



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάπτυξη Δυναμικής Εκτίμησης Κατάστασης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση Φίλτρου Kalman

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκεριολντ Π. Κουτα

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

Ορέστης Δαρμής, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάπτυξη Δυναμικής Εκτίμησης Κατάστασης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση Φίλτρου Kalman

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γκεριολντ Π. Κουτα

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

Ορέστης Δαρμής, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14η Νοεμβρίου 2023

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

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

.....

Γκεριολντ Π. Κουτα

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

Copyright © Γκεριολντ Π. Κουτα, 2023

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 ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί ένα αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής ζωής αλλά και της βιομηχανίας. Για να εξασφαλισθεί η αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές, είναι απαραίτητη η ορθή, αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Οι υπεύθυνοι λειτουργίας τέτοιων συστημάτων βασίζονται στην γνώση της παρούσας κατάστασης του συστήματος για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων. Για την εκτίμηση της παρούσας κατάστασης απαιτείται επεξεργασία της τοπολογίας του συστήματος και των μετρήσεων σε διάφορα σημεία του δικτύου. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τον εκτιμητή κατάστασης ο οποίος υπολογίζει τις μιγαδικές τάσεις όλων των ζυγών, όσο το δυνατόν ακριβέστερα, βασιζόμενος στις διαθέσιμες μετρήσεις.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκτίμησης κατάστασης είναι μέσω λήψης μετρήσεων από μετρητικά όργανα RTU και επεξεργασίας τους από συστήματα SCADA. Η μέθοδος αυτή οδηγεί σε μη γραμμικό μοντέλο μετρήσεων καθώς γίνεται χρήση των εξισώσεων ροής φορτίου με αποτέλεσμα να απαιτείται επαναληπτική διαδικασία για την επίλυση της εκτίμησης κατάστασης. Επίσης το σύστημα SCADA λαμβάνει τις μετρήσεις με περίοδο ανανέωσης αρκετών δευτερολέπτων. Τα τελευταία χρόνια, εντείνεται η χρήση μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMU) στην εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ. Τα PMU μετρούν απευθείας τους φασιθέτες τάσης ζυγών και ρεύματος γραμμών μεταφοράς, με ρυθμούς λήψης μετρήσεων πολύ μεγαλύτερους από των RTU.

Με την διαρκή ανάπτυξη των ηλεκτρικών δικτύων, η κλασική εκτίμηση κατάστασης καλείται να ανταποκριθεί σε δυναμικές μεταβολές του δικτύου τις οποίες αδυνατεί να διαχειριστεί αποδοτικά. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι δυναμικής εκτίμησης κατάστασης οι οποίοι εκτιμούν την κατάσταση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη την συμπεριφορά του δικτύου στον χρόνο. Τα πλεονεκτήματα των δυναμικών εκτιμητών κατάστασης είναι η αυξημένη ακρίβεια και η δυνατότητα πρόβλεψης της κατάστασης του συστήματος. Η δυνατότητα αυτή παρέχει περισσότερο χρόνο στους χειριστές του δικτύου να λάβουν σημαντικές αποφάσεις σε περίπτωση ανάγκης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει αρχικά την θεωρία της κλασικής εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ ενώ στη συνέχεια αναπτύσσεται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος δυναμικής εκτίμησης κατάστασης βασισμένος σε φίλτρο Kalman για δίκτυα AC με χρήση συνδυασμού μετρήσεων από μονάδες RTU και PMU. Ακολούθως, αναλύονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων εκτέλεσης του αλγορίθμου δυναμικής εκτίμησης κατάστασης για διάφορα ηλεκτρικά δίκτυα για διάφορα σενάρια θορύβου ή σφάλματος, και αντιπαραβάλλονται με τα αποτελέσματα της κλασικής εκτίμησης κατάστασης.

Λέξεις Κλειδιά: δυναμική εκτίμηση κατάστασης, φίλτρο Kalman, PMU, SCADA, MATLAB

Abstract

Electricity is an essential part of everyday life and industry. To ensure reliable electric power supply to consumers, it is necessary to have Electrical Power Systems that operate correctly, fast and cost effectively. Administrators of such grids make important decisions based on the current state of the system. In order to extract the current system state estimate, topology and electrical measurements from various busses of the grid are processed. The abovementioned method is possible with the state estimator, which must estimate the buses' voltages accurately from the currently available measurements.

To date, the most utilized method for state estimation involves collecting measurements from Remote Terminal Units (RTU) and processing them in SCADA systems. However, this approach results in a non-linear model due to the utilization of power flow equations, necessitating multiple iterations to extract the state estimation. Moreover, the SCADA terminal receives measurements at intervals of several seconds. In recent years, there has been a surge in the adoption of Phasor Measurement Units (PMU) which utilize recent technologies to measure voltages and currents directly on the installed buses thus leading to linear equations. Additionally, PMU offer a faster time sampling rate for measurements compared to RTU and can communicate with the SCADA system at a rate of 60 times per second.

As the power system expands, the classic state estimation demands more time to be carried out. This led to the development of dynamic state estimation (DSE) algorithms that calculate the state of the system by modeling the time-varying behavior of the power system. These algorithms have the advantage of being more accurate and possessing the ability to predict the state of the system one step ahead. This gives more time to the operator to take control decisions in case of emergencies.

This diploma thesis firstly presents the fundamentals of classic system state estimation theory and then attempts to develop an improved algorithm for dynamic state estimation based on a Kalman filter for AC grids. This algorithm can utilise a combination of RTU and PMU measurements. Afterwards the results of the algorithm with the Kalman filter for multiple power grids and different scenarios of noise and faulty measurements are presented and studied. Finally, the results of the improved algorithm are compared to those of the classic state estimation method.

Keywords: dynamic state estimation, Kalman Filter, PMU, SCADA, MATLAB

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον καθηγητή Γεώργιο Κορρέ, που μου παρείχε τη δυνατότητα να εξετάσω ένα τόσο συναρπαστικό θέμα και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π, Ορέστη Δαρμή για την συνεχή υποστήριξη και καθοδήγησή του, καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές του που συνετέλεσαν καθοριστικά στην επιτυχή διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω την βαθιά μου ευγνωμοσύνη προς τη μητέρα μου, Μίρα, και την αδερφή μου, Βαλέρια, για τη συνεχή υποστήριξη και τη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου για τη συμπαράστασή τους στις δύσκολες στιγμές, για τις ατελείωτες ώρες κοινού διαβάσματος και για τις αξέχαστες στιγμές κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ειδικότερα, Γιώργο, Άγγελε, Νίκο, Αλέξη, Θοδωρή, σας ευχαριστώ για όλα.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	15
1.1	Σημαντικότητα του εκτιμητή κατάστασης	15
1.2	Αναγκαιότητα για βελτιωμένους εκτιμητές κατάστασης.....	16
1.3	Δυναμική εκτίμηση κατάστασης με φίλτρο Kalman.....	17
2	Εποπτεία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
2.1	Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας	19
2.2	Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας	21
2.2.1	Λειτουργίες Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας.....	23
2.3	Σύστημα SCADA	24
2.3.1	Δομή συστήματος SCADA	25
2.3.2	Απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (RTU)	26
2.4	Μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU).....	29
3	Εκτίμηση κατάσταση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	34
3.1	Ρόλος εκτίμησης κατάστασης.....	34
3.2	Λειτουργίες εκτίμησης κατάστασης.....	36
3.3	Κατηγορίες εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ.....	37
3.3.1	Κεντρική και αποκεντρωμένη εκτίμηση κατάστασης	37
3.3.2	Στατική και δυναμική εκτίμηση κατάστασης	38
3.4	Εκτίμηση κατάστασης με συνδυασμό μετρήσεων SCADA και PMU.....	38
4	Μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης	41
4.1	Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας.....	41
4.2	Σύνθεση διανύσματος μετρήσεων	41
4.3	Gaussian κατανομή θορύβου και συνάρτηση πιθανοφάνειας.....	42
4.4	Μητρική μορφή αντικειμενικής συνάρτησης.....	43
4.5	Αριθμητική επίλυση προβλήματος.....	43
4.6	Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	44
5	Εκτίμηση κατάσταση με φίλτρο Kalman	45
5.1	Επισκόπηση λειτουργίας φίλτρου Kalman.....	45
5.2	Επαναληπτικό εκτεταμένο φίλτρο Kalman (IEKF)	46
5.3	Σχηματισμός χώρου καταστάσεων για εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ.....	46
5.4	Εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου (Predictor).....	47
5.5	Εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων (Corrector).....	47

5.6	Αρχικοποίηση παραμέτρων του ΙΕΚF	50
6	Διατύπωση εξισώσεων συμβατικών μετρήσεων	52
6.1	Μοντέλα στοιχείων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας	52
6.1.1	Γραμμές μεταφοράς	52
6.1.2	Εγκάρσια Στοιχεία.....	53
6.1.3	Φορτία και Γεννήτριες	53
6.1.4	Μετασχηματιστές.....	54
6.2	Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ-Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες	55
6.3	Συνάρτηση μετρήσεων $h(x)$	56
6.4	Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων $H(x)$ - Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες	57
7	Δείκτες απόδοσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης.....	60
7.1	Μέσο απόλυτο σφάλμα.....	60
7.2	Μέσο απόλυτο σφάλμα κυκλικής συνιστώσας	60
7.3	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα	61
8	Υλοποίηση σε περιβάλλον MATLAB®	62
8.1	Εισαγωγή τοπολογίας του δικτύου	62
8.2	Δημιουργία RTU και PMU μετρήσεων.....	64
8.3	Αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης	66
8.4	Περιγραφή δοκιμών.....	68
8.4.1	Δίκτυο 4 ζυγών.....	68
8.4.2	Δίκτυο 9 ζυγών.....	69
8.4.3	Δίκτυο 14 ζυγών.....	69
8.5	Ανάλυση αποτελεσμάτων	70
8.5.1	Αποτελέσματα δικτύου 4 ζυγών	71
8.5.2	Αποτελέσματα δικτύου 9 ζυγών	79
8.5.3	Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών	87
8.6	Ανάλυση αποτελεσμάτων	95
9	Συμπεράσματα και παρατηρήσεις.....	100
	Βιβλιογραφία	102

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση αλγορίθμου του φίλτρου Kalman [8].	18
Σχήμα 2.1: Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [12]	20
Σχήμα 2.2: Ψηφιακό ΚΕΕ στο Τορίνο της Ιταλίας [16].	21
Σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη εξοπλισμού (hardware) σε σύγχρονο ΚΕΕ [20].	22
Σχήμα 2.4: Κύριες λειτουργίες ενός ΚΕΕ [21].	24
Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα δομής συστήματος SCADA [14].	25
Σχήμα 2.6: Μονάδα RTU SIMATIC RTU3041C της Siemens [24]	27
Σχήμα 2.7: Σχεδιάγραμμα βασικών τμημάτων ενός RTU.	28
Σχήμα 2.8: Απεικόνιση σήματος σε ημιτονοειδή μορφή (αριστερά) και ως φασιθέτη (δεξιά) [2].	29
Σχήμα 2.9: Γενική δομή ενός PMU [2].	30
Σχήμα 2.10: Μονάδα VCL-PMU-30 της VALIANT COMMUNICATIONS [27].	31
Σχήμα 2.11: Ολοκληρωμένο σύστημα WAMS με υποδομές του EMS [25].	32
Σχήμα 3.1: Λειτουργικές καταστάσεις των ΣΗΕ κατά Dy Liacco.	34
Σχήμα 3.2: Σχεδιάγραμμα εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ.	35
Σχήμα 3.3: Κεντρική (αριστερά) και αποκεντρωμένη (δεξιά) αρχιτεκτονική [25].	38
Σχήμα 3.4: Υβριδικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης [33].	39
Σχήμα 5.1: Ο κύκλος του φίλτρου Kalman [34].	45
Σχήμα 6.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς [15].	52
Σχήμα 6.2: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου [15].	53
Σχήμα 6.3: Μοντέλα γεννήτριας, φορτίου σταθερής ισχύος και αγωγιμότητας [15].	53
Σχήμα 6.4: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [15].	54
Σχήμα 6.5: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [15].	54
Σχήμα 6.6: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ [15].	55
Σχήμα 8.1: Αναφορά μέτρων και γωνιών τάσεων των ζυγών.	64
Σχήμα 8.2: Αναφορά ροών ενεργού και αέργου ισχύος.	65
Σχήμα 8.3: Αποτελέσματα κλασσικής εκτίμησης κατάστασης για το δίκτυο 14 ζυγών για κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις.	67
Σχήμα 8.4: Αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF για το δίκτυο 14 ζυγών για κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις.	67
Σχήμα 8.5: Δίκτυο 4 ζυγών.	68
Σχήμα 8.6: Δίκτυο 9 ζυγών.	69
Σχήμα 8.7: Δίκτυο 14 ζυγών.	70
Σχήμα 8.8: Δείκτης <i>MAEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	71
Σχήμα 8.9: Δείκτης <i>MAEA</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	71
Σχήμα 8.10: Δείκτης <i>MACCV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	72
Σχήμα 8.11: Δείκτης <i>MAPEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	72
Σχήμα 8.12: Δείκτης <i>MAEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	73
Σχήμα 8.13: Δείκτης <i>MAEA</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	73
Σχήμα 8.14: Δείκτης <i>MACCV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	74
Σχήμα 8.15: Δείκτης <i>MAPEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).	74

Σχήμα 8.16: Δείκτης <i>MAEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	75
Σχήμα 8.17: Δείκτης <i>MAEA</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	75
Σχήμα 8.18: Δείκτης <i>MACCV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	76
Σχήμα 8.19: Δείκτης <i>MAPEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	76
Σχήμα 8.20: Δείκτης <i>MAEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	77
Σχήμα 8.21: Δείκτης <i>MAEA</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	77
Σχήμα 8.22: Δείκτης <i>MACCV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	78
Σχήμα 8.23: Δείκτης <i>MAACV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).....	78
Σχήμα 8.24: Δείκτης <i>MAEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	79
Σχήμα 8.25: Δείκτης <i>MAEA</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	79
Σχήμα 8.26: Δείκτης <i>MACCV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	80
Σχήμα 8.27: Δείκτης <i>MAPEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	80
Σχήμα 8.28: Δείκτης <i>MAEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	81
Σχήμα 8.29: Δείκτης <i>MAEA</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	81
Σχήμα 8.30: Δείκτης <i>MACCV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	82
Σχήμα 8.31: Δείκτης <i>MAPEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	82
Σχήμα 8.32: Δείκτης <i>MAEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	83
Σχήμα 8.33: Δείκτης <i>MAEA</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	83
Σχήμα 8.34: Δείκτης <i>MACCV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	84
Σχήμα 8.35: Δείκτης <i>MAPEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	84
Σχήμα 8.36: Δείκτης <i>MAEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	85
Σχήμα 8.37: Δείκτης <i>MAEA</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	85
Σχήμα 8.38: Δείκτης <i>MACCV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	86
Σχήμα 8.39: Δείκτης <i>MAPEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).....	86
Σχήμα 8.40: Δείκτης <i>MAEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	87
Σχήμα 8.41: Δείκτης <i>MAEA</i> 1 ^η δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	87
Σχήμα 8.42: Δείκτης <i>MACCV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	88
Σχήμα 8.43: Δείκτης <i>MAPEV</i> 1 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	88
Σχήμα 8.44: Δείκτης <i>MAEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	89
Σχήμα 8.45: Δείκτης <i>MAEA</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	89
Σχήμα 8.46: Δείκτης <i>MACCV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	90
Σχήμα 8.47: Δείκτης <i>MAPEV</i> 2 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	90
Σχήμα 8.48: Δείκτης <i>MAEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	91
Σχήμα 8.49: Δείκτης <i>MAEA</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	91
Σχήμα 8.50: Δείκτης <i>MACCV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	92
Σχήμα 8.51: Δείκτης <i>MAPEV</i> 3 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	92
Σχήμα 8.52: Δείκτης <i>MAEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	93
Σχήμα 8.53: Δείκτης <i>MAEA</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	93
Σχήμα 8.54: Δείκτης <i>MACCV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	94
Σχήμα 8.55: Δείκτης <i>MAPEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).....	94
Σχήμα 8.56: Δείκτης <i>MAPEV</i> 4 ^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών) με $Qk = diag10 - 5m\chi n$	95

Σχήμα 8.57: Βελτίωση δείκτη <i>MAEV</i> για το δίκτυο 9 ζυγών.....	96
Σχήμα 8.58: Βελτίωση δείκτη <i>MAEA</i> για το δίκτυο 9 ζυγών.....	96
Σχήμα 8.59: Βελτίωση δείκτη <i>MACCV</i> για το δίκτυο 9 ζυγών.....	97
Σχήμα 8.60: Βελτίωση δείκτη <i>MAPEV</i> για το δίκτυο 9 ζυγών.	97
Σχήμα 8.61: Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση για το δίκτυο 9 ζυγών.	98

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Σύγκριση συστημάτων SCADA με PMU	33
Πίνακας 6.1: Ανάλυση πρόσημων ενεργού και άεργου ισχύος γεννήτριας και ειδών φορτίου.	53
Πίνακας 7.1: Ποιοτική κλίμακα του δείκτη MAPE.	61
Πίνακας 8.1: Παράμετροι ζυγών [47].	63
Πίνακας 8.2: Παράμετροι γεννητριών [47].	63
Πίνακας 8.3: Παράμετροι γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών [47].	64
Πίνακας 8.4: Δεδομένα κλάδων δικτύου 4 ζυγών.	68

Πίνακας Ακρωνύμων

ACE	Area Control Error
AGC	Automatic Generation Control
CIOC	Communication Input/Output Controllers
DTS	Dispatcher Training Simulator
EKF	Extended Kalman Filter
EMS	Energy Management System
FHSSE	Fusion Hybrid Static State Estimation
GPS	Global Positioning System
HMI	Human Machine Interface
IED	Intelligent Electronic Device
IEKF	Iterated Extended Kalman Filter
ISO	Independent System Operator
MACC	Mean Absolute Circular Component
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Average Percentage Error
OSHSSE	One-Stage Hybrid Static State Estimation
PDF	Probability Density Function
PMU	Phasor Measurement Unit
PSSE	Power System State Estimation
RTO	Regional Transmission Operator
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SCDFT	Symmetrical Component Discrete Fourier Transform
SCDR	Symmetrical Component Distance Relay
STLF	Short Term Load Forecasting
TSHSSE	Two-Stage Hybrid Static State Estimation
TSO	Transmission System Operator
TVE	Total Vector Error
UTC	Coordinated Universal Time
WAMS	Wide Area Measurement System
WLS	Weighted Least Squares

1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί σημαντικό κομμάτι της σύγχρονης καθημερινότητας. Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι τα δίκτυα που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή, μεταφορά, διανομή και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Διακοπή λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος λόγω μετρητικών λαθών μεταφράζεται σε τεράστια οικονομική ζημιά και κίνδυνο για την δημόσια ασφάλεια. Η συμβατική εκτίμηση κατάστασης αδυνατεί να εντοπίσει, από μόνη της, λάθη στις μετρήσεις που προέρχονται σε σφάλματα των οργάνων με αποτέλεσμα η παρούσα εκτίμηση κατάστασης να παρουσιάζει σημαντική απόκλιση από την πραγματική. Κρίνεται, επομένως, απαραίτητη η ανάπτυξη ενός ακριβή και βελτιωμένου εκτιμητή κατάστασης. Μια προσέγγιση είναι η χρήση του φίλτρου Kalman. Η παρούσα διπλωματική βελτιώνει την κλασσική εκτίμηση κατάστασης με την προσθήκη μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMU) και την εφαρμογή φίλτρου Kalman στον εκτιμητή κατάστασης. Το αποτέλεσμα είναι μια υβριδική δυναμική εκτίμηση κατάστασης βελτιωμένης ακρίβειας με δυνατότητα φιλτραρίσματος αναξιόπιστων μετρήσεων. Μια τέτοια μέθοδος θα πρόσδιδε προσωρινή μνήμη στον εκτιμητή κατάστασης κάνοντας τον λιγότερο ευαίσθητο σε μετρήσεις με σημαντικά σφάλματα.

1.1 Σημαντικότητα του εκτιμητή κατάστασης

Η συνεχής ανάπτυξη των ηλεκτρικών δικτύων έχει αυξήσει την ανάγκη δημιουργίας αποδοτικών μεθόδων εποπτείας των ΣΗΕ. Ήδη από το 1970, η εκτίμηση κατάστασης (state estimation) εισήχθη στην μελέτη των ΣΗΕ με στόχο τον βέλτιστο έλεγχό τους σε πραγματικό χρόνο. Το μαθηματικό μοντέλο της εκτίμησης κατάστασης προέρχεται από συνδυασμό της θεωρίας εκτίμησης από τον κλάδο των Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου (ΣΑΕ) με στοιχεία στατιστικής και πιθανοτήτων [1].

Η εκτίμηση κατάστασης είναι ένα υπολογιστικό εργαλείο επεξεργασίας μετρήσεων πραγματικού χρόνου που λαμβάνει υπόψιν τις τιμές των μετρητικών οργάνων και τις αντίστοιχες ακρίβειές τους, σε αντίθεση με την μέθοδο ροής φορτίου που αδυνατεί να λειτουργήσει αξιόπιστα λόγω αδυναμίας φιλτραρίσματος και εντοπισμού σφαλμάτων των μετρητικών οργάνων. Αναλυτικότερα, τα διαθέσιμα ηλεκτρικά μεγέθη αντιμετωπίζονται ως μετρήσεις και άρα συσχετίζονται με σφάλματα με συγκεκριμένες διασπορές που εξαρτούνται από αυτά. Ο εκτιμητής κατάστασης, επομένως, αποτελεί ένα φίλτρο «ακατέργαστων» δεδομένων τα οποία χρησιμοποιεί κατάλληλα για να εκτιμήσει την κατάσταση του συστήματος. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει στους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων να κάνουν ανάλυση ασφαλείας και εντοπισμό εσφαλμένων μετρήσεων (bad data) κάτι που θα ήταν αδύνατο να γίνει χωρίς τον εκτιμητή κατάστασης πάρα μόνο με εκτενή εποπτεία των δεδομένων ενός ΣΗΕ, διαδικασία αδύνατη σε σημαντικά μεγάλα ΣΗΕ. Επιπλέον, ο εκτιμητής έχει την δυνατότητα να κάνει έλεγχο τοπολογίας ορθά και αξιόπιστα καθιστώντας την χρήση προγραμμάτων ορθότητας αποτελεσμάτων (data validation programs) πλεονασμό [1].

1.2 Αναγκαιότητα για βελτιωμένους εκτιμητές κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης εκτελείται από το Σύστημα Συλλογής και Διαχείρισης Πληροφοριών (SCADA) που αποτελεί το πλέον διαδεδομένο σύστημα τηλεμέτρησης. Το παραπάνω σύστημα χρησιμοποιεί τις συμβατικές τερματικές μονάδες RTU για να συλλέξει μετρήσεις από διάφορα σημεία του δικτύου. Αν και η μέθοδος αυτή έχει διευκολύνει σημαντικά τους TSOs στην εποπτεία του δικτύου, το σύστημα SCADA έχει σχετικά μικρούς ρυθμούς λήψης δεδομένων από τα μετρητικά όργανα ενώ το σφάλμα των μετρήσεων των RTU είναι σχετικά υψηλό. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εκτίμηση κατάστασης να περιέχει σημαντικά σφάλματα, συγκρίσιμα των σφαλμάτων των RTU, τα οποία μεγεθύνονται μετρήσεις συνδεδεμένων ζυγών περιέχουν σημαντικό ποσοστό σφάλματος.

Για να αντιμετωπιστεί η παραπάνω συμπεριφορά των RTU, έχουν αναπτυχθεί οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU). Οι μονάδες αυτές εγκαθίστανται απευθείας στο ζυγός του δικτύου και μετράνε την μιγαδική τάση καθώς και τα ρεύματα κλάδων από τον ζυγό αυτό. Κύριο χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών είναι οι αυξημένοι ρυθμοί δειγματοληψίας καθώς και υψηλή ακρίβεια και ποιότητα των μετρήσεων σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες RTU. Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, γίνεται σταδιακή αντικατάσταση των RTU με PMU καθώς η πλήρη εποπτεία με PMU των ΣΗΕ είναι δύσκολη λόγω του σχετικά υψηλού κόστους των PMU [2].

Πολλοί TSOs για να βελτιώσουν την ακρίβεια της εκτίμησης κατάστασης χρησιμοποιούν επιπλέον τα PMU σε συνδυασμό με τις μετρήσεις του SCADA καθώς τα πρώτα έχουν δυνατότητα απευθείας μέτρησης της μιγαδικής τάσης σε έναν ζυγό αλλά και την βελτίωση τις ακρίβειας εκτίμησης για τις τάσεις των γειτονικών ζυγών. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση αυτή αδυνατεί να ακολουθήσει τις δυναμικές αλλαγές που συμβαίνουν στο ΣΗΕ καθώς υπάρχει σημαντική διαφορά στην συχνότητα λήψεων αλλά και ακρίβειας μετρήσεων ανάμεσα στις μετρήσεις SCADA και τα PMU καθώς και λόγω της πιθανής ύπαρξης μετρήσεων με σημαντικά μεγάλο σφάλμα.

Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να έχουν, καταστροφικές για το ΣΗΕ και τους καταναλωτές, επιπτώσεις. Για παράδειγμα, το 2004 το νοτιοανατολικό κομμάτι των ΗΠΑ και περιοχές του Καναδά υπέστησαν την μεγαλύτερη απώλεια ηλεκτρικής ισχύος (blackout) που έχει παρατηρηθεί στην Βόρεια Αμερική. Σχεδόν 50 εκατομμύρια πολίτες, αντιπροσωπεύοντας κατανάλωση 61.800MW ηλεκτρικής ισχύς, έχασαν την πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο για περίοδο 4 ημερών με μερικές πολιτείες να έχουν παροδικές απώλειες ισχύος ακόμη και μια εβδομάδα μετά το συμβάν. Η οικονομική ζημιά ήταν τεράστια με το κράτος των ΗΠΑ να ζημιώνεται 6 δισεκατομμύρια δολάρια ενώ το ΑΕΠ του Καναδά σημείωσε αισθητή πτώση κατά 0.7%. Αιτία ήταν η αδυναμία του εκτιμητή κατάστασης να υπολογίσει την παρούσα κατάσταση λόγω λάθος τηλεμετρίας και να τεθεί εκτός λειτουργίας. Το ηλεκτρικό δίκτυο δεν μπορούσε να παρατηρηθεί και ο ISO αδυνατούσε να ενημερωθεί ότι μια

γραμμή μεταφοράς των 345kV στο Οχάιο είχε υπερφορτωθεί και έπειτα από λίγο να κυρτωθεί και να βραχυκυκλωθεί με ένα κοντινό δέντρο. Με τον ISO να αδυνατεί να ενημερωθεί για την κατάσταση του δικτύου, το βραχυκύκλωμα προκάλεσε μεγάλη πτώση τάσης στο δίκτυο με αποτέλεσμα κομμάτια του περιφερειακού δικτύου να αποσυνδέονται από το κεντρικό σε μια αλυσιδωτή θετική ανάδραση (cascading failure). Μέσα σε 4 ώρες 256 σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τέθηκαν εκτός λειτουργίας με το ΣΗΕ να έχει υποστεί τεράστιες καταστροφές [3], [4].

1.3 Δυναμική εκτίμηση κατάστασης με φίλτρο Kalman

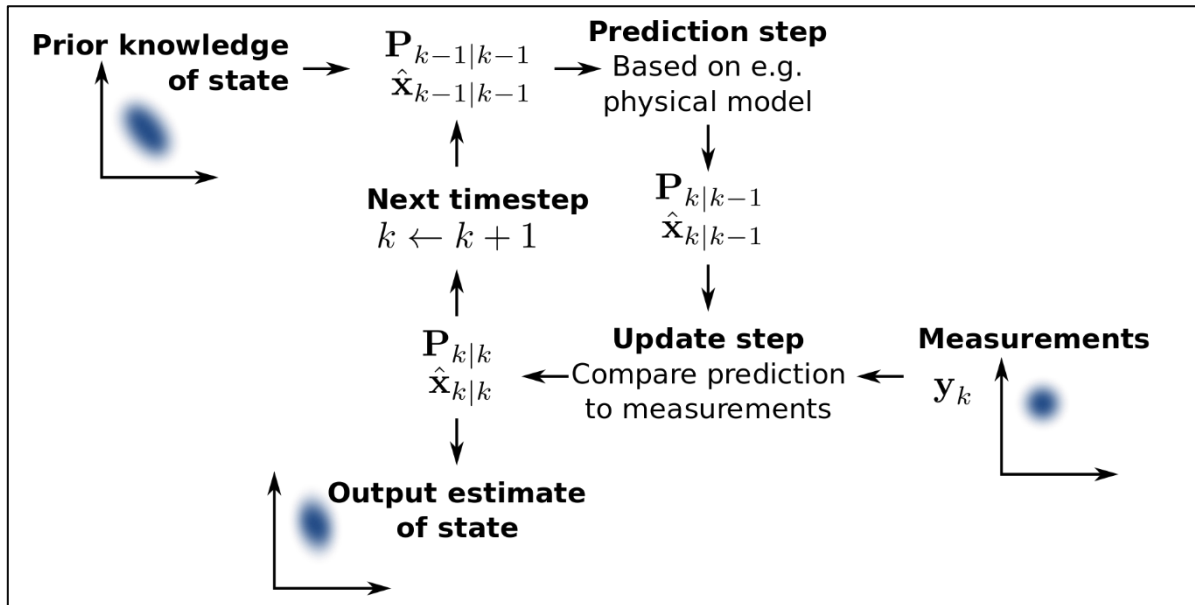
Η στατική εκτίμηση κατάστασης βασίζεται αποκλειστικά στις πιο πρόσφατες διαθέσιμες μετρήσεις και στην τρέχουσα τοπολογία του δικτύου και είναι η πλέον διαδεδομένη μέθοδος εκτίμησης κατάστασης στα σύγχρονα ΚΕΕ.

Η ευαισθησία του στατικού εκτιμητή κατάστασης σε μετρήσεις με υψηλό θόρυβο είναι ένα ζήτημα που έχει απασχολήσει αρκετά τους TSOs. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκε ο δυναμικός εκτιμητής κατάστασης (DSE) ο οποίος, σε αντίθεση με τον στατικό εκτιμητή, χρησιμοποιεί δεδομένα από τις προηγούμενες εκτιμώμενες καταστάσεις του δικτύου. Με τον τρόπο αυτό οι TSOs μπορούν να έχουν μια καλύτερη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης του ΣΗΕ και έτσι να λάβουν πιο αποτελεσματικές αποφάσεις.

Το 1960 ο Kalman, στηριζόμενος σε μια μέθοδο εκτίμησης που ανέπτυξαν ανεξάρτητα οι Kolmogorov (1941) και Wiener (1942), εισήγαγε μια νέα μέθοδο δυναμικής εκτίμησης κατάστασης η οποία είναι γνωστή ως Φίλτρο Kalman (Kalman Filter – KF). Η μέθοδος αυτή στηρίζεται σε γραμμικές εξισώσεις και χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα επεξεργασίας δεδομένων. Αν και το φίλτρο αυτό προοριζόταν για γραμμικά μοντέλα συστημάτων αυτόματου ελέγχου, συναντά σημαντική εφαρμογή και σε μη γραμμικά μοντέλα. Στόχος του φίλτρου Kalman είναι να μειώσει, όσο το δυνατόν πιο πολύ, την απόκλιση της εκτίμησης κατάστασης από το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης λαμβάνοντας υπόψη τις δυναμικές αλλαγές που συμβαίνουν στο δίκτυο αλλά και το ενδεχόμενο ύπαρξης μετρήσεων με υψηλό ποσοστό θορύβου [5].

Το φίλτρο Kalman αποτελεί έναν βέλτιστο αναδρομικό αλγόριθμο επεξεργασίας δεδομένων (optimal recursive data processing algorithm). Η δυνατότητα του φίλτρου να επεξεργάζεται όλες τις μετρήσεις, και να εκτιμά βέλτιστα την παρούσα κατάσταση του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τον θόρυβο και τις αποκλίσεις των μετρήσεων σε συνδυασμό με την τοπολογία του συστήματος, τον καθιστούν κατάλληλη επιλογή για την εκτίμηση κατάστασης στα ΣΗΕ. Ο αλγόριθμος έπειτα ανανεώνει την εκτίμηση κατάστασης ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που οφείλεται στον θόρυβο των νέων μετρήσεων. Ο εκτιμητής μαζί με την εκτίμηση κατάστασης μπορεί να παράγει και ένα μέτρο αβεβαιότητας της εκτίμησης σε μορφή πίνακα συνδιασπορών (covariance matrix). Λόγω της απλότητας στην εφαρμογή, το φίλτρο Kalman μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου (real-time

applications) [6], [7]. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία εκτίμησης κατάστασης με χρήση του φίλτρου Kalman.



Σχήμα 1.1: Αναπαράσταση αλγορίθμου του φίλτρου Kalman [8].

Καθίσταται επομένως κατανοητή η σημαντικότητα και αναγκαιότητα ενός βελτιωμένου δυναμικού εκτιμητή κατάστασης στην λειτουργία των σύγχρονων ΚΕΕ. Ο εκτιμητής αυτός θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να διαχειρίζεται μετρήσεις από το SCADA και τα PMU ταυτόχρονα και να έχει δυνατότητα φιλτραρίσματος πιθανών μεγάλων σχετικά σφαλμάτων.

