engineering Academy and Society Int. Conf., pp. 38-43 Y. Yang, H. Shu, and L. Yue, "Engineering practical method for PMU placement of 2010 Yunnan power grid in China," in 2009 Int. Conf. on Sustainable Power Generation and Supply, pp. 1-6.
- [45] L. Mili, T. Baldwin, and R. Adapa, "Phasor measurement placement for voltage stability analysis of power systems," in Proc. of the 29th IEEE Conf. on Decision and Control, vol. 6, pp. 3033-3038.

- [46] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen Jr., and R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 707-715, May 1993.
- [47] J. R. Altman, "A Practical Comprehensive Approach to PMU Placement for Full Observability", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, January 2007.
- [48] K.-S. Cho, J.-R. Shin, and S. Ho Hyun, "Optimal placement of Phasor measurement units with GPS receiver," in 2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 258-262.
- [49] H.-S. Zhao, Y. Li, Z.-Q. Mi, and L. Yu, "Sensitivity constrained PMU placement for complete observability of power systems," in 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. & Exhibition, pp. 1-5.
- [50] A.Ketabi, S.M.Nosratabadi, M.R.Sheibani, "Optimal PMU placement based on mean square error using differential evolution algorithm," presented at the 1st Conf. Power Quality, Tehran, Iran, 2010.
- [51] F. Aminifar, C. Lucas, A. Khodaei, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Optimal placement of phasor measurement units using immunity genetic algorithm," IEEE Trans. PowerDelivery, vol. 24, no. 3, pp. 1014-1020, Jul. 2009
- [52] M. Hajian, A. M. Ranjbar, T. Amraee, and A. R. Shirani, "Optimal placement of phasor measurement units: particle swarm optimization approach," in 2007 Int. Conf. on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp. 1-6.
- [53] Y. Gao, Z. Hu, X. He, and D. Liu, "Optimal placement of PMUs in power systems based on improved PSO algorithm," in 2008 IEEE Int. Conf. on Industrial Electronics and Applications, pp. 2464-2469.
- [54] P.S. SrinivasaReddy, L. Ramesh, S.P. Chowdhury, and S. Chowdhury, "Power system PMU placement- A comparative survey report," in 2007 IET-UK Int. Conf. on Information and Communication Technology in Electrical Sciences, pp. 249-255.
- [55] K.Mazlumi and H. Vahedi, "optimal placement of pmus in power systems based on bacterial foraging algorithm," in 2010 iranian conf. on electrical engineering, pp. 885-888.
- [56] M. Hurtgen and J.-C. Maun, "Optimal PMU placement using iterated local search," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 32, no. 8, pp. 857-860, Oct. 2010.
- [57] A. Sadu, R. Kumar, and R. G. Kavasseri, "Optimal placement of Phasor measurement units using particle swarm optimization," in 2009 World Cong. On Nature & Biologically Inspired Computing, pp. 1708-1713.
- [58] B. Xu, A. Abur, Texas A&M University "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation", PSERC Publication 05-58, Oct. 2005.
- [59] B. Gou, "Generalized Integer Linear Programming, Formulation for Optimal PMU Placement", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 3, Aug. 2008, pp. 1099-1104
- [60] Optimization Toolbox for use with Matlab. User's Guide the Mathworks.
- [61] Standalone Executables: <http://caml.inria.fr/pub/docs/oreilly-book/html/book-ora067.html>
- [62] J.F. Forrest, R. Lougee-Heimer, "CBC User Guide", Department of Mathematical Sciences, IBM T. J. Watson Research Center, IBM Research, pp. 257-276.
- [63] CBC Homepage: <https://projects.coin-or.org/Cbc>

- [64] Mixed Integer Optimization: <http://www.mathworks.com/help/gads/mixed-integer-optimization.html>
- [65] Solving a Mixed Integer Engineering Design Problem Using the Genetic Algorithm: <http://www.mathworks.com/help/gads/solving-a-mixed-integer-engineering-design-problem-using-the-genetic-algorithm.html>
- [66] Deep, Kusum, Krishna Pratap Singh, M.L. Kansal, and C. Mohan. “A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems”. Applied Mathematics and Computation, 212(2), pp. 505–518, 2009.
- [67] Deb, Kalyanmoy, “An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering”, 186(2–4), pp. 311–338, 2000.
- [68] D. Dua, S. Dambhare, R. Kumar Gajbhiye, and S. A. Soman, “Optimal Multistage Scheduling of PMU Placement: An ILP Approach, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, october 2008, pp. 1821-1820.
- [69] Ν.Π. Θεοδωρακάτος, “Μέθοδοι Βέλτιστης Τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών” Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, ΕΜΠ 2012.
- [70] R. Sodhi and S.C.Srivastava, “Optimal PMU Placement to Ensure Observability of Power System”, Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008.
- [71] N. H. Abbasy N. A. Ahmed “PMU Optimal Allocation Using a Posteriori Bus-Observing Redundancy Removal Approach”, pp. 356-363.
- [72] R.Sudha, Deepak Jain, Umang Lahoty, Swati Khushalani, Nivedita G, Jayabarathi T, “State Estimation and Voltage Stability Monitoring Using ILP PMU Placement”, International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN: 2231-2307, Volume-2, Issue-2, May 2012, pp. 366-373.
- [73] A.G. Phadke, “Synchronized Phasor Measurements - A Historical Overview,”IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Oct. 2002.
- [74] L. Zhao, A. Abur, “Multiarea State Estimation Using Synchronized Phasor Measurements,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 2, May 2005.
- [75] Thawatch Kerdchuen and Weerakorn Ongsakul , “Optimal PMU Placement for Reliable Power System State Estimation”, GMSARN International Conference on Sustainable Development: Challenges and Opportunities for GMS 12-14 Dec. 2007.
- [76] A Brief Introduction to the Power System Analysis Toolbox (PSAT) for Power System Analysis Undergraduate Courses, Federico Milano.
- [77] How the genetic algorithm works: <http://www.mathworks.com/help/gads/how-the-genetic-algorithm-works.html>
- [78] OPTI Toolbox: What is OPTI?: <http://www.i2c2.aut.ac.nz/Wiki/OPTI/index.php/Main/WhatIsOPTI?>
- [79] A. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements in power systems”, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, Issue 2, pp. 10-15, April 1993.
- [80] Bei Xu and A. Abur, “Observability Analysis and Measurement Placement for Systems with PMUs”, Proceedings of the IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Oct. 2004, New York, NY.

- [81] Bei Xu, Y. J. Yoon and A. Abur, “Optimal Placement and Utilization of Phasor Measurements for State Estimation”, Power System Computation Conference, Aug. 2005, Liege, Belgium.
- [82] Behrouz Moarref, Hassan Barati, ‘Optimal Placement of PMUs Considering Sensitivity Constraints’, International Research Journal of Applied and Basic Sciences, Vol, 8 (2): 140-145, 2014.
- [83] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, and D. G. Eliades, “Placement of Synchronized Measurements for Power System Observability,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 12-19, Jan. 2009.
- [84] S. Chakrabarti, G. Venayagamoorthy, and E. Kyriakides, “PMU Placement for Power System Observability Using Particle Swarm Optimization”, Proceedings of IEEE AUPEC '08, Dec. 2008.
- [85] N. Deo, “ Graph Theory with Applications to Engineering and Computer Science, Prentice- Hall, 1974.
- [86] J. S. Bhonsle & A. S. Junghare, “A Novel Approach for the Optimal PMU Placement using Binary Integer Programming Technique”, International Journal of Electrical and Electronics Engineering (IJEET), Vol-1, Iss-3, 2012, pp. 67-72.
- [87] B. Gou and A. Abur, “An improved measurement placement algorithm for network observability,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 819–824, Nov. 2001.
- [88] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, “Taxonomy of PMU placement methodologies,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 27, no. 2, pp. 1070–1077, May 2012.
- [89] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, “Optimal placement of phasor measurement units: A literature review,” in Proc. Int. Conf. Intelligent System Applications to Power Systems, Sep. 2011.
- [90] Γ. Κονταξής, Ν. Χατζηαργυρίου, “Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας”, ΕΜΠ, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.
- [91] Κ.Π. Νικολόπουλος, “Εμπειρικές Μέθοδοι Βέλτιστης Τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών” Διπλωματική Εργασία, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, ΕΜΠ 2011.
- [92] Ηλίας Κυριακίδης, «Εκτίμηση Κατάστασης», Διάλεξη , ΗΜΥ, Πανεπιστήμιο Κύπρου, 2010.
- [93] K. Narendra, T. Weekes, “Phasor Measurement Unit (PMU) Communication Experience in a Utility Environment”, CIGRÉ Canada Conference on Power Systems Winnipeg, October 19-21, 2008.
- [94] D. G. Hart, D. Uy, V. Gharpure, D. Novosel, D. Karlsson, M. Kaba, “PMUs- A new approach to power network monitoring”, ABB Editorial, 2001, pp. 58-61.
- [95] B. Yu, “A Branch and Cut Approach to Linear Programs with Linear Complementarity Constraints”, Doctor Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, August 2011.
- [96] Jyoti. S. Bhonsle, Dr. Anjali. S. Junghare, “Multiple Constraints Consideration in Power System State Estimation”, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Vol. 5, Issue 4 (May. - Jun. 2013), pp. 39-44.
- [97] R. D. Zimmerman and D. Gan, MATPOWER – A MATLAB Power System Simulation Package, User’s Manual, School of Electrical Engineering, Cornell University, 1997, available: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>

