



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

Ανάπτυξη Αλγορίθμου Δυναμικής Εκτίμησης Κατάστασης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Unscented Φίλτρου Kalman

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Ν. Παναγιωτόπουλος

Επιβλέποντες : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Ορέστης Δαρμής Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάπτυξη Αλγορίθμου Δυναμικής Εκτίμησης Κατάστασης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Unscented Φίλτρου Kalman

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Ν. Παναγιωτόπουλος

Επιβλέποντες : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ορέστης Δαρμής Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 25^η Φεβρουαρίου 2025.

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

.....
Άρης-Ευάγγελος Δημέας
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Βασίλειος Νικολαΐδης
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2025

.....

Ηλίας Ν. Παναγιωτόπουλος

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

Copyright © Ηλίας Ν. Παναγιωτόπουλος, 2025

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η εκτίμηση κατάστασης αποτελεί βασικό εργαλείο για την εποπτεία και τον έλεγχο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), εξασφαλίζοντας την εύρυθμη, αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία τους. Αφορά τον υπολογισμό των κρίσιμων μεταβλητών κατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου, όπως οι μιγαδικές τάσεις των ζυγών και οι ροές ισχύος βάσει μετρήσεων, οι οποίες συλλέγονται από όργανα μέτρησης τοποθετημένα σε διάφορα σημεία του δικτύου και εμπεριέχουν θόρυβο. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων, η αβεβαιότητα που προκύπτει από την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών, και οι απαιτήσεις των σύγχρονων έξυπνων δικτύων καθιστούν την εκτίμηση κατάστασης απαραίτητη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της αποδοτικότητας του συστήματος.

Τα μετρητικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται ως είσοδος στους αλγορίθμους εκτίμησης κατάστασης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια και την αποτελεσματικότητά τους. Οι μετρήσεις προερχόμενες από απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (Remote Terminal Units, RTU) και συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), αν και αποτέλεσαν για δεκαετίες τον βασικό μηχανισμό εποπτείας των ΣΗΕ, εμφανίζουν ορισμένες αδυναμίες, καθώς διαθέτουν χαμηλό ρυθμό δειγματοληψίας και επηρεάζονται από χρονικές καθυστερήσεις και υψηλά επίπεδα θορύβου. Αντιθέτως, οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units, PMU) παρέχουν συγχρονισμένες μετρήσεις των φασιθετών τάσης και ρεύματος με υψηλή ακρίβεια, και με υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση ταχέως μεταβαλλόμενων συνθηκών και την ανίχνευση δυναμικών συμβάντων στο δίκτυο. Ωστόσο, η ευρεία ενσωμάτωση των PMU απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και επικοινωνιακά συστήματα, καθώς και προηγμένους αλγορίθμους ικανούς να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Οι παραδοσιακές τεχνικές εκτίμησης κατάστασης, όπως η μέθοδος των Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (Weighted Least Squares, WLS), παρουσιάζουν περιορισμούς όταν εφαρμόζονται σε μη γραμμικά, δυναμικά συστήματα με αυξημένη μεταβλητότητα. Η μέθοδος WLS βασίζεται σε γραμμικές παραδοχές και, επομένως, προϋποθέτει τη γραμμικοποίηση της σχέσης μεταξύ των μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης, κάτι που περιορίζει την αξιοπιστία της σε έντονα μη γραμμικά συστήματα.

Το Unscented Φίλτρο Kalman (Unscented Kalman Filter, UKF) αποτελεί μια αποτελεσματική λύση για την εκτίμηση κατάστασης σε μη γραμμικά συστήματα, χρησιμοποιώντας τον μετασχηματισμό Unscented Transform (UT) για τη διάδοση ενός συνόλου σημείων σίγμα (sigma points) μέσω του μη γραμμικού μοντέλου, επιτυγχάνοντας ακριβέστερη εκτίμηση της πιθανοτικής κατανομής των μεταβλητών κατάστασης. Το μαθηματικό φίλτρο UKF διακρίνεται για την υψηλή ακρίβεια, την ταχεία σύγκλιση και την αποτελεσματική διαχείριση του μετρητικού θορύβου και των αβεβαιοτήτων που εγγενώς διέπουν τους εκτιμητές κατάστασης, καθιστώντας το ιδιαίτερα κατάλληλο για τέτοιες εφαρμογές.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη και η αξιολόγηση ενός αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης βασισμένου στο UKF. Συγκεκριμένα, η εργασία εστιάζει στην υλοποίηση του UKF, στη σύγκρισή του με παραδοσιακές μεθόδους

μέσω προσομοιώσεων και στην αξιολόγηση της απόδοσής του σε πρότυπα δίκτυα, υπό την ύπαρξη διαφόρων πηγών αβεβαιότητας. Ο αλγόριθμος UKF που αναπτύσσεται βασίζεται αποκλειστικά σε μετρήσεις προερχόμενες από μονάδες PMU. Η επιλογή αυτή εξασφαλίζει τη χρήση συγχρονισμένων, υψηλής ακρίβειας δεδομένων, τα οποία παρέχονται σε υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας, επιτρέποντας την ακριβή και δυναμική παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου, συμβάλλοντας στη βελτίωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας του εκτιμητή και ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις του θορύβου και των αβεβαιοτήτων που συχνά επηρεάζουν τα δεδομένα των παραδοσιακών συστημάτων μέτρησης.

Λέξεις Κλειδιά: δυναμική εκτίμηση κατάστασης, PMU, φίλτρο Kalman, UKF, MATLAB.

Abstract

State estimation is a fundamental tool for monitoring and control of Electrical Power Systems, ensuring their smooth, reliable, and efficient operation. It involves calculating the critical state variables of the electrical network, such as the complex bus voltages and power flows, based on redundant, noisy measurements collected from metering devices installed throughout the network. The increasing complexity of modern electrical grids, the rising uncertainties due to the integration of renewable energy sources, and the demands of modern smart grids make state estimation indispensable for the reliability and efficiency of the power grid.

The measurement data used as input for state estimation algorithms plays a decisive role in the accuracy and effectiveness of the process. Measurements from Remote Terminal Units (RTU) devices and Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems, while having served as the backbone for power systems monitoring for decades, have a series of limitations, such as low sampling rates, time delays and noise. In contrast, Phasor Measurement Units (PMUs) provide synchronized, high-accuracy measurements by directly measuring voltage and current phasors at high sampling rates. This enables monitoring of rapidly changing conditions and the detection of dynamic phenomena within the grid. However, extensive PMU integration into the network requires significant investments in infrastructure and communications, as well as advanced algorithms capable of processing large datasets in real time.

Traditional state estimation techniques, such as the Weighted Least Squares (WLS) method, have limitations when applied to nonlinear, dynamic systems with increased variability. The WLS method relies on linear assumptions and presumes a linear relationship between measurements and state variables, which constrains its applicability in highly nonlinear systems.

The Unscented Kalman Filter (UKF) offers a modern and efficient solution for state estimation in nonlinear systems. Instead of linearizing the system, the UKF employs the unscented transformation to propagate a set of points (sigma points) through the nonlinear model, providing an accurate approximation of the system's state distribution. The UKF is characterized by high accuracy, rapid convergence, and improved handling of noise and uncertainties, making it suitable for modern electrical grids.

The objective of this diploma thesis is to develop and evaluate a state estimation algorithm based on the UKF. Specifically, the study focuses on the implementation of the UKF, its comparison with traditional methods through simulations, and the analysis of its performance in benchmark networks under various conditions of uncertainty and noise. The developed UKF algorithm relies exclusively on measurements obtained from PMUs. This choice ensures the use of synchronized, high-precision data, provided at high sampling rates, enabling accurate and dynamic monitoring of the network's state. Furthermore, leveraging PMU data enhances the accuracy and reliability of the estimator by minimizing the impact of noise and uncertainties that often affect measurements from traditional systems such as RTU and SCADA.

Keywords: dynamic state estimation, PMU, Kalman Filter, UKF, MATLAB.

Ευχαριστίες

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την ενθάρρυνση ορισμένων ανθρώπων, προς τους οποίους θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες.

Πρώτα και κύρια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, Γεώργιο Κορρέ, για το έναυσμα που μου έδωσε ως διδάσκων επί του αντικειμένου και για τη δυνατότητα, ως επιβλέπων, να ασχοληθώ σε επίπεδο διπλωματικής εργασίας με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Τον ευχαριστώ θερμά για τη συνολική συνεισφορά του στη γνώση που απέκτησα επί του αντικειμένου, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως, τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π, Ορέστη Δαρμή, για την διαρκή καθοδήγηση και υποστήριξή του, καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε, παρέχοντάς μου καίριες επισημάνσεις και συμβουλές που συνετέλεσαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Ευχαριστώ ειλικρινά, την σύντροφό μου, Αλεξάνδρα, για την καθημερινή, πρακτική και ηθική της υποστήριξη και φροντίδα όλα αυτά τα χρόνια, μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου. Ευχαριστώ, επίσης, όλους τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου σε όλη τη διαδρομή, και ειδικότερα, τον αδερφό μου Αργύρη, τον Πάνο και την Άντζυ, για την καθημερινή συμπαράσταση και στήριξή τους, με κάθε τρόπο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Νίκο και Ολυμπία, για την αμέριστη υπομονή τους και για την ολοκληρωτική και αδιαπραγμάτευτη στήριξή τους, σε όλα τα επίπεδα, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στην μνήμη της αγαπημένης μου γιαγιάς, Ελένης.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract.....	7
Ευρετήριο σχημάτων	12
Ευρετήριο πινάκων	15
1 Εισαγωγή.....	16
2 Εποπτεία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	18
2.1 Σύστημα SCADA.....	18
2.2 Τεχνολογία μετρήσεων συγχρονισμένων φασιθετών	22
2.3 Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (PMUs).....	23
2.4 Σύστημα WAMS	27
3 Κέντρα ελέγχου ενέργειας.....	32
3.1 Ρόλος και Λειτουργίες των ΚΕΕ.....	33
3.1.1 Λειτουργίες Ενέργειας/Οικονομίας.....	33
3.1.2 Λειτουργίες Συγκέντρωσης και Επεξεργασίας Δεδομένων	34
3.1.3 Λειτουργίες Εποπτείας Ασφαλείας και Ελέγχου	35
3.2 Δομή και επιμέρους Υποσυστήματα των Κ.Ε.Ε.....	35
3.3 Το Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	40
3.3.1 Ιστορικά – Υφιστάμενη κατάσταση.....	40
3.3.2 Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	41
3.3.3 ΜΔΝ, Υφιστάμενες Διασυνδέσεις και ανάπτυξη του Συστήματος Μεταφοράς.....	42
3.4 Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας: λειτουργία και έλεγχος.....	45
4 Εκτίμηση κατάστασης Σ.Η.Ε.....	48
4.1 Συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.....	48
4.2 Ο Ρόλος της Εκτίμησης Κατάστασης	50
4.3 Κατηγοριοποίηση Εκτίμησης Κατάστασης	53
4.4 Στατική Εκτίμηση Κατάστασης.....	54
4.5 Δυναμική Εκτίμηση Κατάστασης.....	55
4.6 Η εκτίμηση κατάστασης υπό διαφορετικές μετρητικές συσκευές.....	57
4.7 Υβριδική Εκτίμηση Κατάστασης.....	57
4.7.1 Υβριδική Στατική Εκτίμηση Κατάστασης.....	58
4.7.2 Υβριδική Δυναμική Εκτίμηση Κατάστασης.....	61
5 Μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης.....	66

5.1	Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας	66
5.2	Σύνθεση διανύσματος μετρήσεων.....	66
5.3	Gaussian κατανομή θορύβου και συνάρτηση πιθανοφάνειας	67
5.4	Μητρική μορφή αντικειμενικής συνάρτησης	68
5.5	Αριθμητική επίλυση προβλήματος	68
5.6	Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	69
6	Μοντελοποίηση του δικτύου και διατύπωση εξισώσεων	71
6.1	Υποθέσεις λειτουργίας του ΣΗΕ.....	71
6.1.1	Γραμμές μεταφοράς.....	71
6.1.2	Εγκάρσια στοιχεία.....	71
6.1.3	Φορτία και γεννήτριες.....	72
6.1.4	Μετασχηματιστές	73
6.2	Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ - Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες	74
6.3	Συνάρτηση μετρήσεων $h(x)$	76
6.4	Ιακωβιανή Μήτρα Μετρήσεων $H(x)$ – Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες	76
7	Φίλτρα Kalman και εκτίμηση κατάστασης.....	80
7.1	Θεωρία εκτίμησης και βασικές μαθηματικές έννοιες.....	80
7.2	Λειτουργία του φίλτρου Kalman	81
7.3	Μαθηματικό μοντέλο φίλτρου Kalman	84
7.4	Τροποποιημένα φίλτρα Kalman.....	85
7.5	Unscented φίλτρο Kalman (UKF).....	85
7.5.1	Μετασχηματισμός UT.....	85
7.5.2	Μαθηματική διατύπωση του UKF	87
8	Δείκτες επίδοσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης	92
8.1	Μέσο απόλυτο σφάλμα	92
8.2	Μέσο απόλυτο σφάλμα μιγαδικής συνιστώσας.....	93
8.3	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα.....	93
9	Υλοποίηση σε περιβάλλον MATLAB®	94
9.1	Εισαγωγή τοπολογίας του δικτύου.....	94
9.2	Πρότυπο δίκτυο IEEE 14 ζυγών	97
9.3	Δημιουργία μετρήσεων	99
9.4	Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	102
9.5	Αποτελέσματα αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης UKF	103

9.5.1	Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών με 4 PMU – μετρήσεις χωρίς bad data	106
9.5.2	Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών με 7 PMU – μετρήσεις χωρίς bad data	112
9.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων	118
9.6.1	MAE_V	118
9.6.2	MAE_A	118
9.6.3	$MACC_V$	118
9.6.4	$MAPE_V$	119
10	Συμπεράσματα και παρατηρήσεις	122

Ευρετήριο σχημάτων

Σχήμα 2.1: Γενική δομή ενός συστήματος SCADA [30].....	19
Σχήμα 2.2: Επιμέρους λειτουργικά μέρη συστήματος SCADA	20
Σχήμα 2.3: Σύστημα επικοινωνίας συστήματος SCADA	21
Σχήμα 2.4: Ημιτονοειδές σήμα και η αναπαράστασή του σε μορφή φασιθέτη [9]	22
Σχήμα 2.5: Ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας συγχρονισμένων φασιθετών [11].....	23
Σχήμα 2.6: Διάταξη σύνδεσης μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης με PMU [31] ..	24
Σχήμα 2.7: Φασιθέτες τάσης και ρεύματος στο ζυγό i της γραμμής $i-j$ που παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π» [12].....	25
Σχήμα 2.8: Μπλοκ διάγραμμα μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) [18]	26
Σχήμα 2.9: Βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος WAMS [17].....	26
Σχήμα 2.10: Απόκτηση δεδομένων συστήματος SCADA έναντι WAMS [18]	28
Σχήμα 2.11: Τυπική αρχιτεκτονική συστήματος WAMS [17]	29
Σχήμα 2.12: Κεντροποιημένη Αρχιτεκτονική WAMS [21]	30
Σχήμα 2.13: Αποκεντρωμένη Αρχιτεκτονική WAMS [21]	30
Σχήμα 2.14: Κατανεμημένη αρχιτεκτονική WAMS [21]	31
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα βασικών λειτουργιών του Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας	36
Σχήμα 3.2: Κέντρο ελέγχου ενέργειας και συνεργασία επιμέρους συστημάτων[45] ..	37
Σχήμα 3.3: Βασικές λειτουργίες του EMS	38
Σχήμα 3.4: Σχηματικό μπλοκ διάγραμμα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με σύστημα συλλογής πληροφοριών και κέντρο ελέγχου ενέργειας [32].....	40
Σχήμα 3.5: Ισοζύγιο ηλεκτροπαραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά [40]	43
Σχήμα 3.6: Χάρτης διασυνδέσεων Κυκλάδων [41] [42].....	44
Σχήμα 3.7: Εμπορικά προγράμματα ανταλλαγών ενέργειας ανά διασύνδεση για το 2022 [41].....	45
Σχήμα 3.8: Μίγμα Ηλεκτροπαραγωγής στο ελληνικό δίκτυο, 2023 [38]	46
Σχήμα 3.9: Χάρτης υφιστάμενων και υπό κατασκευή διασυνδέσεων [38]	47
Σχήμα 4.1: Σχήμα 4.1: Πιθανές καταστάσεις του ΣΗΕ	49
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα λειτουργίας ενός σύγχρονου εκτιμητή κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς [45]	52
Σχήμα 4.3: Η ανομοιογένεια μεταξύ των ρυθμών ανανέωσης των μετρήσεων RTU και PMU [55]	58
Σχήμα 4.4: Κατηγοριοποίηση μεθόδων υβριδικής εκτίμησης κατάστασης [55]	60
Σχήμα 4.5: Τυπική Δομή των μεθόδων υβριδικής εκτίμησης κατάστασης [55].....	61
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου στατικής εκτίμησης κατάστασης	69

Σχήμα 6.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς [44]	70
Σχήμα 6.2: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου [44]	71
Σχήμα 6.3: Μοντέλα γεννήτριας, φορτίου σταθερής ισχύος και αγωγιμότητας [44] ..	71
Σχήμα 6.4: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [44]	72
Σχήμα 6.5: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή – ισοδύναμο «Π» [44]	73
Σχήμα 6.6: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ [44]	74
Σχήμα 7.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνικών εκτίμησης κατάστασης [91].....	80
Σχήμα 7.2: Ο βρόχος πρόβλεψης – διόρθωσης των φίλτρων Kalman [101]	82
Σχήμα 7.3: Μπλοκ διάγραμμα που απεικονίζει τα στάδια εκτέλεσης του μετασχηματισμού UT [93].....	86
Σχήμα 7.4: Σύγκριση προσέγγισης της μέσης τιμής και της συνδιακύμανσης, μέσω: (α) Monte Carlo - (β) γραμμικοποίηση πρώτης τάξης (EFK) - (γ) UT [93]	87
Σχήμα 9.1: Πρότυπο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE [99].....	98
Σχήμα 9.2: Υλοποίηση του πρότυπου δικτύου 14 ζυγών της IEEE, στο περιβάλλον προσομοίωσης MATLAB® Simulink [95]	99
Σχήμα 9.3: Επισκόπηση αποτελεσμάτων της συνάρτησης <i>runpf()</i>	100
Σχήμα 9.4: Αποτελέσματα μέτρων και γωνιών τάσεων της <i>runpf()</i>	101
Σχήμα 9.5: Αποτελέσματα ροών ενεργού και αέργου της <i>runpf()</i>	101
Σχήμα 9.6: Αποτελέσματα αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με χρήση UKF	103
Σχήμα 9.7: Αποτελέσματα αλγορίθμου κλασσικής εκτίμησης κατάστασης WLS ...	104
Σχήμα 9.8: Χρονική διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με χρήση UKF	105
Σχήμα 9.9: Δείκτης MAE_V 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	106
Σχήμα 9.10: Δείκτης MA_A 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).....	106
Σχήμα 9.11: Δείκτης $MACC_V$ 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).	107
Σχήμα 9.12: Δείκτης $MAPE_V$ 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).	107
Σχήμα 9.13: Δείκτης MAE_V 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	108
Σχήμα 9.14: Δείκτης MAE_A 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	108
Σχήμα 9.15: Δείκτης $MACC_V$ 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	109
Σχήμα 9.16: Δείκτης $MAPE_V$ 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	109
Σχήμα 9.17: Δείκτης MAE_V 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	110
Σχήμα 9.18: Δείκτης MAE_A 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	110
Σχήμα 9.19: Δείκτης $MACC_V$ 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	111
Σχήμα 9.20: Δείκτης $MAPE_V$ 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU)	111
Σχήμα 9.21: Δείκτης MAE 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).....	112
Σχήμα 9.22: Δείκτης MAE_A 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	112

Σχήμα 9.23: Δείκτης $MACC_N$ 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	113
Σχήμα 9.24: Δείκτης $MAPE_N$ 1 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	113
Σχήμα 9.25: Δείκτης MAE_N 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	114
Σχήμα 9.26: Δείκτης MAE_A 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	114
Σχήμα 9.27: Δείκτης $MACC_N$ 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	115
Σχήμα 9.28: Δείκτης $MAPE_N$ 2 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	115
Σχήμα 9.29: Δείκτης MAE_N 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	116
Σχήμα 9.30: Δείκτης MAE_A 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	116
Σχήμα 9.31: Δείκτης $MACC_N$ 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	117
Σχήμα 9.32: Δείκτης $MAPE_N$ 3 ^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU)	117
Σχήμα 9.33: Βελτίωση δείκτη MAE_N (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου)	120
Σχήμα 9.34: Βελτίωση δείκτη MAE_A (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου)	120
Σχήμα 9.35: Βελτίωση δείκτη $MACC_N$ (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου)	121
Σχήμα 9.36: Βελτίωση δείκτη $MAPE_N$ (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου)	121

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 6.1: Ανάλυση πρόσημων ενεργού και άεργου ισχύος γεννήτριας και ειδών φορτίου	53
Πίνακας 8.1: Ποιοτική κλίμακα του δείκτη MAPE	73
Πίνακας 9.1: Παράμετροι ζυγών	76
Πίνακας 9.2: Παράμετροι γεννητριών	77
Πίνακας 9.3: Παράμετροι γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών	78

1 Εισαγωγή

Στις σύγχρονες κοινωνίες, περισσότερο από το ένα τρίτο της καταναλισκόμενης ενέργειας είναι ηλεκτρική. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), αποτελούν δομές υπεύθυνες για την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή ηλεκτρικής ενέργειας. Ιστορικά, αποτελούν ένα από τα παλαιότερα και πιο πολύπλοκα συστήματα που έχουν κατασκευαστεί από τον άνθρωπο. Η ύπαρξη αξιόπιστων ΣΗΕ αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εύρυθμη κοινωνικοοικονομική λειτουργία και ανάπτυξη, διασφαλίζοντας τη λειτουργία τόσο του συνόλου των κρίσιμων κοινωνικών υποδομών, όπως οι δομές υγείας, οι επικοινωνίες, οι δημόσιες υπηρεσίες και η βιομηχανία, όσο και των απλών καθημερινών δραστηριοτήτων των πολιτών.

Λόγω της πολύπλοκης και ευμετάβλητης φύσης του συστήματος, ο έλεγχος των ΣΗΕ, ώστε να λειτουργούν εντός των ορίων σταθερότητάς τους, είναι μια εξίσου πολύπλοκη και απαιτητική εργασία.

Η αποτελεσματική διαχείριση και διασφάλιση της ευσταθούς λειτουργίας των ΣΗΕ αποτελεί έναν από τους πρωταρχικούς στόχους των διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ΣΗΕ πρέπει να λειτουργούν απρόσκοπτα και να διατηρούν την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλίζεται η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος και η ασφάλεια των υποδομών. Αυτό γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο λόγω των προκλήσεων που προκύπτουν από την συνεχώς αυξανόμενη ένταξη στις μονάδες παραγωγής του συστήματος, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα και στοχαστικότητα στην παραγωγή [1]. Η ζήτηση ενέργειας και οι απαιτήσεις σε παραγόμενη ισχύ, αυξάνονται συνεχώς. Οι διασυνδέσεις του δικτύου πολλαπλασιάζονται, οδηγώντας σε περισσότερο πολύπλοκα ΣΗΕ, συγκριτικά με το παρελθόν. Ταυτόχρονα οι συμβατικοί θερμικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας, αντικαθίστανται με συνεχώς αυξανόμενο ρυθμό, από σταθμούς παραγωγής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) – τόσο κεντρικούς όσο και αποκεντρωμένους, ως προς τον έλεγχό τους. Έτσι, καθώς τα σύγχρονά ΣΗΕ λειτουργούν όλο και πιο κοντά στα όριά τους, δημιουργείται μια σειρά από νεόκοπα ζητήματα που αφορούν την αποδοτική, οικονομική και ασφαλή λειτουργία τους.

Όλα τα παραπάνω εντείνουν την ανάγκη για άμεση εποπτεία και έλεγχο των ΣΗΕ, με αξιόπιστο και αποτελεσματικό τρόπο. Ωστόσο, λόγω της αυξημένης περιπλοκότητας και της ευμετάβλητης φύσης των σύγχρονων ΣΗΕ, τόσο η υφιστάμενη μετρητική υποδομή, όσο και οι χρησιμοποιούμενες συμβατικές μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης, αντιμετωπίζουν δυσκολίες. Κατά συνέπεια, οι συμβατικές μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης σταδιακά αντικαθίστανται με πιο σύγχρονους αλγόριθμους δυναμικής εκτίμησης κατάστασης, που συχνά περιλαμβάνουν φίλτρα Kalman. Τα φίλτρα Kalman επιτρέπουν την παρακολούθηση των συνθηκών του συστήματος ακόμη και σε περιβάλλον έντονου θορύβου ή ελλιπών δεδομένων, ενώ παρέχουν δυναμική εκτίμηση κατάστασης με την ενσωμάτωση πληροφοριών τόσο από μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο όσο και από προβλέψεις βασισμένες στο μαθηματικό μοντέλο του συστήματος.

Παράλληλα, τα μετρητικά δεδομένα που προέρχονται από απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (Remote Terminal Units, RTU) και συστήματα SCADA, εμπλουτίζονται από μετρήσεις Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (Phasor Measurement Units – PMUs),

οι οποίες παρέχουν δυνατότητες όπως η εποπτεία των μεταβαλλόμενων συνθηκών του συστήματος και ο εντοπισμός πιθανών προβλημάτων πριν αυτά εξελιχθούν σε σοβαρά συμβάντα.

2 Εποπτεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

Τα σύγχρονα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας εκτείνονται γεωγραφικά σε όλη την επικράτεια κάθε χώρας. Κάθε μονάδα παραγωγής ή δομή διαχείρισης ενέργειας, ανεξαρτήτως της γεωγραφικής της θέσης, συνδέεται ηλεκτρικά με γειτονικές περιοχές, μέσω των λεγόμενων ζεύξεων. Στα ΣΗΕ είναι ζωτικής σημασίας να διατηρείται σταθερή η ονομαστική συχνότητα λειτουργίας σε ολόκληρο το δίκτυο, συνθήκη που μπορεί να διασφαλιστεί μόνο σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας. Ωστόσο, τα ΣΗΕ υπόκεινται συνεχώς σε διαταραχές που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων διαταραχών είναι οι απότομες μεταβολές στη ζήτηση, οι απώλειες μιας ή περισσότερων γραμμών μεταφοράς, οι μεταβολές στην τοπολογία του δικτύου, οι βλάβες εξοπλισμού και οι αστοχίες γεννητριών [2]. Στα σύγχρονα ΣΗΕ, η μεταβλητή φύση της παραγωγής από ΑΠΕ επιτείνει αυτές τις διαταραχές, ιδιαίτερα σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

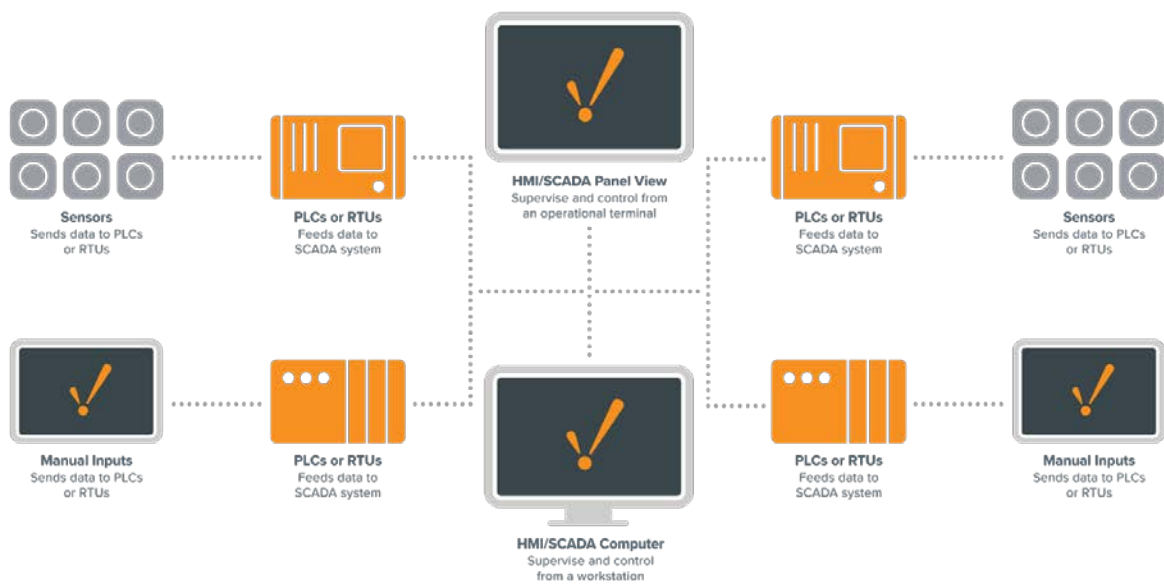
Η ασφάλεια των ΣΗΕ μπορεί να οριστεί ως η πιθανότητα το σημείο λειτουργίας του συστήματος να παραμείνει εντός αποδεκτών ορίων, υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης. Ουσιαστικά είναι μια συνάρτηση του χρόνου και της ανθεκτικότητας του συστήματος έναντι επικείμενων διαταραχών. Η ασφάλεια αποτελεί θεμελιώδη έννοια για την εποπτεία και τον έλεγχο των ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο.

2.1 Σύστημα SCADA

Καθώς οι απαιτήσεις για αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνονταν, η ανάγκη για άμεση εποπτεία και αποτελεσματικό έλεγχο των ΣΗΕ έγινε επιτακτική. Ήδη από τη δεκαετία του 1960 αναπτύχθηκαν τεχνολογίες γνωστές ως Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Ανάκτησης Δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition – SCADA), τα οποία επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο κρίσιμων παραμέτρων του συστήματος [3].

Τα πρώτα συστήματα SCADA χρησιμοποιήθηκαν κυρίως σε δίκτυα διανομής και τηλεπικοινωνιών, παρέχοντας απομακρυσμένες ενδείξεις και έλεγχο παραμέτρων των υποσταθμών. Η τεχνολογία τους βασίστηκε σε αυτόματα συστήματα τηλεφωνικής μεταγωγής, χρησιμοποιώντας απλά αναλογικά και ψηφιακά κυκλώματα, με εξαιρετικά αργούς ρυθμούς μετάδοσης με τα σημερινά δεδομένα – μόλις 10 bits ανά δευτερόλεπτο [4].

Με την πρόοδο των υπολογιστικών συστημάτων, τα συστήματα SCADA βελτιώθηκαν κυρίως με τη χρήση μικροεπεξεργαστών. Αυτό επέτρεψε την επεξεργασία μεγαλύτερου όγκου δεδομένων, τη βελτιωμένη παρακολούθηση διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο και τη μετάβαση από αναλογικά σε ψηφιακά συστήματα ελέγχου. Επιπλέον, η ανάπτυξη των δικτύων υπολογιστών επέτρεψε τη σύνδεση πολλαπλών απομακρυσμένων σημείων (π.χ. υποσταθμών) σε ένα κεντρικό σύστημα ελέγχου, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία και επεκτασιμότητα στα συστήματα SCADA [5].



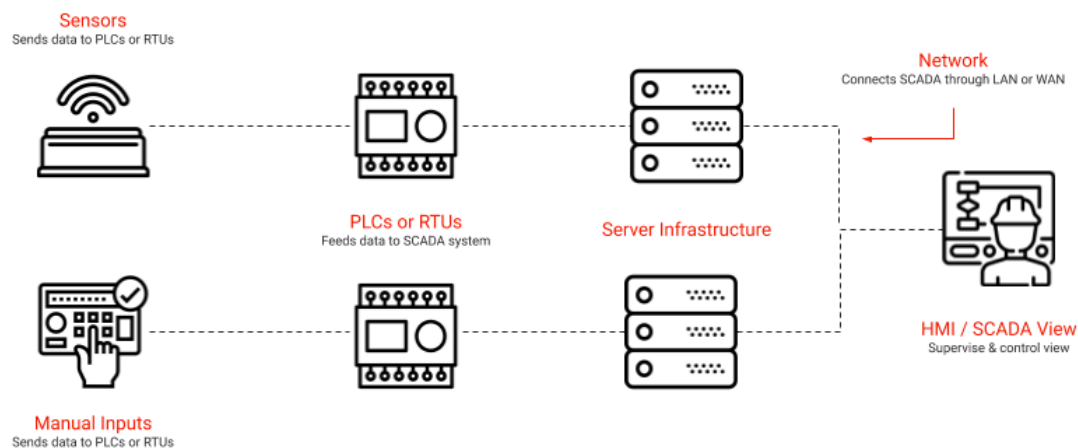
Σχήμα 2.1: Γενική δομή ενός συστήματος SCADA [30].

Σήμερα, ένα πλήρες σύστημα SCADA αποτελείται από εξοπλισμό διαχείρισης σημάτων (για παράδειγμα μονάδες εισόδου/εξόδου, μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to Digital – A/D), δίκτυα για τη διασύνδεση των συσκευών, εξοπλισμό ελέγχου, διεπαφή ανθρώπου – μηχανής (Human-Machine Interface – HMI), και εξειδικευμένο λογισμικό. Το κεντρικό σύστημα SCADA συνήθως βρίσκεται σε μεγάλη γεωγραφική απόσταση από τα σημεία συλλογής δεδομένων. Επομένως, για τη συλλογή μετρητικών δεδομένων από το πεδίο, χρησιμοποιούνται αισθητήρες και μετρητικά όργανα στα σημεία ενδιαφέροντος [6].

Το σύστημα μέτρησης και ελέγχου του SCADA περιλαμβάνει μία κύρια τερματική μονάδα, η οποία λειτουργεί ως ο κεντρικός «εγκέφαλος» του συστήματος, καθώς και έναν μεγάλο αριθμό απομακρυσμένων τερματικών μονάδων (Remote Terminal Units – RTU), τοποθετημένων στα σημεία ενδιαφέροντος στο δίκτυο. Οι μονάδες RTU είναι τοποθετημένες στα σημεία ενδιαφέροντος του δικτύου, συλλέγουν δεδομένα από τοπικές μετρητικές συσκευές και τα διαβιβάζουν στην κύρια μονάδα. Ταυτόχρονα, διανέμουν τα σήματα ελέγχου που λαμβάνουν από την κύρια μονάδα, στις ανάλογες συσκευές. Για τη συλλογή, την επεξεργασία και τη διαχείριση των δεδομένων χρησιμοποιείται ένα σύστημα εξειδικευμένου λογισμικού. Η δομή ενός συστήματος SCADA διαμορφώνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε δικτύου. Ωστόσο, τα κύρια λειτουργικά μέρη ενός τυπικού συστήματος SCADA είναι τα εξής [7]:

- **RTU ή/και Μονάδες Συγκέντρωσης Δεδομένων (Data Concentrator):** Εξασφαλίζουν τη σύνδεση με όργανα μέτρησης και επιτρέπουν την αποστολή εντολών σε στοιχεία του δικτύου από το ΚΕΕ.
- **Κανάλια Επικοινωνίας (Communication Channels):** Εξασφαλίζουν τη διασύνδεση του κέντρου ελέγχου με τα RTU και τις μονάδες συγκέντρωσης δεδομένων.
- **Κεντρικός Σταθμός Ελέγχου (Master Station):** Το κεντρικό σημείο παρακολούθησης και λήψης αποφάσεων για το ηλεκτρικό δίκτυο.

- **Περιβάλλον Επικοινωνίας Ανθρώπου-Μηχανής (HMI):** Η διεπαφή για την αλληλεπίδραση χειριστών με το λογισμικό του SCADA.



Σχήμα 2.2: Επιμέρους λειτουργικά μέρη συστήματος SCADA.

Τα ανωτέρω δομικά στοιχεία συνθέτουν την αρχιτεκτονική των SCADA και βασίζονται σε τεχνολογίες και εξοπλισμό που επιτελούν διακριτές λειτουργίες, όπως [8]:

- **Ευφυείς Ηλεκτρονικές Συσκευές (Intelligent Electronic Devices – IED):** Προγραμματιζόμενες μονάδες που ενσωματώνουν αισθητήρες, μικροεπεξεργαστές και δυνατότητες επικοινωνίας, υποστηρίζοντας μέτρηση, προστασία και έλεγχο σε μία συσκευή. Σε πολλές περιπτώσεις υπερτερούν των παραδοσιακών μονάδων RTU, τόσο σε επίπεδο δυνατοτήτων όσο και αποδοτικότητας. .
- **Διακομιστές Εφαρμογών (Application Servers):** Λειτουργούν ως η κεντρική πλατφόρμα για την επεξεργασία δεδομένων και την εκτέλεση υπολογιστικών εργασιών, όπως η εκτίμηση κατάστασης, η βέλτιστη ροή ισχύος και η πρόβλεψη φορτίου..
- **Μετωπιαίο Άκρο Επικοινωνίας (Communication Front End – CFE):** Λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του κεντρικού συστήματος SCADA και των απομακρυσμένων στοιχείων εποπτείας και ελέγχου του δικτύου.
- **Σύστημα Επικοινωνίας (Communication System):** Περιλαμβάνει τις υποδομές μετάδοσης δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων οπτικών ινών, των μικροκυματικών ζεύξεων και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

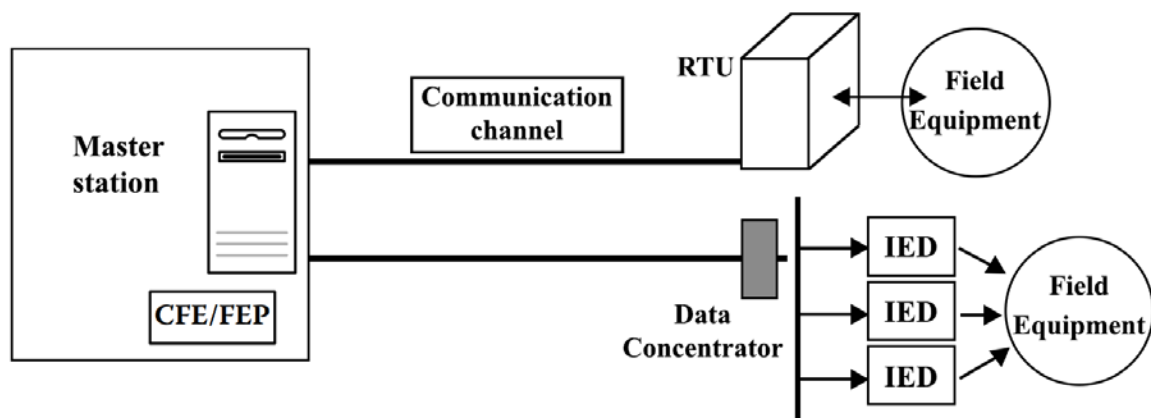
Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό από την παραπάνω δομική ανάλυση, τα συστήματα SCADA, σε επίπεδο ελέγχου, βασίζονται κυρίως σε συστήματα ανοιχτού βρόχου. Παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις ενσωματώνουν χαρακτηριστικά κλειστού βρόχου – για παράδειγμα για τον έλεγχο τάσης ή ροής ισχύος, όπου υπάρχει συνεχής ανατροφοδότηση και αυτόματη ρύθμιση, σε κάποια υποσυστήματα – κατά κύριο λόγο παραμένει ένα σύστημα ανοιχτού βρόχου. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να αξιοποιηθεί η ανατροφοδότηση για να ελεγχθούν τα αποτελέσματα των εντολών, καθώς, πλην εξαιρέσεων, δεν υπάρχει δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης ή προσαρμογής με βάση τα δεδομένα εισόδου. Κατά συνέπεια, στα συστήματα SCADA, δεν υπάρχει δυνατότητα μηχανικής μάθησης ή προσαρμογής βάσει της απόδοσης του συστήματος. Ωστόσο, οι χειριστές παρακολουθούν στενά την παραγωγή, τη μεταφορά και την κατανάλωση

ηλεκτρικής ενέργειας και παρεμβαίνουν όταν προκύπτουν συνθήκες υπερφόρτωσης ή παραβίασης των ορίων τάσης, διασφαλίζοντας τη σωστή λειτουργία του μέσω χειροκίνητων ενεργειών ελέγχου.

Για τις σύγχρονες τεχνικές απαιτήσεις, που επιβάλλουν οι συνεχείς τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της παραγωγής και διαχείρισης, η συχνότητα δειγματοληψίας των SCADA είναι σχετικά χαμηλή (κάθε 2-6 δευτερόλεπτα), γεγονός που περιορίζει την ικανότητά τους να ανιχνεύουν ταχείες δυναμικές αλλαγές στο σύστημα. Οι μετρήσεις τους δεν λαμβάνονται συγχρονισμένα, κάτι που μπορεί να δημιουργήσει καθυστερήσεις και ανακρίβειες στην αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης του δικτύου.

Έτσι, τα συστήματα SCADA, αν και ευρέως χρησιμοποιούμενα για δεκαετίες στη βιομηχανία και τη διαχείριση ΣΗΕ, έχουν ορισμένους περιορισμούς, που οδηγούν στην ανάγκη για μετάβαση σε νεότερα τεχνολογικά συστήματα, άμεσου και αξιόπιστου ελέγχου.

Στο σχήμα 2.3 φαίνεται η αρχιτεκτονική ενός συστήματος SCADA. Αποτελείται από έναν κύριο σταθμό (Master Station) που συνδέεται μέσω καναλιών επικοινωνίας με RTUs και σταθμούς συγκέντρωσης δεδομένων (Data Concentrators), τα οποία με τη σειρά τους διασυνδέονται με IEDs (Intelligent Electronic Devices) και εξοπλισμό πεδίου.



Σχήμα 2.3: Σύστημα επικοινωνίας συστήματος SCADA.

2.2 Τεχνολογία μετρήσεων συγχρονισμένων φασιθετών

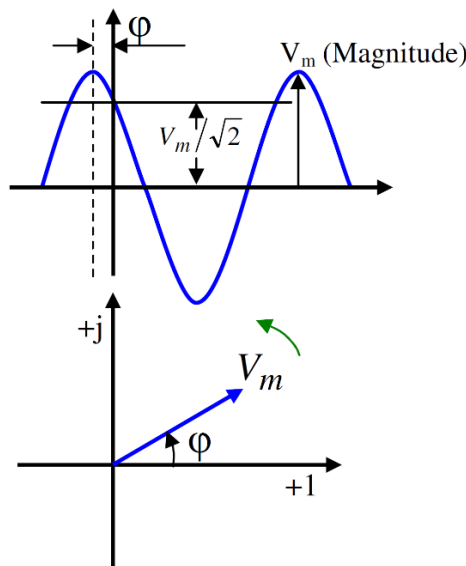
Ο φασιθέτης ορίζεται ως ένα μιγαδικό μέγεθος που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει ένα ημιτονοειδές σήμα. Το μέτρο του φασιθέτη εκφράζει το πλάτος του ημιτονοειδούς σήματος, ενώ η φάση (ή φασική γωνία), είναι η απόσταση μεταξύ της ημιτονοειδούς κορυφής του σήματος και μιας καθορισμένης αναφοράς. Η αναφορά είναι ένα σταθερό σημείο στο χρόνο (όπως για παράδειγμα, $t = 0$) [9], [10].

Θεωρώντας ένα ημιτονοειδές σήμα,

$$x(t) = X_m \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

η αναπαράσταση φασιθέτη του ημιτονοειδούς σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\varphi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos \varphi + j \sin \varphi) = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \angle \varphi = X_{rms} \angle \varphi \quad (2.2)$$



Σχήμα 2.4: Ημιτονοειδές σήμα και η αναπαράστασή του σε μορφή φασιθέτη [9].

Σημειώνεται ότι η συχνότητα του σήματος δεν δηλώνεται ρητά στην αναπαράσταση φασιθέτη. Το μέτρο του είναι η ενεργός τιμή (Root Mean Square – RMS) του ημιτονοειδούς σήματος, και η φασική γωνία του είναι η γωνία φάσης του σήματος στην ημιτονοειδή μορφή.

Όταν ο φασιθέτης ενός ημιτονοειδούς ηλεκτρικού μεγέθους (τάσης ή ρεύματος) σημαίνεται με χρονική σφραγίδα (timestamp) -συνήθως με αναφορά την Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα (Universal Coordinated Time – UTC) μέσω του Παγκόσμιου Συστήματος Εντοπισμού Θέσης (Global Positioning System – GPS), λέγεται **συγχρονισμένος φασιθέτης (synchrophasor)**. Η χρονοσήμανση επιτρέπει οι μετρήσεις από διαφορετικές τοποθεσίες του ΣΗΕ, να συγχρονίζονται και να ευθυγραμμίζονται χρονικά και στη συνέχεια να μπορούν να συνδυαστούν, ώστε να παρέχουν μια ακριβή και πλήρη εικόνα της λειτουργικής κατάστασης μιας ολόκληρης περιοχής του ΣΗΕ ή των διασυνδέσεών του.

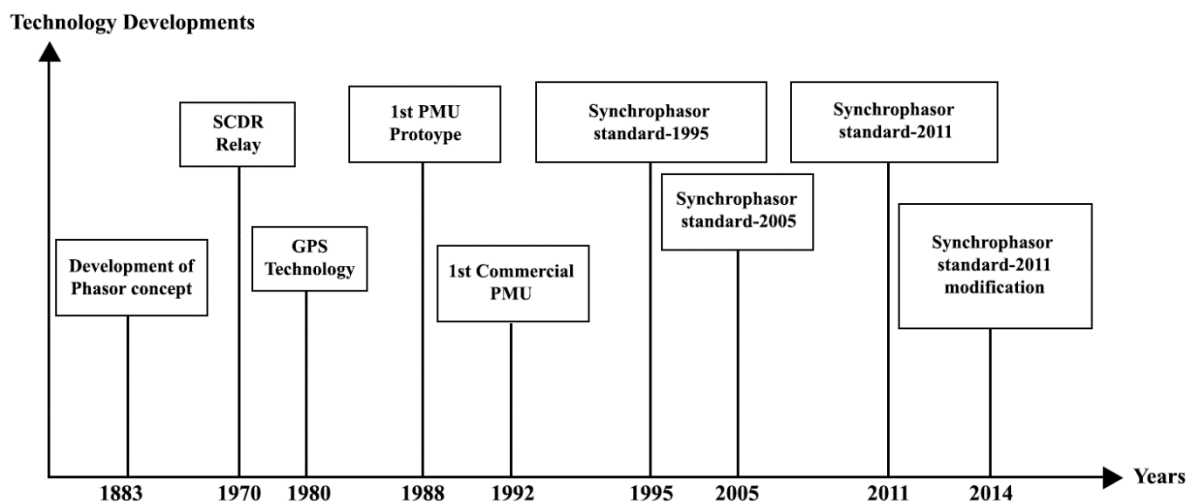
2.3 Μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU)

Η έννοια του συγχρονισμένου φασιθέτη, παρουσιάστηκε κατά τη δεκαετία του 1980, όμως το πρώτο πρότυπο συγχρονισμένων φασιθετών (IEEE 1344) δημοσιεύτηκε το 1995, με σκοπό να εισάγει τους συγχρονισμένους φασιθέτες στα ΣΗΕ και να ορίσει τις βασικές έννοιες και διαδικασίες μετρήσεων και διαχείρισης δεδομένων.

Οι **Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (Phasor Measurement Units – PMU)** είναι ηλεκτρονικές συσκευές βασισμένες σε μικροεπεξεργαστές, οι οποίες αναπτύχθηκαν ενσωματώνοντας τη μαθηματική λογική των φασιθετών, και εντάχθηκαν στην εργαλειοθήκη των ΣΗΕ, για να καλύψουν τους περιορισμούς που διέπουν τα συστήματα SCADA.

Οι πρώτες πρωτότυπες συσκευές PMU κατασκευάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1980, ενώ οι πρώτες εμπορικές συσκευές κυκλοφόρησαν στην αγορά στις αρχές του 1990. Συγκεκριμένα, η πρώτη μονάδα μέτρησης φασιθετών με τεχνολογία GPS, αναπτύχθηκε για εμπορική χρήση το 1991 από την Macrodynne, σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Virginia Tech. Τα πρότυπα IEEE 1344, IRIG-B και IEEE C37.118 περιγράφουν λεπτομερώς την τεχνολογία συγχρονισμένων φασιθετών [11].

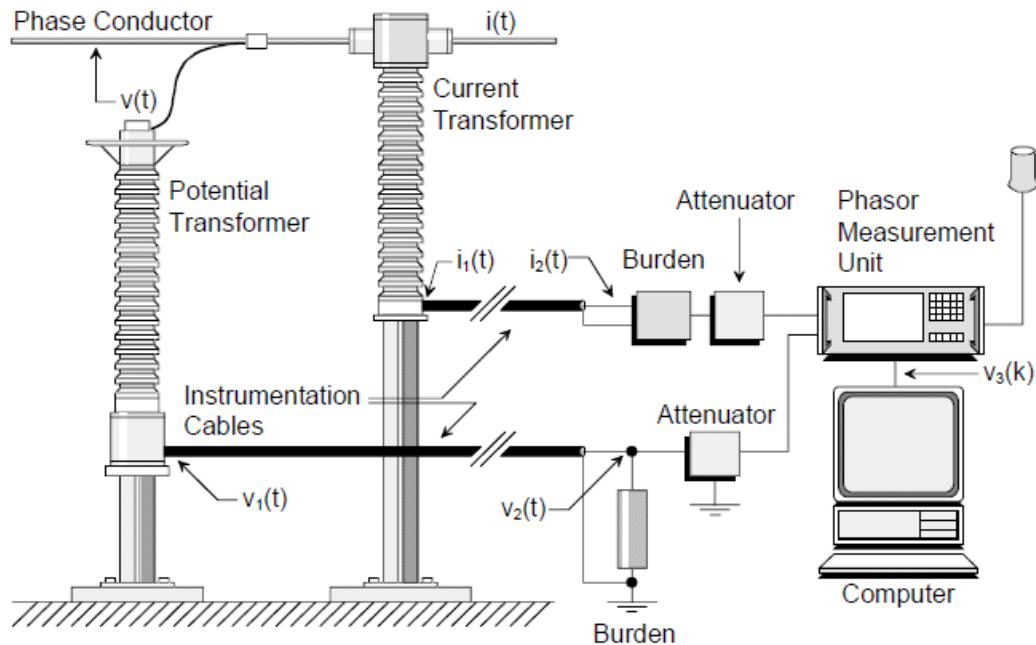
Το σχήμα 2.5 παρουσιάζει τη χρονική τεχνολογική εξέλιξη των PMU, ξεκινώντας από την ανάπτυξη της έννοιας του φασιθέτη, συνεχίζοντας με την εξέλιξη σχετικών τεχνολογιών όπως το GPS, τις πρώτες εμπορικές εφαρμογές PMU, την καθιέρωση διαφόρων προτύπων που διέπουν τη λειτουργία των PMU, από το 1995 έως και την τροποποίηση του προτύπου 2011, το 2014.



Σχήμα 2.5: Ιστορική εξέλιξη της τεχνολογίας συγχρονισμένων φασιθετών [11]

Τα PMU καταγράφουν συγχρονισμένες μέσω GPS μετρήσεις φασιθετών σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την ακριβή παρακολούθηση των φασικών γωνιών τάσης και ρεύματος σε όλο το ηλεκτρικό δίκτυο. Με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας και ρυθμούς μεταφοράς μετρητικών δεδομένων (10-120 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο), τα PMU παρέχουν λεπτομερή και ταχεία απεικόνιση/πληροφόρηση των δυναμικών μεταβολών του συστήματος, συνεισφέροντας αξιοσημείωτα στη διαχείριση της ευστάθειας, την ανίχνευση ταχέων αλλαγών και την πρόληψη διαταραχών στο δίκτυο.

Τα δεδομένα εισόδου σε μια συσκευή PMU είναι κυματομορφές τάσης και ρεύματος, συναρτήσει του χρόνου $-V(t)$ και $I(t)$ – οι οποίες μετρούνται απευθείας από μετασχηματιστές ρεύματος (Current Transformers– CT) και τάσης (Voltage Transformers – VT). [12].



Σχήμα 2.6: Τυπική διάταξη σύνδεσης μετασχηματιστών ρεύματος και τάσης με PMU [31].

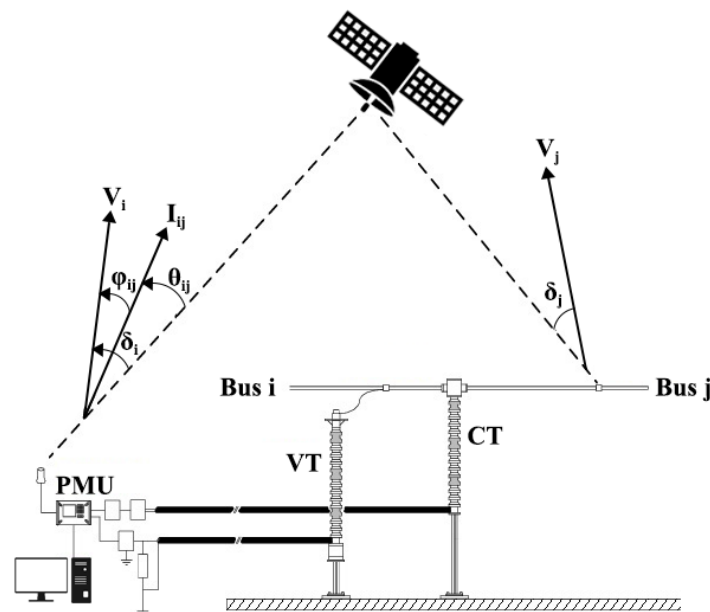
Κάθε μονάδα PMU μπορεί να μετρήσει την τάση του ζυγού στον οποίο εγκαθίσταται και μέρος ή το σύνολο των ρευμάτων γραμμών που συνδέονται με το ζυγό αυτό. Το Σχήμα 2.6 παρουσιάζει μια τυπική εγκατάσταση μονάδας PMU στο ζυγό i μιας γραμμής $i-j$ η οποία απεικονίζεται με το ισοδύναμο μοντέλο π. Οι μετρήσεις φασιθετών τάσεων και ρευμάτων υποβιβάζονται μέσω μετασχηματιστών μέτρησης και στη συνέχεια ψηφιοποιούνται.

Ανάμεσα στα αρχικά αναλογικά σήματα τάσης και ρεύματος και στα τελικά ψηφιακά σήματα που δημιουργούνται από τον A/D μετατροπέα, παρεμβάλλεται μια αλυσίδα συσκευών, η οποία είναι γνωστή ως κανάλι μέτρησης (measuring channel). Το κανάλι μέτρησης παρέχει απομόνωση από το δίκτυο υψηλής τάσης, υποβιβάζει τις τάσεις και τα ρεύματα σε επιτρεπτό επίπεδο μέτρησης και αποτελείται από μετασχηματιστές μέτρησης, καλώδια ελέγχου, εγκάρσιες αγωγιμότητες, φίλτρα και A/D μετατροπείς. Οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς είναι μετασχηματιστές τάσης (VTs) ή ρεύματος (CTs), χωρητικά συζευγμένοι μετασχηματιστές τάσης, ηλεκτροοπτικοί μετασχηματιστές τάσης και μαγνητο-οπτικοί μετασχηματιστές ρεύματος [12].

Αναφορά για τη μέτρηση της φασικής γωνίας αποτελεί το παγκόσμιο σήμα χρόνου UTC, διαθέσιμο σε οιαδήποτε γεωγραφική θέση, μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης GPS. Κάθε PMU διαθέτει κεραία GPS με την οποία λαμβάνει τις γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου στο οποίο είναι εγκατεστημένο, με τη μορφή ενός παλμού κάθε δευτερόλεπτο (1 pps (pulse per second) κατά IRIG-B). Στη συνέχεια δημιουργείται ένα σήμα αναφοράς μοναδιαίου πλάτους και φάσης συγχρονισμένης με το παλμικό σήμα 1 pps του GPS. Ακολούθως μετρούνται οι γωνίες φάσης όλων των

διανυσμάτων ως προς την αναφορά αυτή, επομένως, οι μετρήσεις των PMU, όπου και αν είναι αυτά εγκατεστημένα, έχουν την ίδια, παγκόσμια αναφορά χρόνου. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να γίνει ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από μια μεγάλη έκταση του ΣΗΕ [13].

Στο σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός συστήματος μέτρησης PMU που χρησιμοποιεί δορυφορικό συγχρονισμό GPS. Απεικονίζονται οι φασιθέτες τάσης (V_i, V_j) και ρεύματος (I_{ij}), μεταξύ των ζυγών i και j , καθώς και οι σχετικές γωνίες ($\delta_i, \delta_j, \varphi_{ij}, \theta_{ij}$). Οι μετρήσεις αυτές συλλέγονται από μετασχηματιστές τάσης (VT) και ρεύματος (CT) και αποστέλλονται στη μονάδα PMU, όπου συγχρονίζονται με τη βοήθεια GPS.

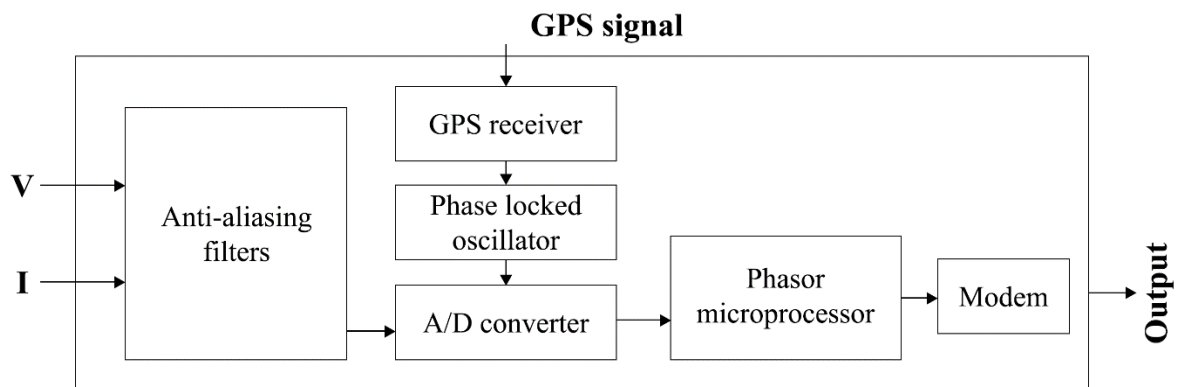


Σχήμα 2.7: Φασιθέτες τάσης και ρεύματος στο ζυγό i της γραμμής i - j που παριστάνεται με το ισοδύναμο μοντέλο π [12].