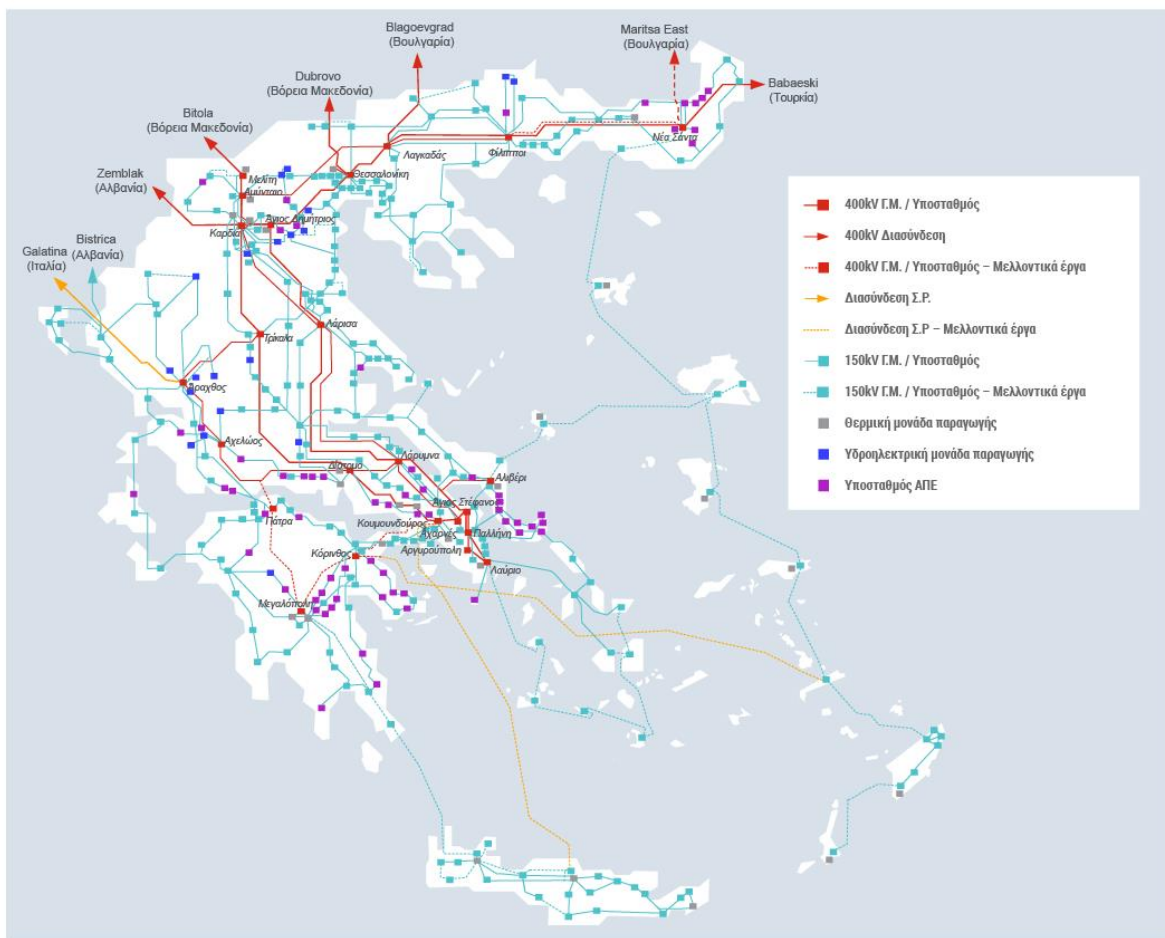
2 Εποπτεία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στην δομή και λειτουργία των ΚΕΕ καθώς και στα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούν για την εποπτεία του ηλεκτρικού δικτύου. Όπως αναφέρθηκε στην Εισαγωγή, τα ΚΕΕ λαμβάνουν διάφορες ηλεκτρικές μετρήσεις από στρατηγικά σημεία του δικτύου μέσω των παραδοσιακών συστημάτων SCADA και RTU είτε μέσω συστημάτων PMU ή και συνδυασμό αυτών. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η επεξήγηση της λειτουργίας τους για την κατανόηση της λειτουργίας της εκτίμησης κατάστασης.

2.1 Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα της ηπειρωτικής Ελλάδας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα υψηλής (66kV και 150kV) και υπερύψηλης τάσης (400kV). Τον κορμό του Διασυνδεδεμένου Συστήματος Μεταφοράς (ΔΣΜ) αποτελούν οι τρεις γραμμές διπλού κυκλώματος των 400kV, που μεταφέρουν ηλεκτρισμό, 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. Επιπρόσθετα, το ΔΣΜ διαθέτει επιπλέον γραμμές των 400kV καθώς και εναέριες, υπόγειες γραμμές και υποβρύχια καλώδια των 150kV που συνδέουν τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Άνδρο, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το ΔΣΜ. Υπάρχει επίσης και μια υποβρύχια σύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66kV [9]. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο αναλυτικός χάρτης του ΕΣΜΗΕ.

Σύμφωνα με την έκθεση του ΑΔΜΗΕ για την απόδοση λειτουργίας του ΕΣΜΗΕ κατά το έτος 2021 το συνολικό μήκος οδεύσεων των γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού δικτύου μετρήθηκε στα 13.175,19km με επιπλέον 200km υπόγειων καλωδίων των 150kV εντός πυκνοκατοικημένων περιοχών της πρωτεύουσας, και με τον αριθμό των υποσταθμών να αγγίζει τους 356. Το σύνολο παραγωγής και ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών που διακινήθηκε το έτος 2021 ανέρχεται στις 52.409 GWh, από τις οποίες οι 45.668 GWh διακινήθηκαν μέσω του Συστήματος Μεταφοράς. Οι υπόλοιπες 6.741 GWh αφορούν παραγωγή στο Δίκτυο (Φ/Β, ΜΥΗΣ, Βιοαέριο, ΣΥΘΗΑ) [10], [11].



Σχήμα 2.1: Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [12]

Η διασφάλιση αξιοπιστίας ενός ΣΗΕ αποτελεί αρμοδιότητα των διαχειριστών συστημάτων μεταφοράς (TSOs στην Ευρώπη/ RTOs ή ISOs στις ΗΠΑ). Οι TSOs έχουν την ευθύνη της αποδοτικής μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές [13]. Για τον σκοπό αυτό, ελέγχουν το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω των κέντρων ελέγχου ενέργειας (ΚΕΕ) με τα οποία επιτυγχάνεται η αποδοτική και οικονομική μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές. Στα ΚΕΕ λαμβάνονται κρίσιμες αποφάσεις έπειτα από λήψη και επεξεργασία μετρήσεων από ορισμένα σημεία του δικτύου [14]. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται η αίθουσα ελέγχου ενός ψηφιακού ΚΕΕ στο Τορίνο της Ιταλίας.

Την σημαντική υποχρέωση ολοκληρωμένης παρακολούθησης και του ελέγχου του ελληνικού ΣΗΕ έχει αναλάβει το Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας (ΕΚΕΕ). Το ΕΚΕΕ έχει εγκατασταθεί στον Άγιο Στέφανο Αττικής και είναι συνδεδεμένο ηλεκτρονικά του σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς μεταφοράς σε ολόκληρο το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μέσω του Βόρειου ΚΕΕ και το ΚΕΕ της Πτολεμαΐδας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το Βόρειο ΚΕΕ έχει την δυνατότητα να αναλάβει βασικές λειτουργίες του ΕΚΕΕ σε περίπτωση που παρουσιαστεί κάποια δυσλειτουργία σε αυτό [15].



Σχήμα 2.2: Ψηφιακό ΚΕΕ στο Τορίνο της Ιταλίας [16].

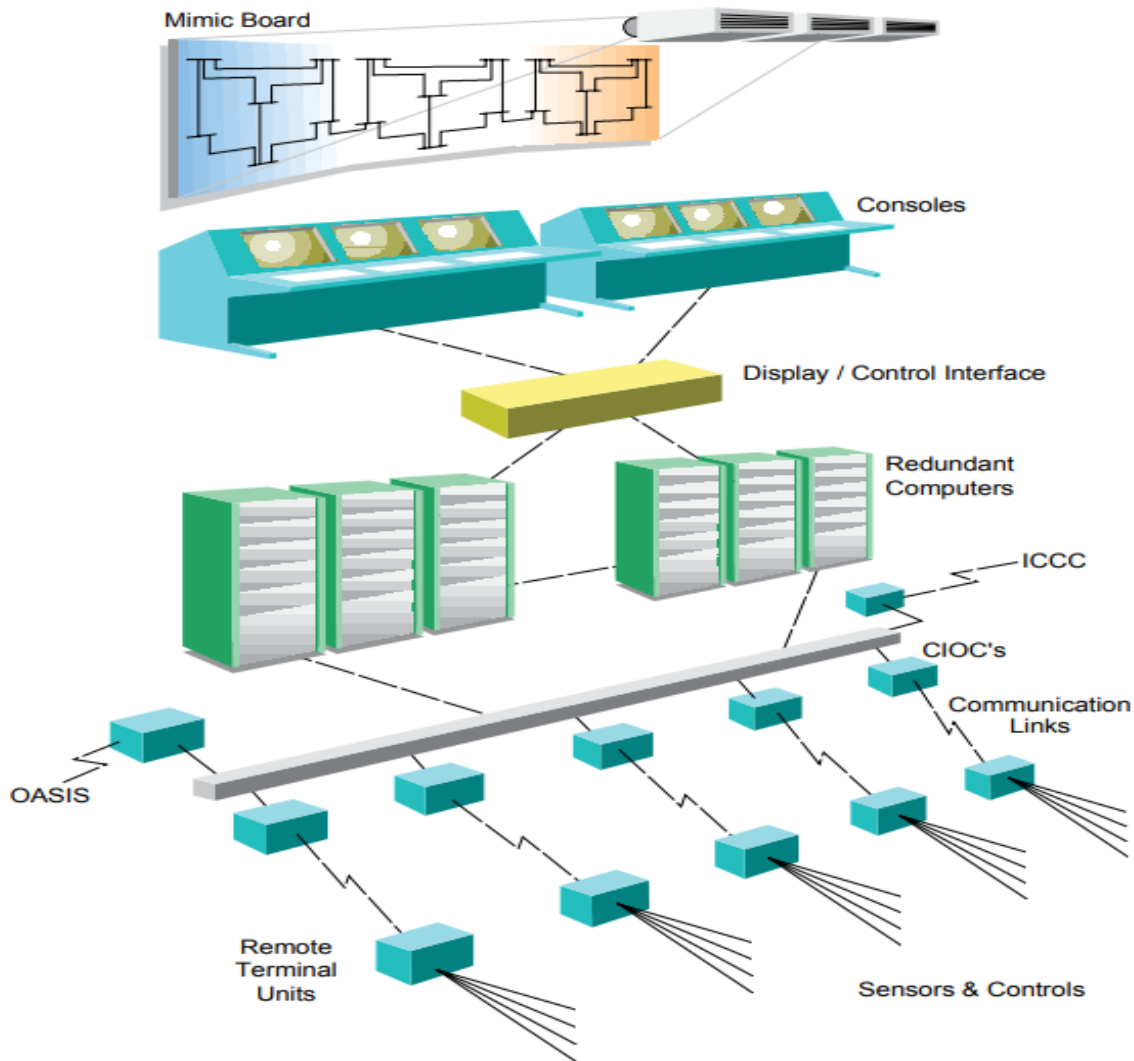
Στα ΣΗΕ, κύρια δραστηριότητα των TSOs αποτελεί η παρακολούθηση της ροής ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στο εθνικό δίκτυο ή το περιφερειακό ηλεκτρικό δίκτυο [17]. Για το σκοπό αυτό, οι μηχανικοί στα ΚΕΕ χρησιμοποιούν τον εκτιμητή κατάστασης ηλεκτρικού δικτύου (PSSE). Το εργαλείο αυτό λαμβάνει μετρήσεις από τα μετρητικά όργανα που είναι τοποθετημένα στο δίκτυο και σε συνδυασμό με την τοπολογία του δικτύου υπολογίζει την κατάσταση του δικτύου, δηλαδή τις μιγαδικές τάσεις όλων των ζυγών του. Έτσι, λαμβάνονται κρίσιμες αποφάσεις για το δίκτυο αυτό όπως είναι η πρόβλεψη φορτίου (load forecast), οικονομική μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (economic dispatch), προστασία στοιχείων ηλεκτρικού δικτύου (real time security monitoring), όπως γραμμών μεταφοράς από υπερφόρτωσης, και ελέγχου συχνότητας (load frequency control) [18].

2.2 Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας

Από την απλή εποπτεία των ηλεκτρικών δικτύων και την κατανομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο σημερινός ρόλος των ΚΕΕ εξελίχθηκε στην ολοκληρωμένη παρακολούθηση και έλεγχο των ΣΗΕ. Μολονότι το κόστος της κατασκευής και συντήρησης ενός ΚΕΕ είναι υψηλό, τα πλεονεκτήματα που παρέχουν δικαιολογούν την επένδυση αυτή. Τα σύγχρονα ΚΕΕ μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο (online) το ΣΗΕ, μέσω αναλογικών και ψηφιακών μετρήσεων, και να επέμβουν σε σημεία όπου γίνεται παραβίαση των συνθηκών ορθής και ασφαλούς λειτουργίας. Επιπρόσθετα, μπορούν να παρακολουθούν την απόδοση του συστήματος ελαχιστοποιώντας τις απώλειες, εξασφαλίζοντας έτσι την βέλτιστη οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Η ποιότητα και η αξιοπιστία του ΣΗΕ ελέγχονται συνεχώς ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της τάσης και της

συχνότητας εντός των προδιαγραφόμενων ορίων και η συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές [15], [19].

Οι TSOs τοποθετούν μετρητικά όργανα σε διάφορα σημεία του δικτύου που συλλέγουν πληροφορίες και τις αποστέλλουν στο ΚΕΕ. Οι πληροφορίες αυτές συλλέγονται σε τερματικές μονάδες RTU που συνδέονται στα όργανα μέτρησης και ελέγχου. Έπειτα οι πληροφορίες μετατρέπονται από αναλογική σε ψηφιακή μορφή και στην συνέχεια μεταφέρονται μέσω καναλιών επικοινωνίας στους ελεγκτές επικοινωνίας εισόδου-εξόδου (CIOC) που είναι τοποθετημένοι στα ΚΕΕ και έπειτα σε Η/Υ. Με αυτόν τον τρόπο κάθε χειριστής έχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του δικτύου η οποία απεικονίζεται στην οθόνη του υπολογιστή του ή στην κεντρική οθόνη του ΚΕΕ. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα σύγχρονα ΚΕΕ οι υπολογιστές (αυτόματα ή από τον χειριστή) μπορούν να στέλνουν εντολές προς εκτέλεση, μέσω των CIOC ή των RTU, στον εξοπλισμό που βρίσκεται στο πεδίο [15]. Μια αναπαράσταση του εξοπλισμού ενός σύγχρονου ΚΕΕ φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 2.3.



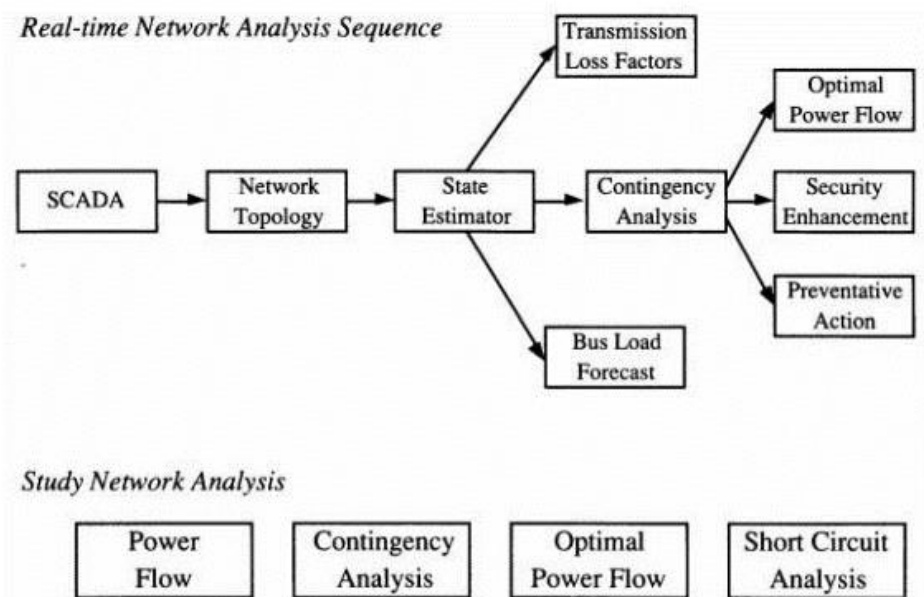
Σχήμα 2.3: Τυπική διάταξη εξοπλισμού (hardware) σε σύγχρονο ΚΕΕ [20].

2.2.1 Λειτουργίες Κέντρου Ελέγχου Ενέργειας

Κάθε ΣΗΕ σχεδιάζεται βάση το είδος των παραγωγών και καταναλωτών που χρησιμοποιούν το ηλεκτρικό δίκτυο. Με την ένταξη των ΑΠΕ και των αυξανόμενων καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούνται δίκτυα που έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες. Επομένως είναι αρκετά δύσκολο να σχεδιαστεί ένα ΚΕΕ που να καλύπτει τις ανάγκες όλων των ειδών των ΣΗΕ. Το εκάστοτε ΚΕΕ σχεδιάζεται βάση τις ανάγκες και προδιαγραφές του ΣΗΕ και του στόχους που επιθυμεί ο TSO που θα διαχειριστεί το ηλεκτρικό δίκτυο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν κάποιες σημαντικές λειτουργίες που είναι κοινές σε μεγάλο μερίδιο των υπαρκτών ΚΕΕ οι οποίες είναι [14], [21]:

- **Επεξεργαστής τοπολογίας δικτύου (Topology Processor):** Λαμβάνει την τρέχουσα κατάσταση των διακοπτικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο για των προσδιορισμό των ηλεκτρικών συνδέσεων των ζυγών.
- **Εκτίμηση Κατάστασης (State Estimation):** Χρησιμοποιεί αναλογικές μετρήσεις πραγματικού χρόνου και την τρέχουσα τοπολογία του δικτύου για να υπολογίσει την πιθανότερη κατάσταση του δικτύου (μέτρα και φάσεις τάσεων όλων των ζυγών του δικτύου).
- **Ανάλυση ροής ισχύος (Power Flow):** Προσδιορίζει τα μέτρα και τις φάσεις τάσεων όλων των ζυγών και τις ροές ισχύος σε όλο το δίκτυο. Η λειτουργία αυτή υποθέτει μόνιμη κατάσταση του ΣΗΕ.
- **Έλεγχος απρόοπτου (Contingency Analysis):** Μελετά τις συνέπειες ξαφνικών συμβάντων στο ΣΗΕ (πχ υπερφόρτωση γραμμής μεταφοράς) και εντοπίζει σημεία του δικτύου που ξεπερνούν επικίνδυνα τα όρια ασφαλούς λειτουργίας.
- **Βέλτιστη ροή φορτίου (Optimal Power Flow):** Συνιστά στον χειριστή πιθανές ενέργειες για την μείωση του κόστους και των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο δεδομένων των περιορισμών του δικτύου.
- **Πρόβλεψη φορτίου (Bus Load Forecasting):** Χρησιμοποιεί μετρήσεις πραγματικού χρόνου, δεδομένα από την τοπολογία δικτύου και ιστορικές καταγραφές για να προβλέψει τη μελλοντική ζήτηση των ζυγών φορτίου του ΣΗΕ.
- **Ανάλυση βραχυκυκλώματος (Short Circuit Analysis):** Προσδιορίζει μονοφασικά ή τριφασικά ρεύματα βραχυκύκλωσης σε σημεία του ηλεκτρικού δικτύου. Χρησιμοποιείται συνήθως για την διαστασιολόγηση των προστασιών έναντι βραχυκυκλώματος του ΣΗΕ.
- **Αυτόματος έλεγχος παραγωγής (AGC):** Εξασφαλίζει το ισοζύγιο, την ποιότητα και την συχνότητα της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις δομικές διαδικασίες του δικτύου (framework). Στόχος της λειτουργίας αυτής είναι η μείωση της διαφοράς παραγόμενης και καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (ACE).
- **Μοντελοποίηση δικτύου (Network Modeling):** Με την λειτουργία αυτή γίνεται αναπαράσταση των στοιχείων του ΣΗΕ, που είναι φυσικές οντότητες, σε μαθηματικά ισοδύναμα μοντέλα ανάλογα την απαίτηση για μεγαλύτερη ταχύτητα ή περισσότερη ακρίβεια.

Αξίζει να σημειωθεί ότι λειτουργίες όπως η επιλογή μονάδων προς παραγωγή ενέργειας (Unit Commitment), η ανάλυση συμβάντων δικτύου (Event Analysis) και η εκπαίδευση χειριστών σε παράλληλο περιβάλλον προσομοίωσης με το πραγματικό ΚΕΕ (DTS) χρησιμοποιούνται εκτενώς από τα σύγχρονα ΚΕΕ και είναι εξίσου σημαντικές με τις προαναφερθείσες λειτουργίες. Στο Σχήμα 2.4 φαίνεται ένα διάγραμμα των λειτουργιών που επιτελεί ένα ΚΕΕ μαζί με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους και την σειρά που επιτελείται η καθεμία.



Σχήμα 2.4: Κύριες λειτουργίες ενός ΚΕΕ [21].

2.3 Σύστημα SCADA

Το σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (SCADA), χρησιμοποιείται σε όλα τα στάδια της λειτουργίας των ΣΗΕ ξεκινώντας από την παραγωγή, μεταφορά, διανομή και χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημερινά SCADA υποστηρίζουν μεγάλο αριθμό λειτουργιών οι οποίες εξαρτώνται κάθε φορά από τον κατασκευαστή και τις απαιτήσεις του ΚΕΕ. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες βασικές λειτουργίες οι οποίες είναι κοινές σε όλα τα συστήματα SCADA και αυτές είναι [14]:

- **Συλλογή Δεδομένων (Data Acquisition):** Όλα τα αναλογικά και ψηφιακά δεδομένα συλλέγονται από το ηλεκτρικό δίκτυο με την χρήση μετρητικών οργάνων τοποθετημένων σε διάφορα σημεία του δικτύου.
- **Τηλεχειρισμός (Remote Control):** Περιλαμβάνει τον έλεγχο διαφόρων στοιχείων του δικτύου από τον χειριστή δικτύου στο ΚΕΕ. Συνήθως ο έλεγχος αυτός αφορά διακόπτες ισχύος.

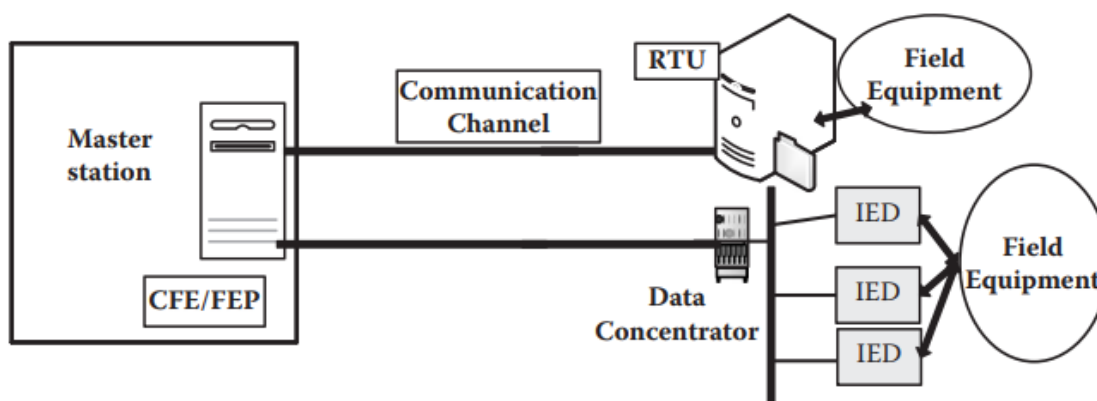
- **Ανάλυση ιστορικών δεδομένων (Historical Data Analysis):** Σημαντικό εργαλείο των συστημάτων SCADA που επιτρέπει την ανάλυση συμβάντων στο ΣΗΕ για την ανάλυση και μελλοντική σχεδίαση του ηλεκτρικού δικτύου.
- **Συγγραφή αναφοράς (Report Writing):** Το SCADA πρέπει να παράγει συγκεκριμένο αριθμό αναφορών για την χρήση από διοικητικά στελέχη.

Η χρήση των SCADA είναι απαραίτητη στην λειτουργία των ΣΗΕ. Τα πλεονεκτήματα από την χρήση τους περιλαμβάνουν βελτίωση της αξιοπιστίας, μικρότερα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, μείωση ανθρώπινων λαθών και γενικότερα τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα τελευταία χρόνια έχουν προστεθεί και άλλες λειτουργίες οι οποίες διευκολύνουν το έργο των χειριστών στα ΚΕΕ, αλλά οι τέσσερις βασικές λειτουργίες έχουν παραμείνει σταθερές.

Τα δεδομένα του συστήματος SCADA συλλέγονται από το λογισμικό συλλογής δεδομένων του ΚΕΕ, ελέγχονται για σφάλματα, μετατρέπονται σε κατάλληλες μονάδες μέτρησης και ελέγχονται για τυχόν παραβίαση ορίων. Έπειτα αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων προσβάσιμη από διάφορες εφαρμογές [22].

2.3.1 Δομή συστήματος SCADA

Ο εξοπλισμός του εκάστοτε ΚΕΕ διαμορφώνεται ανάλογα τις λειτουργίες του και τις ανάγκες του ΣΗΕ που διαχειρίζεται. Τα συστήματα αυτά είναι περίπλοκα και έχουν υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Εξασφαλίζουν όμως την αξιόπιστη παρακολούθηση και τον άμεσο έλεγχο διάφορων τμημάτων του ΣΗΕ. Στο Σχήμα 2.5 φαίνονται τα βασικά δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα SCADA ενός τυπικού ΚΕΕ [14].



Σχήμα 2.5: Σχεδιάγραμμα δομής συστήματος SCADA [14].

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τέσσερις διακριτές λειτουργικές οντότητες οι οποίες αναλυτικά είναι:

- **Μονάδες RTU ή μονάδες συγκέντρωσης δεδομένων (Data Concentrator):** Συνδέει το ΚΕΕ με τα όργανα μέτρησης για την λήψη μετρήσεων και την αποστολή εντολών στα διάφορα στοιχεία του δικτύου από τους χειριστές στο ΚΕΕ.
- **Κανάλια επικοινωνίας (Communication Channel):** Συνδέει το ΚΕΕ με τις μονάδες RTU και τους Data Concentrators και αντίστροφα.
- **Κεντρικός Σταθμός Ελέγχου (Master Station):** Το σημείο όπου ο χειριστής παρακολουθεί το ΣΗΕ και λαμβάνει αποφάσεις για τον έλεγχο του.
- **Περιβάλλον επικοινωνίας ανθρώπου – μηχανής (HMI):** Μέσω αυτού του ηλεκτρονικού περιβάλλοντος γίνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των χειριστών και του λογισμικού του SCADA.

Το παραπάνω διάγραμμα διατυπώνει μια γενική δομή που έχουν τα συστήματα SCADA. Κάθε δομή αποτελείται από υποδομές οι οποίες επιτελούν συγκεκριμένες διακριτές λειτουργίες. Κάποιες από αυτές τις δομές είναι :

- **Έξυπνες ηλεκτρονικές συσκευές (IED):** Ηλεκτρονικές συσκευές με έναν ή πολλαπλούς επεξεργαστές που μπορούν να επικοινωνούν με εξωτερικές πηγές με μορφή δεδομένων. Σε σχέση με τα RTU έχουν μικρότερα κόστη εγκατάστασης, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μικρότερο μέγεθος υποδομών ελέγχου.
- **Διακομιστές εφαρμογών (Application Server):** Περιέχει το σύνολο των λογισμικών που απαιτούνται για την λειτουργία του εκάστοτε SCADA. Περιλαμβάνει λειτουργίες όπως η εκτίμηση κατάστασης, βέλτιστη ροή φορτίου και το λογισμικό για το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS).
- **Μετωπιαίο άκρο επικοινωνίας/επεξεργασίας (CFE/FEP):** Είναι υπεύθυνο για την σύνδεση με το δίκτυο περιφερειακών συσκευών του SCADA. Γίνεται χρήση αργών σειριακών (CFE) και γρήγορων παράλληλων (FEP) πρωτόκολλων επικοινωνίας.
- **Σύστημα επικοινωνίας (Communication System):** Καθιστά δυνατή την πρόσβαση σε δεδομένα από τα μετρητικά όργανα και τον τηλεχειρισμό στοιχείων του ηλεκτρικού δικτύου. Απαρτίζεται από φυσικές ή ασύρματες συνδέσεις ΚΕΕ με τον εξοπλισμό πεδίου (Field Equipment) και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας (πχ IEC 616850).

2.3.2 Απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (RTU)

Το RTU είναι μια αυτόνομη μονάδα συλλογής δεδομένων και ελέγχου βασισμένη στην τεχνολογία των μικροεπεξεργαστών που είναι υπεύθυνη για την εποπτεία εξοπλισμού στο πεδίο. Ο κύριος ρόλος των RTU είναι ο έλεγχος και η συλλογή δεδομένων από τον εξοπλισμό και αποστολή τους στο ΚΕΕ για επεξεργασία. Οι μονάδες RTU υποστηρίζουν επίσης την δυνατότητα ρύθμισης και λήψης προγραμμάτων ελέγχου από το ΚΕΕ. Παραδοσιακά, τα RTU αντάλλασσαν δεδομένα μόνο με το ΚΕΕ, αλλά πλέον έχουν την δυνατότητα επικοινωνίας και με άλλα RTU (Peer to Peer). Επιπρόσθετα, το RTU μπορεί να λειτουργήσει ως αναμεταδότης (relay station) για ένα άλλο RTU που δεν είναι απευθείας προσβάσιμο από το ΚΕΕ. Ο

τυπικός εξοπλισμός ενός RTU περιλαμβάνει έναν κεντρικό επεξεργαστή με την σχετική μνήμη, αναλογικές και ψηφιακές εισόδους/εξόδους, διεπαφές επικοινωνίας, τροφοδοτικό, ράγες και το πλαίσιο της μονάδας [23].

Όπως έχει αναφερθεί, το ΚΕΕ επικοινωνεί με τα εγκατεστημένα RTU μέσω του συστήματος επικοινωνίας του SCADA. Η αγορά ενέργειας συντέλεσε στην ανάπτυξη πρωτοκόλλων επικοινωνίας που επιτρέπουν την εύκολη επέκταση ενός ΣΗΕ και την μείωση των κοστών λειτουργίας του. Κάποια από αυτά τα πρωτόκολλα είναι το Modbus που χρησιμοποιείται για επικοινωνία peer to peer, το Ethernet για επικοινωνία στο τοπικό δίκτυο (LAN), το IEC 60870-5 για τηλεχειρισμό εξοπλισμού και το ICCP που χρησιμοποιείται για επικοινωνία εντός του ΚΕΕ και μεταξύ διαφορετικών ΚΕΕ μέσω δικτύου ευρείας περιοχής (WAN) [14]. Παρακάτω φαίνεται μια εικόνα ενός RTU της εταιρίας SIEMENS (Σχήμα 2.6):



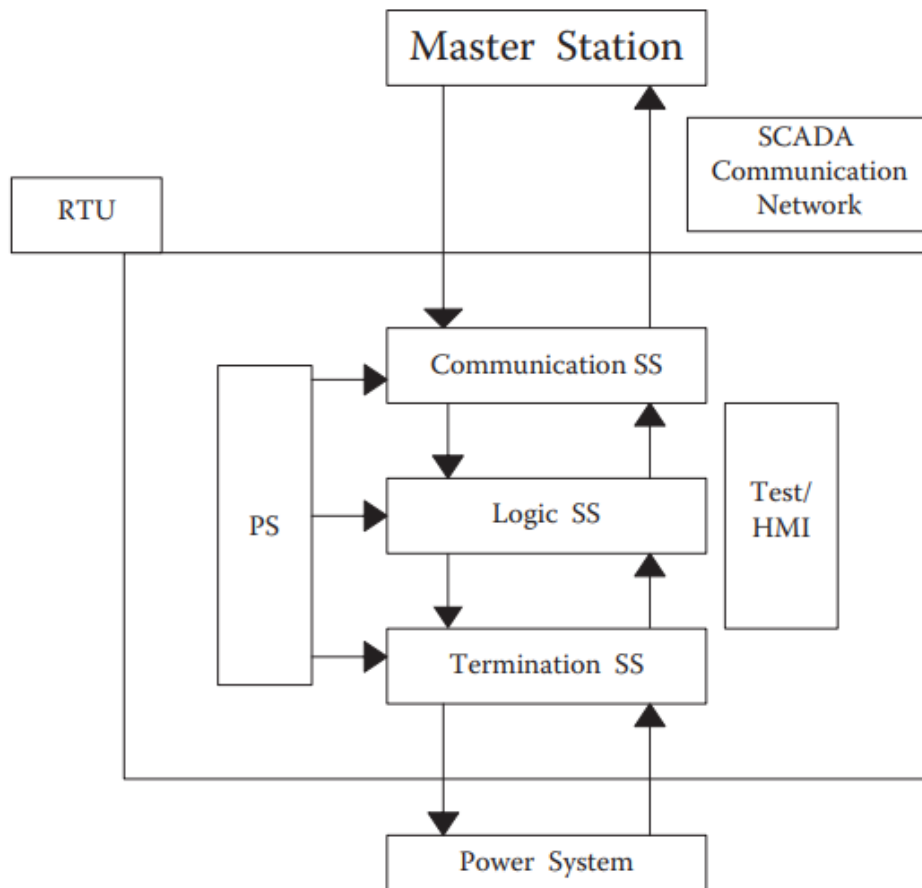
Σχήμα 2.6: Μονάδα RTU SIMATIC RTU3041C της Siemens [24]

Τα RTU αποτελούνται από τα εξής πέντε κύρια τμήματα [14]:

- **Υποσύστημα επικοινωνιών (Communication Subsystem):** Είναι η διεπαφή μεταξύ του συστήματος επικοινωνιών του SCADA και του εσωτερικού συστήματος λογικής του RTU. Το υποσύστημα αυτό λαμβάνει δεδομένα από το ΚΕΕ και στέλνει εντολές στον αντίστοιχο συνδεδεμένο εξοπλισμό πεδίου. Επιπρόσθετα, το σύστημα συλλέγει δεδομένα από τα μετρητικά όργανα και τα αποστέλλει σε ένα ή περισσότερα ΚΕΕ.

- **Υποσύστημα λογικής (Logic Subsystem):** Περιλαμβάνει τον κύριο επεξεργαστή και την βάση δεδομένων. Διαχειρίζεται όλες τις κύριες διεργασίες, την μέτρηση του χρόνου και έλεγχο του κυκλώματος αισθητήρων. Το υποσύστημα επίσης διαχειρίζεται την μετατροπή αναλογικών δεδομένων σε ψηφιακά και την βελτιστοποίηση υπολογιστικών διεργασιών.
- **Υποσύστημα τερματισμού (Termination Subsystem):** Παρέχει την διεπαφή μεταξύ μονάδας RTU και εξωτερικού εξοπλισμού καθώς το υποσύστημα λογικής πρέπει να προστατεύεται από τις συνθήκες που επικρατούν στους υποσταθμούς.
- **Υποσύστημα τροφοδοσίας (Power Supply Subsystem):** Μετατρέπει την κύρια πηγή ηλεκτρικής ισχύος από τις μπαταρίες του υποσταθμού σε ισχύ αξιοποιήσιμη από τα υποσυστήματα του RTU.
- **Υποσύστημα διεπαφής ανθρώπου-μηχανής (Test/HMI Interface):** Περιλαμβάνει διάφορα στοιχεία όπως ενσωματωμένο υλικολογισμικό (firmware), οπτικές ενδείξεις και ενσωματωμένες οθόνες δοκιμών ή συντήρησης.

Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται σε μορφή σχεδιαγράμματος η αλληλεπίδραση των τμημάτων των RTU τόσο μεταξύ τους όσο και με το ΚΕΕ και τον συνδεδεμένο εξοπλισμό στο ΣΗΕ.



Σχήμα 2.7: Σχεδιάγραμμα βασικών τμημάτων ενός RTU.