Κώδικας στο MATLAB

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ο κώδικας που υλοποιήθηκε στο MATLAB για την επίλυση του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMU.

Τα δεδομένα των δικτύων εισάγονται με την έκδοση του MATPOWER 5.01b. Η Matpower είναι ένα πακέτο του MATLAB, αποτελούμενο από m-files, για την επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου. Αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez & Deqiang (David) Gan του Power Systems Engineering Research Center του Πανεπιστημίου Cornell. Αφού γίνει η εγκατάσταση του λογισμικού, πληκτρολογούμε την εντολή `test_matpower` στο παράθυρο εντολών της MATLAB, για να πιστοποιήσουμε ότι η εγκατάσταση έχει γίνει σωστά και το λογισμικό λειτουργεί κανόνικα. Αν όλα λειτουργούν σωστά βλέπουμε στο παράθυρο του MATLAB:

```
>> test_matpower
t_nested_struct_copy....ok
t_moption.....ok
t_loadcase.....ok
t_ext2int2ext.....ok
t_jacobian.....ok
t_hessian.....ok
t_margcost.....ok
t_totcost.....ok
t_modcost.....ok
t_hasPQcap.....ok
t_mips.....ok
t_qps_matpower.....ok (252 of 324 skipped)
t_pf.....ok
t_cpf.....ok
t_islands.....ok
t_opf_model.....ok
t_opf_mips.....ok
t_opf_mips_sc.....ok
t_opf_dc_mips.....ok
t_opf_dc_mips_sc.....ok
t_opf_userfens.....ok
t_runopf_w_res.....ok
t_dcline.....ok
t_makePTDF.....ok
t_makeLODF.....ok
t_total_load.....ok
t_scale_load.....ok
t_psse.....ok
All tests successful (2542 passed, 252 skipped of 2794)
Elapsed time 7.32 seconds.
```

Στο πακέτο αρχείων της MATPOWER περιέχονται αρχεία που αφορούν πρότυπα IEEE δίκτυα. Στην παρούσα διπλωματική τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα case14.m, case30.m, case57.m, case118.m. Στο αρχείο case περιέχονται δεδομένα για το δίκτυο όπως είναι δεδομένα ζυγών (bus data), δεδομένα κλάδων (branch data) κ.α. Τα δεδομένα ζυγών και κλάδων καλούνται ως εσωτερικά ορίσματα της συνάρτησης makeYbus που επιστρέφει την μήτρα αγωγιμοτήτων Ybus του δικτύου. Τα δεδομένα των δικτύων συντάσσονται στα m-file της MATPOWER με την μορφή πινάκων.

Με χρήση των συναρτήσεων της MATPOWER και των συναρτήσεων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 7, συντάχθηκε ο κώδικας που ακολουθεί στις επόμενες παραγράφους.

I. makeAbinary

```
function [A] = makeAbinary(bus, branch) % Returns A binary
matrix
if nargin < 2
bus = mpc.bus;
branch = mpc.branch;
end
fb=branch(:,1); % from bus
tb=branch(:,2); % to bus
nb = size(bus, 1); % number of buses
nl = size(branch, 1); % number of branches
A=zeros(nb,nb); % iniliazition of binary connection matrix
for j=1:nb % Formation of Diagonal Elements.
A(j,j)=1;
end
for i=1:nl % Formation of the Off Diagonal Elements
if (fb(i) <= nb && tb(i)<= nb)
A(fb(i),tb(i))=1;
A(tb(i),fb(i))= A(fb(i),tb(i));
end
end
```

II. Abinary connectivity matrix

```
function A=Abinary_connectivity_matrix(nbus) % Returns A
binary matrix
lineconnection=line_connection_14(nbus); % Calling
"line_connection_9.m"
fb=lineconnection(:,1); % from bus
tb=lineconnection(:,2); % to bus
nbranch=length(fb); % number of branches
A=zeros(nbus); % iniliazition of binary connectivity matrix
for j=1:nbus % Formation of Diagonal Elements
A(j,j)=1;
end
for i=1:nbranch % Formation of the Off Diagonal Elements
A(fb(i),tb(i))=1;
A(tb(i),fb(i))= A(fb(i),tb(i));
end
```

III. BOI and SORI

```
%Bus observability index & SORI
function [BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x)
%INPUTS
% A : connctivity matrix
% x : PMU location vector (0 -> No PMU, 1-> PMU)
%OUTPUTS :
%BOI : Bus Observability Index
%SORI : System Observability Redundancy Index
BOI = A*x;
SORI = sum(BOI);
end
```

IV. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με BIP

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

```
%Non Conventional measurements
%IEEE networks processing using MATPOWER and bintprog
algorithm
clc;clear all;
nbus = 118;%Select type of IEEE network, nbus =
[14,10,57,118];
f = ones(1,nbus);
b = ones(1,nbus);
case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);%Formulate the connectivity
matrix A
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n',nbus);
fprintf('bintprog algorithm - branch and bound\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
tic
[x, nPMU, exitflag, output] = bintprog(f,-A,-b); %Optimize
using Binary Integer Programming
toc
fprintf('Optimal Number of PMUs : %d\n',nPMU);
fprintf('PMU location: ');
[location] = find(x==1);
disp(location);
fprintf('Iterations : %d\n',output.iterations);
fprintf('Nodes : %d\n',output.nodes);
fprintf('Algorithm : %s\n',output.algorithm);
fprintf('branchStrategy : %s\n',output.branchStrategy);
fprintf('Node Search Strategy :
%s\n',output.nodeSrchStrategy);
fprintf('-----\n');
```

```

[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x);
%Uncomment to print BOI
%fprintf('BOI INDEX : \n');
%disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX : %d\n',SORI);
fprintf('-----\n');

```

V. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με MILP

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

```

%Non Conventional measurements
%IEEE networks processing using CBC algorithm and MATPOWER
clc;clear all;
nbus = 30;%Select type of IEEE network, nbus = [14,10,57,118];
f = ones(1,nbus);
b = ones(1,nbus);
case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);%Formulate the connectivity
matrix A
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n',nbus);
fprintf('CBC algorithm\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
tic
[x,fval, exitflag, output] =
opti_cbc([],f',A,b, repmat(1000,nbus,1), [], [], repmat('B',1,nbus
));
toc
fprintf('Optimal Number of PMUs : %d\n',sum(x));
fprintf('PMU location: ');
[location] = find(x==1);
disp(location');
fprintf('Algorithm : %s\n',output.Algorithm);
fprintf('Status : %s\n',output.Status);
fprintf('-----\n');
[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x);
%Uncomment to print BOI
%fprintf('BOI INDEX : \n');
%disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX : %d\n',SORI);

fprintf('-----\n');