Η τεχνολογία λήψης συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών θεωρείται μία από τις σημαντικότερες τεχνολογίες μέτρησης για το μέλλον των ΣΗΕ, κυρίως λόγω της ικανότητάς της να παρέχει ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σχετικά με την κατάσταση του συστήματος, βελτιώνοντας έτσι τις τεχνικές ελέγχου και ενισχύοντας την ευστάθεια του δικτύου. Οι ραγδαία μειωμένοι χρόνοι αναφοράς μετρήσεων επιτρέπουν την ταχεία ανίχνευση σφαλμάτων και κατ' επέκταση τον αποτελεσματικό έλεγχο σε διασυνδεδεμένα δίκτυα. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία συγχρονισμένων φασιθετών διευκολύνει την ανάπτυξη των έξυπνων δικτύων παρέχοντας δεδομένα για έγκαιρη ανάλυση πρόβλεψης μελλοντικών καταστάσεων και δημιουργώντας εύφορο έδαφος για την ανάπτυξη εφαρμογών μηχανικής μάθησης.

Όπως φαίνεται παρακάτω, στο σχήμα 2.8, για τη δημιουργία χρονοσήμανσης (που αποστέλλεται μαζί με τους φασιθέτες) χρησιμοποιείται ένας ταλαντωτής κλειδωμένης φάσης (Phase-Locked Oscillator) [4]. Οι χρονοσημάνσεις προστίθενται στα αναλογικά σήματα τάσης και ρεύματος, τα οποία διέρχονται από ένα βαθυπερατό φίλτρο και έναν μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα. Στη συνέχεια, τα ψηφιακά δεδομένα

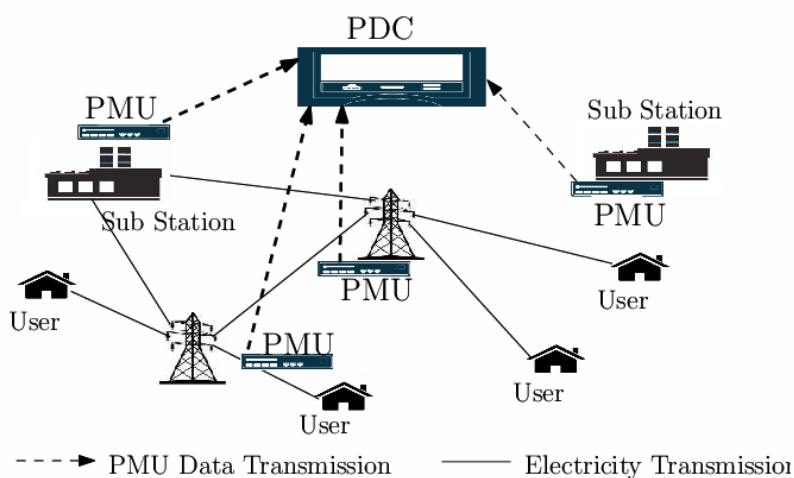
αποστέλλονται σε έναν μικροεπεξεργαστή για τον υπολογισμό των φασιθετών τάσης και ρεύματος, της συχνότητας, του ρυθμού μεταβολής συχνότητας (Rate Of Change Of Frequency – ROCOF) και δυαδικών πληροφοριών.



Σχήμα 2.8: Σχηματικό διάγραμμα μονάδας μέτρησης φασιθετών (PMU) [18].

Αυτά τα δεδομένα μεταδίδονται σε ενιαίο πλαίσιο μηνύματος ανά μέτρηση, σύμφωνα με το πρότυπο IEEE Standard C37.118 σε μονάδες συλλογής δεδομένων φασιθετών (Phasor Data Concentrator – PDC), που συνήθως βρίσκονται σε πρωτεύοντες υποσταθμούς και χρησιμοποιούνται για αρχειοθέτηση δεδομένων, παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος σε πραγματικό χρόνο ή εκτίμηση κατάστασης εκτός σύνδεσης [14], [15], [16].

Το σχήμα 2.9 παρουσιάζει σχηματικά τη σύνδεση και τη λειτουργία ενός μετρητικού συστήματος βασισμένου σε PMUs, σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο. Τα PMUs, εγκατεστημένα σε υποσταθμούς, συλλέγουν δεδομένα από το ηλεκτρικό σύστημα και μεταδίδουν τις μετρήσεις φασιθετών (PMU Data Transmission) σε ένα PDC. Το PDC συγκεντρώνει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, ενώ ταυτόχρονα, το δίκτυο παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στους τελικούς χρήστες μέσω των γραμμών μεταφοράς (Electricity Transmission).



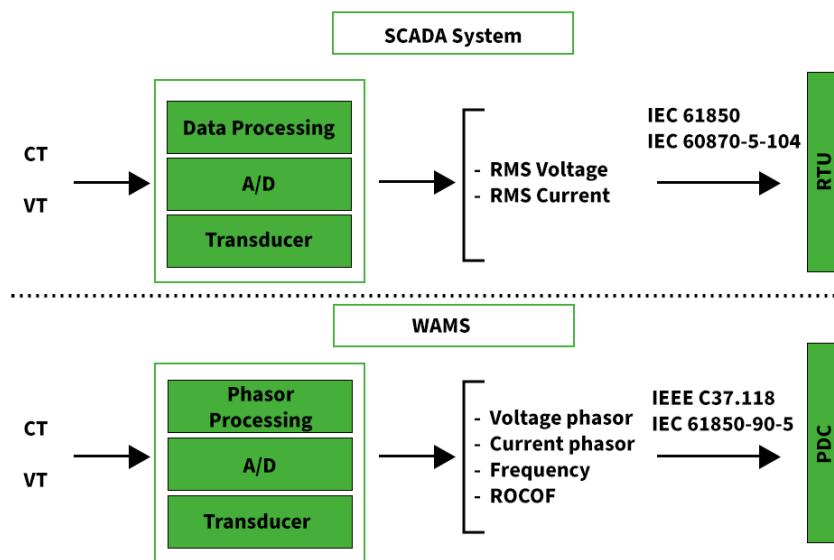
Σχήμα 2.9: Βασικά δομικά στοιχεία του συστήματος WAMS [17].

2.4 Σύστημα WAMS

Το σύνολο των εφαρμογών παρακολούθησης πραγματικού χρόνου, που βασίζεται στην τεχνολογία μονάδων μέτρησης φασιθετών, αναφέρεται ως **σύστημα παρακολούθησης ευρείας περιοχής (Wide Area Monitoring System – WAMS)**. Ενώ το σύστημα SCADA –χρησιμοποιούμενο ευρέως μέχρι σήμερα, ως μέσο παρακολούθησης της κατάστασης των ΣΗΕ– παρέχει μόνο μια στατική εικόνα ενός δυναμικά μεταβαλλόμενου συστήματος, τα συστήματα WAMS έχουν αναδειχθεί σε μια σημαντική τεχνολογική επιλογή για τη βελτίωση της παρατηρησιμότητας και της επίγνωσης της κατάστασης (situational awareness) τόσο για τα σημερινά όσο και για τα μελλοντικά ηλεκτρικά δίκτυα.

Η τεχνολογία συγχρονισμένων φασιθετών και οι μονάδες PMU είναι ο πυρήνας των συστημάτων WAMS, επιτρέποντας τη μέτρηση των μεταβλητών κατάστασης του ΣΗΕ σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα SCADA. Οι μετρήσεις WAMS είναι πιο ακριβείς και πιο γρήγορες από τις αντίστοιχες του SCADA, επιτρέποντας πιο άμεση και ακριβή πληροφόρηση για την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, παρέχοντας στους χειριστές τη δυνατότητα να εφαρμόσουν προληπτικά μέτρα και δίνοντάς τους χρόνο να δράσουν μέσω της έγκαιρης πρόβλεψης πιθανών καταστάσεων κινδύνου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.10, τα δεδομένα εισόδου τόσο για το σύστημα SCADA, όσο και για το WAMS αποτελούνται από αναλογικά ρεύματα και τάσεις, που προέρχονται από μετασχηματιστές ρεύματος (CT) και μετασχηματιστές τάσης (VT). Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, στα συστήματα SCADA, τα δεδομένα εισόδου, μετά την επεξεργασία, αποστέλλονται σε ένα RTU ως RMS τάσεις και ρεύματα, σε ψηφιακή μορφή. Το RTU διασυνδέει τις συσκευές του ΣΗΕ με ένα εποπτικό σύστημα, π.χ. ένα κατανεμημένο σύστημα ελέγχου ή το σύστημα SCADA, μεταφέροντας δεδομένα στο σύστημα και χρησιμοποιώντας μηνύματα που αποστέλλονται από το εποπτικό σύστημα για έλεγχο των συνδεδεμένων συσκευών. Η επικοινωνία μεταξύ ενός RTU και του συστήματος ελέγχου SCADA βασίζεται στα πρότυπα IEC 61850 και IEC 60870-5-104 [19].

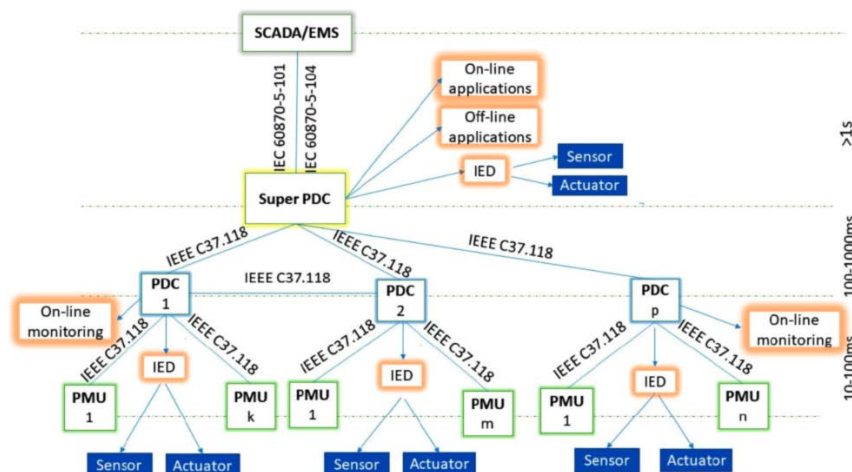


Σχήμα 2.10: Ανάκτηση μετρητικών δεδομένων στα συστήματα SCADA και WAMS [18].

Αντίθετα, τα συστήματα WAMS περιλαμβάνουν μετρήσεις PMU, κέντρα συλλογής δεδομένων PDC, super PDC (περιφερειακά PDC) και κανάλια επικοινωνίας μεταξύ τους. Τα δεδομένα εξόδου ενός PMU αποτελούνται από μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε μορφή φασιθέτη, συχνότητας και ROCOF. Αυτά τα δεδομένα αποστέλλονται σε ένα τοπικό PDC βάσει των προτύπων IEEE C37.118.2 ή IEC 61850-90-5 [18][19]. Οι μονάδες PDC κατά κανόνα τοποθετούνται σε κύριους υποσταθμούς, όπου διενεργείται η συλλογή και διαχείριση των δεδομένων PMU, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται η αμφίδρομη επικοινωνία με άλλα PMU, στον ίδιο ή σε παρακείμενους υποσταθμούς [18][20]. Μερικές από τις κρίσιμες λειτουργίες ενός PDC είναι η λήψη και η επικύρωση δεδομένων PMU (PMU data validation) από το πεδίο, η αποστολή των συγχρονισμένων μετρήσεων σε super PDC ή άλλα τοπικά PDC, καθώς και η αποθήκευση δεδομένων για μελλοντική ανάλυση συμβάντων, ανάλογα με τη δομή του εκάστοτε συστήματος WAMS [18][21].

Η λειτουργία των PDC, η επικοινωνία με τα PMU και με άλλα PDC, καθώς και οι χρόνοι απόκρισης, καθορίζονται βάσει διεθνών προτύπων. Τα PDC λειτουργούν με εξαιρετικά χαμηλή χρονική καθυστέρηση, της τάξης των 10 – 100 ms, ενώ έχουν δυνατότητες για αρχειοθέτηση δεδομένων (offline ή online). Μέσω έξυπνων ηλεκτρονικών συσκευών (IED), όπως είναι οι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι προστασίας, και απλά ηλεκτρικά στοιχεία, όπως διακόπτες και πυκνωτές, τα PDC (ή τα super PDC) παίζουν καθοριστικό ρόλο στον έλεγχο και την προστασία του δικτύου, σε επίπεδο διανομής ή μεταφοράς, απαλείφοντας την ανάγκη για αποστολή όλων των δεδομένων απευθείας σε ένα κεντρικό σύστημα (στο σύστημα SCADA ή στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας (Energy Management System – EMS)), εξοικονομώντας χρόνο και τηλεπικοινωνιακούς πόρους.

Το σχήμα 2.11 δείχνει την ιεραρχία ενός συστήματος WAMS και τη σύνδεσή του με το SCADA και το EMS. Στο χαμηλότερο επίπεδο, τα PMUs συλλέγουν δεδομένα τα οποία στέλνουν στα PDCs μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας IEEE C37.118. Τα PDCs συγκεντρώνουν πληροφορίες από πολλαπλά PMUs. Το κεντρικό, Super PDC συγκεντρώνει τα δεδομένα από όλα τα PDCs, υποστηρίζοντας online και offline εφαρμογές, επικοινωνώντας με το σύστημα SCADA και το κεντρικό σύστημα διαχείρισης EMS, μέσω των πρωτοκόλλων IEC 60870.



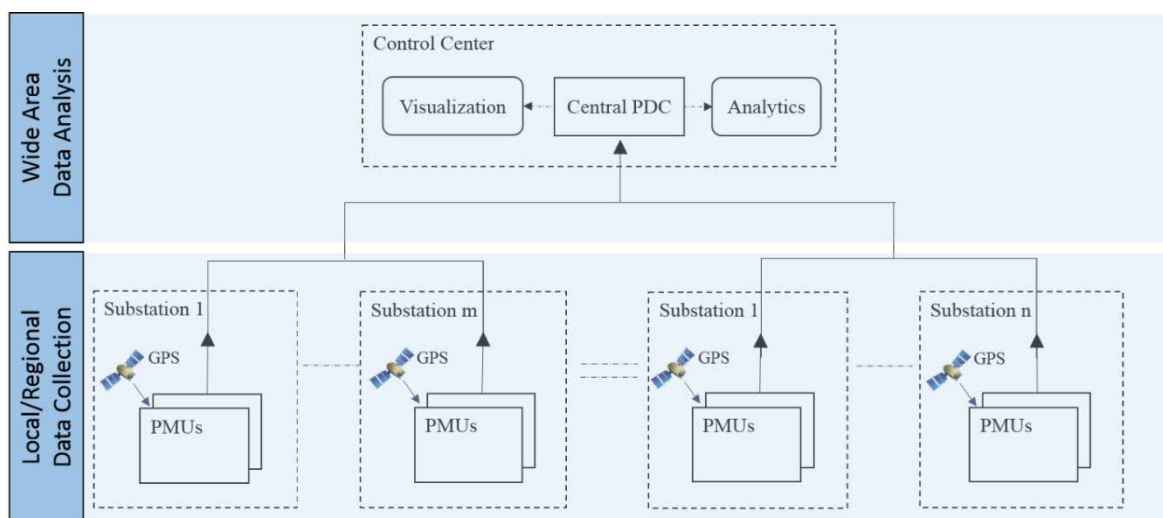
Σχήμα 2.11: Τυπική αρχιτεκτονική συστήματος WAMS [17].

Τα συστήματα WAMS, συμβάλλουν στην αύξηση της αξιοπιστίας του ΣΗΕ, με τη δυνατότητα διεξαγωγής δυναμικής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, τον υπολογισμό περιθωρίων ασφαλείας, τη διευκόλυνση της πρώιμης ανίχνευσης σφαλμάτων ή ενδεχόμενων κινδύνων και παρακολούθησης της ασφάλειας του συστήματος, την πρόβλεψη καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και την έναρξη ενεργειών αποκατάστασης για την αποφυγή αστάθειας. Είναι επίσης χρήσιμα για την εκ των υστέρων ανάλυση διαταραχών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι μονάδες PMU και PDC αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του συστήματος WAMS. Τα PDC ουσιαστικά λειτουργούν ως κόμβοι σε ένα δίκτυο επικοινωνίας, όπου τα δεδομένα φασιθετών από έναν αριθμό PMU (ή/και άλλα PDC) συγκεντρώνονται, ευθυγραμμίζονται χρονικά και αποστέλλονται ως μία ενιαία ροή δεδομένων (data stream) προς τα ανώτερα επίπεδα PDC ή προς κάποια κεντρική ή περιφερειακή εφαρμογή ελέγχου.

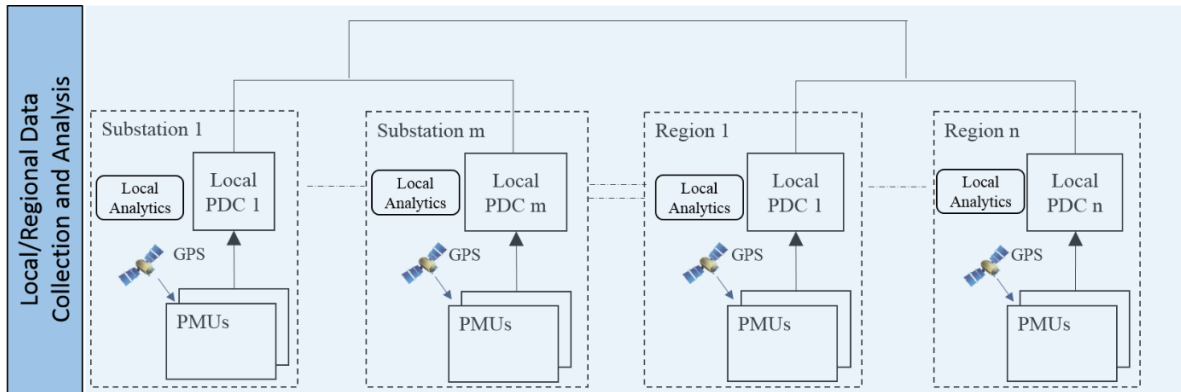
Με την αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων PMU στα σύγχρονα ΣΗΕ, προκύπτει η ανάγκη για μια αποδοτική αρχιτεκτονική συγκέντρωσης και διαχείρισης δεδομένων για την αποτελεσματικότερη αξιοποίησή τους. Οι αρχιτεκτονικές των WAMS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε Κεντριοποιημένες (Centralized), Κατανεμημένες (Distributed) και Αποκεντρωμένες (Decentralized) αρχιτεκτονικές. Οι παράγοντες διάκρισης ανάμεσα στους τρεις τύπους αρχιτεκτονικής είναι η ροή πληροφορίας ή δεδομένων μεταξύ της τοποθεσίας συλλογής δεδομένων, της τοποθεσίας λήψης αποφάσεων και της τοποθεσίας εκτέλεσης δράσεων με βάση την απόφαση [21].

- 1) *Κεντριοποιημένη Αρχιτεκτονική WAMS*: Στην κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική WAMS, η συλλογή δεδομένων από τα PMU, η ανάλυση δεδομένων και η εκτέλεση διορθωτικών ενεργειών πραγματοποιούνται σε μία, κεντρική τοποθεσία. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12, τα PMUs από διάφορους υποσταθμούς του ΣΗΕ, στέλνουν δεδομένα φασιθετών στο κεντρικό PDC, όπου συγκεντρώνονται και συγχρονίζονται. Τα συγκεντρωμένα δεδομένα χρησιμοποιούνται για αναλύσεις και απεικονίσεις, ενώ διορθωτικές ενέργειες που ενδεχομένως προκύψουν από την ανάλυση, αποστέλλονται προς εκτέλεση.



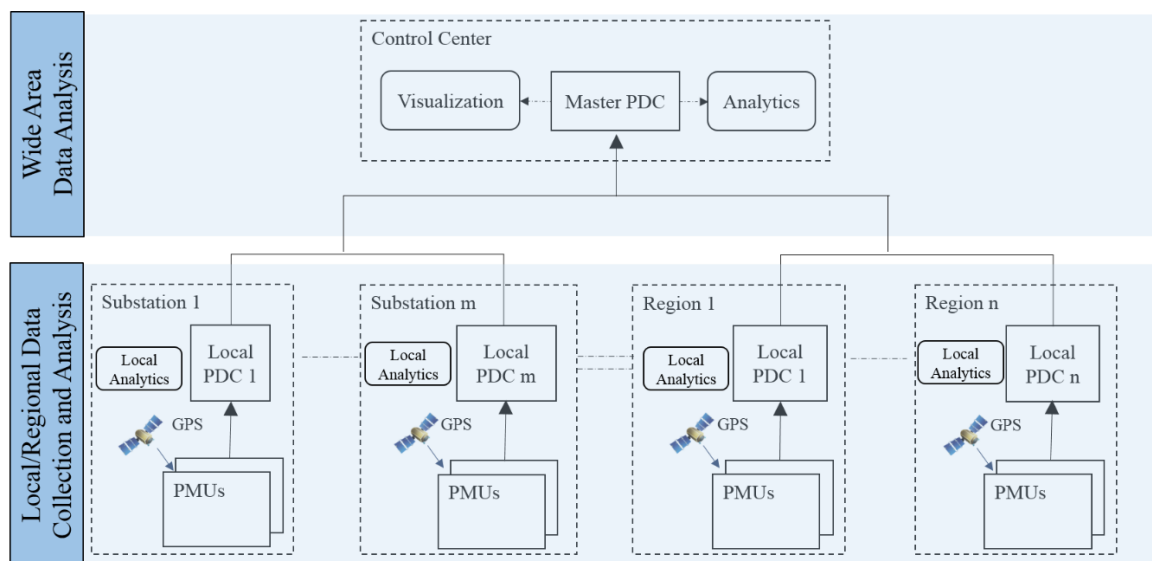
Σχήμα 2.12: Κεντριοποιημένη Αρχιτεκτονική WAMS [21].

- 2) *Αποκεντρωμένη Αρχιτεκτονική WAMS*: Στην αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική WAMS, μια ευρεία περιοχή χωρίζεται σε πολλές μικρές. Τοπικά εγκατεστημένα PDC ελέγχουν τις επιμέρους περιοχές, βάσει των δεδομένων που τις αφορούν. Οι τοπικοί ελεγκτές συνδέονται μεταξύ τους για εποπτικό έλεγχο και της μεγαλύτερης περιοχής. Αν και τα τοπικά συστήματα PDC μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα για την παρακολούθηση μιας ευρύτερης περιοχής, ο τρόπος αυτός δεν είναι πάντα αποδοτικός. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά η Αποκεντρωμένη Αρχιτεκτονική, στο σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13: Αποκεντρωμένη Αρχιτεκτονική WAMS [21].

- 3) *Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική WAMS*: Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική WAMS είναι μία μέση λύση, μεταξύ κεντροποιημένης και αποκεντρωμένης αρχιτεκτονικής. Περιλαμβάνει τόσο τοπικούς, όσο και κεντρικούς ελεγκτές και μπορεί να γίνει αντιληπτή ως ένα σύστημα κεντρικού ελέγχου, με αποκεντρωμένα στάδια εκτέλεσης. Τα τοπικά PMU σε μια περιοχή, όπως ένας υποσταθμός, στέλνουν δεδομένα φασιθετών στο αντίστοιχο τοπικό PDC, ενώ τα τοπικά PDCs συνδέονται με τον κεντρικό SPDC για κεντρικό έλεγχο.



Σχήμα 2.14: Κατανεμημένη αρχιτεκτονική WAMS [21]

Ανεξάρτητα από την αρχιτεκτονική WAMS που χρησιμοποιείται, τα PMU συνεισφέρουν στη βελτίωση της ακρίβειας και της αποδοτικότητας των αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης, και ανίχνευσης, εντοπισμού και απαλοιφής εσφαλμένων μετρήσεων (bad data) [21].

Τα συστήματα WAMS βελτιώνουν τη λειτουργία των συστημάτων εποπτείας και ελέγχου των ΣΗΕ σε πολλά επίπεδα. Τα δεδομένα PMU παρέχουν βελτιωμένη δυνατότητα παρατήρησης των συνθηκών του δικτύου και, ως εκ τούτου, θα μπορούν να παρέχουν προειδοποιήσεις νωρίτερα από ό,τι τα δεδομένα SCADA.

3 Κέντρα ελέγχου ενέργειας

Το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΚΕΕ) είναι ένα από τα πιο νευραλγικά και κρίσιμα λειτουργικά σημεία ενός ΣΗΕ. Αν παρομοιάζαμε το ΣΗΕ με έναν έμβιο οργανισμό, το ΚΕΕ, θα μπορούσε να παρομοιαστεί, ως προς τον ρόλο του, με το κεντρικό νευρικό σύστημα ενός ΣΗΕ. Τα ΚΕΕ είναι σταθμοί διαχείρισης, εποπτείας και ελέγχου της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλα συστήματα ισχύος. Αξιοποιώντας συστήματα συλλογής δεδομένων, όπως τα συστήματα SCADA και WAMS, που αναλύθηκαν προηγουμένως, και αλγοριθμικές τεχνικές, διαδικασίες και εφαρμογές, που αναλύονται σε επόμενα Κεφάλαια, συμβάλλουν σημαντικά στην ευστάθεια, την αξιοπιστία και τη συνολική αποτελεσματική και οικονομική λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων. Με την αυξανόμενη κοινωνικοοικονομική εξάρτηση από την ηλεκτρική ενέργεια και τις συνεχώς αυξανόμενες τεχνικές απαιτήσεις, η ύπαρξη των ΚΕΕ είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την αποφυγή συχνών βλαβών, προβλημάτων στην ομαλή λειτουργία και διακοπών ρεύματος, που θα μπορούσαν να παραλύσουν τις περισσότερες κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες.

Τα ΚΕΕ ως έννοια εμφανίστηκαν τον 20^ο αιώνα, καθώς η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας αναπτυσσόταν ραγδαία και η ανάγκη για κεντρική εποπτεία και έλεγχο των συστημάτων ισχύος γινόταν όλο και πιο σημαντική. Αρχικά, τα κέντρα ελέγχου της εποχής ήταν σχετικά απλά και επικεντρωμένα σε λειτουργίες όπως ο προγραμματισμός παραγωγής και η εξισορρόπηση φορτίου. Αφορμή για την ανάπτυξη των ΚΕΕ αποτέλεσε το blackout των βορειοανατολικών ΗΠΑ, το 1965. Η ουσιαστική αιτία, ωστόσο, για την ανάπτυξή τους, ήταν η αύξηση της πολυπλοκότητας των ΣΗΕ και κατά συνέπεια, η ανάγκη για άμεση εποπτεία, πρόληψη κρίσεων και εν γένει καλύτερη διαχείριση των ΣΗΕ. Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των πρώτων συμβατικών ΚΕΕ είναι τα παρακάτω [22]:

- **Αναλογική μέτρηση και καταγραφή των βασικών μεγεθών:** Οι μετρήσεις σημαντικών ποσοτήτων γίνονταν με αναλογικά όργανα και καταγράφονταν σε ειδικές ταινίες καταγραφής από χαρτί, που παρουσίαζαν τα δεδομένα με γραφικό τρόπο. Η ακρίβεια ήταν περιορισμένη και η πληροφορία δεν ήταν σε πραγματικό χρόνο.
- **Αναλογικός έλεγχος παραγωγής:** Οι γεννήτριες ελέγχονταν μέσω αναλογικών κυκλωμάτων, παρέχοντας μικρή ευελιξία και ακρίβεια στον έλεγχο της παραγωγής ενέργειας.
- **Λειτουργία υποσταθμών με ανθρώπινο δυναμικό:** Οι περισσότεροι υποσταθμοί χρειάζονταν προσωπικό για τη λειτουργία τους, καθώς δεν υπήρχε δυνατότητα αυτομακρυσμένου ελέγχου.
- **Κέντρο εποπτικού ελέγχου σε κεντρικό σημείο ή υποσταθμό:** Ελλείπει συγκεντρωτικού ελέγχου, κάποιοι υποσταθμοί λειτουργούσαν ως κέντρα εποπτείας του δικτύου.
- **Ανάλυση ασφαλείας σε εποχιακή βάση:** Η ανάλυση ασφαλείας του συστήματος γινόταν περιοδικά – εποχιακά, και όχι συνεχώς, κάτι που άφηνε περιθώρια για λάθη ή ελλείψεις [22].

Καθώς τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας επεκτάθηκαν και τεχνολογικά, ο ρόλος και ταυτόχρονα η πολυπλοκότητα των ΚΕΕ αναπτύχθηκαν σημαντικά. Η ενσωμάτωση

υπολογιστικών συστημάτων και προηγμένων δικτύων επικοινωνίας επέτρεψε πιο εξελιγμένες δυνατότητες συγκέντρωσης και ανάλυσης δεδομένων και λήψης αποφάσεων.

Η έλευση της ψηφιακής εποχής και μετέπειτα η ανάπτυξη των ΑΠΕ έχουν μετασχηματίσει περαιτέρω το τοπίο των ΚΕΕ. Προκλήσεις όπως η συνεχής ενσωμάτωση στο ΣΗΕ καταναεμημένων ενεργειακών πόρων, η διαχείριση ζήτησης και η ανάγκη για ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη σύνθετων λειτουργιών στα ΚΕΕ. Η απορρύθμιση (deregulation) και η αναδιάρθρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες, κατά τα τέλη του 20ού και τις αρχές του 21ου αιώνα, αύξησαν περισσότερο την πολυπλοκότητα των συστημάτων ισχύος, απαιτώντας από τα ΚΕΕ την ανάλογη προσαρμογή, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις νέες συνθήκες της αγοράς, στους νέους τρόπους παραγωγής και στις στρατηγικές διαχείρισης ζήτησης.

3.1 Ρόλος και λειτουργίες των ΚΕΕ

Τα σημερινά κέντρα ελέγχου είναι τεχνολογικά πολύ πιο εξελιγμένα, αποτελώντας κομβικό σημείο για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και την πρόβλεψη της λειτουργίας των ΣΗΕ. Χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο συγκεντρωτισμό σε σχέση με το παρελθόν, κεντριοποιημένο έλεγχο του συστήματος, αλλά και ευρεία χρήση ψηφιακών δεδομένων και τακτικών ανάλυσης ασφάλειας, online ή offline [23].

Οι λειτουργίες των σύγχρονων ΚΕΕ κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές ομάδες, οι οποίες σχετίζονται με τη διαχείριση διαφορετικών πτυχών της λειτουργίας του δικτύου. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει σημαντικές υπολειτουργίες που συμβάλλουν στη βέλτιστη λειτουργία, την παρακολούθηση, και τον έλεγχο του συστήματος.

3.1.1 Λειτουργίες ενέργειας και οικονομίας

Αυτή η κατηγορία επικεντρώνεται στη βέλτιστη διαχείριση της παραγωγής, της κατανάλωσης ενέργειας και του ισοζυγίου τους, με στόχο τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και τη μείωση του κόστους λειτουργίας. Ορισμένες βασικές διαδικασίες που εντάσσονται στην κατηγορία αυτή είναι οι εξής:

1. *Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Φορτίων*: Χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα, τάσεις κατανάλωσης και μετεωρολογικά δεδομένα, τα ΚΕΕ έχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για τις επόμενες ώρες ή ημέρες. Η πρόβλεψη φορτίων βοηθά στην κατάλληλη προετοιμασία μονάδων παραγωγής, ώστε να καλύψουν τη ζήτηση, αποφεύγοντας την υπερφόρτωση ή την έλλειψη ενέργειας.
2. *Βραχυπρόθεσμη Ένταξη Μονάδων*: Η βραχυπρόθεσμη ένταξη αφορά τον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής που θα τεθούν σε λειτουργία σε κάθε χρονική στιγμή, για να καλύψουν τις προβλεπόμενες ανάγκες. Αυτή η διαδικασία εξισορροπεί την παραγωγή ενέργειας με το μικρότερο δυνατό κόστος, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η διαθεσιμότητα των μονάδων παραγωγής, η απόδοση και το κόστος καυσίμων.
3. *Βέλτιστη Κατανομή Φορτίου*: Η βέλτιστη κατανομή φορτίου είναι μια λειτουργία που διασφαλίζει ότι η παραγωγή κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ των μονάδων παραγωγής, σύμφωνα με το κόστος και την απόδοση κάθε μονάδας. Οι αλγόριθμοι βέλτιστης κατανομής φορτίου που χρησιμοποιούνται, προσπαθούν να

μεγιστοποιήσουν την απόδοση του συστήματος, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες ενέργειας και διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα του δικτύου.

4. *Αυτόματος Έλεγχος Παραγωγής*: Ο αυτόματος έλεγχος παραγωγής είναι ένα σύστημα που επιτρέπει τη συνεχή ρύθμιση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό τη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, σε πραγματικό χρόνο. Αυτό γίνεται μέσω της αυτόματης προσαρμογής της ισχύος που παράγεται από τις γεννήτριες, ανάλογα με τις αλλαγές στη ζήτηση και την συνολική κατάσταση του δικτύου [23] [24] [25].

3.1.2 Λειτουργίες συγκέντρωσης και επεξεργασίας δεδομένων

Αυτή η ομάδα λειτουργιών επικεντρώνεται στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από διάφορα τμήματα του δικτύου, με σκοπό τη δημιουργία μιας πλήρους εικόνας για την κατάσταση του συστήματος και την παροχή των κατάλληλων πληροφοριών με σκοπό τη λήψη αποφάσεων [26] [27].

1. *Συγκέντρωση Πληροφοριών*: Τα ΚΕΕ συλλέγουν δεδομένα από διάφορα σημεία του δικτύου, μέσω αισθητήρων και μετρητικών οργάνων, τοποθετημένων σε υποσταθμούς και μονάδες παραγωγής. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για την τάση, το ρεύμα, τη συχνότητα, την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο.
2. *Εκτίμηση Παραμέτρων Δικτύου*: Η εκτίμηση παραμέτρων δικτύου περιλαμβάνει τον υπολογισμό διαφόρων βασικών παραμέτρων του δικτύου, όπως αυτές των γραμμών μεταφοράς, των μετασχηματιστών με μεσαία λήψη και των εγκάρσιων πυκνωτών. Επίσης, ανιχνεύει δομικά σφάλματα στο σύστημα και εντοπίζει τυχόν μη έγκυρες καταστάσεις αποζηυκτών.
3. *Τοπολογία Δικτύου*: Η τοπολογία δικτύου αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα στοιχεία του δικτύου (γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, υποσταθμοί) συνδέονται μεταξύ τους. Η παρακολούθηση της τοπολογίας είναι κρίσιμη για την επίλυση του προβλήματος ροής φορτίου και τον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης στο σύστημα.
4. *Εκτίμηση Κατάστασης*: Με χρήση αλγορίθμων για την αξιολόγηση της πραγματικής κατάστασης του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρήσεις από όλο το δίκτυο, η εκτίμηση κατάστασης επιτρέπει την παρακολούθηση της λειτουργίας του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.
5. *Απεικόνιση Πληροφοριών*: Η απεικόνιση πληροφοριών περιλαμβάνει την παρουσίαση των δεδομένων που συλλέγονται από το σύστημα σε κατανοητή μορφή για τους χειριστές του ΚΕΕ. Αυτό γίνεται μέσω οθονών ελέγχου, διαγραμμάτων και χαρτών που δείχνουν την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, τη ροή ισχύος, τα φορτία και τις τάσεις στις διάφορες περιοχές του δικτύου.
6. *Ισοδύναμα Εξωτερικά Δίκτυα*: Τα ισοδύναμα εξωτερικά δίκτυα είναι μοντέλα που προσομοιώνουν την επίδραση των γειτονικών ΣΗΕ στο τοπικό δίκτυο. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν τη ροή ισχύος και την αλληλεπίδραση με διαχειριστές άλλων χωρών [26] [27].

3.1.3 Λειτουργίες εποπτείας ασφαλείας και ελέγχου

Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει λειτουργίες που αφορούν την ασφάλεια και την ευστάθεια του δικτύου, καθώς και την επίβλεψη και διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

1. *Εποπτεία Ασφάλειας*: Η εποπτεία ασφαλείας περιλαμβάνει τη συνεχή παρακολούθηση του συστήματος για να εντοπιστούν πιθανά προβλήματα ή σφάλματα που μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθεια του δικτύου. Η λειτουργία αυτή είναι κρίσιμη για την πρόληψη κρίσεων και την άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων.
2. *Ανάλυση Ενδεχομένων Διαταραχών*: Εκτελεί ανάλυση των πιθανών επιπτώσεων που μπορεί να έχουν διάφορα σενάρια βλαβών ή διαταραχών στο δίκτυο. Η ανάλυση περιλαμβάνει τον εντοπισμό των πιο κρίσιμων τμημάτων του δικτύου και την προετοιμασία για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων.
3. *Προληπτικός Έλεγχος*: Ο προληπτικός έλεγχος επιτρέπει στους χειριστές να λαμβάνουν μέτρα προτού μια βλάβη γίνει κρίσιμη. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την αλλαγή στην κατανομή φορτίου ή την ενεργοποίηση εφεδρικών μονάδων παραγωγής.
4. *Έλεγχος Ανάγκης (Emergency Control)*: Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, όπως μια απότομη πτώση τάσης ή βλάβη σε γραμμές μεταφοράς, ο έλεγχος ανάγκης ενεργοποιεί αυτόματα συστήματα που διασφαλίζουν την αποφυγή ευρύτερων διακοπών παροχής ενέργειας και την κατά το δυνατόν πιο άμεση επαναφορά του ΣΗΕ σε ασφαλή λειτουργική κατάσταση.
5. *Έλεγχος Επαναφοράς (Restoration Control)*: Μετά από μια βλάβη ή blackout, η λειτουργία ελέγχου επαναφοράς είναι υπεύθυνη για την ασφαλή επαναφορά του συστήματος στην κανονική λειτουργία. Αυτό περιλαμβάνει τον συγχρονισμό των μονάδων παραγωγής και τη σταδιακή αποκατάσταση του φορτίου.
6. *Κατανομή Αέργων Ισχύος*: Αφορά τον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος στο δίκτυο, η οποία είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της τάσης στα επιθυμητά επίπεδα και την ευστάθεια του συστήματος [26] [27].

3.2 Δομή και επιμέρους υποσυστήματα των ΚΕΕ

Τα ΚΕΕ αποτελούνται από επιμέρους υποσυστήματα που συνεργαζόμενα έχουν τη δυνατότητα να υλοποιήσουν τις βασικές λειτουργίες του. Εν συντομία, αυτά περιλαμβάνουν:

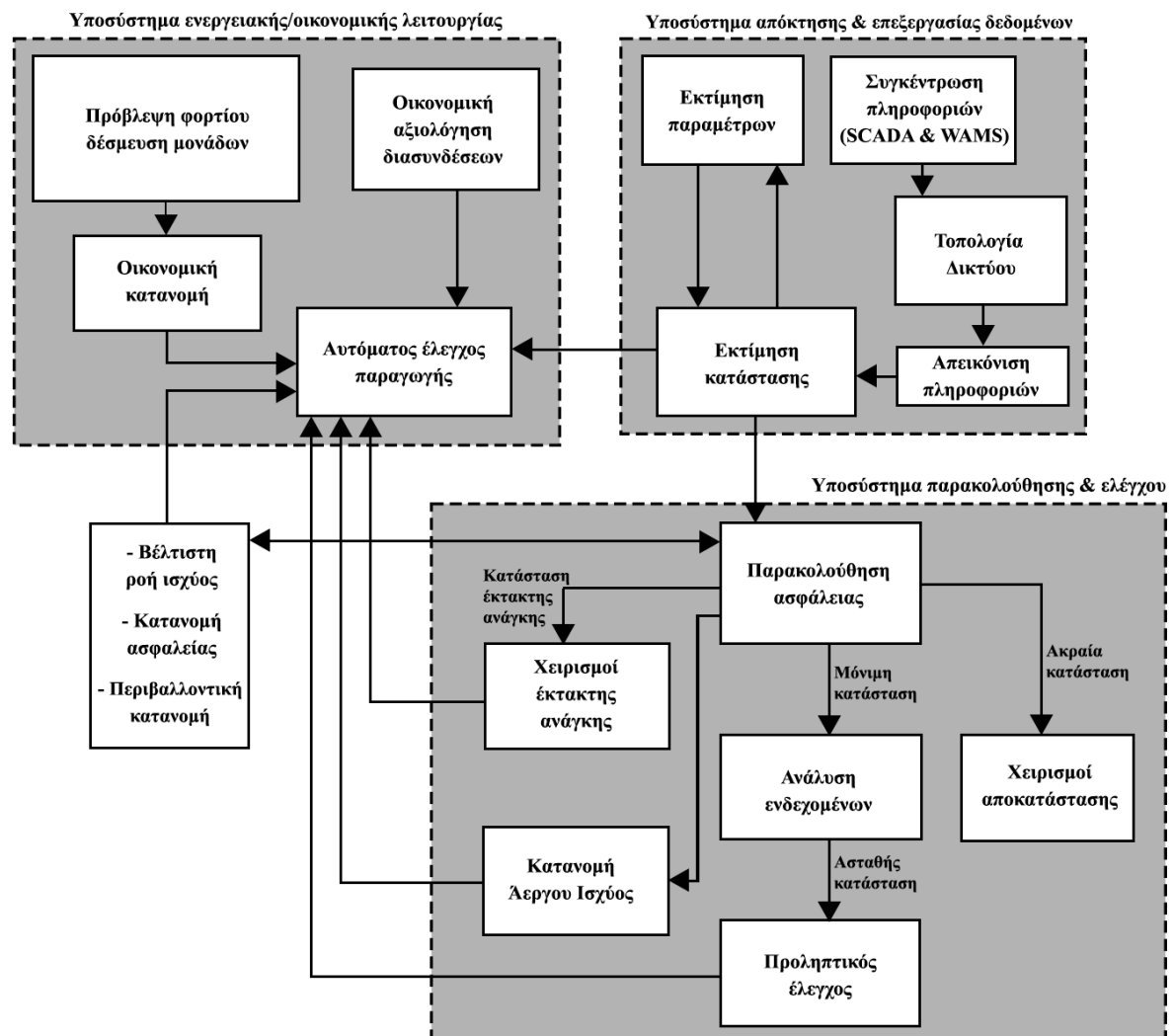
- το Υποσύστημα Συγκέντρωσης Πληροφοριών και Ελέγχου,
- το Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS),
- τις υποδομές τηλεπικοινωνιών,
- προηγμένα εργαλεία ανάλυσης και οπτικοποίησης.

Το *Υποσύστημα Συγκέντρωσης Πληροφοριών και Ελέγχου*, σε συμβατικά συστήματα, βασίζεται αποκλειστικά σε μετρήσεις που προέρχονται από το σύστημα SCADA. Σε δίκτυα που υπάρχουν εγκατεστημένες μονάδες PMU, η συλλογή δεδομένων γίνεται με υβριδικό τρόπο, τόσο από μετρήσεις SCADA, όσο και μετρήσεις PMU, με τα δύο συστήματα (SCADA, WAMS) να λειτουργούν παράλληλα. Το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων από διάφορα σημεία του ΣΗΕ, όπως σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς και γραμμές μεταφοράς. Περιλαμβάνει την απαραίτητη υποδομή (μονάδες ζεύξης επικοινωνίας, προσαρμογείς καναλιών, κωδικοποιητές) για

τη μετάδοση των δεδομένων από τα διασπαρμένα στο δίκτυο σημεία συλλογής, μέχρι την βάση δεδομένων στο ΚΕΕ [1] [28] [29].

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται σχηματικά η οργάνωση των βασικών υποσυστημάτων ενός κέντρου ελέγχου ενέργειας. Διακρίνονται:

- το υποσύστημα ενεργειακής/οικονομικής λειτουργίας που, συνοπτικά, περιλαμβάνει την πρόβλεψη φορτίου, την οικονομική κατανομή και τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής
- το υποσύστημα απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων που εστιάζει στη συγκέντρωση δεδομένων από τα συστήματα SCADA/WAMS, στην τοπολογία δικτύου και στην εκτίμηση κατάστασης.
- Το υποσύστημα παρακολούθησης και ελέγχου που διαχειρίζεται την ασφάλεια, τυχόν έκτακτες ανάγκες και την αποκατάσταση μέσω ανάλυσης ενδεχομένων και προληπτικού ελέγχου.

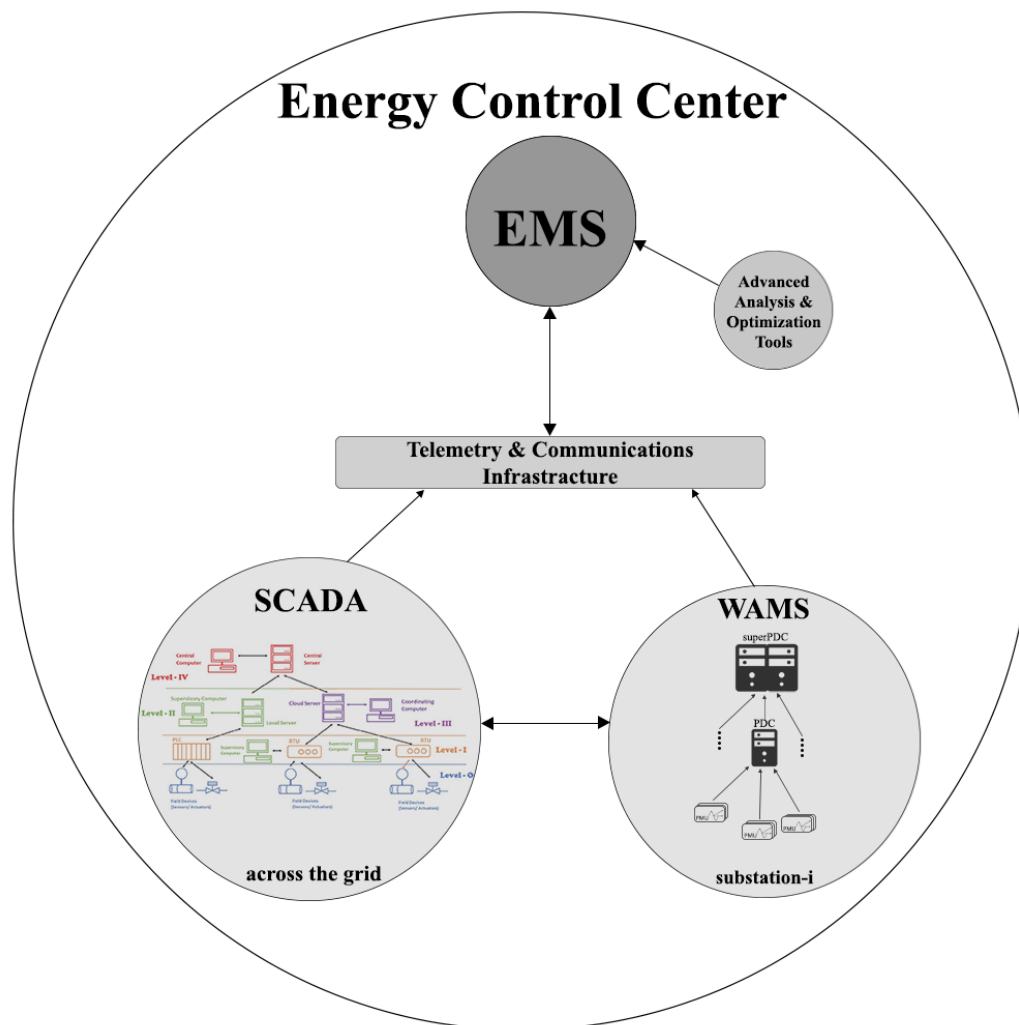


Σχήμα 3.1: Διάγραμμα βασικών λειτουργιών των κέντρων ελέγχου ενέργειας.

Το σύστημα EMS είναι ένα σύνολο εφαρμογών, λογισμικού και αλγοριθμικών τεχνικών, που επικοινωνεί με το σύστημα συλλογής δεδομένων και χρησιμοποιώντας

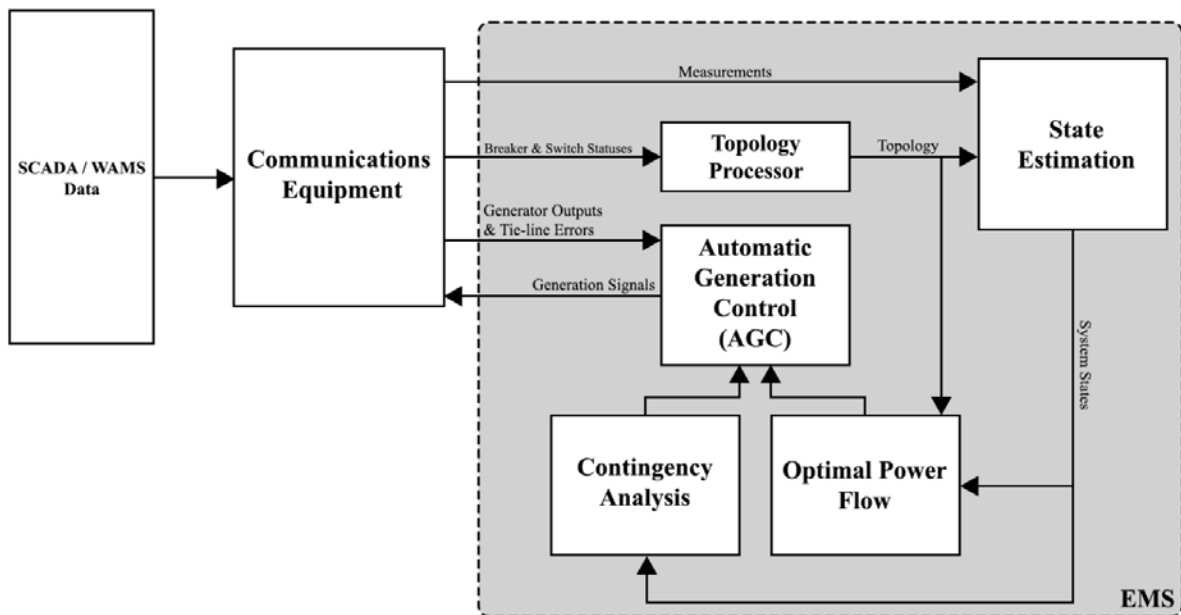
αποδοτικούς αλγόριθμους και τεχνικές βελτιστοποίησης, αναλύει τα συλλεγμένα δεδομένα, προβλέπει τη ζήτηση ενέργειας και συντονίζει την κατανομή των διαθέσιμων πόρων παραγωγής, διασφαλίζοντας την ευστάθεια του συστήματος και την βέλτιστη οικονομική του απόδοση. Χρησιμοποιώντας τα υφιστάμενα συστήματα συλλογής δεδομένων (SCADA, WAMS) και τεχνολογίες επικοινωνίας, επεξεργάζεται τα συλλεγμένα δεδομένα πεδίου και παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση και την απόδοση του συστήματος. Η δυνατότητα εποπτείας σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπει στους χειριστές του EMS, να λαμβάνουν έγκυρες αποφάσεις για τη διαχείριση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας. Μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων ελέγχου – για παράδειγμα, μέσω του αυτόματου ελέγχου παραγωγής – το EMS διαχειρίζεται τα κρίσιμα στοιχεία του δικτύου, όπως μονάδες παραγωγής, μετασχηματιστές και διακόπτες, διασφαλίζοντας ότι το ΣΗΕ λειτουργεί αποτελεσματικά και με ασφάλεια.

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία ενός κέντρου ελέγχου ενέργειας. Κεντρικά, στο υψηλότερο επίπεδο βρίσκεται το EMS, το οποίο συνδέεται μέσω τηλεπικοινωνιακής υποδομής με τα συστήματα SCADA και WAMS, που ασκούν τη λειτουργία της εποπτείας και του ελέγχου του ΣΗΕ. Επιπλέον περιλαμβάνονται εργαλεία ανάλυσης και βελτιστοποίησης.



Σχήμα 3.2: Κέντρο ελέγχου ενέργειας και συνεργασία επιμέρους συστημάτων.

Το σχήμα 3.3 περιγράφει τις επιμέρους λειτουργίες και τη ροή δεδομένων και διαδικασιών στο EMS. Τα δεδομένα από τα συστήματα SCADA/WAMS εισέρχονται στον εξοπλισμό επικοινωνίας, όπου τίθενται υπό επεξεργασία και κατευθύνονται σε διάφορα υποσυστήματα, όπως ο Επεξεργαστής Τοπολογίας, ο Εκτιμητής Κατάστασης και το Αυτόματο Σύστημα Ελέγχου Παραγωγής (AGC). Επιπλέον, ενσωματώνεται ανάλυση ενδεχόμενων (Contingency Analysis) και βέλτιστη ροή ισχύος (Optimal Power Flow) για την υποστήριξη της βέλτιστης λειτουργίας και ελέγχου του δικτύου.



Σχήμα 3.3: Βασικές λειτουργίες του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS).

Μία από τις βασικές λειτουργίες του EMS είναι η πρόβλεψη φορτίου. Χρησιμοποιώντας αλγορίθμους που αναλύουν ιστορικά και μετεωρολογικά δεδομένα, το σύστημα EMS έχει τη δυνατότητα να προβλέπει μελλοντικά μοτίβα κατανάλωσης, και να διαστασιολογεί την παραγωγή κατάλληλα, στα μέτρα της αναμενόμενης ζήτησης, αποφεύγοντας ζητήματα όπως η έλλειψη ενέργειας ή η υπερπαραγωγή. Παράλληλα, το EMS είναι υπεύθυνο για τη βέλτιστη κατανομή των μονάδων παραγωγής, σε οικονομικούς όρους. Ανά πάσα στιγμή και ανάλογα με την προβλεπόμενη ζήτηση, τίθεται σε λειτουργία το πλέον αποδοτικό σχήμα μονάδων παραγωγής, εξισορροπώντας προσεκτικά τη διαθεσιμότητα καυσίμου, την παραγωγή των ΑΠΕ, τις συνθήκες της αγοράς και τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης, δίνοντας τη δυνατότητα μείωσης του λειτουργικού κόστους, διατηρώντας αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, και μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα του συστήματος [28] [29].

Η **εκτίμηση κατάστασης**, η οποία αναλύεται εκτενώς στη συνέχεια, είναι ίσως η σημαντικότερη λειτουργία του EMS. Επιτρέπει στους χειριστές του, να αξιολογούν την κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, υπολογίζοντας απαραίτητες μεταβλητές και αξιολογώντας τελικά, τη συνολική απόδοση του συστήματος. Η εκτίμηση κατάστασης είναι κρίσιμη για τη διατήρηση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας, καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό και την έγκαιρη αντιμετώπιση πιθανών διαταραχών πριν αυτές κλιμακωθούν. Στην εκτίμηση κατάστασης βασίζονται κι άλλες επιμέρους λειτουργίες του EMS, όπως για παράδειγμα η ανάλυση έκτακτων καταστάσεων (contingency

analysis), η οποία βασισμένη στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, προσομοιώνει πιθανές αστοχίες, όπως διακοπές γραμμών ή δυσλειτουργίες γεννητριών, βοηθώντας τους διαχειριστές του συστήματος να κατανοήσουν πιθανές επιπτώσεις τέτοιων βλαβών και να αναπτύξουν στρατηγικές για τον μετριασμό τους, αποτρέποντας αλυσιδωτές βλάβες ή διακοπές ρεύματος (blackouts) μεγάλης κλίμακας. Τέλος, ένας ακόμα σημαντικός τομέας της διαχείρισης του δικτύου που υποστηρίζεται από το EMS και βασίζεται επίσης στην εκτίμηση κατάστασης, είναι ο έλεγχος της τάσης και της αέργου ισχύος. Ρυθμίζοντας τις ροές αέργου ισχύος και χρησιμοποιώντας συσκευές ελέγχου τάσης, όπως πυκνωτές, μετασχηματιστές, ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) και άλλες συσκευές, το EMS διασφαλίζει ότι το δίκτυο διατηρεί σταθερά επίπεδα τάσης σε όλες τις περιοχές του δικτύου, συμβάλλοντας στη συνολική αξιοπιστία και ευστάθεια του συστήματος [28].