2.4 Μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU)

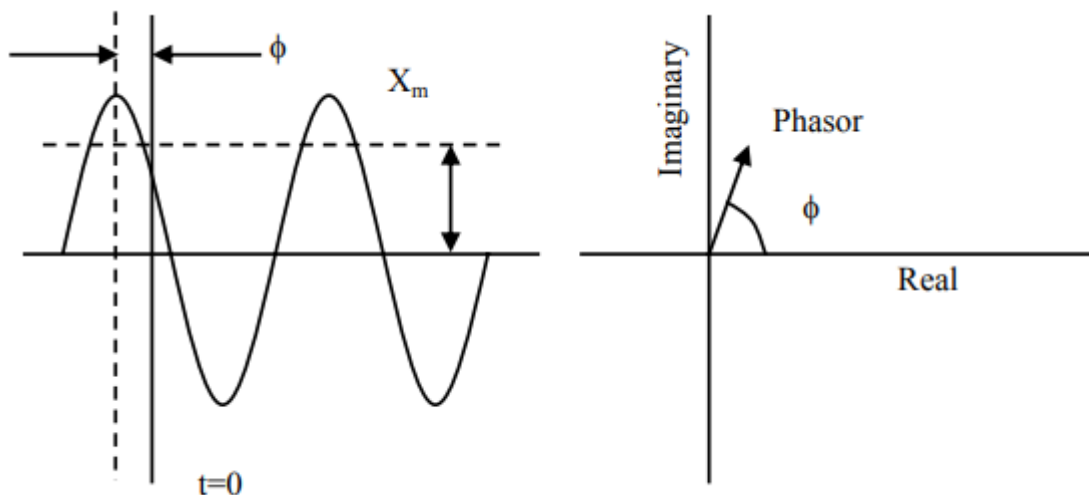
Ο ορισμός του «φασιθέτη» προέρχεται από την έρευνα του Charles Proteus Steinmetz το 1893. Στόχος της ήταν η εισαγωγή ενός νέου τρόπου περιγραφής ημιτονοειδών σημάτων στα AC δίκτυα με χρήση της RMS τιμής και της φάσης τους [25]. Η μαθηματική έκφραση ενός ημιτονοειδούς σήματος δίνεται από την σχέση:

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

όπου ω είναι η κυκλική συχνότητα του σήματος σε rad/s, φ η αρχική φάση σε rad και X_m η μέγιστη τιμή του σήματος. Στα ηλεκτρικά δίκτυα είναι χρήσιμη η RMS τιμή του σήματος, ίση με $X_{rms} = X_m/\sqrt{2}$, και χρησιμοποιείται η εξής έκφραση αναπαράστασης φασιθέτη:

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

Στο παρακάτω σχήμα διακρίνεται η διαφορά στην αναπαράσταση σήματος στην ημιτονοειδή μορφή (αριστερά) και με μορφή φασιθέτη (δεξιά):

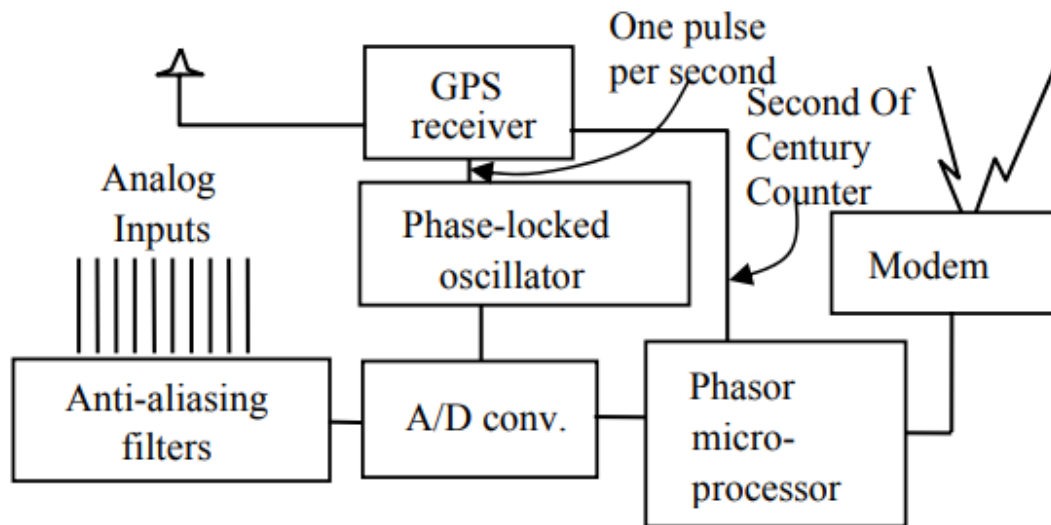


Σχήμα 2.8: Απεικόνιση σήματος σε ημιτονοειδή μορφή (αριστερά) και ως φασιθέτη (δεξιά) [2].

Η τεχνολογία μέτρησης φασιθετών αποτελεί προϊόν της έρευνας που έγινε στην απομακρυσμένη προστασία γραμμών μεταφοράς. Η έρευνα έδειξε ότι τα υπολογιστικά συστήματα την δεκαετία του 1970 δεν επαρκούσαν για τους υπολογισμούς παρά το υψηλό τους κόστος. Αναπτύχθηκε επομένως ένας νέος ηλεκτρονόμος απόστασης συμμετρικών συνιστωσών (SCDR) που βασιζόταν στις μετρήσεις τάσεων και ρευμάτων ακολουθίας. Οι τάσεις και τα ρεύματα ακολουθίας παραγόntonταν μέσω του αλγορίθμου διακριτού μετασχηματισμού Fourier συμμετρικών συνιστωσών (SCDFT). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον αναπτύχθηκε γύρω από την δυνατότητα ακριβούς μέτρησης τάσεων και ρευμάτων θετικής ακολουθίας με ρυθμό απόκρισης ενός κύκλου της θεμελιώδους συχνότητας δεδομένου ότι οι μετρήσεις αυτές μπορούσαν να συγχρονιστούν σε όλο το δίκτυο. Με την ανάπτυξη του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS), κατέστη δυνατός ο ακριβής

συγχρονισμός μετρήσεων εντός μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Η πρώτη μονάδα μέτρησης φασιθετών PMU με τεχνολογία GPS για εμπορική χρήση αναπτύχθηκε από την Macrodyne σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο Virginia Tech το 1991. Έκτοτε η τεχνολογία των PMU αναπτύχθηκε ραγδαία και πλέον χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή μετρήσεων σε συστήματα εποπτείας ευρείας περιοχής (WAMS) [2], [26].

Το PMU σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C37.118, είναι μια συσκευή, βασισμένη σε μικροεπεξεργαστές, η οποία μπορεί να παράγει συγχρονισμένους φασιθέτες, εκτιμήσεις για την συχνότητα και τον ρυθμό αλλαγής συχνότητας (ROCOF) από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος και ένα σήμα συγχρονισμού. Τα βασικά δομικά τμήματα μιας τυπικής μονάδας PMU παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.9 [2], [14].



Σχήμα 2.9: Γενική δομή ενός PMU [2].

Τα αναλογικά σήματα εισόδου υποβιβάζονται σε αποδεκτές τιμές τάσης (συνήθως στο εύρος των $\pm 10V$) ώστε να πληρούν τις προδιαγραφές του μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακού (A/D Converter). Το βαθυπερατό φίλτρο (Anti-aliasing Filter) στην είσοδο χρησιμοποιείται για να διαχωρίζει συχνότητες σημάτων ισχύος. Το σήμα GPS παρέχει τον παλμό ρολογιού για την δειγματοληψία ενώ είναι σε κλειδωμένο φασικά βρόχο (PLL) με τον A/D Converter. Ο μικροεπεξεργαστής (Phasor Microprocessor) υπολογίζει όλες τις τάσεις και ρεύματα θετικής ακολουθίας και, αφού τους προσθέσει την χρονική ετικέτα (timestamp), τα μεταδίδει στο KEE μέσω της διεπαφής επικοινωνίας (Modem/Communication Interface) [14].

Έγινε προηγουμένως αναφορά ότι το PMU μπορεί να παράγει συγχρονισμένους φασιθέτες. Ο συγχρονισμένος φασιθέτης είναι ένας όρος για να περιγράψει έναν φασιθέτη για κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή που ονομάζεται χρονική ετικέτα (time tag). Για να γίνει ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από μια μεγάλη έκταση του ΣΗΕ, θα πρέπει να γίνει συγχρονισμός αυτών των χρονικών ετικετών [18]. Οι μονάδες PMU έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν δεδομένα για τον χρόνο από αξιόπιστες και ακριβείς πηγές, όπως είναι το GPS, που παρέχουν χρόνο με αναφορά την συντονισμένη παγκόσμια ώρα (UTC) με αρκετή ακρίβεια ώστε να διατηρούν το

συνολικό διανυσματικό σφάλμα (TVE), το σφάλμα συχνότητας (Frequency Error), και τον δείκτη ROCOF εντός ορίων σύμφωνα με το πρότυπο C37.118 [14]. Στην πραγματικότητα μόνο μια μέτρηση χρειάζεται να έχει χρονική ετικέτα, καθώς γνωρίζοντας τον ρυθμό δειγματοληψίας μπορεί να γίνει εξαγωγή όλων των υπόλοιπων πληροφοριών. Τα υπολογιστικά συστήματα στο KEE μπορούν να προγραμματισθούν να λαμβάνουν μετρήσεις σε χρονικά διαστήματα ορισμένα από τον χειριστή με την ακρίβεια χρονισμού από το GPS (κάτω του 1μs σε πολλά συστήματα ευρείας κλίμακας). Σύμφωνα με το πρότυπο IEEE C37.118 τα χρονικά διαστήματα αυτά μπορούν να οριστούν με ρυθμούς [22]:

- 10, 12, 15, 20, 30 και 60 φορές το δευτερόλεπτο για ηλεκτρικά δίκτυα 60Hz.
- 10, 25, και 50 φορές το δευτερόλεπτο για ηλεκτρικά δίκτυα 50Hz.

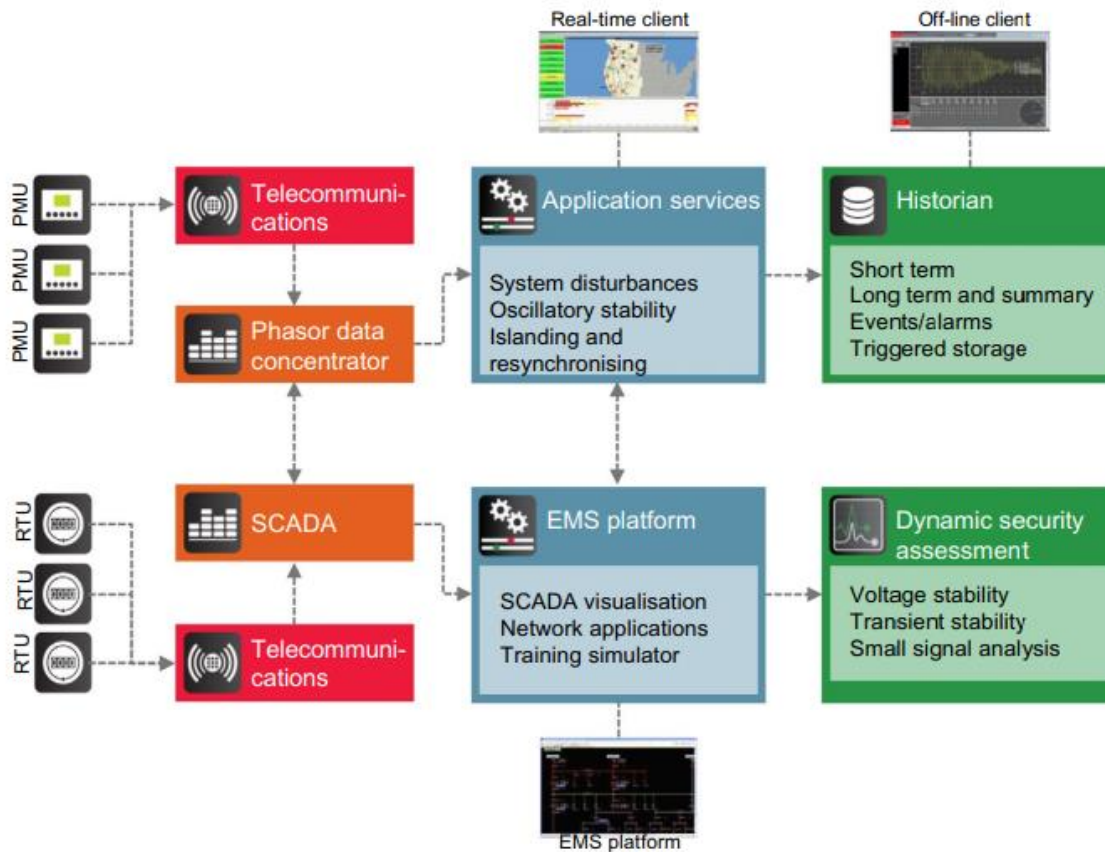
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται μια πραγματική μονάδα PMU της VALIANT COMMUNICATIONS η οποία μπορεί να μετρά τριφασικές τάσεις και ρεύματα κανονικής λειτουργίας και τα αντίστοιχα θετικής ακολουθίας. Διαθέτει 6 αναλογικές και 16 ψηφιακές θύρες εισόδου (I/O), GPS με μεγάλη ακρίβεια συγχρονισμού τάξης των 0.05μs και υποστηρίζει πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το TCP/IP, UDP, Multicast και Unicast [27].



Σχήμα 2.10: Μονάδα VCL-PMU-30 της VALIANT COMMUNICATIONS [27].

Η αρχιτεκτονική των PMU αποτελείται από τις μονάδες PMU τοποθετημένες στον υποσταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας και τις μονάδες συλλογής δεδομένων φασιθετών (PDC) σε επίπεδο κέντρου ελέγχου. Οι μονάδες PDC συλλέγουν δεδομένα από τα PMU και τα προωθούν σε συνδεδεμένο υπολογιστή ή σε άλλο PDC. Δημιουργείται έτσι ένας κόμβος όπου δεδομένα από μονάδες PMU ή PDC συσχετίζονται και τροφοδοτούνται σε μία ροή στις εφαρμογές του συστήματος (Application Service). Μια μονάδα PMU στον σταθμό συλλέγει όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις και τις προωθεί στον τοπικό χειριστή ή της αποστέλλει στον PDC του KEE. Οι μονάδες PDC έχουν υψηλή ταχύτητα τάξης των 10ms έως 100ms και ενσωματώνονται στο SCADA για λειτουργίες εποπτείας, προστασίας και ελέγχου του

ΣΗΕ. Για την επικοινωνία των PMU και PDC χρησιμοποιούνται συνδέσεις τηλεφώνου, ασύρματες συνδέσεις και οπτικές ίνες (fiber-optic link). Πάνω σε αυτήν την αρχιτεκτονική βασίζεται και το σύστημα WAMS όπου δεδομένα από τα PMU αποθηκεύονται στα PDC κάθε 100ms με ακρίβεια 1ms χάρη στο GPS. Με αυτόν τον τρόπο συγκρίνονται στιγμιότυπα από το δίκτυο για διαφορετικές χρονικές στιγμές για την εποπτεία κρίσιμων κόμβων του ΣΗΕ [2], [14], [25]. Στο Σχήμα 2.11 φαίνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα του συστήματος WAMS που συνδυάζει μετρήσεις από PMU/RTU, χρήση μονάδων PDC και ενσωμάτωση του συστήματος EMS:



Σχήμα 2.11: Ολοκληρωμένο σύστημα WAMS με υποδομές του EMS [25].

Τα συστήματα WAMS θα βελτιώσουν σημαντικά τις λειτουργίες του EMS καθώς τα δεδομένα από τα PMU προσφέρουν βελτιωμένες δυνατότητες εποπτείας της κατάστασης του ΣΗΕ και επομένως θα προειδοποιούν ταχύτερα τους χειριστές για τυχόν προβλήματα από τις μετρήσεις SCADA. Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται η σύγκριση των μετρήσεων SCADA και των μετρήσεων PMU [14]:

Πίνακας 2.1: Σύγκριση συστημάτων SCADA με PMU

Μετρήσεις SCADA	Μετρήσεις PMU
Ρυθμός δάρωσης: κάθε 2s	Ρυθμός δάρωσης: 25-50 δείγματα/s
Μέτρο τάσης, έγχυση ισχύος και ροές ισχύος κλάδων ζυγού τοποθέτησης.	Απευθείας μέτρηση μιγαδικής τάσης και μέτρηση ρευμάτων κλάδων ζυγού τοποθέτησης.
Αυξημένοι χρόνοι μετάδοσης των μετρήσεων λόγω παλαιότητας του συστήματος επικοινωνίας.	Ελάχιστη καθυστέρηση χάρη στις νέες τεχνολογίες και πρωτόκολλα επικοινωνίας.
Αδυναμία λήψης της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών συστημάτων.	Απεικόνιση της δυναμικής συμπεριφοράς του ΣΗΕ.
Μη συγχρονισμένες χρονικές ετικέτες σε μετρήσεις.	Χρονικές ετικέτες σε όλα τα δεδομένα με χρήση GPS συγχρονισμού.

Τα πλεονεκτήματα από την χρήση μετρήσεων από μονάδες PMU μπορούν να αναγραφούν περιληπτικά ως [14]:

- Καλύτερη επίδοση του εκτιμητή κατάστασης, καθώς οι φασιθέτες τάσης και ρεύματος συντελούν στη διαμόρφωση γραμμικού μοντέλου εκτίμησης κατάστασης, το οποίο σταδιακά θα εφαρμόζεται ευρέως όσο βελτιώνεται η παρατηρησιμότητα (observability) του ΣΗΕ με χρήση PMU.
- Καλύτερα περιθώρια ευστάθειας καθώς τα PMU έχουν την δυνατότητα να εντοπίζουν ταλαντώσεις μικρού σήματος και συνεπώς βοηθούν στη λήψη των απαραίτητων διορθωτικών ενεργειών.
- Με τον συνδυασμό των μετρήσεων PMU και του συστήματος SCADA, καθίσταται δυνατή η εύρεση σημείων του δικτύου που παρουσιάζουν αποκλίνουσα συμπεριφορά από τις προδιαγραφόμενες.
- Οι μονάδες PMU μπορούν να εντοπίσουν τυχόν νησίδες εντός του ΣΗΕ και να σημάνουν συναγερμό έγκαιρα στο ΚΕΕ. Επιπρόσθετα, κατά την επανεκκίνηση από ολική διακοπή (black start) οι χειριστές έχουν καλύτερη εποπτεία του ΣΗΕ και επομένως ο συντονισμός είναι πιο αποδοτικός.
- Λόγω της χρονικής ετικέτας κάθε μέτρησης και του συγχρονισμού μέσω GPS, κάθε συμβάν μπορεί να αναπαραχθεί και να μελετηθούν τυχόν δυσλειτουργίες του ΣΗΕ σε δεύτερο χρόνο.
- Λόγω της καλύτερης αναπαράστασης του ΣΗΕ με την χρήση δεδομένων από PMU, οι χειριστές του δικτύου θα αξιολογούν καλύτερα την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου και θα λαμβάνουν γρηγορότερα σημαντικές αποφάσεις σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης.
- Με την χρήση μετρήσεων από PMU, κάποιες λειτουργίες προστασίας σε υπερφορτωμένα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν να βελτιωθούν. Με την χρήση μετρήσεων πραγματικού χρόνου υψηλής ακρίβειας καθίσταται δυνατή η δυναμική προστασία του ΣΗΕ.

3 Εκτίμηση κατάσταση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στην ενότητα αυτή αναλύεται ο ρόλος και οι λειτουργίες της εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ. Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει αποδεκτό ότι για την οικονομική και ασφαλή λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι απαραίτητη η συγκέντρωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τις μονάδες PMU και τις μετρήσεις SCADA. Μερικές επιχειρήσεις συγκεντρώνουν μόνο τον απαραίτητο αριθμό πληροφοριών για την εκτέλεση των προγραμμάτων ροής φορτίου για οικονομικούς λόγους αλλά και για μικρότερο χρόνο επεξεργασίας. Η μέθοδος αυτή όμως δεν λαμβάνει υπόψη ότι οι μετρήσεις είναι ανακριβείς εξαιτίας υπεισερχόμενου θορύβου, και ετεροχρονισμένες λόγω μη ταυτόχρονης λήψης. Για τους λόγους αυτούς θα πρέπει να εφαρμοσθούν τεχνικές εκτίμησης κατάστασης.

3.1 Ρόλος εκτίμησης κατάσταση

Κύρια επιδίωξη των μοντέρνων ΚΕΕ είναι η επιτυχής εφαρμογή του ελέγχου ασφάλειας (Security Analysis) του συστήματος. Το 1967 ο Dy Liacco παρατήρησε ότι τα ΣΗΕ μπορούν να λειτουργούν σε τρεις διακριτές καταστάσεις. Οι πιθανές αυτές καταστάσεις ορίζονται ως:

- **Κανονική Κατάσταση (Normal State):** Στην κατάσταση αυτή ικανοποιούνται οι περιορισμοί λειτουργίας και οι περιορισμοί φορτίου.
- **Κατάσταση Ανάγκης (Emergency State):** Στην κατάσταση αυτή μερικοί περιορισμοί λειτουργίας παραβιάζονται.
- **Κατάσταση Επαναφοράς (Restorative State):** Στην κατάσταση αυτή μερικοί περιορισμοί φορτίου παραβιάζονται.

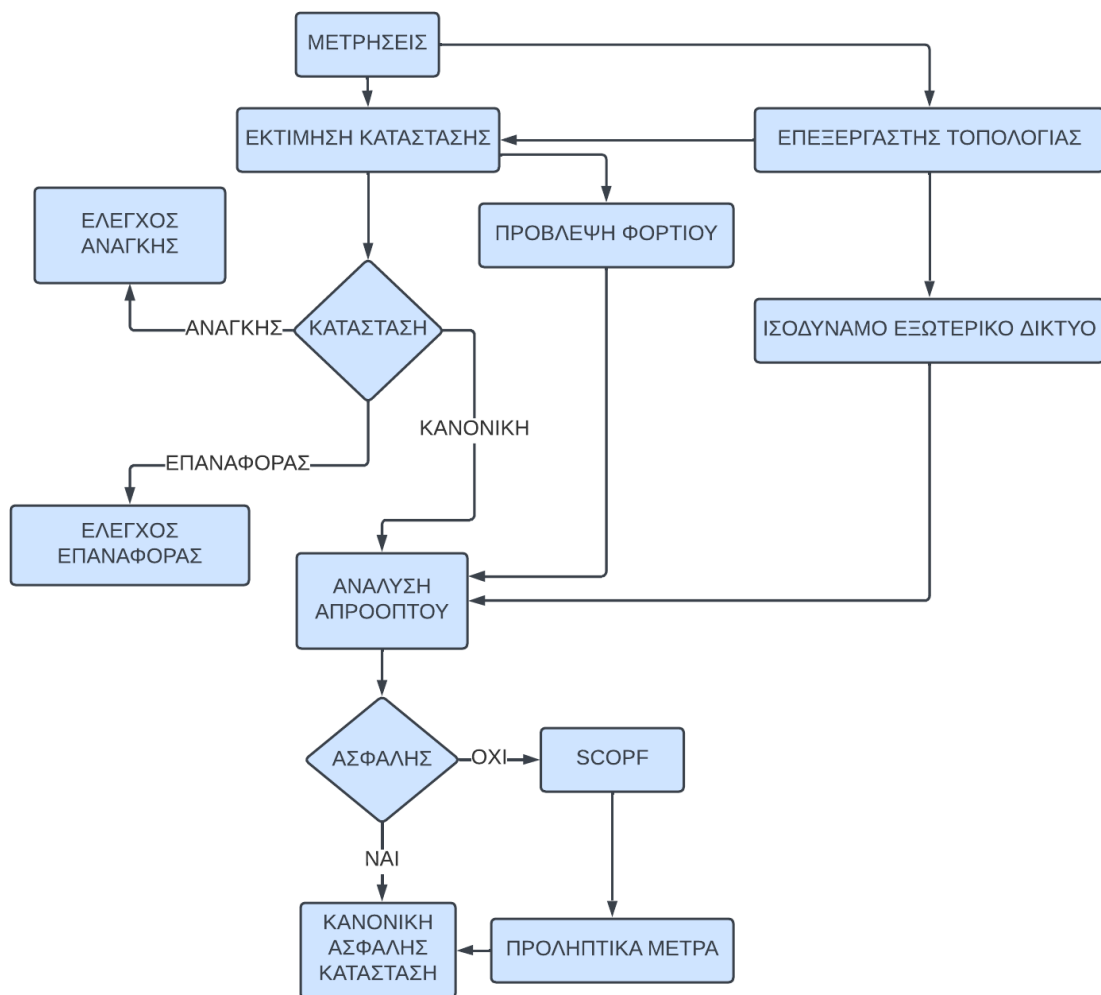
Οι περιορισμοί λειτουργίας προσδιορίζονται από τα μέγιστα και ελάχιστα όρια λειτουργίας διάφορων στοιχείων του ηλεκτρικού συστήματος, ενώ οι περιορισμοί φορτίου αφορούν την απαίτηση της παραγόμενης ισχύς να καλύπτει την ζήτηση και τις απώλειες [15], [18], [28]. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το σχεδιάγραμμα καταστάσεων ενός ΣΗΕ με τους αντίστοιχους ελέγχους.



Σχήμα 3.1: Λειτουργικές καταστάσεις των ΣΗΕ κατά Dy Liacco.

Για να εκτελεστεί η εκτίμηση κατάστασης ώστε να προσδιοριστεί η κατάσταση του ΣΗΕ, θα πρέπει να γίνει συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων από τον εξοπλισμό πεδίου. Παραδοσιακά αυτό γινόταν με το σύστημα SCADA όπου συγκεκριμένες εφαρμογές επεξεργάζονταν δεδομένα για να εκτιμήσουν την πιθανή κατάσταση του συστήματος. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις από το σύστημα SCADA δεν ήταν πάντα αξιόπιστες λόγω σφαλμάτων μέτρησης, σφάλματων τηλεμετρίας, θόρυβο σύνδεσης επικοινωνίας κ.α. Επιπλέον κάποιες μετρήσεις δεν αρκούσαν ή δεν ήταν διαθέσιμες για εκτιμηθεί η κατάσταση του συστήματος ενέργειας [29].

Για τους προαναφερθείς λόγους, ο Schwerppe εισήγαγε την έννοια της εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ για την λήψη μιας ακριβούς εικόνας της κατάστασης λειτουργίας του δικτύου [25], [30]–[32]. Η εκτίμηση κατάστασης οδήγησε στην ανάπτυξη του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS) το οποίο είναι πλέον εξοπλισμένο με έναν εκτιμητή κατάστασης πραγματικού χρόνου. Ο εκτιμητής κατάστασης αντιπροσωπεύει πλέον την «καρδιά» του EMS, επιτρέποντας την ορθή λειτουργία εφαρμογών εποπτείας και ελέγχου ενός ΣΗΕ αλλά και του ελέγχου απροόπτου (Contingency Analysis). Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα φαίνεται ο ρόλος της εκτίμησης κατάστασης στον προσδιορισμό λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου:



Σχήμα 3.2: Σχεδιάγραμμα εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ.

Από το παραπάνω σχεδιάγραμμα παρατηρείται ότι η εκτίμηση κατάστασης είναι ένας αλγόριθμος επεξεργασίας πληροφοριών που υπολογίζει την βέλτιστη εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του ΣΗΕ χρησιμοποιώντας [18]:

- Μετρήσεις μεταβλητών του συστήματος.
- Μαθηματικό μοντέλο του συστήματος.
- Πρότερη γνώση όλων των εισόδων και εξόδων του συστήματος γνωστές και ως ψευδομετρήσεις (pseudo-measurements).

Οι ψευδομετρήσεις μπορούν να παραχθούν βασισμένες σε βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου, την παραγωγή ενέργειας, ιστορικά δεδομένα ή άλλες προσεγγιστικές μεθόδους [29].

Οι λειτουργίες του συστήματος χρησιμοποιούν δεδομένα πραγματικού χρόνου που παρέχονται από τον εκτιμητή κατάστασης. Επομένως καθίσταται υψίστης σημασίας, για τους χειριστές του δικτύου, η βέλτιστη λειτουργία της εκτίμησης κατάστασης. Παρόλα αυτά, αποκλίσεις μπορούν να συμβούν λόγω ανακριβών παραμέτρων του δικτύου και σφαλμάτων στις μετρήσεις.

3.2 Λειτουργίες εκτίμησης κατάστασης

Για να προσδιοριστεί η παρούσα κατάσταση του δικτύου, οι εκτιμητές κατάστασης περιλαμβάνουν ακριβείς και αποδοτικές μεθόδους εποπτείας λειτουργικών περιορισμών στοιχείων όπως είναι η φόρτωση γραμμών μεταφοράς και μέτρα τάσεων των ζυγών του δικτύου. Διατηρούν επίσης μια βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου για το σύστημα, συμπεριλαμβανομένης και της παρούσας κατάστασης, πάνω στην οποία βασίζονται εφαρμογές αξιολόγησης ασφάλειας για να αναλύσουν απρόοπτα συμβάντα και να προτείνουν κρίσιμες διορθωτικές ενέργειες στους χειριστές του συστήματος. Οι λειτουργίες που επιτελεί ένας εκτιμητής κατάστασης μπορούν να διακριθούν ως εξής [29]:

- **Επεξεργαστής τοπολογίας (Topology Processor):** Συλλέγει τα δεδομένα κατάστασης των διακοπών και των αποζευκτών και παράγει το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος.
- **Ανάλυση παρατηρησιμότητας (Observability Analysis):** Καθορίζει την δυνατότητα ή μη επίτευξης λύσης από τον εκτιμητή κατάστασης από τις διαθέσιμες μετρήσεις. Ανιχνεύει μη παρατηρήσιμους κλάδους και τις παρατηρήσιμες νησίδες στο ΣΗΕ εφόσον αυτές υπάρχουν.
- **Επίλυση εκτίμησης κατάστασης (State Estimation Solution):** Προσδιορίζει την βέλτιστη εκτίμηση για την κατάσταση συστήματος η οποία αποτελείται από τις μιγαδικές τάσεις των ζυγών όλου του δικτύου.
- **Ανάλυση εσφαλμένων αποτελεσμάτων (Bad Data Processing):** Ανιχνεύει την παρουσία μεγάλων σφαλμάτων στις μετρήσεις, κάνει ταυτοποίηση και απαλείφει τις λανθασμένες μετρήσεις.
- **Επεξεργασία παραμέτρων και δομικών σφαλμάτων (Parameter and Structural Error Processing):** Εκτιμά διάφορες παραμέτρους του δικτύου όπως

αυτές του μοντέλου των γραμμών μεταφοράς, μετασχηματιστών με μεσαία λήψη και των εγκάρσιων πυκνωτών. Ανιχνεύει δομικά σφάλματα στο σύστημα και εντοπίζει τυχόν μη έγκυρες καταστάσεις αποξευκτών.

Καθίσταται επομένως κατανοητό ότι η εκτίμηση κατάστασης αποτελεί τον πυρήνα της ανάλυσης ασφάλειας πραγματικού χρόνου. Λειτουργεί ως φίλτρο μεταξύ των ακατέργαστων μετρήσεων που συλλέγονται από το πεδίο και των λειτουργιών που απαιτούν αξιόπιστα δεδομένα υψηλής ακρίβειας.

3.3 Κατηγορίες εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ

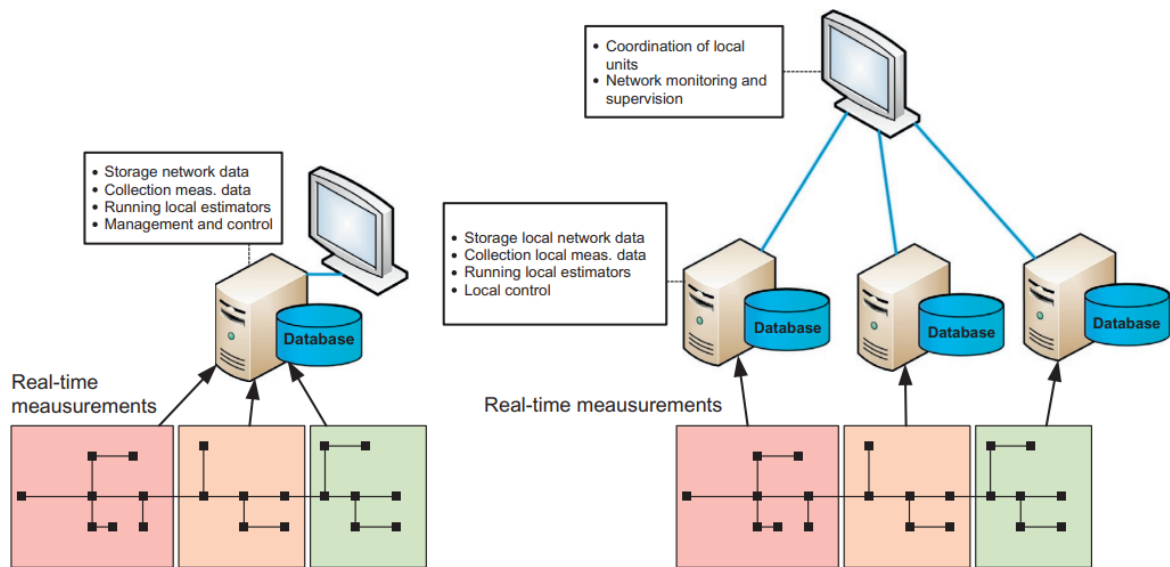
Σε πολλές περιπτώσεις, οι διαχειριστές δικτύων χρειάζεται να αναπτύξουν έναν εκτιμητή κατάστασης βάση του υπάρχοντος συστήματος εποπτείας και των ειδικών χαρακτηριστικών του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, έχουν δημιουργηθεί κατηγορίες εκτιμητών κατάστασης που βοηθούν τους διαχειριστές να επιλέξουν την κατάλληλη λύση για το δίκτυο που διαχειρίζονται. Συγκεκριμένα, οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες διακρίνουν τους εκτιμητές κατάστασης ανάλογα με την αρχιτεκτονική του συστήματος εποπτείας και την δυνατότητά τους να ανταποκρίνονται σε δυναμικές αλλαγές που συμβαίνουν στο ηλεκτρικό δίκτυο.