```

VI. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με GA

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

```
%Non Conventional measurements
%IEEE networks processing using MATPOWER and Genetic Algorithm
clc;clear all;
nbus = 57;%Select type of IEEE network, nbus = [14,30,57,118];
f = ones(1,nbus);
b = ones(1,nbus);
case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n',nbus);
fprintf('Genetic algorithm\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
tic
fun = @(x) sum(x);
%genetic algorithm's options
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',8000,'Ge
neration',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
rng(1,'twister') % for reproducibility
[x,fval, exitflag, output] = ga(fun,nbus,-A,-
b,[],[],zeros(1,nbus),ones(1,nbus),[],1:nbus,options);
toc

fprintf('Optimal Number of PMUs : %d\n',sum(x));
fprintf('PMU location: ');
[location] = find(x==1);
disp(location);
fprintf('Problem Type : %s\n',output.problemtype);
fprintf('Generations : %d\n',output.generations);
fprintf('Max Constraint : %d\n',output.maxconstraint);
fprintf('-----\n');
[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x');
%Uncomment to print BOI
%fprintf('BOI INDEX : \n');
%disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX : %d\n',SORI);
fprintf('-----\n');
```

VII. Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ισχύος

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

```
%Conventional measurements
%IEEE networks processing using MATPOWER and bintprog
algorithm
clc;clear all;
nbus = 118;%Select type of IEEE network, nbus =
[14,10,57,118];

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if nbus == 14
    ncm = 5;
    ncon = nbus - ncm ;
    % power_flows = [1 2;2 3;6 11;7 8;10 11];
    case_id = strcat('case',int2str(nbus));
    [baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
    [A] = makeAbinary(bus, branch);
    Anew = zeros(ncon,nbus);
    Anew(1,:) = A(1,:) | A(2,:) | A(3,:);
    Anew(2,:) = A(4,:);
    Anew(3,:) = A(5,:);
    Anew(4,:) = A(6,:) | A(10,:) | A(11,:);
    Anew(5,:) = A(7,:) | A(8,:);
    Anew(6,:) = A(9,:);
    Anew(7,:) = A(12,:);
    Anew(8,:) = A(13,:);
    Anew(9,:) = A(14,:);

elseif nbus ==30
    ncm = 20;
    ncon = nbus - ncm ;
    % power_flows = [1 2;1 3;2 4;2 5;2 6;6 8;9 10;10 17;12 4;
12 13;12 14;12 15;...
%12 16;18 19;20 19;21 22;23 24;24 25;27 29;29 30];
    case_id = strcat('case',int2str(nbus));
    [baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
    [A] = makeAbinary(bus, branch);
    Anew = zeros(ncon,nbus);
    Anew(1,:) =
A(1,:) | A(2,:) | A(3,:) | A(4,:) | A(5,:) | A(6,:) | A(8,:) | A(12,:) | A(13,
:) | A(14,:) | A(15,:) | A(16,:);
    Anew(2,:) = A(7,:);
    Anew(3,:) = A(9,:) | A(10,:) | A(17,:);
    Anew(4,:) = A(11,:);
    Anew(5,:) = A(18,:) | A(19,:) | A(20,:);
    Anew(6,:) = A(21,:) | A(22,:);
    Anew(7,:) = A(23,:) | A(24,:) | A(25,:);
    Anew(8,:) = A(26,:);
    Anew(9,:) = A(27,:) | A(29,:) | A(30,:);
    Anew(10,:) = A(28,:);
```

```

elseif nbus == 57
    ncm = 40;
    ncon = nbus - ncm ;
    power_flows = [1 2; 1 15;1 16; 1 17; 3 15; 4 5;4 6; 4 18; 7
29;8 9;9 10;10 12;
10 51; 11 41; 11 43; 12 13; 14 46; 19 20; 20 21; 22 38; 23
24; 24 25;
24 26; 27 26; 28 27; 29 52; 30 31; 32 34; 34 35; 36 35; 38 37;
38 44;
38 48; 40 36; 41 42; 42 56; 47 46; 49 38; 51 50; 53 54];

case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);
Anew = zeros(ncon,nbus);

Anew(1,:) = A(1,:) |A(2,:) |A(3,:) |A(15,:) |A(16,:) |A(17,:);
Anew(2,:) = A(4,:) |A(5,:) |A(6,:) |A(18,:);
Anew(3,:) = A(7,:) |A(29,:) |A(52,:);
Anew(4,:) =
A(8,:) |A(9,:) |A(10,:) |A(12,:) |A(13,:) |A(50,:) |A(51,:);
Anew(5,:) = A(11,:) |A(41,:) |A(43,:) |A(42,:) |A(56,:);
Anew(6,:) = A(14,:) |A(46,:) |A(47,:);
Anew(7,:) = A(19,:) |A(20,:) |A(21,:);
Anew(8,:) =
(A(22,:) |A(38,:)) | (A(44,:) |A(37,:)) | (A(48,:) |A(49,:));
Anew(9,:) = A(23,:) |A(24,:) |A(25,:) |A(26,:) |A(27,:) |A(28,:);
Anew(10,:) = A(30,:) |A(31,:);
Anew(11,:) = A(32,:) |A(34,:) |A(35,:) |A(36,:) |A(40,:);
Anew(12,:) = A(33,:);
Anew(13,:) = A(39,:);
Anew(14,:) = A(45,:);
Anew(15,:) = A(53,:) |A(54,:);
Anew(16,:) = A(55,:);
Anew(17,:) = A(57,:);
elseif nbus == 118
    ncm = 32;
    ncon = nbus - ncm ;
    case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);

    power_flows = [ 1 3; 5 6; 11 13; 16 17; 20 21; 22 23;23 25;
27 28; 29 31;34 43;
35 36; 41 42; 44 45; 46 48; 50 57; 51 52; 53 54; 56 58; 60 62;
65 66;
66 67;68 81; 71 73; 75 118; 76 77; 77 82; 78 89; 86 87; 90 91;
95 96; 100 101; 114 115];

Anew(1,:) = A(1,:) |A(3,:);
Anew(2,:) = A(2,:);
Anew(3,:) = A(4,:);
Anew(4,:) = A(5,:) | A(6,:);
Anew(5,:) = A(7,:);
Anew(6,:) = A(8,:);

```

```

Anew(7,:) = A(9,:);
Anew(8,:) = A(10,:);
Anew(9,:) = A(11,:) | A(13,:);
Anew(10,:) = A(12,:);
Anew(11,:) = A(14,:);
Anew(12,:) = A(15,:);
Anew(13,:) = A(16,:) | A(17,:);
Anew(14,:) = A(18,:);
Anew(15,:) = A(19,:);
Anew(16,:) = A(20,:) | A(21,:);
Anew(17,:) = A(22,:) | A(23,:) | A(25,:);
Anew(18,:) = A(24,:);
Anew(19,:) = A(26,:);
Anew(20,:) = A(27,:) | A(28,:);
Anew(21,:) = A(29,:) | A(31,:);
Anew(22,:) = A(30,:);
Anew(23,:) = A(32,:);
Anew(24,:) = A(33,:);
Anew(25,:) = A(34,:) | A(43,:);
Anew(26,:) = A(35,:) | A(36,:);
Anew(27,:) = A(37,:);
Anew(28,:) = A(38,:);
Anew(29,:) = A(39,:);
Anew(30,:) = A(40,:);
Anew(31,:) = A(41,:) | A(42,:);
Anew(32,:) = A(44,:) | A(45,:);
Anew(33,:) = A(46,:) | A(48,:);
Anew(34,:) = A(47,:);
Anew(35,:) = A(49,:);
Anew(36,:) = A(50,:) | A(57,:);
Anew(37,:) = A(51,:) | A(52,:);
Anew(38,:) = A(53,:) | A(54,:);
Anew(39,:) = A(55,:);
Anew(40,:) = A(56,:) | A(58,:);
Anew(41,:) = A(59,:);
Anew(42,:) = A(60,:) | A(62,:);
Anew(43,:) = A(61,:);
Anew(44,:) = A(63,:);
Anew(45,:) = A(64,:);
Anew(46,:) = A(65,:) | A(66,:) | A(67,:);
Anew(47,:) = A(68,:) | A(81,:);
Anew(48,:) = A(69,:);
Anew(49,:) = A(70,:);
Anew(50,:) = A(71,:) | A(73,:);
Anew(51,:) = A(72,:);
Anew(52,:) = A(74,:);
Anew(53,:) = A(75,:) | A(118,:);
Anew(54,:) = A(76,:) | A(77,:) | A(82,:);
Anew(55,:) = A(78,:) | A(89,:);
Anew(56,:) = A(79,:);
Anew(57,:) = A(80,:);
Anew(58,:) = A(83,:);
Anew(59,:) = A(84,:);
Anew(60,:) = A(85,:);
Anew(61,:) = A(86,:) | A(87,:);
Anew(62,:) = A(88,:);

