

Α.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ Τ.Τ.

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΕ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

“Διαχείριση και Ενεργειακή Βελτιστοποίηση Συστημάτων”

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Εφαρμογές βελτιστοποίησης σε Ευφυή Δίκτυα (Βέλτιστη τοποθέτηση μετρήσεων - Phasors - για την παρατηρησιμότητα του δικτύου)»

“Optimization applications in Intelligent Networks (Optimum placement of measurements - Phasors - for network observation)”



Υπεύθυνος Καθηγητής: Δρ. Μαλατέστας Β. Παντελής

Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Στέργιος Γερασόπουλος

Α.Μ.: 42

Αιγάλεω

Οκτώβριος 2017

Copyright © Γερασόπουλος Στέργιος, 2017

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 της 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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ανώτατου Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Παντελή Μαλατέστα, Καθηγητή του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ. του τμήματος Ηλεκτρολογίας, τόσο για τη δυνατότητα όσο και για τη συνδρομή του ώστε να πραγματοποιηθεί αυτή η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νικόλαο Μ. Μανουσάκη, για την συνεχή καθοδήγηση και ενθάρρυνση του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους, όπως και την οικογένεια μου που με στήριξαν στο εγχείρημα μου αυτό.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (PMUs) με στόχο την πλήρη παρατηρησιμότητα 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 του PMU, καθώς και τη σύγκρισή τους με εκείνες της τεχνολογίας SCADA. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται και αναλύεται μια τοπολογική μέθοδος παρατηρησιμότητας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός είναι μια επιλογή για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης τοποθέτησης PMUs.

Οι προσομοιώσεις της διπλωματικής εργασίας εκτελέστηκαν σε περιβάλλον MATLAB και για τα δίκτυα 14, 30, 57 και 118 ζυγών του IEEE.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών, βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων μέτρησης φασιθετών, εκτίμηση κατάστασης, παρατηρησιμότητα δικτύου, ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός.

ABSTRACT

The current Diploma thesis is to solve the problem of the optimum placement of Phasor Measurement Units (PMUs), in order to achieve full network observability. The optimal PMU placement problem is formulated as to minimize the number of PMUs to be installed subject to full network observability.

The thesis initially presents the historical development, starting from the original concept of synchronized measurements until the modern standard PMU device, the basic features of the PMU, as well as comparing them with the features of SCADA technology. Furthermore, this thesis presents a fast analysis method for power system topology observability.

Integer linear programming is an option to solve the problem of optimal PMU placement.

Diploma thesis simulations were performed in a MATLAB environment and for network 14, 30, 57 and 118 bus systems of IEEE.

KEY WORDS

Phasor measurement unit (PMU), optimal PMU placement, state estimation, network observability, integer linear programming.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ.....	11

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	13
1.3 Καταστάσεις λειτουργίας.....	15

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Τι είναι το έξυπνο δίκτυο.....	17
2.2 Προσεγγίσεις.....	17
2.3 Η ανάγκη για Έξυπνα Δίκτυα.....	19
2.4 Βασικές τεχνολογίες στα Έξυπνα Δίκτυα.....	20
2.5 Σύγκριση.....	22

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - PHASOR MEASUREMENT UNITS

3.1 Ορισμός φασιθέτη.....	23
3.2 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη.....	24
3.3 Μονάδα Μέτρησης Φασικής Γωνίας.....	25
3.4 Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών.....	26
3.5 Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης.....	29
3.6 Κατασκευαστές και εγκατεστημένες μονάδες μέτρησης φασιθετών.....	31
3.7 Εξισώσεις συμβατικών μετρήσεων.....	34
3.8 Εξισώσεις συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών.....	36
3.9 Σύγκριση τεχνολογίας PMU και SCADA.....	39
3.10 Πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση PMUs.....	43
3.10.1 Παρακολούθηση και έλεγχος σε πραγματικό χρόνο.....	44

3.10.2	Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού συστήματος.....	44
3.10.3	Διαχείριση συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο.....	45
3.10.4	Επικύρωση και συντονισμός των μοντέλων των συστημάτων.....	46
3.10.5	Ανάλυση διαταραχών.....	46
3.10.6	Επαναφορά συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	47
3.10.7	Έλεγχος υπερφόρτισης και δυναμική εκτίμηση.....	48
3.10.8	Επιλεκτική Προστασία.....	48
3.10.9	Προγραμματισμένη απομόνωση ηλεκτρικών συστημάτων.....	49

4^ο Κεφάλαιο - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.1	Παρατηρησιμότητα Συστήματος.....	52
4.2	Μέθοδοι ανάλυσης παρατηρησιμότητας.....	52
4.2.1	Τοπολογικές.....	52
4.2.2	Αριθμητικές.....	53
4.2.3	Υβριδικές.....	53
4.2.4	Συμβολικές.....	53
4.3	Διατύπωση συνθήκης παρατηρησιμότητας.....	54
4.4	Δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων.....	54
4.4.1	Μετρήσεις SCADA.....	55
4.4.1.1	Για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι σε πολική μορφή.....	55
4.4.1.2	Για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι σε καρτεσιανή μορφή.....	56
4.4.2	Μετρήσεις PMU.....	59
4.4.2.1	Για φασιθέτες ρεύματος σε καρτεσιανή και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή.....	59
4.4.2.2	Για φασιθέτες ρεύματος σε καρτεσιανή και μεταβλητές κατάστασης σε καρτεσιανή μορφή.....	60
4.4.2.3	Για φασιθέτες ρεύματος και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή.....	61

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMUs

5.1	Βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMUs.....	63
5.2	Ταξινόμηση μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος OPP.....	64
5.2.1	Κατηγορίες μαθηματικών αλγορίθμων.....	64
5.2.1.1	Ακέραιος προγραμματισμός.....	64
5.2.1.2	Εξαντλητική αναζήτηση.....	64
5.2.2	Κατηγορίες ευρετικών αλγορίθμων.....	65
5.2.2.1	Γενετικός αλγόριθμος.....	65
5.2.2.2	Αναζήτηση Tabu.....	65
5.2.2.3	Προσομοιωμένη ανόπτηση.....	65
5.2.2.4	Διαφορική εξέλιξη.....	65
5.2.2.5	Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.....	65
5.2.2.6	Ανοσοποιητικός αλγόριθμος.....	66
5.2.2.7	Επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση.....	66
5.2.2.8	Εύρεση γεννητικού δένδρου.....	66
5.2.2.9	Άπληστος αλγόριθμος.....	66
5.2.2.10	Επαναληπτικός αλγόριθμος ασφάλειας N.....	66
5.2.2.11	Δένδρο απόφασης.....	66
5.2.2.12	Πρακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι.....	67
5.3	Επίλυση του προβλήματος OPP με χρήση γραμμικού προγραμματισμού.....	67
5.4	Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.....	68
5.4.1	Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού θεωρώντας μετρήσεις ροής.....	71
5.4.2	Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού θεωρώντας μετρήσεις ροής και μηδενικής έγχυσης.....	72

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1	Εισαγωγή MATLAB.....	74
-----	----------------------	----

6.1.1	Τι είναι το MATLAB.....	74
6.1.2	Το περιβάλλον του MATLAB.....	77
6.2	Εντολές MATLAB.....	79
6.2.1	Γενικά.....	79
6.2.2	Εισαγωγή Πινάκων.....	80
6.2.3	Βασικές Συναρτήσεις.....	80
6.2.4	Πράξεις Πινάκων.....	82
6.2.5	Αλγόριθμος SIMPLEX – Προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού.....	84
6.3	Προσομοιώσεις δικτύων IEEE.....	90
6.3.1	IEEE-14 bus system.....	90
6.3.2	IEEE-30 bus system.....	93
6.3.3	IEEE-57 bus system.....	96
6.3.4	IEEE-118 bus system.....	99

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Συμπεράσματα

7.1	Σύνοψη της εργασίας.....	101
7.2	Επεκτάσεις της εργασίας.....	102

<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	103
----------------------------------	-----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΑΚΡΩΝΥΜΩΝ

AEP	American Electrical Power
A/D	Analog to Digital
DFT	Discrete Fourier Transform
EMS	Energy Management System
ESA	European Space Agency
ES	Exhaustive Search
FRACSEC	FRACTION of a SECOND
GNSS	Global Navigation Satellite System
GLONASS	GLOBal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GPS	Global Positioning System
GrA	Greedy Algorithm
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
ILS	Iterated Local Search
KCL	Kirchhoff Current Law
NP-hard	Nondeterministic Polynomial time-hard
OPP	Optimal PMU Placement
PSO	Particle Swarm Optimization
PAMU	Phase Angle Measurement Unit
PDC	Phasor Data Concentrator
PMU	Phasor Measurement Unit
PPS	Pulse Per Second
SOC	Second Of Century
SE	State Estimation
STS	Spanning Tree Search
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
UTC	Universal Time Coordinated
VME	Virtual Machine Environment

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

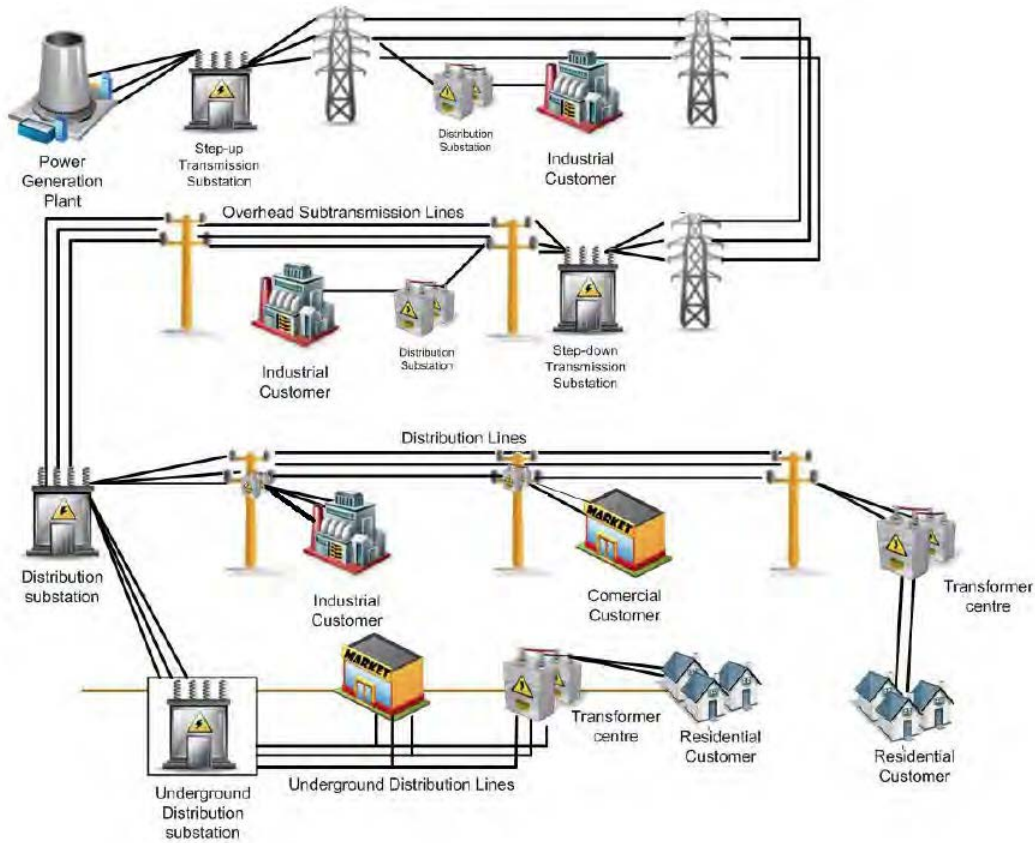
1.1 Εισαγωγή

Ο ηλεκτρισμός είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας. Τόσο άρρηκτα συνδεδεμένο με κάθε τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας που δε θα ήταν υπερβολή να πούμε πως είναι η κινητήριος δύναμη ολόκληρου του κόσμου και ο ουσιαστικότερος φορέας εξέλιξης και προόδου σήμερα. Από τον Nicola Tesla ο οποίος παρουσίασε στις 16 Μαΐου του 1888 στο Αμερικανικό Ινστιτούτο Ηλεκτρομηχανικής μια πρωτοποριακή ιδέα για «το Νέο Σύστημα Κινητήρων και Μετασχηματισμών Εναλλασσόμενου Ρεύματος», μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα και τη δημιουργία των πρώτων ηλεκτρικών δικτύων μεταφοράς ρεύματος τα οποία χαρακτηρίστηκαν ως το σπουδαιότερο επίτευγμα του αιώνα από την Εθνική Ακαδημία Μηχανικών (National Academy of Engineers), αλλά και μέχρι τις μέρες μας, ο ηλεκτρισμός εξακολουθεί να αλλάζει σημαντικά τη ζωή μας.

1.2 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούνται από τα συστήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα μεταφοράς περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό υποσταθμών, οι οποίοι διασυνδέονται μεταξύ τους μέσω γραμμών μεταφορών, Μ/Σ και άλλων συσκευών για τον έλεγχο και την προστασία του συστήματος. Η ισχύς μπορεί να εγχέεται στο σύστημα από τις γεννήτριες ή να απορροφάται από το σύστημα μέσω των φορτίων στους υποσταθμούς. Η τάση εξόδου των γεννητριών τυπικά δεν υπερβαίνει τα 30kV. Επομένως, χρησιμοποιούνται Μ/Σ για να αυξήσουν τα επίπεδα της τάσης που μπορούν να παράσχουν οι γεννήτριες μας προς το σύστημα διανομής. Η υψηλή τάση προτιμάται στα συστήματα μεταφοράς για διάφορους λόγους ένας εκ των οποίων είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών χαλκού, οι οποίες είναι ανάλογες των ροών ρεύματος κατά μήκος των γραμμών. Στη πλευρά άφιξης του, το σύστημα μεταφοράς συνδέεται με το σύστημα διανομής το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης. Το σύστημα διανομής λειτουργεί σε μια ακτινωτή διάταξη στην οποία οι κλάδοι διανομής ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής και σχηματίζουν μια δομή δένδρου με τις

ρίζες τους στον υποσταθμό και τους κλάδους να απλώνονται σε όλη τη περιοχή διανομής.



Σχήμα 1.1 Η μεταφορά και διάδοση της ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή στην κατανάλωση[1]

Γενικά απαιτητό από ένα Διασυνδεδετικό Σύστημα (Μεταφοράς ή Διανομής) είναι ότι θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση, το κύμα της τάσεως να έχει ημιτονοειδή μορφή, η συχνότητα να είναι σταθερή, η αποδοτικότητα να πλησιάζει τη μέγιστη τιμή ώστε να ελαχιστοποιείται το ετήσιο κόστος μεταφοράς και τέλος η επίδραση στις εγκαταστάσεις άλλων κοινωφελών επιχειρήσεων να περιορίζεται σε αποδεκτά όρια. Τα πλεονεκτήματα ενός τέτοιου Συστήματος είναι:

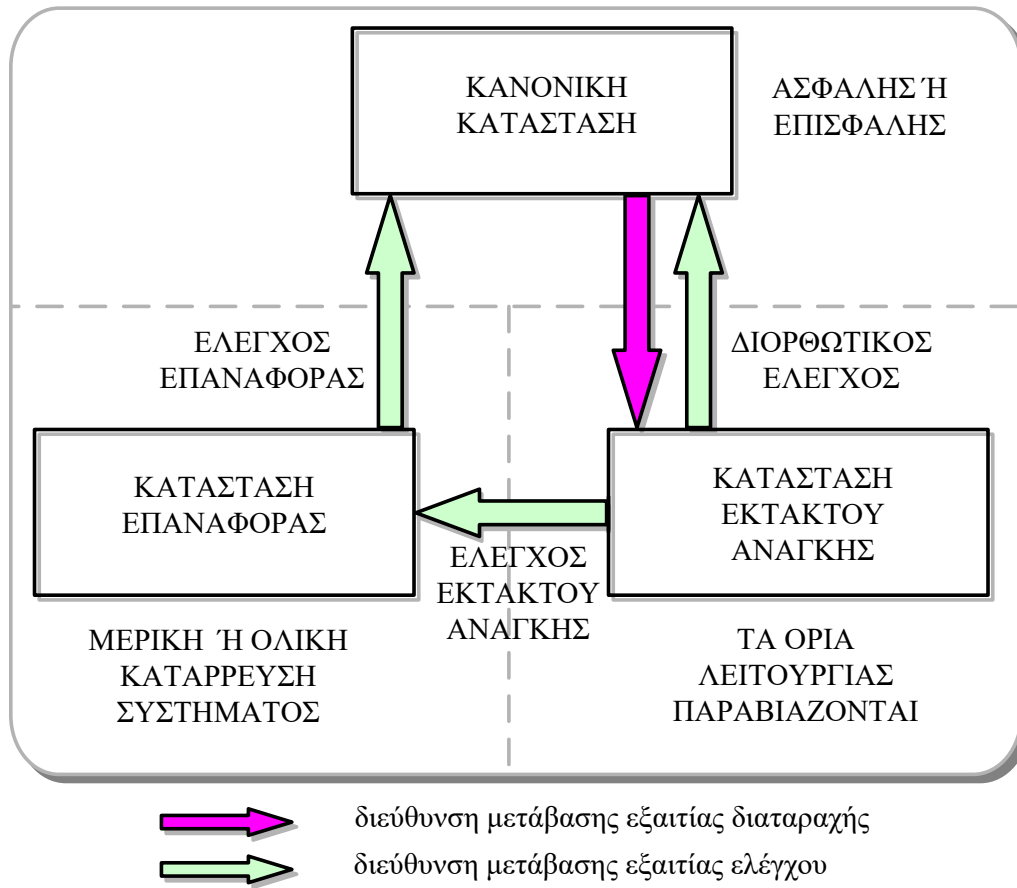
- Δυνατότητα ένταξης μεγαλύτερων και οικονομικότερων μονάδων παραγωγής στο σύστημα.

- Δυνατότητα μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής προς τα μείζονα κέντρα φορτίου.
- Μείωση απαιτήσεων εφεδρείας κάθε μιας από τις διασυνδεδεμένες περιοχές ή συστήματα.
- Οικονομία ισχύος με εποχιακές ανταλλαγές ισχύος μεταξύ περιοχών ή συστημάτων, τα οποία έχουν διαφορετικές ανάγκες ανά εποχή.
- Οικονομία ισχύος λόγω διαφορών στις ζητήσεις φορτίου μεταξύ περιοχών ή συστημάτων κατά την διάρκεια του 24ώρου.
- Δυνατότητα αντιμετώπισης απρόβλεπτων ζητήσεων λόγω εκτάκτου ανάγκης.

1.3 Καταστάσεις λειτουργίας

Οι λειτουργικές συνθήκες ενός συστήματος για οποιαδήποτε χρονική στιγμή μπορούν να προσδιοριστούν, εάν είναι γνωστοί δύο παράγοντες: το μοντέλο του δικτύου και οι τάσεις των ζυγών του συστήματος. Η στατική κατάσταση του συστήματος σχετίζεται με τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, αφού προσδιορίζεται από το σύνολο των τάσεων των ζυγών. Καθώς οι συνθήκες λειτουργίας αλλάζουν, το σύστημα μπορεί να εισέλθει σε τρεις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας: την κανονική, την έκτακτη ή την επαναφοράς [2]. Η κανονική κατάσταση λειτουργίας ενός συστήματος εμφανίζεται όταν όλα του τα φορτία τροφοδοτούνται με την απαιτούμενη ισχύ χωρίς να υπάρχουν παρεκκλίσεις στους περιορισμούς λειτουργίας του. Οι συνήθεις περιορισμοί λειτουργίας αφορούν τα όρια ισχύος των γραμμών μεταφοράς και των τάσεων των ζυγών. Η κανονική κατάσταση μπορεί να χαρακτηριστεί ως ασφαλής ή επισφαλής. Στην ασφαλή κατάσταση λειτουργίας το σύστημα παραμένει στην κανονική του κατάσταση μετά την ολοκλήρωση μιας διαταραχής, ενώ στη επισφαλή κατάσταση το σύστημα οδηγείτε στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης κατά την εμφάνιση των διαταραχών. Σε περίπτωση εμφάνισης απρόσμενων συμβάντων ή παραβίασης κάποιων περιορισμών λειτουργίας, το σύστημα οδηγείτε στην κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Η επέμβαση με άμεσες διορθωτικές κινήσεις μπορεί να επαναφέρει το σύστημα στην κανονική κατάσταση λειτουργίας του. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση επαναφοράς ώστε να αποφευχθεί η πλήρης κατάρρευση του. Για τον σκοπό αυτό μπορούν να εκτελεστούν διαδικασίες αποκοπής φορτίου και αποσύνδεσης γραμμών και εξοπλισμού ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του

συστήματος, ικανοποιώντας τόσο τους περιορισμούς λειτουργίας όσο και τη συνεχή τροφοδοσία των φορτίων. Συνεπώς κάθε σύστημα μπορεί να μεταβεί μεταξύ τριών διαφορετικών καταστάσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2 Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

2.1 Τι είναι το έξυπνο δίκτυο

Το έξυπνο δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που παρέχει ενέργεια στους πελάτες από διάφορα σημεία του και διανέμει την ενέργεια με την βοήθεια καινοτόμων εφαρμογών χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς και διανομής. Το «κτίσιμο» του έξυπνου δικτύου περιλαμβάνει την χρήση τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνίας, ώστε αυτό να λειτουργεί περισσότερο:

- αποδοτικά
- αξιόπιστα

Μπορεί να ενσωματώσει ανανεώσιμες πηγές, οι οποίες δεν είναι σταθερές και μπορούν να καταστούν:

- αξιόπιστες
- καλύτερα ελεγχόμενες

Οι εφαρμογές έξυπνου δικτύου χρησιμοποιούν την παρεχόμενη πληροφορία για να βελτιστοποιήσουν την ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Η προσθήκη αισθητήρων, καινοτόμων υπηρεσιών βασιζόμενων στην επεξεργασία της πληροφορίας και των ψηφιακών επικοινωνιών καθιστά το έξυπνο δίκτυο:

- Παρατηρήσιμο
- Ελέγξιμο
- Αυτοματοποιημένο
- Πλήρως ολοκληρωμένο

2.2 Προσεγγίσεις

Η *Ευρωπαϊκή προσέγγιση* των έξυπνων δικτύων βασίζεται στις ανάγκες των ηλεκτρικών δικτύων όπως φαίνεται παρακάτω:

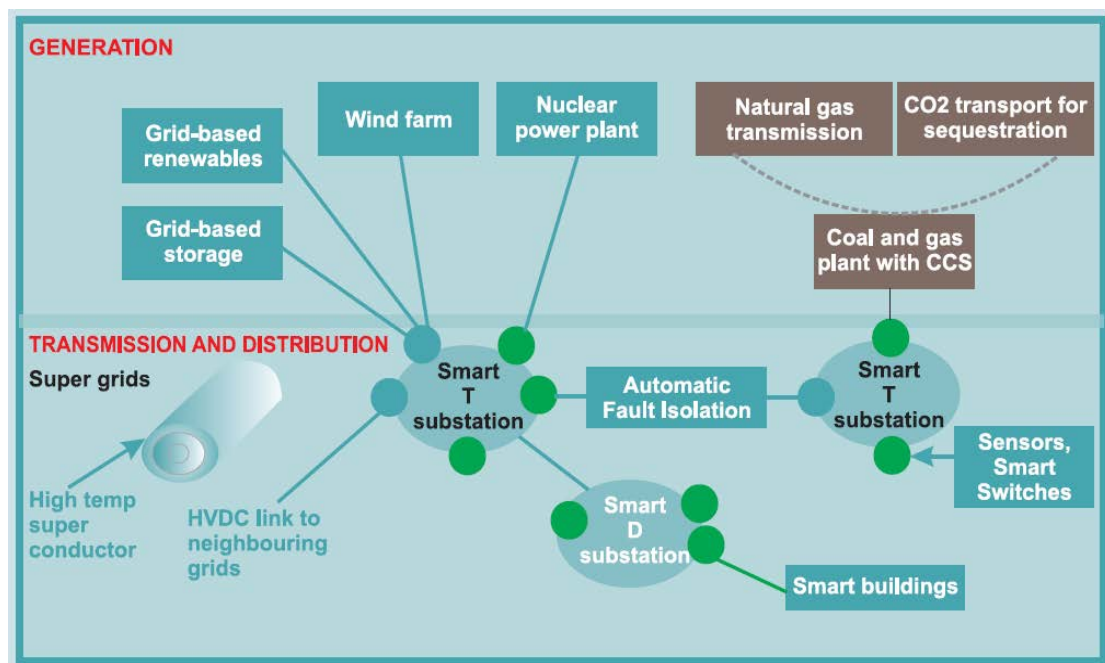
- **Ευέλικτα:** Ικανοποίηση των αναγκών των πελατών ώστε να ανταποκρίνονται στις μελλοντικές αλλαγές και προκλήσεις

- **Προσβάσιμα:** Δυνατότητα σύνδεσης σε όλες τους χρήστες του δικτύου, ιδιαίτερα για ανανεώσιμες πηγές και τοπική παραγωγή υψηλής απόδοσης με μηδενικές ή χαμηλές εκπομπές άνθρακα
- **Αξιόπιστα:** Διασφάλιση και βελτίωση της ασφάλειας και της ποιότητας της παρεχόμενης ενέργειας, με ικανοποίηση των απαιτήσεων της νέας εποχής και ανθεκτικότητα σε κινδύνους και αβεβαιότητες
- **Οικονομικά:** Παρέχουν την καλύτερη τιμή μέσω των τεχνολογικών καινοτομιών, αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας και ισχυροποιούν τον ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων για προσφορά καλύτερων τιμών

Η *Αμερικάνικη προσέγγιση* βασίζεται περισσότερο στις προηγμένες διαδραστικές επικοινωνίες και ελέγχους από μία κυβερνο-υποδομή που εγκαθίστανται στο υπάρχον δίκτυο.