3.3.1 Κεντρική και αποκεντρωμένη εκτίμηση κατάστασης

Στην μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η τεχνική πολλαπλών περιοχών (multi-area approach) για την χρήση του εκτιμητή κατάστασης. Αυτή η τεχνική απαιτεί κατακερματισμό ολόκληρου του δικτύου σε μικρότερες διακριτές περιοχές. Βάση της λογικής αυτής, δύο κατηγορίες αρχιτεκτονικών που σχηματίζονται είναι η κεντρική και αποκεντρωμένη εκτίμηση κατάστασης. Στην κεντρική αρχιτεκτονική τα δεδομένα από διάφορες υποπεριοχές αποστέλλονται σε μια κεντρική υπολογιστική μονάδα η οποία περιέχει όλες τις λειτουργίες συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων, εκτελεί τους τοπικούς εκτιμητές κατάστασης, και επιτελεί την διαχείριση και τον έλεγχο όλου του δικτύου. Στην αποκεντρωμένη εκτίμηση κατάστασης, οι παραπάνω διαδικασίες εκτελούνται σε μικρότερα ΚΕΕ που βρίσκονται εντός των αρμόδιων υποπεριοχών. Μια τέτοια αρχιτεκτονική επιτρέπει την διανομή της αποθήκευσης, επικοινωνίας και επεξεργασίας δεδομένων. Στο Σχήμα 3.3 φαίνεται η σύγκριση των δυο αυτών αρχιτεκτονικών καθώς και οι συνδέσεις των επιμέρους υποπεριοχών.

Οι μονάδες PMU είναι αρκετά χρήσιμες σε τεχνικές πολλαπλών περιοχών καθώς δεδομένα από διάφορες υποπεριοχές μπορούν να αναχθούν σε κοινό σύστημα αναφοράς, διευκολύνοντας τον συντονισμό επίλυσης της εκτίμησης κατάστασης μεταξύ υποπεριοχών. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική καθώς η γνώση της ολοκληρωμένης εικόνας του ΣΗΕ είναι αναγκαία σε ορισμένες περιπτώσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, τα τοπικά δεδομένα αποτελεσμάτων που προέρχονται από υποπεριοχές του δικτύου μπορούν εύκολα να

συγκεντρωθούν για να σχηματισθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα για την κατάσταση του ΣΗΕ [25].



Σχήμα 3.3: Κεντρική (αριστερά) και αποκεντρωμένη (δεξιά) αρχιτεκτονική [25].

3.3.2 Στατική και δυναμική εκτίμηση κατάστασης

Τόσο η στατική όσο και η δυναμική εκτίμηση κατάστασης επιτρέπουν την εκτίμηση των λειτουργικών παραμέτρων σε μια χρονική στιγμή. Στην στατική εκτίμηση κατάστασης, τα επεξεργασμένα δεδομένα αποτελούνται μόνο από τις μετρήσεις κάποιας δεδομένης χρονικής στιγμής. Στην περίπτωση της δυναμικής εκτίμησης κατάστασης λαμβάνονται υπόψη και τα αποτελέσματα προηγούμενων εκτιμήσεων ως είσοδοι στην διαδικασία εκτίμησης κατάστασης.

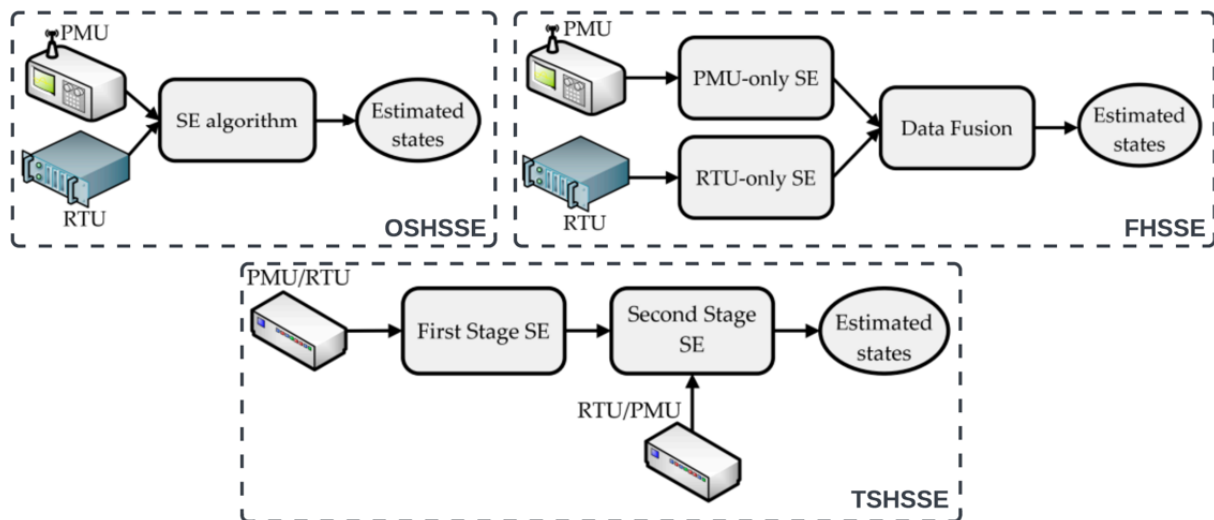
Και στις δύο περιπτώσεις τα PMU έχουν καθοριστικό ρόλο, ειδικά σε υβριδικά μετρητικά συστήματα (PMU/RTU). Στην στατική εκτίμηση κατάστασης, οι υψηλές ταχύτητες δειγματοληψίας των PMU μπορούν να αξιοποιηθούν για την γρήγορη ενημέρωση για την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου. Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαθεσιμότητα μετρήσεων με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας μπορεί να είναι πολύ σημαντική σε ΣΗΕ με συχνή εμφάνιση δυναμικών φαινομένων. Σε αυτήν την περίπτωση οι μετρήσεις με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας βελτιώνουν τον χρόνο υπολογισμού καθώς και την ταχύτητα ανίχνευσης στιγμιαίων συμβάντων στο δίκτυο [25].

3.4 Εκτίμηση κατάστασης με συνδυασμό μετρήσεων SCADA και PMU

Οι συμβατικές μετρήσεις από το σύστημα SCADA έχουν σχεδιαστεί θεωρώντας ότι το σύστημα παραμένει σταθερό ή μεταβάλλεται αρκετά αργά κατά την διάρκεια της εκτίμησης κατάστασης (quasi-state operating conditions). Στην πραγματικότητα, το στιγμιότυπο (snapshot) του δικτύου λαμβάνεται σε πάροδο μερικών δευτερολέπτων. Ο ρυθμός δειγματοληψίας των μονάδων PMU, όπως έχει

προαναφερθεί, ανέρχεται στα 50 με 60 δείγματα το δευτερόλεπτο και κάθε μέτρηση συνοδεύεται από την δική της χρονική ετικέτα συγχρονισμένη με σήμα προερχόμενο από GPS. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση που υπάρχει καθυστέρηση στην λήψη μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Γενικά, ο συνδυασμός μετρήσεων από μονάδες PMU και από το SCADA αυξάνει την ακρίβεια του εκτιμητή και παράλληλα μετατρέπει προηγούμενως κρίσιμες μετρήσεις σε περιπτώσεις μετρήσεις. Η τελευταία ιδιότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανίχνευση εσφαλμένων μετρήσεων.

Η απευθείας μέτρηση του διανύσματος κατάστασης θα ήταν δυνατή αν σε κάθε ζυγό του δικτύου τοποθετούνταν μια μονάδα PMU. Επιπρόσθετα με την μέτρηση των ρευμάτων κλάδων θα παραγόταν επαρκής περίσσεια μετρήσεων για την διαδικασία εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων. Η εγκατάσταση των PMU όμως γίνεται σταδιακά και η εκτίμηση κατάστασης θα πρέπει να εκτελείται με μετρήσεις τόσο από το SCADA όσο και από τα PMU. Σχηματίζεται λοιπόν ένας νέος υβριδικός τρόπος εκτίμησης κατάστασης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα (Σχήμα 3.4) [18]:



Σχήμα 3.4: Υβριδικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης [33].

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα οι αλγόριθμοι υβριδικής εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες που διαφέρουν κυρίως στον τρόπο αξιοποίησης των μετρήσεων. Η τεχνική υβριδικής στατικής εκτίμησης κατάστασης ενός σταδίου (OSHSSE) συνδυάζει τις μετρήσεις RTU και PMU σε ένα ενιαίο μαθηματικό μοντέλο. Πέρα από τις αναγκαίες τροποποιήσεις που απαιτούνται στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης παρουσιάζονται και αρκετές προκλήσεις στην εφαρμογή αυτής της τεχνικής κυρίως σε θέματα αριθμητικής ευστάθειας και απόδοσης του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης. Η λογική της στατικής υβριδικής εκτίμησης σε δύο στάδια (TSHSSE) βασίζεται στον διαχωρισμό των μετρήσεων RTU και PMU και εκτέλεση συμβατικής εκτίμησης κατάστασης (μόνο με RTU) και γραμμικής εκτίμησης κατάστασης (μόνο με PMU) σε ξεχωριστά στάδια. Η μέθοδος αυτή δίνει την δυνατότητα χρήσης καρτεσιανών και πολικών εξισώσεων στην εκτίμηση κατάστασης, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η υπόθεση ότι οι RTU και οι

PMU μετρήσεις είναι ασυσχέτιστες. Σε παρόμοια λογική με τη μέθοδο TSHSSE, όσον αφορά 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 εκτίμησης κατάστασης σε παράλληλη λειτουργία. Τα αποτελέσματά τους συγχωνεύονται για να παραχθεί η τελική εκτίμηση κατάστασης λαμβάνοντας υπόψιν 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[33].

4 Μαθηματικό μοντέλο εκτίμησης κατάστασης

Στην Ενότητα 3 έγινε μια γενική περιγραφή της εκτίμησης κατάστασης όπου αναφέρθηκαν οι λειτουργίες καθώς και οι τρόποι εφαρμογής της στα ΣΗΕ. Το κεφάλαιο αυτό επικεντρώνεται στην θεμελίωση του προβλήματος εκτίμησης κατάστασης και συγκεκριμένα στο μαθηματικό μοντέλο και στον αλγόριθμο επίλυσής του.

4.1 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Γενικά, ο στόχος της εκτίμησης κατάστασης είναι ο προσδιορισμός της πιο πιθανής κατάστασης ενός συστήματος βάσει κάποιων μετρούμενων ποσοτήτων. Ένας τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι με την χρήση της Εκτίμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας (MLE). Γίνεται η υπόθεση ότι τα σφάλματα των μετρήσεων έχουν γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους. Η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για όλες τις μετρήσεις μπορεί γραφεί συναρτήσει αυτών των άγνωστων παραμέτρων. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και λαμβάνει μέγιστη τιμή όταν οι άγνωστες παράμετροι έχουν τιμές αρκούντως κοντά στις πραγματικές τους τιμές. 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.

4.2 Σύνθεση διανύσματος μετρήσεων

Στόχος της εκτίμησης κατάστασης ΣΗΕ είναι εύρεση της πιο πιθανής κατάστασης του συστήματος βασιζόμενη σε μετρήσεις που λαμβάνονται από το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μετρήσεις αυτές περιλαμβάνουν ροές και εγχύσεις ισχύος, μέτρα τάσεων και, πλέον, μετρήσεις φασιθετών τάσης και ρεύματος από PMU. Επομένως, οι περισσότεροι εκτιμητές κατάστασης, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, καταστρώνουν τις σχέσεις μεταξύ των μετρούμενων ποσοτήτων και των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου ως εξής:

$$z = h(x) + e \quad (4.1)$$

όπου $z_{m \times 1}$ είναι το διάνυσμα των μετρήσεων, $h(x)_{m \times 1}$ το διάνυσμα των συναρτήσεων μέτρησης που περιγράφει την σχέση των μετρούμενων ποσοτήτων με τις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος, $e_{m \times 1}$ το άγνωστο διάνυσμα θορύβου των μετρήσεων, $x_{n \times 1}$ το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης και m, n το πλήθος των μετρήσεων και των μεταβλητών κατάστασης αντίστοιχα, με $m \geq n$. Παρακάτω παρουσιάζεται μια πιο λεπτομερής περιγραφή της (4.1) σε μητρική μορφή:

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

4.3 Gaussian κατανομή θορύβου και συνάρτηση πιθανοφάνειας

Τα σφάλματα μετρήσεων θεωρείται ότι ακολουθούν την κανονική (Gaussian) κατανομή, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, με μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 , ή $e \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) μιας τυχαίας μεταβλητής z που ακολουθεί την κανονική κατανομή έχει την εξής μορφή:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.2)$$

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:

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2) \dots f(z_m) = \prod_{i=1}^m f(z_i) \quad (4.3)$$

Η $f_m(z)$ ονομάζεται αλλιώς ως 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 . Για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων, η συνάρτηση πιθανοφάνειας αντικαθίσταται με την λογαριθμική της μορφή για λόγους βελτιστοποίησης των υπολογισμών. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας (Log-Likelihood Function) και εξάγεται γράφοντας την (4.3) σε λογαριθμική μορφή ως εξής:

$$\mathcal{L} = \ln(f_m(z)) = \ln\left\{\prod_{i=1}^m f(z_i)\right\} = -\frac{1}{2}\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 - \frac{m}{2}\ln(2\pi) - \sum_{i=1}^m \ln(\sigma_i) \quad (4.4)$$

Η μέθοδος MLE μεγιστοποιεί την συνάρτηση Λογαριθμο-πιθανοφάνειας \mathcal{L} για κάθε σύνολο παρατηρήσεων του διανύσματος μετρήσεων $z = [z_1, z_2, \dots, z_m]^T$. Επομένως, η μεγιστοποίηση της (4.3) ανάγεται στην εξής διαδικασία:

$$\text{μεγιστοποίηση } f_m(z) \Rightarrow \begin{cases} \text{μεγιστοποίηση } \ln(f_m(z)) \\ \text{ή} \\ \text{ελαχιστοποίηση } \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2 \end{cases} \quad (4.5)$$

Το παραπάνω πρόβλημα μπορεί γραφεί στην μορφή υπολοίπων $r_i = z_i - \mu_i$ όπου η μέση τιμή μ_i κάθε μέτρησης z_i παίρνει την τιμή $h_i(x)$. Το βάρος κάθε τετραγώνου υπολοίπου r_i^2 καθορίζεται από την μήτρα $W_{m \times m}$ με $W_{ii} = \sigma_i^{-2} = R_{ii}^{-2}$, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της μήτρας συνδιασποράς των σφαλμάτων μέτρησης $R_{m \times m}$. Επομένως η μεγιστοποίηση της (4.4) οδηγεί στην ελαχιστοποίηση του σταθμισμένου

αθροίσματος $\sum_{i=1}^m W_{ii}r_i^2$. Η λύση του παραπάνω προβλήματος λέγεται σταθμισμένη εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων (WLS) για το διάνυσμα κατάστασης x [29].

4.4 Μητρική μορφή αντικειμενικής συνάρτησης

Επειδή οι εξισώσεις εκτίμησης κατάστασης στα ΣΗΕ δίνονται σε μητρική μορφή, είναι απαραίτητη η γραφή της $\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2$ σε μητρική μορφή συναρτήσεως γνωστών μεταβλητών του προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψιν τις υποθέσεις της Ενότητας 4.3 η ζητούμενη συνάρτηση γνωστή και ως *αντικειμενική συνάρτηση* παίρνει την εξής μορφή:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - h_i(x)}{\sigma_i}\right)^2 = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (4.6)$$

Όπως φαίνεται από την σχέση (4.6), τα βάρη των μετρήσεων καθορίζονται από την αντίστροφη διασπορά των μετρούμενων ποσοτήτων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μετρήσεις υψηλής ποιότητας να έχουν μικρές διασπορές και μεγάλα βάρη ενώ μετρήσεις μικρής ακρίβειας έχουν μεγάλες διασπορές και επομένως μικρά βάρη και μικρότερη επίδραση στον υπολογισμό της $J(x)$. Παρόλα αυτά χρειάζεται προσοχή στην περίπτωση μετρήσεων με εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια καθώς τέτοιες «τέλειες» μετρήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες καταστάσεις όπως είναι η αντιστροφή διαγώνιων πινάκων με στοιχεία πολύ κοντά στο μηδέν, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλμα υπολογιστικές μονάδες με ανεπαρκή μνήμη [21], [25].

4.5 Αριθμητική επίλυση προβλήματος

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

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0 \quad (4.7)$$

όπου $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$ η Ιακωβιανή (Jacobian) μήτρα της $h(x)$ ως προς τις μεταβλητές κατάστασης. Αν αναπτυχθεί σε ανάπτυγμα σειράς Taylor γύρω από το x^k η μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$, τότε το πρόβλημα θα λάβει την εξής μορφή:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (4.8)$$

Παραλείποντας τους όρους υψηλότερης τάξης το πρόβλημα επιλύεται με χρήση της επαναληπτικής μεθόδου Gauss-Newton όπως φαίνεται παρακάτω:

$$x^{k+1} = x^k - G^{-1}(x^k)g(x^k) \quad (4.9)$$

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

$$g(x^k) = -H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (4.10)$$

$$G(x^k) = \left. \frac{\partial g(x)}{\partial x} \right|_{x=x^k} = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \quad (4.11)$$

Ο πίνακας $G(x)$ λέγεται μήτρα κέρδους. Είναι αραιός, θετικά ορισμένος και συμμετρικός, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Γενικά, κατά την επίλυση, ο $G(x)$ δεν αντιστρέφεται, αλλά παραγοντοποιείται σε δύο τριγωνικούς πίνακες (έναν άνω και έναν κάτω τριγωνικό) και κατόπιν το σύστημα εξισώσεων επιλύεται με εμπρός-πίσω αντικατάσταση σε κάθε επανάληψη k ως εξής:

$$G(x^k)\Delta x^{k+1} = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (4.12)$$

όπου $\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k$. Επομένως η επαναληπτική διαδικασία λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$x^{k+1} = x^k + [H_T(x^k)R^{-1}H(x^k)]^{-1}H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (4.13)$$

Το σύνολο των εξισώσεων που δίνονται από την (4.12) είναι γνωστό και ως κανονικές εξισώσεις (Normal Equations) [21], [22], [29].

4.6 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 παραπάνω αλγόριθμος περιλαμβάνει τους εξής υπολογισμούς σε κάθε επανάληψη k :

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

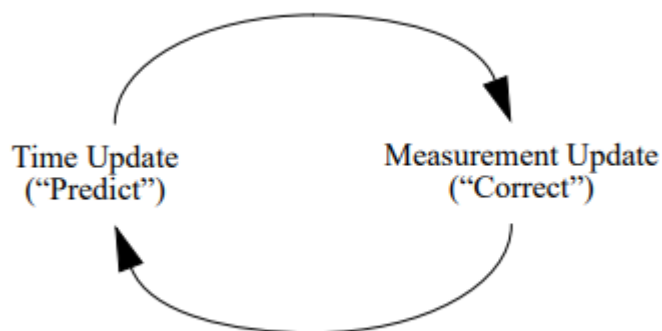
5 Εκτίμηση κατάστασης με φίλτρο Kalman

Στην Ενότητα 1.3 δόθηκε μια περιγραφή της λειτουργίας του φίλτρου Kalman στην εκτίμηση κατάστασης των ΣΗΕ. Το φίλτρο Kalman είναι ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων που παρέχει μια αποδοτική και αναδρομική λύση στο πρόβλημα των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (WLS). Το φίλτρο αυτό υποστηρίζει εκτίμηση της προηγούμενης παρούσας και επόμενης κατάστασης ακόμα και σε περιπτώσεις που το ακριβές μοντέλο του δικτύου δεν είναι γνωστό [34]. Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η δομή και οι εξισώσεις που διέπουν το φίλτρο Kalman καθώς και τα πλεονεκτήματα που παρέχει η χρήση του στην εκτίμηση κατάστασης για ηλεκτρικά δίκτυα.

5.1 Επισκόπηση λειτουργίας φίλτρου Kalman

Το φίλτρο Kalman (KF) εκτελεί εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιώντας μια μορφή ελέγχου μέσω βρόγχου ανάδρασης. Το φίλτρο εκτιμά την κατάσταση κάποια χρονική στιγμή και σχηματίζει κλειστό βρόγχο ελέγχου με την μορφή θορυβωδών μετρήσεων (noisy measurements). Επομένως, οι εξισώσεις που διέπουν το φίλτρο Kalman χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου και τις εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων. Οι εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου προβάλλουν προς τα εμπρός (χρονικά) την παρούσα κατάσταση για να παραχθούν οι a priori εκτιμήσεις για την επόμενη χρονική στιγμή. Οι εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων είναι υπεύθυνες για την ανάδραση των νέων μετρήσεων στις a priori εκτιμήσεις για να παραχθεί μια βελτιωμένη a posteriori εκτίμηση κατάστασης.

Οι εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου μπορούν να θεωρηθούν και ως εξισώσεις πρόβλεψης (predictor equations), ενώ οι εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων ως εξισώσεις διόρθωσης (corrector equations). Επομένως, ο τελικός αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης παρομοιάζεται με έναν αλγόριθμο πρόβλεψης-διόρθωσης της οποίας η δυναμική φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [34]:



Σχήμα 5.1: Ο κύκλος του φίλτρου Kalman [34].

5.2 Επαναληπτικό εκτεταμένο φίλτρο Kalman (IEKF)

Το φίλτρο Kalman απευθύνεται στο γενικό πρόβλημα εκτίμησης του διανύσματος κατάστασης $x \in \mathbb{R}^n$ μιας διαδικασίας διακριτού χρόνου που περιγράφεται από γραμμικές στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις. Όμως, οι εξισώσεις που διέπουν την λειτουργία των ΣΗΕ καθώς και η συσχετίσεις των μετρήσεων με το διάνυσμα κατάστασης είναι μη γραμμικές. Το φίλτρο Kalman που γραμμικοποιεί το σύστημα γύρω από την παρούσα μέση τιμή και διασπορά ονομάζεται εκτεταμένο φίλτρο Kalman (EKF).

Σε μια διαδικασία παρόμοια με την σειρά Taylor, μπορεί να γίνει γραμμικοποίηση γύρω από την παρούσα εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιώντας μερικές παραγώγους των συναρτήσεων κατάστασης και των συναρτήσεων μετρήσεων για να γίνει εκτίμηση κατάστασης ακόμα και υπό την παρουσία μη γραμμικών σχέσεων [34]. Το EKF αποτελεί τον καλύτερο αμερόληπτο γραμμικό εκτιμητή κατάστασης για το γραμμικοποιημένο δυναμικό σύστημα που προσεγγίζει επαρκώς το μη γραμμικό σύστημα. Επομένως ανάλογα την ποιότητα της γραμμικοποίησης του συστήματος, έχουμε ανάλογη ποιότητα εκτίμησης από το EKF. Για αρκετό καιρό το EKF αποτελούσε δημοφιλή επιλογή εκτίμησης κατάστασης λόγω της ακρίβειας και της απλότητας στην εφαρμογή του. Παρόλα αυτά έχουν αναπτυχθεί εκδοχές του EKF που προσφέρουν αυξημένη ακρίβεια και καλύτερη διαχείριση της γραμμικοποίησης καθώς οι προσεγγίσεις πρώτης τάξης του EKF έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικές αστοχίες [6], [35].

Μια τέτοια εκδοχή είναι το επαναληπτικό εκτεταμένο φίλτρο Kalman (IEKF). Συγκεκριμένα, το IEKF γραμμικοποιεί το μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων αναδρομικά για να αντισταθμίσει τις αστοχίες από την παράληψη όρων υψηλής τάξης [15], [36]–[43]. Ο αλγόριθμος αυτός μεταβαίνει συνεχώς από την διαδικασία πρόβλεψης στην διαδικασία ενημέρωσης και αντιστρόφως μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση με αποτέλεσμα να παραχθεί μια πιο ακριβής εκτίμηση κατάστασης. Για την επίτευξη της μεγαλύτερης ακρίβειας και αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς καθώς ο αλγόριθμος στηρίζεται σε χρήση επαναλήψεων για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

5.3 Σχηματισμός χώρου καταστάσεων για εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ

Τα εγκατεστημένα RTU και PMU στο ηλεκτρικό δίκτυο λαμβάνουν τις μετρήσεις σε συγκεκριμένες τακτές χρονικές στιγμές. Επομένως το πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης είναι διακριτού χρόνου και άρα μπορούμε να εφαρμόσουμε το IEKF ορίζοντας το σύστημα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$x_k = F_k x_{k-1} + w_k, \quad E[w_k] = 0 \quad (5.1)$$

$$z_k = h_k(x_k) + e_k, \quad E[e_k] = 0 \quad (5.2)$$

Όπου $x_k \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα κατάστασης και $z_k \in \mathbb{R}^m$ το διάνυσμα μετρήσεων την k -οστή χρονική στιγμή, ενώ ο $F_k \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ονομάζεται πίνακας μετάβασης και παράγεται με την κλασσική μέθοδο Holt-Winters. Για την ευκολότερη μοντελοποίηση

του μοντέλου δυναμικής εκτίμησης κατάστασης στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, ο πίνακας μετάβασης ορίζεται ως μοναδιαίος διαγώνιος πίνακας $F_k = I_{n \times n}$. Τα w_k και e_k αντιπροσωπεύουν τους θορύβους διαδικασίας (process noise) και μετρήσεων (measurement noise) αντίστοιχα και θεωρούνται λευκοί θόρυβοι ασυσχέτιστοι μεταξύ τους. Οι διαγώνιοι πίνακες συνδιασπορών των παραπάνω θορύβων εκφράζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$Q_k = E[w_k w_k^T] = \text{cov}(w_k) \quad (5.3)$$

$$R_k = E[e_k e_k^T] = \text{cov}(e_k) \quad (5.4)$$

Η μορφή των εξισώσεων που διέπουν το φίλτρο Kalman, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των μεταβλητών παραμέτρων εξαρτώνται από τον τομέα της εφαρμογής του φίλτρου. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια να διατυπωθούν οι εξισώσεις και οι υποθέσεις αυτές σε μορφή εύλογη για την εκτίμηση κατάστασης ΣΗΕ, σύμφωνα με την σχετική βιβλιογραφία [6], [34], [36]–[42].

5.4 Εξισώσεις ενημέρωσης χρόνου (Predictor)

Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούν δεδομένα από την προηγούμενη εκτίμηση κατάστασης για να δημιουργήσουν τις a priori εκτιμήσεις του φίλτρου Kalman. Συγκεκριμένα σχηματίζονται το a priori διάνυσμα κατάστασης \tilde{x}_k και η μήτρα συνδιασπορών σφαλμάτων \tilde{P}_k σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\tilde{x}_k = F_k \hat{x}_{k-1} \quad (5.5)$$

$$\tilde{P}_k = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k \quad (5.6)$$

όπου \hat{x}_{k-1} και P_{k-1} η εκτίμηση κατάστασης και η μήτρα συνδιασπορών σφαλμάτων την $k - 1$ χρονική στιγμή.

5.5 Εξισώσεις ενημέρωσης μετρήσεων (Corrector)

Στο στάδιο αυτό το EKF έχει διαθέσιμα τις πλέον διαθέσιμες μετρήσεις και τα a priori δεδομένα που αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.4. Η γενική μορφή των εξισώσεων που υπολογίζουν το διάνυσμα κατάσταση την χρονική στιγμή k είναι η εξής:

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + K_k [z_k - h_k(\tilde{x}_k)] \quad (5.7)$$

$$K_k = \tilde{P}_k H_k^T(\tilde{x}_k) [H_k(\tilde{x}_k) \tilde{P}_k H_k^T(\tilde{x}_k) + R_k]^{-1} \quad (5.8)$$

$$P_k = [I - K_k H_k(\tilde{x}_k)] \tilde{P}_k \quad (5.9)$$

όπου \hat{x}_k η εκτίμηση κατάσταση του φίλτρου Kalman την χρονική στιγμή k , K_k είναι το κέρδος Kalman (Kalman gain) που καθορίζει το ποσοστό βαρύτητας του φίλτρου στις διαθέσιμες μετρήσεις z_k και στην προηγούμενη εκτίμηση κατάστασης \hat{x}_{k-1} , P_k είναι η εκτιμώμενη τιμή της μήτρας συνδιασποράς σφαλμάτων την χρονική στιγμή k ενώ η παράσταση $z_k - h_k(\tilde{x}_k)$ ονομάζεται υπόλοιπο μετρήσεων (measurement residual)

Οι σχέσεις (5.7)-(5.8) μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω φέροντάς τες σε παρόμοια μορφή με αυτές της κλασσικής εκτίμησης κατάστασης. Συγκεκριμένα για την έκφραση του κέρδους Kalman (5.8) και χρησιμοποιώντας το Matrix Inversion Lemma:

$$(A + UCV)^{-1} = A^{-1} - A^{-1}U(C^{-1} + VA^{-1}U)^{-1}VA^{-1}$$

μπορούμε να εκφράσουμε την $(R_k + H_k\tilde{P}_kH_k^T)^{-1}$ ως:

$$(R_k + H_k\tilde{P}_kH_k^T)^{-1} = R_k^{-1} - R_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1}$$

και επομένως το κέρδος Kalman παίρνει την εξής μορφή:

$$\begin{aligned} K_k &= \tilde{P}_kH_k^T \left[R_k^{-1} - R_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \right] \\ &= \tilde{P}_kH_k^TR_k^{-1} - \tilde{P}_kH_k^TR_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \\ &= \tilde{P}_k \left[I - H_k^TR_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \right] H_k^TR_k^{-1} \\ &= \tilde{P}_k \left[(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \right. \\ &\quad \left. - H_k^TR_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \right] H_k^TR_k^{-1} \\ &= \tilde{P}_k \left[\tilde{P}_k^{-1}(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \right. \\ &\quad \left. - H_k^TR_k^{-1}H_k(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \right] H_k^TR_k^{-1} \\ &= \tilde{P}_k\tilde{P}_k^{-1}(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} = (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \end{aligned}$$

και επομένως:

$$K_k = (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \quad (5.10)$$

Με την σχέση (5.10) η μήτρα συνδιασποράς των σφαλμάτων P_k γράφεται ισοδύναμα ως εξής:

$$\begin{aligned} P_k &= (I - K_kH_k)\tilde{P}_k = \left[I - (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \right] \tilde{P}_k \\ &= \left[(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k) - (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \right] \tilde{P}_k \\ &= \left[(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}\tilde{P}_k^{-1} + (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1}H_k \right. \\ &\quad \left. - (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}H_k^TR_k^{-1} \right] \tilde{P}_k \\ &= (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1}\tilde{P}_k^{-1}\tilde{P}_k = (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \end{aligned}$$

επομένως η P_k έχει την εξής αναλυτική μορφή:

$$P_k = (\tilde{P}_k^{-1} + H_k^TR_k^{-1}H_k)^{-1} \quad (5.11)$$

Τελικά η σχέση (5.10) λόγω της (5.11) παίρνει την παρακάτω μορφή:

$$K_k = P_k H_k^T R_k^{-1} \quad (5.12)$$

Η έκφραση $H_k^T R_k^{-1} H_k$ αποτελεί την μήτρα κέρδους G_k που αναφέρθηκε στην Ενότητα 4.5 και επομένως μια ισοδύναμη μορφή της (5.11) είναι η εξής:

$$P_k = (\tilde{P}_k^{-1} + G_k)^{-1} \quad (5.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν τις σχέσεις (5.10)-(5.12) και την γενική μορφή της εκτιμώμενης κατάστασης από την σχέση (5.7), το διάνυσμα κατάστασης του EKF θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\hat{x}_k = \tilde{x}_k + \left(\tilde{P}_k^{-1} + H_k^T(\tilde{x}_k) R_k^{-1} H_k(\tilde{x}_k) \right)^{-1} H_k^T(\tilde{x}_k) R_k^{-1} (z_k - h_k(\tilde{x}_k)) \quad (5.14)$$

Η παραπάνω σχέση θυμίζει την λύση της κλασσικής εκτίμησης κατάστασης για μη γραμμικό μοντέλο αλλά διαφέρει στο γεγονός ότι χρειάζεται μια επανάληψη για την επίτευξη σύγκλισης καθώς το EKF θεωρεί γραμμικοποιημένο μοντέλο. Παρατηρούμε ότι η (5.14) συνδυάζει σε μια εξίσωση την προηγούμενη εκτιμώμενη κατάσταση με τις πλέον διαθέσιμες μετρήσεις με έναν παράγοντα βάρους (κέρδος Kalman). Η ιδιότητα αυτή προσθέτει μνήμη στην εκτίμηση κατάστασης κάνοντάς την πιο αποδοτική σε μετρήσεις με σημαντικό ποσοστό σφάλματος ή bad data. Παρόλα αυτά, λόγω της γραμμικοποίησης, το EKF μπορεί να παρουσιάσει σημαντική απόκλιση ειδικά αν η γραμμικοποίηση δεν έχει γίνει ορθά ή η αρχική εκτίμηση κατάστασης \hat{x}_0 απέχει σημαντικά από το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης.

Στο παραπάνω πρόβλημα δίνει λύση το IEKF που γραμμικοποιεί το πρόβλημα γύρω από την προηγούμενη εκτίμηση κατάστασης \tilde{x}_k αναδρομικά μεταβαίνοντας από τις εξισώσεις ενημέρωσης χρόνους και μετρήσεων μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση στο διάνυσμα παρούσας κατάστασης \hat{x}_k^{i+1} όπου i η i -οστή επανάληψη την k -οστή χρονική στιγμή. Για τον λόγο αυτό θεωρείται ότι η συνάρτηση μετρήσεων προσεγγίζεται μέχρι τον όρο πρώτης τάξης γύρω από το \tilde{x}_k με την εξής μορφή:

$$h_k(x) = h_k(\tilde{x}_k) + \left. \frac{\partial h_k(x)}{\partial x} \right|_{x = \tilde{x}_k} (x - \tilde{x}_k) = h_k(\tilde{x}_k) + H_k(\tilde{x}_k)(x - \tilde{x}_k)$$

$$h_k(\tilde{x}_k) = h_k(x) + H_k(\tilde{x}_k)(\tilde{x}_k - x)$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση σε συνδυασμό με την σχέση (5.14) για το EKF, εξάγεται η επαναληπτική αναδρομική σχέση για εκτίμηση κατάστασης του IEKF:

$$\hat{x}_k^{i+1} = \tilde{x}_k + [\tilde{P}_k^{-1} + H_i^T R_k^{-1} H_i]^{-1} H_i^T R_k^{-1} [z_k - h_k(\hat{x}_k^i) - H_i(\tilde{x}_k - \hat{x}_k^i)] \quad (5.15)$$

όπου $H_i = \left. \frac{\partial h_k(x)}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}_k^i}$. Αξίζει να σημειωθεί ότι για μηδενική επανάληψη με $\hat{x}_k^0 = \tilde{x}_k$, παράγεται η σχέση (5.14) του EKF. Η σχέση (5.15), ανάλογα την επιθυμητή ακρίβεια, παράγει πιο ακριβή αποτελέσματα και είναι σε θέση να ακολουθήσει την

δυναμική μεταβολή του συστήματος σε σχέση με το EKF με μειονέκτημα την παραπάνω υπολογιστική ισχύ που χρειάζεται λόγω των συνεχών επαναλήψεων.

5.6 Αρχικοποίηση παραμέτρων του IEKF

Για να εφαρμοστεί σωστά και βέλτιστα το IEKF, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του πίνακα μετάβασης F_k και των συνδιασπορών θορύβου R_k και Q_k . Ενώ ο πίνακας μετάβασης F_k είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μέσω τεχνικών προβλέψεων που κάνουν χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων και τεχνικών ομαλοποίησης (smoothing techniques), οι μήτρες συνδιασπορών θορύβου R_k και Q_k είναι δυσκολότερο να αρχικοποιηθούν [38], [43].