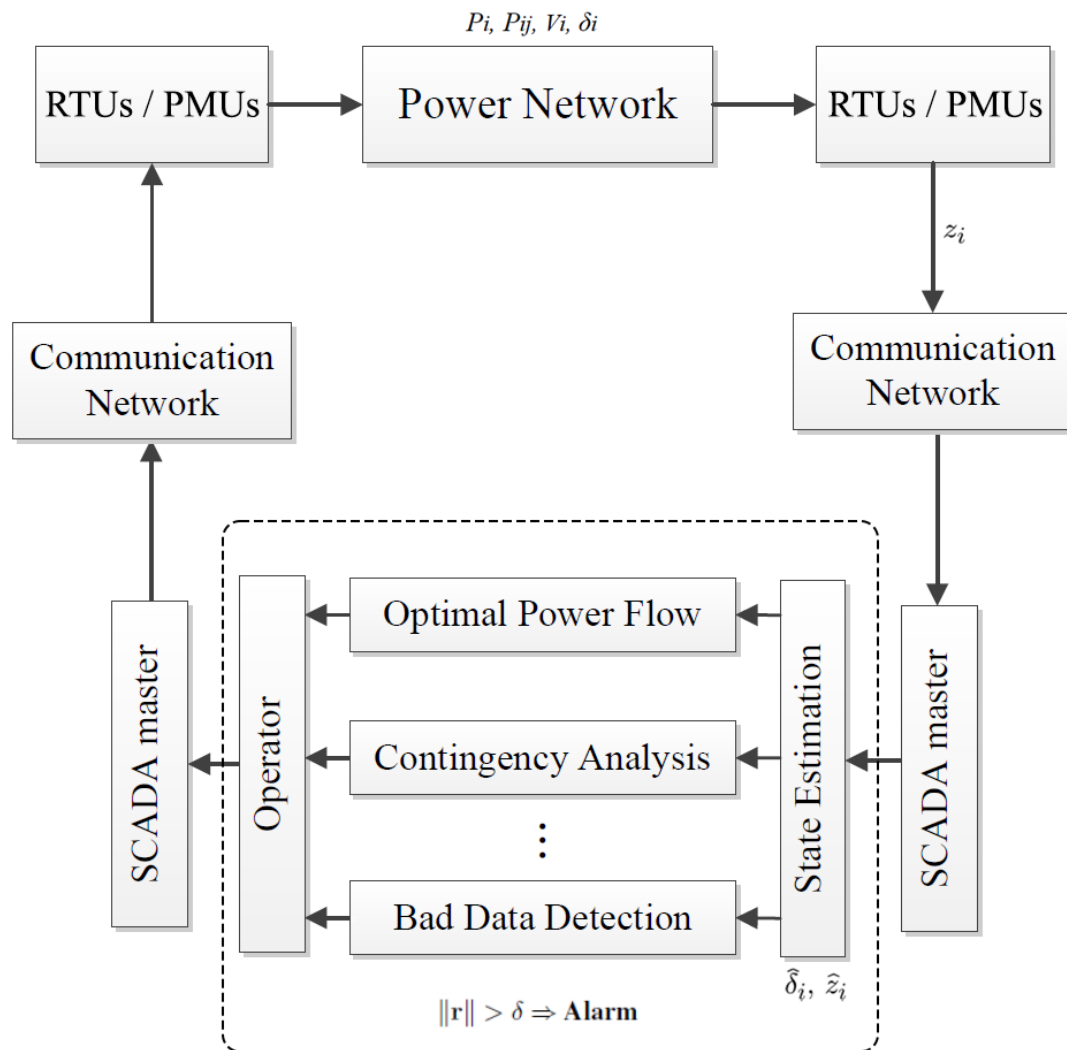
Εν κατακλείδι, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το EMS αποτελεί την τεχνολογική ραχοκοκαλιά των σύγχρονων ΚΕΕ και κατ' επέκταση των ΣΗΕ, διευκολύνοντας κρίσιμες λειτουργίες του συστήματος που εξασφαλίζουν την αποτελεσματική και ασφαλή λειτουργία των ολόενα και πιο πολύπλοκων δικτύων σε ένα ταχέως εξελισσόμενο ενεργειακό τοπίο.

Τα ΚΕΕ για την επικοινωνία μεταξύ του συστήματος συλλογής δεδομένων και του EMS χρησιμοποιούν ισχυρά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα και δομές διαχείρισης δεδομένων. Η αξιοπιστία και η ασφάλεια των υποδομών επικοινωνίας είναι κρίσιμης σημασίας για τη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων των ΚΕΕ, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συσκευών πεδίου, των κέντρων ελέγχου και των χειριστών, σε πραγματικό χρόνο. Τα συστήματα επικοινωνίας μεταφέρουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τις συσκευές πεδίου (RTU, IED, PMU) στα συστήματα SCADA/WAMS στο ΚΕΕ διευκολύνοντας την απρόσκοπτη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του κέντρου ελέγχου και του συστήματος συλλογής δεδομένων. Εντολές ελέγχου, όπως λειτουργίες διακοπών, ρυθμίσεις τάσης και setpoints γεννητριών, αποστέλλονται από το ΚΕΕ στις συσκευές πεδίου, μέσω ασφαλών δικτύων επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα συνήθη εκ των οποίων περιλαμβάνουν τα DNP3, Modbus, IEC 61850 και IEEE C37.118 (για PMU). Η ακριβής επιλογή του πρωτοκόλλου εξαρτάται από την εφαρμογή, τις απαιτήσεις χρονικής καθυστέρησης, αλλά και την αρχιτεκτονική του συστήματος SCADA [32]. Δεδομένης της κρίσιμης φύσης των λειτουργιών του ΣΗΕ, τα συστήματα επικοινωνίας είναι εξοπλισμένα με μέτρα κυβερνοασφάλειας για την προστασία από κυβερνοεπιθέσεις, μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και παραποίηση δεδομένων. Συνήθως χρησιμοποιούνται κρυπτογράφηση, τείχη προστασίας και συστήματα ανίχνευσης εισβολών.

Τέλος, τα ΚΕΕ έχουν τη δυνατότητα να ενσωματώσουν προηγμένα *εργαλεία και τεχνικές ανάλυσης και οπτικοποίησης*, όπως για παράδειγμα εξόρυξη δεδομένων (data mining), μηχανική μάθηση και οπτικοποίηση σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας τις μελλοντικές προοπτικές του.

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται σχηματικά ένα λειτουργικό μπλοκ διάγραμμα του συστήματος SCADA και του EMS ενός ηλεκτρικού δικτύου. Ο Εκτιμητής Κατάστασης χρησιμοποιεί μετρήσεις ροής ισχύος (P_i , P_{ij}), (z_i) που συλλέγονται από τα RTUs και μεταδίδονται μέσω του συστήματος SCADA για να εκτιμήσει την τρέχουσα κατάσταση (δ_i) του συστήματος. Μία ειδοποίηση κινδύνου ενεργοποιείται κατά τη λειτουργία

Ανίχνευσης Λανθασμένων Δεδομένων (Bad Data Detection), όταν η νόρμα του υπολοίπου μετρήσεων (residual) r υπερβαίνει ένα δεδομένο όριο.



Σχήμα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής SCADA και EMS σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο [32].

3.3 Το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Το ελληνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) αποτελεί τη ραχοκοκαλιά της ενεργειακής υποδομής της χώρας, διαδραματίζοντας κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές, τόσο στην ηπειρωτική χώρα, όσο και σε πολυάριθμα νησιά.

3.3.1 Ιστορικά – Υφιστάμενη κατάσταση

Ιστορικά, η Ελλάδα βασίστηκε σε μεγάλο βαθμό σε ορυκτά καύσιμα και κυρίως στον λιγνίτη σε ό,τι αφορά την ηπειρωτική χώρα – ορυκτό που βρίσκεται σε αφθονία σε φυσικά κοιτάσματα της χώρας, καθιστώντας την σε μεγάλο βαθμό και για πολλές δεκαετίες, ενεργειακά ανεξάρτητη – το πετρέλαιο στη νησιωτική χώρα – οι εργασίες για τη διασύνδεση της οποίας είναι υπό εξέλιξη, με τελικό σκοπό τη μείωση στο ελάχιστο

της χρήσης γεννητριών ηλεκτροπαραγωγής diesel – και το φυσικό αέριο τα τελευταία χρόνια, αντικαθιστώντας το μεγαλύτερο μέρος των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής, στην κατεύθυνση της πολιτικής απολιγνιτοποίησης που ακολουθείται [33] [34].

Τα τελευταία χρόνια, η εστίαση του ενεργειακού τομέα στη χώρα, έχει μετατοπιστεί προς τις ΑΠΕ, ιδίως την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, οι οποίες αντιπροσωπεύουν πλέον ένα σημαντικό, συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο του ενεργειακού μείγματος. Ο μετασχηματισμός αυτός έχει δημιουργήσει ευκαιρίες και προκλήσεις για το δίκτυο, ιδιαίτερα όσον αφορά την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά του. Η ευρεία ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο δίκτυο, λόγω της εγγενούς μεταβλητής και μη ελεγχόμενης φύσης τους, απαιτεί εκσυγχρονισμένη υποδομή δικτύου, ώστε να μπορεί να διασφαλιστεί απρόσκοπτα η σταθερή, συνεπής και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας [35].

Καθώς η Ελλάδα μεταβαίνει προς ένα νέο ενεργειακό μείγμα, σημαντικά διαφοροποιημένο σε σχέση με το παρελθόν, το ελληνικό ΣΗΕ βρίσκεται διαρκώς υπό αξιολογες μεταβολές στον τρόπο λειτουργίας του, με σκοπό, αφενός να καλύψει την αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, και αφετέρου να ανταποκριθεί στις τεχνολογικές προκλήσεις που θέτει το συνεχώς αυξανόμενο μερίδιο ΑΠΕ στο ισοζύγιο ηλεκτροπαραγωγής. Το δίκτυο πρέπει να είναι σε θέση να υποστηρίξει τεχνικά μια ποικιλία μονάδων παραγωγής, από συμβατικές γεννήτριες βασισμένες σε ορυκτά καύσιμα, έως αιολικές, ηλιακές και υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας, ενώ ταυτόχρονα να εξυπηρετεί τα φορτία του με ασφάλεια και αξιοπιστία [36].

3.3.2 Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το Εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ), διαχειριστής του οποίου είναι ο ΑΔΜΗΕ, αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα της ηπειρωτικής Ελλάδας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών, με Γραμμές Μεταφοράς Υψηλής (66kV και 150kV) και Υπερυψηλής τάσης (400kV), Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) και Υποσταθμούς 150kV-20kV [37].

Τον κορμό του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς (ΔΣΜ) αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν ηλεκτρική ενέργεια, κυρίως από το ενεργειακό κέντρο παραγωγής της Δυτικής Μακεδονίας. Περίπου, το 70% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας παράγεται στην περιοχή αυτή και στην συνέχεια μεταφέρεται στα μεγάλα κέντρα της Κεντρικής και Νότιας Ελλάδας, όπου και καταναλώνεται σχεδόν το 65% της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σύμφωνα με την έκθεση του ΑΔΜΗΕ για την απόδοση λειτουργίας του ΕΣΜΗΕ κατά το έτος 2023, το συνολικό μήκος οδύσεων των γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου είναι 13.664 χλμ., εκ των οποίων 12.047 χλμ. είναι εναέριας, 1.195 χλμ. υποβρύχιας και 407 χλμ. υπόγειας. Οι υπόγειες γραμμές μεταφοράς είναι εγκατεστημένες, κυρίως, περιμετρικά και εντός των μεγάλων αστικών κέντρων της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης, ενώ ένα μέρος τους αφορά τη διασύνδεση Κρήτης – Πελοποννήσου. Το ΕΣΜΗΕ, επιπλέον, περιλαμβάνει 27 ΚΥΤ (400/150/30kV) και 414 υποσταθμούς 150kV- 20kV (ανύψωσης, υποβιβασμού-ξεύξης και σύνδεσης) [38], [39].

Τα βασικά δεδομένα Εξοπλισμού του ΕΣΜΗΕ όπως αυτά διαμορφώθηκαν έως τις 31/03/2024 περιγράφονται στον ακόλουθο Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Βασικά δεδομένα Εξοπλισμού του ΕΣΜΗΕ (31/03/2024) [38].

Γραμμές Μεταφοράς (km)	Σύνολο	Σύνολο
Εναέριες	13.664,24	13.664,24
Υποβρύχιες	1.195,72	
Υπόγειες	421,48	
Υποσταθμοί με πάγια ΑΔΜΗΕ (πλήθος)	Σύνολο	Σύνολο
Μετασχηματισμού	406	414
Ζεύξης	8	
Μετασχηματιστές ΑΔΜΗΕ	Σύνολοι	
Πλήθος	72	
Ισχύς (MVA)	18.725	
Μετασχηματιστές συνδεδεμένων χρηστών	Σύνολο	
Πλήθος	826	
Ισχύς (MVA)	47.158	

3.3.3 Υφιστάμενες διασυνδέσεις και ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς

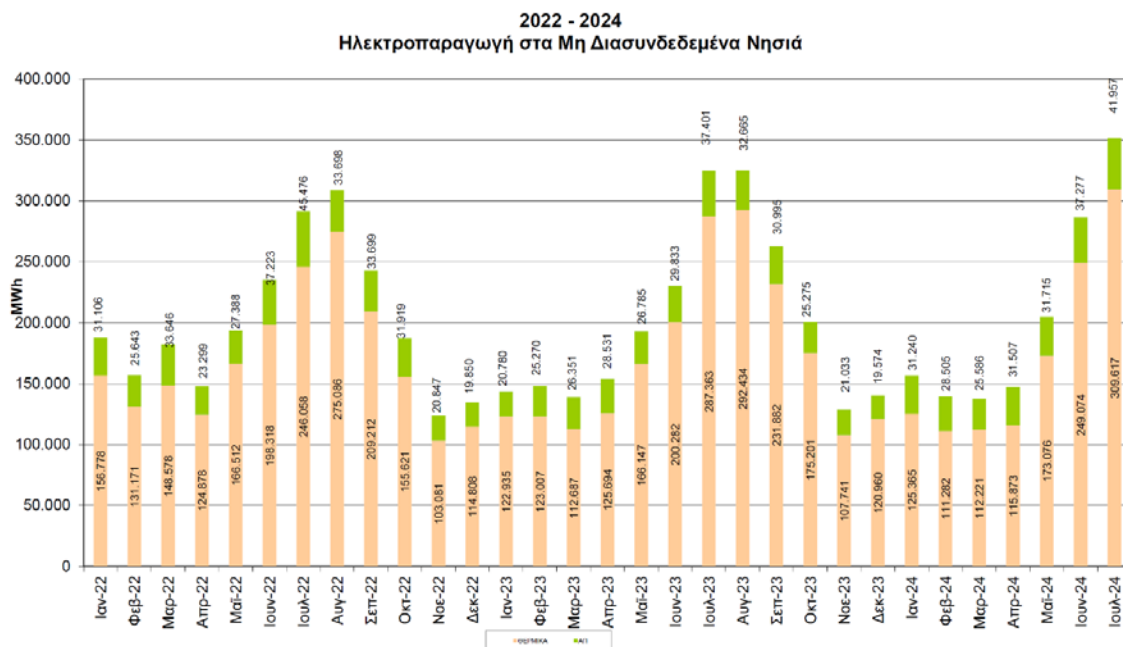
Μία από τις προκλήσεις για την αξιόπιστη, εύρυθμη και οικονομικά αποδοτική λειτουργία του συστήματος, οφείλεται στην ίδια τη γεωγραφία της χώρας. Εκτός από την κυρίως ηπειρωτική χώρα, μέρος του ηλεκτρισμένου συστήματος αποτελούν και τα εκατοντάδες μη διασυνδεδεμένα νησιά (ΜΔΝ), τα περισσότερα από τα οποία, είναι γεωγραφικά και ηλεκτρικά απομονωμένα από τους κεντρικούς κόμβους παραγωγής ενέργειας. Ιστορικά, αυτά τα νησιά βασίζονταν – και το μεγαλύτερο μέρος τους βασίζεται ακόμα – σε τοπικά, ηλεκτρικά απομονωμένα και κοστοβόρα συστήματα θερμικής παραγωγής με βάση το πετρέλαιο και μόνο ένα μικρό μέρος του συνόλου της νησιωτικής χώρας είναι συνδεδεμένο με το ΕΣΜΗΕ.

Συγκεκριμένα, τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθος τροφοδοτούνται ήδη από το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, ενώ ταυτόχρονα έχουν δρομολογηθεί και βρίσκονται σε εξέλιξη **έργα διασύνδεσης των νησιών** του Αιγαίου, με στόχο την ενσωμάτωση τους στο ηπειρωτικό δίκτυο.

Συνολικά, στις 4 φάσεις του έργου διασύνδεσης των Κυκλάδων – οι πρώτες 2 εκ των οποίων, έχουν ήδη ολοκληρωθεί – πρόκειται να εγκατασταθούν πάνω από 700 χιλιόμετρα υποβρυχίων καλωδίων, ενώ έχουν ήδη τοποθετηθεί περισσότερα από 300 χλμ. Τα καλώδια διασύνδεσης ξεκινούν από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της ηπειρωτικής χώρας (κυρίως Λαύριο, Εύβοια αλλά και Νότια Πελοπόννησο) προς τα διάφορα νησιά. Στις φάσεις Α και Β του έργου, ολοκληρώθηκε η τροφοδότηση από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα, της Άνδρου και της Τήνου, μέσω υποβρύχιας καλωδιακής σύνδεσης 150kV, από τον Υ/Σ Λιβιάδι στην Νότια Εύβοια – και της Σύρου, της Πάρου, της Νάξου και της Μυκόνου, μέσω υποβρύχιας καλωδιακής σύνδεσης 150kV από τον Υ/Σ GIS (Gas Insulated Switchgear) Λαυρίου. Στις φάσεις Γ και Δ σχεδιάζεται η πόντιση και δεύτερης καλωδιακής διασύνδεσης Λαυρίου – Σύρου (με στόχο την εξασφάλιση της απαιτούμενης αξιοπιστίας για όλες τις λειτουργικές συνθήκες) και η ηλεκτρική διασύνδεση με υποβρύχια καλωδιακή σύνδεση Νάξου – Θήρας – Φολεγάνδρου – Μήλου – Σερίφου – Λαυρίου [41], [42], [43].

Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το ισοζύγιο ηλεκτροπαραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ) από το 2022 έως το 2024, διαχωρίζοντας την παραγωγή από

θερμικές μονάδες (με πορτοκαλί χρώμα) και από την παραγωγή από ΑΠΕ (με πράσινο χρώμα). Φαίνεται η εποχική διακύμανση της παραγωγής, με αιχμές κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω αυξημένης ζήτησης. Σε ορισμένες χρονικές περιόδους παρατηρείται σταδιακή αύξηση της συνεισφοράς των ΑΠΕ.



Σχήμα 3.5: Ισοζύγιο ηλεκτροπαραγωγής στα μη διασυνδεδεμένα νησιά [40].

Ξεχωριστό έργο για την ανάπτυξη του διασυνδεδεμένου δικτύου, αποτελεί η διασύνδεση της Κρήτης, έργο το οποίο πραγματοποιείται επίσης σε 2 φάσεις. Η φάση Α αφορά στην ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης – Πελοποννήσου, η οποία έχει ήδη ολοκληρωθεί, μέσω δύο υποβρύχιων καλωδίων μήκους 135km το καθένα.

Η φάση Β αφορά στη διασύνδεση Κρήτης – Αττικής. Όντας μία από τις τρεις υποβρύχιες διασυνδέσεις με το μεγαλύτερο βάθος και ταυτόχρονα η νησιωτική διασύνδεση με τη μεγαλύτερη ισχύ (1.000 MW) παγκοσμίως μαζί με τη Σαρδηνία, αποτελεί ένα από τα πιο καινοτόμα έργα διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος πανευρωπαϊκά και προς το παρόν αποτελεί, οικονομικά, τη μεγαλύτερη επένδυση, στον τομέα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα. Τελικός στόχος είναι ο τερματισμός της ηλεκτρικής απομόνωσης της Κρήτης από το δίκτυο της ηπειρωτικής Ελλάδας και η ασφαλής και αξιόπιστη κάλυψη των αυξημένων υπαρχόντων και μελλοντικών αναγκών του νησιού μέσω του ΕΣΜΗΕ.

Για τη διασύνδεση χρησιμοποιείται τάση 500kV DC και η σύγχρονη τεχνολογία VSC (Voltage Source Converter). Η διαδρομή της διασύνδεσης ξεκινά από τον Σταθμό Μετατροπής ΕΡ/ΣΡ Αττικής, πλησίον του ΚΥΤ Κουμουνδούρου με δύο υπόγεια καλώδια συνεχούς ρεύματος υψηλής τάσης (High Voltage DC – HVDC) έως το σημείο προσαιγιάλωσης στην Πάχη Μεγάρων, απ' όπου ποντίζονται στη θάλασσα έως το σημείο προσαιγιάλωσης στην Κορακιά και μέχρι τον τερματικό Σταθμό Μετατροπής ΣΡ/ΕΡ Δαμάστας της Κρήτης [41], [42].

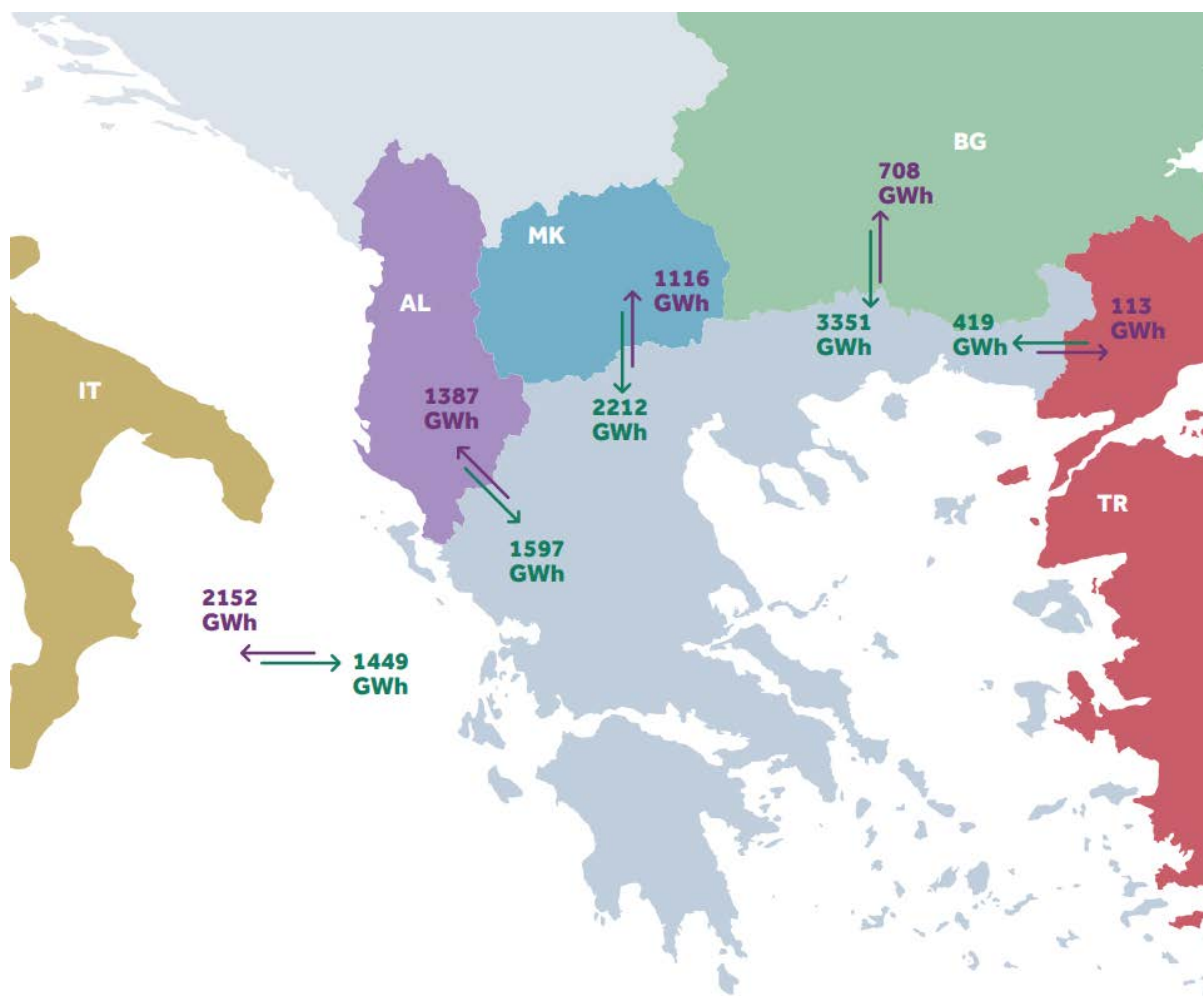
[illegible]

Σχήμα 3.6: Χάρτης διασυνδέσεων Κυκλάδων [40].

Σε ό,τι αφορά τις διεθνείς διασυνδέσεις, με τα συστήματα μεταφοράς γειτονικών χωρών, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς συνδέεται επίσης με τα Συστήματα Μεταφοράς της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Βόρειας Μακεδονίας, της Ιταλίας (Συνεχές Ρεύμα 400kV) και της Τουρκίας, συμβάλλοντας σημαντικά στην ασφάλεια λειτουργίας του συστήματος και στην ανάπτυξη των εμπορικών ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας με την ευρύτερη περιοχή των Βαλκανίων και της Ν.Α. Ευρώπης.

Ταυτόχρονα είναι υπό κατασκευή δεύτερη διασύνδεση με τη Βουλγαρία, ενώ πρόσφατα ανακοινώθηκε η υποθαλάσσια διασύνδεση Ελλάδας – Κύπρου – Ισραήλ [41].

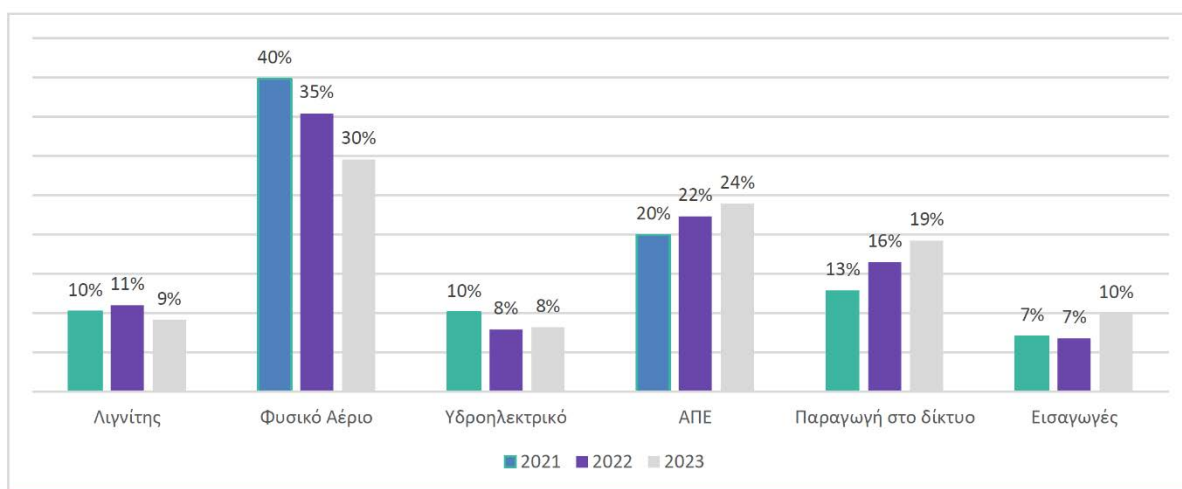
Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται οι ροές ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh) μεταξύ της Ελλάδας και γειτονικών χωρών για το 2022. Οι αναγραφόμενοι αριθμοί δείχνουν την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και τα αντίστοιχα βέλη, την κατεύθυνση (εισαγωγή με πράσινα βέλη και εξαγωγή με μωβ βέλη), μεταξύ της Ελλάδας, της Ιταλίας (IT), της Αλβανίας (AL), της Βόρειας Μακεδονίας (MK), της Βουλγαρίας (BG) και της Τουρκίας (TR).



Σχήμα 3.7: Εμπορικά προγράμματα ανταλλαγών ενέργειας ανά διασύνδεση για το 2022 [41].

3.4 Εθνικό κέντρο ελέγχου ενέργειας: λειτουργία και έλεγχος

Το 2023 το σύνολο παραγωγής και ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών, που διακινήθηκε μέσω του ΕΣΜΗΕ, ανέρχεται στις 46,3 TWh, μειωμένο κατά 5,9% σε σχέση με το 2022, ακολουθώντας την πτωτική πορεία της ζήτησης την ίδια χρονιά. Στο σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η κατανομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τις διαφορετικές πηγές καυσίμου για το 2023. Το 2023 αυξήθηκε το μερίδιο της παραγωγής από ΑΠΕ και Δίκτυο (στο 43% αθροιστικά από 38% το 2022), ενώ μειώθηκε το μερίδιο της λιγνιτικής παραγωγής (στο 9,1% από 11% το 2022) και ταυτόχρονα αυξήθηκαν και οι εισαγωγές [38].



Σχήμα 3.8: Μίγμα Ηλεκτροπαραγωγής στο ελληνικό δίκτυο, 2023 [38].

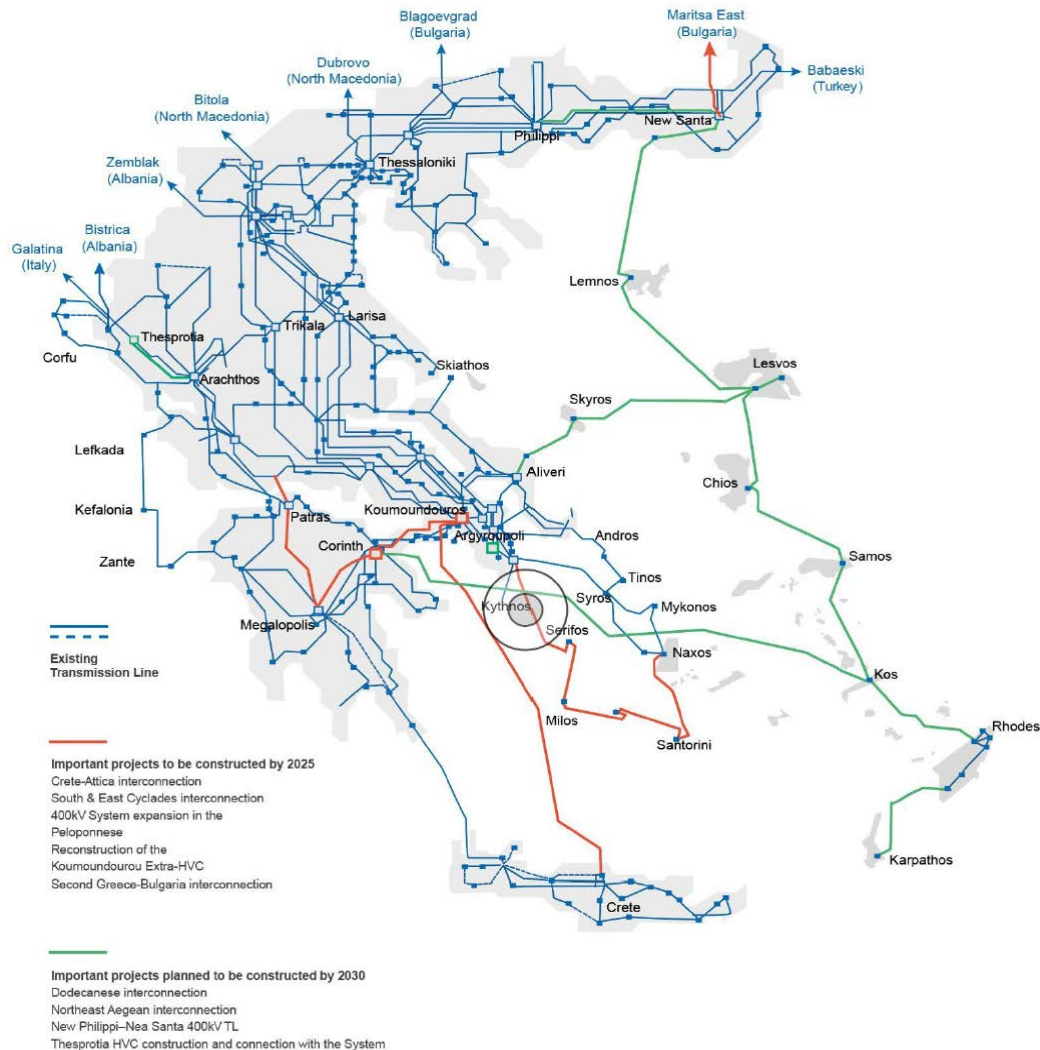
Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής μέχρι το δίκτυο διανομής και την Μέση Τάση (ΜΤ) και στη συνέχεια τη Χαμηλή Τάση (ΧΤ) και τους καταναλωτές, είναι η αρμονική συνεργασία δικτύων ισχύος διαφορετικών επιπέδων τάσης.

Η εύρυθμη και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς, και κατ' επέκταση του ΣΗΕ γενικότερα – βασική ευθύνη του εκάστοτε διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, του ΑΔΜΗΕ, στην περίπτωση της Ελλάδας – επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων ελέγχου και διαχείρισης του δικτύου και μέσω των μηχανισμών αγοράς που έχουν ρυθμιστική επίδραση στο σύστημα. Η λειτουργία και ο έλεγχος του συστήματος υλοποιείται σύμφωνα με λύσεις που εξάγονται από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, βασιζόμενες σε τεχνοοικονομικές προσφορές και στη συνέχεια υλοποιούνται σε πραγματικό χρόνο, κυρίως από το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΕΚΕΕ), στον Άγιο Στέφανο Αττικής, καθώς και από τα τρία Περιφερειακά Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας [44].

Οι διαδικασίες του **Σχεδιασμού Λειτουργίας** (Operational Planning) αποσκοπούν στον σχεδιασμό της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος. Βασικές διαδικασίες του αφορούν στον σχεδιασμό απομονώσεων των διασυνδέσεων και βασικών στοιχείων του ΕΣΜΗΕ καθώς και των Μονάδων Παραγωγής, ώστε να διασφαλίζεται ο αδιάλειπτος εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια και η αξιόπιστη λειτουργία του ΕΣΜΗΕ. Παράλληλα, **η ανάλυση επάρκειας ισχύος και εφεδρειών** της περιοχής ελέγχου, καθώς και η δημιουργία του μοντέλου στο οποίο αποτυπώνεται η υφιστάμενη **τοπολογία του δικτύου**, με τις **προβλέψεις παραγωγής, φορτίου, και ροών** στις διασυνδέσεις, είναι βασικοί πυλώνες της **εκτίμησης της ασφάλειας λειτουργίας** του ΕΣΜΗΕ (Operational Security Analysis) [38].

Το σύνολο των διαδικασιών αυτών, για τη ρύθμιση του συστήματος, βασίζεται στα συστήματα επιτήρησης και συλλογής δεδομένων και στη συνέχεια στην εκτίμηση κατάστασης του δικτύου. Έτσι, τα συστήματα συλλογής δεδομένων ανά το δίκτυο στέλνουν συνεχώς στις βάσεις δεδομένων των ΚΕΕ, μετρήσεις SCADA και μετρήσεις PMU (ανάλογα την υφιστάμενη υποδομή), στα ΚΕΕ τρέχουν αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης, και με βάση το υπάρχον μοντέλο δικτύου και το προκύπτον από την εκτίμηση

διάλυση κατάστασης, τρέχουν παράλληλα τις σχετικές διαδικασίες και λαμβάνουν τις αντίστοιχες αποφάσεις για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος εντός ασφαλών ορίων, ώστε να συντονίζεται η παραγωγή με τη ζήτηση και να εξυπηρετείται το φορτίο χωρίς υπερφορτίσεις των γραμμών.



Σχήμα 3.9: Χάρτης υφιστάμενων και υπό κατασκευή διασυνδέσεων [38].

Ο χάρτης του σχήματος 3.9 παρουσιάζει το υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς (με μπλε διακεκομμένες γραμμές) και τα σημαντικά έργα διασύνδεσης που προγραμματίζονται να ολοκληρωθούν έως το 2025 (με κόκκινες γραμμές) και το 2030 (με πράσινες γραμμές) στην Ελλάδα και την ευρύτερη περιοχή. Τα έργα περιλαμβάνουν τη διασύνδεση Κρήτης-Αττικής, τις Κυκλάδες, τα Δωδεκάνησα, καθώς και διεθνείς διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες όπως η Βουλγαρία, η Τουρκία, και η Ιταλία.

4 Εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός ΣΗΕ σε μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορούν να προσδιοριστούν πλήρως, εάν είναι γνωστό το μοντέλο δικτύου, δηλαδή η διάταξη όλων των κόμβων και των κλάδων που το αποτελούν, οι τιμές των σχετικών τους παραμέτρων καθώς και οι μιγαδικές τάσεις σε κάθε κόμβο του δικτύου. Δεδομένου ότι το σύνολο των φασιθετών των τάσεων προσδιορίζει πλήρως το σύστημα, χαρακτηρίζεται ως **διάνυσμα κατάστασης** του συστήματος.

Σε κάθε ΣΗΕ, θεωρώντας το ως μια ενοποιημένη δομή αποτελούμενη από επιμέρους υποσυστήματα (σταθμοί παραγωγής, σύστημα μεταφοράς, σύστημα διανομής, καταναλωτές), προκειμένου να λειτουργεί αξιόπιστα, να λαμβάνονται σωστές αποφάσεις και βάσει αυτών να εκτελούνται κατάλληλες ενέργειες, πρέπει να εξασφαλίζεται σε επαρκή βαθμό η **επίγνωση της κατάστασης** του (situational awareness) κατά τη χρονική στιγμή που μελετάται. Η κατάσταση του συστήματος αξιολογείται μέσω της μελέτης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών μεγεθών και ποσοτικοποιείται με αυστηρά μαθηματικά εργαλεία. Ως εκ τούτου, η επίγνωση της κατάστασης του συστήματος είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εποπτεία του [45].

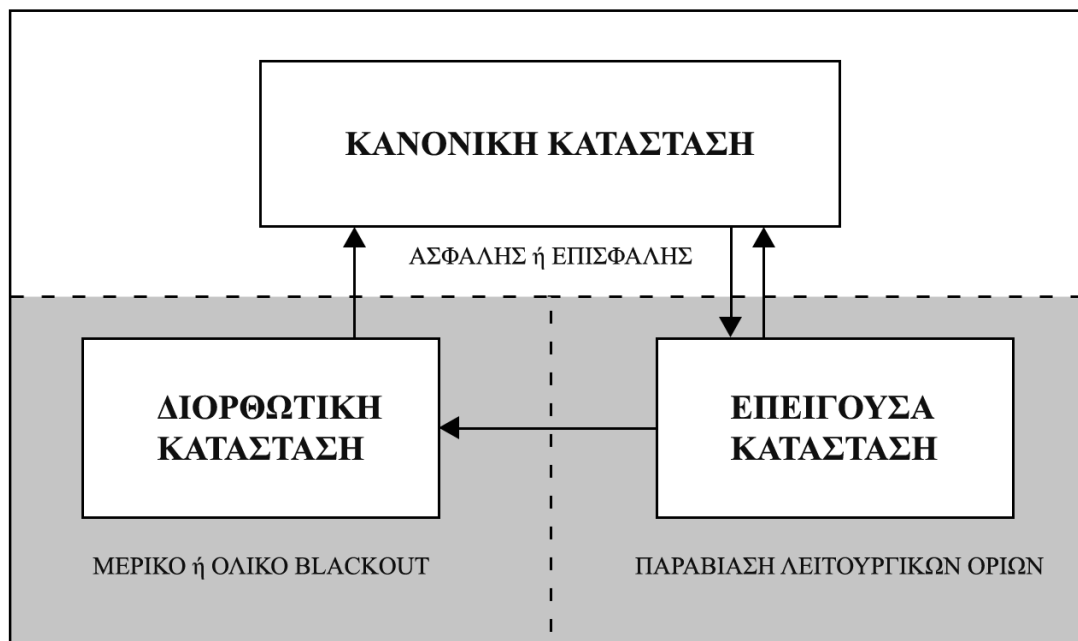
4.1 Συνθήκες λειτουργίας του συστήματος

Υπό αυτό το πρίσμα, υπάρχουν **τρεις πιθανές καταστάσεις** στις οποίες μπορεί να βρεθεί το ΣΗΕ σε σχέση με τα προκαθορισμένα όρια λειτουργίας του: η **κανονική**, η **επείγουσα** και η **διορθωτική** κατάσταση [45],[46].

Κανονική κατάσταση υφίσταται όταν όλα τα φορτία μπορούν να τροφοδοτηθούν από τις εν λειτουργία μονάδες παραγωγής, ενώ γενικά το σύστημα βρίσκεται εντός των προκαθορισμένων λειτουργικών ορίων του. Αν καμία διαταραχή από ένα σύνολο ενδεχόμενων συμβάντων (απώλειες γραμμών μεταφοράς ή μονάδων παραγωγής, λόγω απροσδόκητων βλαβών του εξοπλισμού ή φυσικών αιτιών, όπως για παράδειγμα καταιγίδες) δεν μπορεί να το βγάλει εκτός κανονικής κατάστασης, η κατάσταση χαρακτηρίζεται **ασφαλής**. Σε διαφορετική περίπτωση χαρακτηρίζεται **επισφαλής**. Στην επισφαλή κανονική κατάσταση, το ισοζύγιο ισχύος σε κάθε ζυγό και οι λειτουργικοί περιορισμοί του συστήματος εξακολουθούν να ικανοποιούνται, αλλά το σύστημα παραμένει ευάλωτο σε σχέση με κάποια από τα εξεταζόμενα απρόβλεπτα γεγονότα. Εάν το σύστημα βρεθεί σε επισφαλή κατάσταση λειτουργίας, τότε πρέπει να ληφθούν προληπτικά μέτρα για να αποφευχθεί ενδεχόμενη μετάβασή του σε επείγουσα κατάσταση. Τέτοια προληπτικά μέτρα προσδιορίζονται συνήθως με τη βοήθεια ενός προγράμματος βέλτιστης ροής ισχύος με περιορισμούς ασφαλείας, λαμβάνοντας υπόψη ένα σύνολο κρίσιμων απρόβλεπτων συμβάντων.

Οι συνθήκες λειτουργίας μπορεί να μεταβληθούν σημαντικά λόγω ενός απροσδόκητου γεγονότος που μπορεί να προκαλέσει την παραβίαση ορισμένων από τους λειτουργικούς περιορισμούς, ενώ το ΣΗΕ εξακολουθεί να τροφοδοτεί με ισχύ όλα τα φορτία του συστήματος. Σε μια τέτοια συνθήκη το σύστημα λέγεται ότι λειτουργεί σε **επείγουσα κατάσταση**. Η επείγουσα κατάσταση απαιτεί την άμεση λήψη διορθωτικών μέτρων από τον διαχειριστή του συστήματος, ώστε να επανέλθει σε κανονική κατάσταση.

Τα διορθωτικά μέτρα ελέγχου που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της επείγουσας κατάστασης, μπορεί να είναι σε θέση να αποφύγουν την ολική κατάρρευση του συστήματος (blackout), με κόστος ενδεχομένως την αποσύνδεση κάποιων φορτίων, γραμμών, μετασχηματιστών ή άλλου εξοπλισμού. Έτσι, οι παραβιάσεις των ορίων λειτουργίας μπορεί να εξαλειφθούν και το σύστημα μπορεί να ανακτήσει την ευστάθειά του, με μειωμένο φορτίο και ενδεχομένως αναδιαμορφωμένη τοπολογία. Στη συνέχεια, πρέπει να αποκατασταθεί το ισοζύγιο φορτίου και παραγωγής, προκειμένου να αρχίσει εκ νέου η παροχή ισχύος σε όλα τα φορτία. Αυτή η κατάσταση λειτουργίας ονομάζεται **διορθωτική κατάσταση** και οι απαραίτητες ενέργειες για την επιστροφή του ΣΗΕ σε κανονική κατάσταση, αναφέρονται ως χειρισμοί αποκατάστασης. Το διάγραμμα καταστάσεων του Σχήματος 4.1 απεικονίζει τις πιθανές μεταβάσεις μεταξύ των διαφόρων καταστάσεων λειτουργίας που ορίζονται ανωτέρω.



Σχήμα 4.1: Πιθανές καταστάσεις του ΣΗΕ

Από τα παραπάνω, γίνεται αντιληπτό ότι η **επίγνωση της κατάστασης** στην οποία βρίσκεται την εκάστοτε χρονική στιγμή το σύστημα, είναι ζωτικής σημασίας για την εύρυθμη και αξιόπιστη λειτουργία του. Γενικά, μια υπολογιστική διαδικασία παρακολούθησης και ελέγχου, για την επίγνωση της κατάστασης του συστήματος, βασίζεται στις εξής τέσσερις αρχές [47]:

1. Την **κωδικοποίηση των μετρητικών δεδομένων και πληροφοριών** που έχουν συλλεχθεί σύμφωνα με τα στατικά και δυναμικά μοντέλα των χαρακτηριστικών μεγεθών του συστήματος.
2. Την **εισαγωγή της τυχαιότητας** και τη χρήση της θεωρίας πιθανοτήτων κατά τη διαδικασία.
3. Τη διατύπωση της **διαδικασίας ως πρόβλημα βελτιστοποίησης**, υπό την προϋπόθεση της ύπαρξης περίσσειας δεδομένων.

4. Τη δυνατότητα **αξιολόγησης των μετρούμενων δεδομένων και προσαρμογής** τους ανάλογα με την ποιότητα τους.

Διαχρονικά, η ακριβής επίγνωση της πραγματικής κατάστασης ενός ΣΗΕ, ή τμήματος αυτού, ήταν και εξακολουθεί να είναι αδύνατη. Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, ένα τμήμα του δικτύου διανομής που εξυπηρετείται από ένα τοπικό ΚΕΕ. Η λειτουργία ενός κατανεμημένου συστήματος μονάδων μέτρησης ώστε να υπάρχουν διαθέσιμα στο ΚΕΕ συγχρονισμένα μετρητικά δεδομένα, με στόχο την εξαγωγή της πραγματικής κατάστασής του σε πραγματικό χρόνο, ήταν τεχνολογικά ανέφικτη και οικονομικά ασύμφορη. Παρόλο που σήμερα, οι τεχνολογικές λύσεις για την ανάπτυξη τέτοιας υποδομής υπάρχουν, μια σειρά ενδογενών παραγόντων, όπως τα μετρητικά σφάλματα και ο θόρυβος που αλλοιώνουν την ακρίβεια των δεδομένων κατά τη μέτρηση και τη μετάδοση, οι αστοχίες των τηλεπικοινωνιακών καναλιών και οι χρονικές καθυστερήσεις στη μετάδοσή τους προς τα ΚΕΕ, αναδεικνύουν την εγγενή αδυναμία των τεχνικών μέσων να παρέχουν την ακριβή εικόνα της κατάστασης του συστήματος.

Ταυτόχρονα, η τάση προς την ενοποιημένη προσέγγιση στη λειτουργία όλων των υποσυστημάτων ενός ΣΗΕ, αυξάνει περαιτέρω τις τεχνολογικές απαιτήσεις για την επίγνωση της κατάστασης, καθώς οι υποδομές εποπτείας διευρύνονται ώστε να καλύπτουν περισσότερα σημεία ενδιαφέροντος και το χρονικό παράθυρο λειτουργίας μειώνεται. Ενώ ο αριθμός των διαθέσιμων μονάδων μέτρησης και των καναλιών επικοινωνίας αυξάνεται, παράλληλα αυξάνεται και η ανάγκη για ακρίβεια των μετρήσεων, συγχρονισμό και μικρό χρόνο μετάδοσης των δεδομένων. Διαμορφώνεται, έτσι, ένα γενικό πλαίσιο λειτουργίας το οποίο χαρακτηρίζεται από ελλιπή δεδομένα, είτε ποσοτικά, με καθαρά αριθμητικούς όρους, είτε ποιοτικά, με όρους προδιαγραφών παραμέτρων όπως η ακρίβεια, ο συγχρονισμός, η χρονική καθυστέρηση κ.λπ.

4.2 Ο ρόλος της εκτίμησης κατάστασης

Το 1970, έχοντας διαπιστώσει την εγγενή αδυναμία των συστημάτων μέτρησης να καταγράψουν την πραγματική κατάσταση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οι Schweppe et al., εισήγαγαν την έννοια της **εκτίμησης κατάστασης** στη μελέτη των ΣΗΕ, με τελικό σκοπό τον **βέλτιστο έλεγχο λειτουργίας** τους σε πραγματικό χρόνο. Το μαθηματικό μοντέλο που προτάθηκε προέρχεται από τη θεωρία εκτίμησης, έναν κλάδο της στατιστικής, αξιοποιώντας στοιχεία από τη θεωρία πιθανοτήτων [48].

Ο **στόχος** της εκτίμησης κατάστασης είναι ο **προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις**. Με άλλα λόγια, η **απόδοση τιμών στους φασιθέτες τάσης όλων των κόμβων** του υπό μελέτη συστήματος, που αποτελούν τις **μεταβλητές κατάστασής του**. Ο εκτιμητής κατάστασης έχει καθιερωθεί ως η μόνη υπολογιστική διαδικασία των ΚΕΕ που, από ένα σύνολο πλεοναζουσών μετρήσεων, μπορεί να οδηγήσει στην -κατά το δυνατόν- ακριβέστερη αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης ενός δικτύου σε πραγματικό χρόνο.

Η χρησιμότητα της εκτίμησης κατάστασης είθισται να εξετάζεται σε αντιδιαστολή με εκείνη της **ανάλυσης ροής ισχύος**, η οποία αποτέλεσε το πρώτο υπολογιστικό εργαλείο, κατά τη δεκαετία του 1950, για την αποτύπωση της μόνιμης κατάστασης ενός ΣΗΕ, δηλαδή ενός δεδομένου σημείου λειτουργίας στο οποίο το ΣΗΕ παράγει, μεταδίδει και διανέμει την ισχύ που ζητείται από την κατανάλωση. Στο πλαίσιο της ανάλυσης

ροής φορτίου, υπολογίζονται οι φασιθέτες τάσης όλων των κόμβων καθώς και οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος όλων των κλάδων του ΣΗΕ [49].

Παρόλο που τόσο η εκτίμηση κατάστασης, όσο και η ανάλυση ροής φορτίου βασίζονται υπολογιστικά στις τιμές των ίδιων ηλεκτρικών μεγεθών, στην επίλυση των ίδιων μαθηματικών εξισώσεων, και αποτυπώνουν την κατάσταση του συστήματος χρησιμοποιώντας μοντέλα στατικής ανάλυσης, οι ποιοτικές διαφορές τους είναι πολύ σημαντικές. Μέσω της ανάλυσης ροής φορτίου υπολογίζεται η **λειτουργική κατάσταση του συστήματος** για ένα στιγμιότυπο της μόνιμης κατάστασης με βάση τις διαθέσιμες τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών, ενώ μέσω της εκτίμησης κατάστασης παρέχεται η **πιθανότερη κατάσταση του συστήματος** με βάση τα διαθέσιμα μετρητικά δεδομένα, με τις αντίστοιχες ακρίβειές τους [50]. Με άλλα λόγια, η εκτίμηση κατάστασης είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο επεξεργασίας μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, ενώ η ανάλυση ροής φορτίου είναι μια υπολογιστική διαδικασία που είναι αδύνατον να λειτουργήσει αξιόπιστα σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, καθώς η ανίχνευση και το φιλτράρισμα των σφαλμάτων που μεταφέρονται από τα μετρούμενα δεδομένα, ξεπερνά τις δυνατότητές της.

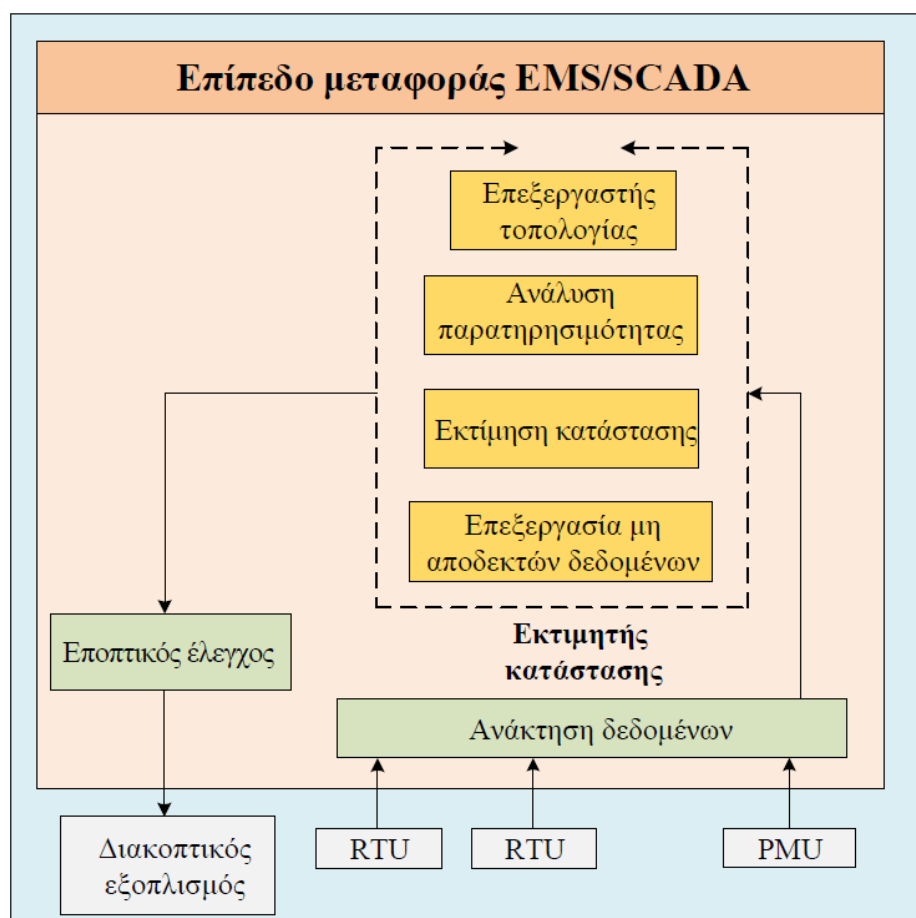
Στο πλαίσιο της εκτίμησης κατάστασης, οι διαθέσιμες τιμές των ηλεκτρικών μεγεθών προκύπτουν από μετρήσεις, συσχετίζονται με συγκεκριμένα σφάλματα και μοντελοποιούνται ως τυχαίες μεταβλητές, με διασπορές που εξαρτώνται από αυτά. Άμεση συνέπεια του μοντέλου είναι ότι ο εκτιμητής κατάστασης λειτουργεί ως ένα είδος φίλτρου των διαθέσιμων «ακατέργαστων» δεδομένων, καθώς είναι σε θέση να αξιολογήσει την ποιότητά τους, να εντοπίσει ποια από αυτά περιέχουν μεγάλα σφάλματα και να μειώσει τον θόρυβο που εισάγουν στο μοντέλο μετρήσεων. Αντίθετα, η ανάλυση ροής φορτίου δεν έχει καμία από τις παραπάνω δυνατότητες, καθώς η μοντελοποίησή της δεν επιτρέπει την αξιολόγηση των τιμών εισόδου στη διαδικασία, ούτε παρουσιάζει προσαρμοστικότητα σε αυτές. Τέλος, η εκτίμηση κατάστασης είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, η λύση του οποίου βασίζεται στη μελέτη ενός υπερκαθορισμένου συστήματος εξισώσεων, καθώς έχει σχεδιαστεί για τη διαχείριση περίσσειας δεδομένων, ενώ η ανάλυση ροής φορτίου συνίσταται στην εύρεση της μοναδικής λύσης ενός συστήματος αλγεβρικών εξισώσεων, οπότε η περίσσεια δεδομένων δεν είναι επιθυμητή [45], [48].

Ο **κλασικός εκτιμητής κατάστασης** αποτελεί ένα από τα πιο θεμελιώδη εργαλεία των σύγχρονων ΚΕΕ για την εποπτεία και τον έλεγχο του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, καθώς και για την υποστήριξη σημαντικών λειτουργιών τους, καθώς επιτελεί ένα σύνολο επιμέρους λειτουργιών με βασικό άξονα την εκτίμηση των μεταβλητών κατάστασης του συστήματος. Οι λειτουργίες του, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.2 διακρίνονται ανάλογα με την επεξεργασία ψηφιακών ή αναλογικών δεδομένων ως εξής [46]:

1. **Επεξεργαστής τοπολογίας (topology processor):** συγκεντρώνει και επεξεργάζεται τα δεδομένα κατάστασης των διακοπτικών μέσων του συστήματος και στη συνέχεια εξάγει το τρέχον μοντέλο του συστήματος (μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος).
2. **Ανάλυση παρατηρησιμότητας (observability analysis):** προσδιορίζεται εάν είναι δυνατή ή όχι η επίλυση του προβλήματος εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος, χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο σύνολο μετρήσεων. Προσδιορίζονται οι μη

παρατηρήσιμοι κλάδοι και οι παρατηρήσιμες νησίδες του συστήματος, εάν υπάρχουν.

3. **Εκτίμηση κατάστασης (state estimation):** προσδιορίζεται η βέλτιστη εκτίμηση κατάστασης του συστήματος, η οποία αποτελείται από μιγαδικές τάσεις ζυγών σε ολόκληρο το ΣΗΕ, με βάση το τρέχον μοντέλο δικτύου και τις συλλεγμένες μετρήσεις από το σύστημα. Παρέχει επίσης τις βέλτιστες εκτιμήσεις για όλες τις ροές ισχύος γραμμών, τα φορτία, τις θέσεις λήψεων των μετασχηματιστών και τις εξόδους των γεννητριών.
4. **Επεξεργασία μη αποδεκτών δεδομένων (bad data processing):** εντοπίζονται και απορρίπτονται μετρητικά δεδομένα που περιέχουν μεγάλα σφάλματα (gross errors), υπό την προϋπόθεση ότι δεν διαταράσσεται η περίσσεια δεδομένων. Ανιχνεύονται επίσης δομικά σφάλματα στη τρέχουσα διαμόρφωση του μοντέλου του δικτύου και προσδιορίζονται εσφαλμένες θέσεις διακοπών, εφόσον υπάρχει αρκετός πλεονασμός μετρήσεων.
5. **Επεξεργασία παραμέτρων και ανίχνευση δομικών σφαλμάτων (Parameter and structural error processing):** εκτιμώνται οι παράμετροι του συστήματος και ανιχνεύονται δομικά σφάλματα που αφορούν τη διαμόρφωση του συστήματος που θεωρήθηκε αρχικά.



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα λειτουργίας ενός σύγχρονου εκτιμητή κατάστασης σε συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [45].