Συνοπτικά οι πυλώνες του έξυπνου δικτύου, Σχήμα 2.1, είναι:

- Βελτιστοποίηση Μεταφοράς
- Διαχείριση Ζήτησης
- Βελτιστοποίησης Διανομής
- Βελτιστοποίηση Εξοπλισμού



Σχήμα 2.1 Σύνοψη του Έξυπνου Δικτύου

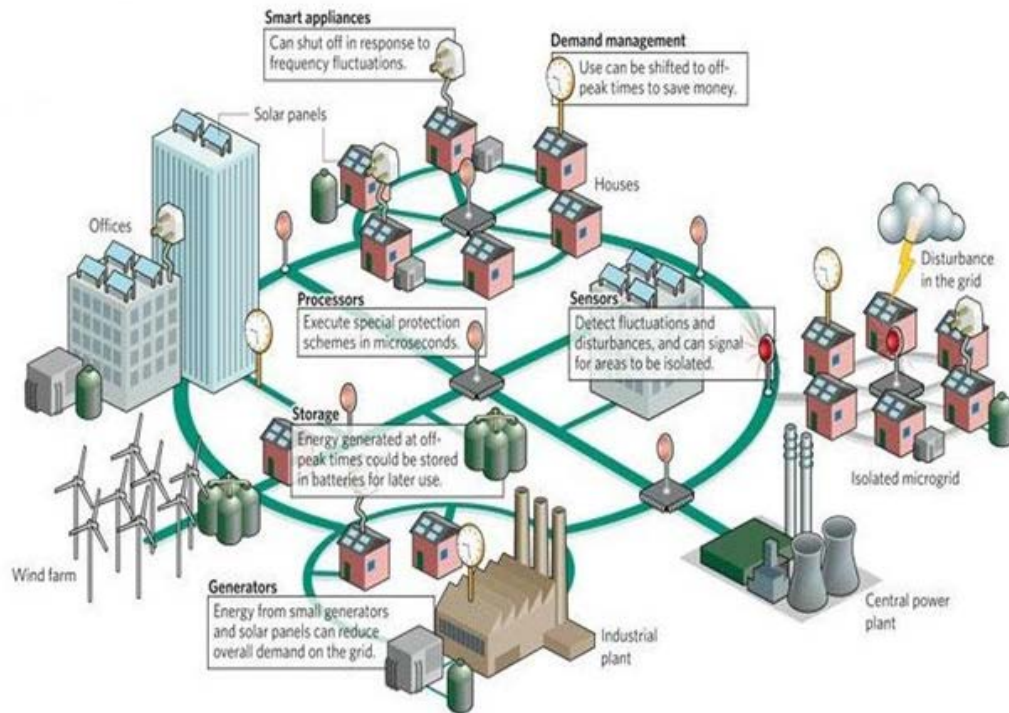
2.3 Η ανάγκη για Έξυπνα Δίκτυα

Τα ηλεκτρομηχανολογικά ηλεκτρικά δίκτυα είναι ανεπαρκή και επιρρεπή σε σφάλματα. Έχουν καταστεί ανελαστικές δομές υπό υψηλή πίεση. Η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με την παρεχόμενη ενέργεια, εξαιτίας της αύξησης του πληθυσμού. Με την αύξηση του ενεργειακού κόστους, οι απαιτήσεις των καταναλωτών αυξάνονται. Οι πελάτες είναι περισσότερο ευαισθητοποιημένοι σε θέματα προστασίας περιβάλλοντος, χρησιμοποιούν λιγότερη ενέργεια και ελέγχουν τα κόστη τους. Οι πελάτες, επίσης, είναι όλο και πιο τεχνολογικά καταρτισμένοι και απαιτούν να λαμβάνουν άμεσα πληροφορίες που θα τους βοηθήσουν να διαχειριστούν την ενεργειακή χρήση τους, ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του Έξυπνου Δικτύου είναι η ώθηση που δίνεται στους καταναλωτές να διαχειριστούν την ενέργεια και να ελέγξουν τα κόστη τους. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνονται εξαιτίας της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης. Τελικά είναι προφανές ότι απαιτείται μια νέα μέθοδος.

Σήμερα, εάν υπάρχει μία κατάρρευση της τάσης σε έναν τοπικό υποσταθμό, ο πάροχος το αντιλαμβάνεται όταν καλέσει ο πελάτης για να παραπονεθεί. Εάν εγκατασταθεί ένας αισθητήρας μέσα στον μετασχηματιστή ή κατά μήκος των τυλιγμάτων του, το πρόβλημα θα μπορούσε να εντοπιστεί και αναφερθεί ή ακόμη και να αποτραπεί στην αρχή της δημιουργίας του.

Παρότι ζούμε στον αιώνα της πληροφορίας, οι περισσότεροι καταναλωτές παίρνουν μια εικόνα της ενεργειακής κατανάλωσής τους όταν λαμβάνουν τους λογαριασμούς. Στους οικιακούς καταναλωτές, το έξυπνο δίκτυο θα παρείχε λεπτομερή πληροφόρηση σχετικά με την κατανάλωση με εργαλεία παρακολούθησης της κατανάλωσης, οθόνες ή διαδικτυακές εφαρμογές οι οποίες θα παρέχουν μια εικόνα της ενέργειας που καταναλώνεται σε πραγματικό χρόνο, ποιες συσκευές καταναλώνουν περισσότερο, και πόση ενέργεια καταναλώνεται σε σχέση με άλλους καταναλωτές.

Το Έξυπνο Δίκτυο, Σχήμα 2.2, μπορεί να μετασχηματίσει τον τρόπο με τον οποίο η ισχύς καταναλώνεται, αυξήσει την αξιοπιστία και την ποιότητα ισχύος, βελτιώσει την απόκριση και απόδοση, μειώσει δυννητικά το κόστος για τον πάροχο και τον καταναλωτή, προσθέσει «ευφυΐα» στο υπάρχον δίκτυο, μειώσει τις εκπομπές αερίου του θερμοκηπίου και μειώσει την κατανάλωση ενέργειας από πλευρά των χρηστών ιδιαίτερα κατά τις ώρες αιχμής.



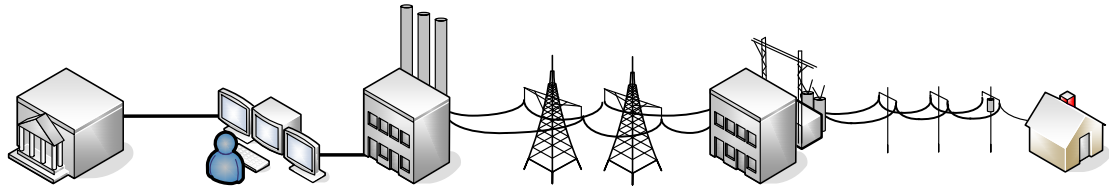
Σχήμα 2.2 Αποτύπωση Έξυπνου Δικτύου

2.4 Βασικές τεχνολογίες στα Έξυπνα Δίκτυα

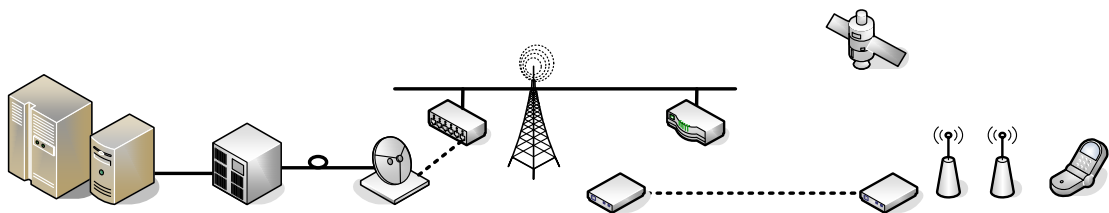
Κάποιες τεχνολογίες που μπορεί να ενσωματωθούν στα Έξυπνα Δίκτυα είναι:

- Η Τεχνολογία της πληροφορίας όπου μέρος παίρνουν τα:
 - Ηλεκτρονικά ισχύος
 - Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου
 - Υποστήριξη απόφασης – ανάλυση
- Η Τεχνολογία της επικοινωνίας όπου μέρος παίρνουν τα:
 - Δίκτυο επικοινωνιών για το δίκτυο ενέργειας
 - Υπηρεσίες διαδικτύου
 - Διαχείριση πελατών

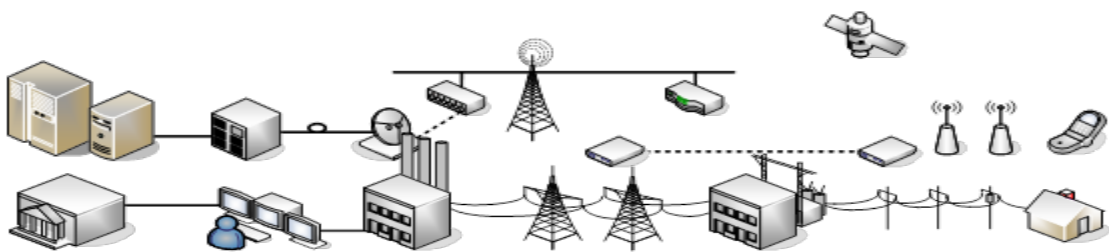
Με συνδυασμό του υπάρχοντος δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, Σχήμα 2.3, με ένα δίκτυο υπολογιστών που συγκεντρώνει, μεταδίδει και αποθηκεύει στοιχεία για την διαχείριση της παροχής και της ζήτησης, Σχήμα 2.4, πραγματοποιείται η υλοποίηση ενός Έξυπνου Δικτύου (Smart Grid), Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.3 Ηλεκτρική υποδομή



Σχήμα 2.4 Ψηφιακή υποδομή



Σχήμα 2.5 Smart Grid

2.5 Σύγκριση

Στον παρακάτω πίνακα διακρίνουμε συνοπτικά τις διαφορές ενός υπάρχοντος δικτύου όταν αναβαθμιστεί σε Έξυπνο Δίκτυο.

Υπάρχον Δίκτυο	Έξυπνο Δίκτυο
Αναλογικό/ηλεκτρομηχανικό	Ψηφιακό/ελεγχόμενο από μικροεπεξεργαστές
Καταστολή (ευαισθησία σε σφάλματα και διακοπές)	Πρόληψη
Τιμολόγηση εφάπαξ	Τιμολόγηση σε πραγματικό χρόνο
Ελάχιστη ή ανύπαρκτη δυνατότητα επιλογής από τον χρήστη	Παροχή πολλαπλών δυνατοτήτων επιλογής στον χρήστη
Μονόδρομη επικοινωνία (εάν υπάρχει)	Αμφίδρομη/ολοκληρωμένη επικοινωνία
Ελάχιστοι αισθητήρες	Πολλοί αισθητήρες και οθόνες
Τυποποιημένη αποκατάσταση	Συντήρηση βασιζόμενη στις συνθήκες και την απόδοση
Περιορισμένη διαφάνεια για τους πελάτες και τις ρυθμιστικές αρχές	Διαφάνεια για τους πελάτες και τις ρυθμιστικές αρχές
Περιορισμένος έλεγχος των ροών ισχύος	Επεμβατικά συστήματα ελέγχου
Εκτιμώμενη αξιοπιστία	Προληπτική αξιοπιστία

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - PHASOR MEASUREMENT UNITS ^{[36]-[42]}

3.1 Ορισμός φασιθέτη

Ως φασιθέτη (phasor) ορίζουμε ένα «εργαλείο» που επιτρέπει την αναπαράσταση ενός ημιτονοειδούς σήματος και τη συσχέτιση του με άλλα. Η μέτρηση φασιθετών στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με τη χρήση εξειδικευμένων συσκευών μέτρησης (PMUs).

Ο φασιθέτης (phasor) εκφράζει κάθε ποσότητα που διαθέτει μέτρο και φάση ως προς μια αναφορά και αναπαριστά ένα ημιτονοειδές σήμα. Το μέτρο του φασιθέτη αντιστοιχεί στο πλάτος του σήματος. Η φάση ή αλλιώς φασική γωνία είναι η απόσταση μεταξύ της κορυφής και ενός συγκεκριμένου σημείου του ημιτονοειδούς σήματος και έχει διαστάσεις γωνίας.

Είναι γνωστό ότι ένα ημιτονοειδές σήμα δίνεται από την σχέση

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

- ω η κυκλική συχνότητα του σήματος σε rad/s
- ϕ η φασική γωνία σε rad
- X_m το πλάτος του σήματος.
- $X_m / \sqrt{2}$ ενεργός τιμή (RMS).

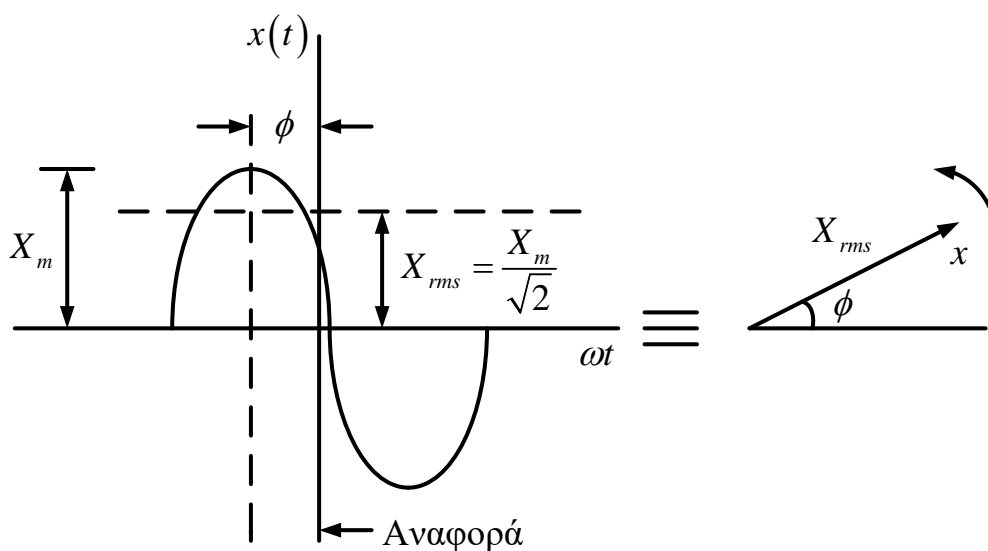
Η εξίσωση (3.1) μπορεί να γραφεί και ως:

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

Στην παραπάνω σχέση ο όρος $e^{j\omega t}$ μπορεί να παραλείπει λόγω του ότι η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου θεωρείται σταθερή. Η ημιτονοειδής κυματομορφή (3.2) δίνετε να αναπαραχθεί με ένα μιγαδικό αριθμό X , γνωστό ως φασιθέτη:

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

Στην περίπτωση εμφάνισης αρμονικών πρέπει πρώτα να γίνει η εξαγωγή της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος ώστε να γίνει η αντιστοιχία του με φασιθέτη. Στη διαδικασία αυτή γίνεται χρήση μετασχηματισμών Fourier.

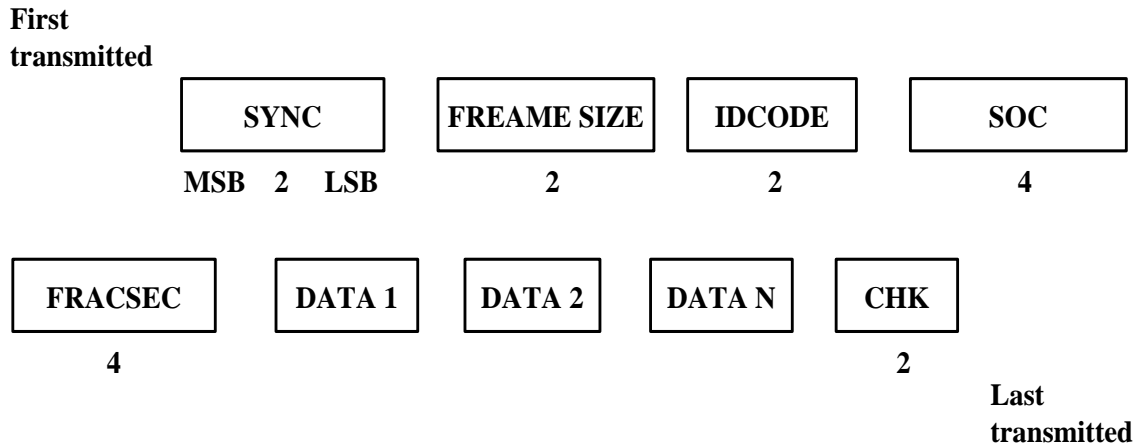


Σχήμα 3.1 Αναπαράσταση φασιθέτη τάσης

3.2 Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη

Συγχρονισμένη μέτρηση φασιθέτη (synchrophasor) θεωρείται κάθε μέτρηση η οποία φέρει μία χρονική σήμανση ή διαφορετικά μία χρονική σφραγίδα. Η δομή αρχείων συγχρονισμένων φασιθετών, Σχήμα 3.2, είναι παρόμοια με την δομή COMTRADE [3], η οποία καθορίζει τον τύπο των αρχείων για την συλλογή και διάδοση δεδομένων. Το πρότυπο COMTRADE έχει υιοθετηθεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) και αποτελεί το θεμελιώδες διεθνές μορφότυπο αρχείου που χρησιμοποιείται από:

- τους ψηφιακούς ηλεκτρονόμους
- τους ψηφιακούς καταγραφείς σφαλμάτων
- άλλους παραγωγούς και χρήστες μεταβατικών δεδομένων του ηλεκτρικού συστήματος.



Σχήμα 3.2 Δομή αρχείων PMU

Η μέτρηση αυτή εκφράζει την ενεργό τιμή και την φασική γωνία ενός ημιτονοειδούς σήματος ως προς μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η φασική γωνία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[-\pi, \pi]$, ενώ η συχνότητα θεωρείται σταθερή κατά τη στιγμή της μέτρησης. Στην πράξη, η συχνότητα του δικτύου ενδεχομένως να παρουσιάζει μια μικρή διακύμανση λόγω των μεταβολών στη ζήτηση. Επομένως για τον σωστό υπολογισμό της φασικής γωνίας, πρέπει να γνωρίζουμε τη συχνότητα του δικτύου κατά τη στιγμή της μέτρησης.

3.3 Μονάδα Μέτρησης Φασικής Γωνίας

Η ιδέα του πρώτου PMU δημιουργήθηκε το 1988 από το Πανεπιστήμιο Virginia Tech σε συνεργασία με την εταιρεία American Electric Power (AEP) με σκοπό την κατασκευή μιας συσκευής λήψης και επεξεργασίας συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Αποτέλεσμα αυτής της συνεργασίας ήταν η Μονάδα Μέτρησης Φασικής Γωνίας (PAMU), η οποία αργότερα ονομάστηκε Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών (PMU) και βασίζεται στο πρότυπο IEEE C37.118 [4]. Οι πρώτες μονάδες αποτελούνταν από ένα πλαίσιο VME, ένα τροφοδοτικό, έναν A/D μετατροπέα 16 καναλιών ο οποίος είχε συχνότητα δειγματοληψίας 720 Hz και ενεργοποιείτο με τη βοήθεια ενός ρολογιού GPS, έναν προσαρμογέα σήματος, και ένα αντιαναδιπλωτικό φίλτρο. Οι μετρήσεις μεταδίδονταν από τον υποσταθμό σε μια κεντρική τοποθεσία σε

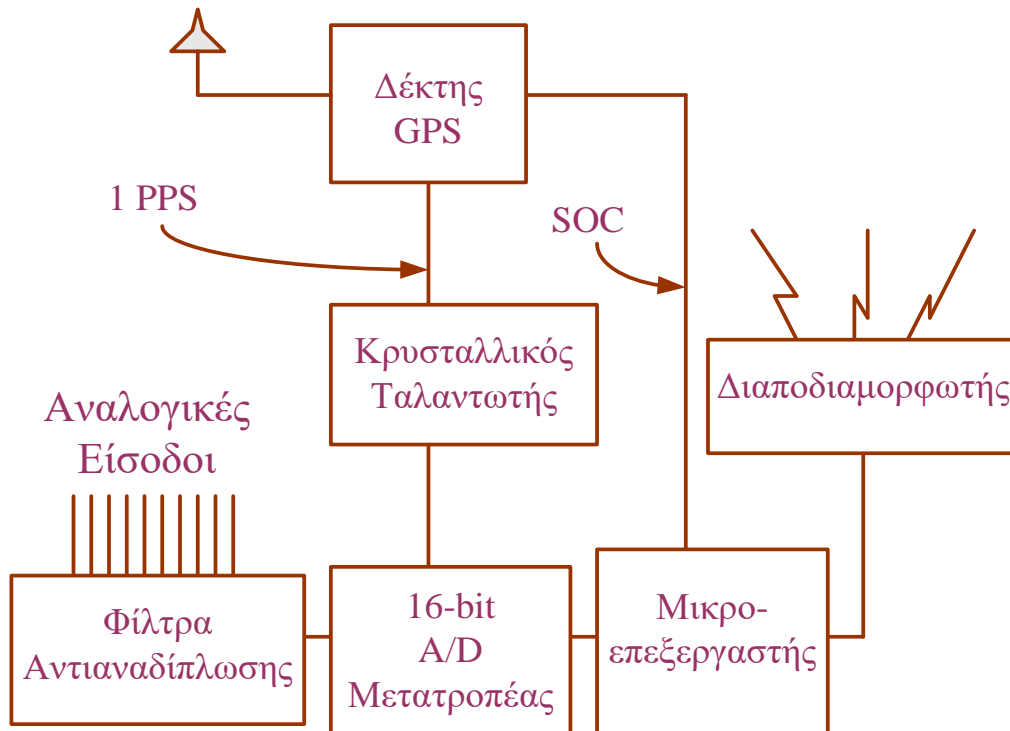
δυναδική μορφή μέσω ενός διαύλου 4800 bps και με ρυθμό 12 πακέτα ανά δευτερόλεπτο.

Για να πραγματοποιηθεί ο συγχρονισμός των δεδομένων, το κάθε πακέτο έπρεπε να περιέχει και μια χρονική σήμανση ή «χρονική σφραγίδα». Η πρώτη «χρονική σφραγίδα» είχε τη μορφή «Έτος - Μήνας - Ημέρα - Ωρα - Λεπτό - Δευτερόλεπτο - Δείγμα». Αργότερα όμως, για λόγους ευκολίας ταξινόμησης των μετρήσεων, διαμορφώθηκε σε «δευτερόλεπτο του αιώνα» (SOC) του Network Time Protocol, το οποίο ήταν ένας μετρητής δευτερολέπτων με εκκίνηση την 1η Ιανουαρίου 1970.

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

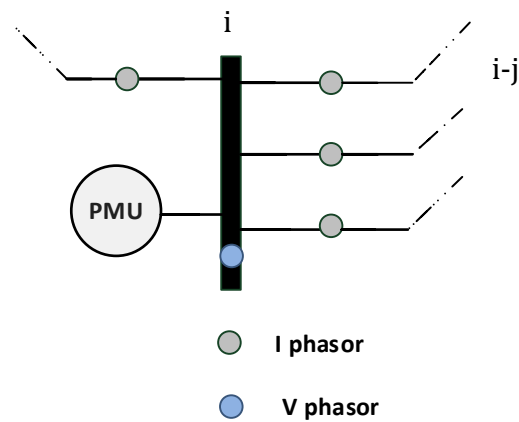
3.4 Μονάδα Μέτρησης Φασιθετών

Προπομπός του PMU ήταν ο ηλεκτρονόμος απόστασης συμμετρικών συνιστωσών, ο οποίος εξελίχθηκε στον ψηφιακό ηλεκτρονόμο, βάσει του οποίου έχει σχεδιαστεί η μονάδα PMU. Ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται, διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή, επομένως είναι δύσκολο να παρουσιάσουμε την διάταξη του υλικού που περιλαμβάνει. Είναι δυνατό να παρουσιάσουμε μία γενική μονάδα PMU, η οποία θα βοηθήσει στη κατανόηση της βασικής δομής της. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η δομή των πρώτων μονάδων PMU, η οποία προσομοιάζει με αυτή του ψηφιακού ηλεκτρονόμου.