Στα ΣΗΕ, το διάνυσμα κατάστασης περιέχει όλα τα μέτρα και τις γωνίες των μιγαδικών τάσεων των ζυγών του δικτύου. Επομένως οι μεταβλητές που υπολογίζονται σε κάθε εκτίμηση κατάστασης είναι οι ίδιες και άρα είναι ικανοποιητική η θεώρηση ότι ο πίνακας μετάβασης είναι μοναδιαίος όπως φαίνεται παρακάτω:

$$F_k = I_{n \times n} \quad (5.15)$$

Η μήτρα συνδιασπορών θορύβου R_k περιέχει στην κύρια διαγώνιο του τις διασπορές των μετρήσεων του διανύσματος μετρήσεων όπως έχει αναλυθεί στην Ενότητα 4.3 και επομένως έχει την μορφή:

$$R_k = R_{m \times m} = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Η μήτρα συνδιασπορών θορύβου διαδικασίας Q_k είναι πιο δύσκολο να εκτιμηθεί. Μια συνήθης τακτική είναι η είναι η παραμετρική της μεταβολή σε ένα διάστημα τιμών έτσι ώστε το IEKF να παρουσιάζει την επιθυμητή συμπεριφορά [43]. Για λόγους απλότητας επιλέχθηκε ο διαγώνιος πίνακας Q_k να έχει τις ίδιες διασπορές στην κύρια διαγώνιο του. Το εύρος βέλτιστης λειτουργίας του αλγορίθμου της παρούσας διπλωματικής βρέθηκε να είναι ίση με :

$$Q_k = Q_{(2n-1) \times (2n-1)} = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma^2 \end{bmatrix}, \quad 10^{-8} \leq \sigma^2 \leq 10^{-5} \quad (5.17)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή σταθερών τιμών για τα R_k και Q_k σε συστήματα με τις κατάλληλες συνθήκες έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη σύγκλιση της μήτρας συνδιασποράς σφαλμάτων P_k σε μια τιμή. Σε πολλές περιπτώσεις τα συστήματα είναι δυναμικά και τα σφάλματα δεν είναι σταθερά. Σε αυτές τις περιπτώσεις όταν το σύστημα φαίνεται να έχει μεγάλα σφάλματα, η μείωση των τιμών του Q_k θα αυξήσει την εμπιστοσύνη του φίλτρου στις προηγούμενες εκτιμήσεις ενώ όταν το σύστημα

φαίνεται να έχει αξιόπιστες μετρήσεις, η αύξηση των τιμών του Q_k θα αυξήσει την εμπιστοσύνη του φίλτρου στις διαθέσιμες μετρήσεις [34].

Εφόσον έχει γίνει η κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων F_k , R_k και Q_k , θα πρέπει να προσδιοριστεί το αρχικό διάνυσμα εκτίμησης κατάστασης \hat{x}_0 και η αρχική μήτρα συνδιασπορών των σφαλμάτων P_0 . Για το αρχικό διάνυσμα κατάστασης αρκεί το ορίσουμε ως μια γνωστή μέση τιμή $\mu_0 \in \mathbb{R}^n$ η οποία έχει παραχθεί είτε από μια σειρά δοκιμών στο εξεταζόμενο δίκτυο είτε είναι διαθέσιμο από ιστορικά γεγονότα με την εξής μορφή:

$$\hat{x}_0 = \mu_0 + w_0$$

Επειδή όμως το ΙΕΚF είναι αυτοδιορθούμενο επιλέχτηκε να οριστεί η \hat{x}_0 ως το αρχικό διάνυσμα κατάστασης της κλασικής εκτίμησης κατάστασης (WLS) κανονικές συνθήκες με τον εξής τρόπο:

$$\hat{x}_0 = \hat{x}_{0WLS} \quad (5.18)$$

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια αρχική εκτίμηση υψηλής ακρίβειας κάτι που βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του ΙΕΚF.

Για τον ορισμό της P_0 μπορούμε να υποθέσουμε οποιαδήποτε αρχική τιμή καθώς το ΙΕΚF έπειτα από έναν αριθμό επαναλήψεων θα συγκλίνει επαρκώς στην σωστή τιμή. Όμως, για να αυξηθεί περαιτέρω η απόδοση και η ακρίβεια του ΙΕΚF θα πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις βασισμένες στην σχέση (5.13):

$$P_k = (\tilde{P}_k^{-1} + G_k)^{-1}$$

Για $k = 0$ η σχέση γίνεται:

$$P_0 = (\tilde{P}_0^{-1} + G_0)^{-1} = [(F_0 P_{-1} F_k^T + Q_0)^{-1} + G_0]^{-1} = [(P_{-1} + Q_0)^{-1} + G_0]^{-1}$$

Επειδή την $k = -1$ δεν υπάρχουν δεδομένα για την κατάσταση του δικτύου, μπορούμε να υποθέσουμε ότι επικρατούν συνθήκες μέγιστου σφάλματος και επομένως η επίδραση του Q_0 είναι ελάχιστη. Επομένως:

$$P_0 \approx (P_{-1}^{-1} + G_0)^{-1}$$

Εφόσον υποθέσαμε ότι ο πίνακας P_{-1} έχει μεγάλες τιμές στην κύρια διαγώνιο, τότε ο αντίστροφος πίνακας θα έχει την κύρια διαγώνιο με στοιχεία πολύ κοντά στο μηδέν και επομένως θα έχει αμελητέα επίδραση στον πίνακα κέρδους G_0 που έχει στοιχεία με συγκριτικά μεγαλύτερες τιμές. Τελικά η τιμή που επιλέγεται να τεθεί στο P_0 , σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις είναι η εξής:

$$P_0 = G_0^{-1} \quad (5.19)$$

Η G_0 λαμβάνεται από την κλασική εκτίμηση κατάστασης με την οποία αρχικοποιήθηκε και το αρχικό διάνυσμα κατάστασης \hat{x}_0 .

6 Διατύπωση εξισώσεων συμβατικών μετρήσεων

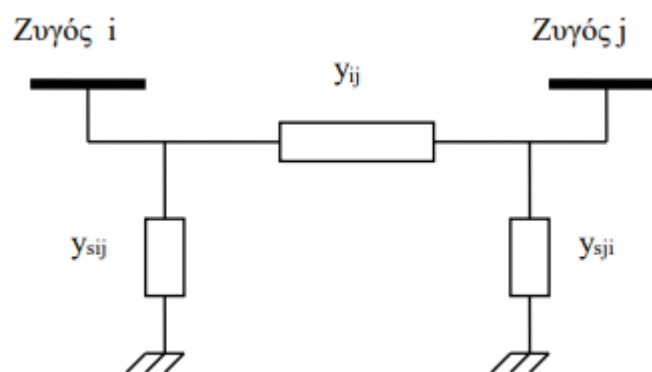
Στις Ενότητες 4 και 5 παρουσιάστηκαν οι εξισώσεις επίλυσης της συμβατικής εκτίμησης κατάστασης και της εκτίμησης κατάστασης με φίλτρο Kalman που συνδέουν το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης x με το διάνυσμα μετρήσεων z . Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψει ο τρόπος υπολογισμού της συνάρτησης μετρήσεων $h(x)$ και της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων $H(x)$. Συγκεκριμένα θα δοθούν τα μαθηματικά μοντέλα των επιμέρους των στοιχείων καθώς και οι εξισώσεις που περιγράφουν την λειτουργία ενός ΣΗΕ.

6.1 Μοντέλα στοιχείων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα ΣΗΕ λειτουργούν με την υπόθεση κανονικής κατάστασης λειτουργίας υπό ισορροπημένο φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία των ζυγών, οι ροές ισχύος και τα εγκάρσια στοιχεία θα είναι τριφασικά και ισορροπημένα. Αυτές οι υποθέσεις επιτρέπουν την χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων θετικής ακολουθίας για την περιγραφή ολόκληρου του δικτύου. Συνήθως οι παράμετροι αυτές εκφράζονται σε κοινό ανά μονάδα σύστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα μοντέλα των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση ολόκληρου του δικτύου [29].

6.1.1 Γραμμές μεταφοράς

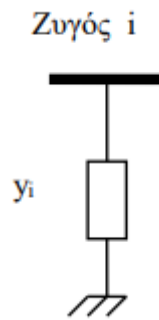
Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με ένα δίθυρο ισοδύναμο-π (two-port pi-model) του οποίου οι παράμετροι καθορίζονται από το ισοδύναμο δίκτυο θετικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς. Το μοντέλο μιας τέτοιας γραμμής μεταφοράς, που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , αποτελείται από μία εν σειρά σύνθετη 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 στο ζυγό j . Παρακάτω φαίνεται η δομή του μοντέλου αυτού:



Σχήμα 6.1: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς [15].

6.1.2 Εγκάρσια Στοιχεία

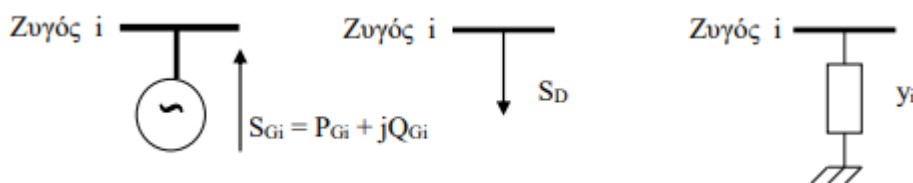
Τα εγκάρσια στοιχεία μπορεί να είναι είτε πυκνωτές είτε αυτεπαγωγές και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ή της άεργου ισχύος. Αναπαρίστανται σε μία εγκάρσια φανταστική αγωγιμότητα $y_{si} = jb_i$. Το πρόσημο της τιμής της αγωγιμότητας καθορίζει τον τύπο του εγκάρσιου στοιχείου: αν είναι θετικό ($b_i > 0$) 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 [15].

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 $y_{si} = g_{si} + jb_{si}$. Παρακάτω φαίνεται η δομή του μοντέλου αυτού:



Σχήμα 6.3: Μοντέλα γεννήτριας, φορτίου σταθερής ισχύος και αγωγιμότητας [15].

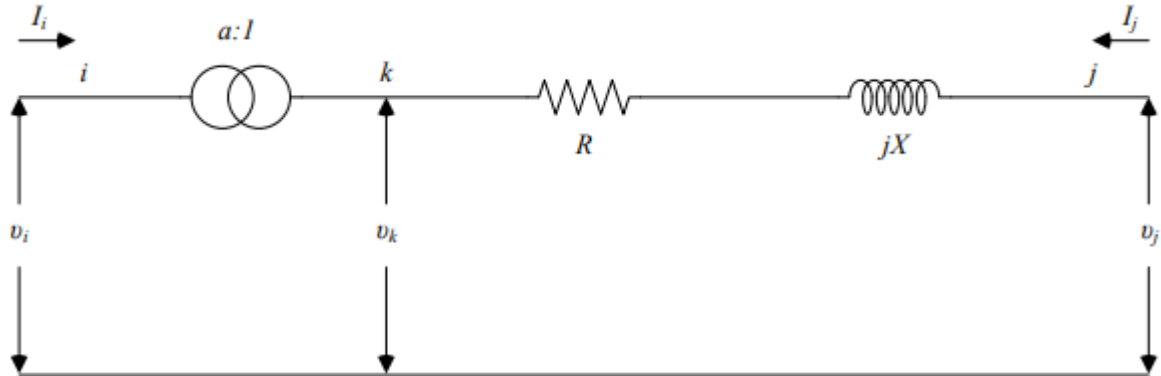
Στον Πίνακα 6.1 αναλύονται τα πρόσημα της ενεργούς και άεργου ισχύς για την γεννήτρια και τα είδη φορτίου:

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 .



Σχήμα 6.4: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [15].

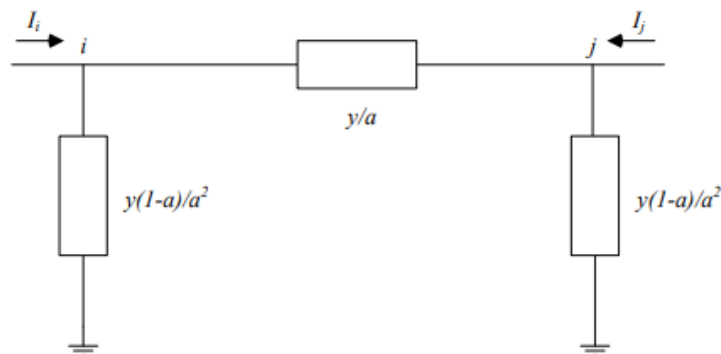
Οι ακροδέκτες του πραγματικού μετασχηματιστή αντιστοιχούν στους ζυγούς i και j . Οι εξισώσεις κόμβων του δίθρου δικτύου προκύπτουν αν εκφραστούν κατάλληλα τα ρεύματα I_{kj} και I_j στα άκρα του κλάδου σύνθετης αντίστασης. Αν η σύνθετη αγωγιμότητα του κλάδου $k - j$ ισούνται με $y = 1/z$, τότε τα ρεύματα συναρτήσει των τάσεων u_k και u_j δίνονται από το σύστημα εξισώσεων [29]:

$$\begin{bmatrix} I_{kj} \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y & -y \\ -y & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_k \\ u_j \end{bmatrix}$$

Αν αντικατασταθούν το ρεύμα I_{kj} και η τάση u_k με τις σχέσεις: $\begin{cases} I_{kj} = aI_i \\ u_k = \frac{u_i}{a} \end{cases}$, τότε:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y}{a^2} & -\frac{y}{a} \\ -\frac{y}{a} & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix}$$

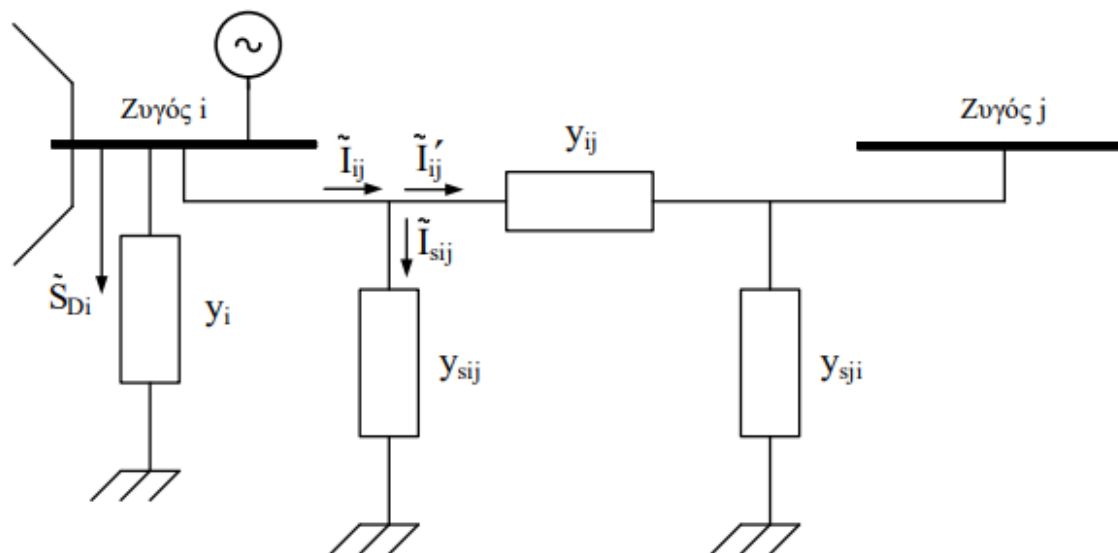
Το σχήμα του τελικού μοντέλου μετασχηματιστή σε δίθρο ισοδύναμο-π παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 6.5: Μοντέλο πραγματικού μετασχηματιστή [15].

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. Στο 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 εγχέει 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 στον ζυγό j με \tilde{V}_j . Μετασχηματιστής δεν υπάρχει στο ζυγό i αλλά αν υπήρχε θα ήταν συνδεδεμένος εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, οπότε θα μπορούσε να υπολογιστεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα που θα αποτερείτο από μία σύνθετη αγωγιμότητα γραμμής y_{ij} και δύο εγκάρσιες αγωγιμότητες y_{sij} . Παρακάτω φαίνεται η αναπαράσταση του γενικευμένου ζυγού με όλα τα στοιχεία που αναφέρθηκαν:



Σχήμα 6.6: Γενικευμένος ζυγός ΣΗΕ [15].

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

$$\tilde{V}_i = E_i + jF_i \quad (6.1)$$

$$\tilde{V}_j = E_j + jF_j$$

$$\tilde{I}_{ij} = I_{ij,r} + jI_{ij,i}$$

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

$$\begin{aligned}\tilde{I}_{ij} = & \{(g_{sij} + g_{ij})E_i - (b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j\} + \\ & + j\{(g_{sij} + g_{ij})F_i + (b_{sij} + b_{ij})E_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j\}\end{aligned}$$

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

$$I_{ij,r} = \text{Re}(\tilde{I}_{ij}) = [(g_{sij} + g_{ij})E_i - (b_{sij} + b_{ij})F_i - g_{ij}E_j + b_{ij}F_j] \quad (6.2)$$

$$I_{ij,i} = \text{Im}(\tilde{I}_{ij}) = [(g_{sij} + g_{ij})F_i + (b_{sij} + b_{ij})E_i - g_{ij}F_j - b_{ij}E_j] \quad (6.3)$$

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

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

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 άεργου ισχύος στη γραμμή $i - j$. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (6.2) και (6.3) οι εκφράσεις των ροών ισχύος και των εγγύσεων ισχύος θα δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{ij} = (g_{sij} + g_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i(-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - F_i(g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) \quad (6.4)$$

$$Q_{ij} = -(b_{sij} + b_{ij})(E_i^2 + F_i^2) + E_i(g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + F_i(-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned}P_i &= (E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in a(i)} (g_{sij} + g_{ij}) + E_i \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) - F_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) \\ &+ (E_i^2 + F_i^2)g_i\end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned}Q_i &= -(E_i^2 + F_i^2) \sum_{j \in a(i)} (b_{sij} + b_{ij}) + E_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij}F_j + b_{ij}E_j) + F_i \sum_{j \in a(i)} (-g_{ij}E_j + b_{ij}F_j) \\ &- (E_i^2 + F_i^2)b_i\end{aligned} \quad (6.7)$$

όπου $a(i)$ είναι το σύνολο όλων των συνδεδεμένων ζυγών με τον ζυγό i .

6.3 Συνάρτηση μετρήσεων $h(x)$

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι διαφόρων ειδών. Όμως, οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετρήσεων είναι οι ροές ισχύος στις γραμμών, εγγύσεις ισχύος ζυγών και μέτρα τάσεων ζυγών. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να εκφραστούν συναρτήσεως των μεταβλητών του διάνυσματος κατάστασης x^k , είτε σε καρτεσιανό είτε σε πολικό σύστημα συντεταγμένων για ένα σύστημα n ζυγών, το διάνυσμα κατάστασης x^k θα έχει $2n$ στοιχεία, n μέτρα τάσεων και n γωνίες τάσεων ζυγών. Για τις ανάγκες τις διπλωματικής, θα χρησιμοποιηθεί το διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες για την επίλυση των εξισώσεων της Ενότητας 6.2 και των κανονικών εξισώσεων και μετατροπή του αποτελέσματος σε πολική μορφή για την ευκολότερη ανάγνωσή τους. Το διάνυσμα κατάστασης σε πολικές συντεταγμένες έχει πλήθος στοιχείων $2n$ και έχει την εξής μορφή:

$$x^T = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]$$

Ενώ το διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχει πάλι πλήθος στοιχείων $2n$ και την παρακάτω μορφή:

$$x^T = [F_1, F_2, \dots, F_N, E_1, E_2, \dots, E_N]$$

6.4 Ιακωβιανή μήτρα μετρήσεων $H(x)$ - Διάνυσμα κατάστασης σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Η δομή της Ιακωβιανής μήτρας μετρήσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχει την παρακάτω μορφή:

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

Με παραγωγή των εξισώσεων (6.1)-(6.7) προκύπτουν οι ακόλουθες αναλυτικές εκφράσεις των επιμέρους στοιχείων [15]:

- Μετρήσεις έγχυσης ενεργού ισχύος

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i$$

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

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

- Μετρήσεις έγχυσης αέργου ισχύος

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

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

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

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

- Μετρήσεις ροής ενεργού ισχύος

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

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial E_j} = -g_{ij}E_i - b_{ij}F_i$$

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

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

- Μετρήσεις ροής αέργου ισχύος

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

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

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

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

- Μετρήσεις μέτρων τάσεων

$$\frac{\partial V_i}{\partial E_i} = \frac{E_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2}}, \quad \frac{\partial V_i}{\partial E_j} = 0, \quad \frac{\partial V_i}{\partial F_i} = \frac{F_i}{\sqrt{E_i^2 + F_i^2}}, \quad \frac{\partial V_i}{\partial F_j} = 0$$

- Μετρήσεις πραγματικού μέρους ρευμάτων

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

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

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

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

- Μετρήσεις φανταστικού μέρους ρευμάτων

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

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

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

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

7 Δείκτες απόδοσης αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης

Στην Ενότητα 3 αναφέρθηκε ότι η εκτίμηση κατάστασης παρέχει μια ακριβή εικόνα της κατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου. Παρόλα αυτά λόγω ανακριβών παραμέτρων του δικτύου και λανθασμένων μετρήσεων, υπάρχουν αποκλίσεις από την πραγματική κατάσταση του δικτύου. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η εισαγωγή ορισμένων δεικτών απόδοσης της εκτίμησης κατάστασης που θα αξιολογούν την αξιοπιστία και την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Οι δείκτες αυτοί εξετάζουν τον αλγόριθμο εκτίμησης ως προς την *ακρίβεια*, *απόδοση* και *ανθεκτικότητα σε σφάλματα* [44]. Η παρούσα διπλωματική αξιοποιεί αυτούς τους δείκτες για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF και τη κλασσικής εκτίμησης κατάστασης.

7.1 Μέσο απόλυτο σφάλμα

Ο δείκτης μέσου απόλυτου σφάλματος (MAE) υπολογίζει την μέση απόλυτη διαφορά μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών με των πραγματικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης του δικτύου. Οι διαφορές αυτές υπολογίζονται για όλους του ζυγούς του δικτύου και έπειτα κανονικοποιούνται. Επειδή το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης περιλαμβάνει τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων όλων των ζυγών του δικτύου, προκύπτουν οι παρακάτω δείκτες:

$$\text{MAE}_V = \frac{\sum_{i=1}^N |V_i^{true} - V_i^{est}|}{N} \quad (7.1)$$

$$\text{MAE}_A = \frac{\sum_{i=1}^N |\delta_i^{true} - \delta_i^{est}|}{N} \quad (7.2)$$

όπου $V_i^{true}, \delta_i^{true}$ οι πραγματικές τιμές των μέτρων και των γωνιών των τάσεων σε κάθε ζυγό και $V_i^{est}, \delta_i^{est}$ οι εκτιμώμενες τιμές αντίστοιχα. Ο αριθμός N αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ζυγών του ηλεκτρικού δικτύου.

Είναι επιθυμητό, οι δείκτες MAE_V και MAE_A να λάβουν τιμή όσο πιο κοντά γίνεται στο μηδέν καθώς τότε οι εκτιμώμενες τιμές είναι ταυτόσημες με τις πραγματικές τιμές. Λόγω του θορύβου των μετρήσεων και των αποκλίσεων στο μοντέλο δικτύου και άλλους παράγοντες αυτό είναι πρακτικά αδύνατο. Επομένως είναι αρκετό η διατήρηση των δεικτών αυτών σε χαμηλές τιμές [45].

7.2 Μέσο απόλυτο σφάλμα κυκλικής συνιστώσας

Συνδυάζοντας τους δείκτες (7.1) και (7.2), σε έναν ενιαίο δείκτη, δημιουργείται ένας νέος δείκτης που περιέχει το μέτρο της μιγαδικής διαφοράς της πραγματικής μιγαδικής τάσης με την εκτιμώμενη. Η εξίσωση του δείκτη αυτή φαίνεται παρακάτω:

$$\text{MACC}_V = \left(\sum_{i=1}^N |\tilde{V}_i^{true} - \tilde{V}_i^{est}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.3)$$

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

Ομοίως με τους δείκτες MAE, είναι επιθυμητή η διατήρηση του δείκτη $MAEC_V$ σε χαμηλές τιμές.

7.3 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην μελέτη απόδοσης των αλγορίθμων έχει ο δείκτης μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος (MAPE) για τα μέτρα τάσης των ζυγών του ηλεκτρικού δικτύου. Αποτελεί επέκταση του δείκτη MAE_V (7.1) και η ποσοστιαία μορφή του διευκολύνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης. Η σχέση του δείκτη MAPE φαίνεται παρακάτω:

$$MAPE_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_i^{true} - V_i^{est}}{V_i^{true}} \right| \quad (7.4)$$

Επειδή ο δείκτης αυτός είναι ποσοστιαίος, είναι δυνατή η ευκολότερη αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων. Οι αποδεκτές τιμές του δείκτη εξαρτώνται από το είδος της εφαρμογής και των δεδομένων που εξετάζονται αλλά μια γενική κλίμακα που χρησιμοποιείται είναι η εξής [46]:

Πίνακας 7.1: Ποιοτική κλίμακα του δείκτη MAPE.

Εύρος δείκτη MAPE	Ποιοτική Αξιολόγηση
< 10%	Πολύ Καλή
10% - 20%	Καλή
20% - 50%	Μέτρια
> 50%	Κακή

8 Υλοποίηση σε περιβάλλον MATLAB®

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η υλοποίηση του αλγορίθμου κλασσικής εκτίμησης κατάστασης και της εκτίμησης κατάστασης με χρήση ΙΕΚΦ βασισμένου σε μετρήσεις RTU και PMU στο υπολογιστικό περιβάλλον του προγράμματος MATLAB® σύμφωνα με τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν στις Ενότητες 4, 5 και 6. Συγκεκριμένα θα εξεταστεί η ακρίβεια και η ποιότητα των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κατάστασης των δύο αυτών μεθόδων σε διάφορες συνθήκες και δίκτυα. Τέλος θα γίνει ποιοτική σύγκριση των δύο τρόπων εκτίμησης κατάστασης και εξέτασης της ορθότητας αποτελεσμάτων.

Η επίλυση της ροής φορτίου έγινε μέσω των υπολογιστικών πακέτων ανοιχτού κώδικα MATPOWER. Τα αρχεία του πακέτου αυτού έχουν την μορφή αρχείων τύπου *.m* (M-files) και χρησιμοποιούνται για την επίλυση της ροής φορτίου καθώς δεν είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων από πραγματικές μονάδες RTU και PMU. Τα αρχεία αυτά περιλαμβάνουν επίσης διάφορα ηλεκτρικά δίκτυα κατά IEEE που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

8.1 Εισαγωγή τοπολογίας του δικτύου

Τα αρχεία MATPOWER παρέχουν την δυνατότητα εύκολης εισαγωγής της τοπολογίας του δικτύου και παραμετροποίηση των στοιχείων του στις επιθυμητές τιμές. Συγκεκριμένα ο χρήστης φορτώνει το επιθυμητό δίκτυο μέσω ενός *.m* αρχείου που περιέχει την ρουτίνα *loadcase()*. Τα διαθέσιμα αρχεία περιλαμβάνονται στον υποφάκελο *data* του πακέτου MATPOWER και έχουν την μορφή *caseX.m* όπου *X* είναι αριθμός χαρακτηριστικός του δικτύου. Η ρουτίνα *loadcase()* δημιουργεί την δομή *mpc* η οποία περιέχει αριθμό πινάκων για την εισαγωγή των επιθυμητών παραμέτρων του ηλεκτρικού δικτύου από τον χρήστη. Οι πιο σημαντικοί πίνακες και οι λειτουργίες τους, για τους σκοπούς της διπλωματικής εργασίας, είναι οι εξής [47]:

- **mpc.baseMVA:** Σε αυτόν τον πίνακα γίνεται η εισαγωγή της βάσης ισχύος ολόκληρου του ηλεκτρικού δικτύου σε MVA. Προεπιλεγμένη τιμή είναι τα 100 MVA.
- **mpc.bus:** Περιέχει την αρίθμηση (BUS_ID) καθώς και το είδος (BUS_TYPE) όλων των ζυγών του δικτύου. Σε αυτόν τον πίνακα ο χρήστης μπορεί να εισάγει και κατανάλωση (PD, QD) σε διάφορα σημεία του δικτύου καθώς και τα εγκάρσια στοιχεία (GS, BS) των ζυγών.
- **mpc.gen:** Περιέχει τους ζυγούς που έχουν εγκατεστημένες γεννήτριες (GEN_BUS) καθώς και την παραγόμενη ενεργό και άεργο ισχύ (PG, QG) που καθορίζεται από τον χρήστη.
- **mpc.branch:** Περιέχει όλες τις συνδέσεις των ζυγών μεταξύ τους (F_BUS, T_BUS). Ο χρήστης μπορεί να εισάγει όλες τις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς και των εγκάρσιων κλάδων (BR_B). Επιπρόσθετα δίνεται η δυνατότητα αλλαγής της ενδιάμεσης λήψης του μετασχηματιστή (TAP) ανάμεσα σε δύο ζυγούς, αν αυτός υπάρχει.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τις παραμέτρους όπως αυτές φαίνονται στο εγχειρίδιο χρήσεως του πακέτου MATPOWER:

Πίνακας 8.1: Παράμετροι ζυγών [47].

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.)

Πίνακας 8.2: Παράμετροι γεννητριών [47]

name	column	description
GEN_BUS	1	bus number
PG	2	real power output (MW)
QG	3	reactive power output (MVar)
QMAX	4	maximum reactive power output (MVar)
QMIN	5	minimum reactive power output (MVar)
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 (MVar)
QC1MAX [*]	14	maximum reactive power output at PC1 (MVar)
QC2MIN [*]	15	minimum reactive power output at PC2 (MVar)
QC2MAX [*]	16	maximum reactive power output at PC2 (MVar)
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) (MVar/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 /MVar)
MU_QMIN [†]	25	Kuhn-Tucker multiplier on lower Q_g limit (u /MVar)

Πίνακας 8.3: Παράμετροι γραμμών μεταφοράς και μετασχηματιστών [47].

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 (MVA _r)
PT [‡]	16	real power injected at “to” bus end (MW)
QT [‡]	17	reactive power injected at “to” bus end (MVA _r)
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)

8.2 Δημιουργία RTU και PMU μετρήσεων

Αφού οριστούν οι παράμετροι της δομής *mpc*, εκτελείται η επίλυση ροής φορτίου για το επιλεγμένο δίκτυο με την ρουτίνα *runpf()* για να γίνουν διαθέσιμες οι τιμές όλων των μέτρων (σε αμ) και γωνιών (σε deg) των ζυγών του δικτύου. Αυτές οι τιμές αποτελούν το πραγματικό διάνυσμα κατάστασης x_{true} το οποίο λαμβάνεται ως διάνυσμα αναφοράς για όλους τους δείκτες απόδοσης. Επιπρόσθετα το MATPOWER υπολογίζει όλες τις ροές ενεργού και αέργου ισχύος του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παράθυρο εντολών (Command Window) του MATLAB[®] μέσω ενσωματωμένου αρχείου του MATPOWER όπως φαίνεται παρακάτω:

```

=====
|      Bus Data      |
=====
Bus      Voltage      Generation      Load
#      Mag (pu)  Ang (deg)      P (MW)  Q (MVAr)  P (MW)  Q (MVAr)
-----
1      1.000      0.000*      200.64   94.82      -        -
2      0.955      -2.677      -        -        50.00    30.00
3      0.937      -3.201      -        -        120.00   80.00
4      0.946      -3.946      -        -        25.00    10.00
-----
Total:      200.64   94.82      195.00   120.00

```

Σχήμα 8.1: Αναφορά μέτρων και γωνιών τάσεων των ζυγών.

Branch Data										
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	Loss (I ² * Z)			
							P (MW)	Q (MVar)		
1	1	2	90.14	37.52	-88.06	-50.40	2.077	6.23		
2	1	3	110.50	57.30	-107.09	-70.54	3.417	10.25		
3	2	3	13.06	9.75	-12.91	-9.46	0.146	0.29		
4	2	4	25.00	10.65	-25.00	-10.00	0.000	0.65		
Total:							5.639	17.42		

Σχήμα 8.2: Αναφορά ροών ενεργού και αέργου ισχύος.

Τα αποτελέσματα της επίλυσης ροής φορτίου αποθηκεύονται σε ξεχωριστή δομή με την ονομασία *results*. Για να παραχθεί το διάγραμμα μετρήσεων θα πρέπει αρχικά να ληφθεί υπόψη ότι οι επιλεγείσες μετρήσεις θα πρέπει να καθιστούν το σύστημα πλήρως παρατηρήσιμο. Οι επιλεγόμενες μετρήσεις παράγονται με προσθήκη κανονικού θορύβου, στα αποτελέσματα της ροής φορτίου. Όσες απαιτούμενες μετρήσεις δεν παράγονται από το πακέτο του MATPOWER, μπορούν να υπολογιστούν από τις εξισώσεις της Ενότητας 6.2 λαμβάνοντας υπόψιν τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων αφού μετατραπούν τα αποτελέσματα της δομής *results* σε καρτεσιανή μορφή. Σε όλη την διάρκεια των δοκιμών γίνεται υπόθεση κανονικής λειτουργίας του δικτύου με τις μόνες αποκλίσεις να προέρχονται αποκλειστικά από τα μετρητικά όργανα. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει την τυπική απόκλιση σ σε κάθε τύπο μετρήσεων ενώ οι αποκλίσεις αυτές ορίζονται από τις παραμέτρους:

- **σ_E , σ_F** : Για τις μετρήσεις φασιθετών από τα PMU.
- **σ_{I_r} , σ_{I_i}** : Για τις μετρήσεις ρευμάτων κλάδων από τα PMU.
- **σ_{V_m}** : Για τις μετρήσεις μέτρων τάσεων από τα RTU
- **$\sigma_{P_{ij}}$, $\sigma_{Q_{ij}}$** : Για τις ροές ισχύς μεταξύ ζυγών από τα RTU.
- **σ_{P_i} , σ_{Q_i}** : Για τις εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς από τα RTU.