4.3 Κατηγοριοποίηση μεθόδων εκτίμησης κατάστασης

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται οι συνθήκες λειτουργίας και οι παραδοχές υπό τις οποίες μελετάται η Εκτίμηση Κατάστασης των ΣΗΕ, και προσεγγίζονται σε γενικό πλαίσιο οι μαθηματικές εξισώσεις που την διέπουν. Στις επόμενες ενότητες, η γενική μορφή που δίνεται εδώ, εξειδικεύεται.

Τόσο σε φυσικούς, όσο και σε μαθηματικούς όρους, η λειτουργία ενός συστήματος ως προς τη δυναμικότητα που παρουσιάζει, μπορεί να χαρακτηριστεί με μία από τις δύο αμοιβαία αποκλειόμενες συνθήκες λειτουργίας: την ημι-μόνιμη (quasi-steady) και τη μεταβατική (transient) κατάσταση λειτουργίας.

Μεταβατική κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται η κατάσταση κατά την οποία συμβαίνει στο ΣΗΕ μια ξαφνική διαταραχή. Υπό αυτό το πρίσμα και λαμβάνοντας υπόψη τις ηλεκτρομηχανικές διαταραχές που μπορούν να συμβούν στο ΣΗΕ, οι σχετικές εξισώσεις που περιγράφουν τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, είναι αυτές που συνήθως υιοθετούνται και από την ανάλυση μεταβατικής ευστάθειας του συστήματος [51]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), y(t), u(t), p), \\ 0 &= g(x(t), y(t), u(t), p)\end{aligned}\tag{4.1}$$

$$\begin{aligned}x_i^{\min} &\leq x_i \leq x_i^{\max}, i \in \Xi, \\ u_j^{\min} &\leq u_j \leq u_j^{\max}, j \in \Omega \\ p_l^{\min} &\leq p_l \leq p_l^{\max}, l \in \Gamma\end{aligned}$$

όπου το $x \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος, για παράδειγμα η εσωτερική κατάσταση μίας μηχανής ή ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο φορτίο, $y \in \mathbb{R}^m$ είναι το αλγεβρικό διάνυσμα κατάστασης, π.χ. οι μετρούμενοι φασιθέτες τάσεων και ρευμάτων· u είναι το διάνυσμα εισόδου του συστήματος· το p περιλαμβάνει τις παραμέτρους του μοντέλου, ενώ οι f και g είναι μη γραμμικές εξισώσεις. Λόγω φυσικών περιορισμών, ορισμένες δυναμικές μεταβλητές κατάστασης, οι εισροές ελέγχου και οι παράμετροι του μοντέλου περιορίζονται από τα ανώτερα και κατώτερα όριά τους, που αντιπροσωπεύονται από τα σύνολα Ξ , Ω και Γ , αντίστοιχα [52].

Ημι-μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (quasi-steady state) χαρακτηρίζεται η κατάσταση κατά την οποία το σημείο λειτουργίας του συστήματος μεταβάλλεται αποκλειστικά λόγω αργών και ομαλών μεταβολών στο φορτίο ή την παραγωγή. Σε αυτή την περίπτωση, οι γεννήτριες και συσκευές ελέγχου του συστήματος έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν άμεσα τις αργές μεταβολές του, με αποτέλεσμα αμελητέες αλλαγές στις δυναμικές καταστάσεις του συστήματος $x(t)$, δηλαδή $\dot{x}(t) \approx 0$. Συνεπώς το σύστημα περιγράφεται μαθηματικά ως εξής:

$$\begin{aligned}0 &\approx f(x(t), y(t), u(t), p), \\ 0 &= g(x(t), y(t), u(t), p)\end{aligned}\tag{4.2}$$

Σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί μόνο η αλγεβρική κατάσταση του συστήματος, δηλαδή οι φασιθέτες τάσης. Δεδομένου ότι οι είσοδοι του συστήματος δεν είναι πάντα

απόλυτα γνωστές και οι παράμετροι εμπεριέχουν πάντα κάποιο βαθμό ανακρίβειας, χρησιμοποιούνται εκτιμητές κατάστασης ικανοί να επεξεργάζονται στιγμιότυπα μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων του συμβατικού στατικού εκτιμητή κατάστασης (Static State Estimator – SSE), αλλά και των εκτιμητών FASE (Forecasting Aided State Estimator) και TSE (Tracking State Estimator).

Πρακτικά, τα παραπάνω μοντέλα συνεχούς χρόνου, τόσο για τις μεταβατικές όσο και για τις οιονεί σταθερές συνθήκες λειτουργίας, μετατρέπονται σε μορφή διακριτού χρόνου, μέσω κάποιας τεχνικής χρονικής διακριτοποίησης [52]. Τότε η (4.1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$x_k = f(x_{k-1}, y_{k-1}, u_k, p) + w_k, \quad (4.3)$$

$$0 = g(x_k, y_k, u_k, p) + e_k, \quad (4.4)$$

όπου w_k and e_k είναι όροι σφάλματος που περιλαμβάνουν σφάλματα λόγω διακριτοποίησης και προσέγγισης του μοντέλου. Θεωρώντας τους περιορισμούς της εξίσωσης (4.4) ως ψευδομετρήσεις και εξετάζοντάς τις μαζί με τις μετρήσεις, προκύπτει ένα γενικότερο μοντέλο του χώρου καταστάσεων:

$$x_k = f(x_{k-1}, y_{k-1}, u_k, p) + w_k \quad (4.5)$$

$$z_k = h(x_k, u_k, p) + v_k \quad (4.6)$$

Το σύστημα υπόκειται στους ίδιους περιορισμούς με προηγουμένως, όπου z_k είναι το διάνυσμα μετρήσεων, συμπεριλαμβανομένων ψευδομετρήσεων, μετρούμενων αλγεβρικών μεταβλητών, εγχύσεων και ροών πραγματικής και άεργου ισχύος, φασιθετών ρευμάτων κ.λπ. h είναι η μη γραμμική συνάρτηση μέτρησης και v_k το σφάλμα μέτρησης. Τα w_k και v_k συνήθως θεωρούνται κανονικά κατανοημένα, με μηδενική μέση τιμή και πίνακες συνδιακύμανσης, Q_k και R_k , αντίστοιχα. Η γενική αυτή θεώρηση εξειδικεύεται στις επόμενες ενότητες [53].

4.3.1 Στατική εκτίμηση κατάστασης

Η έννοια της εκτίμησης κατάστασης και οι πρώτες αλγοριθμικές εφαρμογές Στατικής Εκτίμησης Κατάστασης (SSE), εισήχθησαν στα ΣΗΕ τη δεκαετία του 1970, όταν οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και οι διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων, άρχισαν να χρησιμοποιούν μεθόδους βασισμένες σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές, με σκοπό να μπορούν να κατανοούν και να ελέγχουν καλύτερα τις ακριβείς συνθήκες λειτουργίας των δικτύων τους σε πραγματικό χρόνο [54].

Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο δεύτερο κεφάλαιο, οι παραδοσιακές μέθοδοι εποπτείας των ΣΗΕ, βασίζονται σε συμβατικές μετρήσεις από συστήματα SCADA, με κύρια μεγέθη ενδιαφέροντος να αποτελούν οι τάσεις ζυγών και οι ροές και εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος.

Ως στατική εκτίμηση κατάστασης ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία προσδιορίζονται τα πλάτη και οι γωνίες της τάσης όλων των ζυγών του ΣΗΕ, σε δεδομένη χρονική στιγμή, χρησιμοποιώντας μετρήσεις συλλεγμένες από ολόκληρο το δίκτυο, μέσω εγκατεστημένων RTUs και του συστήματος SCADA [9].

Ενώ στο πλαίσιο της στατικής εκτίμησης κατάστασης θεωρείται ότι οι μετρήσεις των μεγεθών λαμβάνονται ταυτόχρονα, πρακτικά, λόγω καθυστερήσεων στη μετάδοση των δεδομένων από τα σημεία μέτρησης μέχρι το σημείο συλλογής τους και ταυτόχρονα λόγω έλλειψης κοινής χρονικής ετικέτας σήμανσης στις μετρήσεις, ο συγχρονισμός των μετρήσεων SCADA είναι αδύνατος. Ωστόσο, παρόλο που υπάρχει μια ορισμένη χρονική μετατόπιση μεταξύ των μετρήσεων, η παραδοχή αυτή θεωρείται έγκυρη, καθώς το ΣΗΕ θεωρείται ότι λειτουργεί σε ημι-μόνιμη κατάσταση και η μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας του είναι ομαλή και πολύ αργή σε σχέση με τις χρονικές αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων. Εδώ, έγκειται και ο χαρακτηρισμός του εκτιμητή ως «στατικού», μιας και η εκτίμηση επιλύεται για ένα στιγμιότυπο του συστήματος σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Το θεμελιώδες πρόβλημα, που επιλύεται με τη χρήση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης, ουσιαστικά είναι ένα υπερκαθορισμένο σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων. Η σχέση μεταξύ των μεταβλητών κατάστασης και των μετρήσεων, συγκροτεί το λεγόμενο μοντέλο μέτρησης, το οποίο, για ένα ΣΗΕ N ζυγών, δίνεται στη γενική της μορφή από τη σχέση

$$z = h(x) + e \quad (4.7)$$

όπου $h(\cdot) \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ είναι το διάνυσμα των μη γραμμικών εξισώσεων που σχετίζει το διάνυσμα μετρήσεων $z \in \mathbb{R}^m$ και το πραγματικό, άγνωστο διάνυσμα $x \in \mathbb{R}^n$, $n = 2N < m$, ενώ $e \in \mathbb{R}^m$ είναι το διάνυσμα σφάλματος, που θεωρείται ότι έχει μηδενική μέση τιμή και διαγώνιο πίνακα συνδιασποράς, $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$, με $R_{ii} = \sigma_i^2$ να είναι η διακύμανση της i -οστής μέτρησης [46], [55], [56].

Υπό την παραδοχή γκαουσιανού θορύβου μέτρησης, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της εκτίμησης κατάστασης, προκύπτει συνήθως από τη μεγιστοποίηση της λογαριθμικής συνάρτησης πιθανότητας της παρατήρησης z , με αποτέλεσμα το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης, με αντικειμενική συνάρτηση $J(x)$ [46], [56]:

$$\min_x J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] = e^T R^{-1} e \quad (4.8)$$

Σύμφωνα με τη σχέση (4.8), η εκτίμηση κατάστασης επιλύεται ελαχιστοποιώντας το κριτήριο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (Weighted Least Squares – WLS), μέσω επαναληπτικών αριθμητικών μεθόδων, για παράδειγμα με τη μέθοδο Gauss – τον ή τον – Raphson. Εκτός από τον αλγόριθμο WLS, έχουν προταθεί και άλλες μέθοδοι, όπως η αποζευγμένη WLS και η εκτίμηση κατάστασης ελάχιστης απόλυτης τιμής (Least Absolute Value – LAV). Ωστόσο, η μέθοδος WLS εξακολουθεί να υπερισχύει στις πρακτικές εφαρμογές [46]. Ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο επίλυσης, οι περισσότερες μέθοδοι στη βιβλιογραφία αναφέρονται στο μοντέλο μέτρησης (4.7), το οποίο χρησιμοποιείται ως βάση για τον επακόλουθο καθορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο. Το ακριβές αναλυτικό μοντέλο στατικής (συμβατικής) εκτίμησης κατάστασης, αναλύεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 5.

4.3.2 Δυναμική εκτίμηση κατάστασης

Τα ΣΗΕ λειτουργούν και ελέγχονται με ιεραρχικό τρόπο, ενώ οι απαιτούμενοι χειρισμοί του, έχουν σχεδιαστεί για την αντιμετώπιση ποικίλων δυναμικών φαινομένων σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Για παράδειγμα, η αυτόματη ρύθμιση τάσης σύγχρονων γεννητριών βασίζεται αποκλειστικά σε τοπικά διαθέσιμες μετρήσεις, ενώ οι

περιορισμοί τάσης (voltage setpoints) μπορούν να μεταβληθούν μόνο μετά από εντολή προερχόμενη από το κεντρικό σύστημα ελέγχου. Υπάρχει, ως εκ τούτου, ένας ιεραρχικός αποκεντρωμένος έλεγχος κλειστού βρόχου που ανταποκρίνεται στις τοπικές μεταβολές του συστήματος, ενώ ο κεντρικός έλεγχος ανοιχτού βρόχου ενεργοποιείται από τον χειριστή μετά από μια διαδικασία λήψης αποφάσεων, ανταποκρινόμενος στις ανάγκες ευρύτερου τμήματος του συστήματος.

Σύμφωνα με αυτή τη φιλοσοφία σχεδιασμού, το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών εποπτείας και ελέγχου στα ΚΕΕ, βασίζεται στο μοντέλο σταθερής κατάστασης του συστήματος. Στην πραγματικότητα όμως τα ΣΗΕ δεν λειτουργούν ποτέ σε συνθήκες σταθερής κατάστασης, λόγω της ύπαρξης στοχαστικών μεταβολών τόσο στην παραγωγή, όσο και στη ζήτηση. Η εγγενής στοχαστικότητα στα υπό έλεγχο χαρακτηριστικά του δικτύου εντείνεται λόγω της διευρυμένης ενσωμάτωσης διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, σύνθετων φορτίων και νέων απαιτήσεων άμεσης απόκρισης στη ζήτηση, προσδίδοντας έτσι στο σύστημα μεγαλύτερες αβεβαιότητες, ως προς τα δυναμικά του χαρακτηριστικά [51].

Κατά συνέπεια, η θεωρούμενη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των ΣΗΕ, καθίσταται αμφισβητήσιμη και η στατική εκτίμηση κατάστασης δεν είναι σε θέση να αποτυπώσει τη δυναμική του συστήματος σε πλήρες, λειτουργικό περιβάλλον. Οι μέθοδοι στατικής εκτίμησης κατάστασης που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα σημερινά EMS, επανεκτιμώνται και ενισχύονται με νέες τεχνικές εποπτείας του συστήματος, όπως η **δυναμική εκτίμηση κατάστασης** (Dynamic State Estimation – DSE). Η DSE είναι σε θέση να αποδώσει με ακρίβεια τη δυναμική των καταστάσεων του συστήματος και στο μέλλον θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον έλεγχο και την προστασία των ΣΗΕ [57], [58], [59].

Η εξίσωση (4.7) χρησιμοποιείται για τη διατύπωση του προβλήματος στατικής εκτίμησης κατάστασης, αγνοώντας κάθε πληροφορία που αφορά στη μετάβαση μεταξύ καταστάσεων, χωρίς δηλαδή μνήμη των εκτιμήσεων καταστάσεων προηγούμενων εκτελέσεων του αλγορίθμου [55]. Οι πληροφορίες σχετικά με το διάνυσμα κατάστασης σε προηγούμενες χρονικές στιγμές, μπορούν να αξιοποιηθούν σε ένα σχήμα πρόβλεψης, με σκοπό να βοηθήσουν τις επόμενες εκτελέσεις της εκτίμησης κατάστασης, οδηγώντας στη διατύπωση της δυναμικής εκτίμησης κατάστασης (DSE) [60], [61]. Με τις αυξημένες αβεβαιότητες που εισάγονται στο σύστημα, η δυναμική εκτίμηση κατάστασης προσφέρει το πλεονέκτημα της ακριβούς αποτύπωσης των δυναμικών, γρήγορων μεταβολών του συστήματος, με αποτέλεσμα να καθίσταται ζωτικής σημασίας τόσο για την εποπτεία και τον έλεγχο, όσο και για την προστασία των σύγχρονων ΣΗΕ [51].

Η πλειονότητα των προτεινόμενων μεθόδων DSE είναι παραλλαγές της τεχνικής του φίλτρου Kalman (KF), η οποία βασίζεται στην Μπεϋζιανή αξιοποίηση της εκ των προτέρων (*a priori*) γνώσης των καταστάσεων ενός συστήματος στη διάρκεια του χρόνου, μαζί με διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων. Οι μέθοδοι Kalman αξιοποιούν τις μετρήσεις σε συνδυασμό με το μοντέλο μετάβασης κατάστασης του συστήματος, για τον υπολογισμό μιας βέλτιστης εκτίμησης κατάστασης. Η διαδικασία αποτελείται συνήθως από δύο στάδια:

1. την πρόβλεψη, κατά την οποία γίνεται χρονική ενημέρωση του συστήματος εξισώσεων,

2. και τη διόρθωση, που γίνεται ενημέρωση των μετρήσεων.

Ανάλογα με το θεωρούμενο μοντέλο μετάβασης, χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι KF [12], [13]: Εκτεταμένο Φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter - EKF), Unscented Φίλτρο Kalman (Unscented Kalman Filter - UKF), Cubature Φίλτρο Kalman (Cubature Kalman Filter - CKF) και Φίλτρο Kalman Συνόλων (Ensemble Kalman Filter - EnKF). Τα φίλτρα Kalman, η μαθηματική τους διατύπωση, καθώς και η χρήση τους στους αλγορίθμους εκτίμησης κατάστασης, αναλύονται διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο.

4.4 Η εκτίμηση κατάστασης υπό διαφορετικές μετρητικές συσκευές

Οι πιο κοινές πηγές δεδομένων μέτρησης στα σύγχρονα ΣΗΕ είναι τα συστήματα SCADA και WAMS. Οι κλασικοί αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης χρησιμοποιούν μετρητικά δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα SCADA, μέσω μονάδων RTU εγκατεστημένων σε όλο το δίκτυο – σε σταθμούς παραγωγής και κατά μήκος του συστήματος μεταφοράς και διανομής [55].

Τα υπάρχοντα συστήματα SCADA έχουν γενικά μεγάλες περιόδους ενημέρωσης δεδομένων για τα σημερινά πρότυπα, περίπου 2–8 δευτερόλεπτα, προσφέρουν μέτρια ακρίβεια μέτρησης, ενώ οι συλλεγόμενες μετρήσεις αποτελούνται από μετρήσεις τάσεων σε ζυγούς, ροών και εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος [62]. Αντίθετα, τα συστήματα WAMS, παρέχουν υψηλής ακρίβειας συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσεων και ρευμάτων, από μονάδες PMU, και πολύ ταχείς ρυθμούς αναφοράς, (ως και 100 φορές ταχύτερους από το SCADA). Υπό αυτό το πρίσμα, η αξιοποίηση δεδομένων PMU στην εκτίμηση κατάστασης, παρέχει σημαντικά οφέλη για τις διαδικασίες εποπτείας και ελέγχου των ΣΗΕ και για το σκοπό αυτό, τα δίκτυα συγχρονισμένων φασιθετών αναπτύσσονται με ταχείς ρυθμούς παγκοσμίως.

Καθώς όμως η ευρεία εγκατάσταση των PMU εξακολουθεί να είναι περιορισμένη λόγω τεχνικών και οικονομικών περιορισμών, στη συντριπτική πλειονότητα των συστημάτων, οι μετρήσεις συγχρονισμένων φασιθετών δεν επαρκούν για να εξασφαλίσουν την πλήρη παρατηρησιμότητα του δικτύου, για την εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης. Κατά συνέπεια, τα μετρητικά δεδομένα WAMS, εντάσσονται μεν ως δεδομένα εισόδου σε υλοποιήσεις εκτιμητών κατάστασης, συνυπάρχουν όμως δε, με συμβατικές μετρήσεις SCADA.

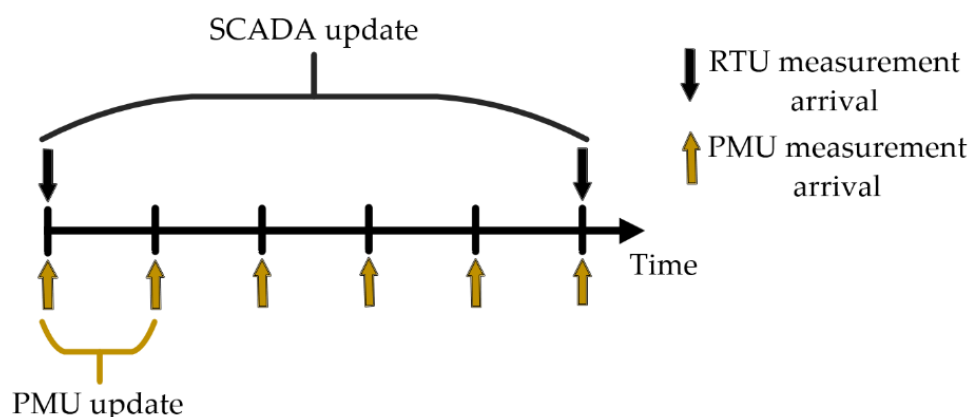
4.4.1 Υβριδική εκτίμηση κατάστασης

Η ενσωμάτωση μετρήσεων συγχρονισμένων φασιθετών στην εκτίμηση κατάστασης και η ταυτόχρονη χρήση τους με συμβατικές μετρήσεις, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και την εφαρμογή βελτιωμένων αλγορίθμων, **υβριδικής εκτίμησης κατάστασης** (Hybrid State Estimation – HSE) ακριβέστερων, κατά περίπτωση ταχύτερων και με μεγαλύτερη περίσσεια δεδομένων [63].

Η υβριδική εκτίμηση κατάστασης παρουσιάζει βελτιωμένες επιδόσεις, όσον αφορά την ακρίβεια και την επεξεργασία εσφαλμένων δεδομένων, καθώς αυτές συνδέονται στενά με την περίσσεια μετρήσεων. Ωστόσο, η ενσωμάτωση δεδομένων από πολλαπλές πηγές, παρά τα οφέλη της, δεν είναι τόσο απλή στην εφαρμογή της [64]. Οι πιο συνήθεις προκλήσεις για τη διαμόρφωση της HSE μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω σε δύο πτυχές:

1. Διαφορετικοί ρυθμοί αναφοράς και έλλειψη χρονικής συνάφειας (time skewness). Οι μετρήσεις PMU ενημερώνονται με πολύ υψηλότερο ρυθμό από τις μετρήσεις RTU, ενώ παράλληλα υπάρχει χρονική μετατόπιση μεταξύ των λαμβανόμενων μετρήσεων, δηλαδή δεν υπάρχει συγχρονισμός των αφίξεων των μετρήσεων από διαφορετικές πηγές δεδομένων. Έτσι, είναι πιθανό οι μετρήσεις πεδίου να μην σχηματίζουν ένα κοινό σύνολο δεδομένων, ληφθέν σε ακριβή χρονική στιγμή. Επιπλέον, εμφανίζονται χρονικές ασυνέπειες και λόγω διαφορετικών καθυστερήσεων επικοινωνίας μεταξύ των αισθητήρων [63], [64].
2. Διαφορετικοί τύποι και επίπεδα ακρίβειας των μετρούμενων μεγεθών. Οι μετρούμενες ποσότητες από τα RTU και τα PMU είναι διαφορετικές, γεγονός που οδηγεί σε προκλήσεις στις πρακτικές υλοποιήσεις, καθώς το υπάρχον λογισμικό εκτίμησης κατάστασης πρέπει να τροποποιηθεί [19]. Επίσης, τα διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας μεταξύ των τύπων αισθητήρων έχουν αντίκτυπο στην επιλογή των κατάλληλων βαρών μέτρησης, γεγονός που με τη σειρά του επηρεάζει αρνητικά τη σύγκλιση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης σε περίπτωση υπερβολικά διαφορετικών τιμών [55], [66], [67].

Στο σχήμα 4.3 απεικονίζεται η χρονική σειρά αφίξεων μετρήσεων από RTUs και PMUs σε ένα σύστημα SCADA. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν την περιοδική ενημέρωση του SCADA, που βασίζεται στις αφίξεις δεδομένων RTU, ενώ οι χρυσές γραμμές δείχνουν τις πιο συχνές ενημερώσεις από PMUs.



Σχήμα 4.3: Χρονική ασυμφωνία μεταξύ των μετρήσεων RTU και PMU [55].

Στο πλαίσιο των παραπάνω, παρουσιάζονται στη συνέχεια προτεινόμενες μέθοδοι για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των δυσχερειών που ανακύπτουν κατά την εφαρμογή της HSE, σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι οι υβριδικές μέθοδοι στατικής εκτίμησης κατάστασης κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους και την αλγοριθμική διαδικασία, ενώ οι μέθοδοι δυναμικής εκτίμησης ταξινομούνται κυρίως σε σχέση με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο χώρου καταστάσεων. Στη συνέχεια σχηματίζονται υποκατηγορίες λαμβάνοντας υπόψη τη συμβολή και το μαθηματικό υπόβαθρο κάθε μεθόδου [55].

4.4.2 Υβριδική στατική εκτίμηση κατάστασης

Αξιοποιώντας μετρήσεις RTU και PMU, η υβριδική στατική εκτίμηση κατάστασης (Hybrid Static State Estimation – HSSE) είναι η πιο διαδεδομένη μορφή εκτίμησης κατάστασης στα KEE. Τα RTU αποτελούν τη συμβατική πηγή δεδομένων, ενώ η

ανάπτυξη των PMU εμπλουτίζει και βελτιώνει το προφίλ μετρήσεων. Οι διάφορες προτεινόμενες μέθοδοι HSSE κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν.

Μια απ' τις πιο σημαντικές προκλήσεις στην HSSE οφείλεται στα μη συγχρονισμένα δεδομένα που παρέχουν οι μονάδες RTU και PMU, καθώς τα δεδομένα από PMU, ενημερώνονται με πολύ υψηλότερη συχνότητα από τα RTU.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, συμπεριλαμβανομένης της ανακατασκευής κατάστασης/μετρήσεων (state/space reconstruction) και της προσωρινής αποθήκευσης των μετρήσεων (measurement buffering).

Σε μία από τις υπάρχουσες υλοποιήσεις, η ανακατασκευή κατάστασης, χρησιμοποιεί έναν γραμμικό εκτιμητή κατάστασης για το χρονικό διάστημα μεταξύ των σαρώσεων RTU, αποκλειστικά με μετρήσεις PMU και ψευδομετρήσεις ισχύος και τάσεων ζυγών – για να είναι παρατηρήσιμο το υπό μελέτη δίκτυο – ενώ στις χρονικές στιγμές που είναι διαθέσιμοι και οι δύο τύποι δεδομένων, επιλύεται μια συνολική, μη γραμμική εκτίμηση κατάστασης. Οι ψευδομετρήσεις παράγονται είτε από την τελευταία εκτέλεση της HSSE και με τα δύο είδη δεδομένων, είτε από τις προηγούμενες ανακατασκευασμένες τιμές της γραμμικής εκτίμησης PMU. Έτσι μπορεί να βελτιωθεί η παρατηρησιμότητα του συστήματος, αξιοποιώντας δεδομένα PMU και ψευδομετρήσεις που προέρχονται από προηγούμενες εκτιμήσεις κατάστασης και εισάγονται στο σύστημα για λόγους επιλυσιμότητας. Όλες οι προτεινόμενες προσεγγίσεις της ανακατασκευής κατάστασης, ανεξάρτητα από τον ακριβή τρόπο υλοποίησης, χρησιμοποιούν ανακατασκευή των μη διαθέσιμων στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή μετρήσεων, είτε των μετρήσεων RTU, είτε μετρήσεων PMU σε μη παρατηρήσιμα σημεία του δικτύου, μέσω στατιστικών διαδικασιών και προηγούμενων εκτελέσεων της εκτίμησης κατάστασης [55], [68], [69], [70], [71], [72].

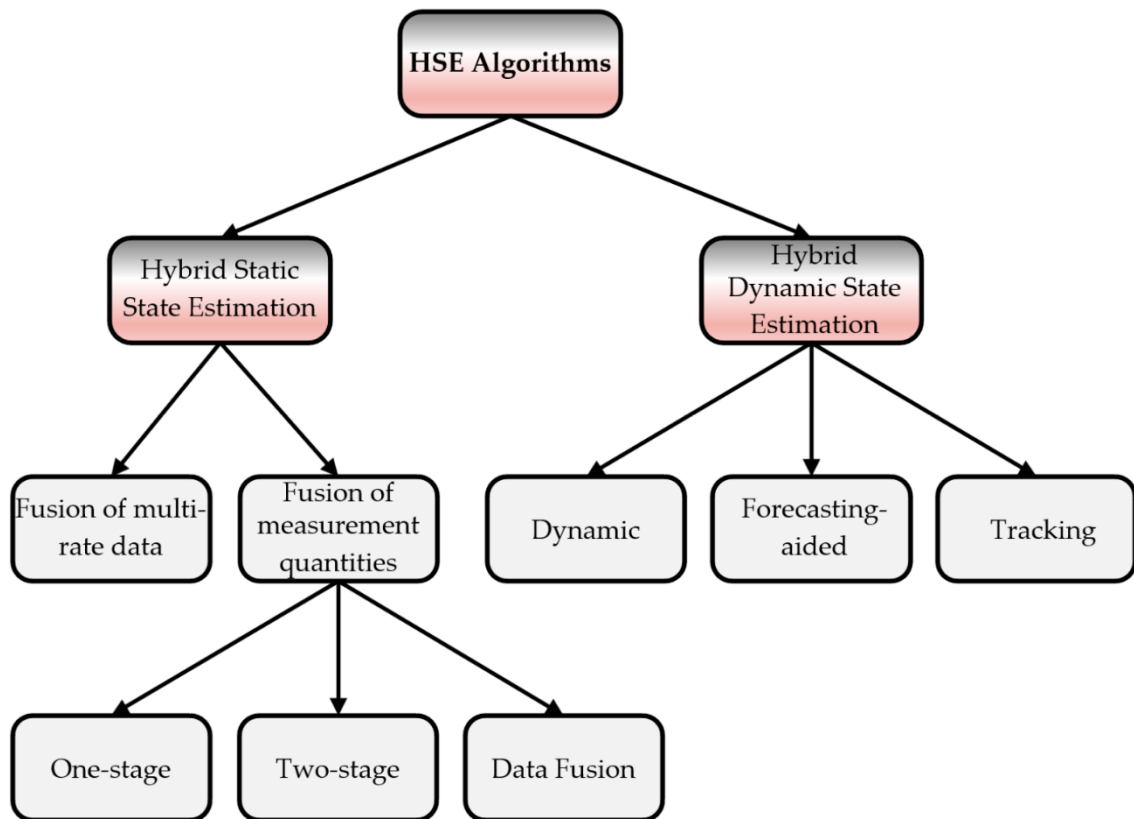
Δεδομένου ότι τα PMU αναφέρουν μετρήσεις σε πολύ υψηλότερη συχνότητα από τα RTU, ένας σημαντικός όγκος δεδομένων PMU είναι διαθέσιμος μεταξύ διαδοχικών σαρώσεων RTU. Ωστόσο, η αφθονία δεδομένων PMU μπορεί να εισάγει θόρυβο και ασυνέπειες λόγω των ταχέων αλλαγών στις καταστάσεις του συστήματος. Η προσωρινή αποθήκευση μετρήσεων συμβάλλει στον μετριασμό αυτών των ζητημάτων, διατηρώντας και θέτοντας υπό επεξεργασία ένα σύνολο διαδοχικών μετρήσεων PMU προσωρινά αποθηκευμένων για καθορισμένο χρονικό διάστημα [73]. Επιλέγοντας κατάλληλο μέγεθος χρονικού διαστήματος ρύθμισης, τα αποθηκευμένα δεδομένα PMU αναλύονται, για να μειωθούν οι επιδράσεις του θορύβου και των διακυμάνσεων που προκαλούνται λόγω της δυναμικής του συστήματος και στη συνέχεια, οι επεξεργασμένες μετρήσεις συνδυάζονται με τα δεδομένα RTU όταν αυτά καθίστανται διαθέσιμα. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η διαδικασία εκτίμησης κατάστασης επωφελείται από την υψηλή συχνότητα αναφοράς των PMU, διατηρώντας παράλληλα τη σταθερότητα και την ακρίβεια του συστήματος [74].

Μια άλλη σημαντική μορφή της υβριδικής εκτίμησης κατάστασης βασίζεται στο συνδυασμό των μετρήσεων φασιθετών με τις συμβατικές μετρήσεις σε έναν ενοποιημένο εκτιμητή. Λόγω των διαφορετικών ιδιοτήτων των μετρούμενων μεγεθών, η άμεση ενσωμάτωση των μετρήσεων φασιθετών στους υπάρχοντες εκτιμητές κατάστασης απαιτεί σημαντικές τροποποιήσεις στους αλγόριθμους εκτίμησης κατάστασης αλλά και στο

υπάρχον συμβατικό λογισμικό EMS. Οι μέθοδοι HSSE που προτείνονται στη βιβλιογραφία για την απευθείας ενσωμάτωση μετρήσεων από διαφορετικούς τύπους αισθητήρων μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο αξιοποίησης των δεδομένων: μέθοδοι HSSE ενός σταδίου (One-Stage HSSE – OSHSSE), μέθοδοι HSSE δύο σταδίων (Two-Stage HSSE – TSHSSE), και μέθοδοι ενοποιημένης HSSE (Fusion HSSE – FHSSE) [64].

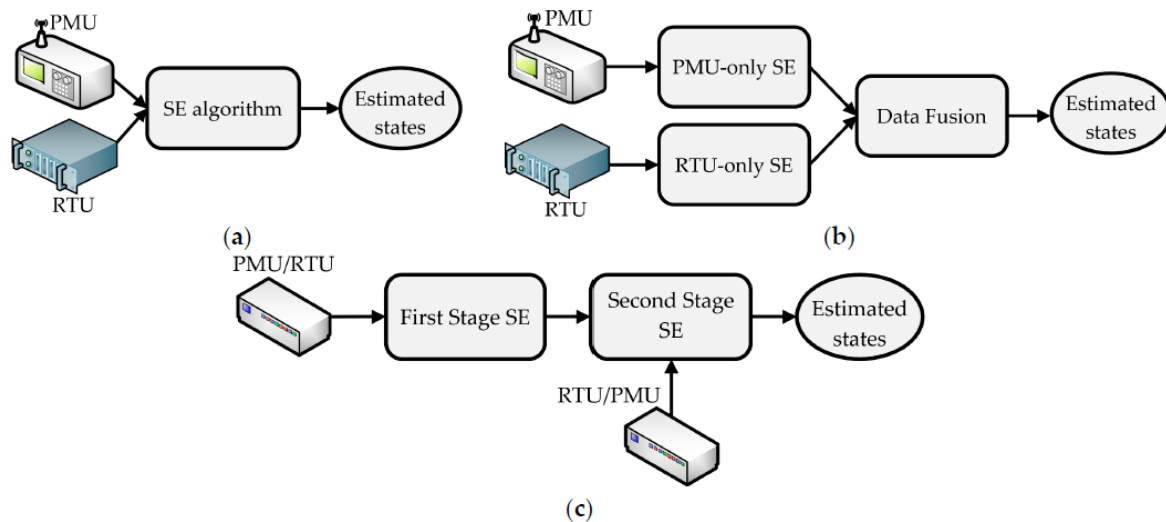
Οι μέθοδοι HSSE ενός σταδίου χρησιμοποιούνται για τον άμεσο συνδυασμό των μετρήσεων RTU και PMU σε μια ενιαία μαθηματική διατύπωση. Εκτός από την απαραίτητη τροποποίηση των υφιστάμενων αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης για την ενσωμάτωση των μετρήσεων φασιθετών, παρουσιάζονται και ορισμένες ακόμα προκλήσεις στην εφαρμογή αυτής της μεθόδου, κυρίως σε θέματα αριθμητικής ευστάθειας και απόδοσης του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης [75]. Η λογική της HSSE σε δύο στάδια βασίζεται στον διαχωρισμό των μετρήσεων RTU και PMU, εκτέλεση συμβατικής εκτίμησης κατάστασης μόνο με RTU, και γραμμικής εκτίμησης κατάστασης, μόνο με PMU, σε ξεχωριστά στάδια. Έτσι δίνεται η δυνατότητα παράλληλης χρήσης καρτεσιανών και πολικών εξισώσεων στην εκτίμηση κατάστασης, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η υπόθεση ότι οι μετρήσεις RTU και PMU είναι ασυσχέτιστες [76], [77].

Το σχήμα 4.4 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων υβριδικής εκτίμησης κατάστασης, σε υβριδική στατική εκτίμηση και υβριδική δυναμική εκτίμηση κατάστασης και στη συνέχεια τις δύο υποκατηγορίες σε επιμέρους αλγορίθμους.



Σχήμα 4.4: Κατηγοριοποίηση μεθόδων Υβριδικής Εκτίμησης Κατάστασης [55].

Σε παρόμοια λογική με την HSSE δύο σταδίων, σε σχέση με τον διαχωρισμό των εκτιμητών κατάστασης ανάλογα με το είδος του μετρητικού οργάνου, η υβριδική εκτίμηση κατάστασης με συγχώνευση αποτελεσμάτων (FHSSE) περιέχει την συμβατική και την γραμμική εκτίμηση κατάστασης σε παράλληλη λειτουργία. Τα αποτελέσματά τους συγχωνεύονται για να παραχθεί η τελική εκτίμηση κατάστασης λαμβάνοντας υπόψη και τα αντίστοιχα βάρη των μετρήσεων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα παράλληλης εκτέλεσης της εκτίμησης κατάστασης οδηγώντας σε μειωμένο υπολογιστικό φόρτο, με την προϋπόθεση ότι το ΣΗΕ είναι πλήρως παρατηρήσιμο τόσο από τα εγκατεστημένα RTU, όσο και από τα PMU [78], [79].



Σχήμα 4.5: Τυπική δομή των μεθόδων υβριδικής εκτίμησης κατάστασης: (a) OSHSSE, (b) FHSSE (c) TSHSSE [55].

Το σχήμα 4.5 παρουσιάζει τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις στην εκτίμηση κατάστασης, σε σχέση με τον αριθμό των σταδίων διαχείρισης των μετρήσεων από RTU και PMU. Τα τρία διαφορετικά είδη εκτίμησης είναι: (α) υβριδική στατική εκτίμηση κατάστασης ενός σταδίου, κατά την οποία τα δεδομένα από RTUs και PMUs τίθενται υπό επεξεργασία σε έναν ενιαίο αλγόριθμο, (β) υβριδική στατική εκτίμηση κατάστασης με συγχώνευση αποτελεσμάτων, κατά την οποία εκτελούνται 2 διαδικασίες εκτίμησης κατάστασης, παράλληλα, μία για κάθε είδος μετρητικών δεδομένων, και στη συνέχεια γίνεται συγχώνευση αποτελεσμάτων για την τελική εκτίμηση, και (γ) υβριδική στατική εκτίμηση κατάστασης δύο σταδίων, κατά την οποία εκτελείται μία εκτίμηση κατάστασης για τον ένα τύπο μετρητικών δεδομένων και στη συνέχεια τα αποτελέσματα εισάγονται στο δεύτερο στάδιο μαζί με τον δεύτερο τύπο μετρητικών δεδομένων για την τελική εκτίμηση.

4.4.3 Υβριδική δυναμική εκτίμηση κατάστασης

Όπως έχει ήδη αναλυθεί προηγουμένως, οι περισσότεροι από τους εκτιμητές κατάστασης που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα EMS και βασίζονται σε μοντέλα ΣΗΕ σταθερής κατάστασης, δεν λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική του συστήματος, δηλαδή τη μεταβολή των συνθηκών λειτουργίας με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χρήση συμβατικών μη συγχρονισμένων μετρήσεων που παρέχονται απ' το σύστημα SCADA και αδυνατούν να παρακολουθήσουν τις δυναμικές μεταβολές του

ΣΗΕ. Με την αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων στο δίκτυο PMUs, καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη μεθόδων υβριδικής δυναμικής εκτίμησης κατάστασης (HDSE) για την εποπτεία και τον έλεγχο του ΣΗΕ, χρησιμοποιώντας συγχρονισμένες μετρήσεις υψηλής συχνότητας για την παρακολούθηση των δυναμικών αλλαγών του συστήματος, ενισχύοντας σημαντικά τις δυνατότητες των υφιστάμενων διαδικασιών εκτίμησης κατάστασης. Η HDSE μπορεί να κατηγοριοποιηθεί στις εξής τρεις κύριες μεθόδους: δυναμική εκτίμηση κατάστασης (DSE), εκτίμηση κατάστασης με τη βοήθεια πρόβλεψης (FASE) και εκτίμηση κατάστασης παρακολούθησης (TSE).

Οι μέθοδοι DSE επεκτείνουν το διάνυσμα κατάστασης συμπεριλαμβάνοντας σε αυτό τις εσωτερικές καταστάσεις διαφόρων στοιχείων του ΣΗΕ, όπως είναι για παράδειγμα οι σύγχρονες μηχανές, χρησιμοποιώντας μη γραμμικά μοντέλα του χώρου καταστάσεων. Αυτή η προσέγγιση, αν και είναι υπολογιστικά απαιτητική, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για περιπτώσεις που ενδιαφέρει η παρακολούθηση γρήγορων μεταβολών κάποιων παραμέτρων του συστήματος και παρέχει εξαιρετικά λεπτομερή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας τις μετρήσεις PMU. Η DSE χρησιμοποιεί συχνά μεθόδους συγχώνευσης δεδομένων πολλαπλών ρυθμών, επιτρέποντας την ανεξάρτητη επεξεργασία ασύγχρονων δεδομένων από RTU και PMU και στη συνέχεια τη συγχώνευση τους σε μια ενοποιημένη εκτίμηση. Επιπλέον, η DSE ενσωματώνει διάφορες τεχνικές, όπως η ανάλυση μοναδιαίου φάσματος (SSA), για τον εντοπισμό ενδεχόμενων διαταραχών του συστήματος και την παρακολούθηση μεταβατικών καταστάσεων [55], [80].

Η FASE υποθέτει οιονεί σταθερές συνθήκες λειτουργίας, όπου οι αλλαγές είναι σταδιακές, γεγονός που την καθιστά λιγότερο πολύπλοκη από την DSE. Ενσωματώνοντας τεχνικές συγχώνευσης δεδομένων και πρόβλεψης, για τον χειρισμό ζητημάτων όπως η έλλειψη δεδομένων – για παράδειγμα στις υλοποιήσεις FASE πολλαπλών περιοχών – η FASE επιτρέπει στα κατανεμημένα συστήματα να εκτιμούν ανεξάρτητα τις καταστάσεις χρησιμοποιώντας τοπικά δεδομένα. Μέθοδοι όπως το Cubature φίλτρο Kalman (CKF) και τεχνικές εξομάλυνσης βοηθούν την FASE να διατηρεί αξιόπιστες εκτιμήσεις παρά τις καθυστερήσεις επικοινωνίας ή μετρήσεων. Η ισορροπία μεταξύ υπολογιστικής απόδοσης και αξιοπιστίας της εκτίμησης καθιστά την FASE κατάλληλη για την ενίσχυση των εκτιμητών σταθερής κατάστασης.

Η TSE παρέχει μια ακόμα πιο απλοποιημένη προσέγγιση, εστιάζοντας στην εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο χωρίς βαθιά δυναμική παρακολούθηση, καθιστώντας την ιδιαίτερα χρήσιμη για ξαφνικές αλλαγές στις καταστάσεις του συστήματος, έχοντας τη δυνατότητα να λειτουργήσει επικουρικά σε υπάρχοντες αλγορίθμους στατικής εκτίμησης κατάστασης, για τη διατήρηση της αξιοπιστίας, υπό την εμφάνιση λανθασμένων μετρήσεων. Οι μέθοδοι TSE χρησιμοποιούν συχνά πρόβλεψη μετρήσεων από RTUs, επικουρικά, για τη διατήρηση της παρατηρησιμότητας του συστήματος και χρησιμοποιούν φιλτράρισμα μέσω τεχνικών φίλτρων Kalman για τη διαχείριση απότομων αλλαγών στην κατάσταση του συστήματος και ταυτόχρονα για τη μείωση της υπολογιστικής επιβάρυνσης.

Γενικά, οι μέθοδοι HDSE προσφέρουν προσαρμοσμένες λύσεις για την εκτίμηση κατάστασης, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του συστήματος, επιτρέποντας την αποτελεσματική εκτίμηση με διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων, δυναμικές συνθήκες και υπολογιστικούς περιορισμούς. Με τη συνδυασμένη χρήση διαφορετικών μεθόδων

εκτίμησης κατάστασης, DSE, FASE και TSE, τα σύγχρονα δίκτυα μπορούν να επιτύχουν αυξημένη ακρίβεια και αξιοπιστία παρακολούθησης.

4.4.4 Γραμμική εκτίμηση κατάστασης – Εκτίμηση κατάστασης αποκλειστικά με μετρήσεις PMU

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες ενότητες, για την αξιοποίηση των διαθέσιμων μετρήσεων PMU και την ενσωμάτωσή τους στους υπάρχοντες εκτιμητές κατάστασης, χρησιμοποιούνται υβριδικές προσεγγίσεις, βασισμένες σε τεχνικές παράλληλης εκτίμησης κατάστασης, ανάλογα με τον τύπο μετρητικών δεδομένων ή εκτίμησης κατάστασης πολλαπλών σταδίων.

Οι λύσεις αυτές αναπτύχθηκαν λαμβάνοντας υπόψη ότι η ένταξη των PMU στο δίκτυο πραγματοποιείται σταδιακά, λόγω κυρίως του αυξημένου κόστους εγκατάστασής τους και συνεπώς, στο άμεσο μέλλον, η διαθέσιμη μετρητική υποδομή θα εξακολουθεί να αποτελείται τόσο από συμβατικές όσο και από συγχρονισμένες μετρήσεις.

Έτσι, λόγω της μικρής ενσωμάτωσης μονάδων PMU στα υφιστάμενα ηλεκτρικά δίκτυα, η εκτίμηση κατάστασης βασισμένη αποκλειστικά σε μετρήσεις PMU, έχει -προς το παρόν- μικρό πεδίο πρακτικής εφαρμογής και περιορίζεται σε ερευνητικό – ακαδημαϊκό επίπεδο και σε κάποιες μικρής κλίμακας πραγματικές εφαρμογές, παράλληλα με τους υπάρχοντες εκτιμητές κατάστασης, για παράδειγμα σε υποσταθμούς συστημάτων μεταφοράς [81].

Ωστόσο, λόγω των προαναφερθέντων σημαντικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα PMU, είναι λογικό να αναμένεται ότι με την περαιτέρω ένταξη μονάδων PMU στο δίκτυο, στο μέλλον, η εποπτεία και ο έλεγχος των ΣΗΕ θα βασίζονται εξ ολοκλήρου σε ένα σύστημα μετρήσεων αποκλειστικά βασιζόμενο σε PMU.

Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα που σχετίζεται με τη χρήση μετρήσεων συγχρονισμένων φασιθετών από PMU, αλλά και με το γενικό ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με την εκτίμηση κατάστασης αποκλειστικά με μετρήσεις PMU, είναι η δυνατότητα σχηματισμού γραμμικών συναρτήσεων μέτρησης για τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Αυτή η δυνατότητα εξαρτάται άμεσα και από την επιλογή των μεταβλητών κατάστασης που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του συστήματος.

Στην περίπτωση των συστημάτων μεταφοράς, δεδομένου ότι οι τοπολογίες των δικτύων είναι συνήθως βροχοειδείς, η χρήση των τάσεων των κόμβων ως μεταβλητών κατάστασης είναι η πιο ελκυστική λύση, καθώς επιτρέπει την ελαχιστοποίηση του αριθμού των μεταβλητών που απαιτούνται για την αναπαράσταση του συστήματος [82].

Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα ενός εκτιμητή κατάστασης που χρησιμοποιεί αποκλειστικά μετρήσεις συγχρονισμένων φασιθετών, συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Οι μετρήσεις αποτελούν γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών κατάστασης, γεγονός που οδηγεί σε έναν γραμμικό εκτιμητή κατάστασης (Linear State Estimator – LSE), αποτελούμενο από έναν μη επαναληπτικό αλγόριθμο, με χαμηλό υπολογιστικό κόστος.
- Οι μετρήσεις διαθέτουν χρονική σήμανση, επιτρέποντας την χρονική ευθυγράμμισή τους κατά τη συλλογή των δεδομένων. Αυτό διασφαλίζει ότι κάθε σύνολο

μετρήσεων που εισάγεται στον LSE αποτελείται από μετρήσεις που έχουν ληφθεί την ίδια χρονική στιγμή.

- Καθώς τα PMU μετρούν άμεσα τη φασική γωνία, δεν απαιτείται επιλογή ζυγού αναφοράς, με αυθαίρετα ορισμένη τιμή φασικής γωνίας.
- Ο πολύ υψηλός ρυθμός ροής δεδομένων των PMU (δεκάδες σύνολα δεδομένων ανά δευτερόλεπτο) επιτρέπει τη δημιουργία ενός εκτιμητή κατάστασης με υψηλό ρυθμό ανανέωσης και πολύ μικρή χρονική καθυστέρηση. Έτσι, η διαδικασία εκτίμησης κατάστασης μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται σε πραγματικό χρόνο.
- Τα PMU μετρώντας φασιθέτες τάσης και ρεύματος ξεχωριστά για κάθε φάση, καθιστούν δυνατή την τριφασική εκτίμηση κατάστασης, ανεξαρτήτως της συμμετρίας των παραμέτρων του δικτύου και της ισορροπίας ροής ισχύος [83].

Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.3.1., το μοντέλο μετρήσεων για τις συμβατικές εκτιμήσεις κατάστασης διατυπώνεται γενικά από την εξίσωση (4.7), η συμβατική εκτίμηση κατάστασης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μετρήσεις μέτρων τάσεων των ζυγών, ροών και εγχύσεων ενεργού και αέργου ισχύος και το διάνυσμα κατάστασης περιλαμβάνει τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων των ζυγών. Επομένως, το μοντέλο δικτύου $h(x)$ είναι μια μη γραμμική συνάρτηση βασισμένη στο μοντέλο ροής ισχύος.

Αντίθετα, αν έχουμε αποκλειστικά μετρήσεις PMU, οι μεταβλητές κατάστασης εκφραστούν σε καρτεσιανές συντεταγμένες και οι μετρήσεις PMU μετατραπούν επίσης σε καρτεσιανές συντεταγμένες, μπορεί να επιτευχθεί ένα γραμμικό μοντέλο τόσο του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης όσο και των ίδιων των συναρτήσεων μέτρησης.

Σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να αποδειχθεί ότι οι μετρήσεις φασιθετών τάσης μπορούν να συσχετιστούν άμεσα με τις μεταβλητές κατάστασης:

$$h_{v_{i(r)}} = v_{i(r)} \quad (4.9)$$

$$h_{v_{i(x)}} = v_{i(x)} \quad (4.10)$$

όπου $h_{v_{i(r)}}$ και $h_{v_{i(x)}}$ είναι οι συναρτήσεις μέτρησης που αντιστοιχούν στο πραγματικό και το φανταστικό μέρος ενός φασιθέτη τάσης στον κόμβο i , αντίστοιχα, και $v_{i(r)}$ και $v_{i(x)}$ αναπαριστούν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της αντίστοιχης μεταβλητής τάσης του διανύσματος κατάστασης.

Επίσης, οι μετρήσεις φασιθετών ρεύματος μπορούν να συσχετιστούν γραμμικά με την καρτεσιανή αναπαράσταση της τάσης του διανύσματος κατάστασης, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$h_{i_{ij(r)}} + j h_{i_{ij(x)}} = y_{i0} v_i + y_{ij} (v_i - v_j) \quad (4.11)$$

όπου $h_{i_{ij(r)}}$ και $h_{i_{ij(x)}}$ είναι οι συναρτήσεις μέτρησης που αντιστοιχούν στον φασιθέτη ρεύματος γραμμής μεταξύ των κόμβων i και j , v_i και v_j είναι οι φασιθέτες τάσης των κόμβων i και j , και y_{i0} και y_{ij} είναι οι αγωγιμότητες μεταξύ του κόμβου i και του γειωμένου σημείου, καθώς και μεταξύ των κόμβων i και j , αντίστοιχα.

Εκφράζοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των τάσεων και των όρων αγωγιμότητας στην εξίσωση (4.11), είναι δυνατό να προκύψει:

$$h_{ij(r)} = g_{i0} v_{i(r)} - b_{i0} v_{i(x)} + g_{ij} (v_{i(r)} - v_{j(r)}) - b_{ij} (v_{i(x)} - v_{j(x)}) \quad (4.12)$$

$$h_{ij(x)} = g_{i0}v_{i(x)} + b_{i0}v_{i(r)} + g_{ij}(v_{i(x)} - v_{j(x)}) + b_{ij}(v_{i(r)} - v_{j(r)}) \quad (4.13)$$

όπου g και b είναι τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των προαναφερθέντων όρων αγωγιμοτήτων, αντίστοιχα.

Από τις συναρτήσεις μέτρησης που προκύπτουν, εάν η μετρητική υποδομή βασίζεται εξ ολοκλήρου σε PMU, τότε μπορεί να επιτευχθεί το ακόλουθο γραμμικό μοντέλο:

$$\begin{bmatrix} v_{(r)}^{PMU} \\ v_{(x)}^{PMU} \\ i_{(r)}^{PMU} \\ i_{(x)}^{PMU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ g_{i0} \pm g_{ij} & -b_{i0} \mp b_{ij} \\ b_{i0} \pm b_{ij} & g_{i0} \pm g_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{(r)} \\ v_{(x)} \end{bmatrix} = H \cdot x \quad (4.14)$$

όπου τα στοιχεία του πίνακα αναφέρονται στους μη μηδενικούς όρους που πρέπει να συμπεριληφθούν στον Ιακωβιανό πίνακα, ανάλογα με την τοποθέτηση των μετρήσεων τάσης και ρεύματος από τα PMU.

Σε αυτό το πλαίσιο, είναι δυνατό να διαπιστωθεί ότι τόσο η Ιακωβιανή μήτρα όσο και η μήτρα Κέρδους (Gain Matrix), που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία WLS είναι σταθεροί. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη του γραμμικού μοντέλου επιτρέπει την απλοποίηση της επίλυσης του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης. Πρακτικά, σε αυτήν την περίπτωση, η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την ανάγκη επαναληπτικών αλγορίθμων, επιλύοντας απευθείας το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$x = G^{-1}H^T W \gamma \quad (4.15)$$

Σε αντίθεση με τη διαδικασία επαναληπτικής επίλυσης των μη γραμμικών εξισώσεων, τα γραμμικά συστήματα διαθέτουν ρητές, κλειστής μορφής λύσεις. Για την επίλυση τέτοιων γραμμικών συστημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνικές όπως ο υπολογισμός του γενικευμένου ρητού πίνακα Moore-Penrose, η παραγοντοποίηση Cholesky, ή η αποσύνθεση QR, ανάλογα με το πόσο καλά ορισμένοι είναι οι πίνακες G και H [84].

Η εξίσωση (4.15) παρέχει την άμεση εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης. Ως αποτέλεσμα, η χρήση του γραμμικού μοντέλου μετρήσεων οδηγεί σε σημαντική μείωση του υπολογιστικού φόρτου καθώς και του αναμενόμενου χρόνου εκτέλεσης.

5 Μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μια γενική θεωρητική προσέγγιση της εκτίμησης κατάστασης, όπου αναλύθηκαν οι λειτουργίες, οι τρόποι εφαρμογής της στα ΣΗΕ, καθώς και οι διαφορετικές υλοποιήσεις στατικής και δυναμικής εκτίμησης κατάστασης. Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην θεμελίωση του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος της συμβατικής (στατικής) εκτίμησης κατάστασης και στον αλγόριθμο επίλυσής του.

5.1 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας

Η εκτίμηση κατάστασης ορίζεται ως η διαδικασία προσδιορισμού της πιο πιθανής κατάστασης ενός συστήματος με βάση ορισμένα μετρούμενα μεγέθη. Μία από τις μεθόδους υλοποίησής της, είναι η εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation – MLE). Η MLE είναι μια θεμελιώδης στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός πιθανοθεωρητικού στατιστικού μοντέλου. Θεωρείται ότι τα σφάλματα των μετρήσεων έχουν γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους.

Η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για όλα τα μετρούμενα δεδομένα, συναρτήσει των άγνωστων παραμέτρων, ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και παίρνει μέγιστη τιμή όταν οι άγνωστες παράμετροι έχουν τιμές, αρκετά κοντά στις πραγματικές τους τιμές. Γενικά, η μέθοδος MLE επιλέγει τις τιμές των παραμέτρων που μεγιστοποιούν τη συνάρτηση πιθανοφάνειας ενός συνόλου δεδομένων, με βάση το σύνολο παρατηρήσεων και το στατιστικό μοντέλο που περιγράφει τη διαδικασία που παρήγαγε τα δεδομένα.

Επομένως, είναι δυνατόν να οριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας, συναρτήσει των αγνώστων παραμέτρων. Η λύση αυτού του προβλήματος παρέχει την βέλτιστη εκτίμηση κατάστασης.

5.2 Σύνθεση διανύσματος μετρήσεων

Η εκτίμηση κατάστασης στα ΣΗΕ έχει ως στόχο την εύρεση της πιο πιθανής κατάστασης του συστήματος βασιζόμενη σε μετρήσεις που λαμβάνονται από το ηλεκτρικό δίκτυο, μέσω εγκατεστημένων μετρητικών συσκευών. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν ροές και εγχύσεις ισχύος, μέτρα τάσεων και, πλέον, μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος από PMU. Επομένως, όπως σημειώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι περισσότεροι εκτιμητές κατάστασης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, διατυπώνουν τις σχέσεις μεταξύ των μετρούμενων ποσοτήτων και των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου ως εξής:

$$z = h(x) + e \quad (5.1)$$

όπου $h(\cdot) \in \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ είναι το διάνυσμα των μη γραμμικών εξισώσεων που σχετίζει το διάνυσμα μετρήσεων $z \in \mathbb{R}^m$ και το πραγματικό, άγνωστο διάνυσμα $x \in \mathbb{R}^n$, ενώ $e \in \mathbb{R}^m$ είναι το διάνυσμα σφάλματος, και m, n το πλήθος των μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης αντίστοιχα, με $n = 2N \leq m$.