```



```

Anew(63,:) = A(90,:) | A(91,:);
Anew(64,:) = A(92,:);
Anew(65,:) = A(93,:);
Anew(66,:) = A(94,:);
Anew(67,:) = A(95,:) | A(96,:);
Anew(68,:) = A(97,:);
Anew(69,:) = A(98,:);
Anew(70,:) = A(99,:);
Anew(71,:) = A(100,:) | A(101,:);
Anew(72,:) = A(102,:);
Anew(73,:) = A(103,:);
Anew(74,:) = A(104,:);
Anew(75,:) = A(105,:);
Anew(76,:) = A(106,:);
Anew(77,:) = A(107,:);
Anew(78,:) = A(108,:);
Anew(79,:) = A(109,:);
Anew(80,:) = A(110,:);
Anew(81,:) = A(111,:);
Anew(82,:) = A(112,:);
Anew(83,:) = A(113,:);
Anew(84,:) = A(114,:) | A(115,:);
Anew(85,:) = A(116,:);
Anew(86,:) = A(117,:);

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
f = ones(1,nbus);
b = ones(1,ncon);
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n with conventional measurements
(power flows)',nbus);
fprintf('bintprog algorithm - branch and bound\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
tic
[x, nPMU, exitflag, output] = bintprog(f,-Anew,-b);
toc
fprintf('Optimal Number of PMUs : %d\n',nPMU);
fprintf('PMU location: ');
[location] = find(x==1);
disp(location');
fprintf('Iterations : %d\n',output.iterations);
fprintf('Nodes : %d\n',output.nodes);
fprintf('Algorithm : %s\n',output.algorithm);
fprintf('branchStrategy : %s\n',output.branchStrategy);
fprintf('Node Search Strategy :
%s\n',output.nodeSrchStrategy);
fprintf('-----
-----\n');
[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x);
%Uncomment to print BOI
fprintf('BOI INDEX : \n');
disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX : %d\n',SORI);
fprintf('-----\n');

```

VIII. Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

Επίσης επιλέγοντας μία από τις τιμές alg= 1, 2 ή 3 παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για την επίλυση με τον BIP, τον GA και τον MILP αντίστοιχα.

```
%IEEE networks processing using MATPOWER and Generalized Gou's
algorithm
clc;clear all;
nbus = 14; %Select type of IEEE network, nbus =
[14,10,57,118];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Select algorithm :
% alg = 1 : bintprog
% alg = 2 : genetic algorithm
% alg = 3 : CBC
alg = 2;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

f = ones(1,nbus);
b = ones(1,nbus);
case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n',nbus);
fprintf('Generalized Gou Algorithm\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
bus = 1:nbus;

if nbus == 14
    %zero_injection_buses = 7;
    bus_conv = [4 7 8 9]; %buses related to zero injection
    numb_conv = 1; % number of zero injections
    numb_bus_conv = size(bus_conv,2); %number of buses related
to conv measurements
    for i=1: numb_bus_conv
        ind = find(bus == bus_conv(i));
        bus(ind) = [];
    end
    bus = [bus bus_conv];
    P = zeros(nbus,nbus);
    for i=1:nbus
        P(i,bus(i)) = 1; %Form Permutation Matrix
    end
    numb_non_conv = nbus - numb_bus_conv;%number of buses not
affected by conv meas
    Tmeas1 = [eye(numb_non_conv);
zeros(numb_conv,numb_non_conv)];
    Tmeas2 = [zeros(numb_non_conv,numb_bus_conv);
ones(1,numb_bus_conv)];
    Tmeas = [Tmeas1 Tmeas2];
    Tcon = Tmeas * P * A;%Form modified T matrix
```

```

b = [ones(1,numb_non_conv) 3]; %form modified b vector

elseif nbus == 30
    %zero_injection_buses = [6,9,11,25,28];
    bus_conv = [2 4 6 7 8 9 10 11 24 25 26 27 28];%buses
related to zero injection
    numb_conv = 5;% number of zero injections
    numb_bus_conv = size(bus_conv,2);%number of buses related
to conv measurements
    for i=1: numb_bus_conv
        ind = find(bus == bus_conv(i));
        bus(ind) = [];
    end
    bus = [bus bus_conv];
    P = zeros(nbus,nbus);
    P = zeros(nbus,nbus);
    for i=1:nbus
        P(i,bus(i)) = 1;
    end
    numb_non_conv = nbus - numb_bus_conv;%number of buses not
affected by conv meas
    Tmeas1 = [eye(numb_non_conv);
zeros(numb_conv,numb_non_conv)];
    Ttemp1 = zeros(numb_conv,13);
    Ttemp1(1,1:7) = 1; Ttemp1(1,13)=1;
    Ttemp1(2,3)=1;Ttemp1(2,6:8) = 1;
    Ttemp1(3,6)=1;Ttemp1(3,8) = 1;
    Ttemp1(4,9:12) = 1;
    Ttemp1(5,3) = 1;Ttemp1(5,5)=1;Ttemp1(5,12:13)=1;
    Tmeas2 = [zeros(numb_non_conv,numb_bus_conv); Ttemp1];
    Tmeas = [Tmeas1 Tmeas2];
    Tcon = Tmeas * P * A;
    b = [ones(1,numb_non_conv) 7 3 1 3 3];
elseif nbus == 57

    bus_conv = [3:9 11 13:15 18 20:27 29 32 34:41 43:49 56
57];%buses related to zero injection
    numb_conv = 15;% number of zero injections
    numb_bus_conv = size(bus_conv,2);%number of buses related
to conv measurements
    for i=1: numb_bus_conv
        ind = find(bus == bus_conv(i));
        bus(ind) = [];
    end
    bus = [bus bus_conv];
    P = zeros(nbus,nbus);
    P = zeros(nbus,nbus);
    for i=1:nbus
        P(i,bus(i)) = 1;
    end
    numb_non_conv = nbus - numb_bus_conv;%number of buses not
affected by conv meas
    Tmeas1 = [eye(numb_non_conv);
zeros(numb_conv,numb_non_conv)];
    Ttemp1 = zeros(numb_conv,numb_bus_conv);

```

```

Ttemp1(1,1:4) = 1; Ttemp1(1,12)=1;
Ttemp1(2,4:6)=1;Ttemp1(2,21) = 1;
Ttemp1(3,7:9)=1;Ttemp1(3,30:31) = 1;
Ttemp1(4,13:15) = 1;
Ttemp1(5,14:16) = 1;Ttemp1(5,27)=1;
Ttemp1(6,16:19) = 1;
Ttemp1(7,17) = 1;Ttemp1(7,19:20) = 1;
Ttemp1(8,22:24) = 1;
Ttemp1(9,24:26) = 1;Ttemp1(9,29)=1;
Ttemp1(10,25:28) = 1;
Ttemp1(11,26) = 1; Ttemp1(11,28)=1;Ttemp1(11,39);
Ttemp1(12,25) = 1; Ttemp1(12,29) = 1; Ttemp1(12,38) = 1;
Ttemp1(13,11) = 1; Ttemp1(13,32:33)=1;
Ttemp1(14,10) = 1; Ttemp1(14,34:35) = 1;
Ttemp1(15,35:37) = 1; Ttemp1(15,27) = 1;
Tmeas2 = [zeros(numb_non_conv,numb_bus_conv); Ttemp1];
Tmeas = [Tmeas1 Tmeas2];
Tcon = Tmeas * P * A;
b = [ones(1,numb_non_conv) 4 3 4 2 3 3 2 2 3 3 2 2 2 2 3];

elseif nbus == 118
    bus_conv = [3:6 8:11 17 26 30 33:35 37:40 59 61 63:65
68:73 80:81 116];%buses related to zero injection
    numb_conv = 10;% number of zero injections
    numb_bus_conv = size(bus_conv,2);%number of buses related
to conv measurements
    for i=1: numb_bus_conv
        ind = find(bus == bus_conv(i));
        bus(ind) = [];
    end
    bus = [bus bus_conv];
    P = zeros(nbus,nbus);
    P = zeros(nbus,nbus);
    for i=1:nbus
        P(i,bus(i)) = 1;
    end
    numb_non_conv = nbus - numb_bus_conv;%number of buses not
affected by conv meas
    Tmeas1 = [eye(numb_non_conv);
zeros(numb_conv,numb_non_conv)];
    Ttemp1 = zeros(numb_conv,numb_bus_conv);
    Ttemp1(1,1:5) = 1; Ttemp1(1,8) = 1;
    Ttemp1(2,5:7) = 1;
    Ttemp1(3,5) = 1;Ttemp1(3,9:11)=1;Ttemp1(3,16)=1;
    Ttemp1(4,12:18) = 1;
    Ttemp1(5,11) = 1;Ttemp1(5,15:16) = 1; Ttemp1(5,23) = 1;
    Ttemp1(6,19) = 1;Ttemp1(6,21:22) = 1;
    Ttemp1(7,20:23) = 1;
    Ttemp1(8,23:25) = 1;Ttemp1(8,31:32) = 1;
    Ttemp1(9,26:29) = 1;
    Ttemp1(10,24) = 1;Ttemp1(10,30:31) = 1;

    Tmeas2 = [zeros(numb_non_conv,numb_bus_conv); Ttemp1];
    Tmeas = [Tmeas1 Tmeas2];
    Tcon = Tmeas * P * A;
    b = [ones(1,numb_non_conv) 5 2 4 6 3 2 3 4 3 2];