Παρόλο που δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να προσθέτει απευθείας κάποια επιθυμητή απόκλιση, αυτό δεν καθιστά εύκολη την δυναμική εκτέλεση των δοκιμών με μεταβαλλόμενες καταστάσεις του δικτύου. Για τον λόγο αυτό, απόκλιση κάθε μέτρησης ορίζεται με τον εξής τρόπο [41]:

$$\sigma_i = \frac{p_{ri} |z_{true,i}|}{3}$$

όπου p_{ri} η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου (0.1% για τα PMU και 1% για τα RTU), και $|z_{true,i}|$ η απόλυτη τιμή της μέτρησης χωρίς θόρυβο προερχόμενη από την επίλυση ροής φορτίου. Το εύρος του θορύβου επιλέχθηκε να είναι τυπικά το διάστημα $[-3\sigma, 3\sigma]$ με εξαίρεση κάποιες περιπτώσεις που εξετάζεται η απόδοση της εκτίμησης κατάστασης με φίλτρο Kalman. Ο θόρυβος αυτός προστίθεται με την ρουτίνα *randn* έτσι ώστε να μοντελοποιηθεί κανονική κατανομή του θορύβου στις μετρήσεις καθώς

και η τυχαιότητα της απόκλισης των μετρήσεων από τις πραγματικές τιμές σύμφωνα με την παρακάτω μέθοδο:

$$\begin{aligned} noise &= randn \\ noise &= \min(noise, 3) \\ noise &= \max(noise, -3) \\ z_i &= z_i^{true} + noise \times \sigma_i \end{aligned}$$

όπου *randn* είναι ρουτίνα της MATLAB® που παράγει την κανονική κατανομή. Με τις εντολές *min* και *max* περιορίζουμε το πιθανό εύρος της *noise* στο $[-3, 3]$ για την προσομοίωση του τυχαίου θορύβου στις μετρήσεις.

Εν συντομία, παράγεται το συνδυασμένο διάνυσμα μετρήσεων με ονομασία z_k το οποίο περιέχει μετρήσεις RTU και PMU ανάλογα τις επιλογές τους χρήστη και έχει την εξής μορφή:

$$z_k = [z_{rtu}, z_{pmu}]^T$$

όπου τα διανύσματα z_{rtu} και z_{pmu} περιέχουν τις μετρήσεις από τα RTU και PMU και παράγονται αυτόματα ανάλογα τις επιλογές του χρήστη.

8.3 Αλγόριθμοι εκτίμησης κατάστασης

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται δύο μεθόδους εκτίμησης κατάστασης, την συμβατική στατική εκτίμηση κατάστασης που λαμβάνει υπόψιν μόνο τις διαθέσιμες μετρήσεις και την δυναμική εκτίμηση κατάστασης με IEKF. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν το διάνυσμα μετρήσεων z_k που παράχθηκε στην Ενότητα 8.2.

Στους επαναληπτικούς αλγορίθμους, αφού αρχικοποιηθεί το διάνυσμα κατάστασης όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 4.6, ορίζεται πρώτα ο πίνακας συναρτήσεων των μετρήσεων $h(x)$ σύμφωνα με τις εξισώσεις της Ενότητας 6.2 και ανάλογα με το είδος των μετρήσεων που επέλεξε ο χρήστης. Στη συνέχεια υπολογίζεται η Ιακωβιανή μήτρα των μετρήσεων με τις εξισώσεις της Ενότητας 6.4 και έπειτα αντιστρέφεται η διαγώνια μήτρα των συνδιασπορών των μετρήσεων R . Στο σημείο αυτό υπολογίζεται και η μήτρα κέρδους G σύμφωνα με την εξίσωση (4.11).

Τέλος αντιστρέφεται η μήτρα κέρδους G έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί τόσο την συμβατική εκτίμηση κατάστασης όσο και στην αρχικοποίηση των παραμέτρων της εκτίμησης με IEKF. Με τα δεδομένα αυτά και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (4.13), και μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση λαμβάνουμε την βέλτιστη εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης \hat{x}_k της εκάστοτε μεθόδου.

Αφού ολοκληρωθεί η εκτίμηση κατάστασης της κλασσικής και της IEKF εκτίμησης κατάστασης, παρουσιάζονται τα μέτρα τάσεων (α.μ.), οι γωνίες (°) όλων των ζυγών του δικτύου καθώς και οι αντίστοιχες αποκλίσεις σε % στο Command Window της MATLAB®. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, δημιουργήθηκε η ρουτίνα

print_results() η οποία δέχεται σαν είσοδο το διάνυσμα εκτιμώμενης κατάστασης του εκάστοτε αλγορίθμου, διαχωρίζει τα μέτρα τάσεων και τις γωνίες και έπειτα τα τυπώνει με τα αντίστοιχα σφάλματα σε ξεχωριστή στήλη. Παρακάτω φαίνεται η μορφή των αποτελεσμάτων για το δίκτυο 14 ζυγών σε κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις και με τις δύο μεθόδους εκτίμησης κατάστασης:

Bus Data									
WLS Estimation			Real Values			Error Estimate			
Bus #	Voltage		Bus #	Voltage		Bus #	Error		
	Mag (pu)	Ang (deg)		Mag (pu)	Ang (deg)		Mag	Ang	
1	1.0526	0.0000	1	1.0600	0.0000	1	-0.6992	NaN	
2	1.0373	-5.0272	2	1.0450	-4.9565	2	-0.7324	1.4253	
3	1.0023	-12.8388	3	1.0100	-12.6328	3	-0.7624	1.6302	
4	1.0184	-10.5189	4	1.0261	-10.3659	4	-0.7479	1.4754	
5	1.0250	-9.0708	5	1.0326	-8.9467	5	-0.7385	1.3871	
6	1.0623	-15.0913	6	1.0700	-14.8794	6	-0.7150	1.4240	
7	1.0372	-13.6510	7	1.0448	-13.4503	7	-0.7251	1.4923	
8	1.0825	-13.6510	8	1.0900	-13.4503	8	-0.6867	1.4923	
9	1.0199	-15.2949	9	1.0276	-15.0699	9	-0.7505	1.4931	
10	1.0198	-15.5464	10	1.0275	-15.3181	10	-0.7503	1.4904	
11	1.0372	-15.4303	11	1.0449	-15.2134	11	-0.7390	1.4252	
12	1.0453	-15.9420	12	1.0530	-15.7197	12	-0.7319	1.4140	
13	1.0384	-15.9678	13	1.0462	-15.7383	13	-0.7442	1.4585	
14	1.0096	-16.6419	14	1.0174	-16.3940	14	-0.7669	1.5121	

Σχήμα 8.3: Αποτελέσματα κλασσικής εκτίμησης κατάστασης για το δίκτυο 14 ζυγών για κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις.

Bus Data									
Kalman Estimation			Real Values			Error Estimate			
Bus #	Voltage		Bus #	Voltage		Bus #	Error		
	Mag (pu)	Ang (deg)		Mag (pu)	Ang (deg)		Mag	Ang	
1	1.0571	0.0000	1	1.0600	0.0000	1	-0.2728	NaN	
2	1.0420	-4.9835	2	1.0450	-4.9565	2	-0.2886	0.5450	
3	1.0070	-12.7241	3	1.0100	-12.6328	3	-0.3004	0.7226	
4	1.0231	-10.4249	4	1.0261	-10.3659	4	-0.2945	0.5684	
5	1.0296	-8.9901	5	1.0326	-8.9467	5	-0.2889	0.4852	
6	1.0669	-14.9577	6	1.0700	-14.8794	6	-0.2911	0.5267	
7	1.0418	-13.5282	7	1.0448	-13.4503	7	-0.2852	0.5792	
8	1.0869	-13.5282	8	1.0900	-13.4503	8	-0.2822	0.5792	
9	1.0246	-15.1573	9	1.0276	-15.0699	9	-0.2953	0.5804	
10	1.0245	-15.4066	10	1.0275	-15.3181	10	-0.2950	0.5775	
11	1.0419	-15.2938	11	1.0449	-15.2134	11	-0.2948	0.5283	
12	1.0499	-15.8011	12	1.0530	-15.7197	12	-0.2945	0.5180	
13	1.0431	-15.8267	13	1.0462	-15.7383	13	-0.3011	0.5620	
14	1.0144	-16.4919	14	1.0174	-16.3940	14	-0.3027	0.5975	

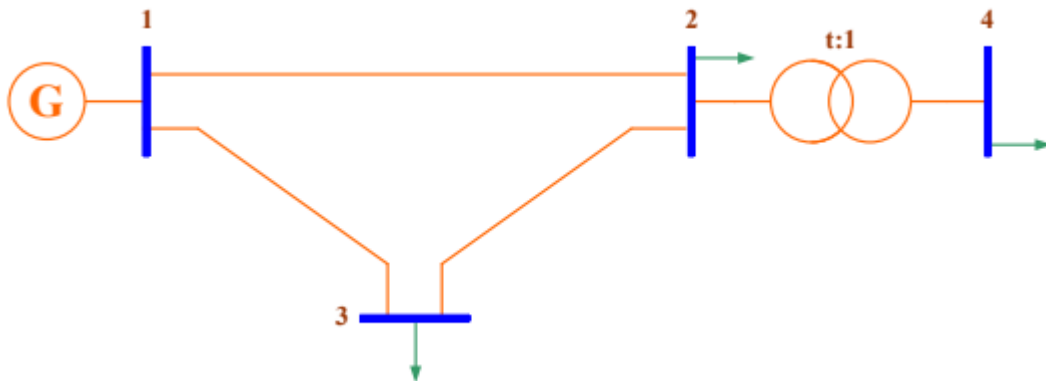
Σχήμα 8.4: Αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης με IEKF για το δίκτυο 14 ζυγών για κανονική λειτουργία με αξιόπιστες μετρήσεις.

8.4 Περιγραφή δοκιμών

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της βελτιωμένης απόδοσης του αλγορίθμου με χρήση του φίλτρου Kalman σε σχέση με την συμβατική εκτίμηση κατάστασης. Τα δίκτυα που αξιοποιούνται για τις δοκιμές είναι 4 ζυγών (ιδιοκατασκευή), 9 ζυγών (IEEE 9-bus system) και 14 ζυγών (IEEE 14-bus system), τα οποία περιλαμβάνονται στο πακέτο λογισμικού MATPOWER. Δοκιμάζονται διάφορα επίπεδα θορύβου μετρήσεων και σενάρια εσφαλμένων δεδομένων (bad data) και παράγονται γραφικές παραστάσεις που παρουσιάζουν τους δείκτες που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 7. Τα bad data προστίθενται πάντα την χρονική στιγμή $time_sample = 10$ ενώ παύουν να ισχύουν την χρονική στιγμή $time_sample = 30$. Για τον υπολογισμό των δεικτών επίδοσης, πραγματοποιήθηκαν 400 δοκιμές Monte Carlo για κάθε αλγόριθμο υπό εξέταση με προσθήκη τυχαίου θορύβου στις μετρήσεις. Ακολούθως γίνεται μια περιγραφή των δικτύων δοκιμών, και παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τοπολογίες.

8.4.1 Δίκτυο 4 ζυγών

Το παρακάτω δίκτυο αποτελεί κομμάτι εξαμηνιαίας εργασίας του συγγραφέα πάνω στο οποίο έγιναν αρχικές δοκιμές του αλγορίθμου εκτίμησης με IEKF. Το δίκτυο αυτό έχει την εξής μορφή:



Σχήμα 8.5: Δίκτυο 4 ζυγών.

Τα επιμέρους στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου 4 ζυγών παρουσιάζονται παρακάτω :

- **Βάση ισχύος:** 100 MVA
- **Δεδομένα κλάδων:**

Πίνακας 8.4: Δεδομένα κλάδων δικτύου 4 ζυγών.

Από ζυγό	Προς ζυγό	R(α.μ)	X(α.μ)	Συνολικό B (α.μ)	Λόγος t (α.μ)
1	2	0.02	0.06	0.02	-
1	3	0.02	0.06	0.25	-
2	3	0.05	0.10	0.00	-
2	4	0.00	0.08	0.00	1.00

- **Φορτία:**

$$S_{D2} = 0.50 + j0.30 \text{ α. μ.}$$

$$S_{D3} = 1.20 + j0.80 \text{ α. μ.}$$

$$S_{D4} = 0.25 + j0.10 \text{ α. μ.}$$

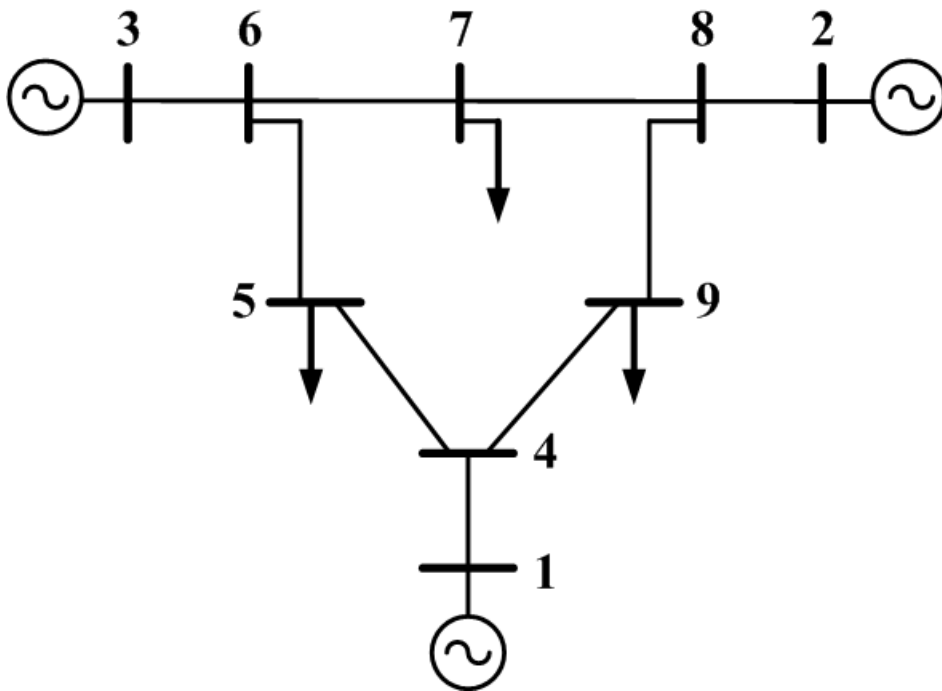
- **Γεννήτριες:**

$$V_1 = 1.0000 \text{ α. μ.}, \delta_1 = +0.0000 \text{ rad (Ο ζυγός 1 είναι ζυγός αναφοράς).}$$

Τοποθετείται μια μονάδα RTU στον ζυγό 2 και ανάλογα την δοκιμή προστίθενται μονάδες PMU.

8.4.2 Δίκτυο 9 ζυγών

Το δίκτυο αυτό περιέχεται στον υπο-φάκελο data του MATPOWER με την ονομασία *case9.m*. Το δίκτυο αυτό, με επίσημη ονομασία IEEE 09 Bus System από το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), αποτελεί βάση για ερευνητικές εφαρμογές και περιέχει αρκετά αντιπροσωπευτικά στοιχεία ενός πραγματικού ΣΗΕ. Στο Σχήμα 8.6 φαίνεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου 9 ζυγών.



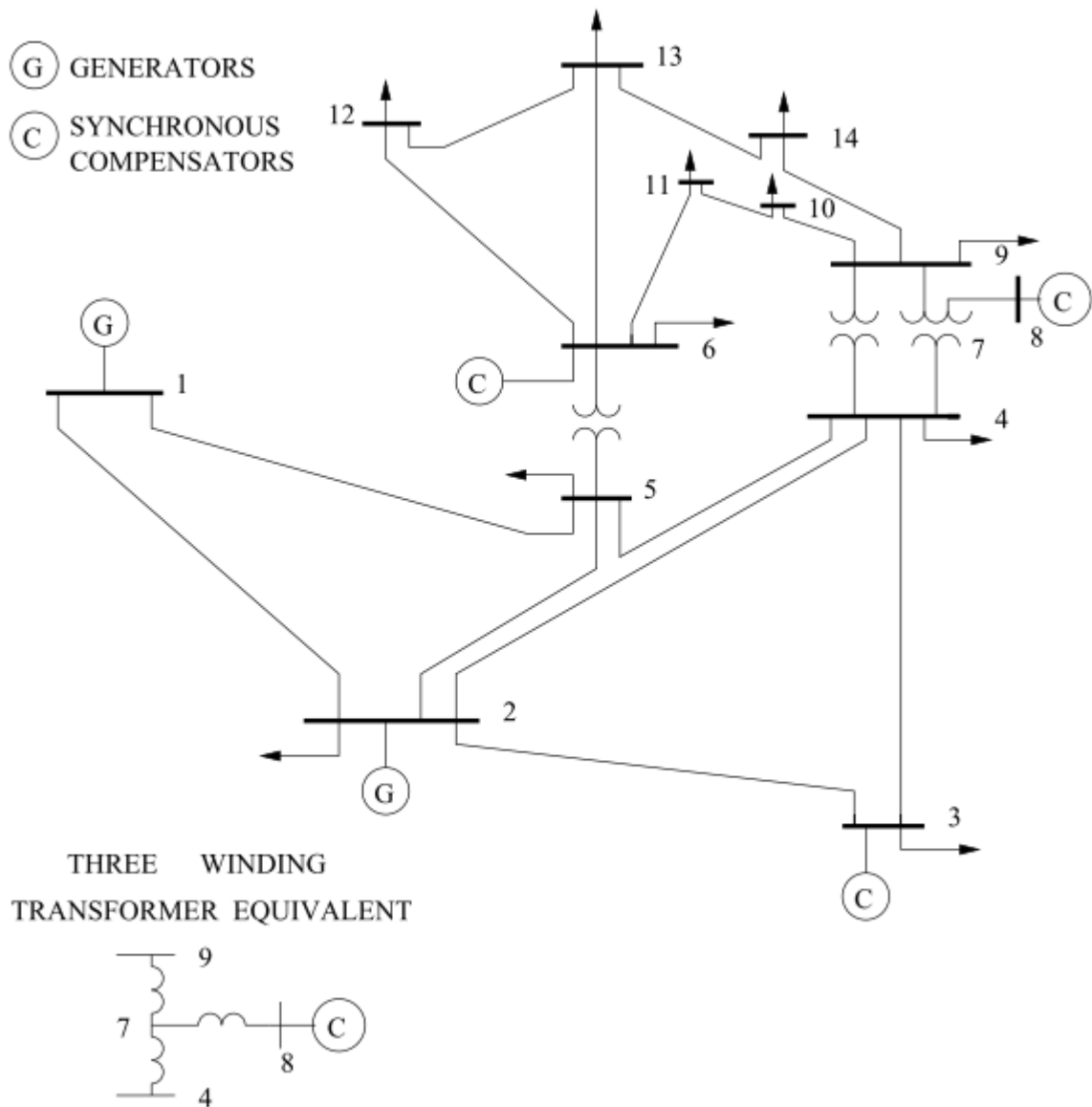
Σχήμα 8.6: Δίκτυο 9 ζυγών.

Οι μονάδες RTU είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς 4, 8 και 9. Ανάλογα με την περίπτωση δοκιμής προστίθενται μονάδες PMU στο δίκτυο.

8.4.3 Δίκτυο 14 ζυγών

Το δίκτυο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως για έρευνα εφαρμογών στα ΣΗΕ. Βρίσκεται στον υπο-φάκελο data με την ονομασία *case14.m*. Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 8.7. Οι συμβατικές μονάδες RTU είναι

τοποθετημένες στους ζυγούς 2, 6, 8 και 9, ενώ επιπλέον μονάδες PMU τοποθετούνται κατά περίπτωση.



Σχήμα 8.7: Δίκτυο 14 ζυγών.

8.5 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αλγορίθμου που επιτελεί την εκτίμηση κατάστασης με χρήση φίλτρου Kalman. Συγκεκριμένα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης με το ΙΕΚF για το μη γραμμικό μοντέλο υβριδικής εκτίμησης. Τα αποτελέσματα αυτά θα συγκριθούν με αυτά της κλασικής εκτίμησης κατάστασης σε κοινή γραφική παράσταση για κάθε περίπτωση δοκιμής. Σε όλες τις περιπτώσεις αναγράφονται οι συνθήκες προσομοίωσης καθώς και οι τυχόν προσθήκες μονάδων PMU επιπρόσθετα των RTU που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 8.4.

8.5.1 Αποτελέσματα δικτύου 4 ζυγών

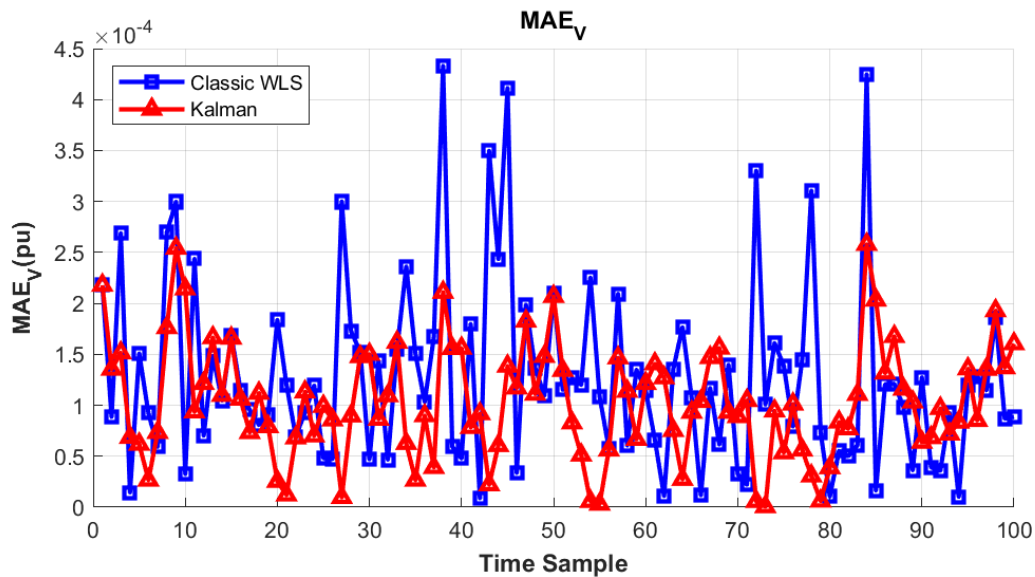
Για το δίκτυο 4 ζυγών εξετάζονται δοκιμές με μετρήσεις χωρίς και με bad data και παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των δεικτών επίδοσης των εκτιμητών κατάστασης.

8.5.1.1 Μετρήσεις χωρίς bad data

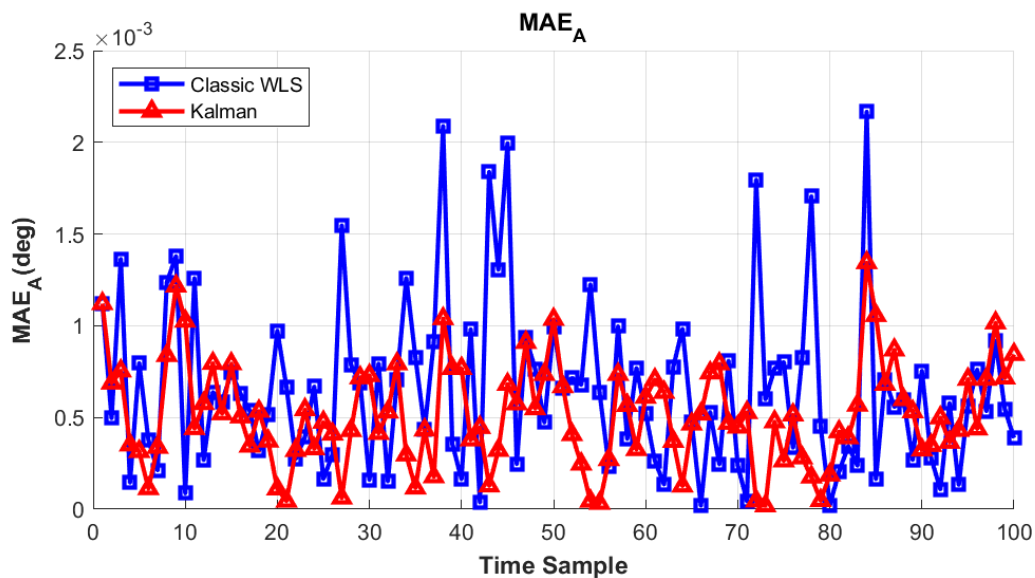
Οι συνθήκες της 1^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στον ζυγό 2.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

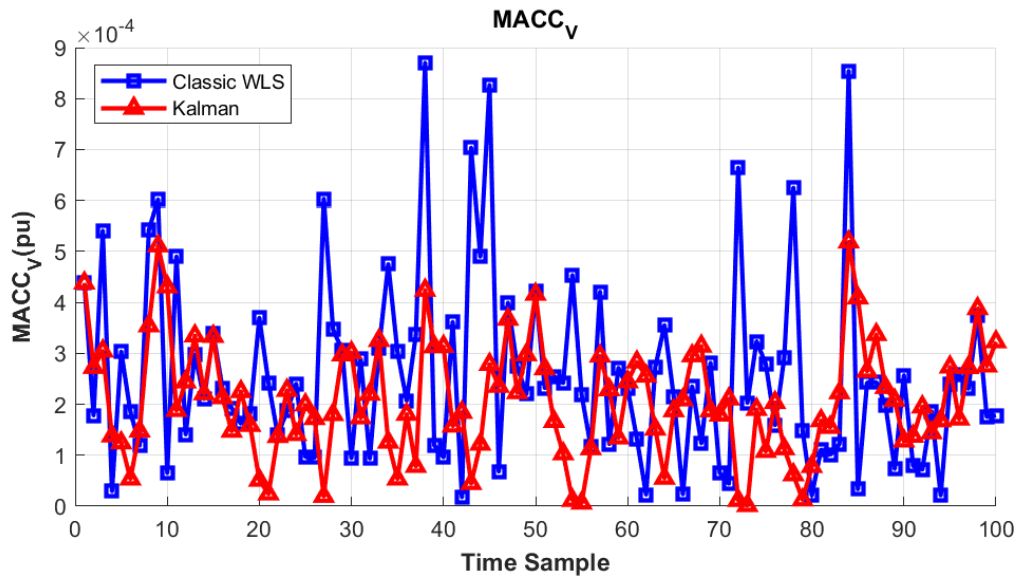
Οι γραφικές παραστάσεις της 1^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



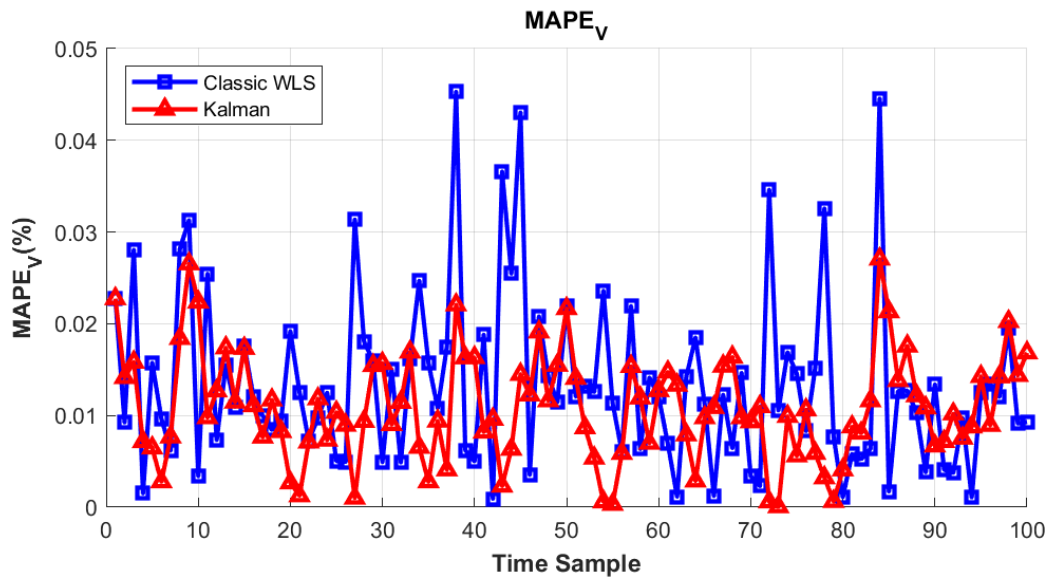
Σχήμα 8.8: Δείκτης MAE_V 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.9: Δείκτης MAE_A 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.10: Δείκτης $MACC_V$ 1ης δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

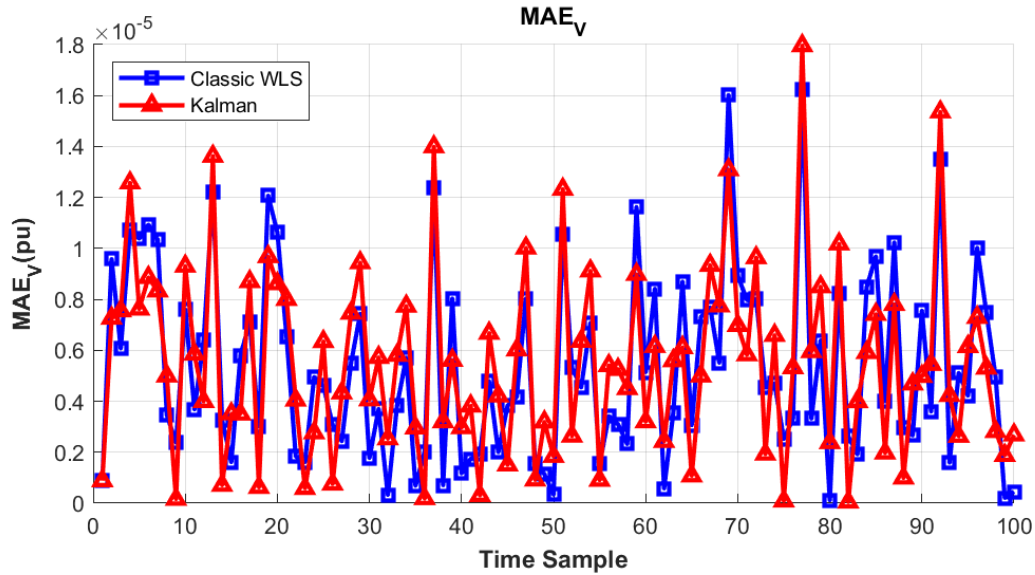


Σχήμα 8.11: Δείκτης $MAPE_V$ 1ης δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

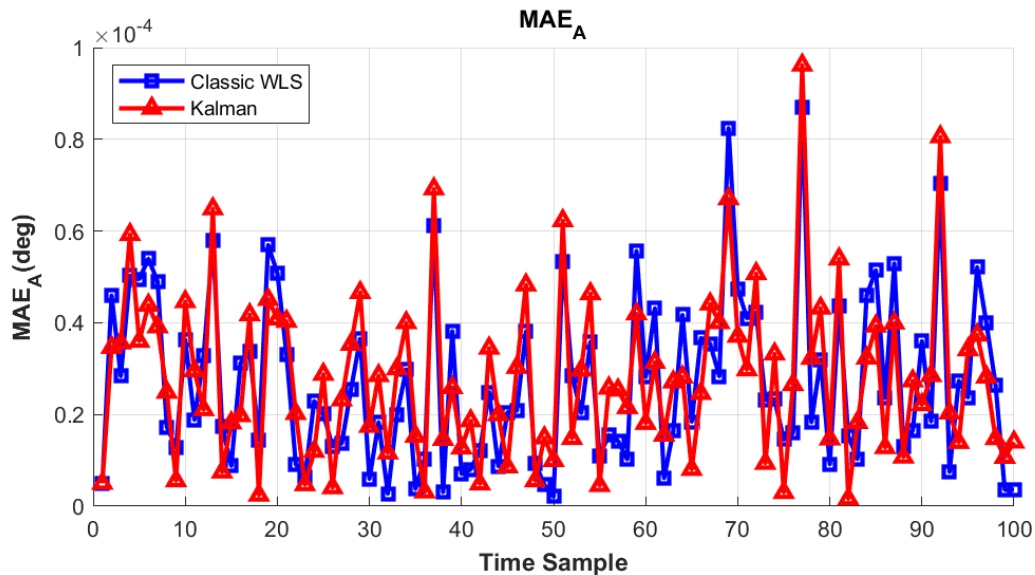
Οι συνθήκες της 2^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στον ζυγό 2.
- PMU στον ζυγό 3.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

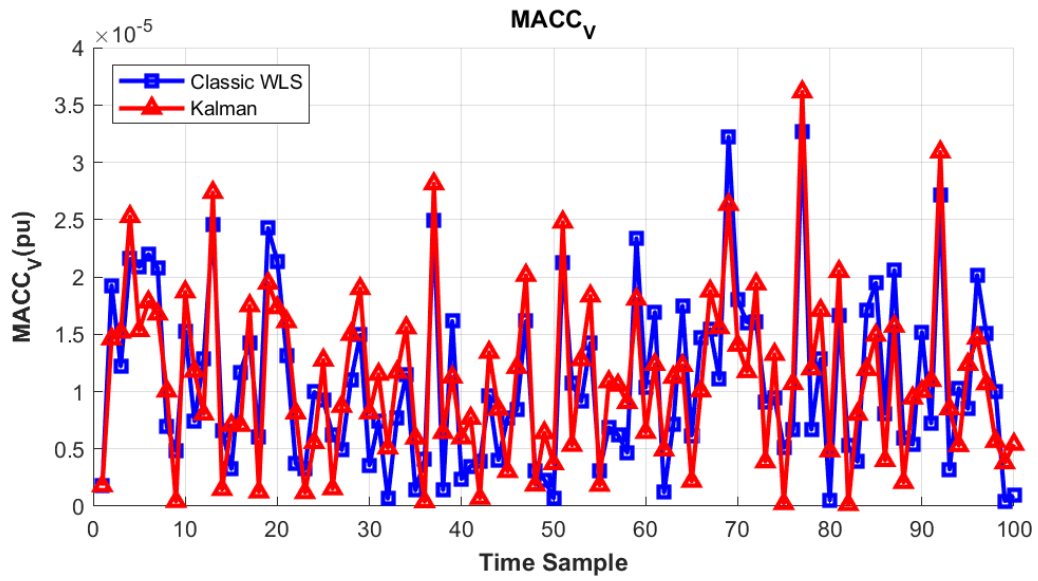
Τα αποτελέσματα της 2^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



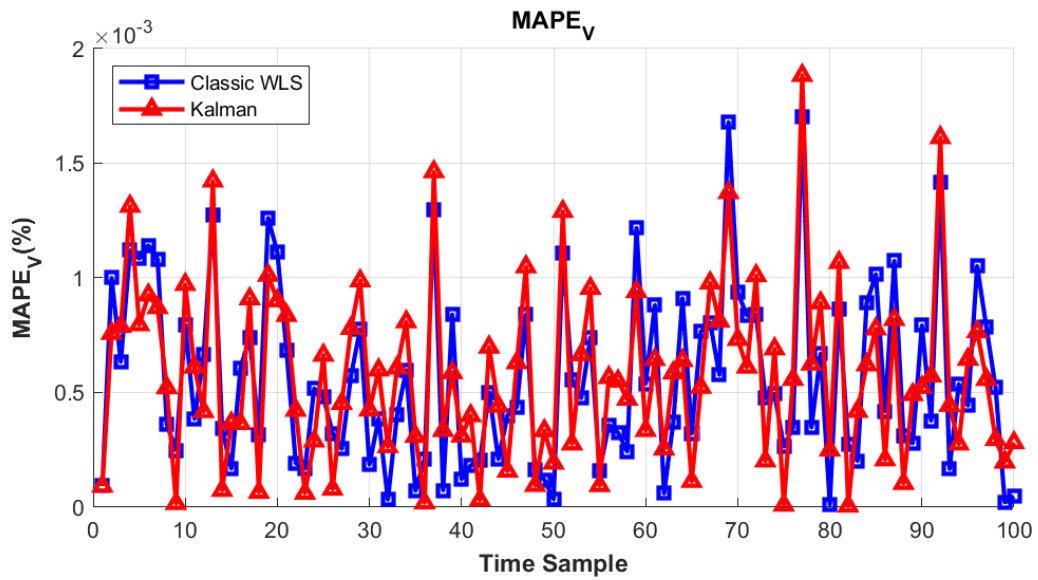
Σχήμα 8.12: : Δείκτης MAE_V 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.13: Δείκτης MAE_A 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.14: Δείκτης $MACC_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



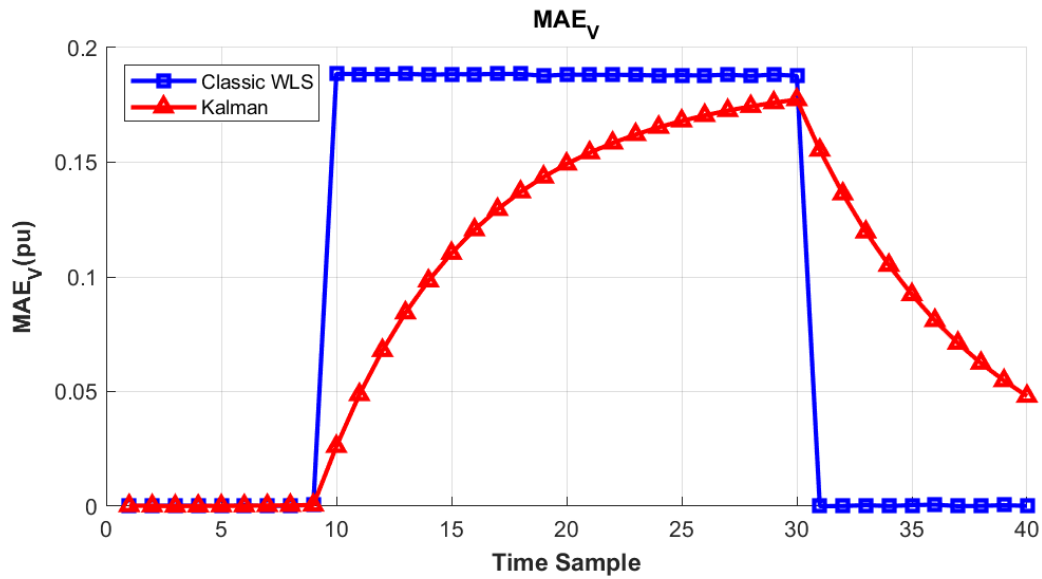
Σχήμα 8.15: Δείκτης $MAPE_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

8.5.1.2 Μετρήσεις με bad data

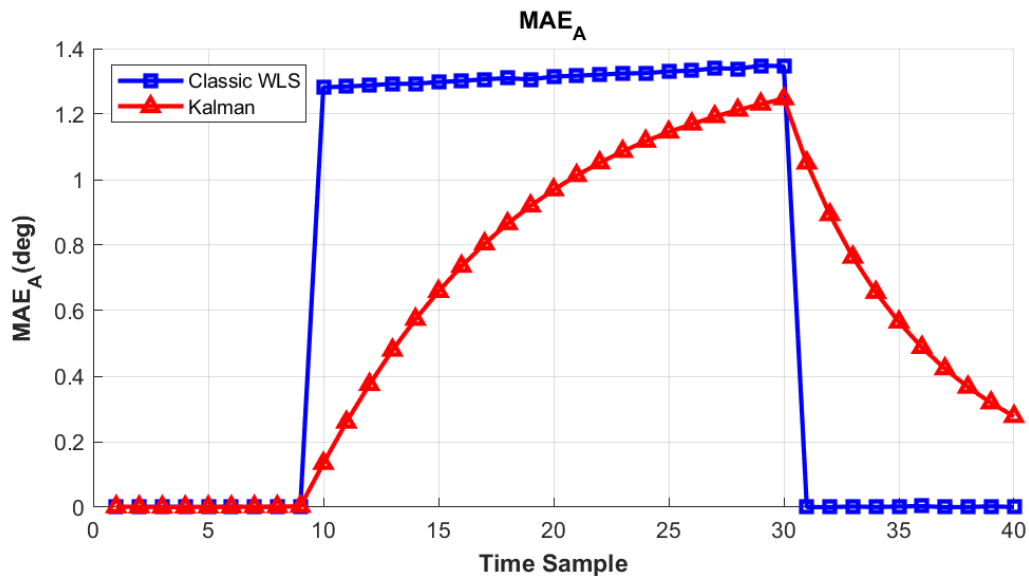
Οι συνθήκες της 3^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στον ζυγό 2.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη μέτρηση μέτρου τάσης ζυγού 2 κατά -20%.