Παρακάτω η εξίσωση (5.1) σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2 \dots x_n) \\ h_2(x_1, x_2 \dots x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2 \dots x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

5.3 Κανονική κατανομή θορύβου και συνάρτηση πιθανοφάνειας

Ο θόρυβος των μετρήσεων θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική (Gaussian) κατανομή, με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 , δηλαδή: $e \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF) μιας τυχαίας μεταβλητής z που ακολουθεί την κανονική κατανομή έχει την εξής μορφή:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.3)$$

Στην περίπτωση της εκτίμησης κατάστασης, η τυχαία μεταβλητή αντιπροσωπεύει μια μέτρηση z_i από το δίκτυο. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε m μετρήσεις, οι οποίες είναι στατιστικά ανεξάρτητες μεταξύ τους, τότε η από κοινού PDF μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο των επιμέρους PDFs των μετρήσεων ως εξής:

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2) \dots f(z_m) = \prod_{i=1}^m f(z_i) \quad (5.4)$$

Η $f_m(z)$ ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας του διανύσματος z . Στην πράξη, η συνάρτηση είναι ένα μέτρο της πιθανότητας του ενδεχόμενου παρατήρησης συγκεκριμένων τιμών στο διάνυσμα μετρήσεων. Σκοπός της MLE είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας μεταβάλλοντας την μέση τιμή μ [46].

Για λόγους βελτιστοποίησης της υπολογιστικής διαδικασίας και για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων, η συνάρτηση πιθανοφάνειας αντικαθίσταται με την λογαριθμική της μορφή. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας (Log-Likelihood Function) και προκύπτει γράφοντας την (5.4) σε λογαριθμική μορφή, ως εξής:

$$\mathcal{L} = \ln(f_m(z)) = \ln\left\{\prod_{i=1}^m f(z_i)\right\} = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 - \frac{m}{2}\ln(2\pi) - \sum_{i=1}^m \ln(\sigma_i) \quad (5.5)$$

Η μέθοδος MLE μεγιστοποιεί την συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας $\mathcal{L}$ για κάθε σύνολο παρατηρήσεων του διανύσματος μετρήσεων $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$.

Κατά συνέπεια, η μεγιστοποίηση της εξίσωσης (5.4) ανάγεται στην εξής διαδικασία:

$$\max \ln(f_m(z)) \Leftrightarrow \min \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 \quad (5.6)$$

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να επαναπροσδιοριστεί με τη χρήση των υπολοίπων $r_i = z_i - \mu_i$, όπου η μέση τιμή μ_i κάθε μέτρησης z_i μπορεί να εκφραστεί ως $h_i(x)$,

δηλαδή ως μια μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει το διάνυσμα κατάστασης x , με την i -οστή μέτρηση. Το τετράγωνο κάθε υπολοίπου υπολοίπου r_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος $W_{ii} = \sigma_i^{-2} = R_{ii}^{-2}$ το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο της μήτρας συνδιασποράς των σφαλμάτων μέτρησης, $R_{m \times m}$. Επομένως η μεγιστοποίηση της (5.5) οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου αθροίσματος $\sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2$. Η λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης ονομάζεται εκτίμηση Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (WLS) για το διάνυσμα κατάστασης x [46].

5.4 Μητρική μορφή αντικειμενικής συνάρτησης

Επειδή, κατά κανόνα, οι εξισώσεις εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ δίνονται σε μητρική μορφή, είναι απαραίτητο η σχέση

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

να γραφεί σε μητρική μορφή, συναρτήσει γνωστών μεταβλητών του προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψιν τις υποθέσεις της Ενότητας 5.3 η ζητούμενη συνάρτηση, γνωστή και ως αντικειμενική συνάρτηση, παίρνει την εξής μορφή:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - h_i(x)}{\sigma_i} \right)^2 = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (5.7)$$

5.5 Αριθμητική επίλυση προβλήματος

Ο WLS εκτιμητής θα πρέπει να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση $J(x)$. Για να πάρει η $J(x)$ την ελάχιστη τιμή της, θα πρέπει να ικανοποιούνται τουλάχιστον οι συνθήκες πρώτης τάξης, οι οποίες συγκεντρωτικά είναι οι εξής:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (5.8)$$

όπου $H(x)$ η Ιακωβιανή (Jacobian) μήτρα της $h(x)$ ως προς τις μεταβλητές κατάστασης, η οποία περιλαμβάνει τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης μέτρησης $h_i(x)$:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Αναπτύσσοντας τη μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$ σε ανάπτυγμα σειράς Taylor γύρω από το διάνυσμα κατάστασης x^k , τότε το πρόβλημα λαμβάνει την εξής μορφή:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (5.10)$$

Αγνοώντας τους όρους υψηλότερης τάξης, το πρόβλημα επιλύεται με χρήση της επαληθευτικής μεθόδου Gauss-Newton όπως φαίνεται παρακάτω:

$$x^{k+1} = x^k - G^{-1}(x^k)g(x^k) \quad (5.11)$$

όπου k είναι ο δείκτης της επανάληψης, x^k είναι το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k και:

$$g(x^k) = -H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (5.12)$$

$$G(x^k) = \left. \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \quad (5.13)$$

Ο πίνακας $G(x)$ αναφέρεται ως μήτρα κέρδους. Η μήτρα αυτή είναι αραιή, θετικά ορισμένη και συμμετρική, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Η μήτρα κέρδους $G(x)$ δεν μπορεί να αντιστραφεί, αλλά παραγοντοποιείται σε δύο τριγωνικούς πίνακες – έναν άνω και έναν κάτω τριγωνικό (παραγοντοποίηση LU) και κατόπιν το σύστημα εξισώσεων επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης σε κάθε επανάληψη k , ως εξής:

$$G(x^k)\Delta x^{k+1} = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (5.14)$$

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

Τελικά, η λύση της εκτίμησης κατάστασης με τη μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, λαμβάνει την ακόλουθη επαναληπτική μορφή:

$$x^{k+1} = x^k + [H_T(x^k)R^{-1}H(x^k)]^{-1}H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (5.15)$$

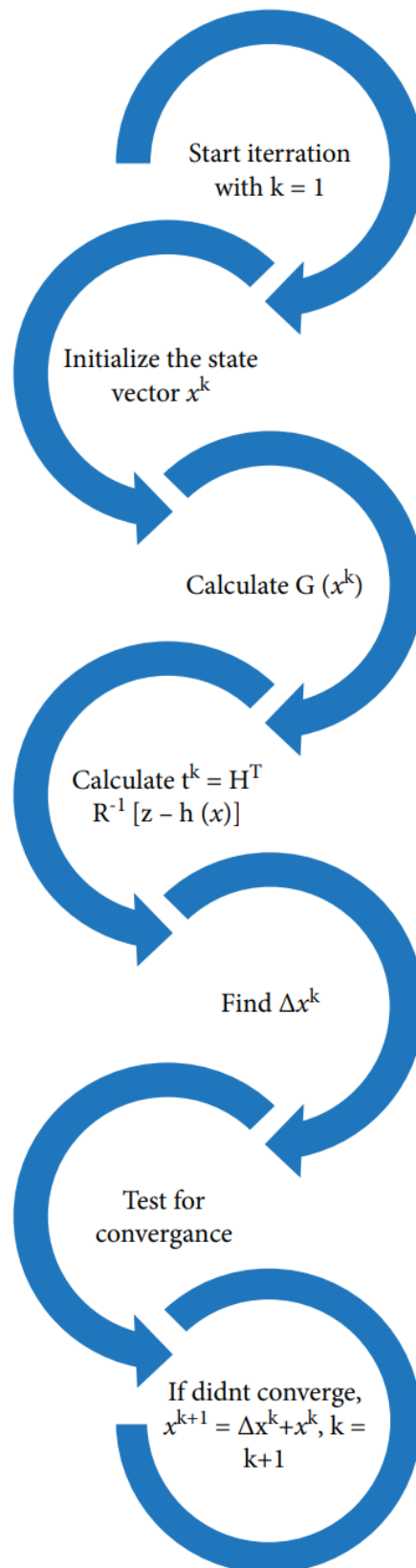
5.6 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

Η λύση των κανονικών εξισώσεων είναι επαναληπτική και γι' αυτό τον λόγο απαιτείται μια αρχική εικασία για το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος x^0 . Στην περίπτωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρούμε μοναδιαία μέτρα (α.μ.) και μηδενικές γωνίες τάσεων (rad). Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

1. Εκκίνηση επαναλήψεων και ορισμός του δείκτη επανάληψης $k = 0$.
2. Αρχικοποίηση του διανύσματος κατάστασης στην τιμή x^0 .
3. Υπολογισμός του πίνακα κέρδους $G(x^k)$.
4. Υπολογισμός του δεξιού μέλους της (4.12): $t^k = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)]$.
5. Παραγοντοποίηση του $G(x^k)$ και επίλυση για την εύρεση του Δx^{k+1} .
6. Έλεγχος για σύγκλιση, αν το $\max|\Delta x^{k+1}| \leq \varepsilon$, όπου ε το κατώφλι σύγκλισης.
7. Αν όχι, $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$, $k = k + 1$ και επιστροφή στο βήμα 3. Αν ναι, τέλος.

Ο ανωτέρω αλγόριθμος περιλαμβάνει τους εξής υπολογισμούς σε κάθε επανάληψη k :

1. Υπολογισμός του δεξιού μέλους $t^k = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)]$.
 - α. Υπολογισμός της συνάρτησης μετρήσεων $h(x^k)$.
 - β. Δημιουργία της Ιακωβιανής μετρήσεων, $H(x^k)$.
2. Υπολογισμός της $G(x^k)$ και επίλυση κανονικών εξισώσεων.
 - α. Δημιουργία του πίνακα κέρδους $G(x^k)$.
 - β. Παραγοντοποίηση του $G(x^k)$ κατά LU.
 - γ. Εφαρμογή εμπρός – πίσω αντικατάστασης για την εύρεση του Δx^{k+1} .



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου στατικής εκτίμησης κατάστασης [100].

6 Μοντελοποίηση ΣΗΕ στο πλαίσιο εκτιμητών κατάστασης

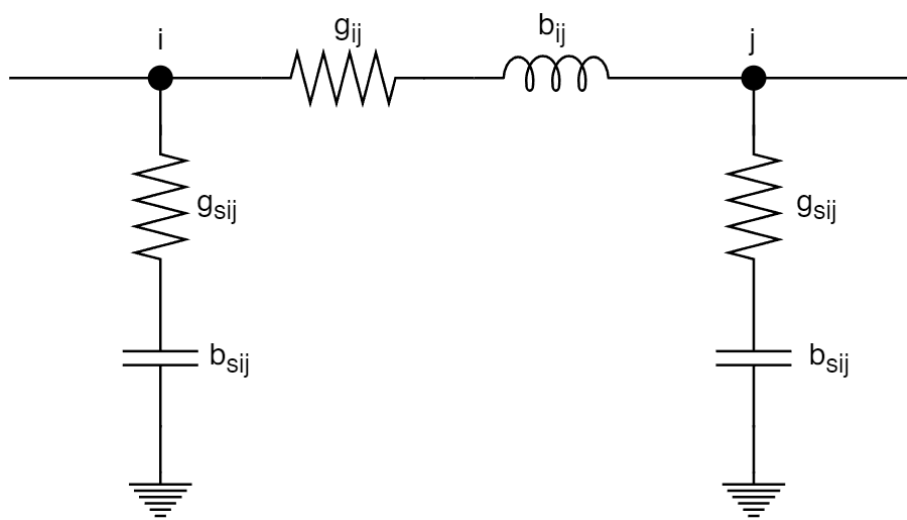
Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και η μαθηματική υλοποίηση της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ. Στο παρόν Κεφάλαιο θα περιγραφεί ο τρόπος υπολογισμού της συνάρτησης μετρήσεων $h(x)$ και της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων $H(x)$. Δίνονται τα μαθηματικά μοντέλα των επιμέρους των στοιχείων του συστήματος, καθώς και οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία ενός ΣΗΕ.

6.1 Υποθέσεις λειτουργίας του ΣΗΕ

Το ΣΗΕ θεωρείται ότι λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση υπό ισορροπημένες συνθήκες φορτίου. Επομένως τα φορτία των ζυγών, οι ροές ισχύος και τα εγκάρσια στοιχεία είναι τριφασικά και ισορροπημένα. Αυτές οι παραδοχές επιτρέπουν τη χρήση του ισοδύναμου μονοφασικού κυκλώματος θετικής ακολουθίας για τη μοντελοποίηση ολόκληρου του δικτύου. Η λύση που θα προκύψει με τη χρήση ενός τέτοιου μοντέλου δικτύου, θα είναι επίσης η συνιστώσα θετικής ακολουθίας της κατάστασης του συστήματος κατά τη μόνιμη λειτουργία. Όλα τα δεδομένα και οι μεταβλητές του δικτύου, εκφράζονται στο ανά μονάδα σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση του ΣΗΕ.

6.1.1 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με ένα δίθυρο ισοδύναμο μοντέλο π (two-port π -model), οι παράμετροι του οποίου καθορίζονται από το ισοδύναμο δίκτυο θετικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς. Το μοντέλο μιας τέτοιας γραμμής μεταφοράς, που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , αποτελείται από μία εν σειρά σύνθετη αγωγιμότητα $y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij}$ και δύο εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες $y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij}$, μια συνδεδεμένη στο ζυγό i και μία στον ζυγό j .

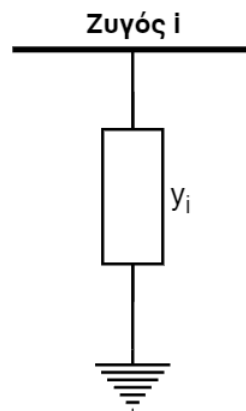


Σχήμα 6.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς [44].

6.1.2 Εγκάρσια στοιχεία

Τα εγκάρσια στοιχεία μπορεί να είναι είτε πυκνωτές, είτε αυτεπαγωγές. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ή της άεργου ισχύος. Αναπαρίστανται με μία εγκάρσια φανταστική αγωγιμότητα $y_{si} = jb_i$. Το πρόσημο της τιμής της αγωγιμότητας καθορίζει

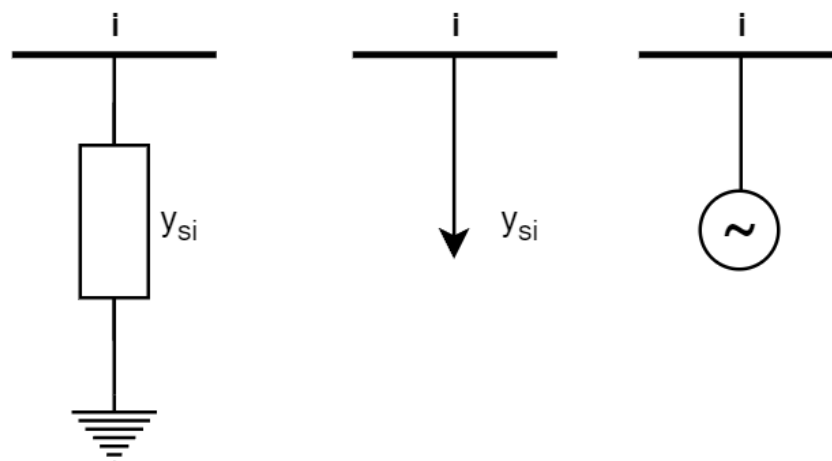
τον τύπο του εγκάρσιου στοιχείου: αν είναι θετικό ($b_i > 0$) αντιστοιχεί σε εγκάρσιο πυκνωτή, ενώ αν είναι αρνητικό ($b_i < 0$) αντιστοιχεί σε εγκάρσια αυτεπαγωγή. Παρακάτω φαίνεται η δομή του μοντέλου αυτού:



Σχήμα 6.2: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου [44].

6.1.3 Φορτία και γεννήτριες

Τα φορτία σταθερής ισχύος και οι γεννήτριες αναπαρίστανται ως ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος και ως εκ τούτου δεν έχουν καμία επίδραση στο μοντέλο του δικτύου. Η γεννήτρια έχει μιγαδική έγχυση $\tilde{S}_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi}$ με θετική ενεργό ισχύ, ενώ το φορτίο σταθερής ισχύος έχει μιγαδική έγχυση $\tilde{S}_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di}$, με αρνητική ενεργό ισχύ. Αντίθετα, τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου και αναπαρίστανται ως εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες $y_{si} = g_{si} + jb_{si}$. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα τα χαρακτηριστικά των ανωτέρω στοιχείων. Στο Σχήμα 6.3 φαίνονται τα μοντέλα για φορτίο σταθερής αγωγιμότητας, σταθερής ισχύος και γεννήτριας αντίστοιχα.



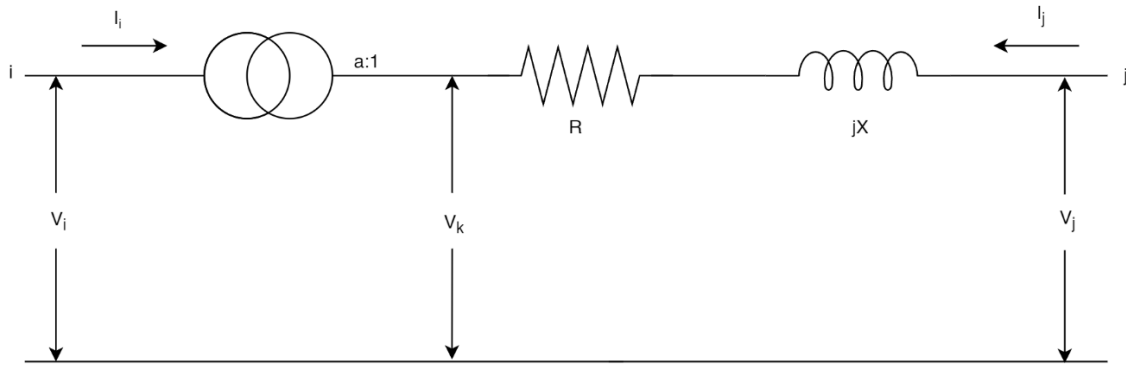
Σχήμα 6.3: Μοντέλα γεννήτριας, φορτίου σταθερής ισχύος και αγωγιμότητας [44].

Πίνακας 6.1: Ανάλυση πρόσημων ενεργού και άεργου ισχύος γεννήτριας και ειδών φορτίου.

	Ενεργός ισχύς P	Άεργος ισχύς Q
Γεννήτρια	$P > 0$	$Q > 0$ ή $Q < 0$
Φορτίο σταθερής ισχύος	$P < 0$	$Q > 0$ ή $Q < 0$
Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας	$P > 0$ ή $P < 0$	$Q > 0$ ή $Q < 0$

6.1.4 Μετασχηματιστές

Ο πραγματικός μετασχηματιστής μοντελοποιείται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής, με λόγο μετασχηματισμού a εν σειρά με ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $Z = R + jX$ όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.4: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [44]

Οι ακροδέκτες του πραγματικού μετασχηματιστή αντιστοιχούν στους ζυγούς i και j . Οι εξισώσεις κόμβων του δίθυρου δικτύου προκύπτουν αν εκφραστούν κατάλληλα τα ρεύματα I_{kj} και I_j στα άκρα του κλάδου της σύνθετης αντίστασης, όπου k νοητός ζυγός, στο δευτερεύον του ιδανικού μετασχηματιστή $a: 1$. Αν η σύνθετη αγωγιμότητα του κλάδου $k - j$ είναι $y = \frac{1}{Z}$, τότε τα ρεύματα συναρτήσει των τάσεων v_k και v_j δίνονται από το σύστημα εξισώσεων [48]:

$$\begin{bmatrix} I_{kj} \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_k \\ v_j \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

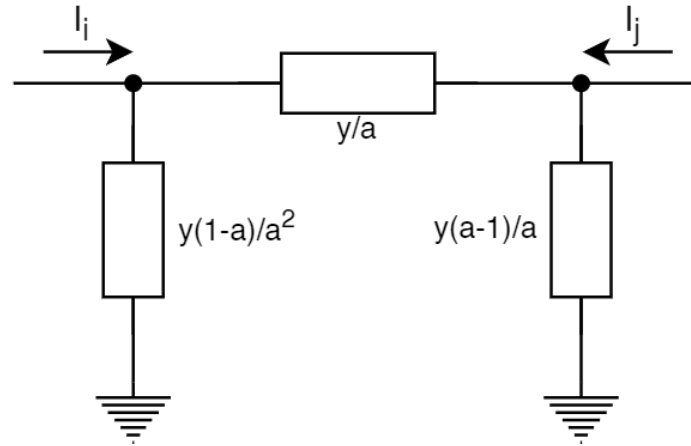
Αν αντικατασταθούν το ρεύμα I_{kj} και η τάση v_k με:

$$\begin{cases} I_{kj} = a \cdot I_i \\ v_k = \frac{v_i}{a} \end{cases} \quad (6.2)$$

τότε προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y}{a^2} & -\frac{y}{a} \\ -\frac{y}{a} & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i \\ v_j \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Το σχήμα του τελικού μοντέλου μετασχηματιστή σε δίθυρο ισοδύναμο-π παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα:



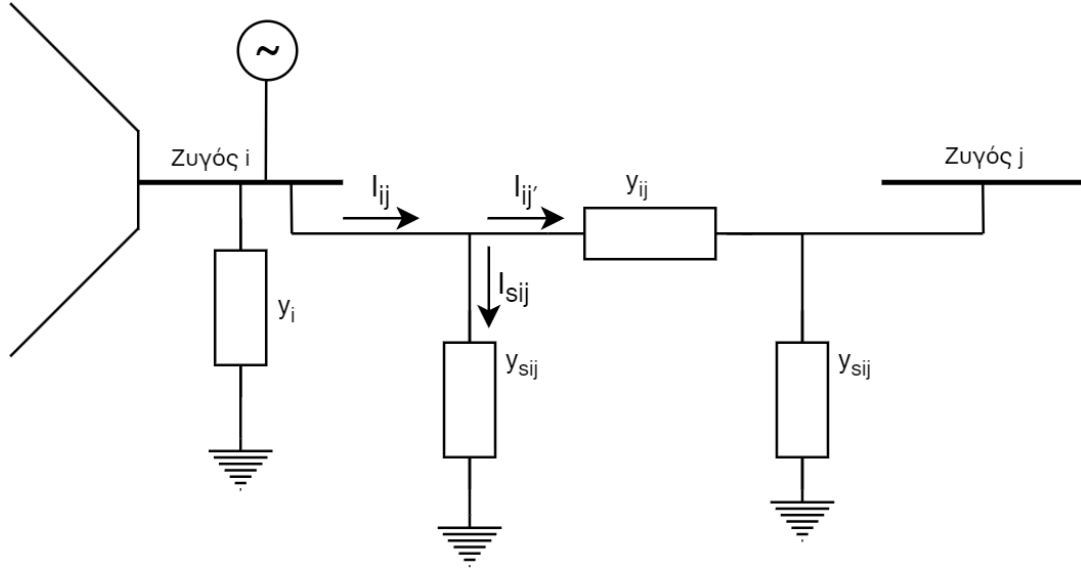
Σχήμα 6.5: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή – ισοδύναμο «Π» [44].

6.2 Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ – Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Ας θεωρήσουμε τον γενικευμένο ζυγό i ενός ΣΗΕ. Σε αυτόν συνδέεται μια γραμμή μεταφοράς, της οποίας το άλλο άκρο συνδέεται στον ζυγό j και παριστάνεται με το ισοδύναμο Π μοντέλο. Στον ζυγό i είναι επίσης συνδεδεμένη μία εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_{si} , που παριστάνει οποιονδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής σύνθετης αγωγιμότητας. Η γεννήτρια που συνδέεται στον ζυγό i εγγχεί μιγαδική ισχύ $\tilde{S}_{Gi}$, ενώ το αντίστοιχο φορτίο σταθερής ισχύος απορροφά μιγαδική ισχύ $\tilde{S}_{Di}$. Η μιγαδική τάση στον ζυγό i συμβολίζεται με $\tilde{V}_i$ και η μιγαδική τάση στο ζυγό j με $\tilde{V}_j$. Μετασχηματιστής δεν υπάρχει στον ζυγό i , αλλά αν υπήρχε θα ήταν συνδεδεμένος εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, που θα αποτελείτο από μία σύνθετη αγωγιμότητα γραμμής y_{ij} και δύο εγκάρσιες αγωγιμότητες y_{sij} . Παρακάτω φαίνεται η αναπαράσταση του γενικευμένου ζυγού με όλα τα στοιχεία:

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε να γραφτούν όλες οι παράμετροι σε καρτεσιανή μορφή για λόγους υπολογισμών. Εάν το διάνυσμα κατάστασης είναι εκπεφρασμένο σε καρτεσιανές συντεταγμένες, τότε τα διανύσματα των τάσεων και του ρεύματος μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\begin{aligned} \tilde{V}_i &= E_i + jF_i \\ \tilde{V}_j &= E_j + jF_j \\ \tilde{I}_{ij} &= I_{ij,r} + jI_{ij,i} \end{aligned} \quad (6.4)$$



Σχήμα 6.6: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ [44].

Η αναλυτική έκφραση του ρεύματος, εφαρμόζοντας τον 1ο κανόνα του Kirchhoff, θα δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{I}_{ij} = \{(g_{sij} + g_{ij})E_i - (b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j\} + j\{(g_{sij} + g_{ij})F_i + (b_{sij} + b_{ij})E_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j\} \quad (6.5)$$

ενώ το πραγματικό και φανταστικό μέρος του ρεύματος θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} I_{ij,r} &= \text{Re}(\tilde{I}_{ij}) = [(g_{sij} + g_{ij})E_i - (b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j] \\ I_{ij,i} &= \text{Im}(\tilde{I}_{ij}) = [(g_{sij} + g_{ij})F_i + (b_{sij} + b_{ij})E_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j] \end{aligned} \quad (6.6)$$

Οι σχέσεις αυτές εκφράζουν τις μετρήσεις ρεύματος σε καρτεσιανή μορφή. Η μιγαδική ροή ισχύος ορίζεται ως $S_{ij} = V_i I_{ij}^*$. Επομένως:

$$\begin{aligned} S_{ij} &= (E_i + jF_i)(I_{ij,r} - jI_{ij,i}) = E_i I_{ij,r} - jE_i I_{ij,i} + jF_i I_{ij,r} + F_i I_{ij,i} \\ &= (E_i I_{ij,r} + F_i I_{ij,i}) + j(F_i I_{ij,r} - E_i I_{ij,i}) \end{aligned} \quad (6.7)$$

Η ισχύς αυτή μπορεί να εκφρασθεί ως $S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$, όπου $P_{ij} = E_i I_{ij,r} + F_i I_{ij,i}$ και $Q_{ij} = F_i I_{ij,r} - E_i I_{ij,i}$, οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος στη γραμμή $i - j$. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6.2) και (6.3) οι εκφράσεις των ροών ισχύος και των εγχύσεων ισχύος θα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{ij} = (g_{sij} + g_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i(-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - F_i(g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) \quad (6.8)$$

$$Q_{ij} = -(b_{sij} + b_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i(g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + F_i(-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) \quad (9.9)$$

$$P_i = (E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + E_i \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - F_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + (E_i^2 + F_i^2)g_i \quad (6.10)$$

$$Q_i = -(E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + E_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + F_i \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - (E_i^2 + F_i^2)b_i \quad (6.11)$$

όπου και πάλι $a(i)$ είναι το σύνολο των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με τον ζυγό i . Οι μετρήσεις αποκλειστικά από PMU μπορούν να εκμεταλλευτούν τη γραμμικότητα που προκύπτει από την έκφραση του διανύσματος κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

6.3 Συνάρτηση μετρήσεων

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετρήσεων για συμβατικά συστήματα SCADA είναι ροές ισχύος γραμμών, εγχύσεις ισχύος ζυγών και μέτρα τάσεων ζυγών. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση των μεταβλητών του διανύσματος κατάστασης x_k , είτε σε καρτεσιανό είτε σε πολικό σύστημα συντεταγμένων για ένα σύστημα κλίμακας n . Το διάνυσμα κατάστασης x_k θα έχει $2n$ στοιχεία, n μέτρα τάσεων και n γωνίες τάσεων ζυγού.

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα χρησιμοποιήσουμε το διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες, για την επίλυση των εξισώσεων της ενότητας 7.2 και των κανονικών εξισώσεων και στη συνέχεια θα μετατρέψουμε το αποτέλεσμα σε πολική μορφή για ευκολότερη ανάγνωση.

Το διάνυσμα κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες έχει αριθμό στοιχείων $2n$ και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$x^T = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n, V_1, V_2, \dots, V_n] \quad (6.12)$$

Αντίστοιχα, το διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες, πάλι με $2n$ πλήθος στοιχείων, για σύστημα n ζυγών εκφράζεται ως εξής:

$$x^T = [E_1, E_2, \dots, E_n, F_1, F_2, \dots, F_n] \quad (6.13)$$

6.4 Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων – Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Όταν το διάνυσμα κατάστασης είναι εκπεφρασμένο σε καρτεσιανές συντεταγμένες, η Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων έχει την παρακάτω μορφή:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial E} & \frac{\partial P_i}{\partial F} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial E} & \frac{\partial Q_i}{\partial F} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial E} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial F} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial E} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial F} \\ \frac{\partial V_i}{\partial E} & \frac{\partial V_i}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F} \\ \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E} & \frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F} \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

Με παραγώγιση των εξισώσεων έγχυσης και ροής ισχύος (6.8)-(6.11) προκύπτουν οι ακόλουθες αναλυτικές εκφράσεις των επιμέρους στοιχείων:

- **Μετρήσεις έγχυσης ενεργού ισχύος**

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial E_i} &= 2E_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) + 2E_i g_i \\ \frac{\partial P_i}{\partial E_j} &= -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i \\ \frac{\partial P_i}{\partial F_i} &= 2F_i \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) - \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + 2F_i g_i \\ \frac{\partial P_i}{\partial F_j} &= -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \end{aligned} \quad (6.15)$$

- **Μετρήσεις έγχυσης αέργου ισχύος**

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_i}{\partial E_i} &= -2E_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) - 2E_i b_i \\ \frac{\partial Q_i}{\partial E_j} &= -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \\ \frac{\partial Q_i}{\partial F_i} &= -2F_i \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - 2F_i b_i \end{aligned} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial F_j} = g_{ij}E_i + b_{ij}F_i$$

- **Μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος**

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_i} &= 2(g_{sij} + g_{ij})E_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial E_j} &= -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial F_i} &= 2(g_{sij} + g_{ij})F_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial F_j} &= -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i\end{aligned}\tag{6.17}$$

- **Μετρήσεις ροής αέργου ισχύος**

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_i} &= -2(b_{sij} + b_{ij})E_i + g_{ij}F_j + b_{ij}E_j \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial E_j} &= -g_{ij}F_i + b_{ij}E_i \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_i} &= -2(b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial F_j} &= g_{ij}E_i + b_{ij}F_i\end{aligned}\tag{6.18}$$

- **Μετρήσεις μέτρων τάσεων**

$$\begin{aligned}\frac{\partial V_i}{\partial E_i} &= \frac{E_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2}} \\ \frac{\partial V_i}{\partial E_j} &= 0 \\ \frac{\partial V_i}{\partial F_i} &= \frac{F_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2}} \\ \frac{\partial V_i}{\partial F_j} &= 0\end{aligned}\tag{6.19}$$

- **Μετρήσεις πραγματικού μέρους ρευμάτων**

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_i} = g_{sij} + g_{ij}$$

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial E_j} = -g_{ij}$$

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

$$\frac{\partial I_{ij,r}}{\partial F_j} = b_{ij}$$

(6.20)

- **Μετρήσεις φανταστικού μέρους ρευμάτων**

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_i} = b_{sij} + b_{ij}$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial E_j} = -b_{ij}$$

(6.21)

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_i} = g_{sij} + g_{ij}$$

$$\frac{\partial I_{ij,i}}{\partial F_j} = -g_{ij}$$

Γίνεται αντιληπτό ότι η θεώρηση του διανύσματος κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες, οδηγεί σε κατά πολύ απλούστερη μορφή εξισώσεων της Ιακωβιανής μήτρας. Συγκεκριμένα μάλιστα για τις μετρήσεις ρευμάτων, τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας είναι σταθερά και εξαρτώνται από το μοντέλο δικτύου. Η Ιακωβιανή μήτρα χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό της μήτρας κέρδους $\mathbf{G}$, όπως είδαμε και στον αλγόριθμο επίλυσης WLS του Κεφαλαίου 5.5.

7 Φίλτρα Kalman και εκτίμηση κατάστασης

Τα φίλτρα Kalman αποτελούν έναν από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους για την εκτίμηση κατάστασης δυναμικών συστημάτων, όπως κινούμενα αντικείμενα ή διαδικασίες που αλλάζουν με τον χρόνο. Η υλοποίησή τους, βασίζεται στη θεωρία εκτίμησης και πιο συγκεκριμένα στην ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης, χρησιμοποιώντας πιθανοτικές μεθόδους.

7.1 Θεωρία εκτίμησης και βασικές μαθηματικές έννοιες

Η θεωρία εκτίμησης (estimation theory) έχει ως αντικείμενο τον υπολογισμό της βέλτιστης εκτίμησης μίας κατάστασης, δεδομένου ενός συνόλου μετρήσεων. Με όρους στατιστικής και πιθανοτήτων, η κατάσταση (state) είναι η τιμή $x(k)$ της στοχαστικής διαδικασίας $\{x(k)\}$ τη χρονική στιγμή k , ενώ ο χρόνος θεωρείται διακριτός. Η μέτρηση (measurement) είναι η τιμή $z(k)$ της στοχαστικής διαδικασίας $\{z(k)\}$ τη χρονική στιγμή k . Το πρόβλημα της θεωρίας εκτίμησης είναι να υπολογιστεί η εκτίμηση (estimation) $x(\ell|k)$ της κατάστασης τη χρονική στιγμή ℓ , δεδομένου του συνόλου των μετρήσεων $Z_k = \{z(0), z(1), z(2), \dots, z(k)\}$, μέχρι και τη χρονική στιγμή k , χρησιμοποιώντας ένα προκαθορισμένο βέλτιστο κριτήριο [85].

Οι διαφορετικοί τύποι εκτίμησης, προσδιορίζονται από τη σχέση των χρονικών στιγμών ℓ και k :

- **πρόβλεψη (prediction)**, όταν η εκτίμηση της κατάστασης αφορά κάποια χρονική στιγμή μετά από αυτήν της τελευταίας μέτρησης ($\ell > k$),
- **φιλτράρισμα (filtering)**, όταν η εκτίμηση της κατάστασης αφορά κάποια χρονική στιγμή που ταυτίζεται με αυτήν της τελευταίας μέτρησης ($\ell = k$),
- **εξομάλυνση (smoothing)**, όταν η εκτίμηση της κατάστασης αφορά κάποια χρονική στιγμή πριν από αυτήν της τελευταίας μέτρησης ($\ell < k$).

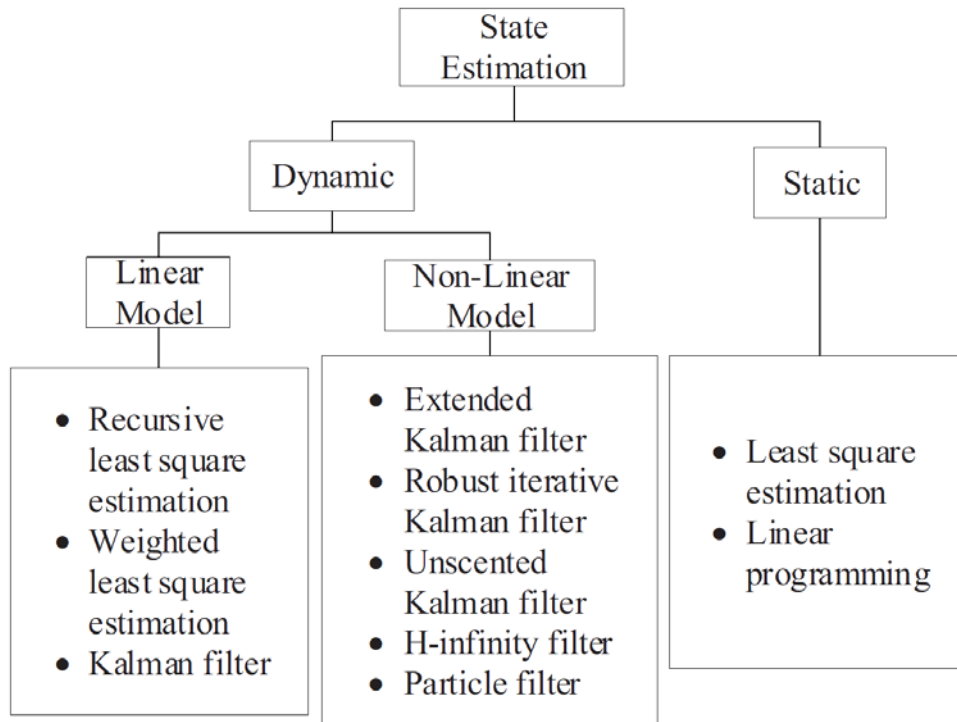
Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα χρησιμοποιηθεί και θα αναλυθεί περαιτέρω αποκλειστικά η πρόβλεψη με φίλτρο Kalman.

Για την επίλυση του προβλήματος της θεωρίας εκτίμησης είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο αποτελείται από:

- το δυναμικό μοντέλο, που εκφράζει τη σχέση κατάστασης και μέτρησης
- το στατιστικό μοντέλο, που εκφράζει τη φύση της κατάστασης και των μετρήσεων.

Σημαντικός είναι επίσης ο προσδιορισμός ενός κριτηρίου βέλτιστης εκτίμησης. Η απόκλιση της εκτίμησης από την πραγματική κατάσταση αναφέρεται ως σφάλμα εκτίμησης (estimation error). Όσο μικρότερο είναι το σφάλμα εκτίμησης, τόσο καλύτερη είναι η εκτίμηση. Επομένως, το κριτήριο βέλτιστης εκτίμησης είναι η ελαχιστοποίηση της μέσης τιμής κάποιας συνάρτησης του σφάλματος εκτίμησης, που πρέπει να προσδιοριστεί. Η επιλογή του τετραγώνου του σφάλματος ως αντικειμενικής συνάρτησης, έχει φυσική σημασία, γιατί η μέση τιμή του τετραγώνου του σφάλματος εκτίμησης συμπίπτει με τη συνδιασπορά του σφάλματος εκτίμησης (estimation error covariance) [85].

Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι κατηγοριοποιήσεις εκτίμησης κατάστασης σε δυναμική και στατική, οι υποκατηγοριοποιήσεις, ανάλογα με τη γραμμικότητα ή μη του μοντέλου μετρήσεων και οι διαφορετικοί χρησιμοποιούμενοι ανά υποκατηγορία, αλγόριθμοι εκτίμησης.



Σχήμα 7.1: Κατηγοριοποίηση των τεχνικών εκτίμησης κατάστασης [91].

7.2 Λειτουργία του φίλτρου Kalman

Οι ρίζες του φίλτρου Kalman βρίσκονται στη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων κατά τη μελέτη των πλανητικών τροχιών από τον Gauss τον 19ο αιώνα.

Η στάσιμη θεωρία εκτίμησης Wiener-Kolmogorov (stationary filtering theory) οφείλεται στον Kolmogorov (1941) και στον Wiener (1949) και σχετίζεται με στάσιμες διαδικασίες, δηλαδή διαδικασίες των οποίων οι στατιστικές ιδιότητες είναι χρονικά αμετάβλητες. Η ιδέα της χρήσης της μεταβλητής κατάστασης στην περιγραφή γραμμικών συστημάτων προτάθηκε από τον Swerling (1959) και τον Kalman (1960). Η μη στάσιμη θεωρία εκτίμησης (non-stationary filtering theory), η οποία αντιμετωπίζει προβλήματα και με μη στάσιμες διαδικασίες, οφείλεται στον Kalman και στον Bucy (1960–1963) [85].

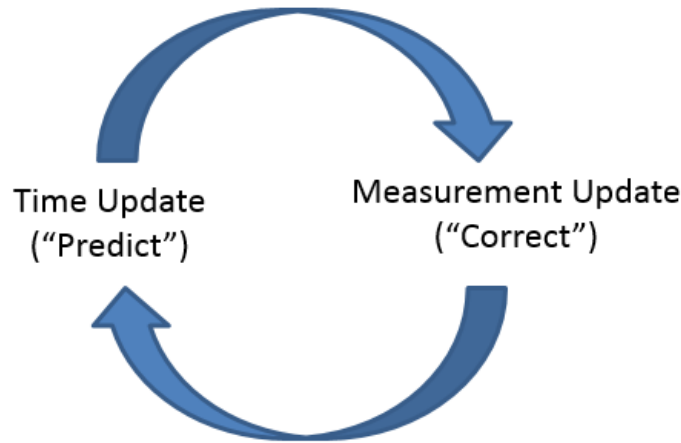
Το 1960 ο Kalman πρότεινε το φίλτρο Kalman, έναν επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης του γραμμικού προβλήματος φιλτραρίσματος διακριτού χρόνου. Το Παραδοσιακό Φίλτρο Kalman (Conventional Kalman Filter ή Traditional Kalman Filter) υπολογίζει την εκτίμηση $x(k|k)$, τη συνδιασπορά σφάλματος εκτίμησης $P(k|k)$, καθώς και την πρόβλεψη $x(k|k-1)$ και τη συνδιασπορά σφάλματος πρόβλεψης $P(k|k-1)$, χρησιμοποιώντας το κέρδος του φίλτρου Kalman $K(k)$ διαστάσεων $n \times m$. Από τις πρώτες διατυπώσεις του μέχρι και σήμερα, το φίλτρο Kalman, έχει γίνει αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας [85].

Το φίλτρο Kalman είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μαθηματική τεχνική για την εκτίμηση των εσωτερικών καταστάσεων ενός δυναμικού συστήματος, από μια σειρά μετρήσεων με θόρυβο. Στον πυρήνα του είναι ένας αναδρομικός αλγόριθμος που εκτιμά βέλτιστα την κατάσταση ενός συστήματος συνδυάζοντας προβλέψεις με νέες παρατηρήσεις, ισορροπώντας δυναμικά μεταξύ ακρίβειας και υπολογιστικής απόδοσης. Συνήθως εφαρμόζεται σε γραμμικά συστήματα που επηρεάζονται από γκαουσιανό θόρυβο, αλλά με την πάροδο του χρόνου έχει προσαρμοστεί και για πιο σύνθετα, μη γραμμικά συστήματα, μέσω τροποποιήσεων του αρχικού αλγορίθμου, όπως το εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF) και το Unscented φίλτρο Kalman (UKF). Το κύριο πρόβλημα που επιδιώκει να επιλύσει το φίλτρο Kalman είναι ο προσδιορισμός της πραγματικής κατάστασης ενός εξελισσόμενου, δυναμικού συστήματος, παρά την παρουσία αβεβαιοτήτων και θορύβου, τόσο στη δυναμική του συστήματος, όσο και στις μετρήσεις που λαμβάνονται από αυτό, καθιστώντας το ιδιαίτερα χρήσιμο σε σενάρια όπου τα συστήματα αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου και οι μετρήσεις εμπεριέχουν θόρυβο. Τα φίλτρα Kalman, επομένως, παρέχουν μια αναδρομική, αποτελεσματική μέθοδο βελτίωσης της εκτίμησης κατάστασης, σε πραγματικό χρόνο [86].

Θεμελιωδώς, το φίλτρο Kalman είναι ένας τύπος αναδρομικού εκτιμητή κατά Bayes. Η Μπεϋζιανή εκτίμηση είναι μια στατιστική προσέγγιση που ενημερώνει την πιθανότητα μιας υπόθεσης, όσο διατίθενται περισσότερα δεδομένα. Περιλαμβάνει την επαναληπτική ενημέρωση της εκτίμησης κατάστασης ενός συστήματος, χρησιμοποιώντας τόσο προηγούμενα όσο και νέα δεδομένα. Η ιδέα του συνδυασμού των τρεχουσών εκτιμήσεων με νέες μετρήσεις αποτελεί τη ραχοκοκαλιά των φίλτρων Kalman και είναι αυτό που τα καθιστά μοναδικά ικανά να χειρίζονται δυναμικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Το κλασικό φίλτρο Kalman λειτουργεί με την υπόθεση ότι η δυναμική του συστήματος και οι μετρήσεις μπορούν να αναπαρασταθούν ως γραμμικές εξισώσεις με θόρυβο που είναι γκαουσιανός, με μηδενική μέση τιμή. Η παραδοχή κανονικού θορύβου επιτρέπει στον αλγόριθμο του φίλτρου να απλοποιήσει την κατανομή του σε ένα συνοπτικό μοντέλο, όπου οι πιθανότητες συνοψίζονται από τους μέσους όρους και τις διακυμάνσεις τους. Βελτιώνοντας σταθερά τις εκτιμήσεις της μέσης τιμής και της διακύμανσης της κατάστασης, το γραμμικό φίλτρο Kalman παράγει τη **βέλτιστη γραμμική αμερόληπτη εκτίμηση** (Best Linear Unbiased Estimation – BLUE) της πραγματικής κατάστασης σε κάθε χρονικό βήμα [87].

Το φίλτρο Kalman λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια μορφή ελέγχου μέσω βρόγχου ανάδρασης, εκτιμώντας την κατάσταση σε δεδομένη χρονική στιγμή και σχηματίζοντας έναν κλειστό βρόγχο πρόβλεψης – διόρθωσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.2. Οι εξισώσεις που το διέπουν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εξισώσεις *ενημέρωσης χρόνου* που αντιστοιχούν στη φάση της πρόβλεψης και τις εξισώσεις *ενημέρωσης μετρήσεων* που αντιστοιχούν στη φάση της διόρθωσης. Θεωρείται ότι η κατάσταση ενός συστήματος εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, διέπεται από γραμμικές εξισώσεις και επηρεάζεται από το θόρυβο της διαδικασίας. Σε κάθε χρονικό βήμα λαμβάνονται μετρήσεις της κατάστασης του συστήματος, οι οποίες όμως συνήθως είναι αλλοιωμένες λόγω θορύβου και ενδέχεται να μην παρέχουν μια αξιόπιστη εικόνα. Το φίλτρο Kalman συγχωνεύει με βέλτιστο τρόπο αυτά τα αβέβαια δεδομένα με την κυκλική εκτέλεση των ακόλουθων βημάτων:



Σχήμα 7.2: Ο βρόχος πρόβλεψης – διόρθωσης των φίλτρων Kalman

1. **Βήμα πρόβλεψης:** Το φίλτρο χρησιμοποιεί την τρέχουσα εκτίμηση της κατάστασης για να προβλέψει την κατάσταση του συστήματος στο επόμενο χρονικό βήμα, λαμβάνοντας υπόψη τον θόρυβο της διαδικασίας. Αυτό σχηματίζει την εκ των προτέρων εκτίμηση, η οποία αντιπροσωπεύει την καλύτερη δυνατή εκτίμηση της κατάστασης πριν την ενσωμάτωση της τελευταίας μέτρησης.

Η φάση της πρόβλεψης βασίζεται στη φύση του μοντέλου του αλγορίθμου και έχει τη δυνατότητα να προβάλλει την τρέχουσα υποκείμενη κατάσταση του συστήματος στο μέλλον. Για να γίνει κατανοητή η φάση πρόβλεψης του φίλτρου Kalman αρκεί να γίνει κατανοητή μόνο μία εξίσωση, στη γενική της μορφή – η παρακάτω μεταβατική εξίσωση:

$$\theta_{k+1}^- = \Phi_k \theta_k \quad (7.1)$$

Η νέα εκ των προτέρων (*a priori*) κατάσταση προκύπτει με απλό πολλαπλασιασμό του πίνακα μετάβασης, εδώ Φ_k , με το διάνυσμα της εκ των υστέρων κατάστασης (*a posteriori*). Στην περίπτωση μας, κάθε γραμμή του πίνακα μετάβασης περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο μετασχηματίζεται κάθε στοιχείο του διανύσματος κατάστασης.

2. **Βήμα διόρθωσης** (ενημέρωσης): Η φάση διόρθωσης λαμβάνει μια μέτρηση x_j και διορθώνει την πρόβλεψη (ή την αρχική κατάσταση) του συστήματος. Κατά τη λήψη της νέας μέτρησης, το φίλτρο υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ της προβλεπόμενης κατάστασης και της παρατηρούμενης μέτρησης (γνωστή ως υπόλοιπο μέτρησης – residual). Αυτή η διαφορά χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την προσαρμογή της πρόβλεψης, αποδίδοντας μια βελτιωμένη εκτίμηση της κατάστασης. Κατά τη φάση διόρθωσης ενημερώνονται επίσης οι υποκείμενες παράμετροι του μοντέλου του φίλτρου, γεγονός που καθιστά το φίλτρο προσαρμοστικό. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο μεταβάλλεται σύμφωνα με τις νέες μετρήσεις (online). Το *κέρδος Kalman* (Kalman gain) K_k , είναι μια παράμετρος που καθορίζει τη βαρύτητα που δίνεται στην πρόβλεψη και την παρατήρηση, εξισορροπώντας μεταξύ της εμπιστοσύνης στη δυναμική του μοντέλου και της εμπιστοσύνης στα δεδομένα των μετρήσεων [87].

Ο συνδυασμός των φάσεων πρόβλεψης και διόρθωσης επιτρέπει στο φίλτρο Kalman να βελτιώνει την εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος, σε κάθε χρονικό βήμα επαναληπτικά, οδηγώντας τελικά σε ιδιαίτερα ακριβείς εκτιμήσεις.

Η επαναληψιμότητα ως έμφυτο στοιχείο της διαδικασίας και κατ' επέκταση η απουσία ανάγκης αποθήκευσης μεγάλου όγκου ιστορικών δεδομένων, είναι ένα από τα χαρακτηριστικά του φίλτρου Kalman που οδηγεί στη θεώρησή του ως ένα ιδιαίτερα ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για την εκτίμηση κατάστασης. Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας, διατηρείται μόνο η πιο πρόσφατη εκτίμηση, μία μέτρηση της αβεβαιότητας του συστήματος, καθώς και η τελευταία μέτρηση, καθιστώντας το φίλτρο Kalman υπολογιστικά αποδοτικό. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους για την υιοθέτησή του σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου ο χρόνος επεξεργασίας και η μνήμη είναι κρίσιμες παράμετροι [88].

7.3 Μαθηματικό μοντέλο φίλτρου Kalman

Το φίλτρο Kalman χρησιμοποιεί ένα σύνολο μετρήσεων, παρατηρούμενων κατά την πάροδο του χρόνου, οι οποίες μπορεί να είναι αλλοιωμένες με θόρυβο, και τις συνδέει με το μοντέλο του συστήματος για να λάβει την καλύτερη δυνατή εκτίμηση. Χρησιμοποιώντας την εκ των προτέρων γνώση του συστήματος και αξιοποιώντας τα στάδια της χρονικής ενημέρωσης και της ενημέρωσης μετρήσεων, επιλύει βέλτιστα το πρόβλημα της εκτίμησης κατάστασης, το οποίο με τη χρήση του φίλτρου Kalman αποτελεί πρόβλημα τύπου πρόβλεψης, ακολουθούμενο από διόρθωση, μετά από ενημέρωση μετρήσεων [88] [89] [90].

Η μαθηματική διατύπωση για τις **εξισώσεις πρόβλεψης** του διανύσματος κατάστασης και της συνδιασποράς σφάλματος, σε κάθε χρονικό βήμα $k = 1, 2, \dots, n$ δίνονται από τις σχέσεις:

$$\hat{x}_k^- = F_{k-1} \hat{x}_{k-1}^+ \quad (7.2)$$

$$P_k^- = F_{k-1} P_{k-1}^+ F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (7.3)$$

όπου x_k είναι το διάνυσμα κατάστασης, P_k ο πίνακας συνδιασποράς, F_k ο πίνακας μετάβασης του συστήματος και Q_k ο πίνακας συνδιασποράς του θορύβου διαδικασίας (process noise). Τα πλην (-) και συν (+), ως δείκτες δείχνουν αν πρόκειται για εκ των προτέρων ή εκ των υστέρων αναφορά στα μεγέθη.

Οι εξισώσεις διόρθωσης γράφονται ως εξής:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (7.4)$$

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k (y_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (7.5)$$

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (7.6)$$

όπου K_k είναι το κέρδος Kalman τη χρονική στιγμή k , το οποίο καθορίζει τη βαρύτητα που δίνεται στη μέτρηση κατά την ενημέρωση της εκτίμησης, H_k είναι ο πίνακας μετρήσεων, y_k πραγματική μέτρηση τη χρονική στιγμή k και I μοναδιαίος πίνακας που προκύπτει κατά τον υπολογισμό της διόρθωσης της διακύμανσης σφάλματος [91].

7.4 Τροποποιημένα φίλτρα Kalman

Τα τελευταία χρόνια, λόγω των αυξημένων τεχνολογικών απαιτήσεων των ΣΗΕ, οι αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης που βασίζονται στο φίλτρο Kalman είναι ιδιαίτερα δημοφιλείς, καθώς μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, χαρακτηριστικό σημαντικό για την άμεση εποπτεία και τον ακριβή έλεγχο των ΣΗΕ. Ταυτόχρονα, οι εξελίξεις στις μετρητικές συσκευές και κατ' επέκταση στα συστήματα εποπτείας και ελέγχου των ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη και χρήση των PMU και του συστήματος WAMS, με τους υψηλούς ρυθμούς αναφοράς δεδομένων που παρουσιάζουν, δημιουργούν εύφορο έδαφος για την ανάπτυξη καλύτερων, ταχύτερων και ακριβέστερων αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης, εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες και τα εγγενή χαρακτηριστικά του φίλτρου Kalman.

Ορισμένες τροποποιημένες εκδόσεις του συμβατικού φίλτρου Kalman, όπως τα EKF και UKF μπορούν να εφαρμοστούν και σε μη γραμμικά συστήματα, τα οποία είναι ι-δανικά για εφαρμογές που αφορούν ΣΗΕ. Ειδικότερα, το UKF μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τον προσδιορισμό των καταστάσεων του ΣΗΕ, όσο και τη μελέτη προ-στασίας του [91].

Η παρούσα διπλωματική εργασία και ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής, βασίζονται στη χρήση του Unscented Φίλτρου Kalman (UKF). Στη συνέχεια, αναλύεται η μαθηματική λογική και οι εξισώσεις που διέπουν το UKF, χωρίς περαιτέρω ανάλυση άλλων εξίσου χρήσιμων τύπων φίλτρου Kalman, όπως για παράδειγμα το EKF, παρά μόνο συγκριτικά, τονίζοντας όπου χρειάζεται επιμέρους χαρακτηριστικά του.

7.5 Unscented φίλτρο Kalman (UKF)

Ο αλγόριθμος που αναφέρεται ως Unscented Kalman Filter (UKF), προτάθηκε πρώτη φορά από τους Julier et al. και στη συνέχεια αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Wan και van der Merwe [92] [93]. Η βασική του διαφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες υλοποιήσεις φίλτρων Kalman και ειδικότερα σε σχέση με το EKF, έγκειται στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζονται οι τυχαίες μεταβλητές (TM) Gauss (Gaussian Random Variables – GRV) για τη διάδοσή τους μέσω της δυναμικής του συστήματος.

Στο EKF η κατανομή του διανύσματος κατάστασης προσεγγίζεται μέσω μιας τυχαίας μεταβλητής Gauss και στη συνέχεια διαδίδεται μέσω της γραμμικοποίησης πρώτης τάξης του μη γραμμικού συστήματος, που εφαρμόζει το EKF. Η μέθοδος αυτή ενδέχεται να εισάγει μεγάλα σφάλματα στην εκ των υστέρων μέση τιμή και τη συνδιακύμανση της μετασχηματισμένης τυχαίας μεταβλητής, που μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη απόδοση της μεθόδου και ενίοτε σε απόκλιση του φίλτρου [92].

7.5.1 Μετασχηματισμός unscented transform

Το UKF αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα χρησιμοποιώντας μια ντετερμινιστική μέθοδο δειγματοληψίας, τον λεγόμενο μετασχηματισμό Unscented Transform (UT). Ο μετασχηματισμός UT είναι μία μέθοδος υπολογισμού των στατιστικών μεγεθών μιας τυχαίας μεταβλητής, η οποία υφίσταται μη γραμμικό μετασχηματισμό. Το διάνυσμα κατάστασης προσεγγίζεται και πάλι μέσω μιας τυχαίας μεταβλητής Gauss, x , αλλά σε αυτή την περίπτωση, αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας ένα ελάχιστο σύνολο προσεκτικά επιλεγμένων δειγματοληπτικών σημείων, που αναφέρονται ως σημεία σίγμα

(sigma points). Τα sigma points αποτυπώνουν πλήρως την πραγματική μέση τιμή, $\bar{x}$, και τη συνδιακύμανση P_x , της τυχαίας μεταβλητής και, όταν διαδίδονται μέσω του πραγματικού μη γραμμικού συστήματος, έστω μέσω μιας συνάρτησης $y = f(x)$, αποτυπώνουν και πάλι ορθά, την εκ των υστέρων μέση τιμή και συνδιακύμανση, με ακρίβεια δεύτερης τάξης (ανάπτυγμα σειράς Taylor) για οποιαδήποτε μη γραμμικότητα, ενώ το EKF πετυχαίνει μόνο ακρίβεια πρώτης τάξης. Για το UKF, δεν απαιτούνται αναλυτικοί υπολογισμοί της Ιακωβιανής ή της Εσσιανής μήτρας [93].