```

```

end

% Check algorithm that will be used
if alg ==1
tic
[x, nPMU, exitflag, output] = bintprog(f,-Tcon,-b);
toc
fprintf('Iterations :    %d\n',output.iterations);
fprintf('Nodes :        %d\n',output.nodes);
fprintf('Algorithm :     %s\n',output.algorithm);
fprintf('branchStrategy :   %s\n',output.branchStrategy);
fprintf('Node Search Strategy :
%s\n',output.nodeSrchStrategy);
elseif alg == 2
    fun = @(x) sum(x);
    options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',8000,
'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
tic
    [x,fval, exitflag, output] = ga(fun,nbus,-Tcon,-
b,[],[],zeros(1,nbus),ones(1,nbus),[],1:nbus,options);
toc
    x = x';
    fprintf('Problem Type :    %s\n',output.problemtype);
    fprintf('Generations :    %d\n',output.generations);
    fprintf('Max Constraint :    %d\n',output.maxconstraint);
elseif alg == 3
    tic
    [x,fval, exitflag, output] =
opti_cbc([],f',Tcon,b,repmat(1000,size(b,2),1),[],[],repmat('B
',1,nbus));
    toc
    fprintf('Algorithm :     %s\n',output.Algorithm);
    fprintf('Status :        %s\n',output.Status);
end
fprintf('Optimal Number of PMUs :  %d\n',sum(full(x)));
fprintf('PMU location:    ');
[location] = find(x==1);
disp(location');
fprintf('-----\n');
[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x);
%Uncomment to print BOI
%fprintf('BOI INDEX :  \n');
%disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX :  %d\n',SORI);
fprintf('-----\n');

```

IX. Περίπτωση μελέτης για απώλεια μιας PMU

Επιλέγοντας μία από τις τιμές 14, 30, 57 και 118 για το nbus παίρνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τα δίκτυα IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 και IEEE 118 αντίστοιχα.

```
%PMU loss

%Non Conventional measurements
%IEEE networks processing using MATPOWER and bintprog algorithm with
PMU
%loss
clc;clear all;
nbus = 14;%Select type of IEEE network, nbus = [14,10,57,118];
f = ones(1,nbus);
b = 2*ones(1,nbus);
case_id = strcat('case',int2str(nbus));
[baseMVA, bus, gen, branch ] = loadcase(case_id);
[A] = makeAbinary(bus, branch);
%[A] = Abinary_connectivity_matrix(nbus);
fprintf('-----\n');
fprintf('IEEE %d network \n',nbus);
fprintf('bintprog algorithm - branch and bound\n');
fprintf('Optimization processing...\n');
tic
[x, nPMU, exitflag, output] = bintprog(f,-A,-b);
toc
fprintf('Optimal Number of PMUs : %d\n',nPMU);
fprintf('PMU location: ');
[location] = find(x==1);
disp(location');
fprintf('Iterations : %d\n',output.iterations);
fprintf('Nodes : %d\n',output.nodes);
fprintf('Algorithm : %s\n',output.algorithm);
fprintf('branchStrategy : %s\n',output.branchStrategy);
fprintf('Node Search Strategy : %s\n',output.nodeSrchStrategy);
fprintf('-----\n');
[BOI,SORI] = BOI_SORI(A,x);
%Uncomment to print BOI
%fprintf('BOI INDEX : \n');
%disp(BOI');
fprintf('SORI INDEX : %d\n',SORI);
fprintf('-----\n');
-\n');
```

Αποτελέσματα προσομοίωσης στο παράθυρο του MATLAB

I. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με BIP

i) nbus = 14

```
-----  
IEEE 14 network  
bintprog algorithm - branch and bound  
Optimization processing...  
Optimization terminated.  
Elapsed time is 0.637109 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 4  
PMU location:    2    6    7    9
```

```
Iterations : 8  
Nodes : 1  
Algorithm : LP-based branch-and-bound  
branchStrategy : maximum integer infeasibility  
Node Search Strategy : best node search
```

```
-----  
SORI INDEX : 19  
-----
```

ii)nbus = 30

```
-----  
IEEE 30 network  
bintprog algorithm - branch and bound  
Optimization processing...  
Optimization terminated.  
Elapsed time is 0.593497 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 10  
PMU location:    1    7    9   10   12   18   24   25   27   28
```

```
Iterations : 28  
Nodes : 1  
Algorithm : LP-based branch-and-bound  
branchStrategy : maximum integer infeasibility  
Node Search Strategy : best node search
```

```
-----  
SORI INDEX : 43  
-----
```

iii) *nbus* = 57

IEEE 57 network
bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.945728 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: Columns 1 through 13

1 4 6 13 20 22 25 27 29 32 36 39 41

Columns 14 through 17

45 47 51 54

Iterations : 118
Nodes : 17
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 67

iv) *nbus* = 118

IEEE 118 network
bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.714685 seconds.
Optimal Number of PMUs : 32
PMU location: Columns 1 through 13

3 7 9 11 12 17 21 25 28 34 37 41 45

Columns 14 through 26

49 53 56 62 63 68 70 71 76 79 85 86 89

Columns 27 through 32

92 96 100 105 110 114

Iterations : 140
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 157

II. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με MILP

i) nbus = 14

IEEE 14 network
CBC algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.141979 seconds.
Optimal Number of PMUs : 4
PMU location: 2 8 10 13

Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal

SORI INDEX : 14

ii) nbus = 30

IEEE 30 network
CBC algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.121052 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 7 8 10 11 12 19 23 26 29

Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal

SORI INDEX : 35

iii) nbus = 57

IEEE 57 network
CBC algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.264973 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: Columns 1 through 15

1 4 9 14 20 23 25 26 29 32 36 39 41 44 47

Columns 16 through 17

50 54

Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal

SORI INDEX : 65

iv) nbus = 118

IEEE 118 network
CBC algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.136501 seconds.
Optimal Number of PMUs : 32
PMU location: Columns 1 through 15

2 5 10 12 15 17 21 24 26 28 34 37 41 45 49

Columns 16 through 30

52 56 62 63 68 73 75 77 80 85 87 90 94 101 105

Columns 31 through 32

110 114

Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal

SORI INDEX : 153

III. Περίπτωση μελέτης χωρίς συμβατικές μετρήσεις- επίλυση με GA

Αλλάζοντας τις τιμές των παραμέτρων 'PopulationSize', 'Generations', 'EliteCount', και 'TolFun' παίρνουμε διαφορετικές λύσεις.

i) nbus = 14

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
0,'Generations',1000,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 14 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 12.979413 seconds.
Optimal Number of PMUs : 4
PMU location: 2 6 7 9

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 19

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',200  
, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

IEEE 14 network

Genetic algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 4.530402 seconds.

Optimal Number of PMUs : 4

PMU location: 2 7 11 13

Problem Type : integerconstraints

Generations : 51

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 16

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

IEEE 14 network

Genetic algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 3.466917 seconds.