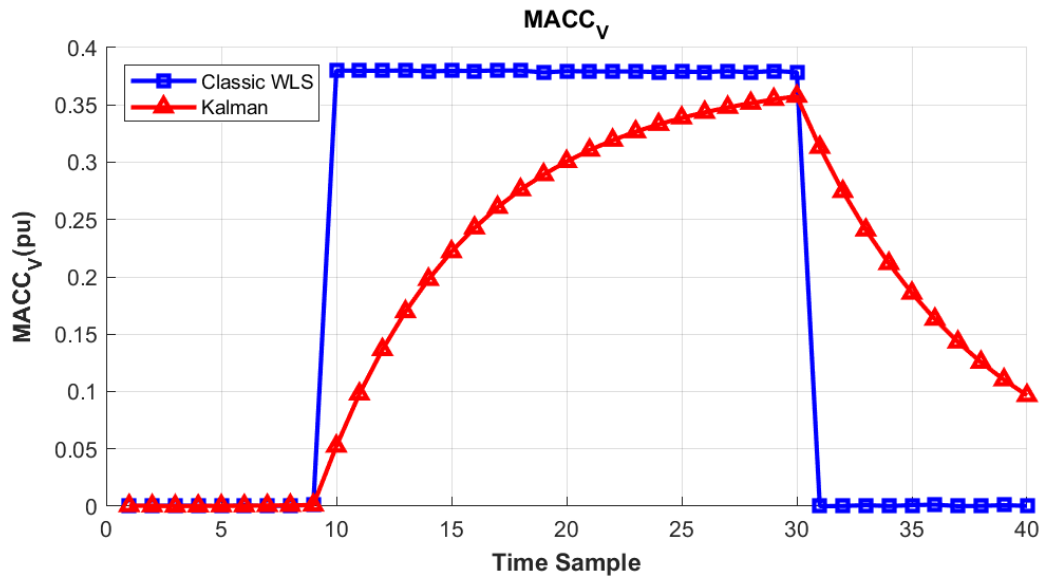
Τα αποτελέσματα της 3^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



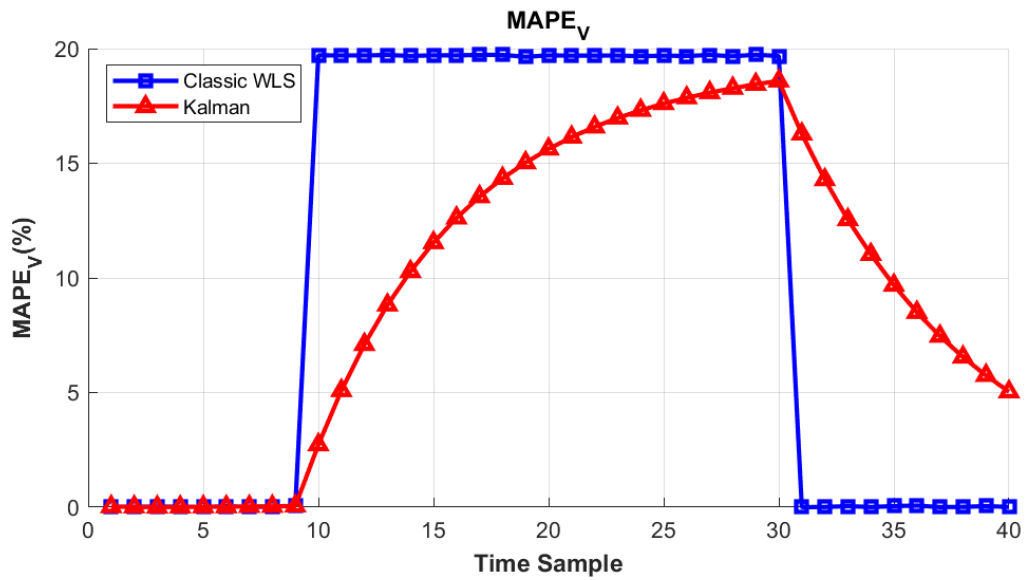
Σχήμα 8.16: Δείκτης MAE_V 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.17: Δείκτης MAE_A 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.18: Δείκτης $MACC_V$ 3ης δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

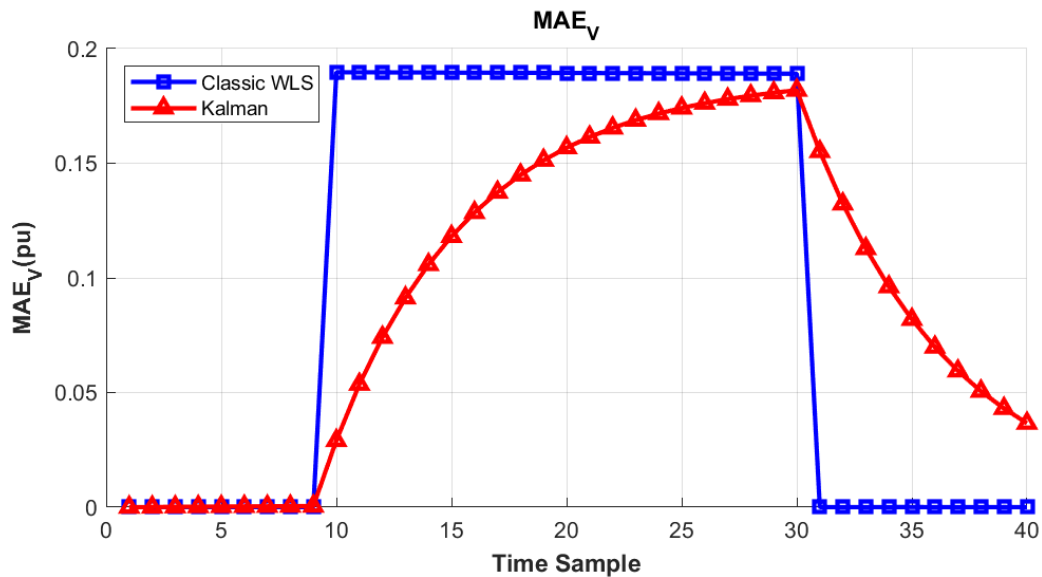


Σχήμα 8.19: Δείκτης $MAPE_V$ 3ης δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

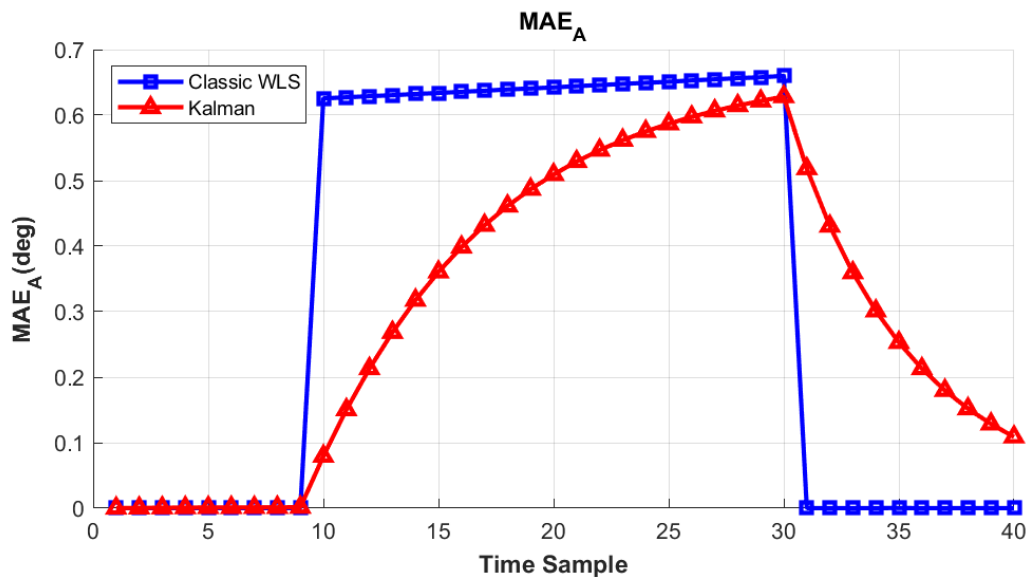
Οι συνθήκες της 4^{ης} δοκιμής είναι:

- PMU στον ζυγό 2.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη μέτρηση πραγματικού μέρους φασιθέτη τάσης ζυγού 2 κατά -20%

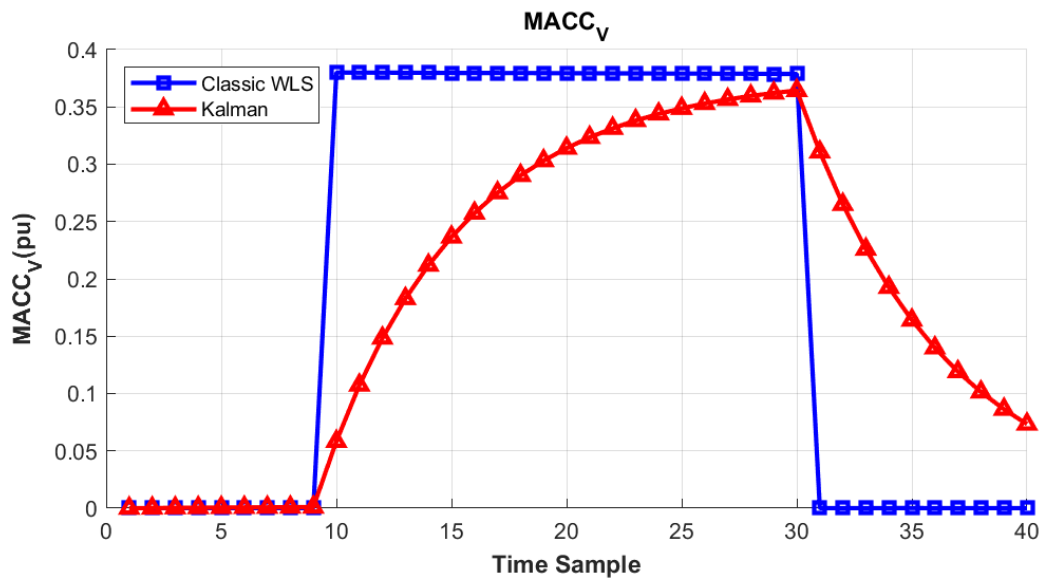
Τα αποτελέσματα της 4^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



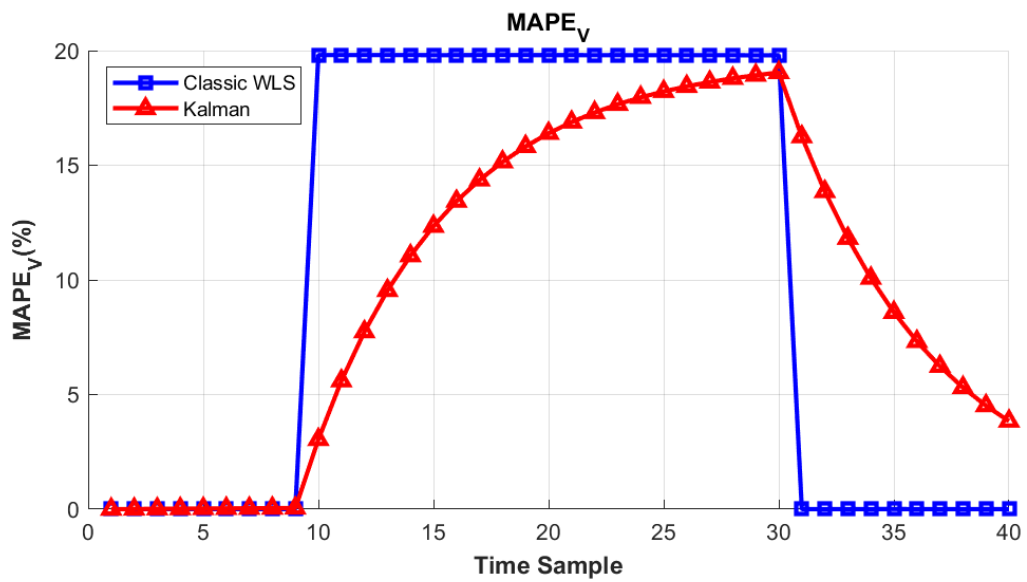
Σχήμα 8.20: Δείκτης MAE_V 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.21: Δείκτης MAE_A 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.22: Δείκτης $MACC_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).



Σχήμα 8.23: Δείκτης $MAPE_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 4 ζυγών).

8.5.2 Αποτελέσματα δικτύου 9 ζυγών

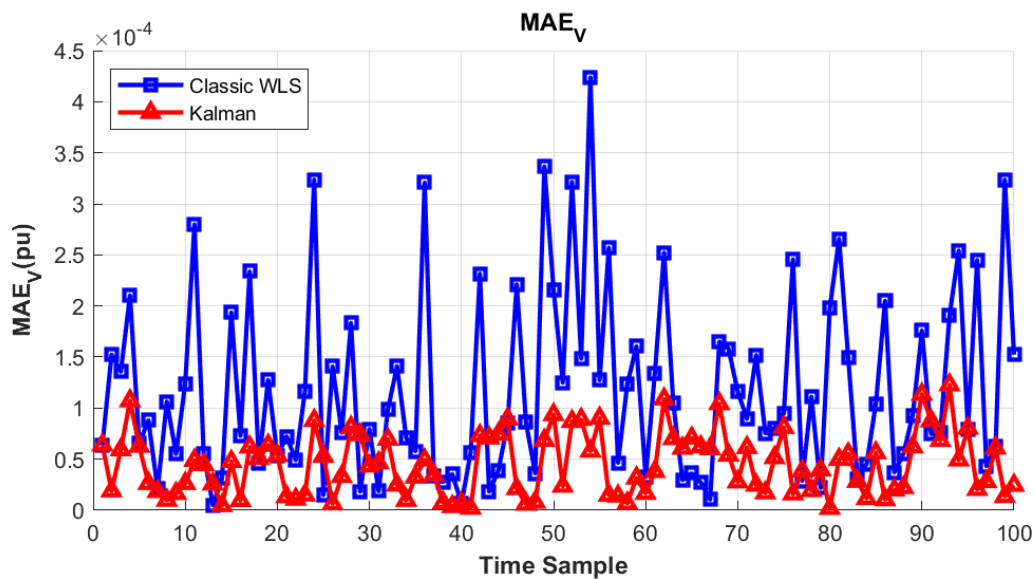
Ομοίως με το δίκτυο 4 ζυγών, δοκιμάζονται περιπτώσεις με αξιόπιστες μετρήσεις και μετρήσεις με bad data.

8.5.2.1 Μετρήσεις χωρίς bad data

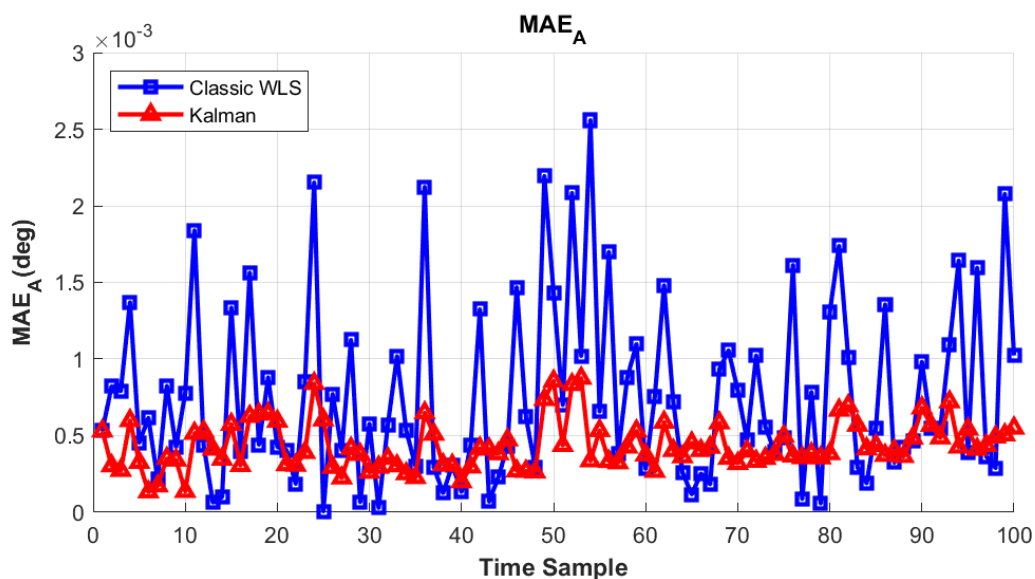
Οι συνθήκες της 1^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στου ζυγούς 4, 6 και 8.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

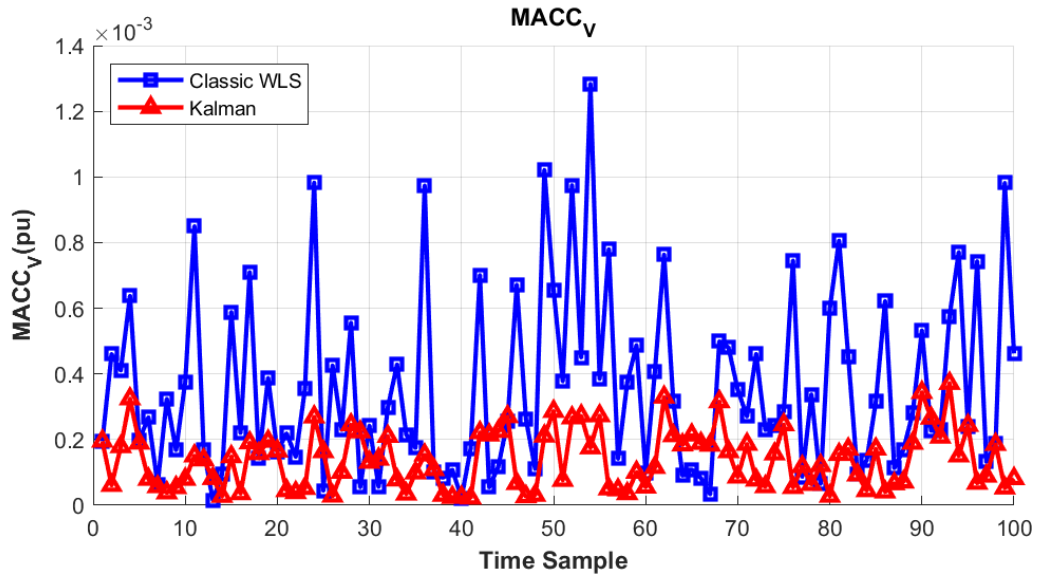
Οι γραφικές παραστάσεις της 1^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



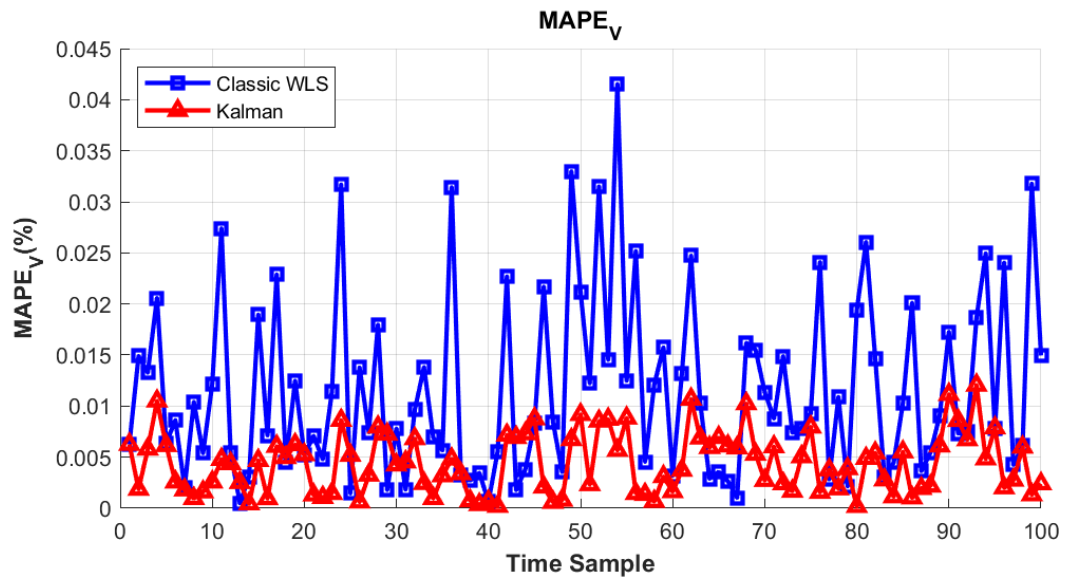
Σχήμα 8.24: Δείκτης MAE_V 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.25: Δείκτης MAE_A 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.26: Δείκτης $MACC_V$ 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

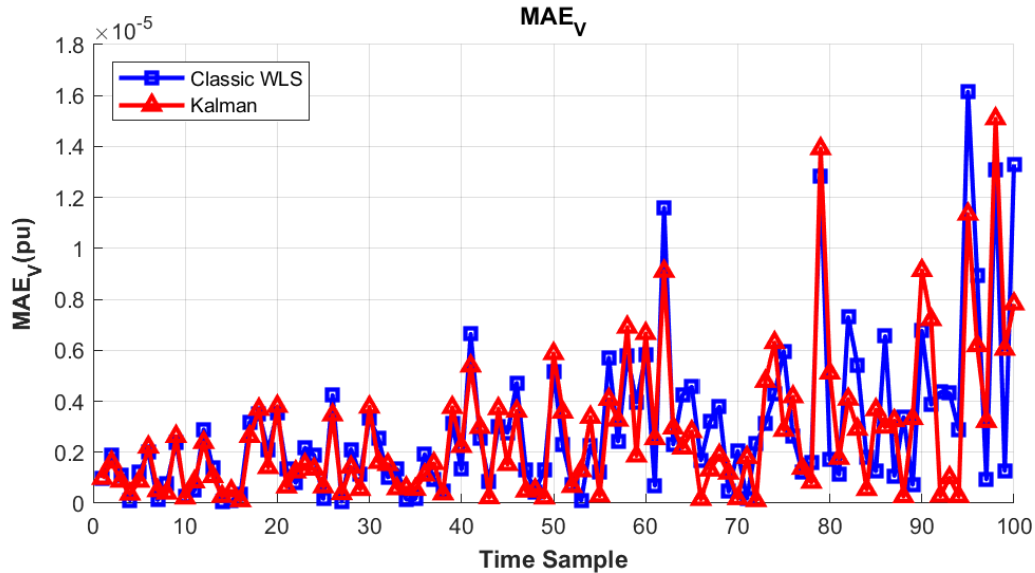


Σχήμα 8.27: Δείκτης $MAPE_V$ 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

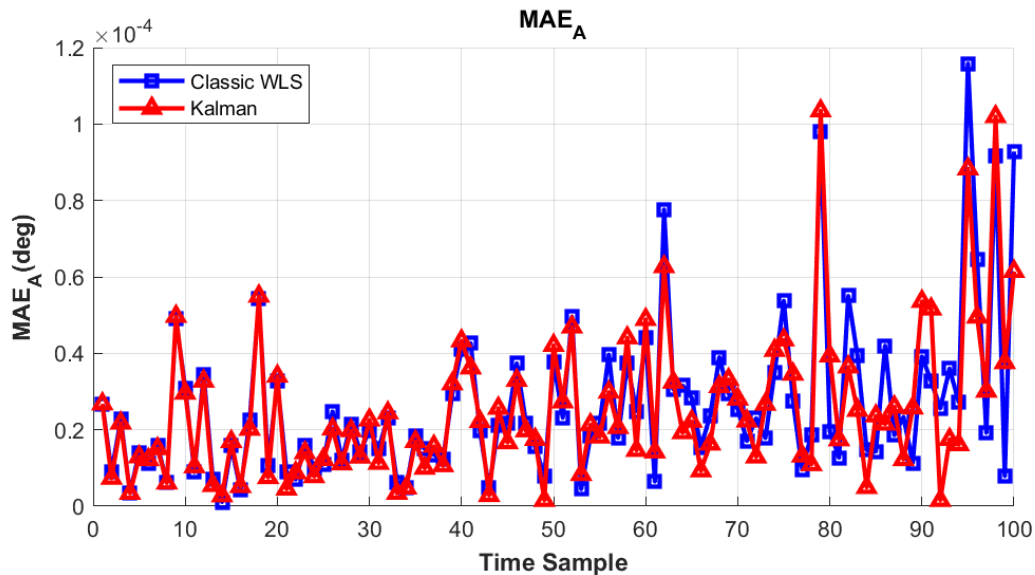
Οι συνθήκες της 2^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στου ζυγούς 4, 6 και 8.
- PMU στον ζυγό 7.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

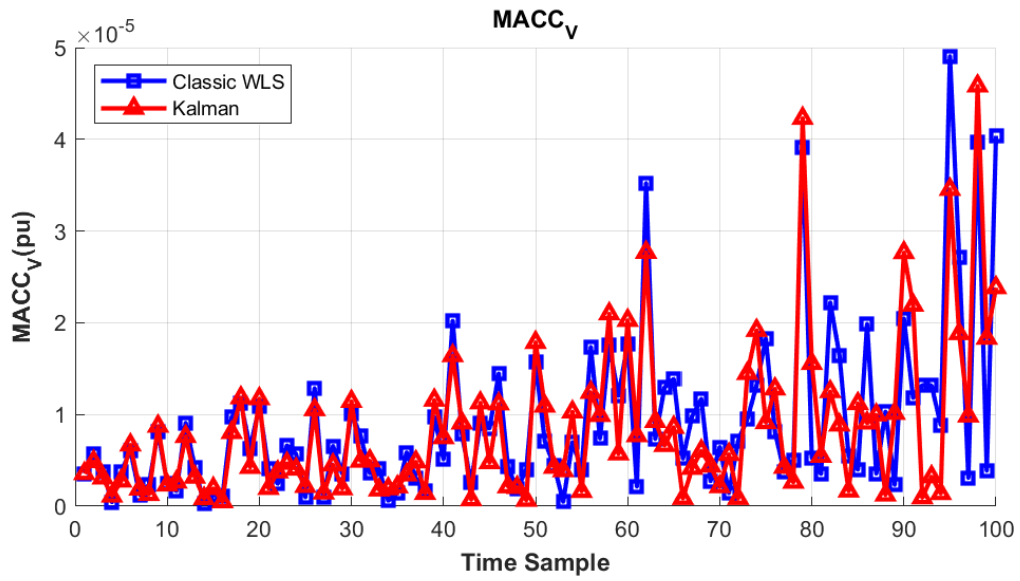
Οι γραφικές παραστάσεις της 2^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



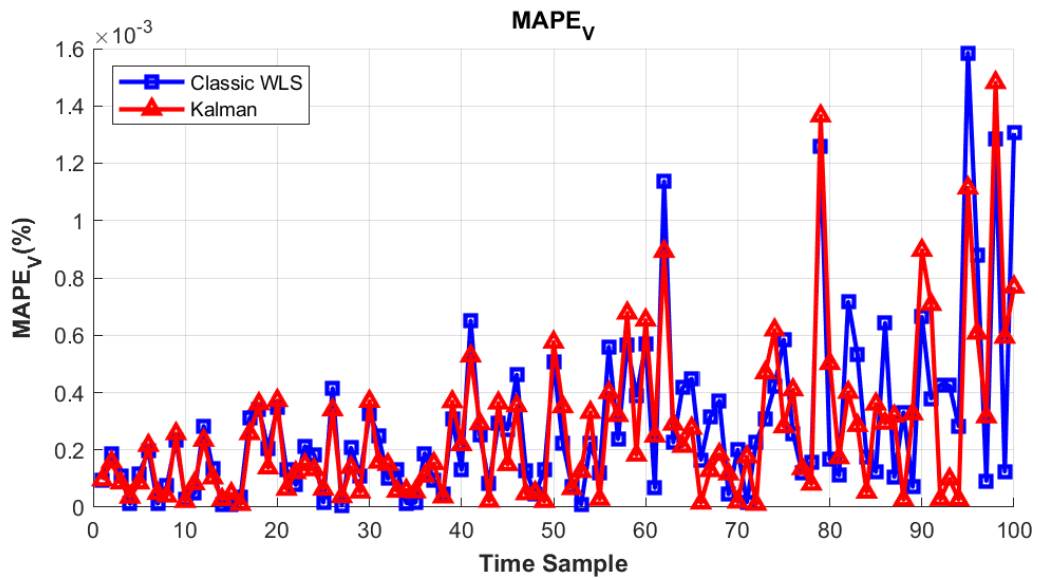
Σχήμα 8.28: Δείκτης MAE_V 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.29: Δείκτης MAE_A 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.30: Δείκτης $MACC_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



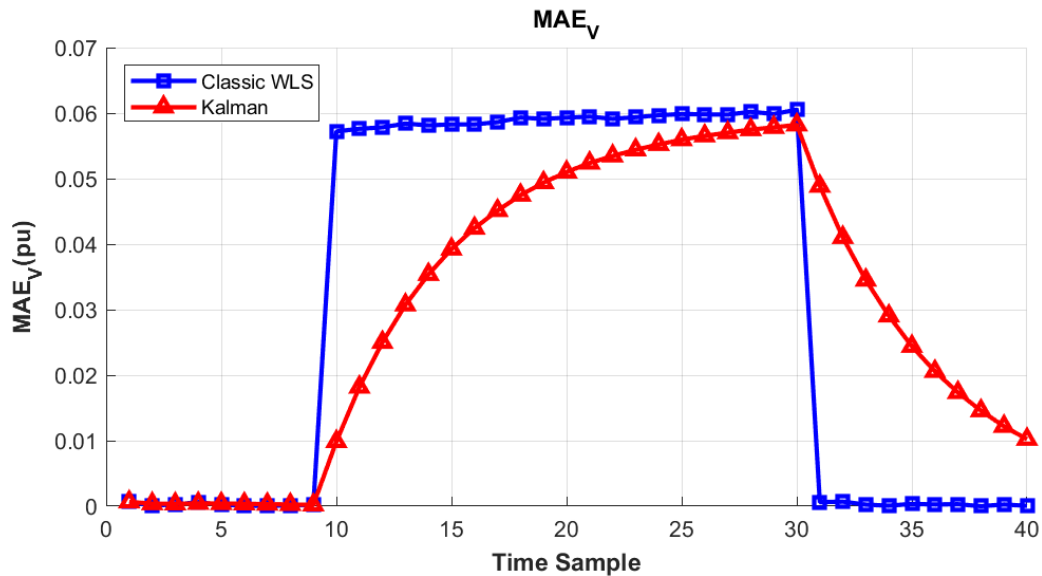
Σχήμα 8.31: Δείκτης $MAPE_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

8.5.2.2 Μετρήσεις με bad data

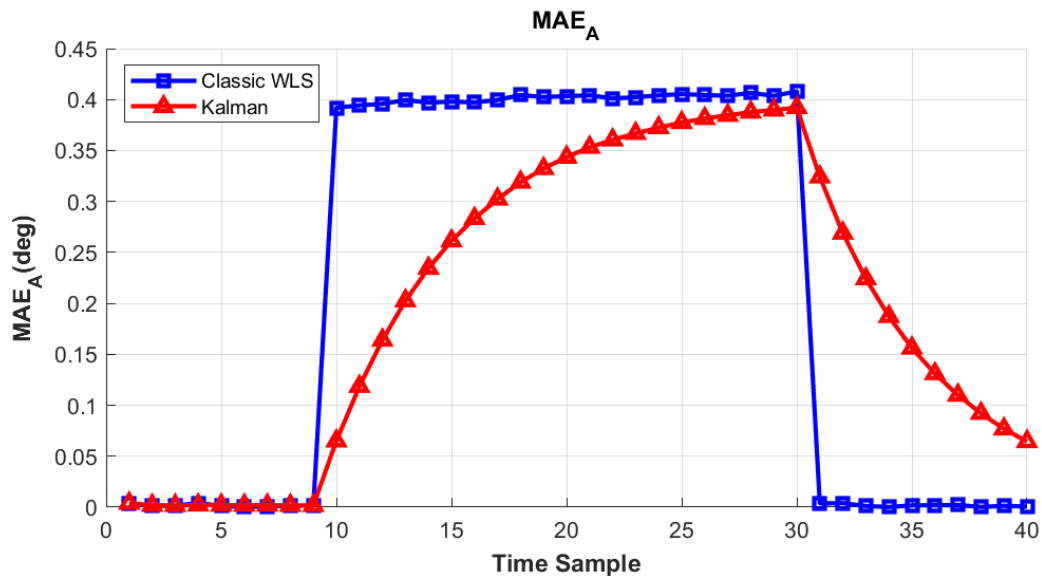
Οι συνθήκες της 3^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στους ζυγούς 4, 6 και 8.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη μέτρηση μέτρου τάσης ζυγού 4 κατά -20%.