Σχήμα 3.3 Βασική δομή μονάδας PMU

Οι αναλογικές εισόδους είναι ρεύματα και τάσεις που προέρχονται από τα δευτερεύοντα τυλίγματα των μετασχηματιστών τάσης και ρεύματος. Σε αντίθεση με έναν ηλεκτρονόμο, η μονάδα PMU μπορεί να παρέχει τα ρεύματα και τις τάσεις σε διάφορες παροχές και ζυγούς ενός υποσταθμού (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 Εγκατάσταση PMU σε ζυγό

Τα σήματα τάσεων και ρευμάτων μετατρέπονται σε τάσεις μέσω μετασχηματιστών μέτρησης, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των A/D μετατροπέων. Ο ρυθμός δειγματοληψίας που επιλέγεται καθορίζει την απόκριση συχνότητας των φίλτρων αντιαναδίπλωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά είναι αναλογικού τύπου φίλτρα με συχνότητα αποκοπής μικρότερη του μισού της συχνότητας δειγματοληψίας, έτσι ώστε να ικανοποιείται το κριτήριο του Nyquist. Όπως σε πολλά σχήματα προστασίας [5], μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας με αντίστοιχα υψηλή συχνότητα αποκοπής. Αυτό το βήμα ακολουθείται από ένα ψηφιακό βαθυπερατό φίλτρο που μετατρέπει τα δεδομένα σε ένα χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας, παρέχοντας έτσι ένα ψηφιακό φίλτρο αντιαναδίπλωσης που συνάδει με τα αναλογικά φίλτρα αντιαναδίπλωσης. Η συχνότητα δειγματοληψίας κυμαίνεται από 12 δείγματα ανά κύκλο της ονομαστικής συχνότητας δικτύου για τις πρώτες μονάδες PMU μέχρι 128 δείγματα ανά κύκλο για τις πιο σύγχρονες μονάδες PMU. Οι ακόμη μεγαλύτεροι ρυθμοί δειγματοληψίας θα οδηγήσουν, μελλοντικά, σε ακόμη πιο ακριβείς εκτιμήσεις φασιθετών [5].

Ο μικροεπεξεργαστής υπολογίζει τις εκτιμήσεις θετικής ακολουθίας όλων των σημάτων ρεύματος και τάσης χρησιμοποιώντας τον Διακριτό Μετασχηματισμό Fourier (DFT). Άλλες μετρήσεις, όπως της συχνότητας και του ρυθμού μεταβολής της συχνότητας που εμφανίζεται τοπικά, συμπεριλαμβάνονται επίσης στην έξοδο της μονάδας PMU. Κάθε μέτρηση που παράγεται πρέπει να συνοδεύεται από μια χρονική σφραγίδα, την οποία ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει από δύο σήματα του δέκτη GPS.

Στο τελευταίο τμήμα βρίσκεται η διεπαφή του επικοινωνιακού συστήματος. Αυτή μπορεί να είναι ένας διαποδιαμορφωτής (modem) με έξοδο για τηλεφωνικό καλώδιο ή ένας δρομολογητής (router) με έξοδο για καλώδιο Ethernet. Οι 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 την κάνει να διαφέρει 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, η οποία χρησιμοποιείται τόσο από το μετατροπέα A/D για τη δειγματοληψία των σημάτων όσο και από το μικροεπεξεργαστή

για την ενσωμάτωση της χρονικής σφραγίδας στις μετρήσεις. Στη συνέχεια της διαδικασίας 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 ως προς τη φάση με το ρολόι του δέκτη GPS. Ο δέκτης GPS στέλνει την ακριβή χρονική πληροφορία στο μικροεπεξεργαστή για να κατασκευαστεί η χρονική σφραγίδα. Ο ακριβής χρόνος παράγεται ως εξής: το σύστημα GPS δίνει τον ακριβή χρόνο GPS στους δέκτες, αυτοί το μετατρέπουν σε χρόνο UTC και σε συνδυασμό με το σήμα 1PPS που παράγουν, δημιουργούν τελικά το δευτερόλεπτο του αιώνα (SOC), το οποίο αποστέλλεται στο μικροεπεξεργαστή.

3.5 Παγκόσμια δορυφορικά συστήματα πλοήγησης

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

- Τομέας διαστήματος
- Τομές Ελέγχου
- Τομέας τελικού χρήστη

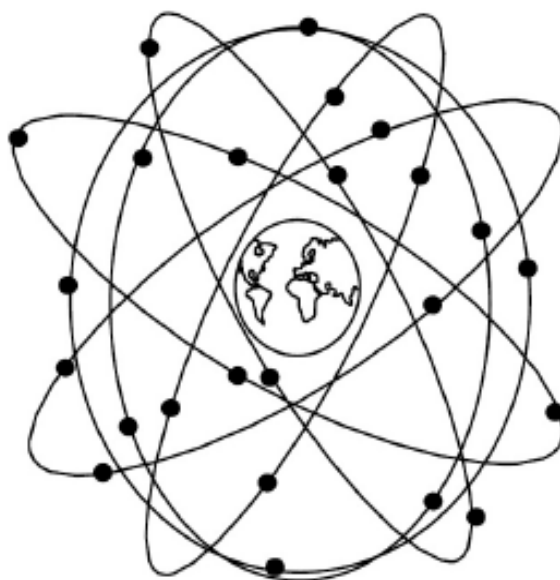
Ο τομέας διαστήματος αποτελείται από τους δορυφόρους οι οποίοι είναι διατεταγμένοι σε διαφορετικές τροχιές και με διαφορετική τροχιακή κλίση. Αυτή η διάταξη των δορυφόρων διασφαλίζει ότι τουλάχιστον 6 από αυτούς θα είναι ορατοί σχεδόν από κάθε σημείο της επιφάνειας της γης. Οι υπόλοιποι πλεονάζοντες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

Το τμήμα ελέγχου περιλαμβάνει τις επίγειες εγκαταστάσεις που παρέχουν υπηρεσίες τηλεμετρίας, ιχνηλάτησης, διοίκησης και ελέγχου, επιτήρησης των δορυφόρων, υπολογισμού αστρονομικής εφημερίδας και αναβάιβασης δεδομένων. Αποτελείται από έναν κύριο και έναν εφεδρικό σταθμό ελέγχου που σκοπό έχουν την υλοποίηση όλων των διαστημικών επιχειρήσεων, όπως κινήσεις ελιγμού των δορυφόρων, κρυπτογράφηση σήματος, χρονισμό δορυφόρων κ.α. Επίσης περιλαμβάνει τους

σταθμούς επιτήρησης που παρακολουθούν συνεχώς τις κινήσεις των δορυφόρων, ενώ ταυτόχρονα συλλέγουν και αποστέλλουν τα δεδομένα ιχνηλάτησης και τις επίγειες κεραίες με δυνατότητα συλλογής δεδομένων τηλεμετρίας και αναβίβασης εντολών και δεδομένων στους δορυφόρους.

Το τμήμα τελικού χρήστη αποτελείται από τέσσερις βασικές κατηγορίες χρηστών, ανάλογα με το είδος των εφαρμογών που αυτοί χειρίζονται. Έτσι ορισμένες εκατοντάδες χιλιάδες είναι στρατιωτικοί, ενώ δεκάδες εκατομμύρια είναι εμπορικοί χρήστες, επιστήμονες ή απλοί πολίτες, αντίστοιχα. Αυτή τη στιγμή, τα παγκόσμια δορυφορικά συστήματα που βρίσκονται σε πλήρη λειτουργία ή ακόμη εξελίσσονται είναι τα ακόλουθα:

- GPS (Global Positioning System). Το Παγκόσμιο Σύστημα Προσδιορισμού Θέσης (GPS), αναπτύσσεται και συντηρείται από την πολεμική αεροπορία των ΗΠΑ. Με βάση τα δεδομένα του 2011 περιλαμβάνει 32 ενεργούς δορυφόρους σε τροχιά (Σχήμα 3.5). Οι περισσότεροι δέκτες GPS παράγουν ένα χρονικό παλμό που ονομάζεται «ένας παλμός ανά δευτερόλεπτο» (1PPS). Είναι το βασικό σύστημα που χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των μονάδων PMU.




Σχήμα 3.5 Αναπαράσταση διάταξης των δορυφόρων του GPS

- GLONASS (GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). Το δορυφορικό σύστημα GLONASS, βρίσκεται υπό την εποπτεία και διαχείριση του ρωσικού στρατού. Από το 2010 επετεύχθη η πλήρης κάλυψη της ρωσικής επικράτειας. Με τα δεδομένα του 2011, το σύστημα αποτελείται από 23 εν λειτουργία δορυφόρους, με προοπτική να αυξηθούν σε 24 ώστε να παρέχεται συνεχής παγκόσμια κάλυψη.
- GALILEO. Αποτελεί το εν εξελίξει σύστημα GNSS της Ευρωπαϊκής Ένωσης το οποίο διαχειρίζεται ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA). Σε πρώτη φάση το σύστημα θα αποτελείται από 18 δορυφόρους που θα τεθούν σε τροχιά μέχρι το 2015 και σε τελική φάση θα φτάσει στο σύνολο των 30 δορυφόρων. Το Galileo θα συνυπάρχει με τα προαναφερθέντα συστήματα, όμως η χρήση του θα υπόκειται σε πολιτικό και όχι στρατιωτικό έλεγχο.
- COMPASS. Το σύστημα αυτό, είναι η κινεζική εκδοχή στα συστήματα GNSS. Αποτελεί εξέλιξη του τοπικού δορυφορικού συστήματος πλοήγησης BeiDou-1, το οποίο καλύπτει αποκλειστικά την κινεζική επικράτεια, και είναι γνωστό και ως BeiDou-2. Στην τελική του μορφή θα περιλαμβάνει ένα σύνολο 35 δορυφόρων. Προγραμματίζεται να λειτουργήσει μέσα στο 2012 για την περιοχή Ασίας - Ειρηνικού και εκτιμάται ότι θα ολοκληρωθεί το 2020, οπότε και θα προσφέρει παγκόσμια κάλυψη.

3.6 Κατασκευαστές και εγκατεστημένες μονάδες μέτρησης φασιθετών

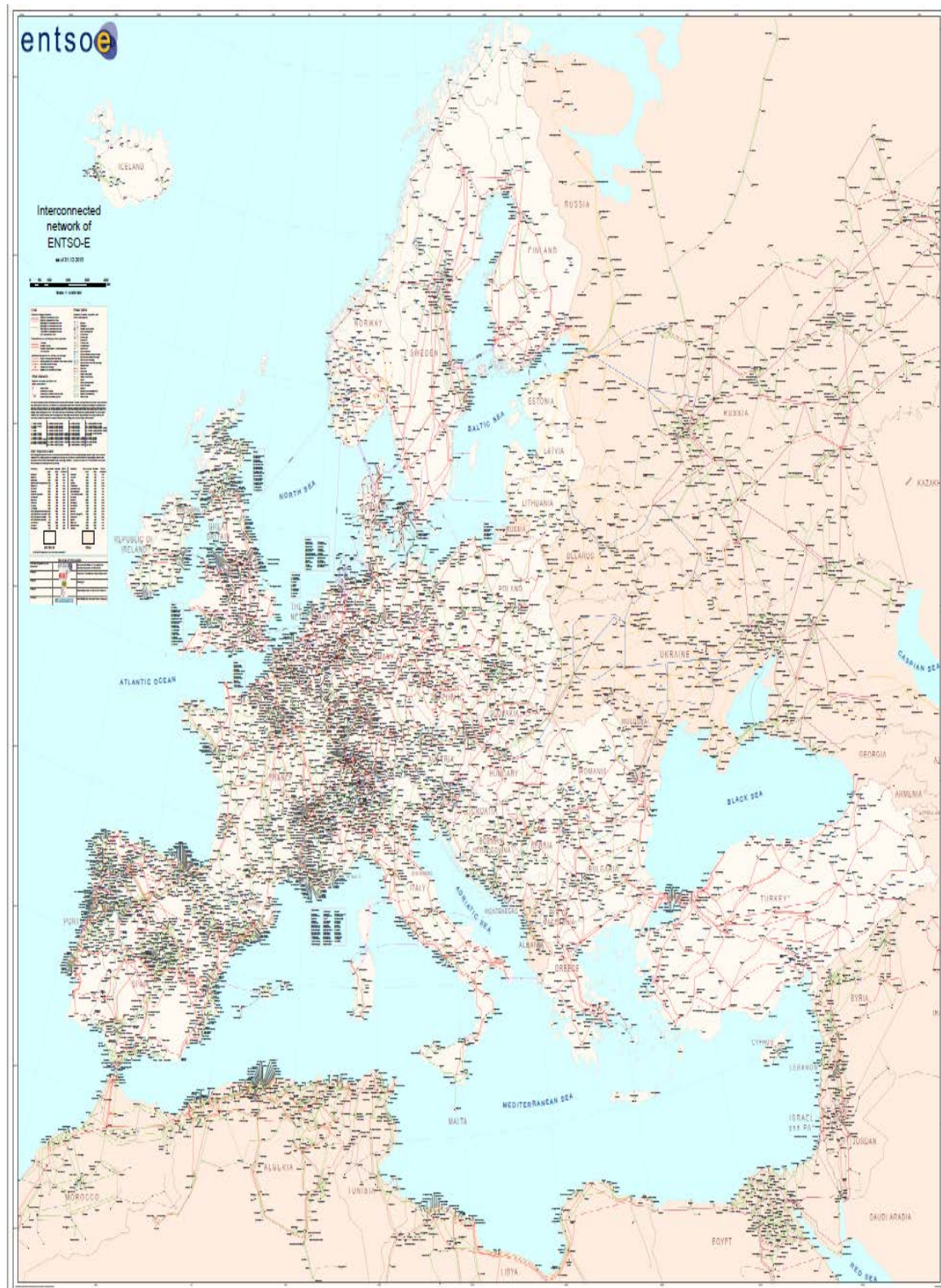
Η τεχνολογία των μονάδων μέτρησης φασιθετών εξελίσσεται διαρκώς και ο ρυθμός εγκατάστασής τους αυξάνεται με ταχύς ρυθμούς. Με την τεχνολογία αυτή έχουν ασχοληθεί διάφοροι κατασκευαστές παγκοσμίως, οι οποίοι παρέχουν μεγάλη ποικιλία μοντέλων. Οι σημαντικότεροι κατασκευαστές και τα επικρατέστερα μοντέλα PMUs φαίνονται στο επόμενο πίνακα:

Κατασκευαστής	Επικρατέστερο μοντέλο PMU
	RES 521
	P847B&C
	MODEL 1133A
	TESLA 4000
	D 60
	MODEL 1690
	SEL-421
	SIMEAS R-PMU
	PMU2002

Ως προς τον αριθμό των εγκατεστημένων μονάδων PMUs, πρέπει να αναφέρουμε ότι στο τέλος του 2014, ανήλθε παγκοσμίως στις 2674 μονάδες. Οι μονάδες PMUs έχουν γεωγραφικά διασπαρεί, όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα [6].

α/α	Γεωγραφική περιοχή	Αριθμός PMUs	α/α	Γεωγραφική περιοχή	Αριθμός PMUs
1.	Βόρεια Αμερική, Κίνα	1000	10.	Νέα Ζηλανδία	10
2.	Μεξικό	272	11.	Σουηδία, Ισλανδία	8
3.	Ινδία	130	12.	Κολομβία	6
4.	Βραζιλία	100	13.	Γαλλία, Σλοβενία, Κροατία, Ελβετία	5
5.	Ανατολική Ευρώπη, Κεντρική Ασία, Σιβηρία	26	14.	Δανία, Νορβηγία, Πολωνία, Ουγγαρία	4
6.	Φιλανδία	20	15.	Γερμανία, Σλοβακία	3
7.	Ιταλία	19	16.	Αυστρία, Ρουμανία	2
8.	Ισπανία	13	17.	Ελλάδα	2
9.	Αυστραλία	12	18.	Βέλγιο, Βουλγαρία	1

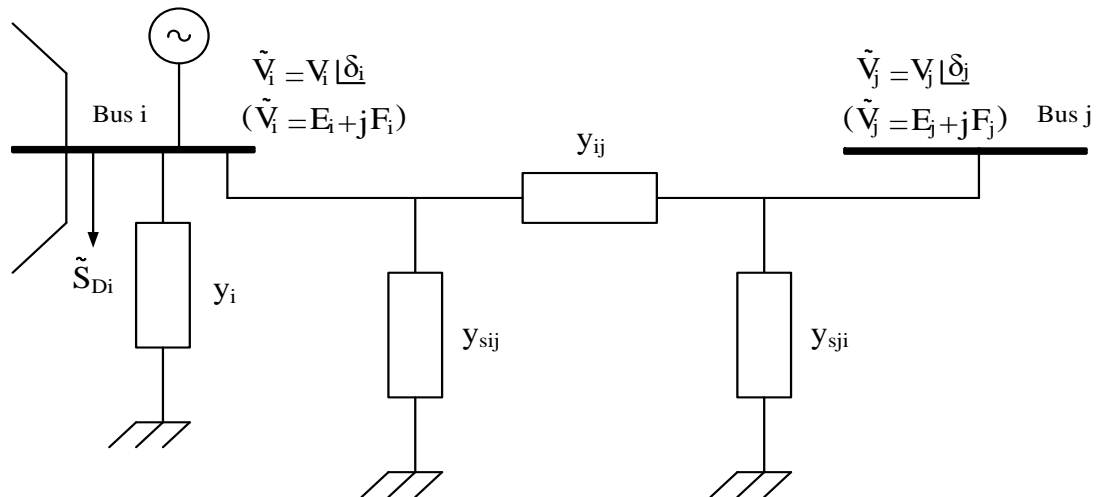
Στην Ευρώπη έχουν εγκατασταθεί 74 PMUs, όπως φαίνεται παρακάτω [Σχήμα 3.6]:



Σχήμα 3.6 Διασυνδεδεμένο δίκτυο κατά entso-e

3.7 Εξισώσεις συμβατικών μετρήσεων

Ας υποθέσουμε έναν γενικευμένο ζυγό συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7 Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ

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

Επίσης, ισχύουν:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.4)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (3.5)$$

$$y_{sji} = g_{sji} + jb_{sji} \quad (3.6)$$

$$y_i = g_i + jb_i \quad (3.7)$$

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

Οι μιγαδικές τάσεις κάθε ζυγού i μπορούν να εκφραστούν σε καρτεσιανές συντεταγμένες, E_i και F_i , ή πολικές συντεταγμένες, V_i και δ_i . Οι συμβατικές μετρήσεις πραγματικής και αέργου εγχύσεως (P_i , Q_i) και πραγματικής και αέργου ροής (P_{ij} , Q_{ij}) δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P_i = V_i^2 \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{j \in \alpha(i)} V_j \alpha_{ij} \quad (3.8)$$

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sij}) - V_i V_j \alpha_{ij} \quad (3.9)$$

$$Q_i = -V_i^2 \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{j \in \alpha(i)} V_j \beta_{ij} \quad (3.10)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sij}) - V_i V_j \beta_{ij} \quad (3.11)$$

$$P_i = (E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + E_i \sum_{j \in \alpha(i)} (-g_{ij} E_j + b_{ij} F_j) - F_i \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} F_j + b_{ij} E_j) \quad (3.12)$$

$$P_{ij} = (g_{sij} + g_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i (-g_{ij} E_j + b_{ij} F_j) - F_i (g_{ij} F_j + b_{ij} E_j) \quad (3.13)$$

$$Q_i = -(E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in \alpha(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + E_i \sum_{j \in \alpha(i)} (g_{ij} F_j + b_{ij} E_j) + F_i \sum_{j \in \alpha(i)} (-g_{ij} E_j + b_{ij} F_j) \quad (3.14)$$

$$Q_{ij} = -(b_{sij} + b_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i(g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + F_i(-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) \quad (3.15)$$

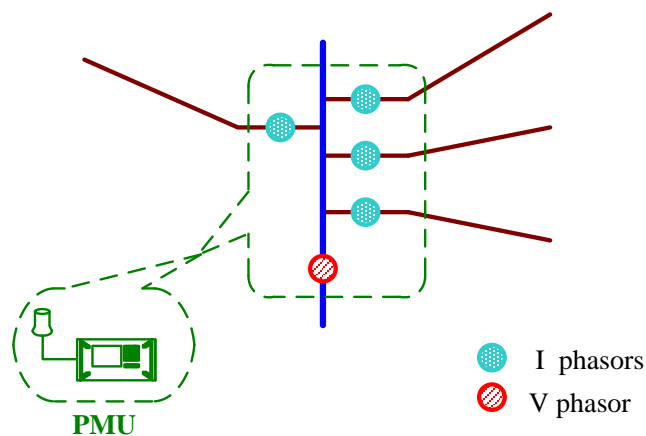
όπου,

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

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

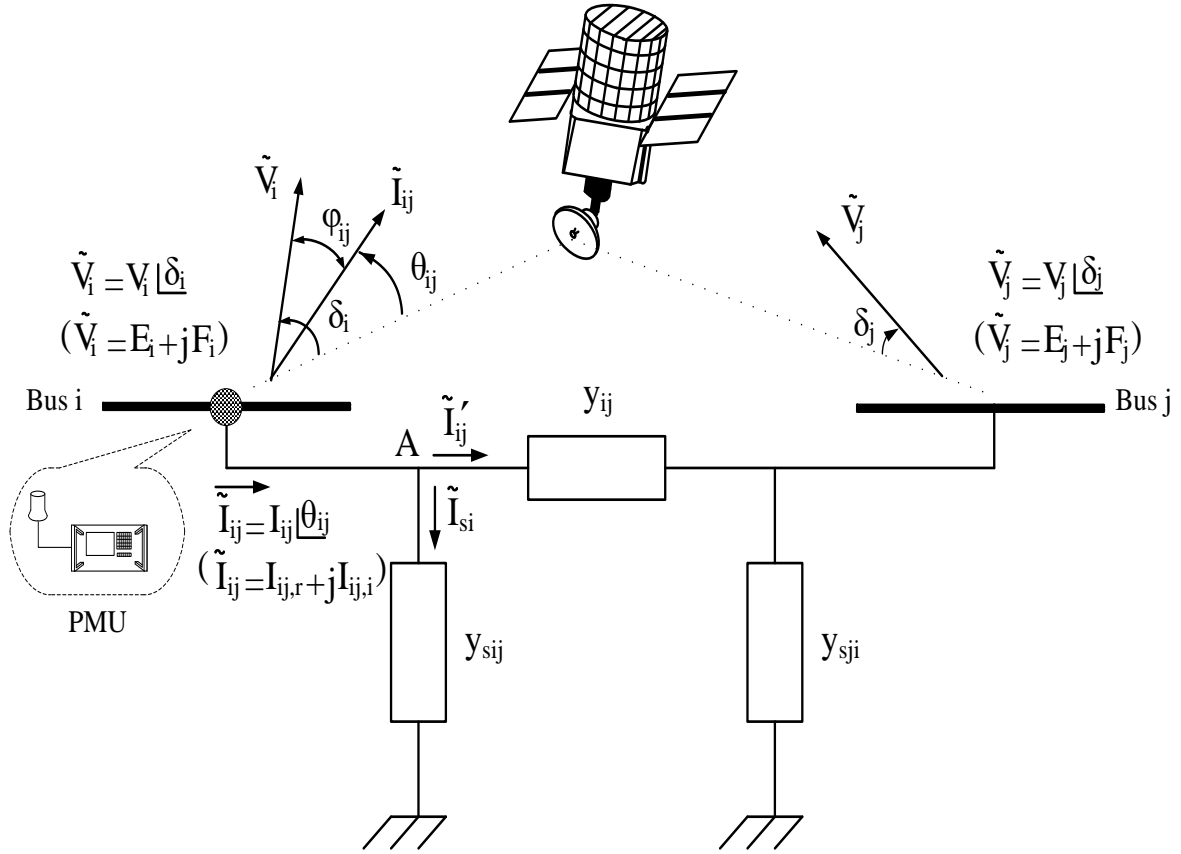
3.8 Εξισώσεις συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών

Το σύνολο των μετρήσεων από μια μονάδα PMU αποτελείται από δύο τύπους μετρήσεων, τον φασιθέτη τάσης του ζυγού εγκατάστασης και τους φασιθέτες ρεύματος όλων ή ορισμένων γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό [Σχήμα 3.8].