Optimal Number of PMUs : 4

PMU location: 2 8 10 13

Problem Type : integerconstraints

Generations : 51

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 14

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',500  
0, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

IEEE 14 network
 Genetic algorithm
 Optimization processing...
 Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
 and constraint violation is less than options.TolCon.
 Elapsed time is 66.290478 seconds.
 Optimal Number of PMUs : 4
 PMU location: 2 7 10 13

Problem Type : integerconstraints
 Generations : 51
 Max Constraint : 0

 SORI INDEX : 16

```
options = gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf});
```

 IEEE 14 network
 Genetic algorithm
 Optimization processing...
 Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
 and constraint violation is less than options.TolCon.
 Elapsed time is 6.874542 seconds.
 Optimal Number of PMUs : 4
 PMU location: 2 6 8 9

Problem Type : integerconstraints
 Generations : 51
 Max Constraint : 0

 SORI INDEX : 17

ii) *nbus = 30*

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf}, 'PopulationSize',100  
0, 'Generations',1000, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

 IEEE 30 network
 Genetic algorithm
 Optimization processing...
 Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
 and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 16.514696 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 3 5 6 9 10 12 18 24 26 29

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 43

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
00,'Generations',1000,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 135.934388 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 2 6 10 11 12 18 24 26 30

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 43

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',400  
, 'Generations',100,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 7.917749 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 3 5 8 9 10 12 19 24 26 29

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 38

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',200  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 38.660037 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 3 5 6 9 10 12 18 23 26 30

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 42

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',300  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 74.905967 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 2 6 9 10 12 15 19 25 27

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 50

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',250
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 47.877194 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location:    3  5  9  10  12  18  24  25  28  30
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 41
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',150
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 29.097838 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location:    3  6  7  10  11  12  19  24  25  30
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 43
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',500
,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 14.144768 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 5 9 10 12 15 19 25 28 30

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 42

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',350  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 62.749001 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 2 4 6 9 10 12 15 19 25 27

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 52

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',400  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 72.054915 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 5 6 10 11 12 15 19 25 29

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 44

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',320  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 64.893801 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 1 7 8 10 11 12 15 20 25 27

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 41

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',120  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 26.694371 seconds.
Optimal Number of PMUs : 10
PMU location: 3 5 6 10 11 12 15 19 25 30

Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 44

iii) *nbus* = 57

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 38.148740 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: 1 4 9 14 19 22 25 26 29 32 36 41 44 47
50 53 57

Problem Type : integerconstraints
Generations : 66
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 66

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',900  
, 'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 33.052107 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: 1 4 9 20 24 26 29 31 32 36 38 41 44 46
51 54 57

Problem Type : integerconstraints
Generations : 63

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 68

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',110  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 42.254196 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: 1 4 9 20 24 27 29 30 32 36 38 39 41 45
46 50 54

Problem Type : integerconstraints
Generations : 66
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 68

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',120  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 37.302984 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location: 1 4 9 20 24 25 27 29 32 36 38 41 45 46
51 54 57

Problem Type : integerconstraints
Generations : 60
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 68

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',160
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 45.366776 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:   1  4  9  10  20  23  26  29  30  32  36  39  41  45
46  49  54
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 57
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 67
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',170
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 50.348949 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:   1  4  9  20  24  25  27  29  32  36  38  39  41  45
46  51  54
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 60
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 68
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',180  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 57.711772 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 4 9 15 19 22 25 27 29 32 36 38 39 41  
47 51 53
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 67  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 71  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',200  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 66.790672 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 4 9 19 22 26 29 30 32 36 39 41 45 46  
49 50 54
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 59  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 67  
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',250
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 94.252543 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:    1  6  9 15 19 21 24 25 28 32 36 38 39 41
46 50 53
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 67
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 70
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',220
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 69.080281 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:    1  4  9 20 24 25 27 29 32 36 38 39 41 44
46 50 54
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 59
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 68
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',300  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 109.382966 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location:   1  4  9  20  24  28  29  30  32  36  38  39  41  44  
46  50  54
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 68  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 68  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',350  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 110.904175 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location:   1  4  9  15  20  24  27  29  30  32  36  38  39  41  
47  51  54
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 66  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 71  
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',400
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 142.036954 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:   1  4  9  15  20  24  25  28  29  32  36  38  39  41
46  50  54
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 66
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 71
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',450
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 168.467799 seconds.
Optimal Number of PMUs : 17
PMU location:   1  4  9  20  24  28  29  31  32  36  38  39  41  45
46  50  54
```

```
Problem Type : integerconstraints
Generations : 70
Max Constraint : 0
```

```
-----
SORI INDEX : 68
-----
```



```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',500  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 172.013948 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 4 9 20 24 27 29 31 32 36 38 41 45 46  
51 54 57
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 65  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 68  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',520  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 172.976764 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 4 9 15 20 24 27 29 30 32 36 38 41 47  
51 53 57
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 62  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 71  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',600  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 217.762031 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location:    1  4  9  19  22  25  27  29  32  36  38  39  41  45  
46  51  54
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 68  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 68  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',650  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 210.763875 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location:    1  4  9  15  20  24  27  29  30  32  36  38  41  46  
51  54  57
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 64  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 71  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',700  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 229.158267 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 6 9 15 19 22 25 27 29 32 36 38 39 41  
46 51 54
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 62  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 71  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 57 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 272.303140 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 17  
PMU location: 1 4 9 20 24 25 27 29 32 36 38 39 41 45  
46 51 53
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 64  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 68  
-----
```

iv) *nbus = 118*

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',260  
0,'Generations',400,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 143.619634 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 32  
PMU location:  Columns 1 through 21  
  
 1  6  9 11 12 17 21 25 29 34 37 40 45 49 53 56 62  
64 70 71 75  
  
Columns 22 through 32  
  
77 80 85 87 91 94 101 105 110 114 116
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 89  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 155  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',420  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 231.904288 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 32  
PMU location:  Columns 1 through 21  
  
 2  5  9 11 12 17 21 25 29 34 37 40 45 49 52 56 62  
64 70 71 75  
  
Columns 22 through 32
```

77 80 85 87 90 94 102 105 110 114 116

Problem Type : integerconstraints
Generations : 90
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 158

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',259  
8,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 118 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 170.127527 seconds.
Optimal Number of PMUs : 32
PMU location: Columns 1 through 21

1 5 10 11 12 17 21 23 25 29 34 37 40 45 49 52 56
62 63 68 71

Columns 22 through 32

75 77 80 85 86 91 94 102 105 110 115

Problem Type : integerconstraints
Generations : 87
Max Constraint : 0

SORI INDEX : 159

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',7510,'Generations',1000);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 485.393433 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 32  
PMU location: Columns 1 through 21
```

```
2 5 10 12 15 17 21 23 26 29 34 37 40 45 49 52 56  
62 64 68 71
```

```
Columns 22 through 32
```

```
75 77 80 85 86 90 94 102 105 110 115
```

```
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 86  
Max Constraint : 0
```

```
-----  
SORI INDEX : 160  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800  
0,'Generations',200,'TolFun', 1e-16,'TolCon',1e-16);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Genetic algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 748.314155 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 32  
PMU location: Columns 1 through 21
```

```
1 5 9 12 15 17 21 23 25 28 34 37 40 45 49 52 56  
62 64 68 71
```

Columns 22 through 32

75 77 80 85 87 91 94 101 105 110 115

Problem Type : integerconstraints

Generations : 126

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 161

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800  
0,'Generations',200,'TolFun', 1e-8,'TolCon',1e-16);
```

IEEE 118 network

Genetic algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than

options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 564.935158 seconds.