Για να υπολογιστούν τα στατιστικά μεγέθη της διαδικασίας y , σχηματίζεται ένας πίνακας $\tilde{X}$, $2L + 1$ σημείων σίγμα, X_i , σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} X_0 &= \bar{x}, \\ X_i &= \bar{x} + \left(\sqrt{(L + \lambda) P_x} \right)_i, i = 1, \dots, L \\ X_i &= \bar{x} - \left(\sqrt{(L + \lambda) P_x} \right)_{i-L}, i = L + 1, \dots, 2L \end{aligned} \quad (7.7)$$

όπου $\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L$ είναι παράμετρος κλιμάκωσης. Η σταθερά α , καθορίζει τη διασπορά των σημείων σίγμα γύρω από τη μέση τιμή $\bar{x}$, και συνήθως παίρνει μικρή θετική τιμή (για παράδειγμα $1 \leq \alpha \leq 10^{-4}$). Η σταθερά κ , είναι μια δευτερεύουσα παράμετρος κλιμάκωσης, που συνήθως καθορίζεται ως $3 - L$, ενώ το β χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει πρότερη γνώση της κατανομής του x (για κατανομή Gauss, το $\beta = 2$, θεωρείται βέλτιστο). Η παράσταση $\left(\sqrt{(L + \lambda) P_x} \right)_i$ είναι η i -οστή στήλη της τετραγωνικής ρίζας του πίνακα (προκύπτει από παραγοντοποίηση Cholesky του πίνακα συνδιακύμανσης P_x με χρήση κάτω-τριγωνικού πίνακα). Τα σημεία σίγμα διαδίδονται μέσω της μη γραμμικής συνάρτησης

$$y_i = f(X_i), i = 0, \dots, 2L \quad (7.8)$$

και η μέση τιμή και η συνδιακύμανση της y , προσεγγίζονται μέσω σταθμισμένης μέσης τιμής και συνδιακύμανσης των εκ των υστέρων σημείων σίγμα:

$$\bar{y} \approx \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} y_i \quad (7.9)$$

$$P_y \approx \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} (y_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})^T \quad (7.10)$$

με βάρη W_i , που δίνονται από τις σχέσεις

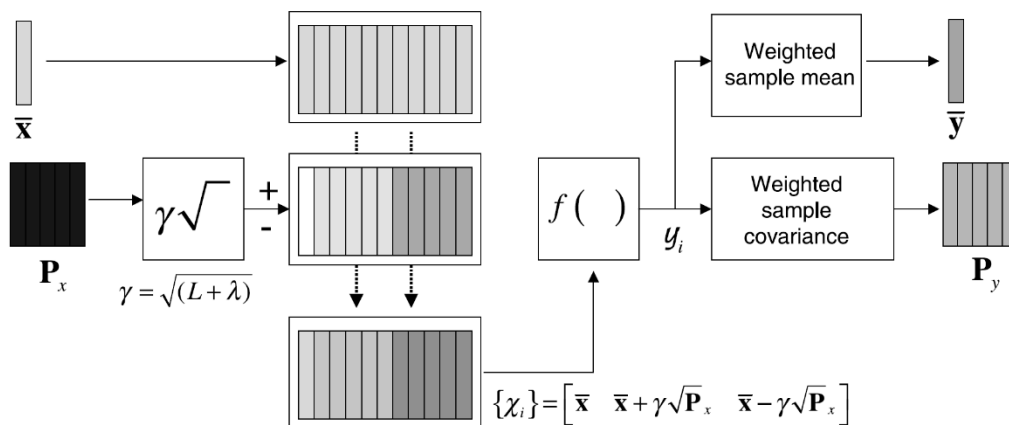
$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L + \lambda}, \quad (7.11)$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \quad (7.12)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)}, i = 1, \dots, 2L \quad (7.13)$$

Ο μετασχηματισμός UT διαφέρει σημαντικά από τις γενικές μεθόδους δειγματοληψίας Monte Carlo, οι οποίες απαιτούν τάξεις μεγέθους περισσότερα σημεία δειγματοληψίας για τη διάδοση της ακριβούς (ενδεχομένως μη γκαουσιανής) κατανομής της κατάστασης. Η πολύ απλή προσέγγιση που ακολουθείται στον UT οδηγεί σε προσεγγίσεις που είναι ακριβείς μέχρι την τρίτη τάξη, για γκαουσιανές εισόδους και για όλες τις μη γραμμικότητες. Για μη γκαουσιανές εισόδους, οι προσεγγίσεις είναι ακριβείς τουλάχιστον μέχρι τη δεύτερη τάξη, με την ακρίβεια των ροπών τρίτης και υψηλότερης τάξης να καθορίζεται από την επιλογή των α και β .

Το σχήμα 7.3 είναι ένα μπλοκ διάγραμμα που απεικονίζει τα βήματα για την εκτέλεση του μετασχηματισμού UT. Συνοπτικά, η διαδικασία ακολουθεί τα εξής βήματα: εισάγονται οι αρχικές παράμετροι του συστήματος, η μέση τιμή $\bar{\mathbf{x}}$ και ο πίνακας συνδιακύμανσης $\mathbf{P}_x$, υπολογίζεται ο παράγοντας κλιμάκωσης γ , δημιουργούνται τα σημεία σίγμα, $\mathbf{X}_i$, προσθέτοντας και αφαιρώντας τον όρο $\gamma\sqrt{\mathbf{P}_x}$ από τη μέση τιμή $\bar{\mathbf{x}}$. Τα σημεία σίγμα εισάγονται στη μη γραμμική συνάρτηση $f(\mathbf{X}_i)$ και τελικά υπολογίζονται η σταθμισμένη μέση τιμή $\bar{\mathbf{y}}$ των μετασχηματισμένων σημείων και η σταθμισμένη συνδιακύμανση $\mathbf{P}_y$.



Σχήμα 7.3: Σχηματικό διάγραμμα που απεικονίζει τα στάδια εφαρμογής του μετασχηματισμού UT [93].

7.5.2 Μαθηματική διατύπωση του UKF

Το Unscented Φίλτρο Kalman είναι μια απλή επέκταση του μετασχηματισμού UT. Θεωρούμε ένα δυναμικό σύστημα διακριτού χρόνου, που περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις:

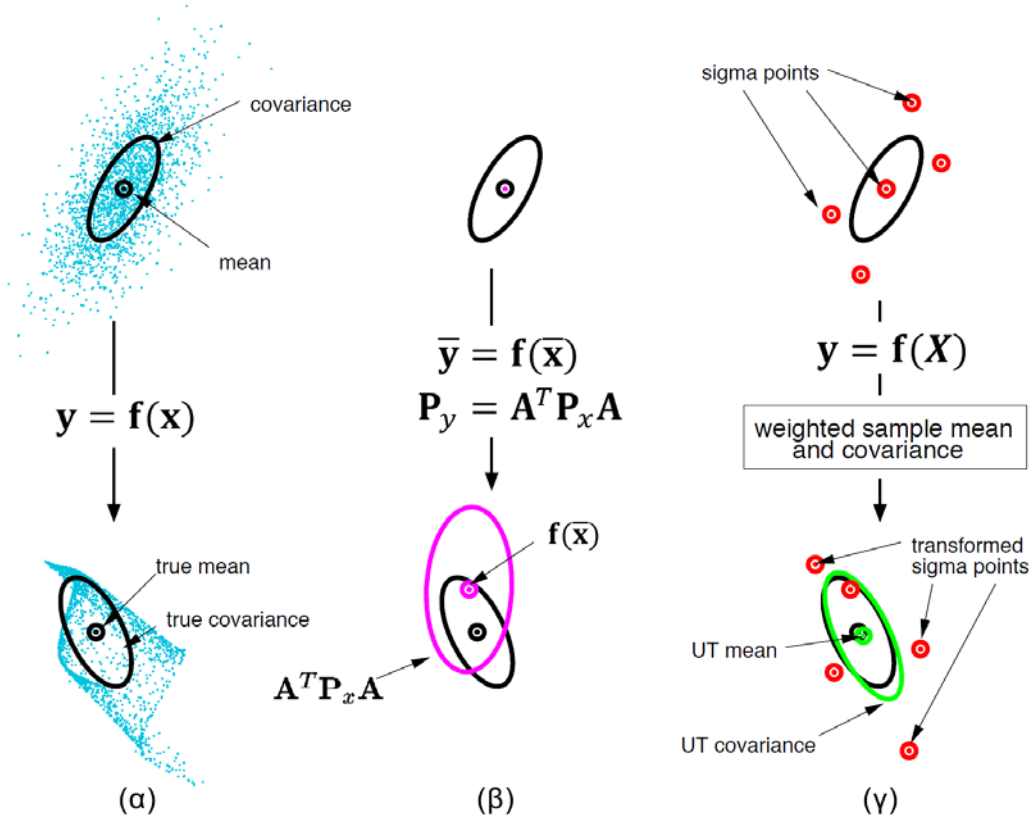
$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k, \mathbf{w}) \quad (7.14)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k, \mathbf{n}_k, \mathbf{w}) \quad (7.15)$$

όπου οι καταστάσεις του συστήματος $\mathbf{x}_k$ και το σύνολο των παραμέτρων του μοντέλου του δυναμικού συστήματος, $\mathbf{w}$, πρέπει να εκτιμηθούν ταυτόχρονα μόνο από το παρατηρούμενο θορυβώδες σήμα $\mathbf{y}_k$. Εν προκειμένω το σήμα $\mathbf{y}_k$ αποτελείται αποκλειστικά από μετρήσεις προερχόμενες από PMU.

Το σχήμα 7.4, δείχνει για ένα δισδιάστατο σύστημα: (α) τον πραγματικό μέσο όρο και τη διάδοση της συνδιακύμανσης με δειγματοληψία Monte Carlo, (β) τα

αποτελέσματα με τη χρήση μιας προσέγγισης γραμμικοποίησης, όπως θα γινόταν στο EKF, (γ) την απόδοση του UT (απαιτούνται μόνο πέντε σημεία σίγμα).



Σχήμα 7.4: Σύγκριση προσέγγισης της μέσης τιμής και της συνδιακύμανσης, μέσω: (α) Monte Carlo - (β) γραμμικοποίηση πρώτης τάξης (EFK) - (γ) UT [93].

Δεδομένων των μετρήσεων y_k , ο στόχος είναι η εκτίμηση της κατάστασης x_k . Σε αυτό το σημείο, δεν κάνουμε καμία υπόθεση σχετικά με τη φύση της δυναμικής του συστήματος. Η βέλτιστη εκτίμηση με την έννοια του ελάχιστου μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Minimum Mean Square Error – MMSE) δίνεται από την υπό συνθήκη μέση τιμή των:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbb{E}[\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^k] \quad (7.16)$$

όπου $\mathbf{Y}_0^k$ είναι η ακολουθία των μετρήσεων μέχρι τη χρονική στιγμή k . Η αποτίμηση της αναμενόμενης τιμής $\hat{\mathbf{x}}_k$ απαιτεί γνώση της εκ των υστέρων συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (pdf) $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^k)$. Η έμμεση εξάρτηση από την παρατηρούμενη είσοδο u_k δεν λαμβάνεται υπόψη, δεδομένου ότι δεν είναι τυχαία μεταβλητή. Δεδομένης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ) της x_k , μπορούμε να προσδιορίσουμε οποιαδήποτε εκτίμηση κατάστασης σύμφωνα με κάποιο κριτήριο απόδοσης. Το πρόβλημα του προσδιορισμού της εκ των υστέρων πυκνότητας αναφέρεται γενικά ως Μπεϋζιανή προσέγγιση και μπορεί να υπολογιστεί αναδρομικά σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^k) = \frac{p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^{k-1})p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k)}{p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}_0^{k-1})} \quad (7.17)$$

όπου:

$$p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^{k-1}) = \int p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})p(\mathbf{x}_{k-1} | \mathbf{Y}_0^{k-1})d\mathbf{x}_{k-1} \quad (7.18)$$

και η σταθερά κανονικοποίησης $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}_0^k)$ δίνεται από τη σχέση:

$$p(\mathbf{y}_k | \mathbf{Y}_0^{k-1}) = \int p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^{k-1})p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k)d\mathbf{x}_k. \quad (7.19)$$

Η παραπάνω αναδρομική σχέση προσδιορίζει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τρέχουσας κατάστασης, ως συνάρτηση της προηγούμενης και των πιο πρόσφατων δεδομένων μέτρησης. Το μοντέλο χώρου καταστάσεων εισάγεται καθορίζοντας την πιθανότητα μετάβασης $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$ και την πιθανότητα μέτρησης $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k)$. Συγκεκριμένα, η $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$ καθορίζεται από την πυκνότητα πιθανότητας θορύβου διεργασίας $p(\mathbf{v}_k)$ μέσω της εξίσωσης ενημέρωσης κατάστασης:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \quad (7.20)$$

Δεδομένου ενός μοντέλου θορύβου με γκαουσιανή κατανομή πυκνότητας πιθανότητας $p(\mathbf{v}_k) = \mathcal{N}(0, \mathbf{R}^v)$, ισχύει $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) = \mathcal{N}(\mathbf{F}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}), \mathbf{R}^v)$. Ομοίως, η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των μετρήσεων $p(\mathbf{y}_k | \mathbf{x}_k)$, καθορίζεται από την πυκνότητα πιθανότητας του θορύβου μέτρησης $p(\mathbf{n}_k)$ και την εξίσωση μέτρησης:

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k, \mathbf{n}_k). \quad (7.21)$$

Η γνώση των κατανομών πυκνότητας πιθανότητας και της αρχικής συνθήκης $p(\mathbf{x}_0 | \mathbf{y}_0) = p(\mathbf{y}_0 | \mathbf{x}_0)p(\mathbf{x}_0)/p(\mathbf{y}_0)$ καθορίζει την $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^k)$ για κάθε k . Η ολοκλήρωση που υποδεικνύεται από τις εξισώσεις (7.19)-(7.21) καθιστά μια λύση κλειστής μορφής δύσκολη για τα περισσότερα συστήματα. Η μόνη γενική προσέγγιση είναι η εφαρμογή τεχνικών δειγματοληψίας Monte Carlo που ουσιαστικά μετατρέπουν τα ολοκληρώματα σε πεπερασμένα αθροίσματα που συγκλίνουν στην πραγματική λύση στο όριο.

Θεωρώντας ως βασική υπόθεση ότι όλες οι κατανομές παραμένουν γκαουσιανές, η μπεϋζιανή αναδρομή απλοποιείται σημαντικά. Στην περίπτωση αυτή, πρέπει να αποτιμηθούν μόνο η υπό συνθήκη μέση τιμή $\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbb{E}[\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_0^k]$ και η συνδιακύμανση $\mathbf{P}_{\mathbf{x}_k}$. Και τελικά προκύπτει η απλή αναδρομική εκτίμηση:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = (\text{prediction of } \mathbf{x}_k) + \mathcal{K}_k \cdot [\mathbf{y}_k - (\text{prediction of } \mathbf{y}_k)] \quad (7.22)$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{x}_k} = \mathbf{P}_{\mathbf{x}_k}^- - \mathcal{K}_k \mathbf{P}_{\mathbf{y}_k} \mathcal{K}_k^T. \quad (7.23)$$

Αν και πρόκειται για γραμμική αναδρομική διαδικασία, δεν έχουμε υποθέσει γραμμικότητα του μοντέλου.

Οι βέλτιστοι όροι δίνονται από τις σχέσεις:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbb{E}[\mathbf{F}(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \mathbf{v}_{k-1})] \quad (7.24)$$

$$\mathcal{K}_k = \mathbf{P}_{\mathbf{x}_k \mathbf{y}_k} \mathbf{P}_{\mathbf{y}_k}^{-1} \hat{\mathbf{y}}_k \quad (7.25)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = \mathbb{E}[\mathbf{H}(\mathbf{x}_k^-, \mathbf{n}_k)] \quad (7.26)$$

όπου η βέλτιστη πρόβλεψη (πρότερη μέση τιμή) της x_k γράφεται ως $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ και αντιστοιχεί στην προσδοκία μιας μη γραμμικής συνάρτησης των τυχαίων μεταβλητών $\mathbf{x}_{k-1}$ και $\mathbf{v}_{k-1}$ (ομοίως και για την βέλτιστη πρόβλεψη $\hat{\mathbf{y}}_k^-$). Ο όρος K_k είναι το κέρδος Kalman και εκφράζεται ως συνάρτηση των εκ των προτέρων πινάκων συνδιακύμανσης, με $\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k$.

Η αξιολόγηση των όρων συνδιακύμανσης απαιτεί επίσης τη λήψη προσδοκιών μιας μη γραμμικής συνάρτησης της προηγούμενης μεταβλητής κατάστασης. $\mathbf{P}_{\mathbf{x}_k}^-$ είναι η πρόβλεψη της συνδιακύμανσης του x_k και $\mathbf{P}_{\mathbf{y}_k}^-$ είναι η συνδιακύμανση του y_k . Το φίλτρο Kalman υπολογίζει ακριβώς τους όρους αυτών των εξισώσεων στη γραμμική περίπτωση και μπορεί να θεωρηθεί αποτελεσματική μέθοδος για τη σωστή διάδοση μιας τυχαίας μεταβλητής Gauss μέσω της δυναμικής ενός γραμμικού συστήματος [94]. Για μη γραμμικά μοντέλα, ωστόσο, οι βέλτιστοι όροι προσεγγίζονται ως εξής:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- \approx \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}, \bar{\mathbf{v}}) \quad (7.27)$$

$$\mathcal{K}_k \approx \hat{\mathbf{P}}_{\mathbf{x}_k \mathbf{y}_k} \hat{\mathbf{P}}_{\mathbf{y}_k}^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_k \quad (7.28)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k^- \approx \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}_k^-, \bar{\mathbf{n}}) \quad (7.29)$$

όπου οι προβλέψεις προσεγγίζονται απλά ως συναρτήσεις της εκ των προτέρων μέσης τιμής, ενώ οι μέσες τιμές των θορύβων συνήθως λαμβάνονται ως μηδενικές.

Η τυχαία μεταβλητή κατάστασης επαναπροσδιορίζεται ως παράθεση του αρχικού διανύσματος κατάστασης και των μεταβλητών θορύβου ως εξής:

$$\mathbf{x}_k^a = [\mathbf{x}_k^T \ \mathbf{v}_k^T \ \mathbf{n}_k^T]^T.$$

Το σχήμα επιλογής σημείων σίγμα, που δίνεται από την εξίσωση (7.7), εφαρμόζεται στη νέα επαυξημένη τυχαία μεταβλητή κατάσταση, για τον υπολογισμό του αντίστοιχου πίνακα σίγμα $\mathbf{X}_k^a$.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι εξισώσεις που σχηματίζουν τον αλγόριθμο του UKF:

- Αρχικοποιούμε τις μεταβλητές:

$$\hat{\mathbf{x}}_0 = \mathbb{E}[\mathbf{x}_0], \quad (7.30)$$

$$\mathbf{P}_0 = \mathbb{E}[(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)(\mathbf{x}_0 - \hat{\mathbf{x}}_0)^T], \quad (7.31)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_0^a = \mathbb{E}[\mathbf{x}^a] = [\hat{\mathbf{x}}_0^T \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}]^T, \quad (7.32)$$

- Για $k \in \{1, \dots, \infty\}$, υπολογισμός των σημείων σίγμα:

$$\mathbf{X}_{k-1}^a = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a & \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a + \gamma \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}^a} & \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^a - \gamma \sqrt{\mathbf{P}_{k-1}^a} \end{bmatrix} \quad (7.33)$$

- Οι εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου είναι:

$$\mathcal{X}_{k|k-1}^x = \mathbf{F}(X_{k-1}^x, \mathbf{u}_{k-1}, (\mathcal{X}_{k-1}^v), \quad (7.34)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \mathcal{X}_{i,k|k-1}^x \quad (7.35)$$

$$\mathbf{P}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} (\mathcal{X}_{i,k|k-1}^x - \hat{\mathbf{x}}_k^-) (\mathcal{X}_{i,k|k-1}^x - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T \quad (7.36)$$

$$\mathcal{Y}_{k|k-1} = \mathbf{H}(\mathcal{X}_{k|k-1}^x, \mathbf{X}_{k-1}^n) \quad (7.37)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \mathcal{Y}_{i,k|k-1} \quad (7.38)$$

- και οι εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων είναι:

$$\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{y}}_k \tilde{\mathbf{y}}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} (\mathcal{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-) (\mathcal{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)^T, \quad (7.39)$$

$$\mathbf{P}_{\mathbf{x}_k \mathcal{Y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} (\mathcal{X}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k^-) (\mathcal{Y}_{i,k|k-1} - \hat{\mathbf{y}}_k^-)^T, \quad (7.40)$$

$$\mathcal{K}_k = \mathbf{P}_{\mathbf{x}_k \mathcal{Y}_k} \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{y}}_k}^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_k, \quad (7.41)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathcal{K}_k (\mathbf{y}_k - \hat{\mathbf{y}}_k^-), \quad (7.42)$$

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - \mathcal{K}_k \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{y}}_k \tilde{\mathbf{y}}_k} \mathcal{K}_k^T, \quad (7.43)$$

όπου

$$\mathbf{x}^a = [\mathbf{x}^T \quad \mathbf{v}^T \quad \mathbf{n}^T]^T, \quad X^a = [(\mathcal{X}^x)^T \quad (\mathcal{X}^v)^T \quad (\mathcal{X}^n)^T]^T, \quad \gamma = \sqrt{L + \lambda},$$

λ είναι η σύνθετη παράμετρος κλιμάκωσης, L είναι η διάσταση της επαυξημένης κατάστασης, $\mathbf{R}^v$ είναι η συνδιακύμανση του θορύβου διαδικασίας, $\mathbf{R}^n$ είναι η συνδιακύμανση θορύβου μέτρησης, και W_i είναι τα βάρη που υπολογίζονται με τις εξισώσεις (7.11)-(7.13).

8 Δείκτες επίδοσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης

Ενώ η εκτίμηση κατάστασης θεωρείται ότι παρέχει ακριβή εικόνα του δικτύου, ενδέχεται να υπάρχουν ανακρίβειες στις θεωρούμενες παραμέτρους του δικτύου και λανθασμένες μετρήσεις. Για αυτό κρίνεται απαραίτητη η χρήση δεικτών αξιολόγησης, προσαρμοσμένων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και αποδοτικής λειτουργίας των αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης. Γενικά, ένας εκτιμητής κατάστασης είναι απαραίτητο να διέπεται από τα παρακάτω βασικά χαρακτηριστικά:

- *ακρίβεια*: τα εκτιμώμενα μεγέθη επιδιώκεται να είναι κατά το δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές τους τιμές.
- *απόδοση*: η ταχύτητα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς τα αποτελέσματα του εκτιμητή, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται από άλλες εφαρμογές του EMS, κρίσιμες για τον έλεγχο και την εποπτεία του ΣΗΕ.
- *ανθεκτικότητα*: οι εκτιμητές κατάστασης πρέπει να λειτουργούν σωστά ακόμα και υπό την ύπαρξη εσφαλμένων παραδοχών, έχοντας παράλληλα την ικανότητα να τις ανιχνεύουν και να τις διορθώνουν. Για παράδειγμα ενδέχεται να υπάρχουν σφάλματα μέτρησης που παραβιάζουν τις παραδοχές αβεβαιότητας, τοπολογία δικτύου που διαφέρει από τη θεωρούμενη ή παράμετροι του μοντέλου δικτύου που δεν συνάδουν με τις παρατηρούμενες μετρήσεις ροής ισχύος.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά ελέγχονται από τους δείκτες επίδοσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης.

8.1 Μέσο απόλυτο σφάλμα

Το μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error – MAE) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης απόλυτης διαφοράς μεταξύ των εκτιμώμενων καταστάσεων και των πραγματικών τιμών τους. Επειδή τα μεγέθη που απαρτίζουν το διάνυσμα κατάστασης είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών του δικτύου, χρησιμοποιούμε τον δείκτη MAE, ξεχωριστά για τα μέτρα των τάσεων, και ξεχωριστά για τις γωνίες:

$$\text{MAE}_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i^{\text{true}} - V_i^{\text{est}}| \quad (8.1)$$

$$\text{MAE}_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\delta_i^{\text{true}} - \delta_i^{\text{est}}| \quad (8.2)$$

όπου $V_i^{\text{true}}, \delta_i^{\text{true}}$, οι πραγματικές τιμές των μέτρων και των γωνιών των τάσεων σε κάθε ζυγό i , $V_i^{\text{est}}, \delta_i^{\text{est}}$, οι εκτιμώμενες τιμές και N ο αριθμός των ζυγών του δικτύου.

Το μέσο απόλυτο σφάλμα μετρά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου. Για να έχουμε την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, είναι επιθυμητό τα αποτελέσματα των υπολογιζόμενων δεικτών να έχουν τη μικρότερη δυνατή τιμή, λαμβάνοντας υπόψη και τον θόρυβο των μετρήσεων και τις αποκλίσεις του θεωρούμενου μοντέλου δικτύου.

8.2 Μέσο απόλυτο σφάλμα μιγαδικής συνιστώσας

Το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα Μιγαδικής Συνιστώσας (Mean Absolute Complex Component error – MACC) υπολογίζεται ως η μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμώμενων μιγαδικών φασιθετών τάσης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο το μέγεθος όσο και τη γωνία.

Κάθε φασιθέτης τάσης μπορεί να αναπαρασταθεί ως μιγαδικός αριθμός με πραγματικό και φανταστικό μέρος, που εξαρτώνται από το μέγεθος της τάσης και τη γωνία φάσης, αντίστοιχα. Αντί να αξιολογούνται ξεχωριστά οι διαφορές στις τάσεις και τις γωνίες, όπως στο μέσο απόλυτο σφάλμα, το MACC υπολογίζει τη συνολική μιγαδική διαφορά, παρέχοντας μια πιο ολοκληρωμένη μέτρηση της απόκλισης. Αυτό επιτρέπει να μετρούνται με ακρίβεια οι διαφορές που προκύπτουν και στα δύο μέρη (πραγματικό και φανταστικό), επιτυγχάνοντας πιο ολοκληρωμένη και πιο ακριβή αξιολόγηση της επίδοσης της εκτίμησης, στο μιγαδικό επίπεδο.

$$\text{MACC}_V = \left(\sum_{i=1}^N |\tilde{V}_i^{\text{true}} - \tilde{V}_i^{\text{est}}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8.3)$$

όπου $\tilde{V}_i^{\text{true}}$ η πραγματική μιγαδική τιμή της τάσης σε κάθε ζυγό και $\tilde{V}_i^{\text{est}}$ η εκτιμώμενη μιγαδική τιμή αντίστοιχα.

8.3 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα

Το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error – MAPE) ουσιαστικά βασίζεται στο μέσο απόλυτο σφάλμα, ενώ η ποσοστιαία μορφή του διευκολύνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο ως δείκτης, όταν θέλουμε να εκφράσουμε το σφάλμα ως ποσοστό της πραγματικής τιμής. Υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των απόλυτων ποσοστιαίων διαφορών μεταξύ των εκτιμώμενων και των πραγματικών τιμών:

$$\text{MAPE}_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_i^{\text{true}} - V_i^{\text{est}}}{V_i^{\text{true}}} \right| \quad (8.4)$$

Το MAPE είναι εύκολα ερμηνεύσιμο, καθώς εκφράζει πόσο μακριά, κατά μέσο όρο, βρίσκονται οι εκτιμήσεις από τις πραγματικές τιμές, σε ποσοστιαία βάση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το MAPE μπορεί να οδηγήσει σε αβέβαια συμπεράσματα όταν οι πραγματικές τιμές είναι πολύ κοντά στο μηδέν, καθώς τα ποσοστιαία σφάλματα μπορούν να γίνουν εξαιρετικά μεγάλα ή να μη ορίζονται. Μία γενική κλίμακα για την αξιολόγηση του μεγέθους του σφάλματος είναι η εξής:

Πίνακας 8.1: Ποιοτική κλίμακα του δείκτη MAPE.

Εύρος δείκτη MAPE	Ποιοτική αξιολόγηση
< 10%	Πολύ καλή
10% – 20%	Καλή
20% – 50%	Μέτρια
> 50%	Κακή

9 Υλοποίηση σε περιβάλλον MATLAB®

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η υλοποίηση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με χρήση UKF, βασισμένου αποκλειστικά σε μετρήσεις PMU, σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB®. Γίνεται σύγκριση του αλγορίθμου UKF με τον κλασικό αλγόριθμο στατικής εκτίμησης κατάστασης και εξετάζεται η ακρίβεια του αλγορίθμου UKF και οι ποιοτικές διαφορές σε σχέση με τον συμβατικό εκτιμητή. Ο αλγόριθμος του UKF βασίζεται στις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 7, ενώ ο αλγόριθμος στατικής εκτίμησης, στις εξισώσεις των Κεφαλαίων 5 και 6.

Αρχικά επιλύεται η ροή φορτίου του υπό εξέταση συστήματος, μέσω του υπολογιστικού εργαλείου MATPOWER, καθώς δεν είναι η δυνατή η χρήση πραγματικών μετρήσεων PMU. Το MATPOWER είναι ένα πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα που έχει σχεδιαστεί για προσομοίωση και ανάλυση ΣΗΕ και έχει αναπτυχθεί ειδικά για την επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του MATPOWER είναι η επεκτασιμότητά του – οι χρήστες μπορούν εύκολα να προσαρμόσουν ή να επεκτείνουν το πακέτο για να δοκιμάσουν και να αναπτύξουν νέους αλγορίθμους ή να ενσωματώσουν πρόσθετες λειτουργίες στο ήδη υπάρχον λογισμικό. Το πακέτο περιλαμβάνει ένα εκτεταμένο σύνολο ενσωματωμένων λειτουργιών για διάφορες αναλύσεις, όπως ανάλυση ροής φορτίου AC και DC, βέλτιστη ροή φορτίου, δέσμευση μονάδων και στοχαστική μοντελοποίηση, υποστηρίζοντας την έρευνα στις αγορές ενέργειας και τη βελτιστοποίηση ΣΗΕ.

9.1 Εισαγωγή τοπολογίας του δικτύου

Χρησιμοποιώντας το MATPOWER, εισάγεται το μοντέλο του συστήματος που θα προσομοιωθεί. Η μοντελοποίηση του συστήματος περιλαμβάνει την αρχικοποίησή του, τη χρήση των απαραίτητων παραμέτρων και τη δημιουργία των απαιτούμενων δομών δεδομένων. Το MATPOWER παρέχει τυποποιημένη μορφοποίηση δεδομένων, γνωστή ως MATPOWER Case Format, η οποία υλοποιείται ως δομή MATLAB (mpc). Χρησιμοποιώντας την ενσωματωμένη συνάρτηση loadcase, το μοντέλο φορτώνεται στο MATLAB:

```
mpc = loadcase('case_name'); % Loads the specified power system  
model into the MATLAB workspace
```

Η δομή mpc είναι κομβική για τη μοντελοποίηση του δικτύου στο MATPOWER. Τα βασικά στοιχεία που περιέχει είναι:

1. **mpc.baseMVA:** βαθμωτό μέγεθος που προσδιορίζει την ισχύ βάσης του συστήματος σε MVA. Όλες οι τιμές ισχύος (ενεργού και άεργου) στο σύστημα εκφράζονται σε σχέση με αυτή τη βασική τιμή. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλοι οι υπολογισμοί ισχύος είναι κανονικοποιημένοι και συνεπείς σε όλο το σύστημα.
2. **mpc.bus:** Πίνακας που περιέχει τα βασικά δεδομένα των ζυγών του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των τύπων ζυγών (καθορισμός ζυγού αναφοράς, ζυγών παραγωγής και ζυγών φορτίου), μέτρων και γωνιών τάσης, καθώς και των απαιτήσεων ισχύος.

Κάθε γραμμή του πίνακα αντιστοιχεί σε έναν ζυγό του ΣΗΕ και κάθε στήλη περιέχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον εν λόγω ζυγό. Στη συνέχεια περιγράφεται το χαρακτηριστικό που αντιστοιχεί σε κάθε στήλη του mpc.bus. Η αρίθμηση αφορά τη σειρά κάθε στήλης στον πίνακα.

1. Αριθμός ζυγού: Μοναδικό αναγνωριστικό για κάθε ζυγό, ένας θετικός ακέραιος αριθμός.
2. Τύπος ζυγού: Δείχνει τον τύπο του ζυγού, ανάλογα με τον αριθμό που του αντιστοιχείται. Με «1» χαρακτηρίζεται ο ζυγός αναφοράς (slack), με «2» οι ζυγοί παραγωγής (PV) και με «3» οι ζυγοί PQ.
3. Ζήτηση ενεργού ισχύος στον ζυγό, εκφρασμένη σε MW.
4. Ζήτηση άεργου ισχύος στο δίκτυο, εκφρασμένη σε MVar.
5. Αγωγιμότητα παράκαμψης στον ζυγό, που αντιπροσωπεύει φορτίο σταθερής ισχύος, εκφρασμένη σε MW.
6. Αγωγιμότητα παράκαμψης στον δίκτυο, που αντιπροσωπεύει σταθερό φορτίο άεργου ισχύος, εκφρασμένο σε MVar.
7. Αριθμός περιοχής στην οποία ανήκει ο ζυγός, που χρησιμοποιείται για σκοπούς ανάλυσης ή ελέγχου του συστήματος.
8. Μέτρο τάσης στον ζυγό, σε α.μ..
9. Γωνία τάσης στον ζυγό, σε μοίρες.
10. Επίπεδο τάσης βάσης του ζυγού, σε kV.
11. Αριθμός ζώνης, που χρησιμοποιείται για την οργάνωση των ζυγών σε γεωγραφικές ή λειτουργικές ζώνες.
12. Μέγιστο όριο μέτρου τάσης στον ζυγό, σε α.μ.
13. Ελάχιστο όριο μέτρου τάσης στον ζυγό, σε α.μ.

Πίνακας 9.1: Παράμετροι ζυγών.

name	column	description
BUS_I	1	bus number (positive integer)
BUS_TYPE	2	bus type (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated)
PD	3	real power demand (MW)
QD	4	reactive power demand (MVar)
GS	5	shunt conductance (MW demanded at $V = 1.0$ p.u.)
BS	6	shunt susceptance (MVar injected at $V = 1.0$ p.u.)
BUS_AREA	7	area number (positive integer)
VM	8	voltage magnitude (p.u.)
VA	9	voltage angle (degrees)
BASE_KV	10	base voltage (kV)
ZONE	11	loss zone (positive integer)
VMAX	12	maximum voltage magnitude (p.u.)
VMIN	13	minimum voltage magnitude (p.u.)
LAM_P [†]	14	Lagrange multiplier on real power mismatch (u /MW)
LAM_Q [†]	15	Lagrange multiplier on reactive power mismatch (u /MVar)
MU_VMAX [†]	16	Kuhn-Tucker multiplier on upper voltage limit (u /p.u.)
MU_VMIN [†]	17	Kuhn-Tucker multiplier on lower voltage limit (u /p.u.)

3. **mpc.gen:** Πίνακας που περιγράφει λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά των γεννητριών του συστήματος. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια γεννήτρια του συστήματος και κάθε στήλη περιέχει δεδομένα σχετικά με την επίδοση και του περιορισμούς της γεννήτριας. όπως είναι για παράδειγμα η έξοδος ενεργού και αέργου ισχύος, τα όρια τάσης της γεννήτριας και οι συντελεστές κόστους.

Πίνακας 9.2: Παράμετροι γεννητριών.

name	column	description
GEN_BUS	1	bus number
PG	2	real power output (MW)
QG	3	reactive power output (MVA _r)
QMAX	4	maximum reactive power output (MVA _r)
QMIN	5	minimum reactive power output (MVA _r)
VG [‡]	6	voltage magnitude setpoint (p.u.)
MBASE	7	total MVA base of machine, defaults to baseMVA
GEN_STATUS	8	machine status, > 0 = machine in-service ≤ 0 = machine out-of-service
PMAX	9	maximum real power output (MW)
PMIN	10	minimum real power output (MW)
PC1 [*]	11	lower real power output of PQ capability curve (MW)
PC2 [*]	12	upper real power output of PQ capability curve (MW)
QC1MIN [*]	13	minimum reactive power output at PC1 (MVA _r)
QC1MAX [*]	14	maximum reactive power output at PC1 (MVA _r)
QC2MIN [*]	15	minimum reactive power output at PC2 (MVA _r)
QC2MAX [*]	16	maximum reactive power output at PC2 (MVA _r)
RAMP_AGC [*]	17	ramp rate for load following/AGC (MW/min)
RAMP_10 [*]	18	ramp rate for 10 minute reserves (MW)
RAMP_30 [*]	19	ramp rate for 30 minute reserves (MW)
RAMP_Q [*]	20	ramp rate for reactive power (2 sec timescale) (MVA _r /min)
APF [*]	21	area participation factor
MU_PMAX [†]	22	Kuhn-Tucker multiplier on upper P_g limit (u/MW)
MU_PMIN [†]	23	Kuhn-Tucker multiplier on lower P_g limit (u/MW)
MU_QMAX [†]	24	Kuhn-Tucker multiplier on upper Q_g limit (u/MVA _r)
MU_QMIN [†]	25	Kuhn-Tucker multiplier on lower Q_g limit (u/MVA _r)

4. **mpc.branch:** Πίνακας με δεδομένα σχετικά με τους κλάδους του συστήματος που μπορεί να είναι είτε γραμμές μεταφοράς, είτε μετασχηματιστές. Περιέχει όλες τις συνδέσεις των ζυγών μεταξύ τους (F_BUS, T_BUS). Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια γραμμή μεταφοράς ή έναν μετασχηματιστή του συστήματος και κάθε στήλη περιέχει δεδομένα σχετικά με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά και τους λειτουργικούς περιορισμούς του κλάδου. Για παράδειγμα περιλαμβάνεται η σύνθετη αντίσταση γραμμής, τα θερμικά όρια και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών.

Πίνακας 9.3: Παράμετροι γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών.

name	column	description
F_BUS	1	“from” bus number
T_BUS	2	“to” bus number
BR_R	3	resistance (p.u.)
BR_X	4	reactance (p.u.)
BR_B	5	total line charging susceptance (p.u.)
RATE_A*	6	MVA rating A (long term rating), set to 0 for unlimited
RATE_B*	7	MVA rating B (short term rating), set to 0 for unlimited
RATE_C*	8	MVA rating C (emergency rating), set to 0 for unlimited
TAP	9	transformer off nominal turns ratio, if non-zero (taps at “from” bus, impedance at “to” bus, i.e. if $r = x = b = 0$, $tap = \frac{ V_f }{ V_t }$; $tap = 0$ used to indicate transmission line rather than transformer, i.e. mathematically equivalent to transformer with $tap = 1$)
SHIFT	10	transformer phase shift angle (degrees), positive $\Rightarrow$ delay
BR_STATUS	11	initial branch status, 1 = in-service, 0 = out-of-service
ANGMIN [†]	12	minimum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
ANGMAX [†]	13	maximum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
PF [‡]	14	real power injected at “from” bus end (MW)
QF [‡]	15	reactive power injected at “from” bus end (MVar)
PT [‡]	16	real power injected at “to” bus end (MW)
QT [‡]	17	reactive power injected at “to” bus end (MVar)
MU_SF [§]	18	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “from” bus (u/MVA)
MU_ST [§]	19	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at “to” bus (u/MVA)
MU_ANGMIN [§]	20	Kuhn-Tucker multiplier lower angle difference limit (u/degree)
MU_ANGMAX [§]	21	Kuhn-Tucker multiplier upper angle difference limit (u/degree)

Η αρχικοποίηση των τιμών των μέτρων και των γωνιών των τάσεων είναι ζωτικής σημασίας για τον καθορισμό της αρχικής υπόθεσης του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης, οι ροές ισχύος και τα όρια των γραμμών θέτουν περιορισμούς για τη διαδικασία της εκτίμησης, ενώ τα δεδομένα των γραμμών είναι χρήσιμα για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του ζυγού αναφοράς και των ζυγών παραγωγής, απαραίτητων για τη διασφάλιση της ισορροπίας στο σύστημα.

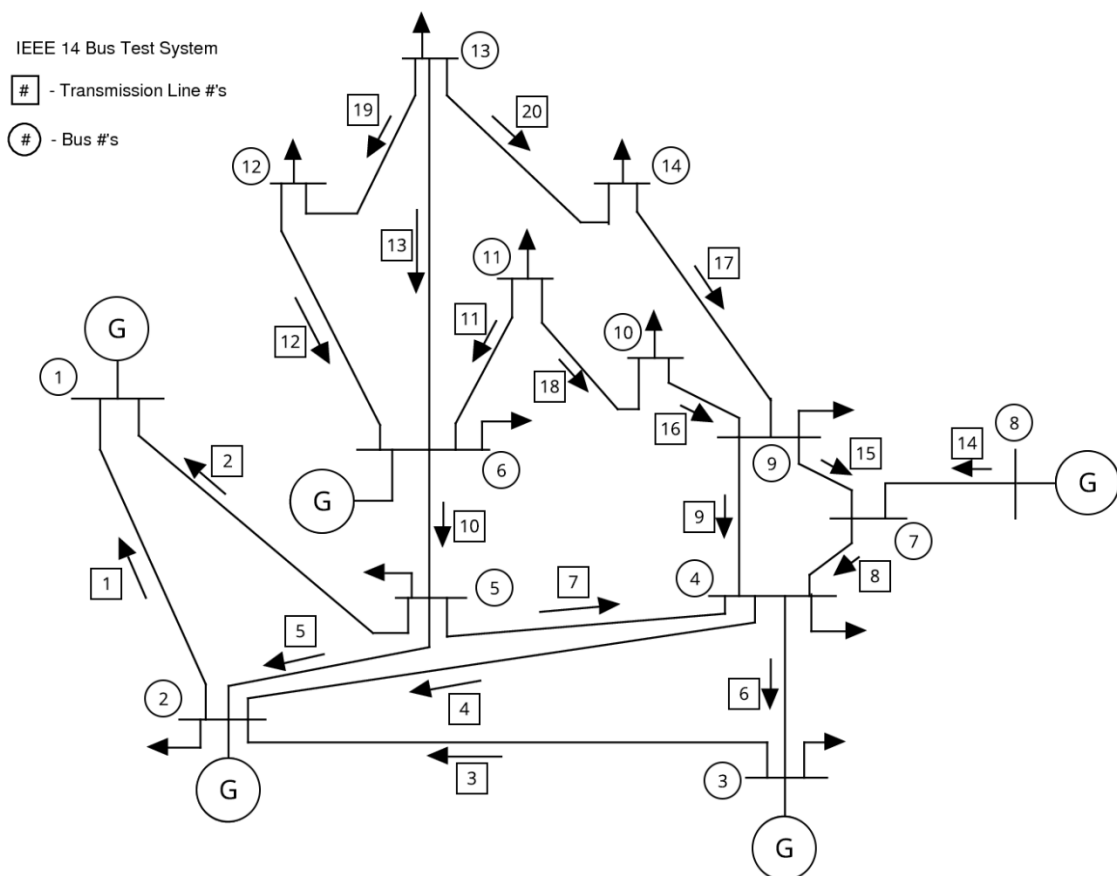
9.2 Πρότυπο δίκτυο IEEE 14 ζυγών

Το δίκτυο που χρησιμοποιείται για τη διενέργεια των δοκιμών και την εκτέλεση του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης είναι το πρότυπο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE. Είναι ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο τυποποιημένο σύστημα αναφοράς για την ανάλυση και την προσομοίωση ΣΗΕ. Αναπαριστά μια απλουστευμένη εκδοχή ενός πραγματικού δικτύου μεταφοράς και περιλαμβάνει βασικά στοιχεία για την ανάλυση ροής ισχύος, την ανάλυση ευστάθειας, την ανάλυση σφάλματος και την εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης.

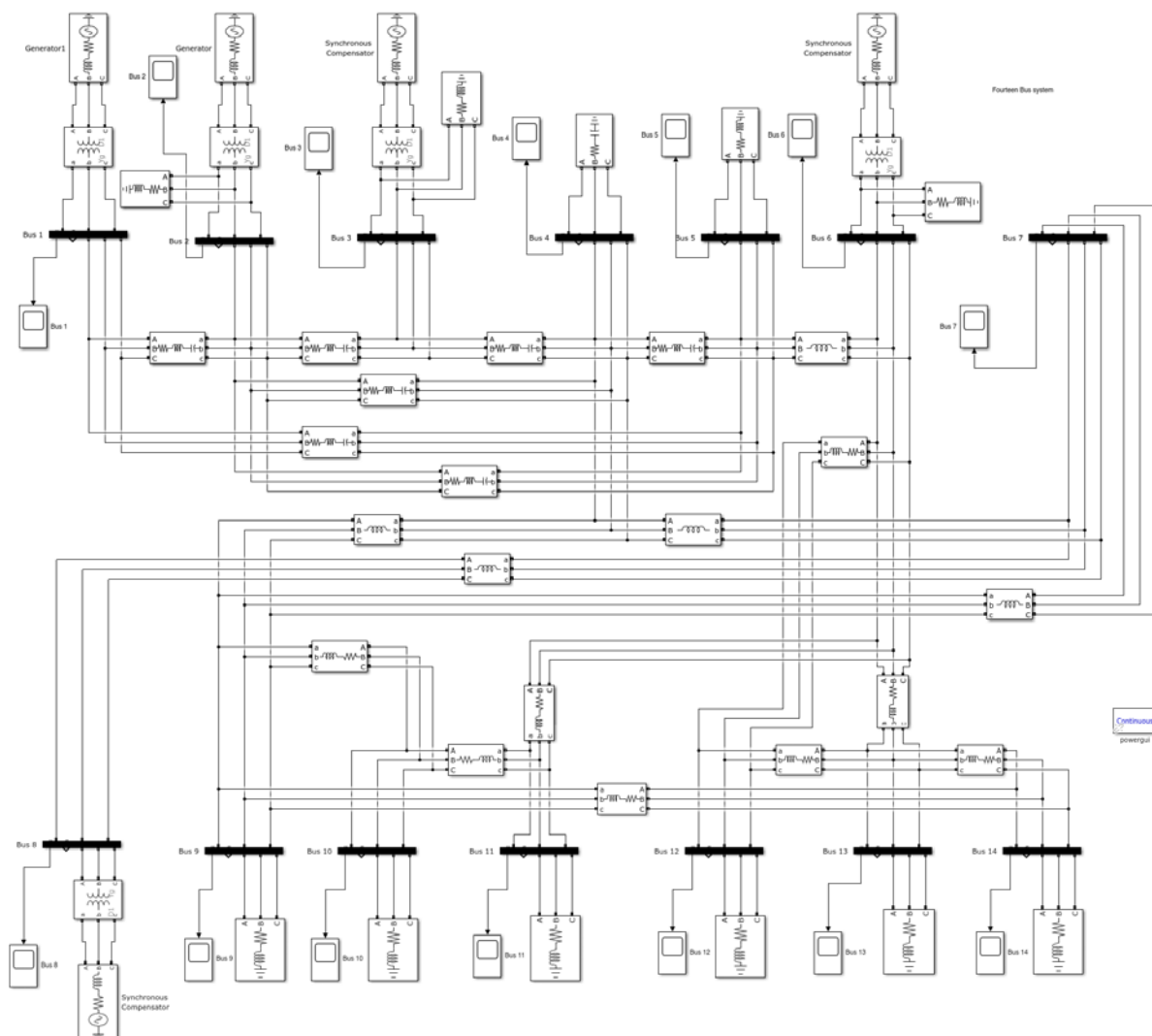
Το δίκτυο περιλαμβάνει 14 ζυγούς, πέντε γεννήτριες (συμπεριλαμβανομένου του ζυγού αναφοράς), τρεις σύγχρονους αντισταθμιστές και 11 ζυγούς φορτίου. Απαρτίζεται από 20 γραμμές μεταφοράς και διάφορους μετασχηματιστές, οι οποίοι επιτρέπουν τη μελέτη της ρύθμισης τάσης και της διαχείρισης αέργου ισχύος. Τυπικά, οι γεννήτριες

τοποθετούνται σε στρατηγικές θέσεις, όπως οι ζυγοί 1, 2, 3, 6 και 8, και ποικίλλουν ως προς την ισχύ τους, με τον ζυγό 1 να χρησιμεύει ως ζυγός αναφοράς με σκοπό την εξισορρόπηση της ενεργού και αέργου ισχύος σε όλο το σύστημα.

Το δίκτυο 14 ζυγών της IEEE είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τη δοκιμή και την επικύρωση νέων αλγορίθμων βελτιστοποίησης της λειτουργίας των ΣΗΕ. Χρησιμοποιείται για μελέτες ροής φορτίου, με χρήση μεθόδων όπως η Newton-Raphson ή η Gauss-Seidel, για την εξέταση της σύγκλισης και του αντίκτυπου διαφορετικών στρατηγικών ελέγχου ισχύος στην απόδοση του δικτύου. Γενικά, τόσο το δίκτυο 14 ζυγών, όσο και τα υπόλοιπα πρότυπα δίκτυα της IEEE (δίκτυο 30 ζυγών, 57 ζυγών, 118 ζυγών, κλπ.) χρησιμοποιούνται ευρέως ως συστήματα δοκιμών, καθώς διευκολύνουν την έρευνα και την ανάπτυξη αλγοριθμικών τεχνικών και τεχνικών προσομοίωσης και ελέγχου, παρέχοντας ένα τυποποιημένο περιβάλλον δοκιμών και εξασφαλίζοντας την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 9.1: Πρότυπο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE [99].



Σχήμα 9.2: Υλοποίηση του πρότυπου δικτύου 14 ζυγών της IEEE, στο περιβάλλον προσομοίωσης MATLAB® Simulink [95].

9.3 Δημιουργία μετρήσεων

Αφού καθοριστούν οι παράμετροι της δομής mpc, πραγματοποιείται η επίλυση ροής φορτίου, για το επιλεγμένο δίκτυο, με χρήση των συναρτήσεων:

- *monteCarloPowerFlow()*
- *runpf()*

Η συνάρτηση *runpf* του MATPOWER χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ροής φορτίου, τα οποία είναι θεμελιώδη για την ανάλυση του συστήματος και χρησιμεύουν ως βάση για την εκτίμηση κατάστασης. Υπολογίζονται τα μέτρα (σε α.μ.) και οι γωνίες (σε μοίρες) των τάσεων, σε όλους τους ζυγούς του δικτύου, δεδομένων των εγχύσεων ισχύος, των περιορισμών παραγωγής και της τοπολογίας του υπό μελέτη δικτύου.

Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου αποθηκεύονται σε ξεχωριστή δομή, με όνομα *results* και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των αρχικών συνθηκών του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης και παρέχουν μια αναφορά για τον έλεγχο των μετρήσεων.

Η συνάρτηση *monteCarloPowerFlow()* χρησιμοποιείται για την ενσωμάτωση της στοχαστικότητας και τη θεώρηση της πιθανοκρατικής φύσης των παραμέτρων του συστήματος, προσομοιώνοντας τις μεταβολές των φορτίων, την παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ή πιθανές βλάβες. Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο για τη δημιουργία διαφορετικών σεναρίων του προβλήματος ροής φορτίου, ρυθμίζοντας παραμέτρους όπως οι μεταβολές της ζήτησης, προσομοιώνοντας ένα ευρύ φάσμα ρεαλιστικών συνθηκών λειτουργίας και εξασφαλίζοντας έτσι μια πιο διευρυμένη εξέταση των πιθανών καταστάσεων του συστήματος. Με την ταυτόχρονη χρήση της *runpf()*, κάθε σενάριο επιλύεται ντετερμινιστικά, παρέχοντας αξιοπιστία στα αποτελέσματα ενός δεδομένου σημείου λειτουργίας. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ανάλυση της μεταβλητότητας του συστήματος, του τρόπου με τον οποίο η μεταβλητότητα επηρεάζει τις μεταβλητές κατάστασής του, αλλά και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου UKF στα διαφορετικά εξεταζόμενα σενάρια.

Η προετοιμασία των δεδομένων για την εκτίμηση κατάστασης στο MATPOWER, προϋποθέτει την προσεκτική διάρθρωση των αποτελεσμάτων της ροής ισχύος σε διανύσματα κατάστασης και μετρήσεων [96]. Με τη χρήση των αποτελεσμάτων της *runpf()*, κατασκευάζεται μια αρχική υπόθεση του διανύσματος κατάστασης και διαμορφώνονται τα δεδομένα μέτρησης, με προσθήκη θορύβου, δημιουργώντας τις αρχικές συνθήκες για την εφαρμογή του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.

```

Newton's method converged in 2 iterations.
PF successful

Converged in 0.64 seconds
=====
|      System Summary      |
=====

```

How many?		How much?	P (MW)	Q (MVar)

Buses	14	Total Gen Capacity	772.4	-52.0 to 148.0
Generators	5	On-line Capacity	772.4	-52.0 to 148.0
Committed Gens	5	Generation (actual)	272.4	82.4
Loads	11	Load	259.0	73.5
Fixed	11	Fixed	259.0	73.5
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	1	Shunt (inj)	-0.0	21.2
Branches	20	Losses (I^2 * Z)	13.39	54.54
Transformers	3	Branch Charging (inj)	-	24.4
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			
		Minimum	Maximum	

Voltage Magnitude	1.010 p.u. @ bus 3		1.090 p.u. @ bus 8	
Voltage Angle	-16.03 deg @ bus 14		0.00 deg @ bus 1	
P Losses (I^2*R)	-		4.30 MW @ line 1-2	
Q Losses (I^2*X)	-		13.12 MVar @ line 1-2	

Σχήμα 9.3: Επισκόπηση αποτελεσμάτων της συνάρτησης *runpf()*.

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.060	0.000*	232.39	-16.55	-	-
2	1.045	-4.983	40.00	43.56	21.70	12.70
3	1.010	-12.725	0.00	25.08	94.20	19.00
4	1.018	-10.313	-	-	47.80	-3.90
5	1.020	-8.774	-	-	7.60	1.60
6	1.070	-14.221	0.00	12.73	11.20	7.50
7	1.062	-13.360	-	-	-	-
8	1.090	-13.360	0.00	17.62	-	-
9	1.056	-14.939	-	-	29.50	16.60
10	1.051	-15.097	-	-	9.00	5.80
11	1.057	-14.791	-	-	3.50	1.80
12	1.055	-15.076	-	-	6.10	1.60
13	1.050	-15.156	-	-	13.50	5.80
14	1.036	-16.034	-	-	14.90	5.00
Total:			272.39	82.44	259.00	73.50

Σχήμα 9.4: Αποτελέσματα μέτρων και γωνιών τάσεων της *runpf()*.

Branch Data								
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	Loss ($I^2 \cdot Z$)	
							P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	156.88	-20.40	-152.59	27.68	4.298	13.12
2	1	5	75.51	3.85	-72.75	2.23	2.763	11.41
3	2	3	73.24	3.56	-70.91	1.60	2.323	9.79
4	2	4	56.13	-1.55	-54.45	3.02	1.677	5.09
5	2	5	41.52	1.17	-40.61	-2.10	0.904	2.76
6	3	4	-23.29	4.47	23.66	-4.84	0.373	0.95
7	4	5	-61.16	15.82	61.67	-14.20	0.514	1.62
8	4	7	28.07	-9.68	-28.07	11.38	0.000	1.70
9	4	9	16.08	-0.43	-16.08	1.73	0.000	1.30
10	5	6	44.09	12.47	-44.09	-8.05	0.000	4.42
11	6	11	7.35	3.56	-7.30	-3.44	0.055	0.12
12	6	12	7.79	2.50	-7.71	-2.35	0.072	0.15
13	6	13	17.75	7.22	-17.54	-6.80	0.212	0.42
14	7	8	-0.00	-17.16	0.00	17.62	0.000	0.46
15	7	9	28.07	5.78	-28.07	-4.98	0.000	0.80
16	9	10	5.23	4.22	-5.21	-4.18	0.013	0.03
17	9	14	9.43	3.61	-9.31	-3.36	0.116	0.25
18	10	11	-3.79	-1.62	3.80	1.64	0.013	0.03
19	12	13	1.61	0.75	-1.61	-0.75	0.006	0.01
20	13	14	5.64	1.75	-5.59	-1.64	0.054	0.11
Total:							13.393	54.54

Σχήμα 9.5: Αποτελέσματα ροών ενεργού και αέργου της *runpf()*.

9.4 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης με χρήση του UKF. Προσομοιώνονται οι μεταβολές του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των φορτίων στον χρόνο. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του UKF με τα αποτελέσματα του κλασσικού αλγορίθμου στατικής εκτίμησης κατάστασης.

Στις ακόλουθες προσομοιώσεις, θεωρούνται μετρήσεις προερχόμενες αποκλειστικά από PMU. Τα διαθέσιμα δεδομένα PMU περιλαμβάνουν μετρήσεις των πραγματικών και φανταστικών συνιστωσών των τάσεων και ρευμάτων για ένα υποσύνολο των ζυγών και των κλάδων του ΣΗΕ. Συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο διαφορετικά σύνολα μετρήσεων, αξιοποιώντας συνολικά 4 και 7 PMU αντίστοιχα, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι οι επιλεγμένες μετρήσεις καθιστούν το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο, ήτοι την επιλυσιμότητα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.

Οι μετρήσεις που απαρτίζουν το διάνυσμα μετρήσεων προκύπτουν προσθέτοντας κανονικό θόρυβο στα αποτελέσματα της ροής φορτίου. Συγκεκριμένα, στις θεωρούμενες μετρήσεις PMU προστίθεται τυχαίος θόρυβος που ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ , με χρήση της συνάρτησης *randn* στον κώδικα. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την τυπική απόκλιση σ για κάθε κατηγορία μετρήσεων, ρυθμίζοντας τις τιμές της από τις σχετικές παραμέτρους. Αξίζει να σημειωθεί ότι, καθώς οι τιμές των φασιθετών ρευμάτων γραμμών δεν είναι διαθέσιμες από τη ροή φορτίου, αυτές μπορούν να υπολογιστούν βάσει των εξισώσεων του Κεφαλαίου 6, λαμβάνοντας υπόψη τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων και μετατρέποντας τα δεδομένα της δομής *results* σε καρτεσιανή μορφή. Σε όλες τις δοκιμές υποτίθεται μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου.