Σχήμα 3.8 Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών

Θεωρούμε και πάλι το ισοδύναμο μοντέλο "π" μιας γραμμής μεταξύ των ζυγών i και j . Ο φασιθέτης τάσης στο ζυγό i συμβολίζεται με \tilde{V}_i και στο ζυγό j με \tilde{V}_j . Επίσης, στην αρχή της γραμμής έχει τοποθετηθεί μία μονάδα PMU, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9 Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ με εγκατεστημένη μονάδα PMU

Όλοι οι φασιθέτες μπορούν να εκφραστούν τόσο σε πολική όσο και σε καρτεσιανή μορφή. Εφαρμόζοντας τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff (KCL) στον κόμβο A, ισχύει:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{I}_{si} + \tilde{I}'_{ij} \quad (3.16)$$

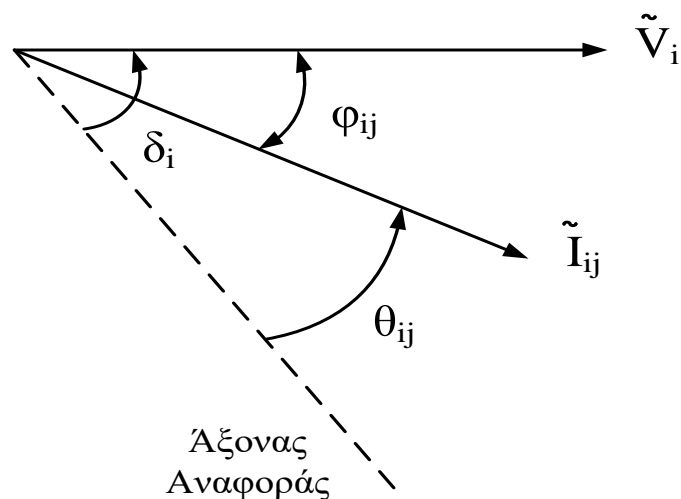
Τα ρεύματα \tilde{I}_{si} και \tilde{I}'_{ij} της εξίσωσης (3.16), μπορούν να γραφούν συναρτήσει των τάσεων των ζυγών και των χαρακτηριστικών της γραμμής:

$$\tilde{I}_{ij} = \tilde{V}_{ij} y_{sij} + (\tilde{V}_i - \tilde{V}_j) y_{ij} = \tilde{V}_i (y_{sij} + y_{ij}) - \tilde{V}_j y_{ij} \quad (3.17)$$

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις:

- Φασιθέτης Ρεύματος σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες - Μεταβλητές Κατάστασης σε Πολικές Συντεταγμένες
- Φασιθέτης Ρεύματος σε Πολικές Συντεταγμένες - Μεταβλητές Κατάστασης σε Πολικές Συντεταγμένες
- Φασιθέτης Ρεύματος σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες - Μεταβλητές Κατάστασης σε Καρτεσιανές Συντεταγμένες

Με τη χρήση των μονάδων μέτρησης φασιθετών, όλοι οι φασιθέτες θεωρούμε ότι έχουν μία κοινή αναφορά ως προς τη γωνία. Η κοινή αυτή αναφορά είναι το σήμα του GPS όπως αναλυτικά φαίνεται στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 Αναπαράσταση των μετρήσεων μίας μονάδας PMU με κοινή αναφορά το GPS

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τόσο για την τάση \tilde{V}_i όσο και για το ρεύμα \tilde{I}_{ij} δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\tilde{V}_i = V_i \angle \delta_i = V_i \cos \delta_i + j V_i \sin \delta_i \quad (3.18)$$

$$\tilde{V}_j = V_j \angle \delta_j = V_j \cos \delta_j + j V_j \sin \delta_j \quad (3.19)$$

$$\tilde{V}_i = E_i + jF_i \quad (3.20)$$

$$\tilde{V}_j = E_j + jF_j \quad (3.21)$$

$$I_{ij,r} = \left\{ V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (3.22)$$

$$I_{ij,i} = \left\{ V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right] \right\} \quad (3.23)$$

$$\theta_{ij} = \arctg \left\{ \frac{V_i \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j \right]}{V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] - V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right]} \right\} \quad (3.24)$$

$$I_{ij} = \sqrt{\left[(g_{ij} + g_{sij})^2 + (b_{ij} + b_{sij})^2 \right] V_i^2 + (g_{ij}^2 + b_{ij}^2) V_j^2 + 2 \left[(b_{ij} + b_{sij}) \beta_{ij} - (g_{ij} + g_{sij}) \alpha_{ij} \right] V_i V_j} \quad (3.25)$$

$$I_{ij,r} = \left[(g_{sij} + g_{ij}) E_i - (b_{sij} + b_{ij}) F_i - g_{ij} E_j + b_{ij} F_j \right] \quad (3.26)$$

$$I_{ij,i} = \left[(g_{sij} + g_{ij}) F_i + (b_{sij} + b_{ij}) E_i - g_{ij} F_j - b_{ij} E_j \right] \quad (3.27)$$

όπου,

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

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

3.9 Σύγκριση τεχνολογίας PMU και SCADA

Η εποπτεία και ο έλεγχος των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία 50 χρόνια βασίστηκε στα Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA) και στα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (Energy Management Systems –EMS). Ένα σύστημα

SCADA είναι ένα σύστημα τηλεμέτρησης. Το σύστημα υπό έλεγχο ή ένα τμήμα του είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται σε απομακρυσμένα σημεία. Με την τοποθέτηση στα σημεία αυτά Απομακρυσμένων Μονάδων Τηλεμετρίας (Remote Telemetry Units-RTU) λαμβάνονται μετρήσεις της τάσης, του ρεύματος, της πραγματικής και της άεργου ισχύος ενός δικτύου. Όλες οι μετρήσεις μετατρέπονται σε ηλεκτρικά σήματα και αποστέλλονται μέσω των RTU σε έναν κεντρικό υπολογιστικό σταθμό. Τα ηλεκτρικά αυτά σήματα μπορεί να είναι αναλογικά ή ψηφιακά ή και παλμικά και η μετάδοσή τους γίνεται μέσω τηλεπικοινωνιακού δικτύου ενσύρματα ή ασύρματα. Τα δομικά στοιχεία ενός συστήματος SCADA είναι τα παρακάτω:

- Ένας κεντρικός υπολογιστικός σταθμός (Master Station Computer)
- Οι γραμμές επικοινωνίας (radio, καλωδιακή, τηλεφωνική)
- RTUs που κωδικοποιούν και αποκωδικοποιούν σήματα από τον πραγματικό κόσμο
- Το ελεγχόμενο σύστημα

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

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

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

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

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

Πίνακας 3.1 Σύγκριση συστημάτων SCADA και PMU

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

Με τη χρήση της τεχνολογίας PMU έχουμε τη δυνατότητα εποπτείας ευρείας περιοχής, αφού μας παρέχει μια ακριβή και αναλυτική εικόνα μιας ολόκληρης διασύνδεσης. Με τη βοήθεια της χρονικής σφραγίδας των μετρήσεων φασιθετών έχουμε τη δυνατότητα αξιοποίησης των πληροφοριών πέρα από την περιοχή του ζυγού, όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Αυτό διευκολύνει τη κατανεμημένη τηλεπισκόπηση και την ανάληψη συντονισμένων δράσεων. Η ευρεία εποπτεία και η ανάλυση των μετρήσεων επιτρέπει στους χειριστές να εντοπίζουν αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο, όπως το είδος και το μέγεθος της καταπόνησης, έτσι ώστε να είναι σε θέση να βελτιώσουν την αξιοπιστία του. Το σύστημα SCADA, αντίθετα, σχεδιάστηκε για εποπτεία μιας μικρότερης γεωγραφικά περιοχής και δε μπορεί να ανταποκριθεί στις σύγχρονες ανάγκες για έλεγχο μεγαλύτερων διασυνδέσεων.

Η αξιοποίηση των PMU στα ηλεκτρικά δίκτυα έχει και οικονομικά οφέλη. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει αυξημένη ροή ισχύος στις ήδη υπάρχουσες γραμμές, γεγονός που επηρεάζει τα οικονομικά κόστη 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.

3.10 Πλεονεκτήματα από τη χρησιμοποίηση PMUs

Η χρήση των φασιθετών για τη λήψη μετρήσεων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχει γίνει αρκετά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Καθώς οι κατασκευαστές και οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας ενδιαφέρονται στο να χρησιμοποιούν PMUs στα συστήματά τους, η επένδυση στα PMUs και τις εφαρμογές τους τείνει να αυξάνεται. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση, όπως και η έρευνα, των PMUs στα ηλεκτρικά συστήματα μεγαλώνει. Λόγο της πληθώρας νέων και εξελισσόμενων εφαρμογών που προκύπτουν από τη χρησιμοποίηση PMUs σε ένα ηλεκτρικό σύστημα, καθημερινά εισάγονται νέες μέθοδοι που αποσκοπούν στην παρακολούθηση και τον έλεγχο των ηλεκτρικών συστημάτων. Συνοπτικά τα οφέλη από την χρήση των PMUs, αν και είναι πολύ περισσότερα από αυτά που παρατίθενται, μπορούμε να πούμε ότι είναι τα:

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

3.10.1 Παρακολούθηση και έλεγχος σε πραγματικό χρόνο

Ο έλεγχος του ηλεκτρικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο παρέχει τις πληροφορίες που χρειάζεται ο διαχειριστής του. Η γνώση των τρεχουσών πληροφοριών του συστήματος αυξάνει την απόδοσή του και βοηθά το διαχειριστή του συστήματος να προσδιορίσει, να προβλέψει και να αντιμετωπίσει τις διαταραχές που μπορεί να προκύψουν.

Σήμερα, τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS) βασίζονται στο αποτέλεσμα του εκτιμητή κατάστασης για την παρακολούθηση της ασφάλειας του συστήματος. Για αυτό, απαιτούνται τόσο η τοπολογία του όσο και το Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (SCADA). Ακόμη και στο ενδεχόμενο που οι μετρήσεις ακριβείας και η τοπολογία του συστήματος δεν είναι προσωρινά διαθέσιμα, η ανανέωση των δεδομένων και η επικοινωνία διαρκούν μερικά δευτερόλεπτα. Από την άλλη πλευρά, εάν έχουμε αρκετά PMUs διασκορπισμένα σε αυτό, μπορούμε να μετρήσουμε απ' ευθείας την κατάστασή του. Αν και η παρακολούθηση ενός συστήματος μόνον από PMUs δεν είναι προς το παρόν συμφέρουσα οικονομικά, η σταδιακή εγκατάστασή τους μπορεί να αναδειξεί τα οφέλη τους.

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα των PMUs είναι πως στην περίπτωση ενός σοβαρού περιστατικού είναι ικανά όχι μόνον να αποστέλλουν σήμα κινδύνου για να ενημερώνουν τον εσωτερικό χειριστή του συστήματος, αλλά έχουν και την ικανότητα αποστολής προειδοποιήσεων και στους χειριστές των γειτονικών συστημάτων ώστε να ενημερώνονται για αυτό το συμβάν.

3.10.2 Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού συστήματος

Η εκτίμηση κατάστασης είναι μία σύνθετη διαδικασία η οποία περιλαμβάνει μεγάλη ποικιλία υλικού και λογισμικού. Προς το παρόν, οι περισσότεροι από τους εκτιμητές κατάστασης εγκαθίστανται στα κέντρα ελέγχου του ανεξάρτητου διαχειριστή του συστήματος. Οι εκτιμητές αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο, για την απ' ευθείας παρακολούθηση των συνθηκών του δικτύου και την παροχή της καλύτερης δυνατής εκτίμησης του μοντέλου του δικτύου. Η εκτίμηση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο εκκίνησης για άλλες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο. Η εκτίμηση κατάστασης

και οι παρεπόμενες εφαρμογές της χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία. Για την σωστή εφαρμογή της εκτίμησης κατάστασης απαιτούνται [7]:

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

Αυτό είναι σύμφωνο με τη άποψη πολλών ειδικών σχετικά με τα ζητήματα που εμποδίζουν την εκτίμηση κατάστασης στην πράξη [8]. Αυτά τα ζητήματα συνοψίζονται στα ακόλουθα:

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

3.10.3 Διαχείριση συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο

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

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

3.10.4 Επικύρωση και συντονισμός των μοντέλων των συστημάτων

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

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

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

3.10.5 Ανάλυση διαταραχών

Η ανάλυση διαταραχών είναι η μελέτη και η προσομοίωση της αλληλουχίας των γεγονότων που λαμβάνουν χώρα αφότου εμφανιστεί μια διαταραχή στο ηλεκτρικό σύστημα. Για να συμβεί αυτό, πρέπει να γίνει μία έρευνα στα δεδομένα που καταγράφονται μέσω των συστημάτων καταγραφής και είναι εγκατεστημένα σε όλο το

δίκτυο. Τα συστήματα καταγραφής δεδομένων χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για πολλά έτη. Εντούτοις, η εργασία με τα παραδοσιακά συστήματα καταγραφής δεδομένων είναι πολύ δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία εξαιτίας του γεγονότος ότι τα διαθέσιμα στοιχεία, που παρέχονται από αυτές τις συσκευές, δεν είναι χρονικά συγχρονισμένα και είναι πολύ δύσκολο για τους μηχανικούς να ευθυγραμμίσουν τη χρονοσειρά των καταγεγραμμένων δεδομένων.

Το GPS έχει χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών ως μια κοινή χρονική αναφορά, επιτρέποντας σε πολλές συσκευές όπως τα PMUs, να παρέχουν χρονικά συγχρονισμένα δεδομένα. Οι αρχές συστήνουν με επιτακτικό τρόπο την εγκατάσταση PMUs μετά τις διακοπές ηλεκτρικού ρεύματος στις βορειοανατολικές Η.Π.Α. και την Ιταλία το 2003 [9], [10].

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

3.10.6 Επαναφορά συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Στα άκρα του διακοπτικού υλικού που συνδέει δύο παρακείμενους υποσταθμούς συνήθως ο χειριστής του ηλεκτρικού συστήματος αντιμετωπίζει μια μεγάλη, σταθερή διαφορά φάσης (standing phase angle-SPA). Στη περίπτωση λάθους του χειριστή και εξαιτίας αυτή της μεγάλης φασικής διαφοράς, ο χειρισμός του διακόπτη μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργία στο σύστημα όπου σαν αποτέλεσμα θα έχει την καταστροφική επιπόνηση του εξοπλισμού ή και ακόμα τη διακοπή της λειτουργίας του [11]. Τα PMUs είναι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Λόγω της δυνατότητάς τους για άμεση μέτρηση των γωνιών φάσης, ο χειριστής μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα για να αποφύγει τέτοιου είδους αστοχίες.

3.10.7 Έλεγχος υπερφόρτισης και δυναμική εκτίμηση

Παρότι υπάρχει διαθέσιμο μεγάλο πλήθος εξοπλισμού (hardware – software) για την παρακολούθηση των μερών των ηλεκτρικών συστημάτων [12], η χρήση PMUs μπορεί να καταστήσει τον έλεγχο ακόμη πιο ακριβή. Βοηθά επίσης στον έλεγχο του δικτύου σε υψηλότερους χρόνους ανάλυσης. Αν και ο έλεγχος υπερφόρτισης όπως και η δυναμική εκτίμηση ενός συστήματος, μέσω PMU, είναι σε κάποιο βαθμό ανεπαρκείς συγκρινόμενες με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα ελέγχου, τα πλεονεκτήματα της χρησιμοποίησης PMUs για αυτό το σκοπό εντοπίζονται στο γεγονός ότι το PMU μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο καλά και για πολλές άλλες εφαρμογές, ενώ οι υπάρχουσες συσκευές μπορούν μόνο να εγκατασταθούν και να χρησιμοποιηθούν για έναν και μόνο σκοπό. Η πολλαπλή λειτουργία των PMUs τα καθιστά περισσότερο επιθυμητά από οποιαδήποτε άλλη διαθέσιμη συμβατική συσκευή μέτρησης. Ο έλεγχος υπερφόρτισης είναι γνωστός ως εφαρμογή ελέγχου εξοπλισμού. Αυτή τη στιγμή, η μόνη διαθέσιμη εφαρμογή για τον έλεγχο του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί PMUs είναι ο θερμικός έλεγχος των εναέριων γραμμών μεταφοράς. Δεδομένου ότι το PMU μπορεί να μετρήσει το μέτρο της τάσης και τη φασική γωνία του ζυγού, η εγκατάσταση PMU στα δύο άκρα μιας γραμμής επιτρέπει τον υπολογισμό της σύνθετης αντίστασης αυτής καθώς και της μέσης θερμοκρασίας της γραμμής σε πραγματικό χρόνο. Το μειονέκτημα αυτής της εφαρμογής είναι το γεγονός ότι τα PMUs δε μπορούν να παράσχουν οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με τα σημεία υπερφόρτισης στις γραμμές μεταφοράς.

3.10.8 Επιλεκτική Προστασία

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

Οι συμβατικοί ηλεκτρονόμοι και οι διατάξεις προστασίας, που χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό σύστημα λειτουργούν συνήθως υπό προκαθορισμένους κανόνες που καθορίζονται από το χειριστή του συστήματος. Σε περίπτωση ενός συμβάντος, η

απόκριση αυτών των συσκευών γίνεται με προκαθορισμένο τρόπο που καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά τους. Η δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων έχει ξεκινήσει μια νέα εποχή για την σε πραγματικό χρόνο απόκριση στις μεταβολές των δικτύων. Οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι βασίζονται σε δύο βασικά χαρακτηριστικά που τους ξεχωρίζουν από τους παραδοσιακούς ηλεκτρονόμους και τις προστατευτικές διατάξεις:

- Η λειτουργία τους καθορίζεται μέσω λογισμικού και όχι με προκαθορισμένο τρόπο.
- Έχουν την ικανότητα επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο.

Η επιλεκτική προστασία καθορίστηκε μετά τη δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων το 1987 [13], [14]. Ο κύριος λόγος για τη δημιουργία των ψηφιακών ηλεκτρονόμων ήταν η αλλαγή στη βιομηχανία ηλεκτρικής ισχύος. Στη δεκαετία του '80 τα συστήματα ηλεκτρικής ισχύος άρχισαν να λειτουργούν πιο κοντά στα όριά τους λόγω των οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών. Από εκείνη τη στιγμή, δόθηκε έμφαση στην οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος, το οποίο στη συνέχεια, επηρέασε και άλλαξε την εφαρμογή της παραδοσιακής προστασίας στα ηλεκτρικά συστήματα.

Η εφαρμογή των PMUs ως ηλεκτρονόμων προστασίας, έχει διερευνηθεί. Μια άλλη σημαντική εφαρμογή των PMUs είναι η ακριβής μέτρηση της σύνθετης αντίστασης των γραμμών, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον εντοπισμό του σφάλματος θέσης. Η σύνθετη αντίσταση των γραμμών έχει ένα σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση των σφαλμάτων θέσης. Η ακριβής τιμή της μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας δύο PMUs στα άκρα της. Το όφελος από τη χρησιμοποίηση των PMUs, γίνεται ακόμη πιο αισθητό από το γεγονός ότι η ανακριβής θέση του σφάλματος μπορεί να παρατείνει τις διαδικασίες του εντοπισμού του και της αποκατάστασης του συστήματος.

3.10.9 Προγραμματισμένη απομόνωση ηλεκτρικών συστημάτων

Ο προγραμματισμένος διαχωρισμός του συστήματος σε νησίδες είναι η τελευταία δράση που λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό σύστημα αντιμετωπίζει μια έντονα

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

Σήμερα, χρησιμοποιούνται δύο βασικές μέθοδοι για να επιτευχθεί ο παραπάνω διαχωρισμός του συστήματος: η προστασία αποσυγχρονισμού και τα σχήματα αποκατάστασης. Και οι δύο αυτές τεχνικές είναι γνωστές ως εφαρμογές προστασίας. Εντούτοις, τα σχήματα αποκατάστασης είναι μερικές φορές γνωστά και ως εφαρμογή ελέγχου [15]. Οι προαναφερθείσες τεχνικές στηρίζονται στην προκαθορισμένη εκτιμώμενη συμπεριφορά του συστήματος η οποία βασίζεται στην κατάσταση του συστήματος, την τοπολογία, τις διακοπές λειτουργίας, και τα επίπεδα φορτίων και παραγωγής. Είναι σύνηθες στα ηλεκτρικά συστήματα, η προβλεφθείσα κατάσταση του συστήματος να διαφέρει σημαντικά από την πραγματική κατάσταση του συστήματος. Αφού οι ρυθμίσεις των σχημάτων προστασίας προγραμματίζονται βάσει των υπολογισμένων και προκαθορισμένων καταστάσεων του συστήματος, σε περίπτωση υπερβολικού σφάλματος μεταξύ υπολογιζόμενης και πραγματικής κατάστασης, η απόδοση των σχημάτων προστασίας θα ήταν ακατάλληλη και θα μπορούσε να επιδεινώσει τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

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

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

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

4^ο Κεφάλαιο - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ

4.1 Παρατηρησιμότητα Συστήματος

Η ανάλυση ασφαλείας ενός ηλεκτρικού συστήματος βασίζεται στα αποτελέσματα του εκτιμητή κατάστασης, ο οποίος παραδοσιακά επεξεργάζεται μετρήσεις οι οποίες παρέχονται από το σύστημα SCADA (ενεργές και άεργες ροές και εγχύσεις ισχύος, όπως επίσης και μέτρα τάσης των ζυγών), δίνοντας με αυτό τον τρόπο μια αξιόπιστη εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος.

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

Ο ραγδαία αυξανόμενος ρυθμός εγκατάστασης των μονάδων PMU στους υποσταθμούς του δικτύου, έχει ως αποτέλεσμα τη διεύρυνση του συστήματος μετρήσεως, το οποίο περιλαμβάνει πλέον και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών.

4.2 Μέθοδοι ανάλυσης παρατηρησιμότητας

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

- Τοπολογικές
- Αριθμητικές
- Υβριδικές
- Συμβολικές

4.2.1 Τοπολογικές

Οι αλγόριθμοι τοπολογικής παρατηρησιμότητας αναζητούν ένα μέγιστο δένδρο πλήρους βαθμού για το μετρητικό σύστημα. Ο τοπολογικός αλγόριθμος [16] βασίζεται

στη δημιουργία ενός γεννητικού δένδρου πλήρους βαθμού. Η τοπολογική προσέγγιση εντοπίζει τις ψευδομετρήσεις που χρησιμοποιούνται για την αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουν την αξιοπιστία της βάσης δεδομένων από το ενδεχόμενο ύπαρξης εσφαλμένων ψευδομετρήσεων [17]-[21].

4.2.2 Αριθμητικές

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

Ο επαναληπτικός αριθμητικός αλγόριθμος [22], [23] βρίσκει τις παρατηρήσιμες νησίδες και τοποθετεί τις απαραίτητες μετρήσεις για αποκατάσταση της παρατηρησιμότητας του συστήματος, χρησιμοποιώντας τριγωνική παραγοντοποίηση της μήτρας κέρδους. Αυτή η προσέγγιση επεκτείνεται στην εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιώντας ορθογώνιους μετασχηματισμούς [24], ισοτικούς περιορισμούς [25], [26], και τεχνικές βασισμένες στην μέθοδο Hachtel [27]-[29].

4.2.3 Υβριδικές

Οι υβριδικές μέθοδοι είναι ένας συνδυασμός τοπολογικών και αριθμητικών μεθόδων.

4.2.4 Συμβολικές

Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν συμβολικές τεχνικές επεξεργασίας.

Η παρατηρησιμότητα του δικτύου [30] ελέγχεται μέσω της συμβολικής παραγοντοποίησης της Ιακωβιανής μήτρας, χωρίς τον πραγματικό υπολογισμό της. Ένας άμεσος αλγόριθμος, που χρησιμοποιεί συμβολική παραγοντοποίηση Gauss κατάλληλων ακέραιων μητρών [31], αναλύει την παρατηρησιμότητα συστήματος θεωρώντας μετρήσεις SCADA και PMU.

4.3 Διατύπωση συνθήκης παρατηρησιμότητας

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

$$H\lambda = 0 \quad (4.1)$$

προκύπτει $\lambda = 0$.

4.4 Δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων

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

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m}{\partial x_1} & \frac{\partial h_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial h_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων για κάθε τύπο μετρήσεων. Όταν οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολική ή σε καρτεσιανή μορφή τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας που αφορούν τις συμβατικές μετρήσεις παρουσιάζονται στις εξισώσεις (4.3 - 4.18) και (4.19 - 4.34). Θεωρώντας ότι οι φασιθέτες ρεύματος εκφράζονται σε καρτεσιανή μορφή και οι μεταβλητές κατάστασης σε πολική ή σε καρτεσιανή μορφή τα αντίστοιχα στοιχεία της Ιακωβιανής δίνονται στις εξισώσεις (4.35 - 4.43) και (4.44 - 4.51), ενώ οι εξισώσεις (4.52 - 4.60) αναφέρονται στην περίπτωση όπου τόσο οι φασιθέτες ρεύματος όσο και οι μεταβλητές κατάστασης εκφράζονται σε πολικές συντεταγμένες.