Optimal Number of PMUs : 32

PMU location: Columns 1 through 21

1 5 9 12 15 17 21 23 25 28 34 37 40 45 49 52 56
62 64 68 71

Columns 22 through 32

75 77 80 85 87 91 94 101 105 110 115

Problem Type : integerconstraints

Generations : 99

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 161

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800  
0,'Generations',200,'TolFun', 1e-8);
```

IEEE 118 network

Genetic algorithm

```

Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 596.588498 seconds.
Optimal Number of PMUs : 32
PMU location:  Columns 1 through 21

```

```

    1  5  9 12 15 17 21 23 25 28 34 37 40 45 49 52 56
62 64 68 71

```

```
Columns 22 through 32
```

```
    75  77  80  85  87  91  94 101 105 110 115
```

```

Problem Type : integerconstraints
Generations : 99
Max Constraint : 0

```

```
-----
SORI INDEX : 161
-----
```

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',7500,'Generations',200);
```

```

-----
--
IEEE 118 network
Genetic algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty
fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 471.021961 seconds.
Optimal Number of PMUs : 32
PMU location:  Columns 1 through 21

```

```

    1    5    9    12    15    17    21    25    28
34   37   40   45   49   52   56   62   64   68
70   71

```

```
Columns 22 through 32
```

```

    75    77    80    85    87    90    94   102   105
110   114

```

```

Problem Type : integerconstraints
Generations : 96
Max Constraint : 0

```

```
-----
--
```


SORI INDEX : 162


```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',7700,'Generations',200);
```

IEEE 118 network

Genetic algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 525.913524 seconds.

Optimal Number of PMUs : 32

PMU location: Columns 1 through 21

1 5 9 11 12 17 21 25 29 34 37 40 45 49 52 56 62
64 68 70 71

Columns 22 through 32

75 77 80 85 87 91 94 101 105 110 114

Problem Type : integerconstraints

Generations : 97

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 161

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',7000,'Generations',200,'EliteCount',4,'TolFun',1e-12);
```

IEEE 118 network

Genetic algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 581.484017 seconds.

Optimal Number of PMUs : 32

PMU location: Columns 1 through 21

2 5 9 11 12 17 21 23 25 29 34 37 40 45 49 52 56
62 64 68 71

Columns 22 through 32

75 77 80 85 86 91 94 101 105 110 115

Problem Type : integerconstraints

Generations : 110

Max Constraint : 0

SORI INDEX : 161

IV. Περίπτωση μελέτης με μετρήσεις ροής ισχύος

i) nbus = 14

IEEE 14 network

with conventional measurements (power flows)bintprog algorithm - branch and bound

Optimization processing...

Optimization terminated.

Elapsed time is 0.567120 seconds.

Optimal Number of PMUs : 2

PMU location: 4 13

Iterations : 6

Nodes : 1

Algorithm : LP-based branch-and-bound

branchStrategy : maximum integer infeasibility

Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 10

ii) nbus = 30

IEEE 30 network

with conventional measurements (power flows)bintprog algorithm - branch and bound

Optimization processing...

Optimization terminated.

Elapsed time is 0.494481 seconds.

Optimal Number of PMUs : 4

PMU location: 6 9 10 25

Iterations : 8

Nodes : 1

Algorithm : LP-based branch-and-bound

branchStrategy : maximum integer infeasibility

Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 23

iii) *nbus* = 57

IEEE 57 network
with conventional measurements (power flows)bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.467975 seconds.
Optimal Number of PMUs : 6
PMU location: 8 15 22 32 55 57

Iterations : 20
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 24

iv) *nbus* = 118

IEEE 118 network
with conventional measurements (power flows)bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.716348 seconds.
Optimal Number of PMUs : 18
PMU location: Columns 1 through 13

9 11 12 19 24 30 32 37 49 59 65 68 70

Columns 14 through 18

80 85 92 105 110

Iterations : 55
Nodes : 2
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 108

V. Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης - επίλυση με BIP

i) *nbus* = 14

IEEE 14 network
Generalized Gou Algorithm

Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.456090 seconds.
Optimal Number of PMUs : 3
PMU location: 2 6 9

Iterations : 7
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 15

ii) nbus = 30

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.461320 seconds.
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 7 10 12 19 24 29

Iterations : 10
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 29

iii) nbus = 57

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 3.709284 seconds.
Iterations : 2674
Nodes : 532
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 25 26 29 32 37 48 51 54 56

SORI INDEX : 53

iv) $nbus = 118$

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 1.625047 seconds.
Iterations : 290
Nodes : 55
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 27

3 9 12 15 17 21 25 28 34 40 45 49 53 56 61 62 70 75 77
80 85 86 90 94 101 105 110

Column 28

114

SORI INDEX : 143

VI. Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης- επίλυση με MILP

i) $nbus = 14$

IEEE 14 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.122565 seconds.
Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal
Optimal Number of PMUs : 3
PMU location: 2 6 9

SORI INDEX : 15

ii) $nbus = 30$

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.123697 seconds.

Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 5 10 12 19 24 27

SORI INDEX : 31

iii) nbus = 57

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 0.163445 seconds.
Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 24 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 53

iv) nbus = 118

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Elapsed time is 2.379046 seconds.
Algorithm : CBC: Branch and Cut using CLP
Status : Integer Optimal
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 21

3 9 12 15 17 21 23 28 34 40 45 49 52 56 62 64 71
75 77 80 85

Columns 22 through 28

87 90 94 101 105 110 115

SORI INDEX : 140

VII. Περίπτωση μελέτης με ζυγούς μηδενικής έγχυσης- επίλυση με GA

i) nbus=14

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
0,'Generations',1000,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 14 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 13.628158 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 3  
PMU location: 2 6 9
```

```
-----  
SORI INDEX : 15  
-----
```

ii) nbus=30

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 22.357482 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 7  
PMU location: 2 4 10 12 19 24 29
```

```
-----  
SORI INDEX : 33  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',500  
, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 14.117500 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 7  
PMU location: 2 3 10 12 19 23 27
```

```
-----  
SORI INDEX : 32  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',600  
0, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 15.093396 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 7  
PMU location: 1 7 10 12 18 24 27
```

```
-----  
SORI INDEX : 31  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',700  
, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```



```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 16.203287 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 7  
PMU location: 3 7 10 12 19 24 27
```

```
-----  
SORI INDEX : 31  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800  
, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 18.534428 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 51  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 7  
PMU location: 2 3 10 12 18 23 27
```

```
-----  
SORI INDEX : 32  
-----
```

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',100  
0, 'Generations',200, 'EliteCount',10, 'TolFun',1e-8);
```

```
-----  
IEEE 30 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun
```

and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 21.838334 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 4 10 12 18 24 27

SORI INDEX : 35

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',110  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 23.315608 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 2 10 12 19 24 27

SORI INDEX : 33

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',120  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 24.190491 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 3 10 12 18 24 27

SORI INDEX : 33

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',150  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 29.469564 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 3 10 12 19 24 27

SORI INDEX : 33

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',200  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 36.790222 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 3 7 10 12 18 24 27

SORI INDEX : 31

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',250
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 44.538800 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 3 10 12 19 24 29
```

```
-----
SORI INDEX : 31
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',300
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 52.526469 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 7 10 12 19 24 29
```

```
-----
SORI INDEX : 29
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',350
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
```

Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 59.980644 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 2 10 12 18 24 27

SORI INDEX : 33

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',400  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 66.056322 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 7 10 12 18 24 27

SORI INDEX : 31

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',500  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 85.650416 seconds.
Problem Type : integerconstraints

Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 1 2 10 12 19 24 27

SORI INDEX : 33

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',600  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 95.836489 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 4 10 12 19 24 27

SORI INDEX : 35

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',700  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 114.207494 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 3 5 10 12 19 23 27

SORI INDEX : 30

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',800
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 30 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 131.924493 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 51
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 7
PMU location: 2 4 10 12 19 24 29
```

```
-----
SORI INDEX : 33
-----
```

iii) nbus=57

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',120
0,'Generations',200,'EliteCount',10);
```

```
-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 32.016183 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 52
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 24 29 31 32 37 48 51 54 56
```

```
-----
SORI INDEX : 54
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',140
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```

-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 36.479725 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 56
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 23 25 29 32 37 47 51 54 56

```

```

-----
SORI INDEX : 52
-----

```

```

options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',220
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);

```

```

-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 72.060089 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 66
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 6 9 19 25 27 32 37 38 46 51 53 56

```

```

-----
SORI INDEX : 54
-----

```

```

options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',240
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);

```

```

-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...

```


Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 72.856182 seconds.

Problem Type : integerconstraints

Generations : 67

Max Constraint : 0

Optimal Number of PMUs : 13

PMU location: 1 6 9 14 19 25 27 32 37 38 42 51 53

SORI INDEX : 53

options =

```
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',260  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network

Generalized Gou Algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 79.768526 seconds.

Problem Type : integerconstraints

Generations : 71

Max Constraint : 0

Optimal Number of PMUs : 13

PMU location: 1 6 9 14 19 25 27 32 37 38 51 53 56

SORI INDEX : 55

options =

```
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',280  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network

Generalized Gou Algorithm

Optimization processing...

Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun

and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 88.659548 seconds.

Problem Type : integerconstraints

Generations : 75

```
Max Constraint :      0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location:      1      4      13      20      25      27
29      32      37      48      51      54      56
```

```
-----
---
SORI INDEX : 53
-----
----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',320
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty
fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 100.271435 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 72
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location:      1      6      9      14      19      25
27      32      37      38      50      53      56
```

```
-----
---
SORI INDEX : 55
-----
----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',450
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 131.072488 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 66
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
```

PMU location: 1 4 13 19 23 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 52

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',460  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 122.182813 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 61
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 23 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 52

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',470  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 148.532411 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 71
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 6 9 14 19 25 27 32 37 38 51 53 56

SORI INDEX : 55

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',480
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 157.794086 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 77
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 25 27 29 32 37 48 51 54 56
```

```
-----
SORI INDEX : 53
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',320
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 148.087070 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 68
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 6 13 19 23 25 29 32 37 47 51 54 56
```

```
-----
SORI INDEX : 52
-----
```

```
options =
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',520
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

```
-----
IEEE 57 network
```

Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 152.684657 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 67
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 24 29 30 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 53

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',580  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 154.470620 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 63
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 5 13 19 23 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 50

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',640  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 189.811423 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 72
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 24 25 29 32 37 48 51 54 56

SORI INDEX : 54

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',680  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 212.099676 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 75
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 23 25 29 32 37 46 51 54 56

SORI INDEX : 52

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',720  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.

Elapsed time is 219.277062 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 72
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 6 13 19 23 25 29 32 37 48 51 54 56

SORI INDEX : 53

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',760  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 216.714933 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 67
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 23 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 52

```
options =  
gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',820  
0,'Generations',200,'EliteCount',10,'TolFun',1e-8);
```

IEEE 57 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 235.558716 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 70
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 13
PMU location: 1 4 13 20 24 25 29 32 37 47 51 54 56

SORI INDEX : 53

iv) nbus=118

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',3996);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 218.768901 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 88  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 28  
PMU location: Columns 1 through 21
```

```
1 8 12 15 17 21 23 28 34 40 45 49 52 56 62 65 70  
75 77 80 85
```

Columns 22 through 28

```
87 90 94 101 105 110 114
```

```
-----  
SORI INDEX : 143  
-----
```

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 214.461124 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 84  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 28  
PMU location: Columns 1 through 21
```

```
1 8 12 15 17 21 23 28 34 40 45 49 52 56 59 62 70  
75 77 80 85
```


Columns 22 through 28

86 91 94 101 105 110 114

SORI INDEX : 146

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 211.983658 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 87
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 21

1 8 12 15 17 21 27 28 32 34 40 45 49 52 56 59 62
70 75 77 80

Columns 22 through 28

85 86 90 94 102 105 110

SORI INDEX : 149

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 220.558955 seconds.
Problem Type : integerconstraints

Generations : 89
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 21

1 8 12 15 17 21 27 29 32 34 40 45 49 52 56 59 62
70 75 77 80

Columns 22 through 28

85 87 91 94 101 105 110

SORI INDEX : 148

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 214.824774 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 84
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 21

2 8 12 13 17 21 23 28 34 40 45 49 52 56 62 65 70
75 77 80 85

Columns 22 through 28

87 91 94 101 105 110 115

SORI INDEX : 140

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

IEEE 118 network
 Generalized Gou Algorithm
 Optimization processing...
 Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
 options.TolFun
 and constraint violation is less than options.TolCon.
 Elapsed time is 142.402987 seconds.
 Problem Type : integerconstraints
 Generations : 85
 Max Constraint : 0
 Optimal Number of PMUs : 28
 PMU location: Columns 1 through 14

3 9 12 15 17 21 27 29 32 34 40 45 49 52

Columns 15 through 28

56 59 66 70 75 77 80 85 86 90 94 102 105 110

 SORI INDEX : 149

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationS  

ize',4000);
```

IEEE 118 network
 Generalized Gou Algorithm
 Optimization processing...
 Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
 options.TolFun
 and constraint violation is less than options.TolCon.
 Elapsed time is 137.923643 seconds.
 Problem Type : integerconstraints
 Generations : 82
 Max Constraint : 0
 Optimal Number of PMUs : 28
 PMU location: Columns 1 through 14

3 8 12 15 17 21 27 29 32 34 40 45 49 52

Columns 15 through 28

56 59 62 70 75 77 80 85 87 91 94 101 105 110

 SORI INDEX : 149

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationS  

ize',4000);
```

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 157.938537 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 88
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 14

3 9 12 15 17 21 23 28 34 40 45 49 52 56

Columns 15 through 28

62 65 70 75 77 80 85 86 91 94 101 105 110 115

SORI INDEX : 144

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

IEEE 118 network
Generalized Gou Algorithm
Optimization processing...
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than
options.TolFun
and constraint violation is less than options.TolCon.
Elapsed time is 144.111802 seconds.
Problem Type : integerconstraints
Generations : 87
Max Constraint : 0
Optimal Number of PMUs : 28
PMU location: Columns 1 through 14

3 8 12 15 17 21 23 29 34 40 45 49 52 56

Columns 15 through 28

59 62 70 75 77 80 85 87 91 94 102 105 110 115

SORI INDEX : 146

```
options=gaoptimset('PlotFcns',{@gaplotbestf},'PopulationSize',4000);
```

```
-----  
IEEE 118 network  
Generalized Gou Algorithm  
Optimization processing...  
Optimization terminated: average change in the penalty fitness value less than  
options.TolFun  
and constraint violation is less than options.TolCon.  
Elapsed time is 147.127908 seconds.  
Problem Type : integerconstraints  
Generations : 86  
Max Constraint : 0  
Optimal Number of PMUs : 28  
PMU location: Columns 1 through 14
```

1 9 11 12 17 21 27 29 32 34 40 45 49 52

Columns 15 through 28

56 62 65 70 75 77 80 85 87 90 94 102 105 110

```
-----  
SORI INDEX : 144
```

VIII. Περίπτωση μελέτης για απώλεια μιας PMU

i) nbus = 14

```
-----  
IEEE 14 network  
bintprog algorithm - branch and bound  
Optimization processing...  
Optimization terminated.  
Elapsed time is 0.458082 seconds.  
Optimal Number of PMUs : 9  
PMU location: 2 4 5 6 7 8 9 11 13
```

```
Iterations : 13  
Nodes : 1  
Algorithm : LP-based branch-and-bound  
branchStrategy : maximum integer infeasibility  
Node Search Strategy : best node search
```

```
-----  
SORI INDEX : 39  
-----
```

ii) nbus = 30

IEEE 30 network
bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.505286 seconds.
Optimal Number of PMUs : 21
PMU location: 1 3 5 7 8 9 10 11 12 13 15 17 19 20 22 24
25 26 28 29 30

Iterations : 24
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 74

iii) nbus = 57

IEEE 57 network
bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.
Elapsed time is 0.529144 seconds.
Optimal Number of PMUs : 33
PMU location: Columns 1 through 27

1 3 4 6 9 12 15 19 20 22 24 26 28 29 30 31 32 33 35
36 38 39 41 43 45 46 47

Columns 28 through 33

50 51 53 54 56 57

Iterations : 62
Nodes : 1
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 127

iv) nbus = 118

IEEE 118 network
bintprog algorithm - branch and bound
Optimization processing...
Optimization terminated.

Elapsed time is 0.860764 seconds.
Optimal Number of PMUs : 68
PMU location: Columns 1 through 27

2 3 5 7 9 10 11 12 15 17 19 21 22 24 25 26 27 29 31
32 34 36 37 40 42 44 45

Columns 28 through 54

46 49 52 53 56 57 58 59 62 64 65 67 68 70 71 73 75 77
79 80 84 85 86 87 89 91 92

Columns 55 through 68

94 96 100 102 105 107 109 110 111 112 115 116 117 118

Iterations : 158
Nodes : 11
Algorithm : LP-based branch-and-bound
branchStrategy : maximum integer infeasibility
Node Search Strategy : best node search

SORI INDEX : 299