Το διάνυσμα κατάστασης X περιλαμβάνει τις πραγματικές (V_{real}) και φανταστικές (V_{img}) συνιστώσες της τάσης όλων των ζυγών του συστήματος, σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Για ένα σύστημα με n ζυγούς, το X είναι ένα διάνυσμα διαστάσεων $2n$:

$$X = [V_{img}^1, V_{img}^2, \dots, V_{img}^n, V_{real}^1, V_{real}^2, \dots, V_{real}^n]^T \quad (9.1)$$

Αφού εισαχθεί το υπό μελέτη μοντέλο του συστήματος (case14.m), η προσομοίωση εκκινεί με την επίλυση ροής φορτίου. Το κύριο μέρος του αλγορίθμου ξεκινά με μια αρχική εκτίμηση για το διάνυσμα κατάστασης X_0 , το οποίο περιλαμβάνει τα μέτρα και τις γωνίες τάσης που προκύπτουν από τα αρχικά αποτελέσματα της ροής φορτίου. Αρχειοποιούνται οι πίνακες συνδιακύμανσης P , Q και R , ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις κατάστασης, τις αβεβαιότητες που οφείλονται στη δυναμική του συστήματος (θόρυβος διαδικασίας) και τον μετρητικό θόρυβο στα δεδομένα PMU. Οι προβλεπόμενες καταστάσεις δεν είναι ντετερμινιστικές αλλά περιλαμβάνουν αβεβαιότητα λόγω αυτού του θορύβου.

Δημιουργούνται σημεία σίγμα για την προσέγγιση της μη γραμμικής μετάβασης κατάστασης, χρησιμοποιώντας την πιο πρόσφατη εκτίμηση των P και $\hat{x}$. Χρησιμοποιώντας την προηγούμενη εκτίμηση και το διάνυσμα $\hat{x}_k^{(i)}$, λαμβάνεται η εκ των προτέρων εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης και υπολογίζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης του σφάλματος πρόβλεψης.

Στο βήμα διόρθωσης, καθορίζονται τα νέα σημεία σίγμα, συμπεριλαμβάνοντας τις τελευταίες μεταβολές στον πίνακα συνδιακύμανσης και στο διάνυσμα κατάστασης. Χρησιμοποιώντας τα τελευταία σημεία σίγμα στη συνάρτηση μέτρησης $h(\cdot)$, καθορίζονται οι προβλεπόμενες μετρήσεις $\hat{z}_k^{(i)}$. Υπολογίζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης των προβλεπόμενων μετρήσεων P_z , ο πίνακας ετεροσυσχέτισης P_{xz} και το κέρδος Kalman. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω μεγέθη, το UKF υπολογίζει το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης, σε κάθε χρονικό βήμα.

Στο τέλος της διαδικασίας και αφού ολοκληρωθεί η εκτίμηση κατάστασης του UKF, παρουσιάζονται τα μέτρα τάσεων (α.μ.), οι γωνίες (°) όλων των ζυγών του δικτύου καθώς και οι αντίστοιχες αποκλίσεις της εκτιμώμενης κατάστασης σε σχέση με τις πραγματικές τιμές, στο Command Window του MATLAB®. Στη συνέχεια εκτελείται ο κλασσικός αλγόριθμος στατικής εκτίμησης κατάστασης, ώστε να υπάρχει μία βάση σύγκρισης για την αξιολόγηση της απόδοσης του αλγορίθμου UKF.

9.5 Αποτελέσματα αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης UKF

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης, για το δίκτυο 14 ζυγών, σε κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις PMU και για τις δύο μεθόδους εκτίμησης κατάστασης, με χρήση UKF και WLS, για ένα time sample. Για τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν θεωρηθεί 4 PMUs, εγκατεστημένα στους ζυγούς 2, 6, 7 και 9.

UKF SE Results							
State Estimation				Real Values		Difference	
Voltage				Voltage		Voltage Difference (Mag & Ang)	
Bus #	Mag (pu)	Ang (deg)		Mag (pu)	Ang (deg)	Mag Diff	Ang Diff
1	1.0600	0.0002		1.0600	0.0000	1.2631e-05	0.0000e+00
2	1.0449	-4.9826		1.0450	-4.9800	5.4044e-05	2.7572e-03
3	1.0100	-12.7252		1.0100	-12.7200	4.6303e-05	5.3655e-03
4	1.0178	-10.3130		1.0190	-10.3300	1.2118e-03	1.6757e-02
5	1.0195	-8.7738		1.0200	-8.7800	5.0432e-04	5.9944e-03
6	1.0699	-14.2209		1.0700	-14.2200	5.2321e-05	1.1158e-03
7	1.0615	-13.3596		1.0620	-13.3700	5.4515e-04	1.0224e-02
8	1.0899	-13.3597		1.0900	-13.3600	8.5374e-05	1.1965e-04
9	1.0558	-14.9386		1.0560	-14.9400	1.7336e-04	1.2200e-03
10	1.0510	-15.0972		1.0510	-15.1000	3.7838e-05	2.5725e-03
11	1.0570	-14.7907		1.0570	-14.7900	4.9535e-05	8.6501e-04
12	1.0552	-15.0756		1.0550	-15.0700	2.3060e-04	5.7978e-03
13	1.0504	-15.1563		1.0500	-15.1600	3.9374e-04	3.5283e-03
14	1.0355	-16.0336		1.0360	-16.0400	4.6936e-04	6.1936e-03

Σχήμα 9.6: Αποτελέσματα αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με χρήση UKF.

WLS SE Results							
State Estimation			Real Values		Difference		
Voltage			Voltage		Voltage Difference (Mag & Ang)		
Bus #	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag (pu)	Ang (deg)	Mag Diff	Ang Diff	
1	1.0593	0.0000	1.0600	0.0000	6.9887e-04	0.0000e+00	
2	1.0447	-4.9819	1.0450	-4.9800	3.2618e-04	1.9269e-03	
3	1.0101	-12.7262	1.0100	-12.7200	-6.0132e-05	6.1750e-03	
4	1.0182	-10.3465	1.0190	-10.3300	8.3066e-04	1.6460e-02	
5	1.0197	-8.7816	1.0200	-8.7800	3.4642e-04	1.6477e-03	
6	1.0698	-14.2278	1.0700	-14.2200	2.4227e-04	7.8384e-03	
7	1.0628	-13.3542	1.0620	-13.3700	-8.4807e-04	-1.5765e-02	
8	1.0910	-13.3304	1.0900	-13.3600	-9.7796e-04	-2.9588e-02	
9	1.0567	-14.9265	1.0560	-14.9400	-6.9973e-04	-1.3494e-02	
10	1.0518	-15.0846	1.0510	-15.1000	-7.9285e-04	-1.5370e-02	
11	1.0567	-14.8046	1.0570	-14.7900	3.3349e-04	1.4576e-02	
12	1.0547	-15.0823	1.0550	-15.0700	3.2615e-04	1.2256e-02	
13	1.0499	-15.1723	1.0500	-15.1600	1.3672e-04	1.2306e-02	
14	1.0365	-16.0240	1.0360	-16.0400	-5.0730e-04	-1.6015e-02	

Σχήμα 9.7: Αποτελέσματα αλγορίθμου κλασσικής εκτίμησης κατάστασης WLS.

Αρχικά, όσον αφορά τα αποτελέσματα του UKF, γίνεται εμφανές ότι η απόκλιση των εκτιμώμενων μέτρων τάσης από την θεωρούμενη πραγματική τιμή τους είναι περίπου ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη της εκτίμησης WLS. Η απόκλιση του UKF κυμαίνεται σε τάξη μεγέθους $10^{-4} - 10^{-5}$ και η απόκλιση της WLS σε τάξη μεγέθους, 10^{-4} , σταθερά. Σε ό,τι αφορά την εκτίμηση των γωνιών τάσης, το UKF αποκλίνει λιγότερο κατά τουλάχιστον μία τάξη μεγέθους από το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης, σε σχέση με την WLS.

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με χρήση UKF, υπολογίζεται: $O\left(\frac{13}{3}n^3 + 11n^2 + \frac{14}{3}n + \frac{8}{3}l^3 + 12nl^2 + 2n^2l + 6l^2 + 10nl + n^2 + \frac{19}{3}l + n\right)$, όπου n το πλήθος των ζυγών του συστήματος και l το πλήθος των θεωρούμενων μετρήσεων PMU [97] [98]. Για μεγάλες τιμές του n , και επειδή στη συντριπτική πλειοψηφία των περιπτώσεων, τα εγκατεστημένα PMUs είναι σημαντικά λιγότερα από τους ζυγούς, δηλαδή $l \ll n$, ο όρος n^3 κυριαρχεί και όλοι οι υπόλοιποι όροι μπορούν να αμεληθούν, προσεγγίζοντας την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου UKF ως $O(n^3)$.

Ο υπολογιστικά απαιτητικός όρος n^3 οφείλεται στον υπολογισμό των σημείων σίγμα. Τα σημεία σίγμα παράγονται με χρήση του πίνακα συνδιακύμανσης P , ενός συμμετρικού, θετικά ορισμένου πίνακα διαστάσεων $2n \times 2n$, που αποτυπώνει τις διακυμάνσεις και συνδιακυμάνσεις όλων των μεταβλητών κατάστασης. Το υπολογιστικά απαιτητικό βήμα στη διαδικασία υπολογισμού των σημείων σίγμα, είναι η απαιτούμενη παραγοντοποίηση Cholesky του P , η οποία μετατρέπει τον πίνακα P σε γινόμενο ενός κάτω-τριγωνικού πίνακα L με τον ανάστροφό του L^T , δηλαδή $P = L \cdot L^T$, ενώ στη συνέχεια στίγλες του L προστίθενται και αφαιρούνται, πολλαπλασιασμένες επί κάποιο ειδικό βάρος, στο μέσο διάνυσμα κατάστασης [97].

Η παραγοντοποίηση Cholesky η οποία έχει πολυπλοκότητα $O(n^3)$, τελικά καθορίζει τη συνολική πολυπλοκότητα της διαδικασίας υπολογισμού των σημείων σίγμα, αφού το αμέσως επόμενο, πιο απαιτητικό βήμα περιλαμβάνει προσθέσεις και πολλαπλασιασμούς διανυσμάτων, που έχουν πολυπλοκότητα $O(n^2)$ – σημαντικά μικρότερη και άρα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα σε σχέση με τον κυβικό όρο n^3 . Δεδομένου ότι ο πίνακας P υπολογίζεται εκ νέου και παραγοντοποιείται κατά Cholesky σε κάθε χρονικό βήμα του αλγορίθμου, η πολυπλοκότητα $O(n^3)$, γίνεται το αδύναμο σημείο (bottleneck) του UKF συνολικά.

Όμοιας τάξης είναι και η υπολογιστική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης WLS. Για την κατασκευή της Ιακωβιανής μήτρας, τις πράξεις μεταξύ πινάκων και τον υπολογισμό της μήτρας κέρδους έχουμε πολυπλοκότητα $O(l \cdot n)$ και $O(l \cdot n^2)$, ενώ για την αντιστροφή της μήτρας κέρδους και τον υπολογισμό του διανύσματος κατάστασης, χρησιμοποιείται και πάλι παραγοντοποίηση Cholesky, με πολυπλοκότητα της τάξης του $O(n^3)$, στη χειρότερη περίπτωση, δηλαδή αν έχουμε «πυκνούς» πίνακες συνδιακύμανσης. Έτσι, η συνολική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου WLS είναι $O(l \cdot n^2 + n^3)$ και επειδή $l \ll n$, προσεγγίζεται επίσης ως $O(n^3)$ [102] [103].

Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ζυγών του υπό μελέτη συστήματος, η κυβική αύξηση της παραγοντοποίησης Cholesky, την καθιστά τον κυρίαρχο παράγοντα του υπολογιστικού κόστους. Για συστήματα με μικρό πλήθος ζυγών, όπως το εξεταζόμενο στην παρούσα διπλωματική εργασία, δίκτυο 14 ζυγών, η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων UKF και WLS, δεν συνεπάγεται μεγάλη χρονική διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε σχέση με τη WLS – η χρονική διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου είναι περίπου αυξημένη κατά 60%. Παρακάτω φαίνεται η χρονική διάρκεια σε κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις και για τις δύο μεθόδους εκτίμησης κατάστασης, από το Command Window του MATLAB®:

UKF state estimation time: 0.0329 seconds
WLS State estimation time: 0.0209 seconds

Σχήμα 9.8: Χρονική διάρκεια εκτέλεσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης UKF και WLS.

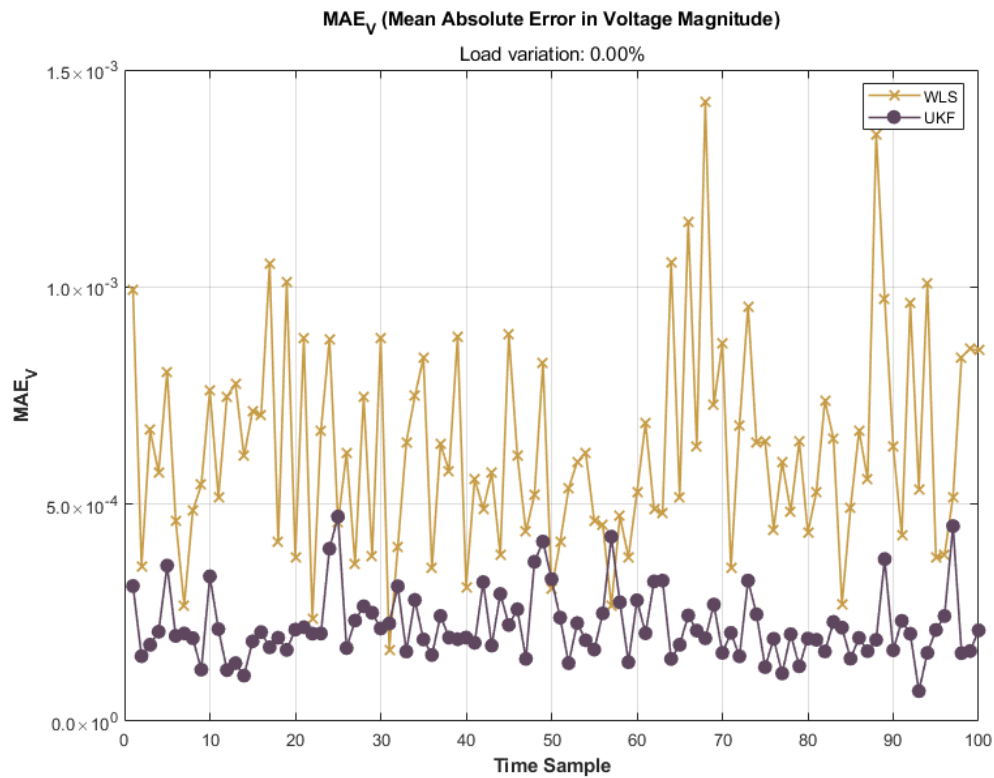
Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδοση των δύο αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης, με βάση τους δείκτες που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 8, δηλαδή με βάση τους δείκτες:

- Μέσου απολύτου σφάλματος τάσης MAE_V (α.μ.),
- Μέσου απολύτου σφάλματος γωνίας MAE_A (°),
- Μέσου απολύτου σφάλματος μιγαδικής συνιστώσας $MACC_V$ (p. u. ∠°),
- Μέσου απολύτου ποσοστιαίου σφάλματος $MAPE_V$ (%).

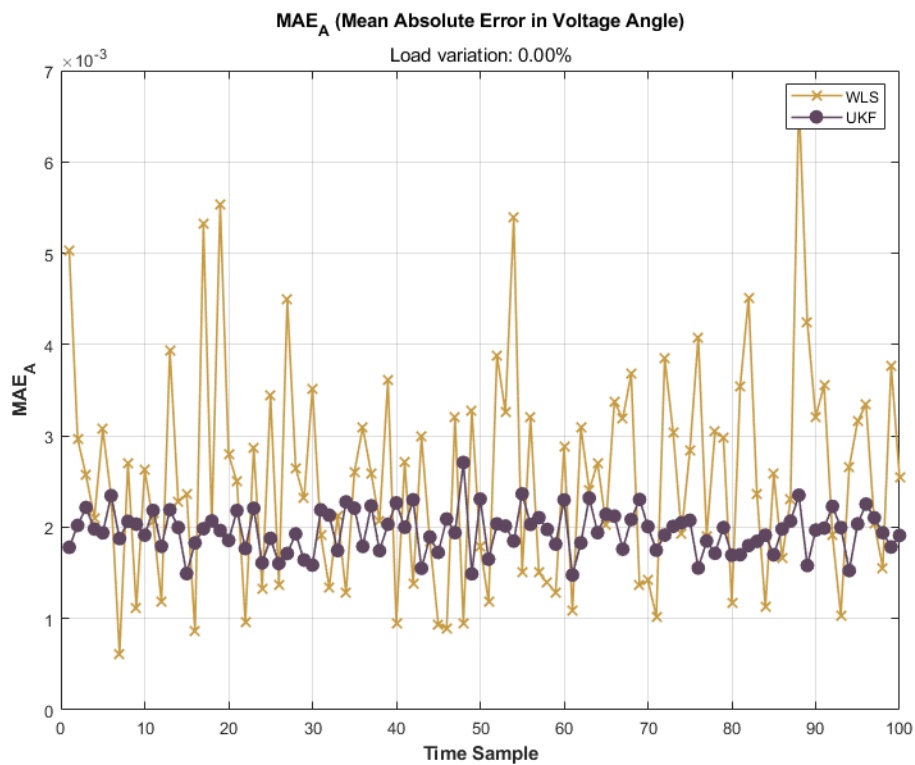
Εξετάζονται οι περιπτώσεις μηδενικών μεταβολών στο φορτίο, ποσοστιαίων μεταβολών 10% και 20%, σε συνολική διάρκεια 100 διακριτών χρονικών στιγμιότυπων (time samples), θεωρώντας δύο διαφορετικά σύνολα μετρήσεων, με εγκατεστημένα 4 και 7 PMU, στους ζυγούς 2, 6, 7, 9 και 1, 3, 5, 8, 9, 10, 12, αντίστοιχα.

9.5.1 Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών με 4 PMU

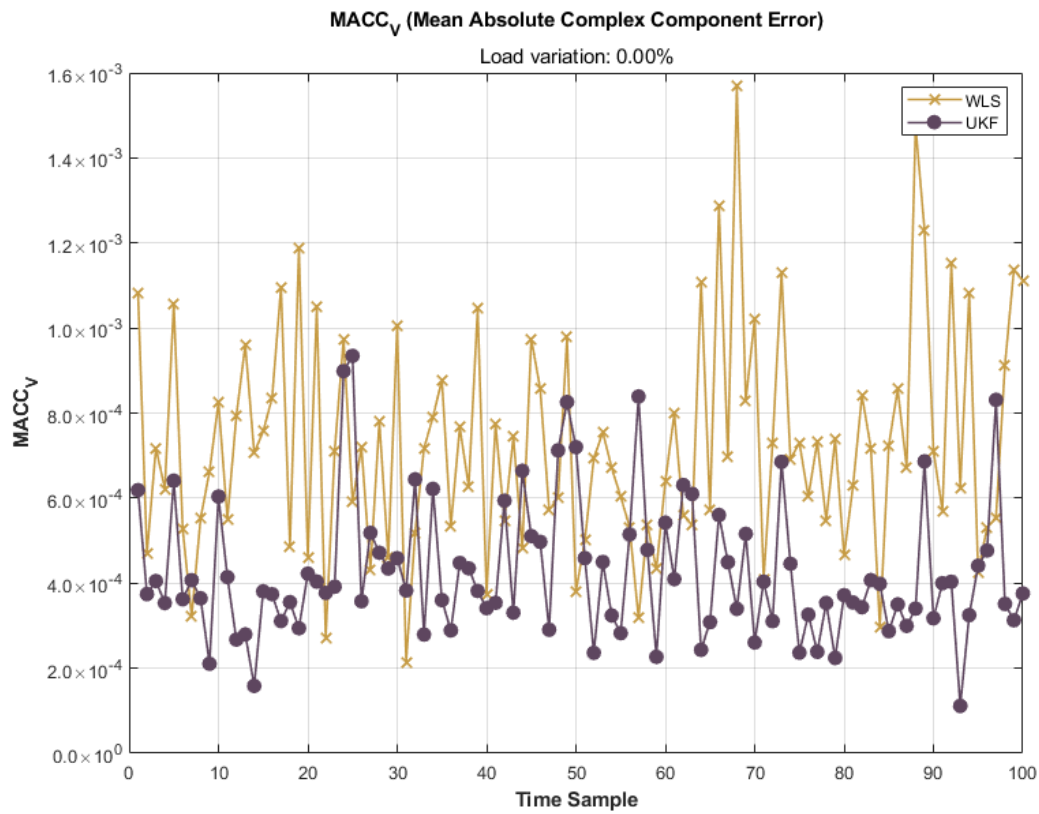
- 1^η προσομοίωση: 4 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου.



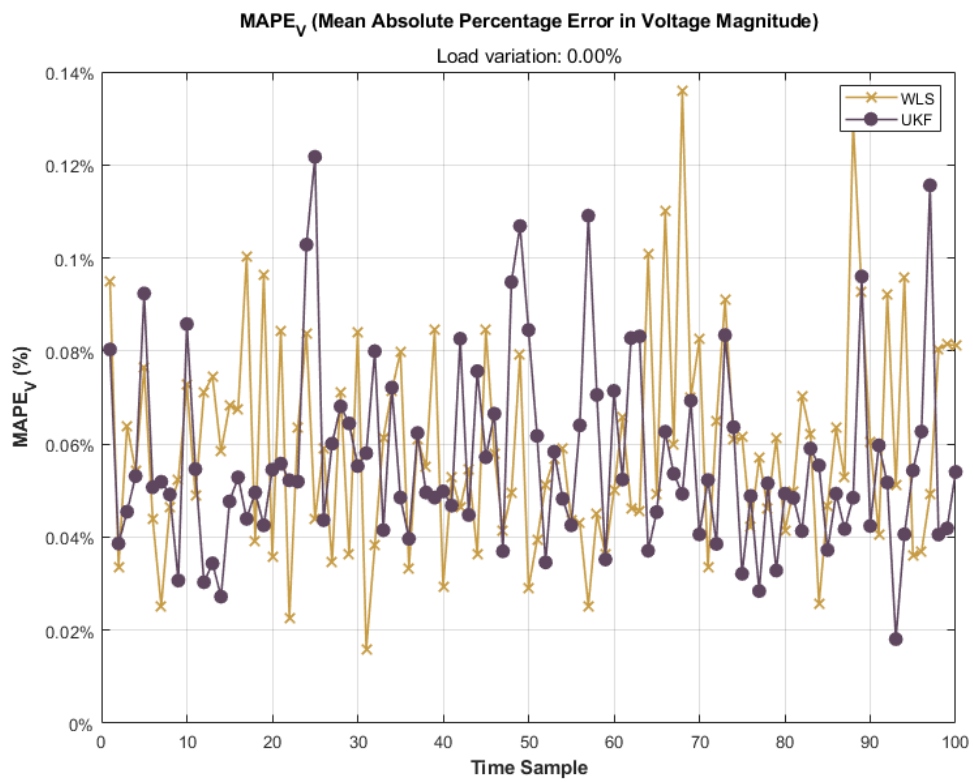
Σχήμα 9.9: Δείκτης MAE_V 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).



Σχήμα 9.10: Δείκτης MAE_A 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών, με 4 PMU).

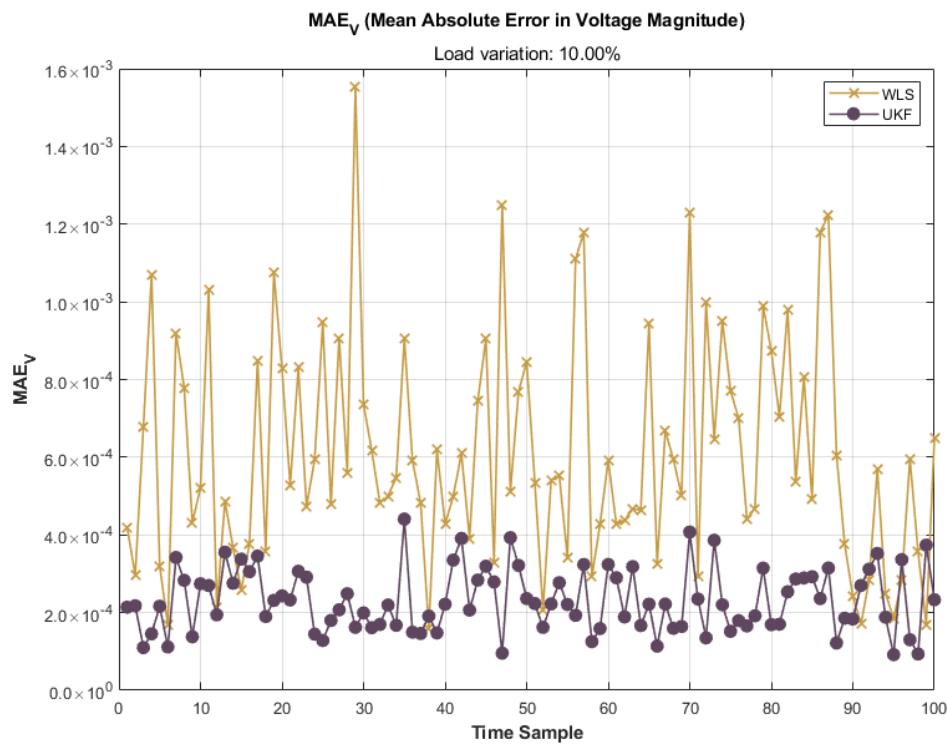


Σχήμα 9.11: Δείκτης $MACC_V$ 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

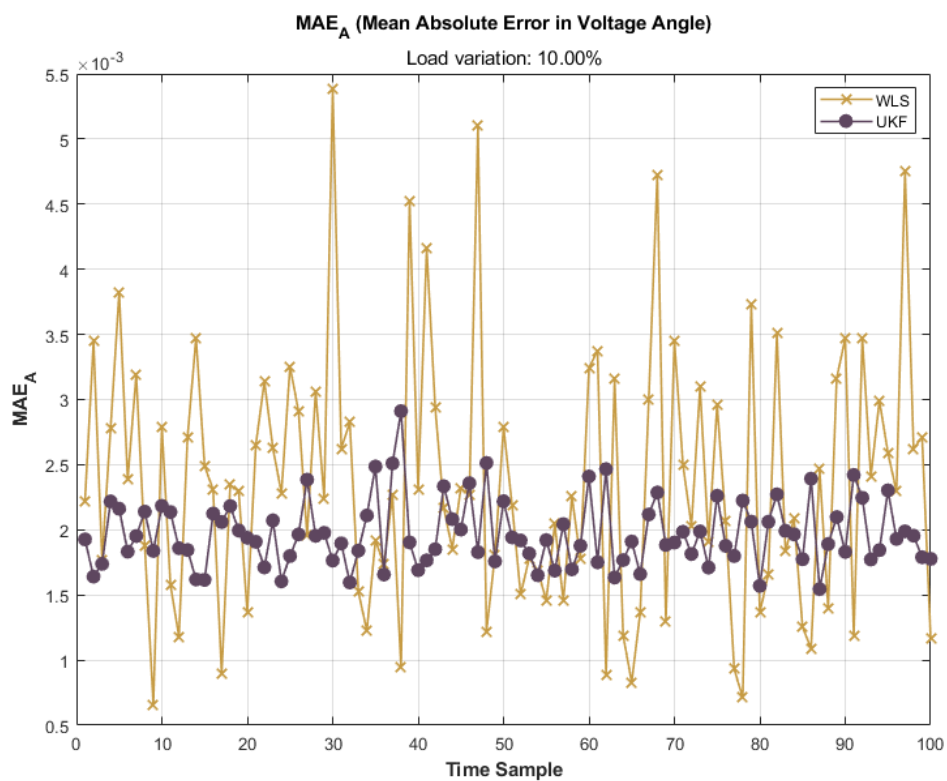


Σχήμα 9.12: Δείκτης $MAPE_V$ 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

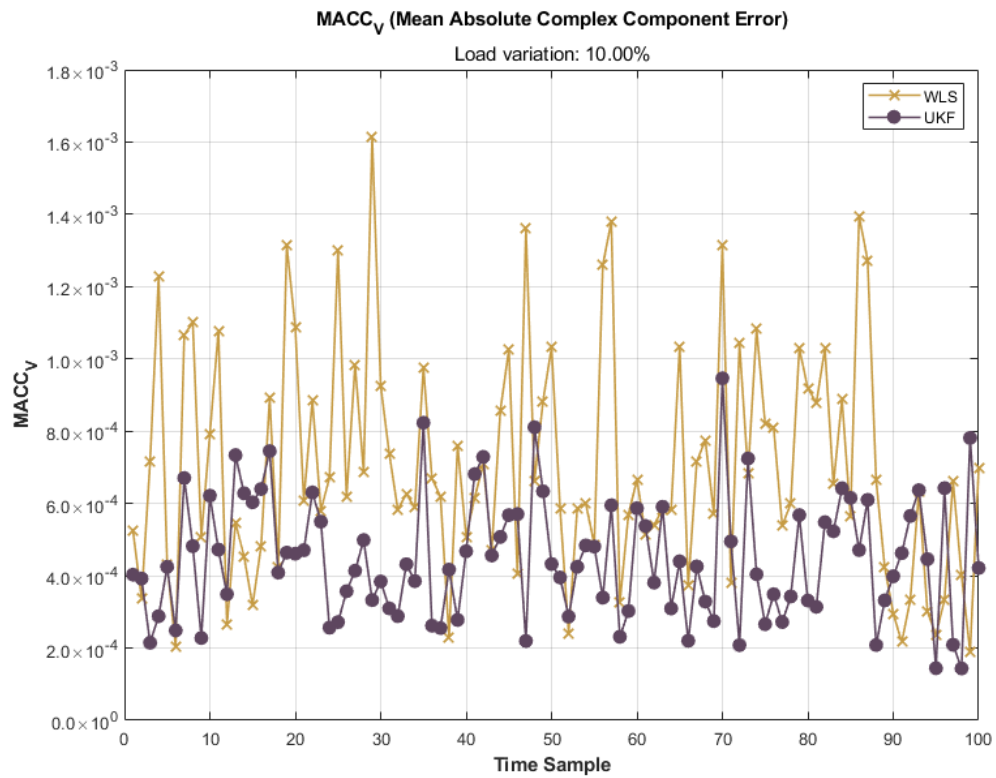
- 2^η προσομοίωση: 4 PMU και μεταβολή φορτίου κατά +10%.



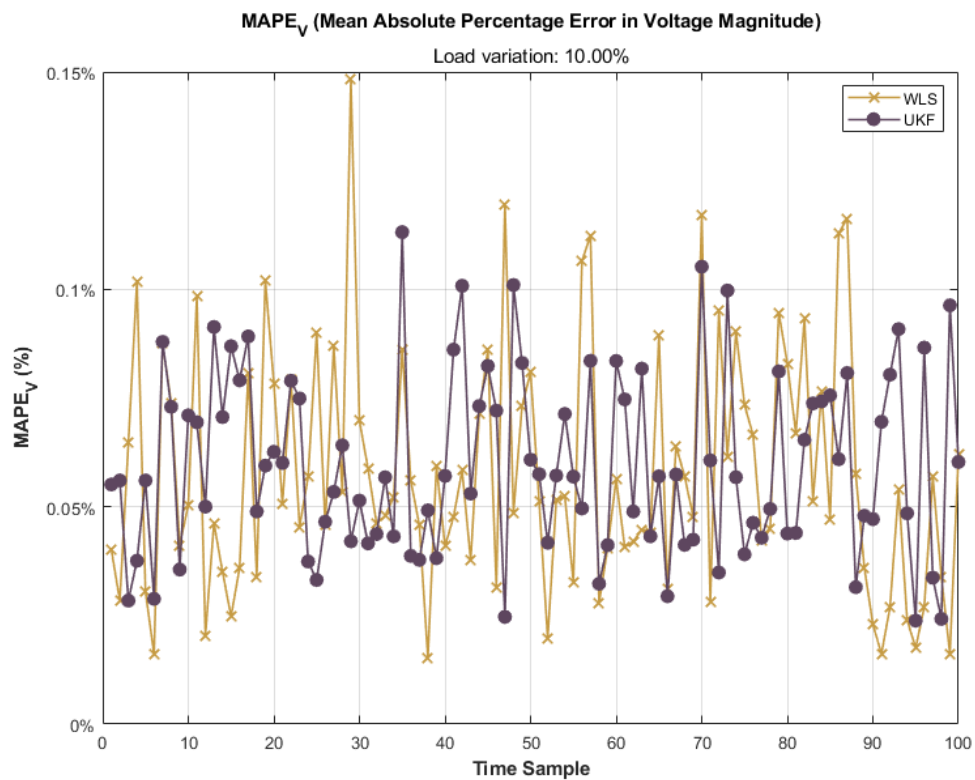
Σχήμα 9.13: Δείκτης MAE_V 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).



Σχήμα 9.14: Δείκτης MAE_A 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

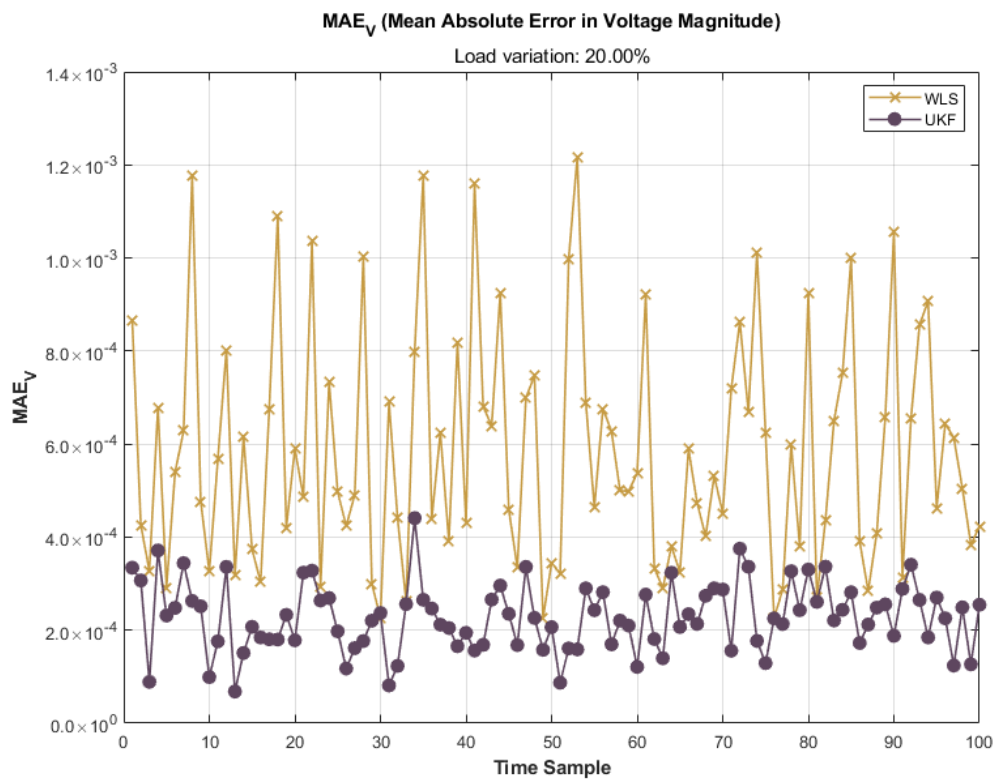


Σχήμα 9.15: Δείκτης $MACC_V$ 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

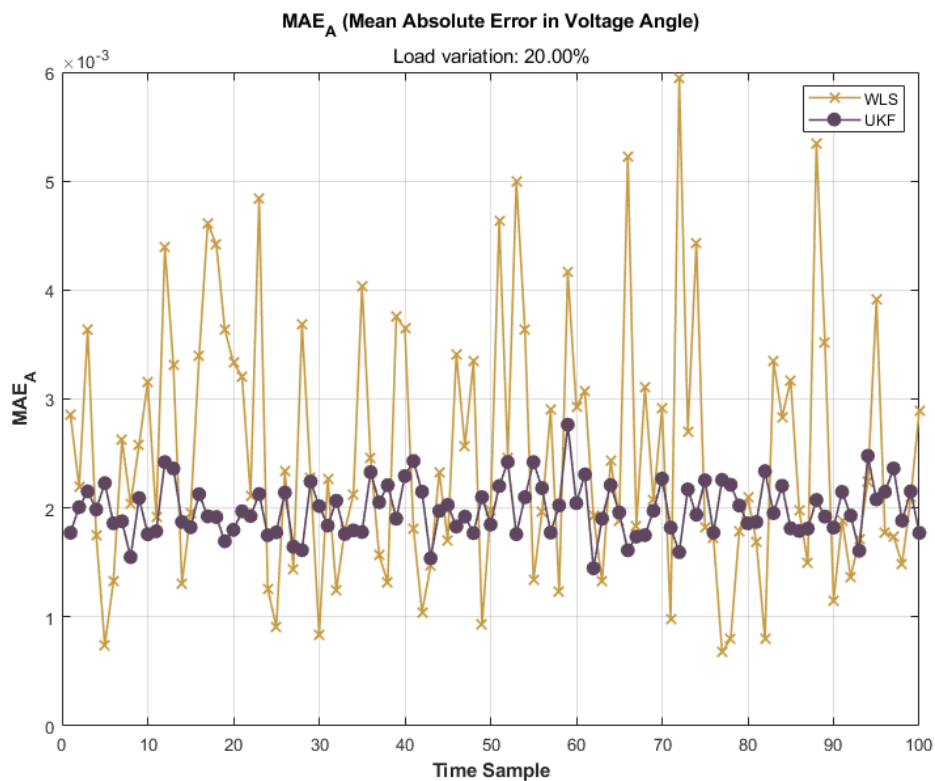


Σχήμα 9.16: Δείκτης $MAPE_V$ 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

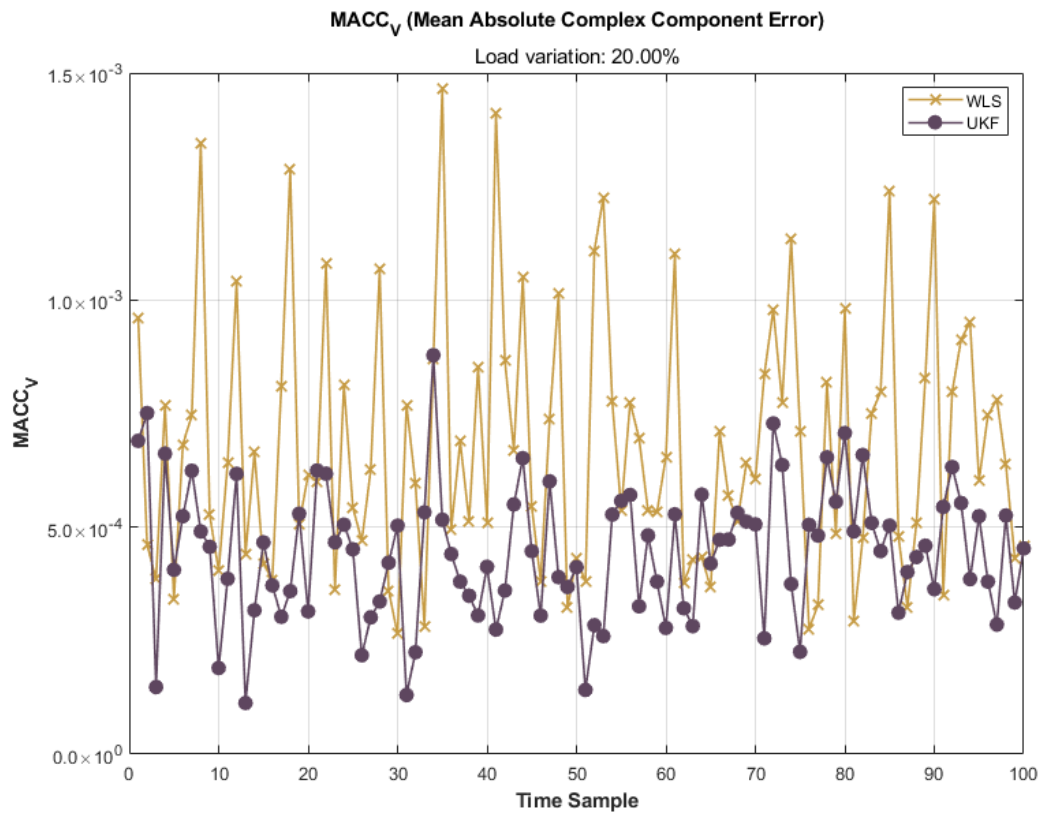
- 3^η προσομοίωση: 4 PMU και μεταβολή φορτίου κατά +20%.



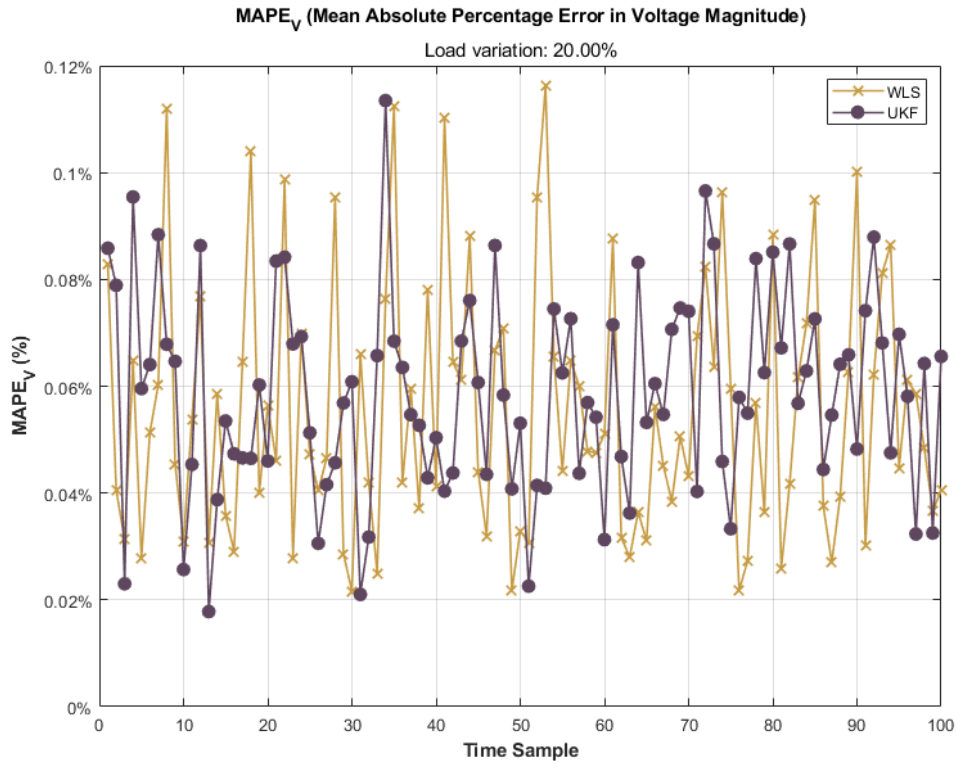
Σχήμα 9.17: Δείκτης MAE_V 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).



Σχήμα 9.18: Δείκτης MAE_A 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).



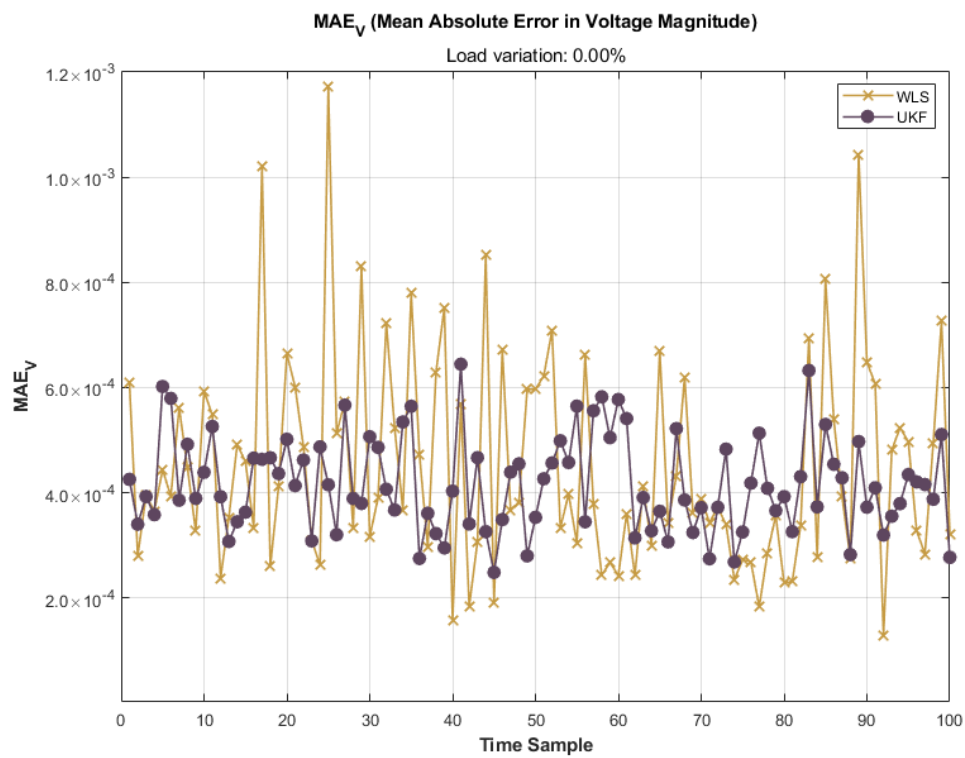
Σχήμα 9.19: Δείκτης $MACC_V$ 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).



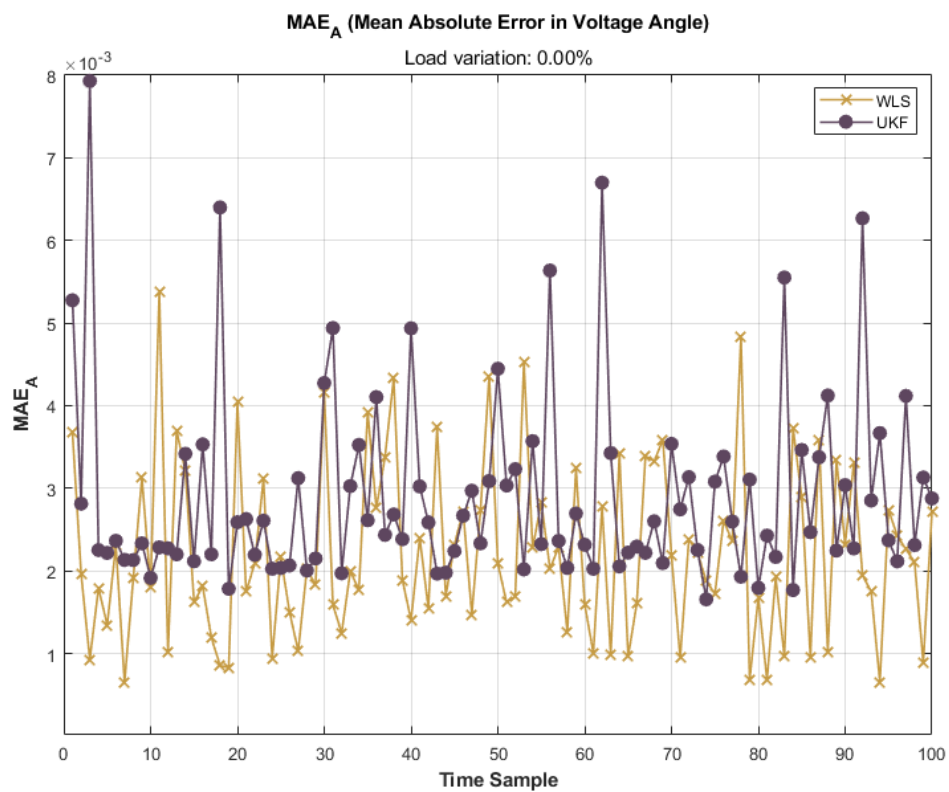
Σχήμα 9.20: Δείκτης $MAPE_V$ 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU).

9.5.2 Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών με 7 PMU

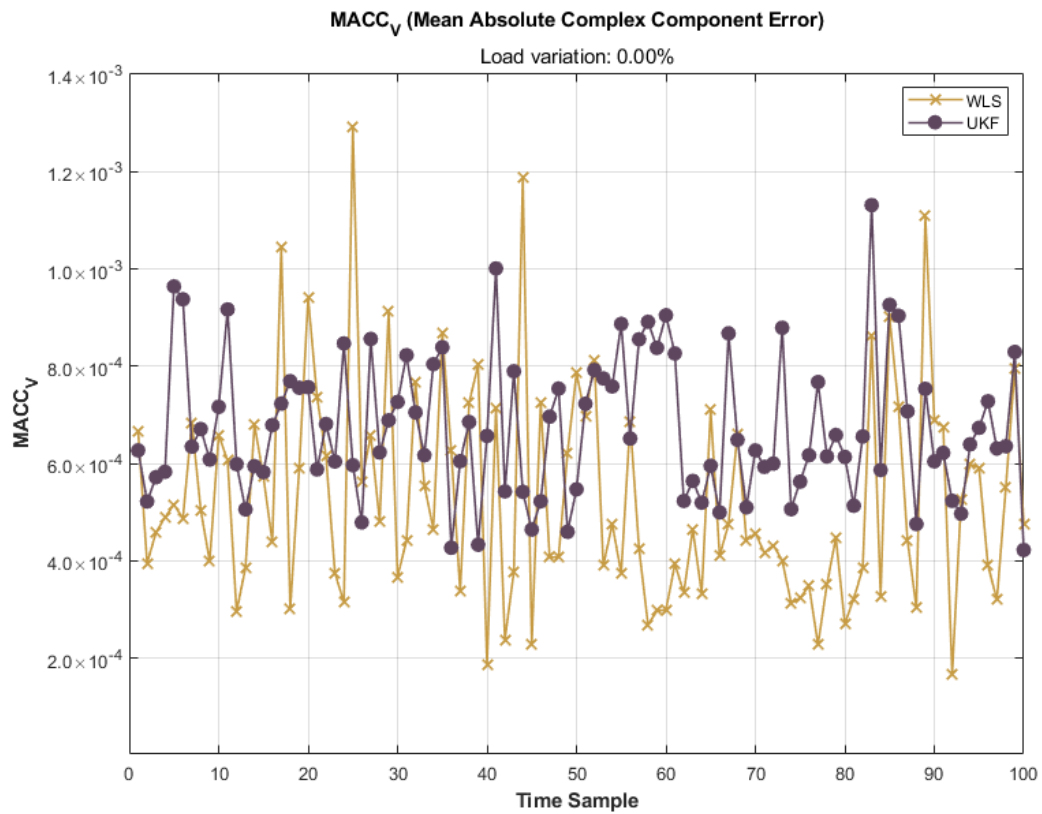
- 1^η προσομοίωση: 7 PMU και μηδενική μεταβολή φορτίου.



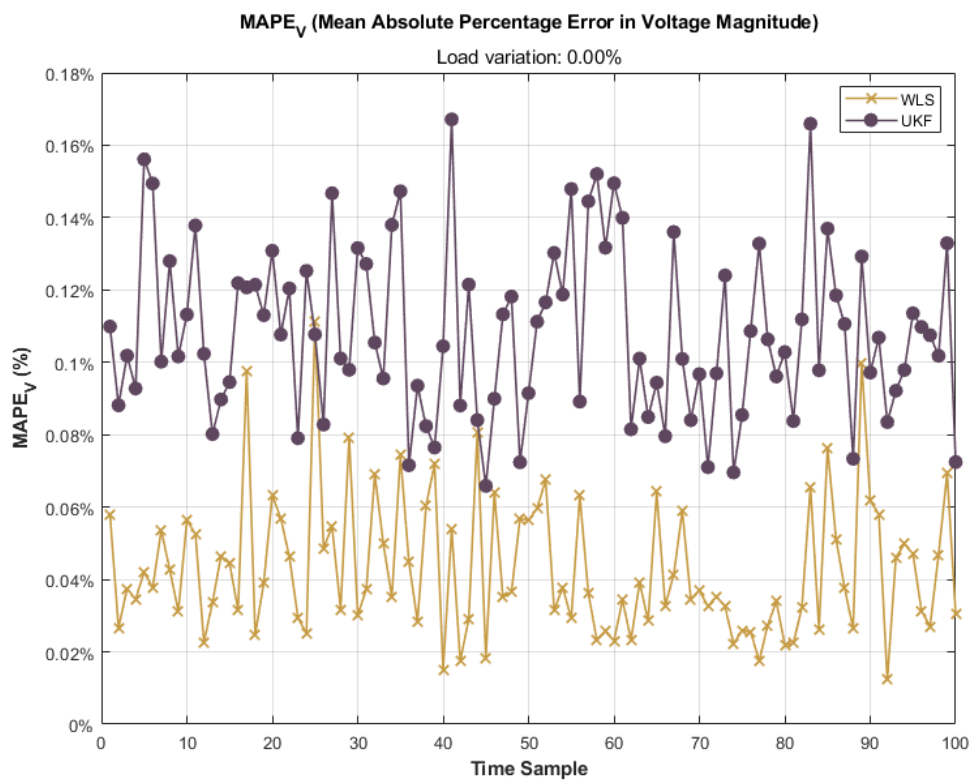
Σχήμα 9.21: Δείκτης MAE_V 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).



Σχήμα 9.22: Δείκτης MAE_A 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

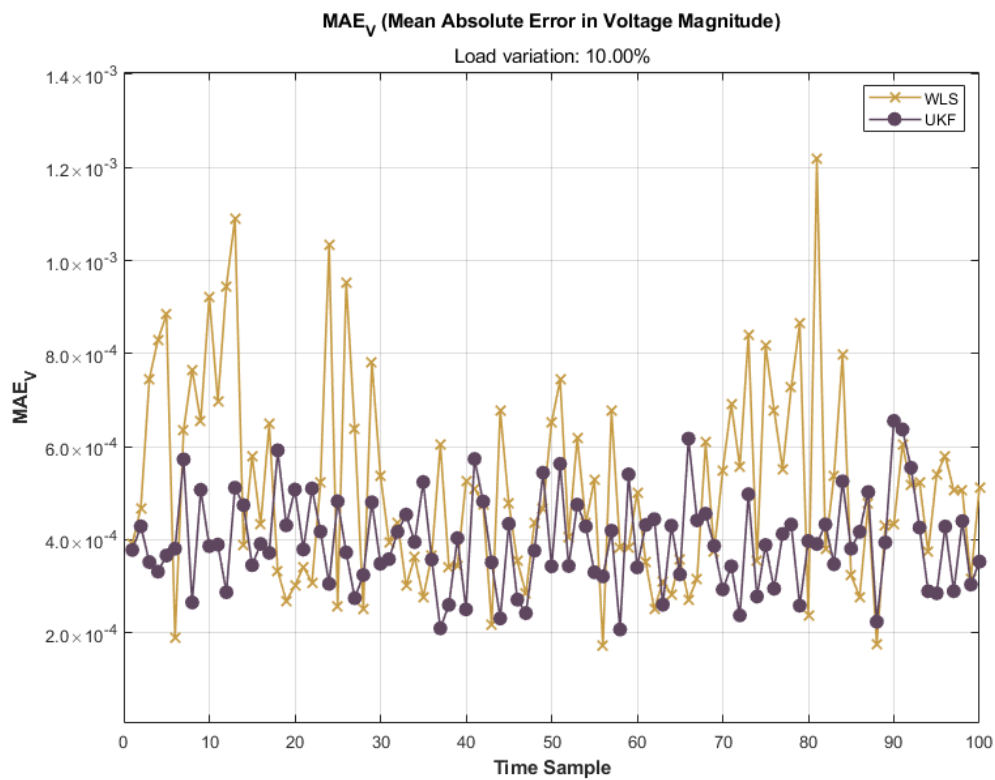


Σχήμα 9.23 Δείκτης $MACC_V$ 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

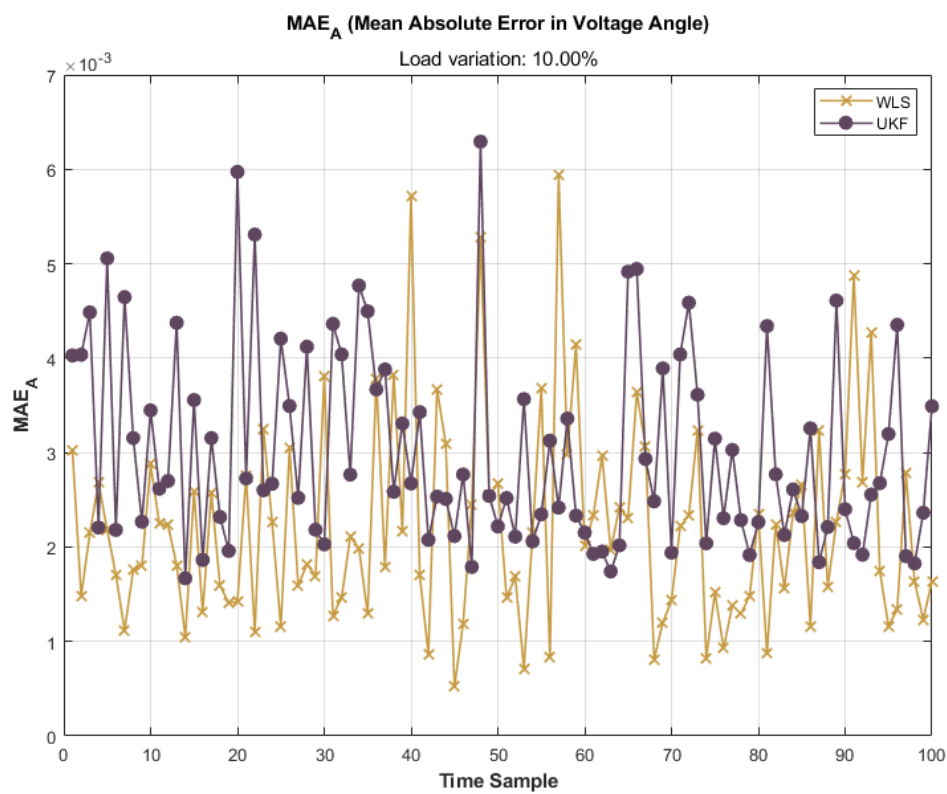


Σχήμα 9.24 Δείκτης $MAPE_V$ 1^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

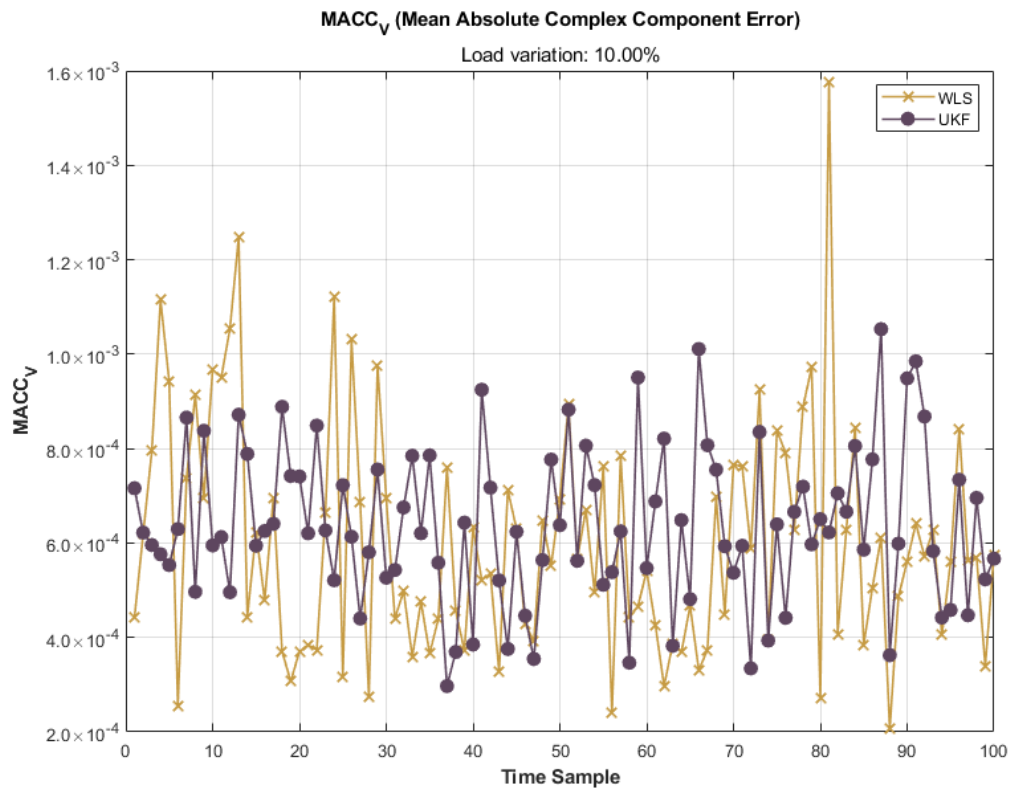
- 2^η προσομοίωση: 7 PMU και μεταβολή φορτίου κατά +10%.