4.4.1 Μετρήσεις SCADA

4.4.1.1 Για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι σε πολική μορφή

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij} \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + 2V_i g_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij} \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i V_j \beta_{ij} \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij} \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \alpha_{ij} + 2V_i (g_{ij} + g_{sij}) \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij} \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij} \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - 2V_i b_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i V_j \alpha_{ij} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \beta_{ij} - 2V_i (b_{ij} + b_{sij}) \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij} \quad (4.18)$$

όπου,

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

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

$P_i (Q_i)$: η έγχυση ενεργού (αέργου) ισχύος στον ζυγό i

$P_{ij} (Q_{ij})$: η ροή ενεργού (αέργου) ισχύος στην γραμμή $i - j$

4.4.1.2 Για συμβατικές μετρήσεις και με θεώρηση ότι οι μεταβλητές κατάστασης είναι σε καρτεσιανή μορφή

$$\frac{\partial P_i}{\partial E_i} = 2E_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij} E_j + b_{ij} F_j) \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial F_i} = 2F_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) - \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial F_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_i} = 2(g_{sij} + g_{ij})E_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial F_i} = 2(g_{sij} + g_{ij})F_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial F_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial E_i} = -2E_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial E_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial F_i} = -2F_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial F_j} = g_{ij}E_i + b_{ij}F_i \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_i} = -2(b_{sij} + b_{ij})E_i + g_{ij}F_j + b_{ij}E_j \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_j} = -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_i} = -2(b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_j} = g_{ij}E_i + b_{ij}F_i \quad (4.34)$$

όπου,

P_i : η έγχυση ενεργού ισχύος στον ζυγό i

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

Q_i : η έγχυση αέργου ισχύος στον ζυγό i

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

4.4.2 Μετρήσεις PMU

4.4.2.1 Για φασιθέτες ρεύματος σε καρτεσιανή και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή

$$\text{Συμπαγής Μορφή} \rightarrow \tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i} \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_i} = -V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i + (b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i \right] \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_i} = V_i \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial \delta_j} = V_j \left[g_{ij} \sin \delta_j + b_{ij} \cos \delta_j \right] \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial \delta_j} = -V_j \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_i} = \left[(g_{ij} + g_{sij}) \cos \delta_i - (b_{ij} + b_{sij}) \sin \delta_i \right] \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_i} = \left[(b_{ij} + b_{sij}) \cos \delta_i + (g_{ij} + g_{sij}) \sin \delta_i \right] \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial V_j} = - \left[g_{ij} \cos \delta_j - b_{ij} \sin \delta_j \right] \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial V_j} = -[b_{ij} \cos \delta_j + g_{ij} \sin \delta_j] \quad (4.43)$$

4.4.2.2 Για φασιθέτες ρεύματος σε καρτεσιανή και μεταβλητές κατάστασης σε καρτεσιανή μορφή

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_i} = g_{sij} + g_{ij} \quad (4.44)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_i} = b_{sij} + b_{ij} \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_j} = -g_{ij} \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_j} = -b_{ij} \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F_i} = -(b_{sij} + b_{ij}) \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_i} = g_{sij} + g_{ij} \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F_j} = b_{ij} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_j} = -g_{ij} \quad (4.51)$$

4.4.2.3 Για φασιθέτες ρεύματος και μεταβλητές κατάστασης σε πολική μορφή

$$\text{Συμπαγής Μορφή} \rightarrow \tilde{I}_{ij} = I_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i V_j D_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (4.53)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial \delta_j} = -\frac{V_i V_j D_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_i} = \frac{V_i A_{ij} + V_j C_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial I_{ij}}{\partial V_j} = \frac{V_j B_{ij} + V_i C_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i^2 A_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}} \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_j} = \frac{V_j^2 B_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}} \quad (4.58)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial V_i} = -\frac{V_j D_{ij}}{E_{ij}} \quad (4.59)$$

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial \delta_i} = \frac{V_i^2 A_{ij} + V_i V_j C_{ij}}{E_{ij}} \quad (4.60)$$

όπου,

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

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

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

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

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

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

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

Επιπλέον,

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

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ PMUs [43]-[57]

5.1 Βέλτιστη τοποθέτηση μονάδων PMUs

Οι μονάδες PMU είναι συσκευές οι οποίες παρέχουν προηγμένη προστασία, ανάλυση και έλεγχο στα ηλεκτρικά συστήματα, χρησιμοποιώντας δορυφορικές τεχνολογίες.

Σκοπός του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMU, Optimal PMU Placement (OPP) problem, είναι η εύρεση του ελάχιστου αριθμού PMUs, n_{PMU} , και του βέλτιστου συνόλου θέσεων, $S(n_{PMU})$, ώστε να διασφαλίζεται η παρατηρησιμότητα.

Ένα δίκτυο χαρακτηρίζεται παρατηρήσιμο όταν ο αριθμός των μετρήσεων που υπάρχουν σε αυτό επαρκεί ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι μιγαδικές τάσεις όλων των ζυγών του δικτύου.

Το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης μονάδων PMUs διατυπώνεται ως εξής [32]:

$$\begin{aligned} \min_{n_{PMU}} \{G(n_{PMU}, S(n_{PMU}))\} \\ \text{s.t. } f(n_{PMU}, S(n_{PMU})) = 1 \end{aligned} \quad (5.1)$$

όπου,

$G(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ το σύνολο των μη παρατηρήσιμων ζυγών και

$f(n_{PMU}, S(n_{PMU}))$ μια πολυκριτηριακή λογική συνάρτηση, οριζόμενη ως:

$$\begin{aligned} f(n_{PMU}, S(n_{PMU})) = O_{bs}(n_{PMU}, S(n_{PMU})) \\ + O_{bs}(n_{PMU}, S(n_{PMU})) \cdot C_{on}(n_{PMU}, S(n_{PMU})) \end{aligned} \quad (5.2)$$

όπου,

$O_{bs}(\cdot)$ η λογική συνάρτηση υπολογισμού της παρατηρησιμότητας και

$C_{on}(\cdot)$ η λογική συνάρτηση υπολογισμού κάθε περιορισμού ή ενδεχομένου.

Οι τελεστές + και • συμβολίζουν τις λογικές πράξεις OR και AND. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος το κατατάσσει στη κατηγορία NP-hard (Non deterministic Polynomial time-hard) και δεν έχει μοναδική λύση.

5.2 Ταξινόμηση μεθοδολογιών επίλυσης του προβλήματος OPP

Στη διεθνή βιβλιογραφία καταγράφονται δύο βασικές κατηγορίες αλγορίθμων επίλυσης του προβλήματος OPP, όπως εμφανίζονται παρακάτω:

- Μαθηματικοί Αλγόριθμοι
- Ευρετικοί Αλγόριθμοι

5.2.1 Κατηγορίες μαθηματικών αλγορίθμων

5.2.1.1 Ακέραιος προγραμματισμός

Ο ακέραιος προγραμματισμός, Integer Programming (IP), επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης με ακέραιες μεταβλητές, ενώ η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί, μη γραμμικοί ή τετραγωνικοί. Έτσι δημιουργούνται αντιστοίχως αλγόριθμοι ακέραιου γραμμικού, μη γραμμικού και τετραγωνικού προγραμματισμού [33].

5.2.1.2 Εξαντλητική αναζήτηση

Η εξαντλητική αναζήτηση (ES) απαριθμεί συστηματικά όλες τις πιθανές υποψήφιας λύσεις και επιλέγει την υποψήφια λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς για βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ενώ εγγυάται την εύρεση του ολικού βέλτιστου, υστερεί στα μεγάλης κλίμακας συστήματα έχοντας τεράστιο διάστημα αναζήτησης.

5.2.2 Κατηγορίες ευρετικών αλγορίθμων

5.2.2.1 Γενετικός αλγόριθμος

Ο γενετικός αλγόριθμος (GA) βασίζεται στην υπόθεση της φυσικής επιλογής και στην γενετική. Συνήθως, εφαρμόζεται σε ένα πλήθος «χρωμοσωμάτων», τα οποία είναι οι πιθανές λύσεις ενός δεδομένου προβλήματος και ο συνδυασμός τους αναπαραγάγει νέα άτομα [34].

5.2.2.2 Αναζήτηση Tabu

Η αναζήτηση Tabu (TS) είναι μία μέθοδος βελτιστοποίησης καθοδικής κλίσης με μνήμη [34].

5.2.2.3 Προσομοιωμένη απόπτωση

Η προσομοιωμένη απόπτωση (SA) είναι μια γενική ευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίζεται στην απόπτωση της μεταλλουργίας [34].

5.2.2.4 Διαφορική εξέλιξη

Η διαφορική εξέλιξη (DE) χρησιμοποιεί τα τυχαία δειγματοληπτούμενα ζεύγη διαφορών των αντικειμενικών διανυσμάτων για την καθοδήγηση της διαδικασίας μετάλλαξης, αντί των συναρτήσεων κατανομής πιθανοτήτων [34].

5.2.2.5 Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO), κάθε πιθανή λύση ορίζεται με μια τυχαία ταχύτητα και στη συνέχεια διατρέχεται το υπερδιάστημα του προβλήματος. Η βελτιστοποίηση PSO έχει κριθεί ως εξαιρετικά αποτελεσματική για την επίλυση ενός μεγάλου πλήθους προβλημάτων βελτιστοποίησης εφαρμοσμένης μηχανικής [34].

5.2.2.6 Ανοσοποιητικός αλγόριθμος

Ο ανοσοποιητικός αλγόριθμος βασίζεται στις αρχές των γενετικών αλγορίθμων και έχει εμπνευστεί από τους μηχανισμούς προστασίας των έμβιων οργανισμών ενάντια σε βακτήρια και ιούς.

5.2.2.7 Επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση

Η επαναλαμβανόμενη τοπική αναζήτηση (ILS) διερευνά μια σειρά από λύσεις που αποτελούν διαταραχές της τρέχουσας βέλτιστης λύσης. Τα αποτελέσματα αυτής εκκαθαρίζονται χρησιμοποιώντας άλλες ενσωματωμένες ευρετικές μεθόδους.

5.2.2.8 Εύρεση γεννητικού δένδρου

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

5.2.2.9 Άπληστος αλγόριθμος

Ο άπληστος αλγόριθμος (GrA) πραγματοποιεί μία τοπικά βέλτιστη επιλογή σε κάθε στάδιο, με την ελπίδα της εύρεσης του ολικού βέλτιστου.

5.2.2.10 Επαναληπτικός αλγόριθμος ασφάλειας N

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

5.2.2.11 Δένδρο απόφασης

Σε ένα δένδρο απόφασης κάθε κόμβος κλάδου αντιπροσωπεύει μια επιλογή μεταξύ διάφορων εναλλακτικών λύσεων και κάθε κόμβος φύλλων μια ταξινόμηση ή μια απόφαση.

5.2.2.12 Πρακτικοί ευρετικοί αλγόριθμοι

Είναι ευρετικοί αλγόριθμοι, που χρησιμοποιούν συνδυασμό των παραπάνω ευρετικών και μαθηματικών μεθόδων, για να προσεγγίσουν καλύτερα το αποτέλεσμα.

5.3 Επίλυση του προβλήματος ORP με χρήση γραμμικού προγραμματισμού

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος βέλτιστης τοποθέτησης PMUs [35], βασίζεται στο γραμμικό ακέραιο προγραμματισμό. Η διατύπωση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \min \sum_i^n w_i \cdot x_i \\ \text{s.t. } f(X) \geq \hat{1} \end{aligned} \quad (5.3)$$

όπου,

X διάνυσμα απόφασης,

x_i δυαδικές μεταβλητές, των οποίων οι τιμές καθορίζονται ως εξής:

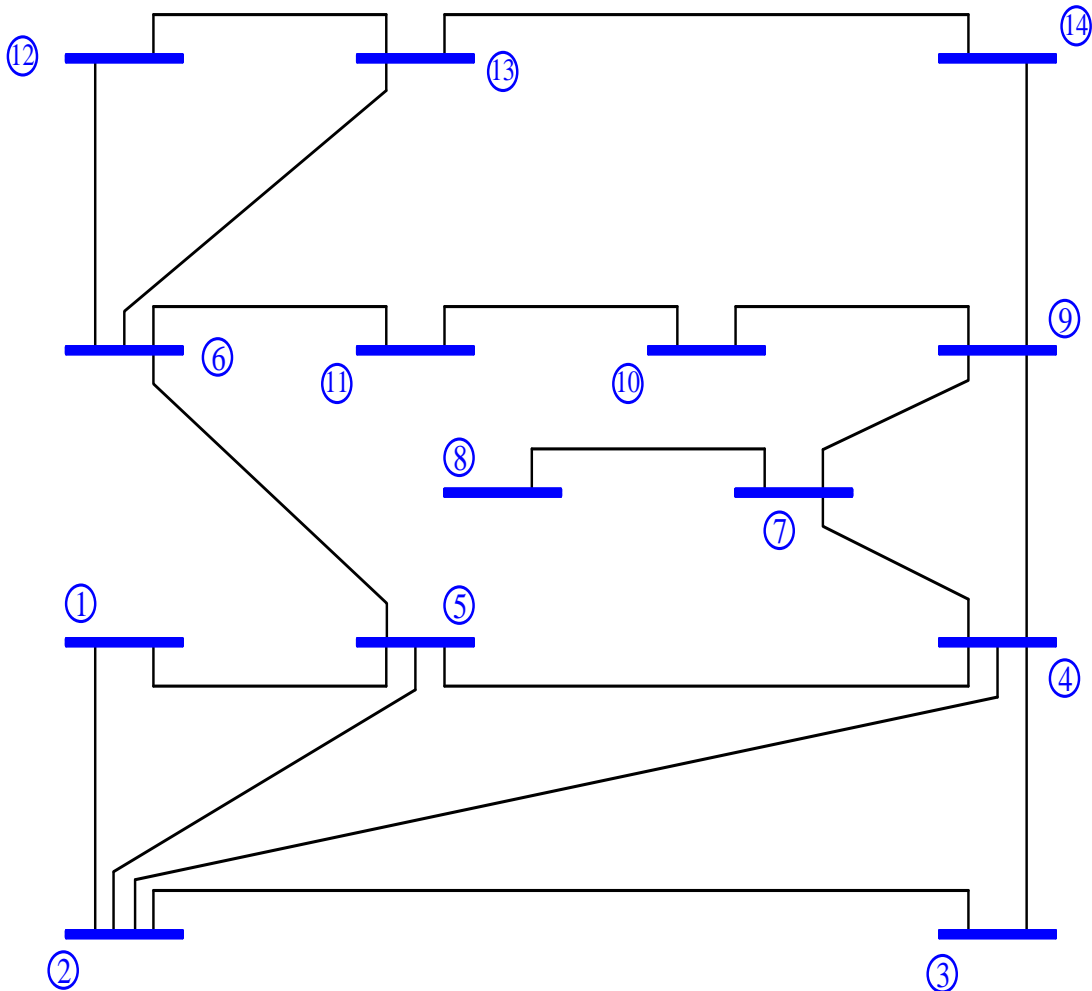
$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{εάν έχει τοποθετηθεί PMU στον ζυγό } i \\ 0, & \text{σε διαφορετική περίπτωση} \end{cases}$$

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

Το γινόμενο $w_i x_i$ εκφράζει το συνολικό κόστος εγκατάστασης. Οι συναρτήσεις των περιορισμών διασφαλίζουν την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούν το κόστος εγκατάστασης των PMUs.

5.4 Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού

Για την επεξήγηση του αλγορίθμου ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα το δίκτυο 14 ζυγών του IEEE, το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια:



Σχήμα 5.1 Σύστημα IEEE 14 ζυγών

Αρχικά δημιουργούμε τη δυαδική μήτρα διασυνδέσεων A , τα στοιχεία της οποίας ορίζονται ως εξής :

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

Η μήτρα A που προκύπτει για το δίκτυο IEEE 14 είναι:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(5.4)

Οι περιορισμοί είναι:

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 & \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 & \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 & \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 & \geq 1 \\ f_5 = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 & \geq 1 \\ f_6 = x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_7 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_8 = x_7 + x_8 & \geq 1 \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \end{cases} \quad (5.5)$$

Κάθε περιορισμός f_i διασφαλίζει ότι τουλάχιστον μία μεταβλητή του λογικού αθροίσματος θα είναι διάφορη του μηδενός.

Για παράδειγμα ο περιορισμός που αφορά το ζυγό 8 θα είναι :

$$f_8 = x_7 + x_8 \geq 1$$

που σημαίνει ότι τουλάχιστον μία μονάδα PMU θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάποιον από τους ζυγούς 7 ή 8 προκειμένου να καταστεί ο ζυγός 8 παρατηρήσιμος.

5.4.1 Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού θεωρώντας μετρήσεις ροής

Χρησιμοποιώντας ξανά το δίκτυο των 14 ζυγών, θεωρώντας μία μέτρηση ροής στη γραμμή 5 – 6, θα τροποποιηθούν οι περιορισμοί που αφορούν τους ζυγούς 5 και 6. Η τροποποίηση αυτή βασίζεται στους κανόνες του Kirchhoff, που επιτρέπουν τον υπολογισμό της τάσης του ενός από τους τερματικούς ζυγούς της γραμμής όταν η τάση στον ζυγό του άλλου άκρου της είναι γνωστή. Επομένως, οι περιορισμοί f_5 και f_6 μπορούν να συγχωνευθούν σε έναν ισοδύναμο:

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

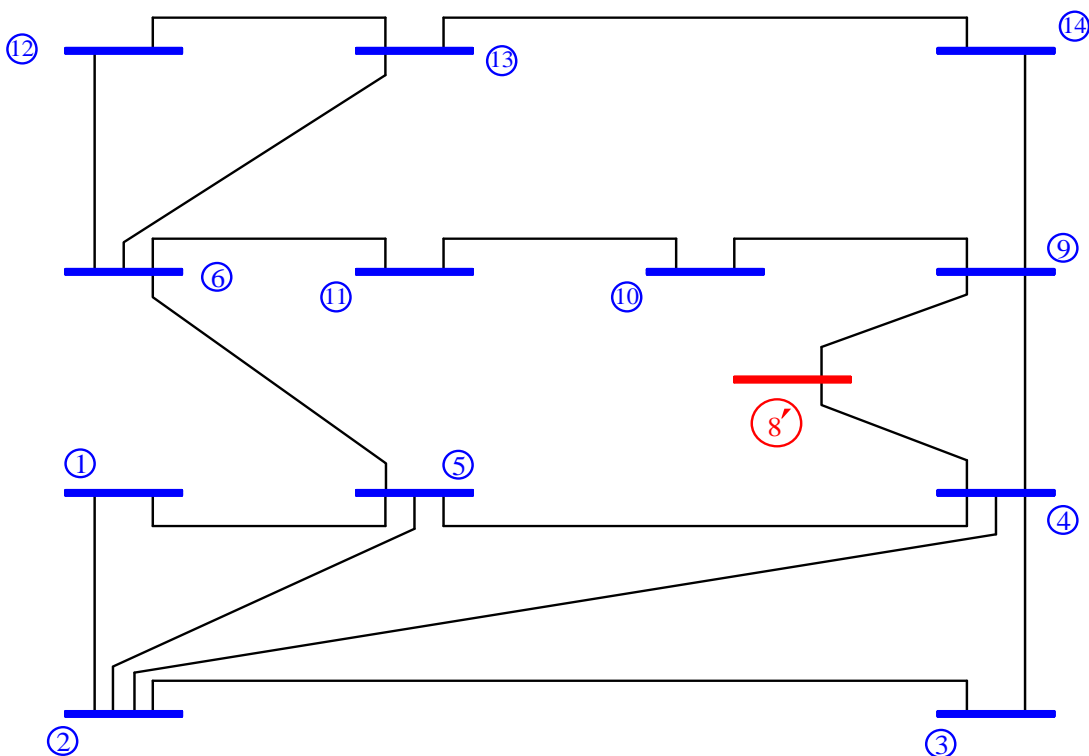
Ο νέος περιορισμός f_{5_new} υποδηλώνει ότι εάν ένας από τους δύο φασιθέτες τάσης των ζυγών 5 και 6 είναι παρατηρήσιμος, τότε και ο άλλος θα είναι επίσης παρατηρήσιμος.

Έτσι το σύστημα περιορισμών (5.5) μετασχηματίζεται σε:

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 = x_1 + x_2 + x_5 & \geq 1 \\ f_2 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 & \geq 1 \\ f_3 = x_2 + x_3 + x_4 & \geq 1 \\ f_4 = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_7 + x_9 & \geq 1 \\ f_{5_new} = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_7 = x_4 + x_7 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_8 = x_7 + x_8 & \geq 1 \\ f_9 = x_4 + x_7 + x_9 + x_{10} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{10} = x_9 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{11} = x_6 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{12} = x_6 + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{13} = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{14} = x_9 + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

5.4.2 Επεξηγηματικό παράδειγμα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού θεωρώντας μετρήσεις ροής και μηδενικής έγχυσης

Σε αυτή την περίπτωση θεωρούμε ότι στο δίκτυο υπάρχουν τόσο μετρήσεις έγχυσης όσο και ροής, αλλά δεν επαρκούν ώστε να το καταστήσουν πλήρως παρατηρήσιμο. Οι μετρήσεις έγχυσης αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο, είτε είναι μηδενικές (ψευδομετρήσεις) είτε όχι. Έχοντας σαν βάση το δίκτυο 14 ζυγών, στο οποίο ο ζυγός 7 θεωρείται ζυγός μηδενικής έγχυσης, η βασική ιδέα είναι η συνένωση ενός ζυγού που φέρει μέτρηση έγχυσης με οποιονδήποτε από τους γειτονικούς του ζυγούς. Αυτό βασίζεται στο νόμο ρευμάτων του Kirchhoff (KCL) ο οποίος στην περίπτωση μας επαληθεύεται μέσω της παρατήρησης ότι εάν οι φασιθέτες τάσης όλων των γειτονικών ζυγών είναι γνωστές, τότε ο φασιθέτης τάσης του ζυγού έγχυσης μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Το Σχήμα 5.2, παρουσιάζει το ισοδύναμο διάγραμμα του συστήματος μετά την συνένωση των ζυγών 7 και 8 σε ένα ισοδύναμο νέο ζυγό 8'.



Σχήμα 5.2 Ισοδύναμο δίκτυο IEEE 14 ζυγών θεωρώντας μετρήσεις ροής και μηδενικής έγχυσης

Έτσι το σύστημα περιορισμών (5.6) μετασχηματίζεται σε:

$$f(x) = Ax = \begin{cases} f_1 & = x_1 + x_2 + x_5 & \geq 1 \\ f_2 & = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 & \geq 1 \\ f_3 & = x_2 + x_3 + x_4 & \geq 1 \\ f_4 & = x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_{5_new} & = x_1 + x_2 + x_4 + x_5 + x_6 + x_{11} + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_8 & = x_4 + x_8 + x_9 & \geq 1 \\ f_9 & = x_4 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{10} & = x_9 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{11} & = x_6 + x_{10} + x_{11} & \geq 1 \\ f_{12} & = x_6 + x_{12} + x_{13} & \geq 1 \\ f_{13} & = x_6 + x_{12} + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \\ f_{14} & = x_9 + x_{13} + x_{14} & \geq 1 \end{cases} \quad (5.7)$$

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Εισαγωγή MATLAB

6.1.1 Τι είναι το MATLAB

Το MATLAB είναι ένα λογισμικό πακέτο για υψηλής απόδοσης αριθμητικούς υπολογισμούς (numerical computations). Παρέχει στο χρήστη ένα διαδραστικό περιβάλλον με χιλιάδες ενσωματωμένες συναρτήσεις, κατάλληλες για την υλοποίηση απαιτητικών υπολογιστικών αναλύσεων, γραφημάτων καθώς επίσης και για την παραγωγή διαφόρων animations. Επιπλέον, το MATLAB προσφέρει τη δυνατότητα επέκτασης σε ποικίλα πεδία εφαρμογών με τη αξιοποίηση την υψηλού επιπέδου γλώσσας προγραμματισμού, την οποία διαθέτει σε όλες τις εκδόσεις του. Για λόγους πληρότητας, να αναφερθεί ότι το όνομα MATLAB προέρχεται από τις λέξεις MATrix και LABoratory.

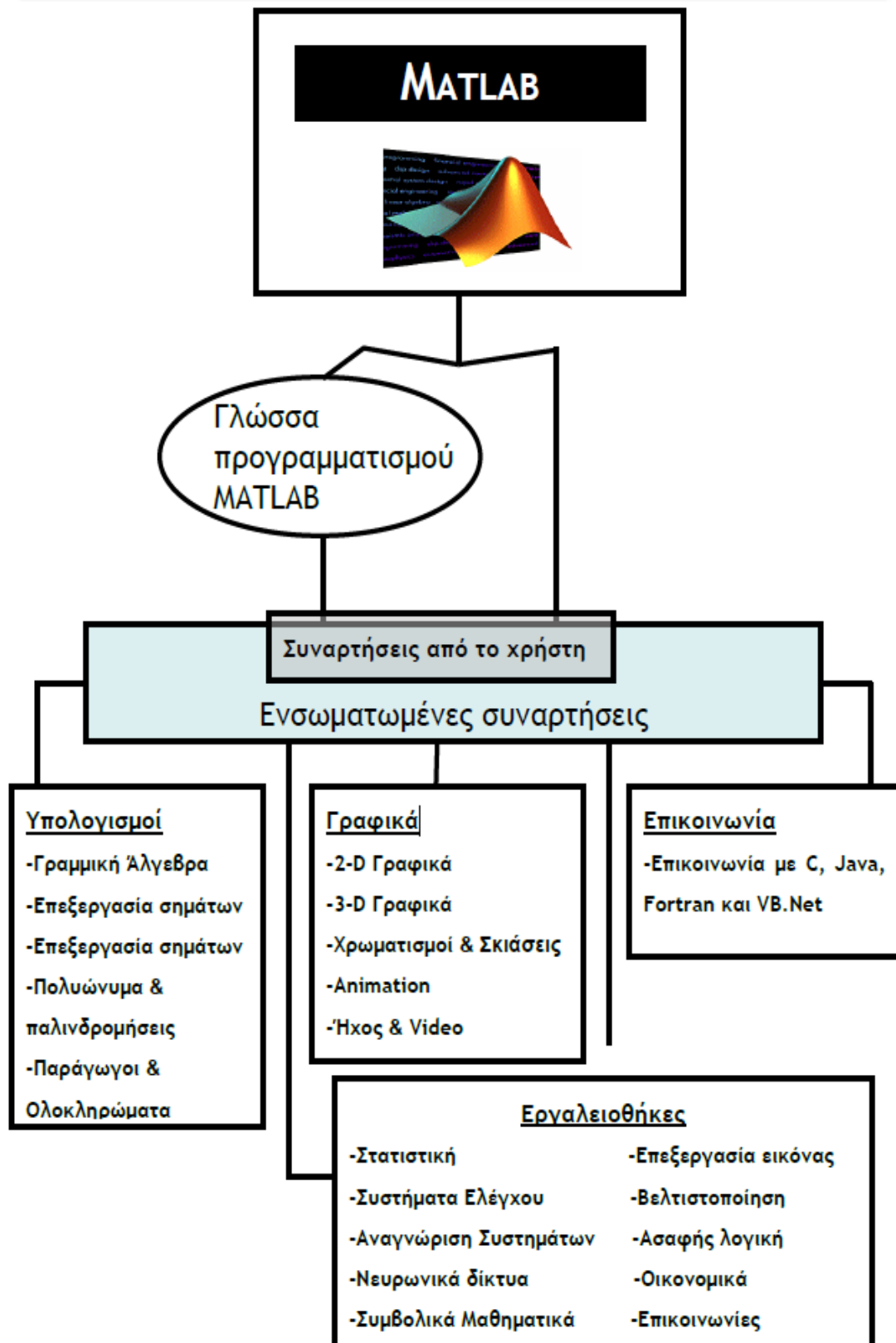
Το MATLAB αποτελεί ένα εξελιγμένο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να βρει εφαρμογή σε διάφορους τομείς της επιστήμης αλλά βέβαια και της πράξης, όπως για παράδειγμα τη μηχανική, την ιατρική, τις θετικές επιστήμες (Μαθηματικά – Φυσική), την οικονομία καθώς και γενικά τη βιομηχανική παραγωγή. Μάλιστα, το φάσμα των εφαρμογών του συγκεκριμένου πακέτου λογισμικού διευρύνεται συνεχώς και περισσότερο, αναδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο τις πολλαπλές δυνατότητες του, όπως:

- Υψηλή απόδοση και ταχύτητα υπολογιστικών αναλύσεων.
- Δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών συστημάτων.
- Δυνατότητα υλοποίησης αλγορίθμων.
- Δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με πληθώρα άλλων προγραμμάτων και εφαρμογών.
- Υψηλής ποιότητας γραφικές απεικονίσεις και animations.
- Δυνατότητα σύνδεσης με διάφορες συσκευές καταγραφής.
- Φιλικότητα προς το χρήστη και διαδραστικός χαρακτήρας.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύρια χαρακτηριστικά και δυνατότητες του MATLAB. Οι ενσωματωμένες συναρτήσεις του λογισμικού παρέχουν τα απαραίτητα πακέτα εργαλείων για υπολογισμούς γραμμικής άλγεβρας, ανάλυσης δεδομένων, επεξεργασία σημάτων, αριθμητικές λύσεις κανονικών διαφορικών εξισώσεων. Οι περισσότερες από τις προαναφερόμενες συναρτήσεις εφαρμόζουν την πλέον πρόσφατη και εξελιγμένη γνώση στο κάθε τομέα επιστήμης (state-of-the-art algorithms). Επίσης ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναπτύξει τις δικές του συναρτήσεις, κάνοντας χρήση της δικής του γλώσσας προγραμματισμού. Από τη στιγμή που θα αναπτυχθούν οι συναρτήσεις αυτές, λειτουργούν ως ενσωματωμένες συναρτήσεις του εν λόγω λογισμικού.

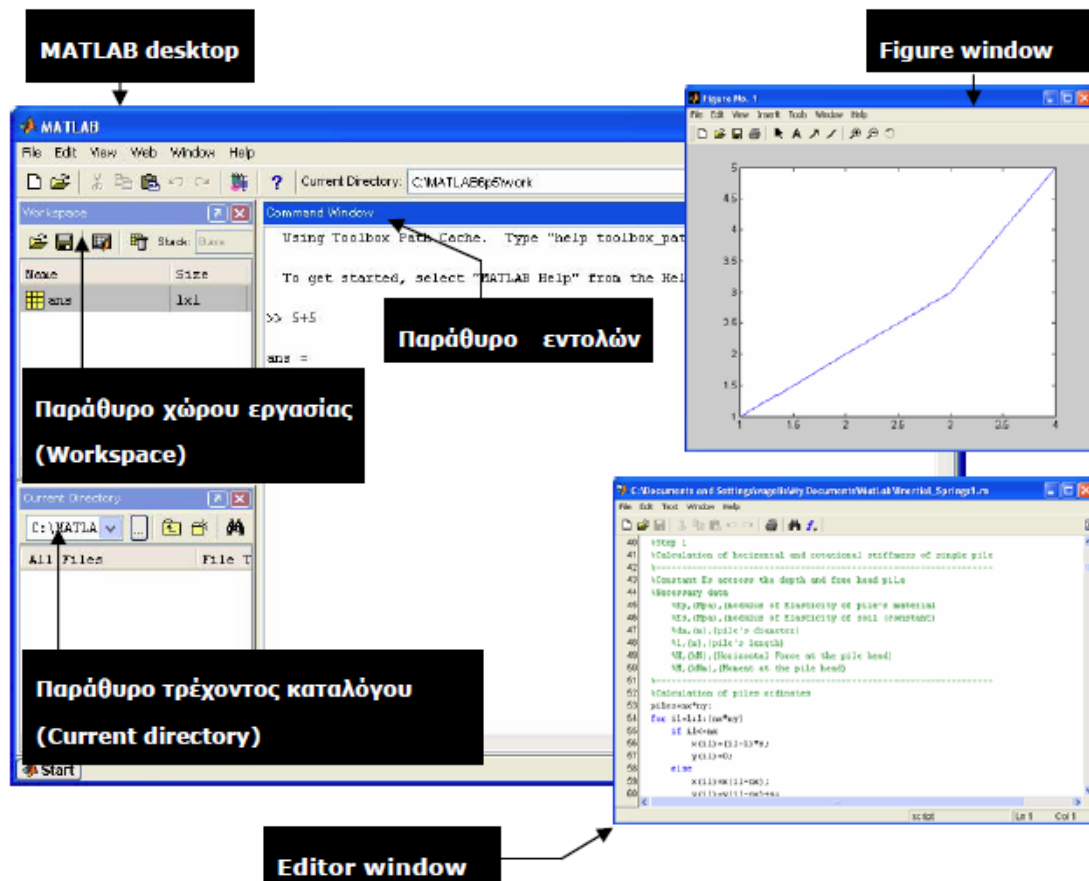
Επίσης παρέχονται από το MATLAB πολλές προαιρετικές εργαλειοθήκες, οι οποίες προορίζονται για την ανάπτυξη ειδικών εφαρμογών, όπως συμβολικοί υπολογισμοί (symbolic computation), επεξεργασία εικόνων (image processing), στατιστική (statistics), σχεδιασμός ελέγχου συστημάτων (control system design), νευρωνικά δίκτυα (neural networks), ασαφή λογική (fuzzy logic). Η λίστα με τις διαθέσιμες εργαλειοθήκες συνεχώς διευρύνεται (στην τελευταία έκδοση του λογισμικού ο αριθμός των εργαλειοθηκών έχει ξεπεράσει τις 50).

Η βασική δομική μονάδα του MATLAB είναι ο πίνακας (matrix) και ο θεμελιώδης τύπος δεδομένου είναι το διάνυσμα (array). Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του λογισμικού πακέτου συντίθεται από τι προαναφερόμενες βασικές μονάδες. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι στο MATLAB δεν υπάρχει ανάγκη για δήλωση των διαστάσεων ενός πίνακα, ο οποίος χρησιμοποιείται σε μια εφαρμογή. Το λογισμικό αυτό είναι με τέτοιο τρόπο δομημένο, ώστε όλοι οι υπολογισμοί να μετατρέπονται ουσιαστικά σε υπολογισμούς μεταξύ πινάκων και διανυσμάτων.



6.1.2 Το περιβάλλον του MATLAB

Το MATLAB λειτουργεί μέσω τριών βασικών παραθύρων όπως φαίνεται παρακάτω.



➤ Επιφάνεια εργασίας του MATLAB (MATLAB desktop)

Η επιφάνεια εργασίας του MATLAB είναι το παράθυρο, το οποίο συναντά ο χρήστης με την εκκίνηση του προγράμματος. Η επιφάνεια εργασίας του MATLAB αποτελείται από τα εξής επιμέρους υπό-παράθυρα.

Παράθυρο εντολών (Command Window): Αυτό είναι το βασικό παράθυρο. Χαρακτηρίζεται από το σύμβολο προτροπής (>>, MATLAB command prompt). Το σύνολο των εντολών, συμπεριλαμβανομένων και των εντολών, που αναπτύσσει ο ίδιος ο χρήστης, πληκτρολογούνται στο Παράθυρο εντολών, πάντα με τη χρήση του συμβόλου της προτροπής (μπροστά από την κάθε εντολή). Επίσης, στο τμήμα αυτό της επιφάνειας εργασίας του MATLAB, πραγματοποιείται η εισαγωγή των απαραίτητων

δεδομένων για μια εφαρμογή, καθώς χρησιμεύει και για την εξαγωγή των επιζητούμενων αποτελεσμάτων.

Παράθυρο τρέχοντος καταλόγου (Current directory): Είναι το σημείο της επιφάνειας εργασίας του MATLAB, όπου αναγράφονται το σύνολο των αρχείων, τα οποία είναι αποθηκευμένα στο τρέχον κατάλογο (directory) του συστήματος. Παρέχεται η δυνατότητα πλοήγησης μέσα σε αυτό, όπως επίσης με τη χρήση του ποντικιού (κάνοντας δεξί κλικ με το ποντίκι πάνω στο επιλεγμένο αρχείο), είναι δυνατή η εκτέλεση διάφορων επιλογών, οι οποίες σχετίζονται με το αρχείο (μετονομασία αρχείου, διαγραφή αρχείου, εκτέλεση M- File).

Παράθυρο χώρου εργασίας (Workspace): Στο παράθυρο αυτό, απεικονίζονται όλες οι μεταβλητές, οι οποίες εισάγονται και χρησιμοποιούνται στο Παράθυρο εντολών. Στο παρών παράθυρο παρέχονται πληροφορίες για τον τύπο και το μέγεθος κάθε μεταβλητής. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ανακαλέσει ανά πάσα στιγμή τη μεταβλητή αυτή στο Παράθυρο εντολών, πληκτρολογώντας απλώς το όνομα της. Στις τελευταίες εκδόσεις του MATLAB προσφέρεται η δυνατότητα για κάθε μεταβλητή, η οποία καταγράφεται στο Παράθυρο του χώρου εργασίας, να αναπαρίσταται και μέσω γραφήματος.

Παράθυρο ιστορικού εντολών (Command History): Το σύνολο των εντολών, οι οποίες πληκτρολογούνται στο Παράθυρο εντολών, μετά από κάθε ένα σύμβολο προτροπής, καταγράφονται στο παρών Παράθυρο ιστορικού εντολών. Στο παράθυρο αυτό υπάρχουν καταχωρημένες εντολές, οι οποίες έχουν εκτελεστεί στο πλαίσιο πολυσύνθετων τμημάτων, ακόμα και μέρες πριν από την τελευταία εισαγωγή στο σύστημα. Παρέχεται η δυνατότητα να επιλεγεί από αυτό το παράθυρο μια επιθυμητή εντολή και εν συνεχεία να εκτελεστεί στο παράθυρο εντολών, κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι πάνω στην εντολή αυτή.

➤ **Παράθυρο γραφημάτων (Figure Window)**

Το αποτέλεσμα από όλες τις σχετικές με τα γραφήματα εντολές, οι οποίες έχουν εκτελεστεί στο Παράθυρο εντολών, παρέχονται από το παρών, ξεχωριστό από τα υπόλοιπα, παράθυρο. Από το Παράθυρο των γραφημάτων, είναι δυνατή η επεξεργασία και ο χειρισμός των γραφημάτων. Να σημειωθεί ότι η δυνατότητα αυτή προσφέρεται από τις τελευταίες εκδόσεις του MATLAB.

➤ Παράθυρο σύνταξης (Editor Window)

Είναι το παράθυρο, στο οποίο ο χρήστης μπορεί να αναπτύξει, να επεξεργαστεί, να αποθηκεύσει τα δικά του αρχεία εντολών, τα οποία κυρίως απαρτίζονται από τα M-Files. Αν και είναι δυνατό τα αρχεία αυτά να συνταχθούν μέσω των κλασσικών προγραμμάτων σύνταξης (text editors), το MATLAB προσφέρει το αντίστοιχο πρόγραμμα, το οποίο είναι ενσωματωμένο στο πακέτο λογισμικού.

6.2 Εντολές MATLAB

Εδώ παρατίθενται μέρος εντολών της εφαρμογής, για την εξοικείωση του χρήστη, με σκοπό την ευκολότερη κατανόηση της προσομοίωσης που θα εκτελεσθεί σε παρακάτω ενότητα αυτού του κεφαλαίου.

6.2.1 Γενικά

<code>a = 2</code>	Εκχώρηση της τιμής 2 στη μεταβλητή a.
<code>b = 3;</code>	Εκχώρηση της τιμής 3 στη μεταβλητή b, χωρίς να εμφανίζεται το αποτέλεσμα.
<code>c = a + b</code>	Δίνει το άθροισμα των a και b.
<code>x = 1, y = -2</code>	Δύο εντολές σε μία γραμμή, χωρισμένες με κόμμα (εμφανίζονται και τα δύο αποτελέσματα).
<code>b</code>	Εμφανίζει την τιμή που έχουμε δώσει προηγουμένως: 3.
<code>clear b</code>	Σβήνει τη μεταβλητή b από τη μνήμη.
<code>b</code>	Μήνυμα λάθους, γιατί έχουμε σβήσει το b.
<code>clear</code>	Σβήνει όλες τις μεταβλητές από τη μνήμη.

6.2.2 Εισαγωγή Πινάκων

$v = [7 -2 5]$

Δημιουργεί ένα διάνυσμα, αποτελούμενο από μία γραμμή.

$v = [7,-2, 5]$

Ομοίως με προηγούμενως.

$w = [1; 2; 3]$

Δημιουργεί ένα διάνυσμα, αποτελούμενο από μία στήλη.

$A = [4 -2 5; -1 7 -6; 2 3 5]$

Εισαγωγή πίνακα 3x3.

$A = [4 -2 5 -1 7 -6 2 3 5]$

Εισαγωγή του ίδιου πίνακα (πατάμε Enter στο τέλος της γραμμής).

6.2.3 Βασικές Συναρτήσεις

$va = abs(v)$

Δημιουργεί το διάνυσμα va του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με την απόλυτη τιμή του αντίστοιχου στοιχείου του ορίσματος v .

$sq = sqrt(v)$

Δημιουργεί το διάνυσμα sq του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αντίστοιχου στοιχείου του ορίσματος v . Αν κάποιο στοιχείο είναι αρνητικό, το αντίστοιχο στοιχείο του sq θα είναι μιγαδικός.

$y = sin(pi/6)$

Επιστρέφει το ημίτονο του $\pi/6$. Όμοια για \cos (συνημίτονο), \tan (εφαπτομένη), \asin (τόξο ημ.), \acos (τόξο συν.), \atan (τόξο εφ.).

$y = exp(4)$

Επιστρέφει το e^4 , όπου e η βάση των νεπέριων λογαρίθμων.

v'

Επιστρέφει τον ανάστροφο του πίνακα v .

$C1 = \text{eye}(4)$

Δίνει το μοναδιαίο τετραγωνικό πίνακα με διάσταση 4.

$C2 = \text{eye}(5,3)$

Δίνει το μοναδιαίο πίνακα με 5 γραμμές και 3 στήλες.

$C3 = \text{ones}(3)$

Δίνει τον τετραγωνικό πίνακα με διάσταση 3 και όλα τα στοιχεία μονάδες.

$C4 = \text{eye}(2,3)$

Δίνει τον πίνακα με 5 γραμμές και 3 στήλες και όλα τα στοιχεία μονάδες.

$C5 = \text{zeros}(2)$

Δίνει τον τετραγωνικό πίνακα με διάσταση 2 και όλα τα στοιχεία μηδέν.

$A1 = \text{diag}(v)$

Επιστρέφει το διαγώνιο (τετραγωνικό) πίνακα με στοιχεία διαγωνίου τα στοιχεία του v , αφού το όρισμα v είναι διάνυσμα.

$A2 = \text{diag}(v,k)$

Επιστρέφει τον πίνακα με όλα τα στοιχεία 0, εκτός αυτών που ανήκουν στην k -διαγώνιο και που θα παίρνουν τις τιμές από τα στοιχεία του διανύσματος v . Για $k = 0$ τα στοιχεία του v μπαίνουν στην κύρια διαγώνιο, για $k = 1$ μπαίνουν στη διαγώνιο που βρίσκεται ακριβώς πάνω από την κύρια διαγώνιο, για $k = -1$ μπαίνουν στη διαγώνιο που βρίσκεται ακριβώς κάτω από την κύρια διαγώνιο κ.ο.κ. Οι διαστάσεις του πίνακα θα είναι οι ελάχιστες δυνατές ώστε να χωρούν το διάνυσμα v .

$$w = \text{diag}(A,k)$$

Παίρνει τα στοιχεία της k -διαγωνίου του τετραγωνικού πίνακα A και σχηματίζει με αυτά ένα διάνυσμα-στήλη. Το k ορίζεται όπως πριν. Η συνάρτηση diag είναι η ίδια με τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, απλώς συμπεριφέρεται διαφορετικά ανάλογα με τη μορφή του πρώτου ορίσματος.

6.2.4 Πράξεις Πινάκων

$$S = A+B$$

Επιστρέφει το άθροισμα των A και B , που έχουν κοινές διαστάσεις.

$$P = A*B$$

Εκτελεί το γινόμενο του $A(m \times n)$ επί τον $B(n \times t)$ και το εκχωρεί στον $P(m \times t)$.

$$X1.*X2$$

Για τους πίνακες $X1$ και $X2$, που έχουν κοινές διαστάσεις, δημιουργεί πίνακα του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το γινόμενο των αντίστοιχων των $X1$, $X2$.

$$X1./X2$$

Παρόμοια με πριν, αλλά το κάθε στοιχείο προκύπτει με διαίρεση του αντίστοιχου του $X1$ δια του $X2$.

$$A^3$$

Εκτελεί τον πολλαπλασιασμό $A*A*A$ (ισχύει για τετραγωνικό μόνο).

$$X3 = X1.^3$$

Δημιουργεί τον πίνακα $X3$ ίδιων διαστάσεων με τον $X1$ και κάθε στοιχείο του ισούται με την 3η δύναμη του αντίστοιχου του $X1$.

$$X4 = X1.^X2$$

Για τους πίνακες $X1$ και $X2$, που έχουν κοινές διαστάσεις, δημιουργεί πίνακα $X4$ του οποίου

κάθε στοιχείο ισούται με το αντίστοιχο του X1
υψωμένο στο αντίστοιχο του X2.

A^{-1}	Επιστρέφει τον αντίστροφο πίνακα του A.
$\text{inv}(A)$	Επίσης επιστρέφει τον αντίστροφο πίνακα του A. Αντίστροφη διαίρεση: εκτελεί την πράξη $\text{inv}(A)*B$, όπου ο B δεν πρέπει απαραίτητα να είναι τετραγωνικός πίνακας, αρκεί όμως το πλήθος των γραμμών του να είναι ίσος με τη διάσταση του τετραγωνικού A. Η αντίστροφη διαίρεση είναι χρήσιμη για την επίλυση του συστήματος $Ax=b$
$A \setminus B$	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-γραμμή του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το μέγιστο από τα στοιχεία της στήλης που ανήκει. Αν το A είναι διάνυσμα (στήλη ή γραμμή), επιστρέφει το μέγιστο αριθμό.
$\text{max}(A)$	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-γραμμή του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το μέγιστο από τα στοιχεία της στήλης που ανήκει.
$\text{max}(A,[],1)$	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-στήλη του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το μέγιστο από τα στοιχεία της γραμμής που ανήκει.
$\text{max}(A,[],2)$	Ίδια σύνταξη με το max, αλλά επιστρέφει τα ελάχιστα.
$\text{min}(A)$	

sum(A)	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-γραμμή του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το άθροισμα των στοιχείων της στήλης που ανήκει. Αν το A είναι διάνυσμα (στήλη ή γραμμή), επιστρέφει το άθροισμα όλων των στοιχείων.
sum(A,1)	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-γραμμή του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το άθροισμα των στοιχείων της στήλης που ανήκει.
sum(A,2)	Αν το A είναι πίνακας, επιστρέφει το διάνυσμα-στήλη του οποίου κάθε στοιχείο ισούται με το άθροισμα των στοιχείων της γραμμής που ανήκει.
prod(A)	Ίδια σύνταξη με το sum, αλλά επιστρέφει τα γινόμενα.

6.2.5 Αλγόριθμος SIMPLEX – Προβλήματα Γραμμικού Προγραμματισμού

Στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (ΠΓΠ) ζητείται να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης (ΑΣ), υπό τους περιορισμούς (ΥΠΠ) που θέτει το πρόβλημα. Στα προβλήματα μεγιστοποίησης αναζητούμε τη μέγιστη τιμή της ΑΣ (max) ενώ στα προβλήματα ελαχιστοποίησης την ελάχιστη τιμή της (min).

Αν το πρόβλημα έχει μόνο δύο μεταβλητές τότε μπορεί να λυθεί και γραφικά. Όμως στη γενική τους μορφή τα ΠΓΠ έχουν πολλές μεταβλητές και πολλούς περιορισμούς, και η λύση τους είναι δυνατή μόνο με τη βοήθεια του αλγορίθμου SIMPLEX και ενός Η/Υ που θα τον υλοποιεί ταχύτατα. Υπάρχουν αρκετές εφαρμογές λογισμικού που λύνουν προβλήματα βελτιστοποίησης υλοποιώντας τον αλγόριθμο SIMPLEX (π.χ., MathCAD, MS-Excel(Solver), κ.ά.). Το MatLab εκτός από τα προγράμματα που δημιουργεί ο χρήστης διαθέτει τις τυπικές συναρτήσεις ελαχιστοποίησης (fminsearch,

fminbnd, κλπ.) και διαθέτει το Optimization Toolbox το οποίο περιλαμβάνει επιπλέον συναρτήσεις για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης (linprog, optimtool, κλπ.).

Στο παράδειγμα που ακολουθεί θα δούμε πως μπορούμε να δημιουργήσουμε στο MatLab ένα απλό πρόγραμμα το οποίο να υλοποιεί τον αλγόριθμο SIMPLEX και να λύνει ένα τυπικό ΠΓΠ μεγιστοποίησης καθώς επίσης και πως το λύνουμε με τα εργαλεία του MatLab.

1) Το πρόγραμμα μας αποτελείται από τρία τμήματα:

- μια συνάρτηση **Spivot.m** που όταν κληθεί βρίσκει το οδηγό στοιχείο (pivot) για το επόμενο βήμα της Simplex,
- μια συνάρτηση **Sstep.m** που όταν κληθεί εκτελεί ένα βήμα της μεθόδου Simplex και
- το κυρίως πρόγραμμα **Simplex.m** που διαβάζει τον Αρχικό πίνακα Simplex και καλεί τις δύο πιο πάνω συναρτήσεις όσες φορές χρειαστεί (βήματα) μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Έστω ότι μας δίνεται το παρακάτω ΠΓΠ:

$$A\Sigma: \text{maximize } P = 5x_1 + 2x_2 + 3x_3$$

$$YTP: x_1 + 2x_2 + 3x_3 \leq 9$$

$$3x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq 5$$

$$x_1, x_2, x_3 \geq 0$$

Ο Αρχικός πίνακας Simplex που περιέχει και τις μεταβλητές περιθωρίου (slack) θα έχει τη μορφή:

	x_1	x_2	x_3	S_1	S_2	P	
S_1	1	2	3	1	0	0	9
S_2	3	2	2	0	1	0	5
P	-5	-2	-3	0	0	1	0

Μεταφέρουμε τις τιμές του αρχικού πίνακα στο πρόγραμμα simplex.m στη θέση Initialization και στη συνέχεια το εκτελούμε.