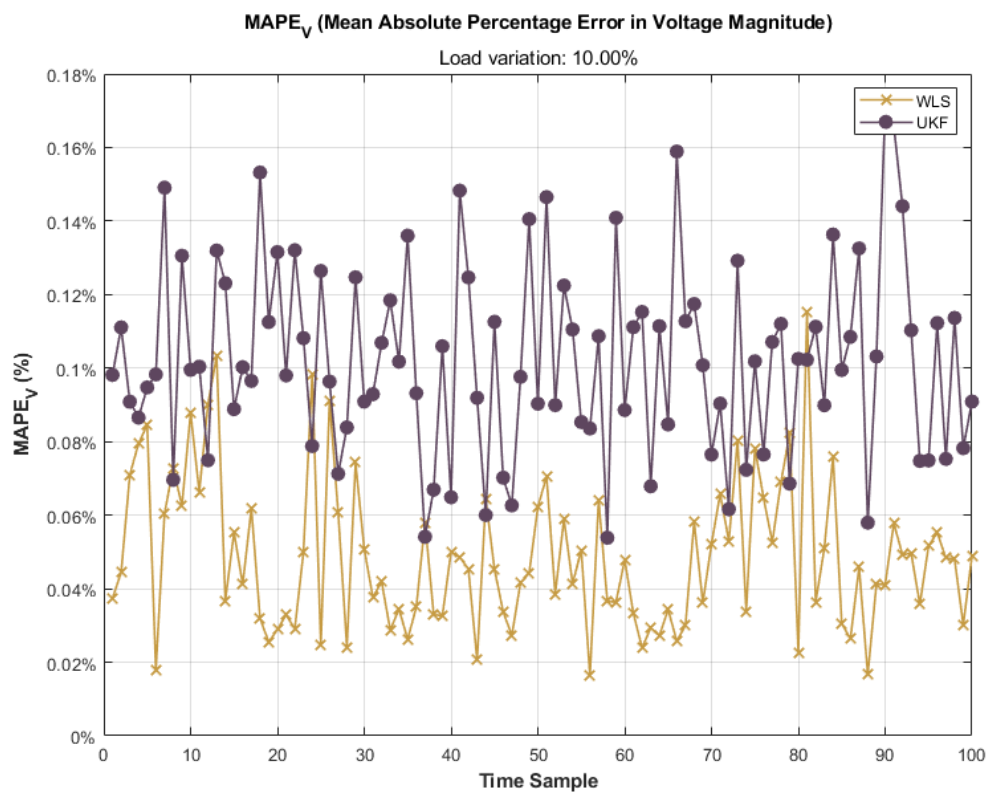
Σχήμα 9.25 Δείκτης MAE_V 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).



Σχήμα 9.26 Δείκτης MAE_A 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

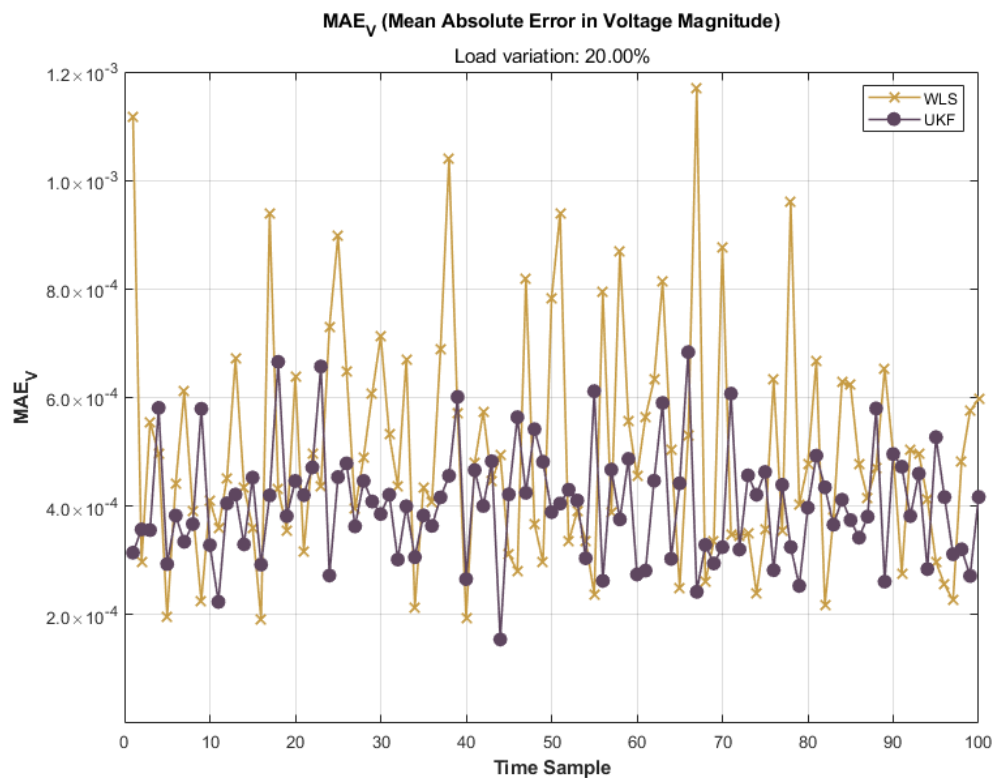


Σχήμα 9.27 Δείκτης $MACC_V$ 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

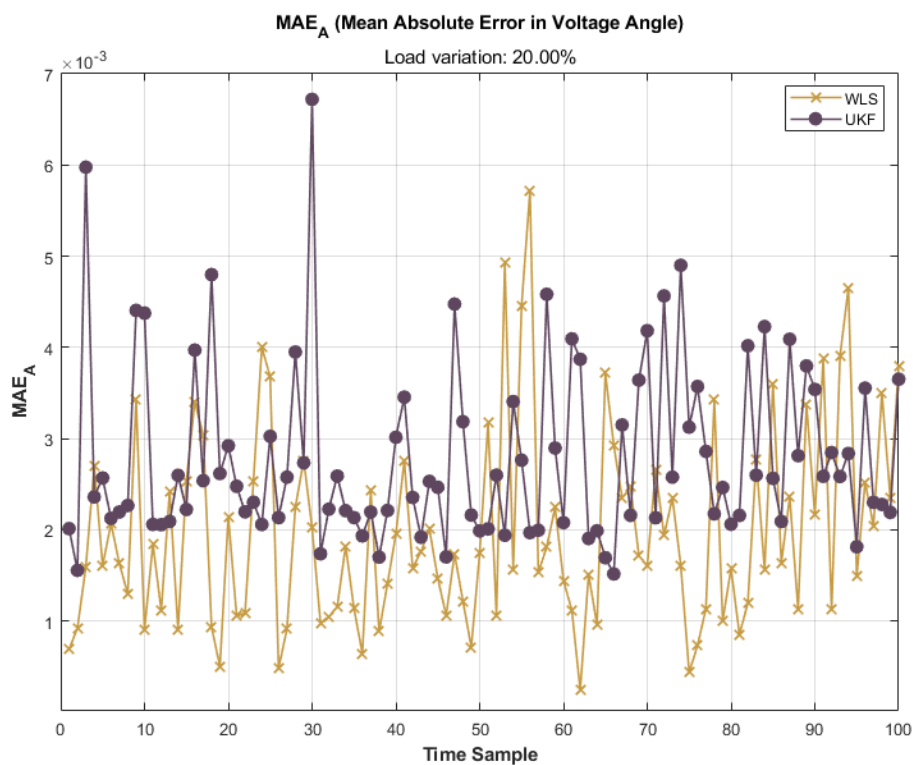


Σχήμα 9.28 Δείκτης $MAPE_V$ 2^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

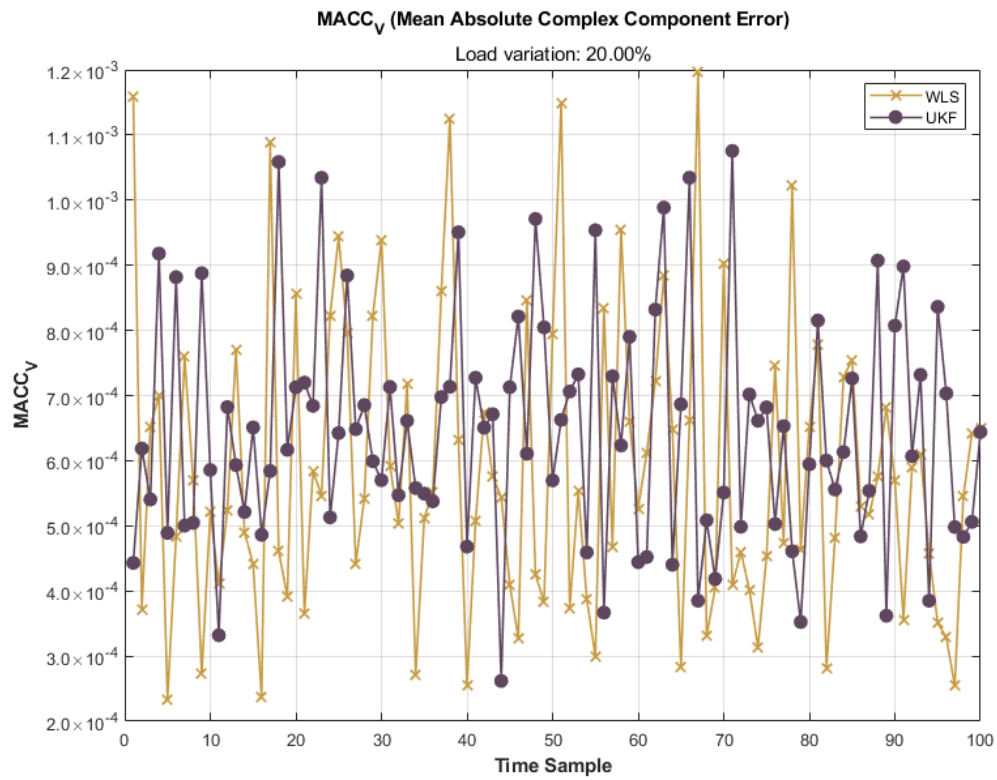
- 3^η προσομοίωση: 7 PMU και μεταβολή φορτίου κατά +20%.



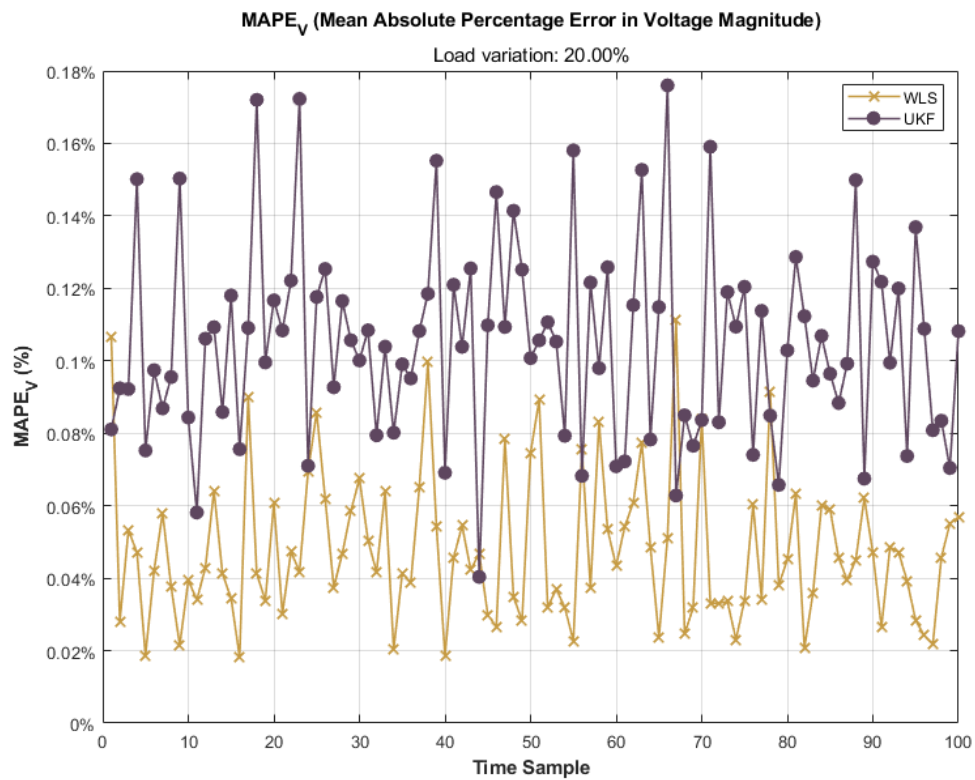
Σχήμα 9.29: Δείκτης MAE_V 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).



Σχήμα 9.30: Δείκτης MAE_A 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).



Σχήμα 9.31: Δείκτης $MACC_V$ 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).



Σχήμα 9.32: Δείκτης $MAPE_V$ 3^{ης} προσομοίωσης (δίκτυο 14 ζυγών με 7 PMU).

9.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Παρατηρείται ότι τόσο η κλασική εκτίμηση κατάστασης WLS όσο και η εκτίμηση κατάστασης με UKF, παρουσιάζουν μικρή απόκλιση στο εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης κάτι που είναι φανερό από τις μικρές τιμές, τάξης $10^{-3} - 10^{-4}$, των δεικτών απόδοσής τους. Αυτό υποδεικνύει ότι το UKF μπορεί να εκτελέσει την εκτίμηση κατάστασης με αξιόπιστες μετρήσεις έχοντας παρόμοια αποτέλεσμα με την εκτίμηση WLS.

9.6.1 MAE_V

Στην περίπτωση των 4 θεωρούμενων PMU, ο αλγόριθμος UKF παρουσιάζει χαμηλότερο δείκτη μέσου απολύτου σφάλματος τάσης (MAE_V) σε σύγκριση με τον WLS, για όλες τις μεταβολές φορτίου (0%, +10%, +20%). Η ακρίβεια στην εκτίμηση της τάσης μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της μεταβολής του φορτίου, ωστόσο η μείωση αυτή είναι μικρή και ομαλή. Με μηδενικές μεταβολές φορτίου, το UKF επιτυγχάνει βέλτιστη ακρίβεια, ενώ στο +10% και +20% το μέσο απόλυτο σφάλμα αυξάνεται ελάχιστα, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Η εκτίμηση WLS παρουσιάζει υψηλότερο μέσο απόλυτο σφάλμα σε όλα τα σενάρια, με μεγαλύτερη αύξηση του σφάλματος στη μεταβολή φορτίου κατά +20%, κάτι που δείχνει την αυξημένη ευαισθησία της μεθόδου στις μεταβολές του συστήματος. Στην περίπτωση των 7 PMU, η ακρίβεια του UKF παραμένει στα ίδια επίπεδα για όλες τις μεταβολές φορτίου, όμως η ακρίβεια της WLS βελτιώνεται, παρουσιάζοντας μικρότερα αποτελέσματα στον δείκτη μέσου απολύτου σφάλματος τάσης, σχεδόν όμοια με του UKF.

9.6.2 MAE_A

Οι εκτιμήσεις γωνιών τάσης ακολουθούν παρόμοιο μοτίβο, με το UKF να παράγει σε όλες τις περιπτώσεις λίγο μικρότερα σφάλματα, της τάξης του 10^{-3} , μεσοσταθμικά. Στην εκτίμηση UKF δεν παρουσιάζονται σημαντικές μεταβολές στα αποτελέσματα του δείκτη, για τις διαφορετικές μεταβολές φορτίου. Αντίθετα, στην εκτίμηση WLS παρουσιάζεται μεγαλύτερη διακύμανση του δείκτη και υψηλότερες αιχμές, με τη μεταβολή του φορτίου. Στη μηδενική μεταβολή, ο δείκτης και για τους δύο αλγορίθμους είναι ελάχιστος, ενώ στο +10% και +20% τα σφάλματα αυξάνονται ελαφρώς. Στην περίπτωση της WLS, ο δείκτης μέσου απολύτου σφάλματος γωνιών (MAE_A), αυξάνεται έντονα με τις μεταβολές φορτίου, ειδικά πέρα από το +10%, αναδεικνύοντας και εδώ την περιορισμένη ικανότητα του WLS να διαχειρίζεται την αυξημένη πολυπλοκότητα και δυναμική του συστήματος. Και για τον MAE_A , στην περίπτωση των 7 PMU, η ακρίβεια της WLS στην εκτίμηση των γωνιών βελτιώνεται σημαντικά, ενώ ταυτόχρονα η ακρίβεια του UKF μειώνεται, παρουσιάζοντας μικρότερη ομαλότητα στα αποτελέσματα του δείκτη, με μεγαλύτερες αιχμές, καταλήγοντας μεσοσταθμικά με μεγαλύτερα σφάλματα συγκριτικά με την εκτίμηση WLS.

9.6.3 $MACC_V$

Παρόμοια αποτελέσματα έχουμε και για το μέσο απόλυτο σφάλμα μιγαδική συνιστώσας, όπως αναμένεται βάσει των παραπάνω, αφού ουσιαστικά αποτελεί σύνθεση των μέσων απόλυτων σφαλμάτων τάσεων και γωνιών, στο μιγαδικό επίπεδο. Και εδώ, στην περίπτωση των 4 PMU παρατηρούνται καλύτερα αποτελέσματα του UKF συγκριτικά με την WLS, ενώ στην περίπτωση των 7 PMU, τα σφάλματα και οι διακυμάνσεις του δείκτη αυξάνονται για το UKF, ενώ βελτιώνονται για την WLS. Σε όλες τις μεταβολές φορτίου, το UKF διατηρεί σχεδόν σταθερό μέσο απόλυτο σφάλμα μιγαδικής

συνιστώσας ($MACC_V$). Η αύξηση του σφάλματος από μηδενική μεταβολή φορτίου σε μεταβολή κατά +20% είναι ελάχιστη, ενώ οι τιμές του δείκτη $MACC_V$ για τον αλγόριθμο WLS είναι υψηλότερες και αυξάνονται με τις μεταβολές φορτίου.

9.6.4 $MAPE_V$

Η ποσοστιαία μεταβολή του σφάλματος ακολουθεί, όπως αναμένεται, το ίδιο μοτίβο με τους προηγούμενους δείκτες, παρουσιάζοντας ελαφρώς βελτιωμένη ακρίβεια και μικρότερες διακυμάνσεις στα σφάλματα του UKF για όλες τις μεταβολές φορτίου, συγκριτικά με την WLS και ειδικά για την περίπτωση των 4 PMU, ενώ στην περίπτωση των 7 PMU, η ακρίβεια της WLS είναι βελτιωμένη, με τον δείκτη ποσοστιαίου σφάλματος της WLS να είναι μεσοσταθμικά μικρότερος κατά περίπου 0,06% από του UKF.

Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος UKF είναι απόλυτα συγκρίσιμος με τον WLS σε ό,τι αφορά την επίδοση και την αξιοπιστία, έχοντας ελαφρώς βελτιωμένα αποτελέσματα σε όλους τους χρησιμοποιούμενους δείκτες, ειδικά στην περίπτωση των 4 PMU. Με την αύξηση των εγκατεστημένων PMU από –τον ελάχιστο αριθμό– 4 σε 7, η ακρίβεια των αποτελεσμάτων της μεθόδου WLS βελτιώνεται σημαντικά, ενώ η επίδοση της μεθόδου UKF παραμένει σχεδόν ίδια.

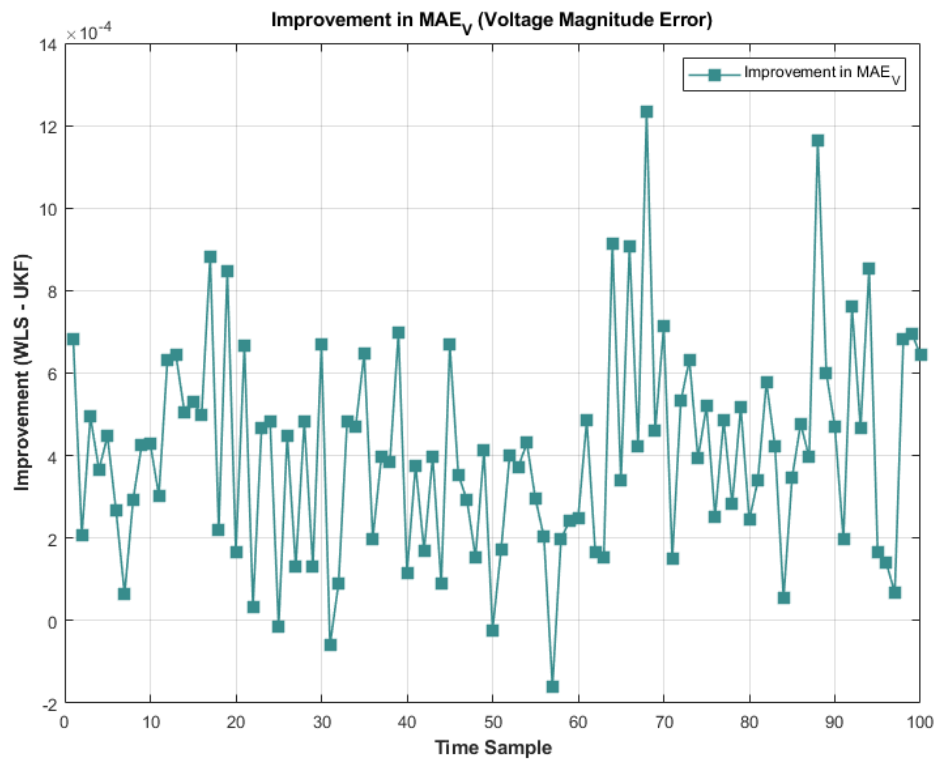
Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στον διαφορετικό τρόπο λειτουργίας των δύο μεθόδων: η ακρίβεια της συμβατικής μεθόδου WLS, εξαρτάται άμεσα από το πλήθος και την τοποθεσία των μετρητών – και κατ' επέκταση – των μετρήσεων. Η αύξηση της περισσειας (redundancy) των μετρήσεων, και η βέλτιστη επιλογή θέσεων εγκατάστασης των μετρητών στο πεδίο έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ευαισθησίας της μεθόδου WLS στον θόρυβο των μετρήσεων. Αντίθετα, η ποιότητα της εκτίμησης της μεθόδου UKF εξαρτάται κυρίως από την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του μοντέλου πρόβλεψης που χρησιμοποιείται, ήτοι των σημείων σίγμα, καθώς και των θεωρούμενων στατιστικών χαρακτηριστικών του θορύβου. Επομένως, η ακρίβεια της μεθόδου UKF μπορεί να μην βελτιώνεται με την προσθήκη επιπλέον μετρήσεων έπειτα από ένα σημείο, λόγω της εμπειρικής (μη βέλτιστης) επιλογής των επιμέρους παραμέτρων του UKF (μοντέλο πρόβλεψης, χαρακτηριστικά θορύβου μετάβασης και θορύβου μετρήσεων).

Αυτή η παρατήρηση εγείρει ενδιαφέρον για την περαιτέρω διερεύνηση της συγκεκριμένης συμπεριφοράς του UKF σε εκτιμητές κατάστασης ΣΗΕ. Πιο συγκεκριμένα, θα πρέπει να απασχολήσουν:

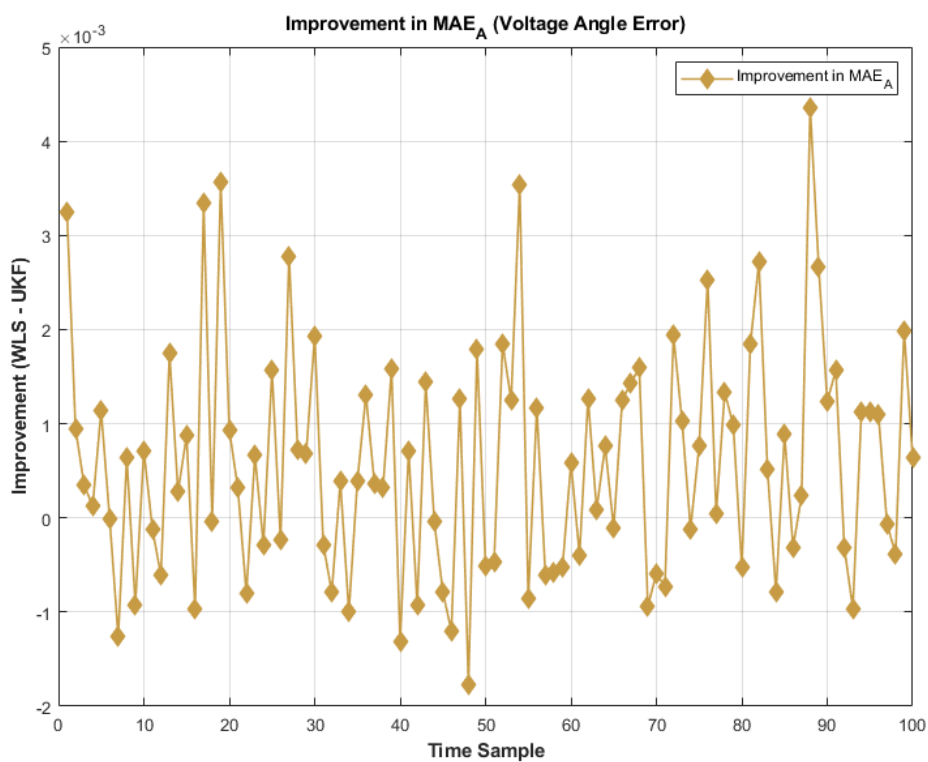
1. Η θεωρητική μελέτη της βέλτιστης και, ενδεχομένως, δυναμικής επιλογής των παραμέτρων του UKF, με βάση την εκάστοτε υπό μελέτη τοπολογία και τις διαθέσιμες μετρήσεις.
2. Η μελέτη της επίδρασης των πιθανών συνδυασμών μετρήσεων στον εκτιμητή UKF.
3. Η διερεύνηση της επίδρασης του αριθμού κατάστασης (condition number) του πίνακα συνδιακύμανσης του UKF, στην ακρίβεια της εκτίμησης.

Τέλος, η μείωση της επίδοσης του UKF με την αύξηση της μεταβολής φορτίου είναι ελάχιστη σε σύγκριση με τον WLS, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις στις μεταβολές του φορτίου, υποδεικνύοντας μεγαλύτερη ευαισθησία. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την υπόθεση ότι το UKF είναι προτιμητέα επιλογή για συστήματα με μεγαλύτερο βαθμό μεταβλητότητας ή έντονων δυναμικών φαινομένων. Παρακάτω, παρατίθενται τέσσερις γραφικές παραστάσεις, οι οποίες ποσοτικοποιούν τις παραπάνω

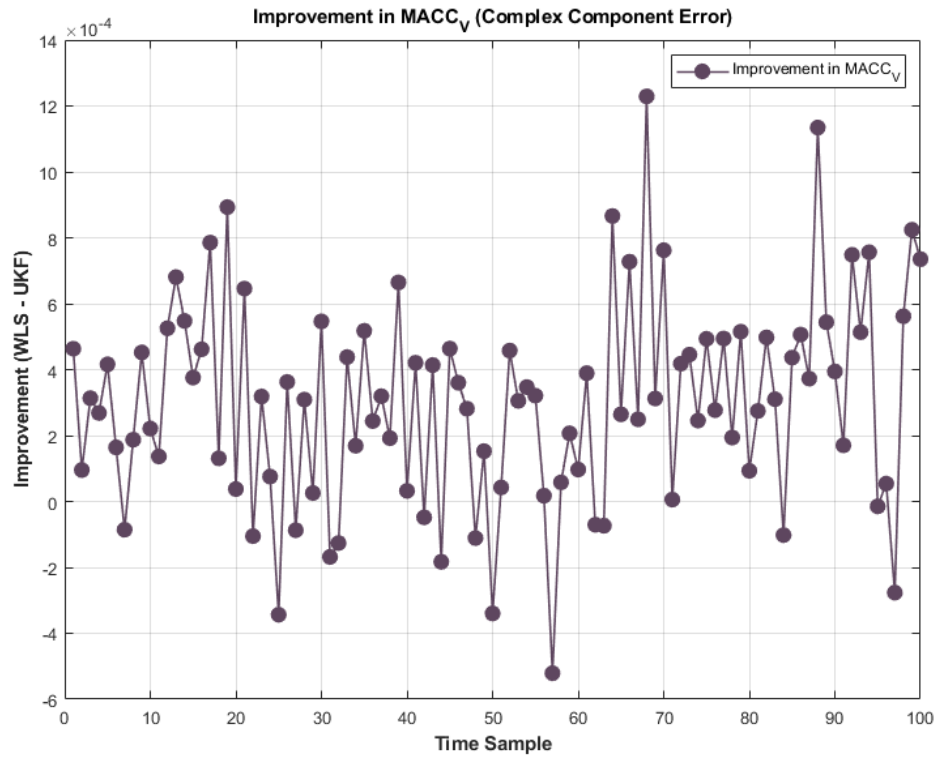
ποιοτικές παρατηρήσεις, παρουσιάζοντας τις διαφορές των δεικτών επίδοσης των αλγορίθμων UKF και WLS.



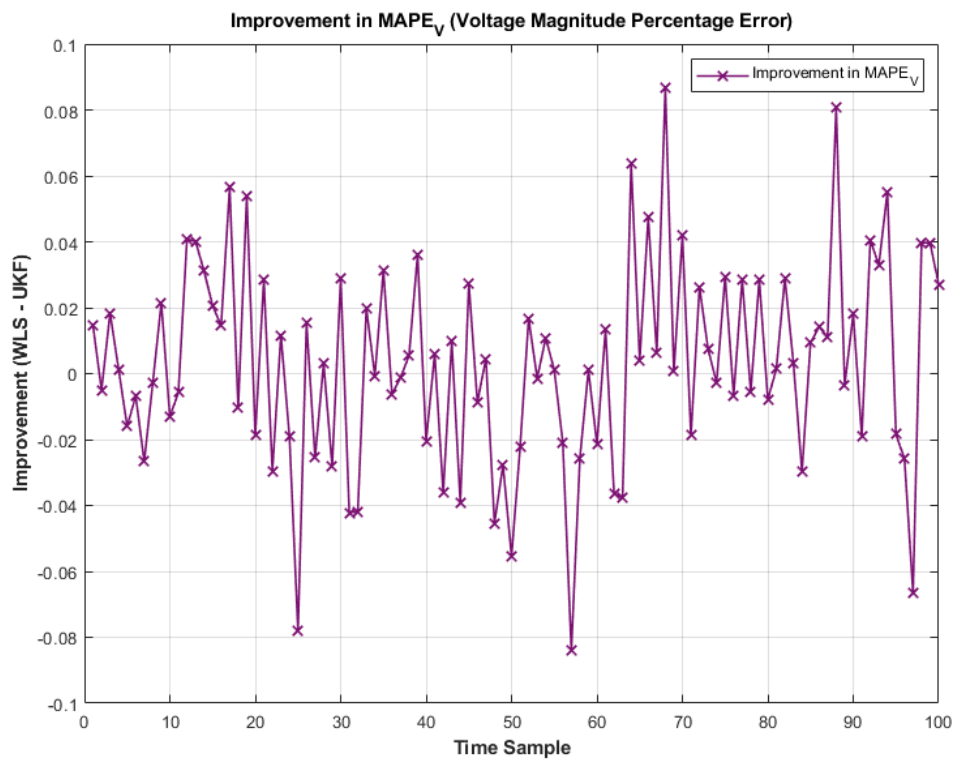
Σχήμα 9.33: Βελτίωση δείκτη MAE_V (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU, μηδενική μεταβολή φορτίου).



Σχήμα 9.34: Βελτίωση δείκτη MAE_A (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU, μηδενική μεταβολή φορτίου).



Σχήμα 9.35: Βελτίωση δείκτη $MACC_V$ (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU, μηδενική μεταβολή φορτίου).



Σχήμα 9.36: Βελτίωση δείκτη $MAPE_V$ (δίκτυο 14 ζυγών με 4 PMU, μηδενική μεταβολή φορτίου).

10 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη και την αξιολόγηση ενός αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης βασιζόμενου σε Unscented Φίλτρο Kalman (UKF), με χρήση μετρήσεων προερχόμενων αποκλειστικά από PMU. Η εργασία εστιάζει στην υλοποίηση του UKF, τη σύγκρισή του με άλλες μεθόδους εκτίμησης κατάστασης, και την ανάλυση της απόδοσής του υπό την ύπαρξη αβεβαιοτήτων και θορύβου.

Η εκτίμηση κατάστασης διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στις σύγχρονες λειτουργίες των ΣΗΕ, επιτρέποντας την παρακολούθηση της δυναμικής του συστήματος, τη διασφάλιση της ευστάθειας και τη βελτιστοποίηση της απόδοσής του σε πραγματικό χρόνο.

Κίνητρο για την υιοθέτηση του UKF αποτέλεσε η ικανότητά του να χειρίζεται αποτελεσματικά μη γραμμικότητες και μη γκαουσιανό θόρυβο. Επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία λόγω των θεωρητικών πλεονεκτημάτων του έναντι άλλων μεθόδων όπως οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε WLS ή EKF. Το UKF, εγγενώς, λόγω της μαθηματικής δόμησής του, αντιμετωπίζει επιτυχώς τα προβλήματα που συναντούν οι προαναφερθέντες αλγόριθμοι, κυρίως με τη μη γραμμικότητα των υπό μελέτη συστημάτων. Το UKF δεν εφαρμόζει γραμμικοποίηση, αλλά μετασχηματίζει δειγματοληπτικά ένα ελάχιστο σύνολο σημείων μέσω μη γραμμικών συναρτήσεων για να υπολογίσει τη μέση τιμή και τη συνδιακύμανση, επιτυγχάνοντας καλύτερη επίδοση σε συστήματα με έντονα μη γραμμική δυναμική.

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ΣΗΕ, η οποία οφείλεται στις αποκεντρωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα δυναμικά μεταβαλλόμενα φορτία και στον αυξανόμενο αριθμό έξυπνων συσκευών, απαιτεί πιο ισχυρές και αποδοτικές μεθόδους εκτίμησης της κατάστασης. Οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι συχνά δυσκολεύονται να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις λόγω της ευαισθησίας τους σε ανακρίβειες του μοντέλου και σε θόρυβο. Εστιάζοντας στο UKF, η παρούσα διατριβή είχε ως στόχο να αντιμετωπίσει αυτές τις ελλείψεις και να συμβάλει στην εξέλιξη της εποπτείας και του ελέγχου των ΣΗΕ.

Ο χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε ειδικά για την εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ. Δοκιμάστηκε στο πρότυπο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE, μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo και συγκρίθηκε με συμβατικό αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης WLS. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν ότι το UKF παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα, προσφέροντας βελτιωμένη επίδοση και μεγαλύτερη ακρίβεια, απαιτώντας ταυτόχρονα τους ίδιους υπολογιστικούς πόρους. Το UKF επέδειξε σταθερά υψηλότερη ακρίβεια από την εκτίμηση με WLS σε διάφορες περιπτώσεις δοκιμών, ιδίως σε συνθήκες υψηλού θορύβου, παρουσίασε βελτιωμένη σύγκλιση σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, χαρακτηριστικό κρίσιμο για εφαρμογές εκτίμησης κατάστασης σε πραγματικό χρόνο, όπου η ταχύτητα και η αξιοπιστία είναι υψίστης σημασίας. Τέλος, η ικανότητα του UKF να προσαρμόζεται σε ποικίλες συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των ξαφνικών μεταβολών φορτίου, αναδεικνύει την ευελιξία του.

Τα παραπάνω αποτελέσματα, παρέχοντας ένα σημείο αναφοράς για μελλοντική έρευνα επί του ζητήματος, καταδεικνύουν την ανάγκη για διερεύνηση της δυνατότητας

εφαρμογής του UKF σε πραγματικές συνθήκες και σε εφαρμογές με εισροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ταυτόχρονα, μπορούν να χρησιμεύσουν ως βάση για τη διερεύνηση προηγμένων τεχνικών εκτίμησης κατάστασης, συμπεριλαμβανομένων των υβριδικών προσεγγίσεων και της ενσωμάτωσης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Τέλος, ενώ η επίδοση του UKF σε συστήματα μικρής κλίμακας προκύπτει βελτιωμένη, η δυνατότητα κλιμάκωσης του σε μεγάλα συστήματα εκατοντάδων ή και χιλιάδων κόμβων, παραμένει ζήτημα προς εξέταση.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Ahmad, *Power System State Estimation*, Boston: Artech House, 2013.
- [2] A. K. Singh and B. C. Pal, *Dynamic Estimation and Control of Power Systems*, 2018.
- [3] Α. Τσαγκάρης, *Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές και Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου (PLC και SCADA)*. Broken Hill Publishers Ltd, 2022.
- [4] M. S. Thomas and J. D. McDonald, *Power System SCADA and Smart Grids*, 1st ed., CRC Press, 2015.
- [5] Α. Leventis, *Remote access and telemetry in industrial applications*, M.S. thesis, Univ. of Piraeus, Piraeus, Greece, 2022. [Online]. Available: <https://dione.lib.unipi.gr>.
- [6] "SCADA Systems," Open Academic Courses, Western Macedonia University of Applied Sciences. [Online]. Available: <https://openclass.teiwm.gr>. [Accessed: Jan. 28, 2025].
- [7] A. Shahzad, A. Abdalla, and M. Al-Rodhaan, "The SCADA Review: System Components, Architecture, Protocols, and Future Security Trends," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 11, no. 8, pp. 1418–1425, 2014.
- [8] G. Yadav and K. Paul, "Architecture and Security of SCADA Systems: A Review," *arXiv preprint*, arXiv:2001.02925, Jan. 2020. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2001.02925>.
- [9] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, Springer, 2008.
- [10] S. Miron, "From SCADA to smart grid in power transmission and distribution systems," *Bul. AGIR*, vol. 4, pp. 191–198, 2011.
- [11] R. Sharma and G. M. Dhole, "Wide Area Measurement Technology in Power Systems," *Procedia Technology*, vol. 25, pp. 718–725, 2016.
- [12] Ν. Μ. Μανουσάκης, Κ. Π. Νικολόπουλος, and Γ. Ν. Κορρές, "Ευρετικός αλγόριθμος βέλτιστης τοποθέτησης συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών σε ηλεκτρικά δίκτυα," *7ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας*, Αθήνα, 2018, pp. 1–10.
- [13] Μ. Χολιαστού, "Μετρήσεις με πρότυπα μέτρησης φάσης (PMU) στο Ελληνικό δίκτυο μεταφοράς," *EMRP ENG04 «Metrology for Smart Grids»*, 2013.
- [14] IEEE Standard C37.111, *Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*, 1999.
- [15] IEEE Standard C37.118TM-2005, *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*.
- [16] IEEE Standard C37.118.1-2011, *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*.
- [17] S. Tripathi and S. De, "Dynamic Prediction of Powerline Frequency for Wide Area Monitoring and Control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 7, pp. 2837–2846, 2018.

- [18] M. Hojabri, U. Dersch, A. Papaemmanouil, and P. Bosshart, "A Comprehensive Survey on Phasor Measurement Unit Applications in Distribution Systems," *Energies*, vol. 12, 2019.
- [19] E. Romanov and S. A. Menzhulin, "Application of IEC 60870 and 61850 Standards in Energy Storage Systems," 2023, pp. 830–835.
- [20] S. Borlase, Ed., *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*, 1st ed., CRC Press, 2013.
- [21] R. Gore and M. Kande, "Analysis of Wide Area Monitoring System Architectures," in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2015, pp. 1269–1274.
- [22] F. F. Wu, K. Moslehi, and A. Bose, "Power System Control Centers: Past, Present, and Future," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1890–1908, Nov. 2005.
- [23] S. C. Savulescu, *Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Centers*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2009.
- [24] G. Gross and F. D. Galiana, "Short-Term Load Forecasting," *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 12, pp. 1558–1573, Dec. 1987.
- [25] B. F. Hobbs, "Analysis of the value for unit commitment of improved load forecasts," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 4, pp. 1342–1348, Nov. 1999.
- [26] Lawrence Berkeley National Laboratory, Real-Time Security Monitoring and Control of Power Systems. [Online]. Available: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/rt-security-monitoring.pdf>. [Accessed: Dec. 28, 2024].
- [27] "System Security, Resilience, and Recovery Modelling," Institution of Engineering and Technology (IET), [Online]. Available: <https://www.theiet.org/media/9418/8-system-security-resilience-and-recovery-modelling.pdf>. [Accessed: Dec. 28, 2024].
- [28] A. Aman, Y. Simmhan, and V. K. Prasanna, "Energy Management Systems: State of the Art and Emerging Trends," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 1, pp. 114–119, Jan. 2013.
- [29] M. E. El-Hawary, *Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems*. Springer, 2012. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-1752-1>. [Accessed: Dec. 28, 2024].
- [30] [Online]. Available: <https://www.reliservsolution.net/substation-automation/>
- [31] S. A. P. Meliopoulos, "The Substation of the Future: A Feasibility Study Final Project Report," 2010.
- [32] K. Pan, A. Teixeira, C. López, and P. Palensky, "Co-simulation for Cyber Security Analysis: Data Attacks against Energy Management Systems," 2017.
- [33] E. Georgopoulou, S. Mirasgentis, G. Sarafidis, D. Lalas, and N. Gakis, *Κείμενο Πολιτικής: Απολιγνιτοποίηση του ελληνικού ενεργειακού συστήματος*, National Observatory of Athens, Mar. 2021. [Online]. Available:

- https://energypress.gr/sites/default/files/media/noa_policy_brief_coal_phase_out_v21_greek.pdf. [Accessed: Dec. 28, 2024].
- [34] Energy Committee of the Academy of Athens, *Απολιγνιτοποίηση της Ελλάδας: Διαχείριση της μεταλιγνιτικής εποχής*, May 2020. [Online]. Available: <https://www.ppel.gov.gr/wp-content/uploads/2020/05/της-Ελλάδας-ΤΕΛΙΚΗ-ΕΚΘΕΣΗ.pdf>. [Accessed: Dec. 29, 2024].
- [35] Συντονιστική Επιτροπή ΣΔΑΜ, *Σχέδιο δίκαιης και αναπτυξιακής μετάβασης λιγνιτικών περιοχών: Επιπτώσεις και αντισταθμιστικές δράσεις*, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Αθήνα, Ελλάδα, [Online]. Available: https://www.sdam.gr/sites/default/files/consultation/Σχέδιο_δίκαιης_και_αναπτυξιακής_μετάβασης_λιγνιτικών_περιοχών_Επιπτώσεις_και_αντισταθμιστικές_δράσεις.pdf. [Accessed: Dec. 29, 2024].
- [36] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ)*, Αθήνα, Ελλάδα, 2024. [Online]. Available: <https://ypen.gov.gr/en-ergeia/esek/>. [Accessed: Jan. 28, 2025].
- [37] ΑΔΜΗΕ Α.Ε, "Περιγραφή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ)." [Online]. Available: <https://www.admie.gr/systima/perigrafi/basika-stoixeia>
- [38] ΑΔΜΗΕ ΣΥΜΜΕΤΟΧΩΝ Α.Ε, "Ετήσιος απολογισμός 2023." [Online]. Available: <https://admieholding.gr/app/uploads/2024/07/Ετήσιος-Απολογισμός-2023.pdf>
- [39] ΑΔΜΗΕ Α.Ε, "Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2022-2031." [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/dia-boyleyseis/attached-files2021/01/kurioteuxos_0.pdf
- [40] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε, "Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για τον Ιούλιο 2024." [Online]. Available: <https://deddie.gr/media/50604/πληροφοριακο-δελτιο-2024-ιουλιος.pdf>
- [41] ΑΔΜΗΕ Α.Ε, "Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2025-2034." [Online]. Available: <https://www.admie.gr/sites/default/files/dia-boyleyseis/attached-files2024/03/ΔΠΑ%202025-2034%20Κύριο%20Τεύχος.pdf>
- [42] CIGRE Greece, *Ηλεκτρονικό περιοδικό Πυλώνες*, Τεύχος 5, Sep. 26, 2024. [Online]. Available: <https://cigre.gr/wp-content/uploads/2024/05/Pylons-Issue-5.pdf>
- [43] ΑΔΜΗΕ Α.Ε, *Ηλεκτρονικό περιοδικό Ενεργών*, Τεύχος 6. [Online]. Available: <https://www.admie.gr/sites/default/files/2020-03/ΙΟΥΛΙΟΣ%202018.pdf>
- [44] Γ. Κονταξής and Ν. Χατζηαργυρίου, *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.
- [45] Θ. Ξύγκης, "Βέλτιστη διαχείριση μετρήσεων για ενίσχυση παρατηρησιμότητας και ακρίβειας σε εκτιμητές κατάστασης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με ελλιπή δεδομένα," Ph.D. dissertation, Ε.Μ.Π., 2019.
- [46] A. Abur and A. Gómez Expósito, *Power System State Estimation: Theory and Implementation*, New York, NY, USA: Marcel Dekker, 2004.

- [47] M. Mitchell, "Self-Awareness and Control in Decentralized Systems," in *Proc. AAAI Spring Symp. Metacognition in Computation*, Stanford, CA, USA, 2005, pp. 80–85. [Online]. Available: www.cs.pdx.edu/~mm/self-awareness.pdf
- [48] F. C. Schweppe, J. Wildes, and D. B. Rom, "Power system static state estimation – Part I, II, III," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–135, Jan. 1970.
- [49] Β. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας: Τόμος Ι Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*, Αθήνα: Έκδοση Ε.Μ.Π., 1985.
- [50] Κ. Βουρνάς and Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Αθήνα: Εκδόσεις Συμμέτρια, 2010.
- [51] J. Zhao et al., "Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies and Future Work," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, pp. 3188–3198, 2019.
- [52] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, 2008.
- [53] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp, and A. G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurement Applications in Power Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, pp. 20–27, 2010.
- [54] Z. Jin, *Static and Dynamic State Estimation of Power Systems*, Ph.D. dissertation, The University of Manchester, 2017.
- [55] O. Darmis and G. Korres, "A Survey on Hybrid SCADA/WAMS State Estimation Methodologies in Electric Power Transmission Systems," *Energies*, vol. 16, no. 618, 2023.
- [56] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation and Control*, 2nd ed., Wiley, New York, 1996.
- [57] H. Modir and R. A. Schlueter, "A dynamic state estimator for dynamic security assessment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 100, no. 11, pp. 4644–4652, 1981.
- [58] A. P. Meliopoulos et al., "Dynamic state estimation based protection: Status and promise," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 320–330, 2017.
- [59] Y. Liu, A. P. Sakis Meliopoulos, et al., "Dynamic state estimation based protection on series compensated transmission lines," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 32, no. 5, pp. 2199–2209, 2017.
- [60] R. Fan, et al., "Dynamic state estimation-based protection of power transformers," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2015, pp. 1–5.
- [61] Y. Cui, R. G. Kavasseri, and S. M. Brahma, "Dynamic state estimation assisted out-of-step detection for generators using angular difference," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 32, no. 3, pp. 1441–1449, 2017.
- [62] M. S. Thomas and J. D. McDonald, *Power System SCADA and Smart Grids*, CRC Press, 2015.
- [63] A. Gomez-Exposito, A. Abur, and P. Rousseaux, "On the Use of PMUs in Power System State Estimation," in *Proc. 17th Power System Computation Conference*, Stockholm, Sweden, Aug. 22–26, 2011, p. 14.

- [64] Z. Jin, P. Wall, Y. Chen, J. Yu, S. Chakrabarti, and V. Terzija, "Analysis of Hybrid State Estimators: Accuracy and Convergence of Estimator Formulations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, pp. 2565–2576, 2019.
- [65] M. Kezunovic, A. P. Meliopoulos, V. Venkatasubramanian, and V. Vittal, "Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks," 2014.
- [66] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Ledwich, and A. Ghosh, "A Comparative Study of the Methods of Inclusion of PMU Current Phasor Measurements in a Hybrid State Estimator," in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Minneapolis, MN, USA, Jul. 25–29, 2010, pp. 1–7.
- [67] M. Kabiri and N. Amjady, "A New Hybrid State Estimation Considering Different Accuracy Levels of PMU and SCADA Measurements," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 68, pp. 3078–3089, 2019.
- [68] M. Glavic and T. Van Cutsem, "Reconstructing and Tracking Network State from a Limited Number of Synchrophasor Measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1921–1929, 2013.
- [69] N. M. Manousakis and G. N. Korres, "A Hybrid Power System State Estimator Using Synchronized and Unsynchronized Sensors," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 28, e2580, 2018.
- [70] M. Asprou, S. Chakrabarti, and E. Kyriakides, "A Two-Stage State Estimator for Dynamic Monitoring of Power Systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, pp. 1767–1776, 2017.
- [71] M. Gol and A. Abur, "A Hybrid State Estimator for Systems with Limited Number of PMUs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, pp. 1511–1517, 2015.
- [72] M. Gol, "A Decentralization Method for Hybrid State Estimators," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, pp. 2070–2077, 2018.
- [73] Q. Zhang, Y. Chakhchoukh, V. Vittal, G. T. Heydt, N. Logic, and S. Sturgill, "Impact of PMU Measurement Buffer Length on State Estimation and Its Optimization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1657–1665, 2013.
- [74] V. Murugesan, Y. Chakhchoukh, V. Vittal, G. T. Heydt, N. Logic, and S. Sturgill, "PMU Data Buffering for Power System State Estimators," *IEEE Power Energy Technol. Syst. J.*, vol. 2, pp. 94–102, 2015.
- [75] T. S. Bi, X. H. Qin, and Q. X. Yang, "A Novel Hybrid State Estimator for Including Synchronized Phasor Measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, pp. 1343–1352, 2008.
- [76] N. Rathod, H. Patel, and S. Joshi, "Implementing Two Stage Hybrid State Estimation with Various Approaches," in *Proc. 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, Perth, Australia, Nov. 23–26, 2020, pp. 627–632.
- [77] D. M. Bez, A. S. Costa, and E. Z. Junior, "A Block Version of Orthogonal Rotations for Improving the Accuracy of Hybrid State Estimators," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, pp. 4432–4444, 2020.

- [78] A. S. Costa, A. Albuquerque, and D. Bez, "An Estimation Fusion Method for Including Phasor Measurements into Power System Real-Time Modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, pp. 1910–1920, 2013.
- [79] T. Wu, C. Y. Chung, and I. Kamwa, "A Fast State Estimator for Systems Including Limited Number of PMUs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, pp. 4329–4339, 2017.
- [80] S. Goleijani and M. T. Ameli, "Neural Network-Based Power System Dynamic State Estimation Using Hybrid Data from SCADA and Phasor Measurement Units," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 28, e2481, 2018.
- [81] L. Zanni, A. Derviškić, M. Pignati, C. Xu, P. Romano, R. Cherkaoui, A. Abur, and M. Paolone, "PMU-based linear state estimation of Lausanne subtransmission network: Experimental validation," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 189, Dec. 2020, Art. no. 106649.
- [82] Monti, A., Muscas, C., & Ponci, F. (2016). *Phasor Measurement Units and Wide Area Monitoring Systems*. Academic Press, Elsevier.
- [83] L. Zanni, A. Derviškić, M. Pignati, C. Xu, P. Romano, R. Cherkaoui, A. Abur, and M. Paolone, "PMU-based Linear State Estimation of Lausanne Subtransmission Network: Experimental Validation," *Electric Power Systems Research*, vol. 189, Dec. 2020.
- [84] Li, W., "PMU-based State Estimation for Hybrid AC and DC Grids," Ph.D. dissertation, Dept. of Electrical, Computer, and Systems Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, 2018. [Online]. Available: https://sites.ecse.rpi.edu/~vanfrl/documents/phdthesis/2018_WeiLi_PhD_Thesis.pdf. [Accessed: Jan. 27, 2025].
- [85] Ν. Ασημάκης, "Φίλτρα Kalman [Μονογραφία]," Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, 2022.
- [86] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," in *Proc. Siggraph Course*, vol. 8, 2006.
- [87] T. Lacey and N. A. Thacker, "Tutorial: the Kalman filter," University of Manchester, 1998.
- [88] K. Kenda, J. Škrbec, and M. Škrjanc, "Usage of the Kalman Filter for Data Cleaning of Sensor Data," *Control and Intelligent Systems*, vol. 39, 2013.
- [89] H. Tebianian and B. Jeyasurya, "Dynamic state estimation in power systems using Kalman filters," in *Proc. 2013 IEEE Electrical Power Energy Conference*, 2013, pp. 1–5.
- [90] Z. Huang, K. Schneider, and J. Nieplocha, "Feasibility studies of applying Kalman Filter techniques to power system dynamic state estimation," in *Proc. 2007 International Power Engineering Conference (IPEC)*, 2007, pp. 376–382.
- [91] A. Sharma and S. Jain, "A Review and Performance Comparison of Power System State Estimation Techniques," in *Proc. ISGT-Asia 2018*, 2018, pp. 770–775.
- [92] E. A. Wan and R. van der Merwe, "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," in *Proc. IEEE 2000 Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium*, Alberta, Canada, 2000, pp. 153–158.

- [93] S. *Kalman Filtering and Neural Networks*, Wiley, New York, 2001.
- [94] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Transactions of the ASME, Ser. D, Journal of Basic Engineering*, vol. 82, pp. 35–45, 1960.
- [95] "Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation," *Eastern Interconnection Phasor Project*, KEMA, Netherlands, Mar. 2006.
- [96] *MATPOWER-manual.pdf*. [Online]. Available: <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-8.0.pdf>
- [97] S. Lü and R. Zhang, "Two Efficient Implementation Forms of Unscented Kalman Filter," *Control and Intelligent Systems*, vol. 39, 2011.
- [98] R. Merwe, E. Wan, and S. Julier, "Sigma-Point Kalman Filters for Nonlinear Estimation and Sensor Fusion—Applications to Integrated Navigation," in *Proc. AIAA Guidance, Navigation & Control Conference*, 2004.
- [99] M. A. Pai, *Energy Function Analysis for Power System Stability*, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [100] A. Aflaki, M. Gitizadeh, A. Ghasemi, and K. Okedu, "Optimal Placement of Measuring Devices for Distribution System State Estimation Using Dragonfly Algorithm," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, 2022.
- [101] K. Sreekala, N. N. Raj, and S. Gupta, "Deep convolutional neural network with Kalman filter-based object tracking and detection in underwater communications," *Wireless Networks*, vol. 30, pp. 5571–5588, 2024.
- [102] R. A. van de Geijn, "Notes on Cholesky Factorization," Department of Computer Science, University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, Mar. 11, 2011.
- [103] B. Adcock, M. Griebel, and G. Maier, "Learning Lipschitz operators with respect to Gaussian measures with near-optimal sample complexity," *arXiv preprint*, arXiv:2410.23440, 2024.