M-file: simplex1.m

```
% Program simplex1.m (Simplex Method for Linear Progr.)
% Initialization
%
%           X1 X2 X3 S1 S2 P   C
SimplexInitMatrix = [ 1  2  3  1  0  0   9   % S1
                    3  2  2  0  1  0   5   % S2
                    -5 -2 -3  0  0  1   0 ]; % P

% Simplex Iterations
Bima = 0
Smat = SimplexInitMatrix
[PivRow, PivCol, Telos] = Spivot(Smat);
while ~Telos
    Bima = Bima + 1
    Smat = Sstep(Smat, PivRow, PivCol)
    [PivRow, PivCol, Telos] = Spivot(Smat);
end
```

M-file: Sstep.m

```
function NewSmat = Sstep(Smat, PivotRow, PivotCol)
% Simplex Method - Function for One Step Simplex on Smat
% using Pivot element: Smat(PivotRow,PivCol)
[P, C] = size(Smat);
for i = 1:P,
    NewSmat(i,:) = Smat(i,:) - ...
        Smat(i,PivotCol) .* Smat(PivotRow,:) ./ Smat(PivotRow,PivotCol);
end
NewSmat(PivotRow,:) = Smat(PivotRow,:) ./ Smat(PivotRow,PivotCol);
```

M-file: Spivot.m

```
function [PivRow, PivCol, Telos] = Spivot(Smat)
% Simplex Method - Spivot Function finds Pivot element in Smat
[P, C] = size(Smat);
if sum(Smat(P,1:C-1)<0)==0,
    Telos = 1; % Ola ta P einai (+,0) TELOS epanelipsewn Simplex.
    PivRow = 0; PivCol = 0;
else
    [minP, minPindex] = min(Smat(P,1:C-1)); % Find Pivot_Col.
    if (sum(Smat(1:P-1,minPindex)>0)==0),
        Telos = -1; % Pivot_Col den exei kanena (+) (ALYTO)
        PivRow = 0; PivCol = 0;
    else
        Telos = 0; % Yparxei P (-) & Pivot_Col (+), brethike Pivot.
        for i = 1:P-1,
            if Smat(i,minPindex)>0,
                SmatCdivided(i) = Smat(i,C) ./ Smat(i,minPindex);
            else
                SmatCdivided(i) = 1/eps; % to kanei HUGE an element <=0
            end
        end
        [minC, minCindex] = min(SmatCdivided);
        PivRow = minCindex;
        PivCol = minPindex;
    end
end
```

```

>> simplex1
Bima =
    0
Smat =
    1     2     3     1     0     0     9
    3     2     2     0     1     0     5
   -5    -2    -3     0     0     1     0
Bima =
    1
Smat =
    0    4/3    7/3     1    -1/3     0    22/3
    1    2/3    2/3     0     1/3     0     5/3
    0    4/3    1/3     0     5/3     1    25/3

```

Το αποτέλεσμα είναι ότι η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται για $x_1 = 5/3$ & $x_2 = x_3 = 0$ και ότι η βέλτιστη τιμή της ΑΣ θα είναι $P = 25/3$. (Για να πάρουμε τα αποτελέσματα σε μορφή κλάσματος έχουμε δώσει προηγουμένως την εντολή: **format rat**).

- 2) Τα αποτελέσματα του προγράμματος μπορούμε να τα συγκρίνουμε και με τα αποτελέσματα των έτοιμων συναρτήσεων που διαθέτει το MatLab μέσω του **Optimization Toolbox**. Η συνάρτηση που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η `linprog()` και ο πιο συνηθισμένος τρόπος που συντάσσεται είναι ο εξής:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub)$$

όπου,

x είναι οι μεταβλητές που αναζητάμε

f είναι η αντικειμενική συνάρτηση που θα ελαχιστοποιηθεί

$fval$ τη τιμή που παίρνει τελικά

$A * x \leq b$ είναι οι περιορισμοί (ανισότητες) του προβλήματος

$A_{eq} * x = b_{eq}$ είναι άλλοι τυχόν περιορισμοί (ισότητες) του προβλήματος

lb & ub είναι τα κάτω και άνω όρια των μεταβλητών x

Όσα δεδομένα δεν υφίστανται δίνονται σαν κενοί πίνακες [] ή παραλείπονται αν είναι στο τέλος.

Το παραπάνω ΠΓΠ μετασχηματίζεται ελαφρά για να δοθεί προς λύση στην linprog:

$$A\Sigma: \text{maximize } P = 5x_1 + 2x_2 + 3x_3$$

$$\text{(ή ισοδύναμα } \text{minimize } f(x) = -5x_1 - 2x_2 - 3x_3)$$

$$(A * x \leq b) \quad \begin{array}{l} \text{ΥΤΠ: } x_1 + 2x_2 + 3x_3 \leq 9 \\ 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 \leq 5 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0 \quad (x \geq lb = 0) \end{array}$$

```
>> f = [-5; -2; -3];  
>> A = [ 1  2  3 ; 3  2  2];  b = [ 9; 5;];  
>> lb = zeros(3,1);  
  
>> [x,fval] = linprog(f,A,b,[],[],lb)  
  
Optimization terminated.  
x =  
    1.6667                (=5/3)  
    0.0000  
    0.0000  
fval =  
   -8.3333                (=25/3)
```

3) Για τη διαδραστική επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης, το Optimization Toolbox διαθέτει το ειδικό εργαλείο Optimization Tool. Στο εργαλείο αυτό επιλέγουμε τη μέθοδο επίλυσης (Solver) και τον αλγόριθμο (Algorithm), και στη συνέχεια δίνουμε τα ονόματα των πινάκων που περιέχουν τα στοιχεία του προβλήματος. Με το πλήκτρο Start εκτελείται ο αλγόριθμος και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα.

Όπως είναι αναμενόμενο, τα αποτελέσματα είναι τα ίδια με τις προηγούμενες μεθόδους, απλά αλλάζει ο τρόπος χρήσης και παρουσίασης.

Problem Setup and Results

Solver: linprog - Linear programming ▾

Algorithm: Simplex ▾

Problem

f: [-5;-2;-3]

Constraints:

Linear inequalities: A: [1 2 3; 3 2 2] b: [9;5]

Linear equalities: Aeq: beq:

Bounds: Lower: zeros(3,1) Upper:

Start point:

Let algorithm choose point

Specify point:

Run solver and view results

Start Pause Stop

Current iteration: 1 Clear Results

Optimization running.
Objective function value: -8.333333333333334
Optimization terminated.

Final point:

Index ▲	Value
1	1,667
2	0
3	0

< >

Options >>

Stopping criteria

Max iterations: Use default: 10*numberOfVariables

Specify:

Time limit (seconds): Use default

Specify:

Function tolerance: Use default: 1e-6

Specify:

Constraint tolerance: Use default

Specify:

Algorithm settings

Preprocessing: basic ▾

Display to command window

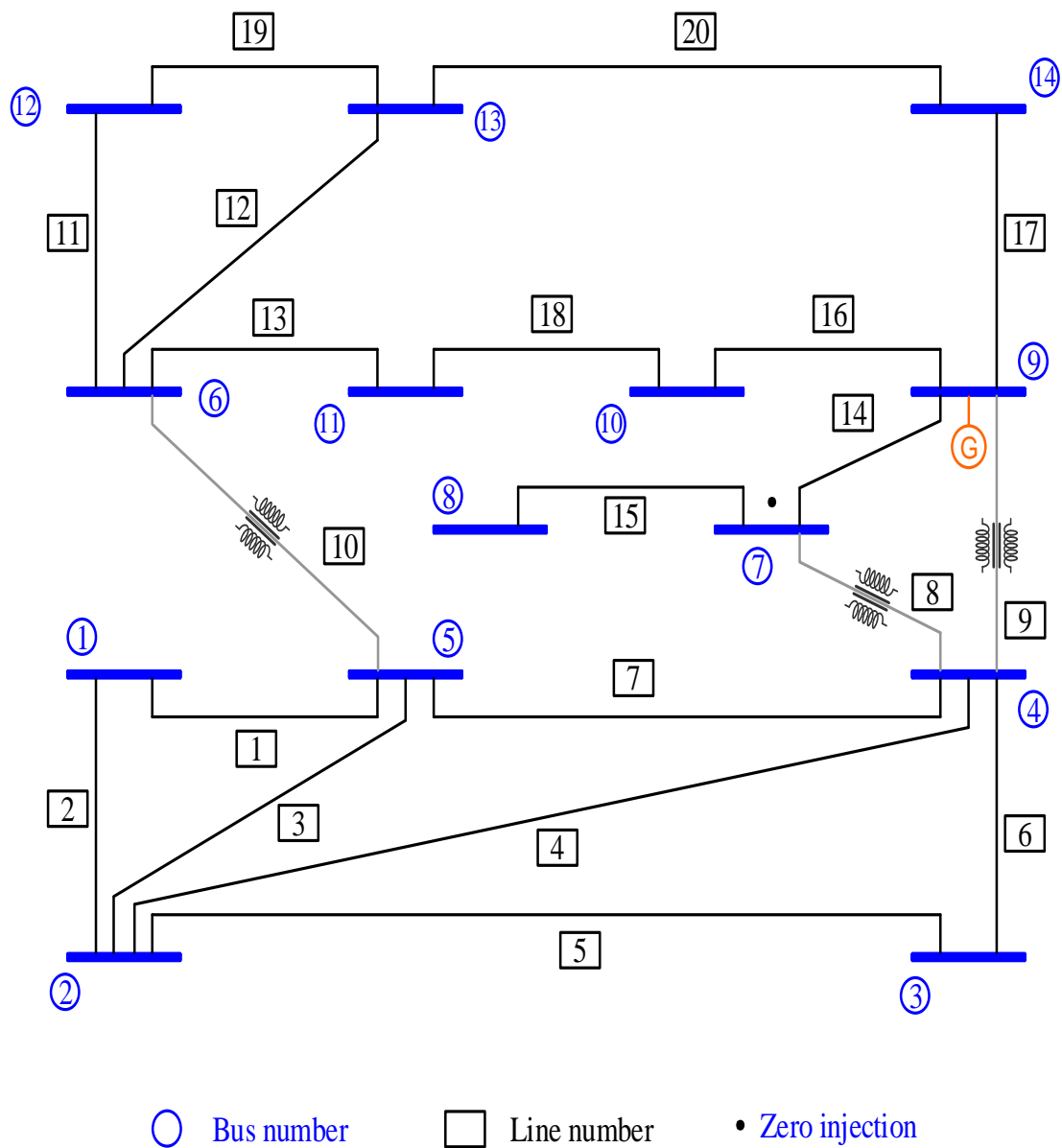
Level of display: off ▾

Show diagnostics

6.3 Προσομοιώσεις δικτύων IEEE

Στις παρακάτω υποενότητες περιέχονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν μετά από την προσομοίωση των IEEE 14-ζυγών, 30-ζυγών, 57-ζυγών και 118-ζυγών συστημάτων, με τη χρήση του προγράμματος MATLAB με την επίλυση του προβλήματος αέριου γραμμικού προγραμματισμού.

6.3.1 IEEE-14 bus system



Σχήμα 6.1 IEEE 14-ζυγών σύστημα

Χρησιμοποιώντας, για αυτής της τάξης το σύστημα (14-ζυγών), όπως και για τα υπόλοιπα (30, 57, 118-ζυγών αντίστοιχα), τη μέθοδο ανάλυσης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.4 και με την εκάστοτε εύρεση της μήτρας A (5.4) μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 6.1 Πληροφορίες συστήματος IEEE 14-ζυγών

Σύστημα	Πλήθος γραμμών	Πλήθος μηδενικών εγχύσεων	Ζυγοί μηδενικών εγχύσεων
IEEE 14	20	1	7

Σχήμα 6.2 Προσομοίωση IEEE 14-bus

The screenshot shows the Optimization Tool interface. The 'Problem Setup and Results' section displays the following configuration:

- Solver: linprog - Linear programming
- Algorithm: Simplex
- Problem: f: [1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1;1]
- Constraints:
 - Linear inequalities: A: -1*[A] b: [-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1;-1]
 - Linear equalities: Aeq: beq:
 - Bounds: Lower: Upper:
- Start point:
 - Let algorithm choose point
 - Specify point:
- Run solver and view results:
 - Start Pause Stop
 - Current iteration: 3 Clear Results
- Optimization running:
 - Objective function value: 4.0
 - Optimization terminated.
- Final point table:

Index	Value
1	0
2	1
3	0
4	0
5	0
6	1
7	1
8	0
9	1
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0

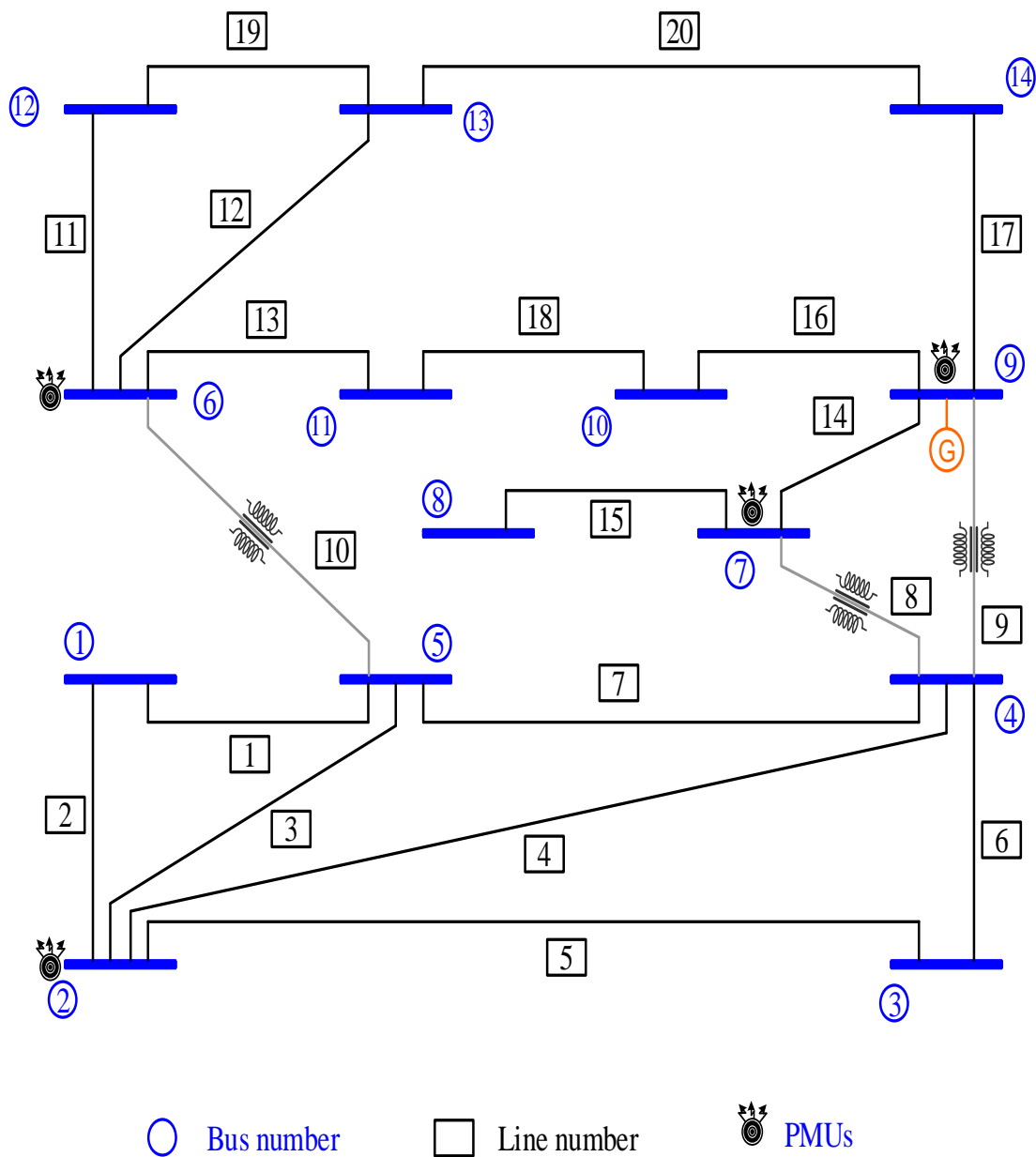
The 'Options' section on the right shows the following settings:

- Stopping criteria:
 - Max iterations: Use default: 10*numberOfVariables
 - Time limit (seconds): Use default
 - Function tolerance: Use default: 1e-6
 - Constraint tolerance: Use default
- Algorithm settings: Preprocessing: basic
- Display to command window: Level of display: off
- Show diagnostics:

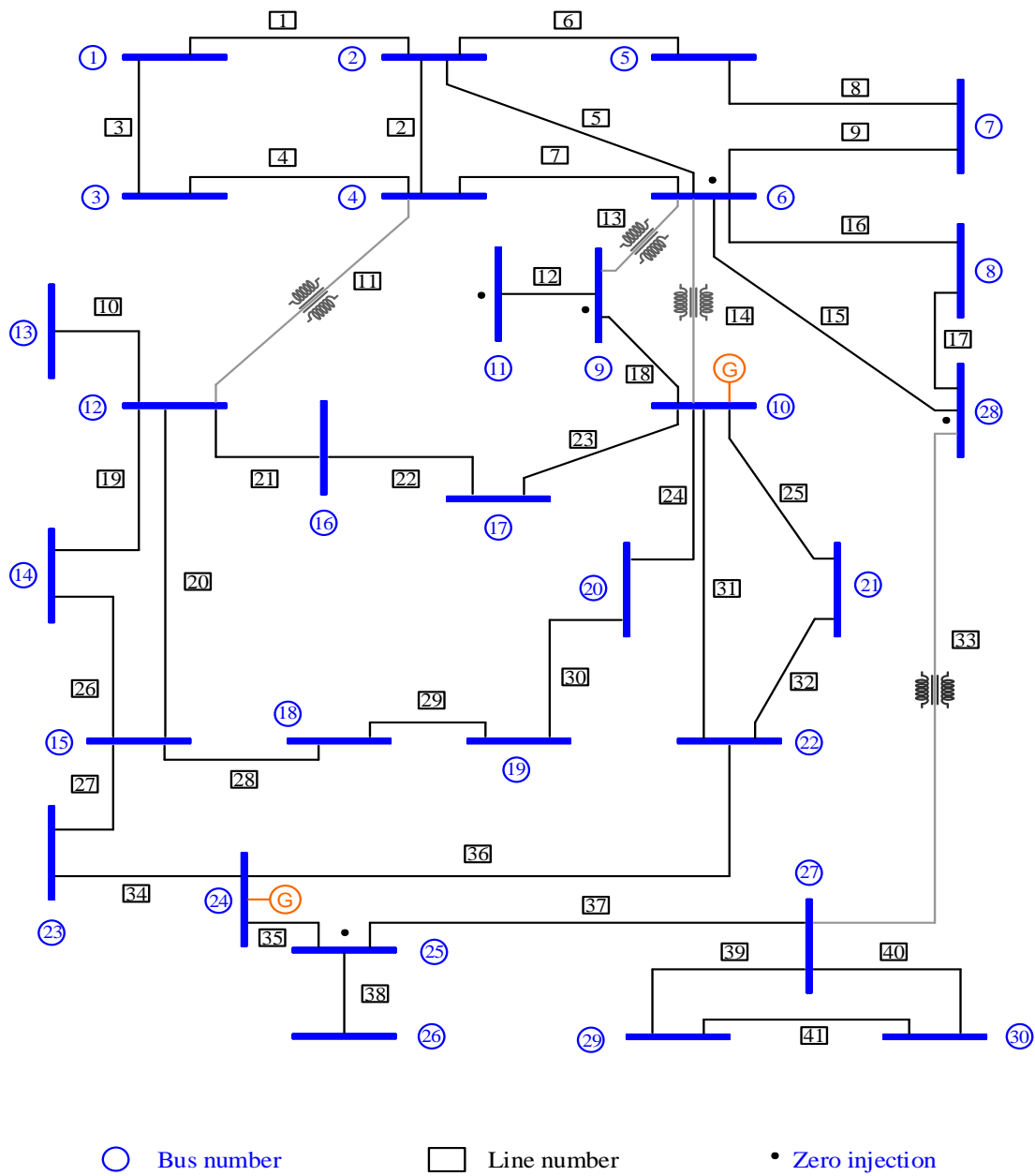
Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης για σύστημα 14-ζυγών με και χωρίς μηδενικές εγχύσεις

Χωρίς μηδενικές εγχύσεις		Με μηδενικές εγχύσεις	
Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)	Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)
4	2, 6, 7, 9	3	2, 6, 9

Σχήμα 6.3 Σύστημα IEEE 14 με τοποθετημένα PMUs



6.3.2 IEEE-30 bus system



Σχήμα 6.4 IEEE 30-ζυγών σύστημα

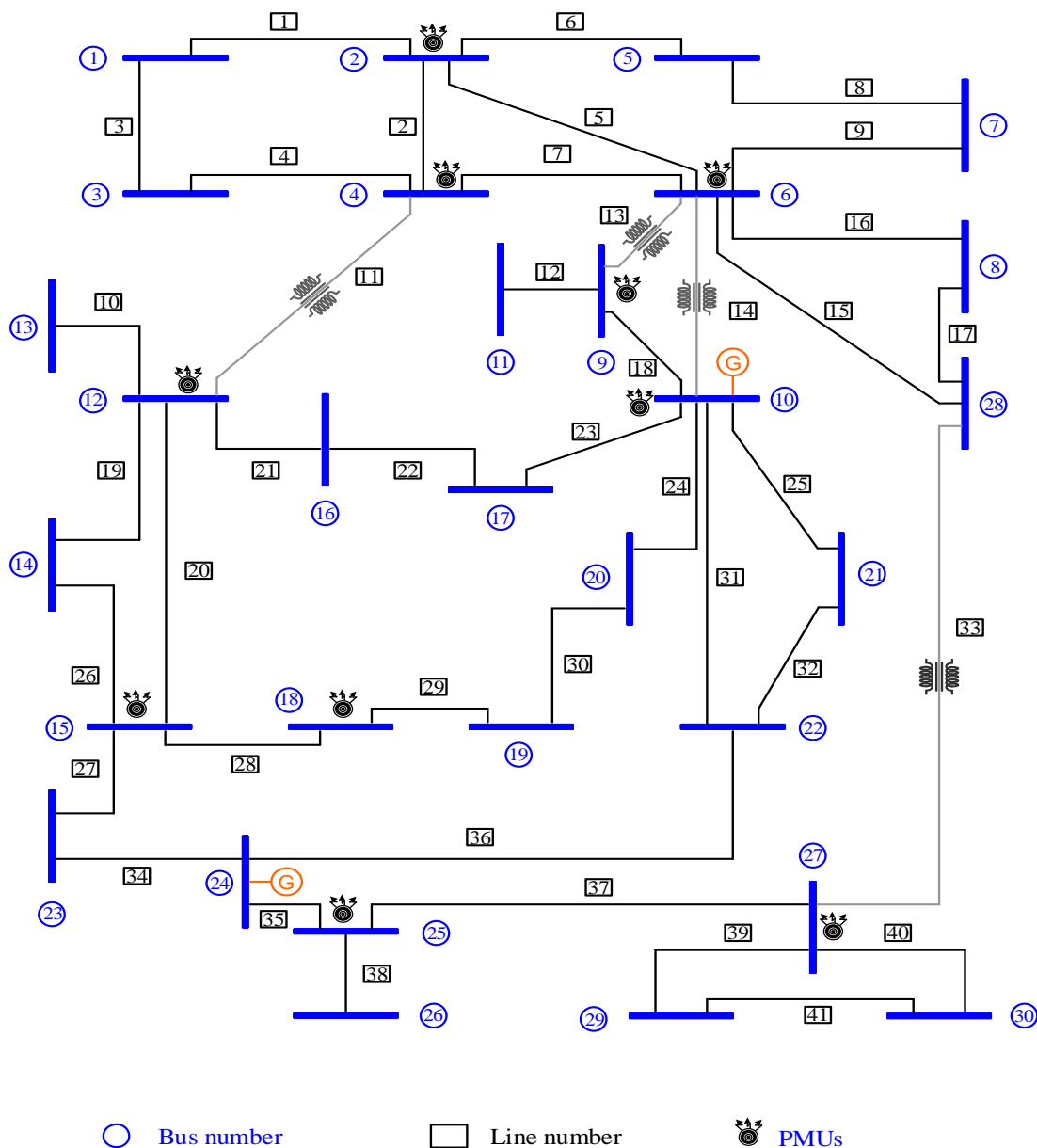
Πίνακας 6.3 Πληροφορίες συστήματος IEEE 30-ζυγών

Σύστημα	Πλήθος γραμμών	Πλήθος μηδενικών εγχύσεων	Ζυγοί μηδενικών εγχύσεων
IEEE 30	41	5	6, 9, 11, 25, 28

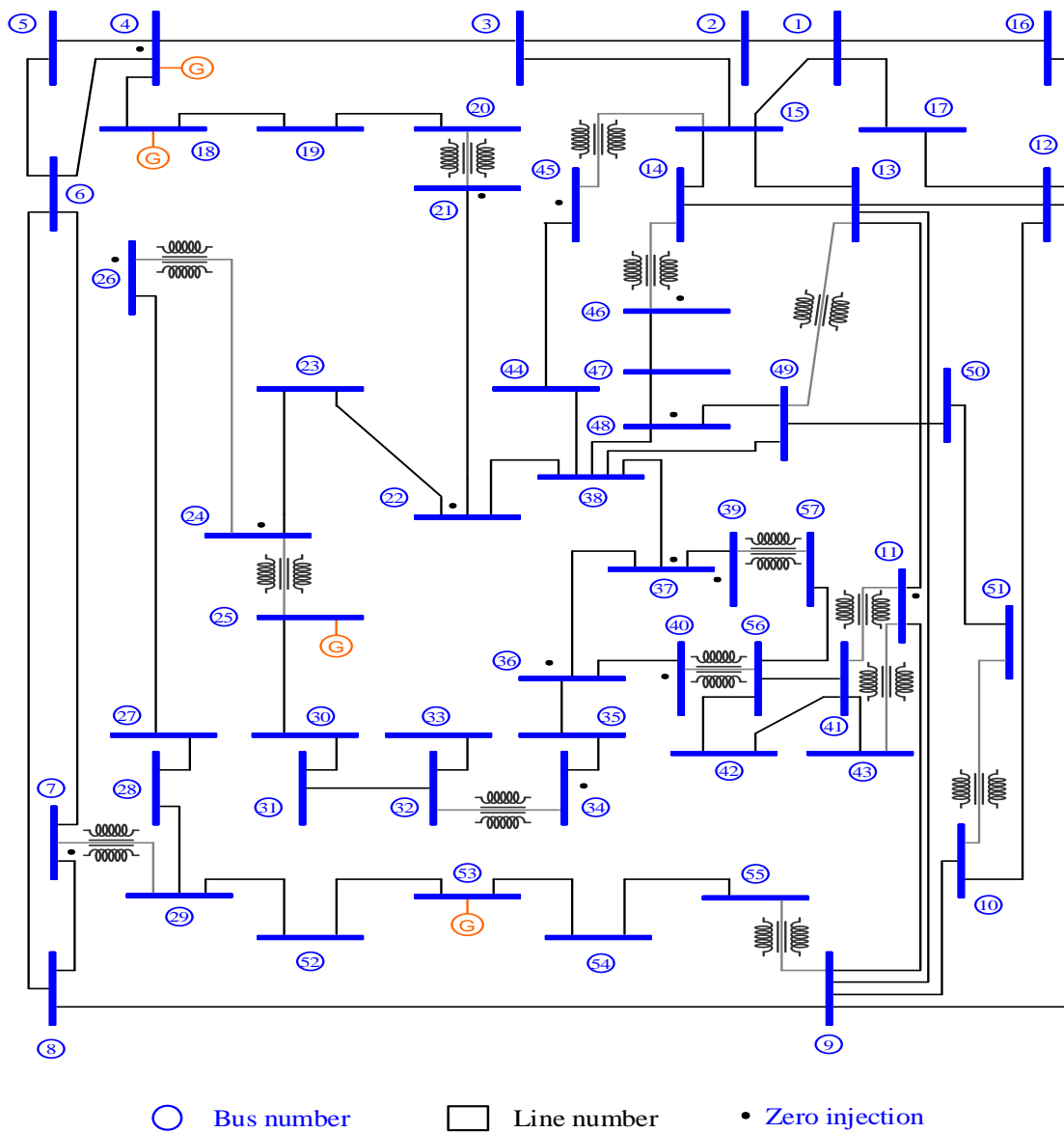
Πίνακας 6.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης για σύστημα IEEE 30-ζυγών με και χωρίς μηδενικές εγχύσεις

Χωρίς μηδενικές εγχύσεις		Με μηδενικές εγχύσεις	
Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)	Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)
10	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 25, 27	7	3, 5, 10, 12, 18, 23, 27

Σχήμα 6.5 Σύστημα IEEE 30 με τοποθετημένα PMUs



6.3.3 IEEE-57 bus system



Σχήμα 6.6 IEEE 57-ζυγών σύστημα

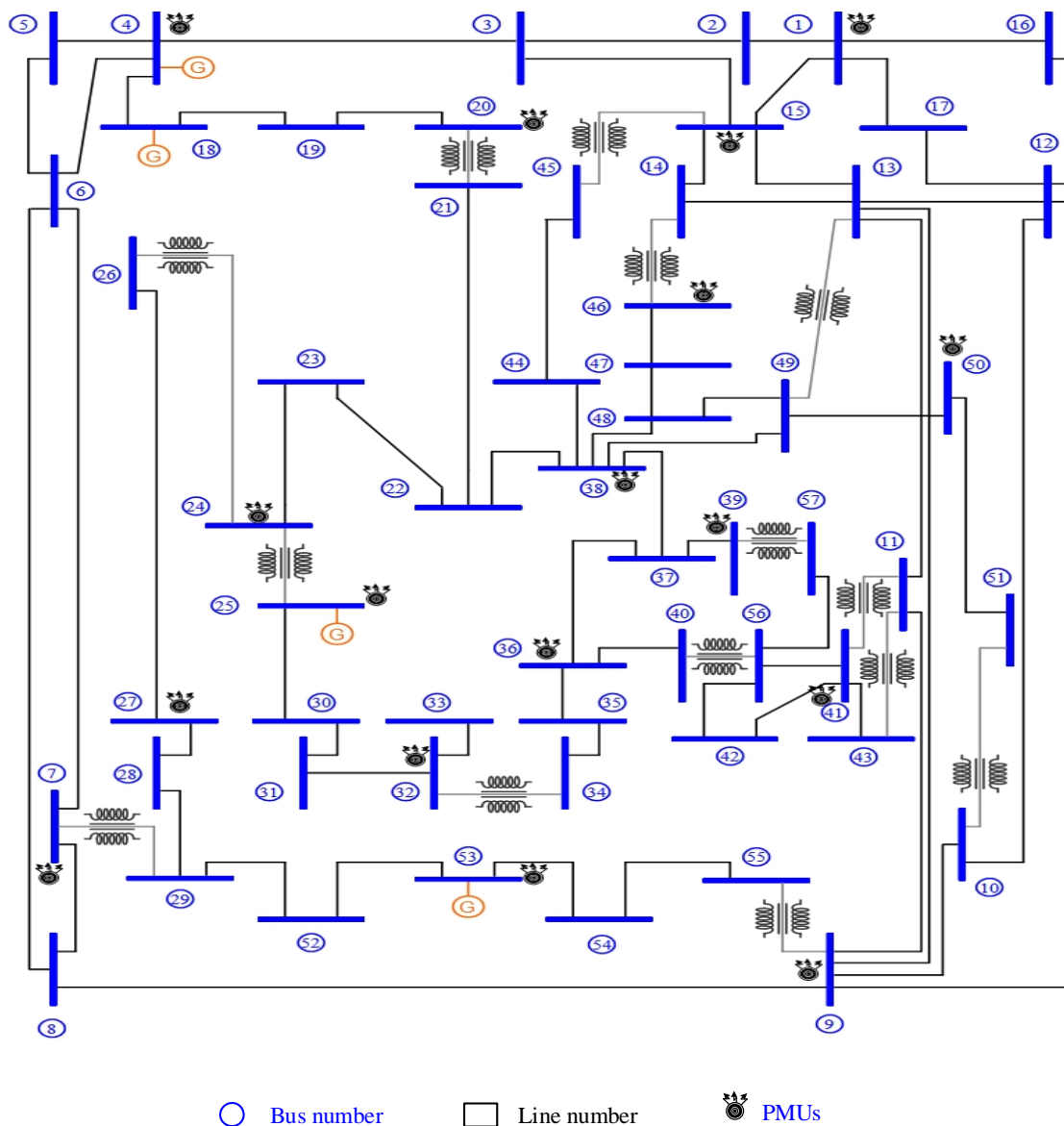
Πίνακας 6.6 Πληροφορίες συστήματος IEEE 57-ζυγών

Σύστημα	Πλήθος γραμμών	Πλήθος μηδενικών εγχύσεων	Ζυγοί μηδενικών εγχύσεων
IEEE 57	78	15	4, 7, 11, 21, 22, 24, 26, 34, 36, 37, 39, 40, 45, 46, 48

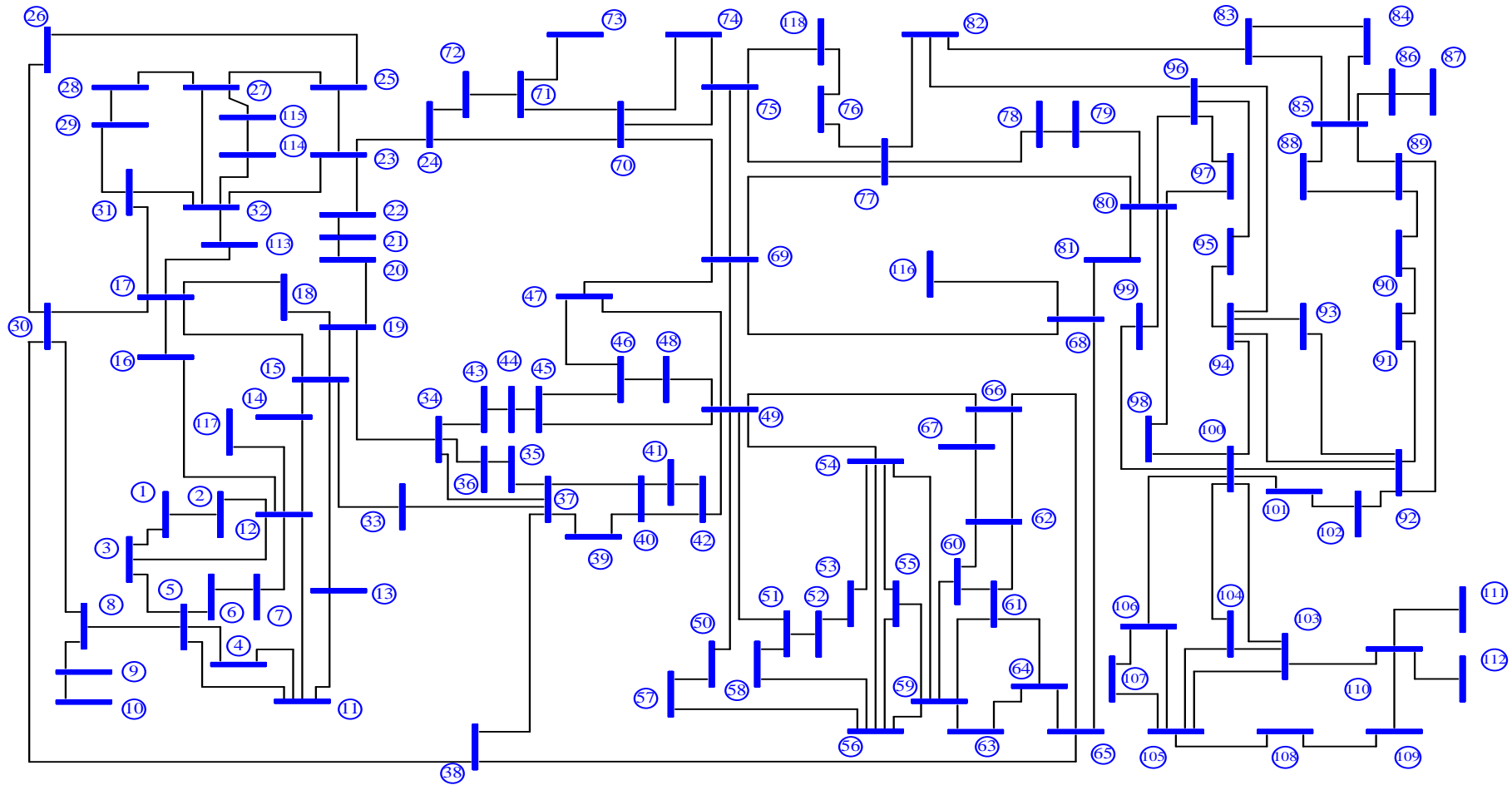
Πίνακας 6.8 Αποτελέσματα προσομοίωσης για σύστημα IEEE 57-ζυγών με και χωρίς μηδενικές εγχύσεις

Χωρίς μηδενικές εγχύσεις		Με μηδενικές εγχύσεις	
Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)	Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)
17	1, 4, 7, 9, 15, 20, 24, 25, 27, 32, 36, 38, 39, 41, 46, 50, 53	13	1, 6, 9, 15, 20, 25, 27, 32, 38, 47, 50, 53, 56

Σχήμα 6.7 Σύστημα IEEE 57 με τοποθετημένα PMUs



6.3.4 IEEE-118 bus system



Σχήμα 6.8 IEEE 118-ζυγών σύστημα

Για το παρόν σύστημα η μήτρα A (Πίνακας 6.11) δεν παρουσιάζεται λόγω έλλειψης χώρου.

Πίνακας 6.9 Πληροφορίες συστήματος IEEE 118-ζυγών

Σύστημα	Πλήθος γραμμών	Πλήθος μηδενικών εγχύσεων	Ζυγοί μηδενικών εγχύσεων
IEEE 118	179	10	5, 9, 30, 37, 38, 63, 64, 68, 71, 81

Πίνακας 6.10 Αποτελέσματα προσομοίωσης για σύστημα IEEE 118-ζυγών με και χωρίς μηδενικές εγχύσεις

Χωρίς μηδενικές εγχύσεις		Με μηδενικές εγχύσεις	
Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)	Πλήθος PMUs	Θέσεις PMUs (ζυγών)
32	2, 5, 9, 11, 12, 17, 21, 24, 25, 28, 34, 37, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 63, 68, 73, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110, 114	29	2, 8, 11, 12, 15, 19, 21, 27, 31, 32, 34, 40, 45, 49, 52, 56, 62, 65, 72, 75, 77, 80, 85, 86, 90, 94, 101, 105, 110

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη της εργασίας

Στη παρούσα διπλωματική μελετήθηκε το πρόβλημα της βέλτιστης τοποθέτησης Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (Phasor Measurement Units – PMUs), όπου σκοπός είναι η εγκατάσταση ενός ελαχίστου αριθμού PMUs, έτσι ώστε ένα δίκτυο να είναι πλήρως παρατηρήσιμο, δηλαδή η τάση και η γωνία της σε όλους του ζυγούς του συστήματος να είναι γνωστή.

Τα τελευταία χρόνια τα PMUs χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τον έλεγχο και την εποπτεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που μπορούν να παρέχουν τα PMUs, όπως οι πραγματικού χρόνου συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών (τάσης, ρεύματος, συχνότητα) σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα SCADA. Εξαιτίας του μεγάλου κόστους των PMUs, καθώς και των τηλεπικοινωνιακών υποδομών που απαιτούνται να το συνοδεύουν, η εύρεση του ελαχίστου αριθμού PMUs με τον οποίο ένα δίκτυο μπορεί να γίνει παρατηρήσιμο έχει γίνει επιτακτική ανάγκη στη σημερινή εποχή.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός, ο οποίος αποτελεί τμήμα της συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Στόχος της χρήσης του είναι η βελτιστοποίηση συστημάτων και η επίλυση πρακτικών προβλημάτων. Μπορεί να φαίνεται ότι τα προβλήματα ακεραίου προγραμματισμού είναι εύκολο να λυθούν, παρ' όλα αυτά, κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Οι αστρονομικά μεγάλοι ακέραιοι αριθμοί, καθώς επίσης και η στρογγυλοποίηση και αφαίρεση μη ακεραίων λύσεων από ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού οδηγούν σε προβλήματα και λανθασμένα συμπεράσματα.

Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του προγράμματος MATLAB και έγιναν προσομοιώσεις για τα δίκτυα 14, 30, 57 και 118 ζυγών του IEEE. Για κάθε δίκτυο έγιναν πολλαπλές εκτελέσεις του αλγορίθμου ώστε να μειωθεί στο ελάχιστο η εμφάνιση σφαλμάτων.

7.2 Επεκτάσεις της εργασίας

Για την μελλοντική εξέλιξη αυτής της διπλωματικής εργασίας προτείνονται οι παρακάτω επεκτάσεις:

- Διερεύνηση αποδοτικότητας του αλγόριθμου για την τοποθέτηση PMUs σε δίκτυα διανομής.
- Διεξαγωγή περισσότερης έρευνας πάνω στα πλεονεκτήματα των PMUs για τον έλεγχο και την εποπτεία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να γίνει ελκυστικότερη η επένδυση στην τεχνολογία αυτή.
- Μελλοντική προοπτική είναι ένα smart grid το οποίο θα περιέχει αποκλειστικά μετρήσεις PMUs. Ενδεικτικά, στο επίπεδο της διανομής η Κίνα έχει ήδη αναπτύξει ένα πρόγραμμα για την δημιουργία δικτύου μεταφοράς το οποίο θα επιτηρείται αποκλειστικά από 2400 PMUs..

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ENISA, “Smart Grid Security - Annex I - General Concepts and Dependencies with ICT”, 2012.
- [2] T. E. Dy Liacco, “Real-Time Computer Control of Power Systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no.7, pp. 884-891, Jul. 1974.
- [3] *IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, IEEE Standard C37.111-1991, 1991.
- [4] *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE Standard C37.118-2005, Jun. 2005.
- [5] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer relaying for power systems*. New York: Research Studies Press, John Wiley and Sons Inc., 1988.
- [6] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, and G. N. Korres, “Strategies for placement of synchronized phasor measurements in power systems,” *Cigre Greek National Committee*, 2013.
- [7] J. Allemong, “State Estimation fundamentals for successful deployment,” in *Proc. Power Eng. Soc. General Meeting*, 2005.
- [8] K. Uhlen, M. T. Pallson, J. O. Gjerde, K. Vu, and O. Kirkeluten, “Voltage monitoring and control for enhanced utilization of power grids,” in *Power Systems Conference and Exposition*, vol. 1, 2004, pp. 342-347.
- [9] “Blackout in the United States and Canada: Causes and recommendations,” U.S.-Canada Power System Outage Task Force, Apr. 2004.

- [10] “Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy,” Union for the Coordination of the Transmission of Electricity (UCTE), Apr. 2004.
- [11] “Development of a real-time monitoring/dynamic rating system for overhead lines,” Consultant Report for CEC, 2003.
- [12] G. D. Rockefeller, C. L. Wagner, J. R. Linders, K. L. Hicks, and D. T. Rizy, “Adaptive transmission relaying concept for improved performance,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 3, no. 4, pp. 1446-1458, Oct. 1988.
- [13] S. H. Horowitz, A. G. Phadke, and J. S. Thorp, “Adaptive transmission system relaying,” *IEEE Trans. Power Del.*, vol.3, no. 4, pp. 1436-1445, Oct. 1988.
- [14] S. Maram, “A new special protection scheme for power system controlled separation,” Master thesis, Virginia Polytechnic, 2007.
- [15] F. L. Alvarado, “Detection of external system topology errors,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 100, no. 11, pp. 4553-4561, Nov. 1981.
- [16] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis, “Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 99, no. 4, pp. 1534–1542, Jul. 1980.
- [17] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, “Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no. 9, pp. 3044–3052, Sep. 1982.
- [18] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, “Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Observability / Measurement Placement Algorithm,” *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no. 7, pp. 2012–2020, Jul. 1983.

- [19] T. Van Cutsem, "Power system observability and related functions Derivation of appropriate strategies and algorithms," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 7, no.3, pp. 175-187, Jul. 1985.
- [20] V. H. Quintana, A. Simoes-Costa, and A. Mandel, "Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no.3 pp. 617-626, Mar. 1982.
- [21] R. R. Nucera and M. L. Gilles, "Observability analysis: A new topological algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 2, pp. 466-475, May 1991.
- [22] F. F. Wu and A. Monticelli, "Network Observability: Theory," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, no. 5, pp. 1042–1048, May 1985.
- [23] A. Monticelli and F. F. Wu, "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 104, no. 5, pp. 1035-1041, May 1985.
- [24] A. Monticelli and F. F. Wu, "Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 201–206, Feb. 1986.
- [25] F. F. Wu, W-H. E. Liu, and S-M. Lun, "Observability analysis and bad data processing for state estimation with equality constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 541–548, May 1988.
- [26] G. N. Korres, "A robust method for equality constrained state estimation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 2, pp. 305–314, May 2002.
- [27] F. F. Wu, W-H. E. Liu, L. Holten, A. Gjelsvik, and S. Aam, "Observability analysis and bad data processing for state estimation using Hachtel's augmented matrix method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 3, no. 2, pp. 604–611, May 1988.

- [28] R. R. Nucera, V. Brandwajn, and M. L. Gilles, "Observability analysis and bad data analysis using augmented blocked matrices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8, no. 2, pp. 426–433, May 1993.
- [29] B. Gou, "Observability analysis for state estimation using Hachtel's augmented matrix method," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 77, no. 7, pp. 865–875, May 2007.
- [30] I. W. Slutsker and J. M. Scudder, "Network observability analysis through measurement Jacobian matrix reduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 2, pp. 331–338, May 1987.
- [31] G. N. Korres, "An integer-arithmetic algorithm for observability analysis of systems with SCADA and PMU measurements," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 7, pp. 1388–1402, Jul. 2011.
- [32] 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.
- [33] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. García, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. New York: Wiley, 2001.
- [34] K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi, *Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems*. New York: Wiley–IEEE Press, 2008.
- [35] B. Xu, Y. J. Yoon, and A. Abur, "Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation," PSERC Publication 05-20, Oct. 2005.
- [36] G. N. Korres and N. M. Maousakis, "State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1514–1524, vol. 81, no. 7, Jul. 2011

- [37] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "A state estimator including conventional and synchronized phasor measurements," *Journal Computers and Electrical Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 294-305, Mar. 2012
- [38] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and observability analysis for phasor measurement unit measured systems," *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 9, pp. 902-913, Sep. 2012
- [39] J. Zhao, G. Zhang, K. Das, G. N. Korres, N. M. Manousakis, A. K. Sinha, and Z. He, "Power System Real-time Monitoring by Using PMU based Robust State Estimation Method," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 1, Jan. 2016
- [40] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Observability Analysis for Power Systems including Conventional and Phasor Measurements," *Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2010
- [41] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Optimal placement of phasor measurement units: A literature review," *International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, 2011
- [42] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Combining conventional and synchronized phasor measurements in a hybrid state estimator," *International MARINELIVE Conference on "All Electric Ship"*, 2012
- [43] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU placement methodologies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 1070–1077, May 2012
- [44] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Observability analysis and restoration for systems with conventional and phasor measurements," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 1548-1566, Nov. 2013
- [45] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, and G. N. Korres, "Optimal Placement of PMUs with Linear and Nonlinear Models," *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 4, pp. 357-373, 2015
- [46] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal Allocation of PMUs in the Presence of Conventional Measurements Considering Contingencies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Early Access, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2524658, 2016

- [47] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal placement of phasor measurement units in power systems", *International MARINELIVE Conference on "All Electric Ship,"* 2012
- [48] G. N. Korres and N. M. Manousakis, "Observability Analysis and Restoration for State Estimation Using SCADA and PMU Data," *IEEE PES General Meeting,* 2012
- [49] N. M. Manousakis, G. N. Korres, J. N. Aliprantis, G. P. Vavourakis, and G.-C. J. Makrinas, "A Two-Stage State Estimator for Power Systems with PMU and SCADA measurements," *IEEE PowerTech,* 2013
- [50] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, and G. N. Korres, "Optimal PMU placement using nonlinear programming," *OPT-i 2014 International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization,* 2014
- [51] N. P. Theodorakatos, N. M. Manousakis, and G. N. Korres, "Optimal placement of PMUs in power systems using binary integer programming and genetic algorithm," *9th Mediterranean Conference on Power, Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion,* 2014
- [52] N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis, and G. N. Korres, "Numerical Observability Method for Optimal PMU Placement using Recursive Tabu Search Method," *IET Generation Transmission & Distribution,* vol. 7, no. 4, pp. 347-356, Jun. 2013
- [53] N. M. Manousakis, G. N. Korres, and P. S. Georgilakis, "A Detailed Bibliographic Analysis of Optimal PMU Placement Problem in Conventional Power Systems and Smart Grids," *9th Mediterranean Conference on Power, Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion,* 2014
- [54] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal placement of PMUs considering SCADA measurements and fixed channel capacity by semidefinite programming," *9th Mediter. Conf. on Power Gener. Transm. Distrib. and Energy Conver. (MedPower),* 2014.
- [55] G. N. Korres, N. M. Manousakis; T. C. Xygkis, and J. Löfberg, "Optimal phasor measurement unit placement for numerical observability in the presence of conventional measurements using semi-definite programming," *IET Gener. Transm. Distrib.,* vol. 9, no. 15, pp. 2427–2436, Nov. 2015
- [56] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "Optimal PMU placement for numerical observability considering fixed channel capacity—A

semidefinite programming approach,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 3328–3329, Jul. 2016.

- [57] N. M. Manousakis and G. N. Korres, “Semidefinite programming for optimal placement of PMUs with channel limits considering pre-existing SCADA and PMU measurements,” in *Proc. Power Syst. Comp. Conf. (PSCC)*, 2016.