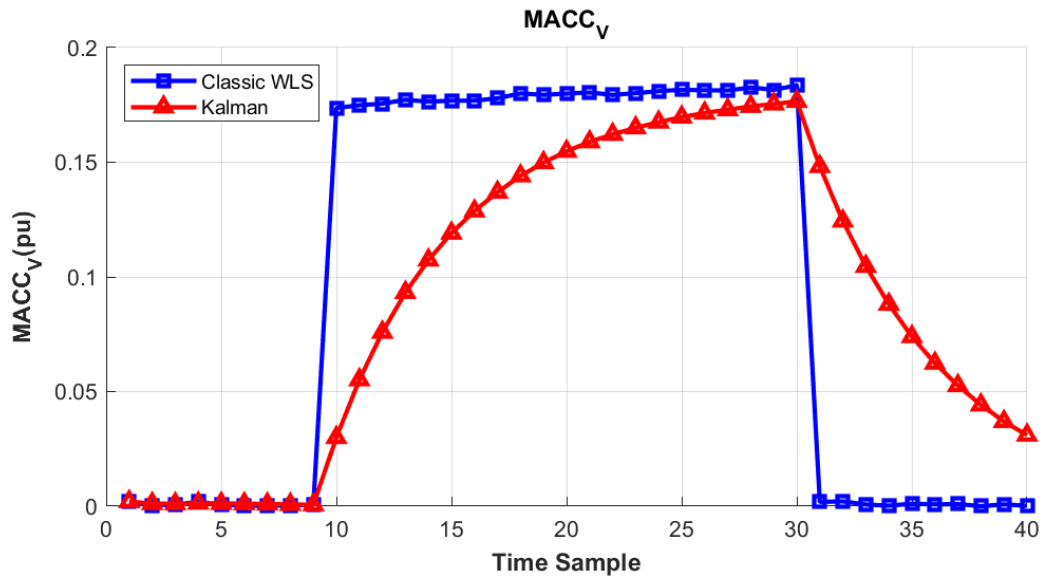
Οι γραφικές παραστάσεις της 3^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



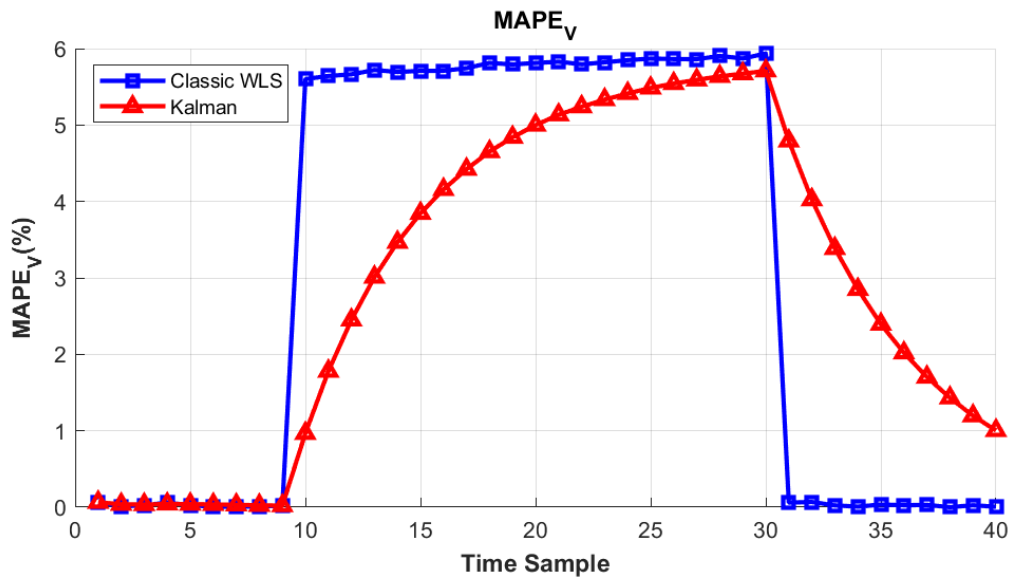
Σχήμα 8.32: Δείκτης MAE_V 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.33: Δείκτης MAE_A 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.34: Δείκτης $MACC_V$ 3ης δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

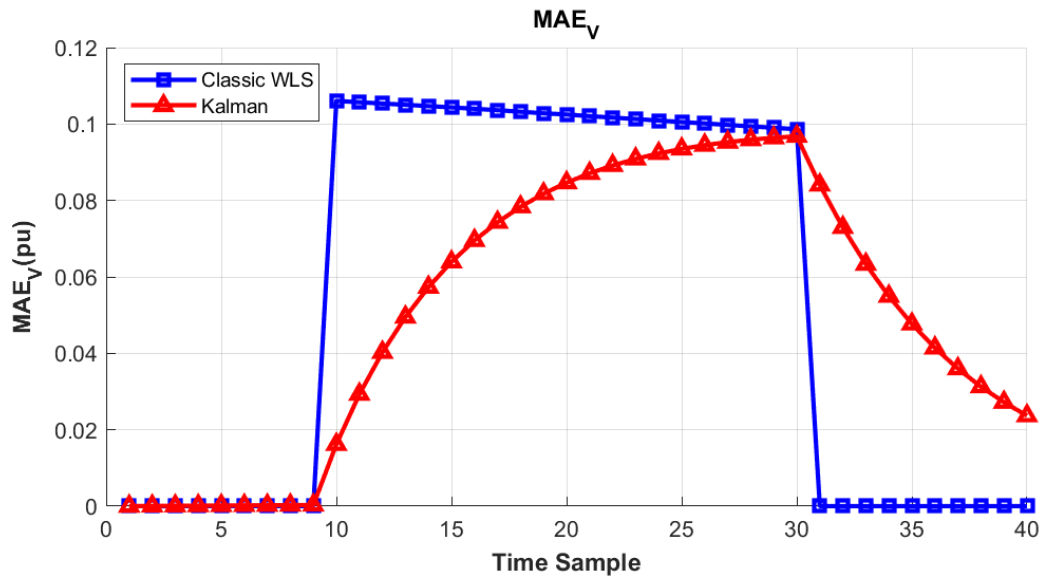


Σχήμα 8.35: Δείκτης $MAPE_V$ 3ης δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

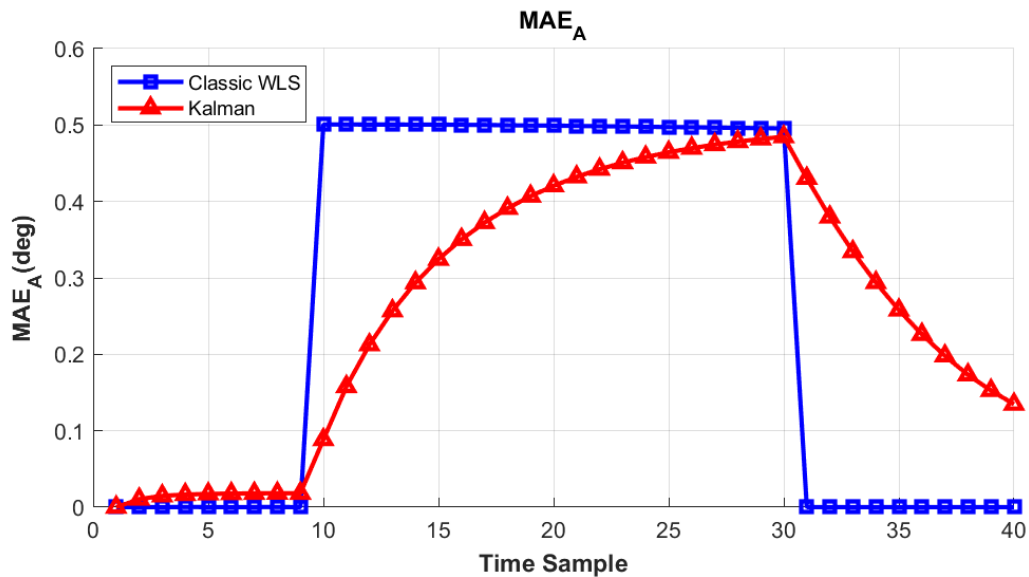
Οι συνθήκες της 4^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στου ζυγούς 4, 6 και 8.
- PMU στον ζυγό 7.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη των ροών ισχύος P_{41} , P_{45} , P_{49} , Q_{41} , Q_{45} , Q_{49} κατά -20%.

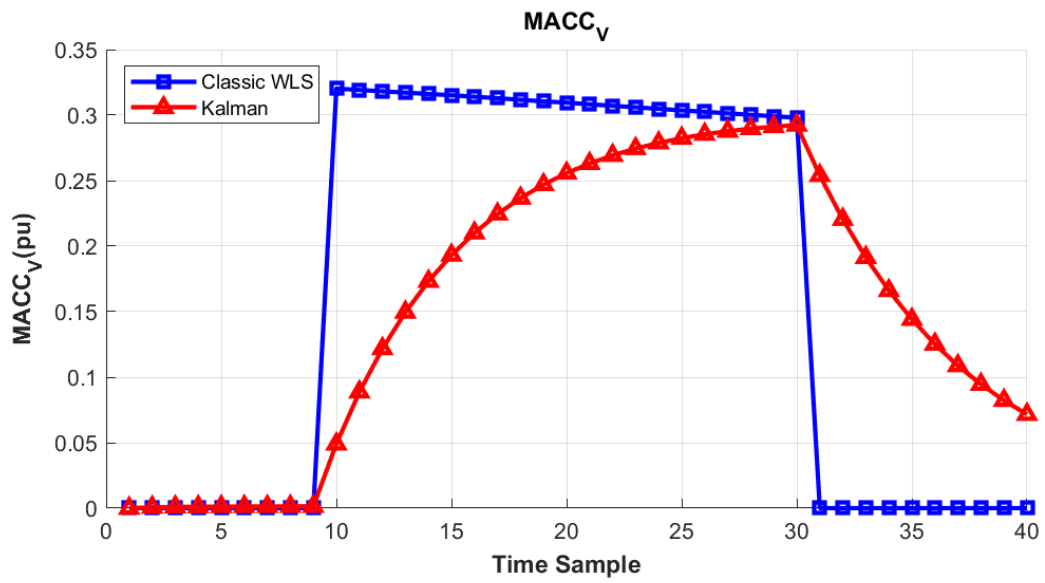
Οι γραφικές παραστάσεις της 4^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



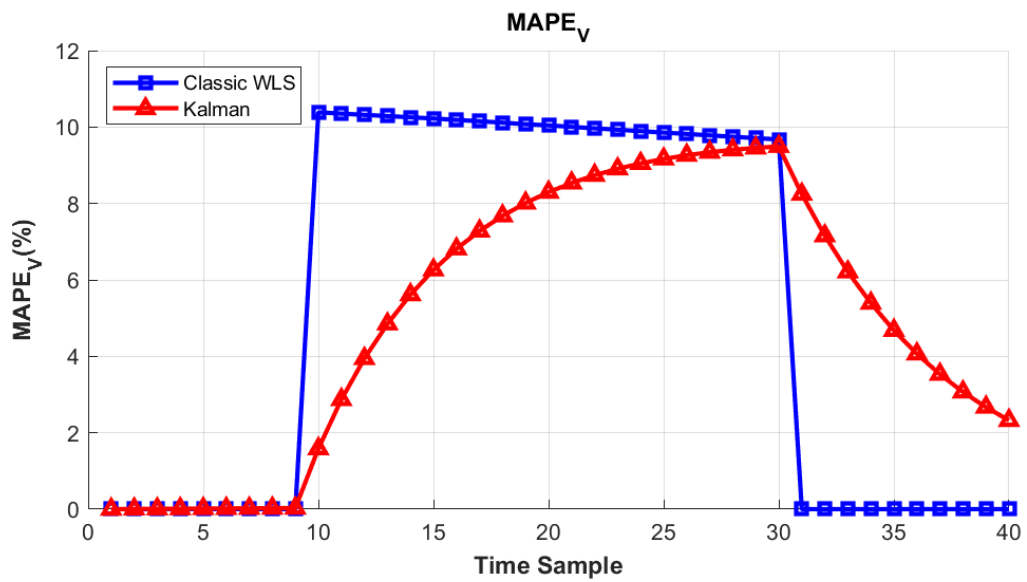
Σχήμα 8.36: Δείκτης MAE_V 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.37: Δείκτης MAE_A 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.38: Δείκτης $MACC_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).



Σχήμα 8.39: Δείκτης $MAPE_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 9 ζυγών).

8.5.3 Αποτελέσματα δικτύου 14 ζυγών

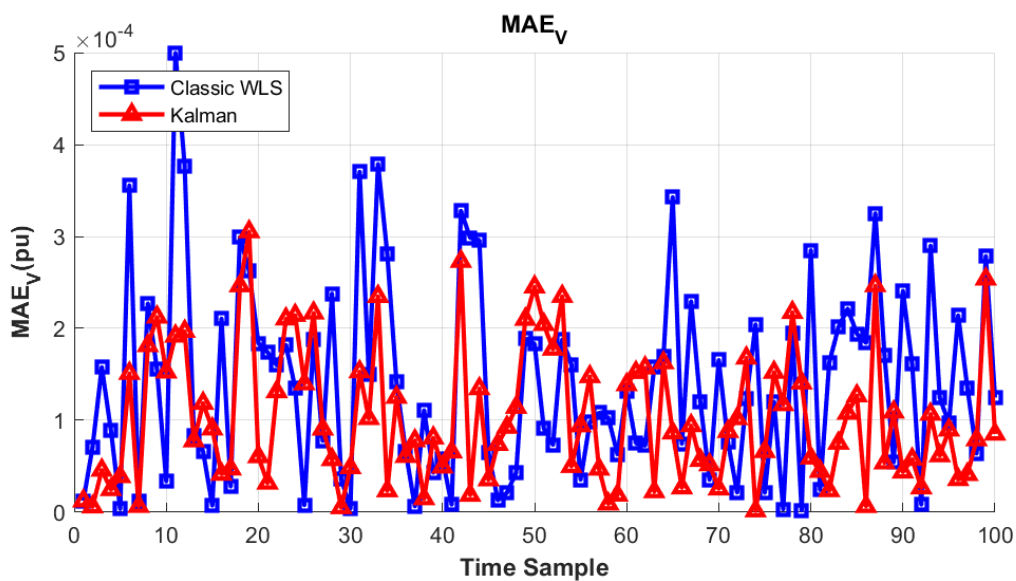
Για το δίκτυο των 14 ζυγών υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί μετρήσεων και επιπέδων θορύβου που μπορούν να δοκιμαστούν. Από αυτά επιλέχθηκαν 4 σενάρια τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

8.5.3.1 Μετρήσεις χωρίς bad data

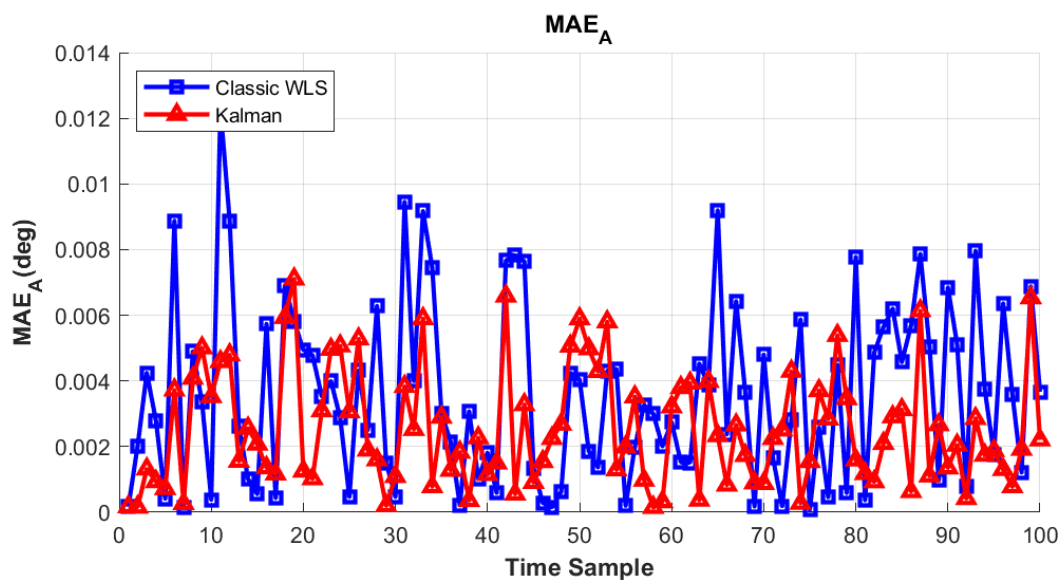
Οι συνθήκες της 1^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στους ζυγούς 2, 6, 8 και 9.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

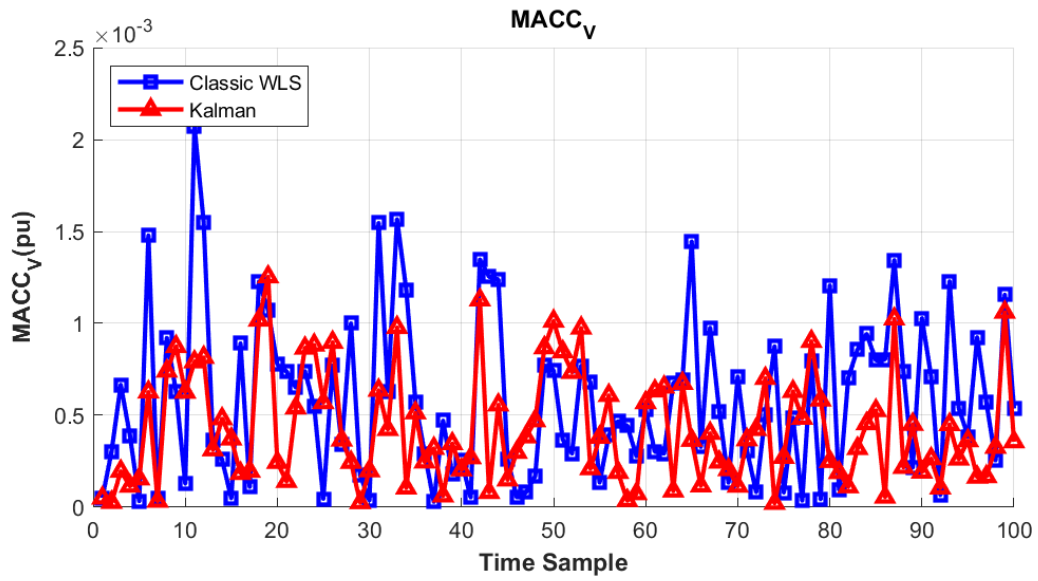
Οι γραφικές παραστάσεις της 1^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



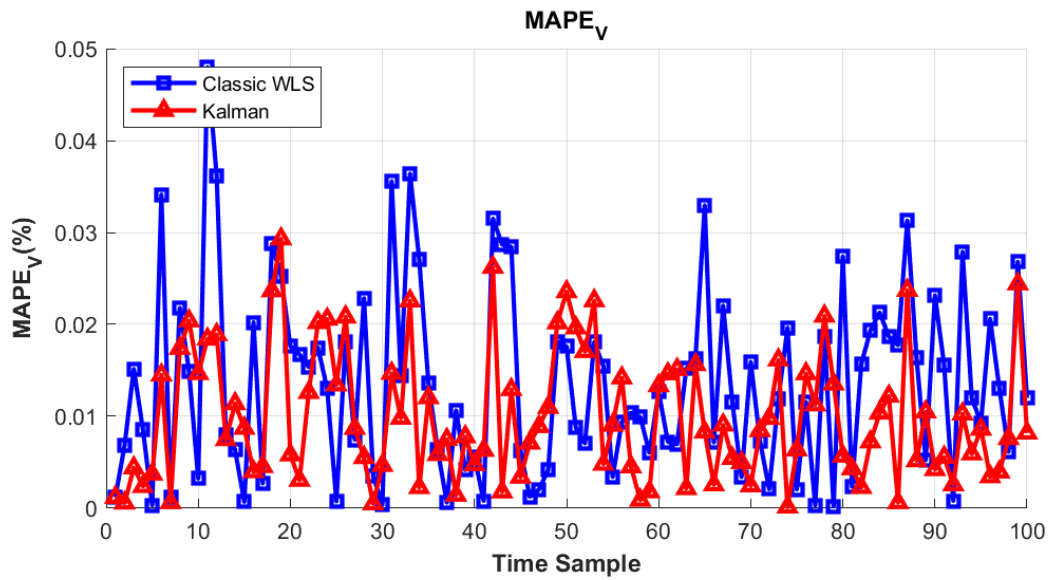
Σχήμα 8.40: Δείκτης MAE_V 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.41: Δείκτης MAE_A 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.42: Δείκτης $MACC_V$ 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

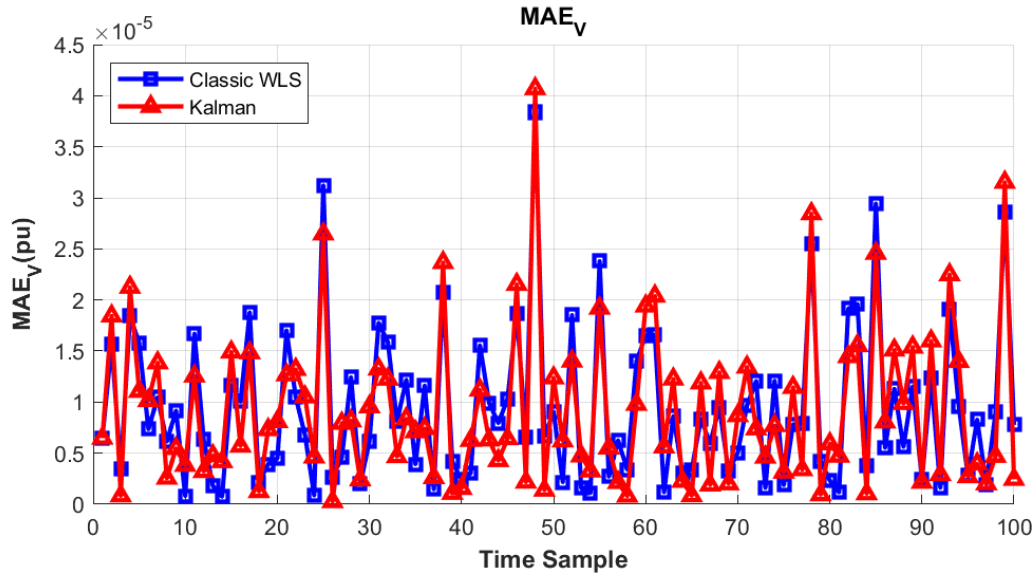


Σχήμα 8.43: Δείκτης $MAPE_V$ 1^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

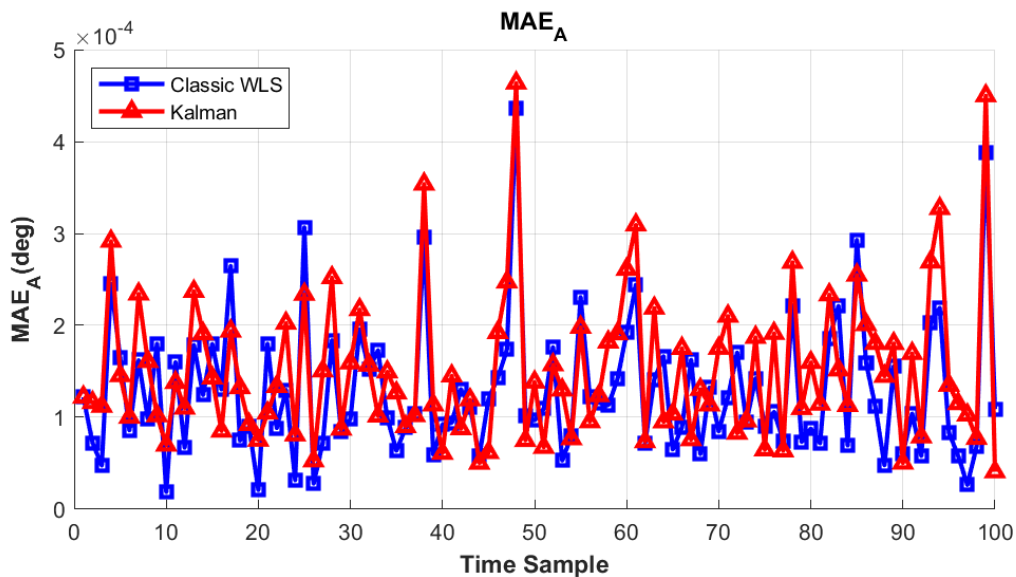
Οι συνθήκες της 2^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στους ζυγούς 2, 6, 8 και 9.
- PMU στον ζυγό 13.
- 100 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.

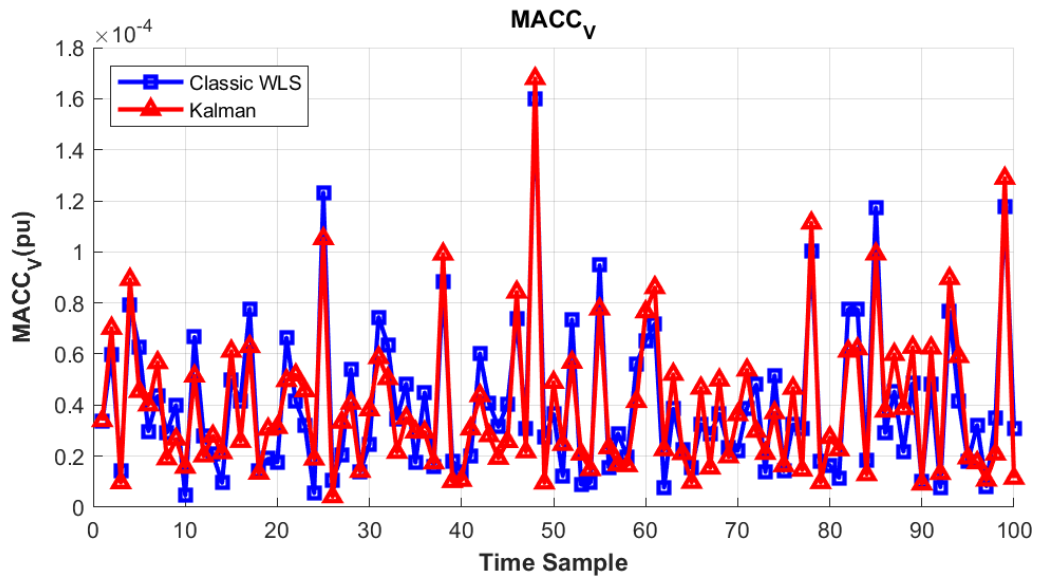
Οι γραφικές παραστάσεις της 2^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



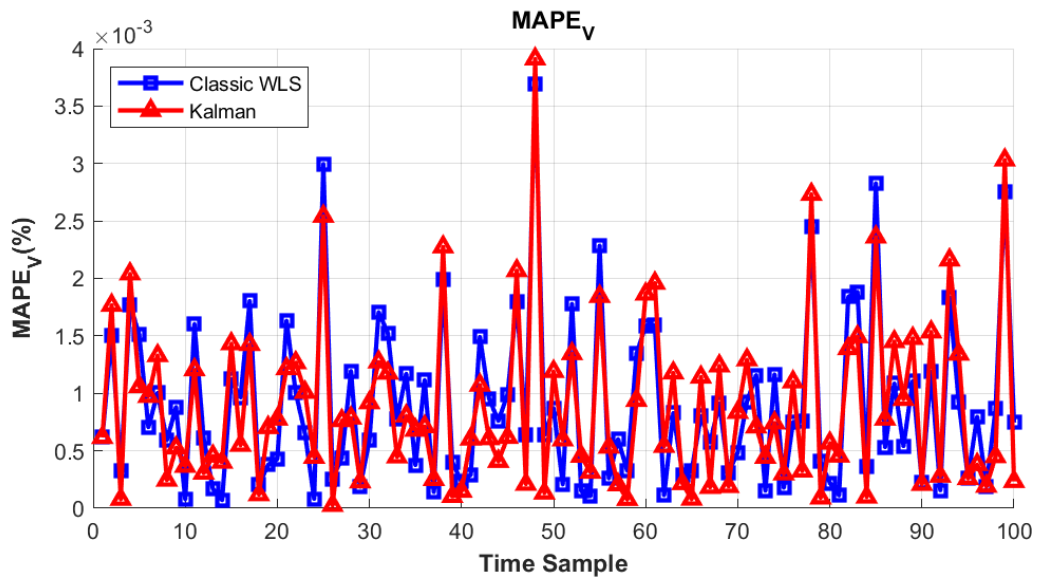
Σχήμα 8.44: Δείκτης MAE_V 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.45: Δείκτης MAE_A 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.46: Δείκτης $MACC_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



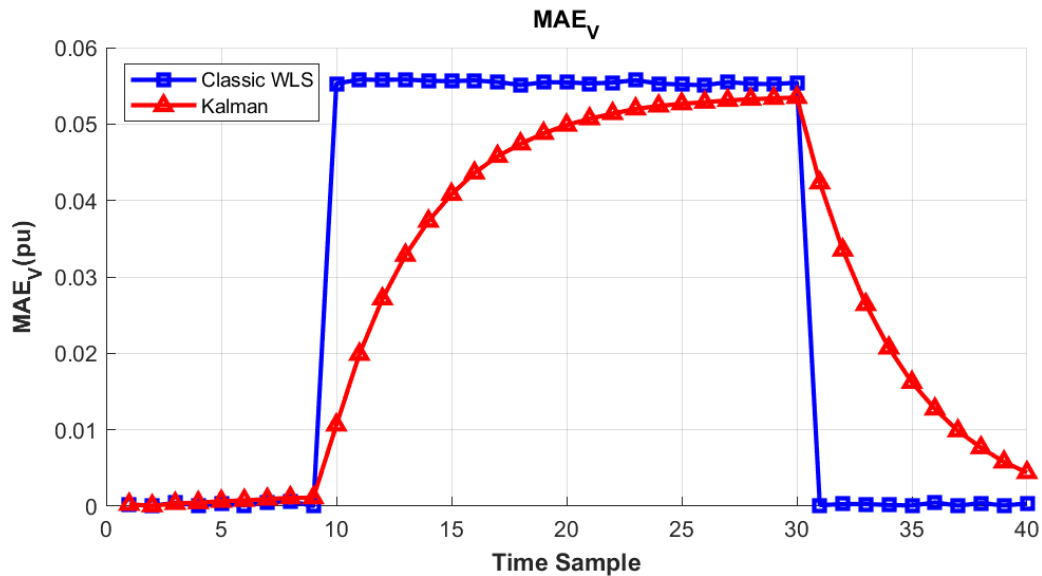
Σχήμα 8.47: Δείκτης $MAPE_V$ 2^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

8.5.3.2 Μετρήσεις με bad data

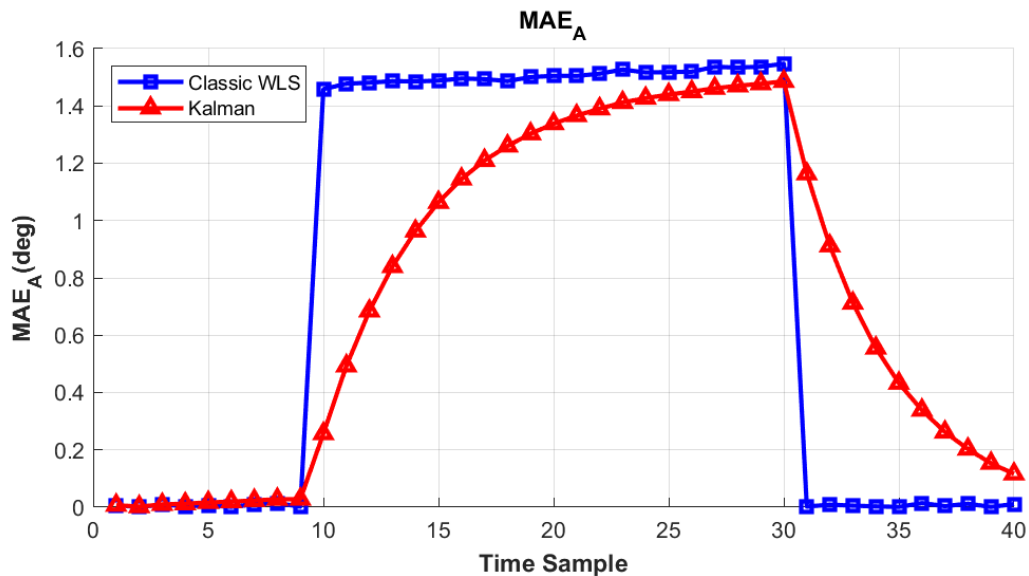
Οι συνθήκες της 3^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στους ζυγούς 2, 6, 8 και 9.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη μέτρηση μέτρου τάσης ζυγού 2 κατά -20%.

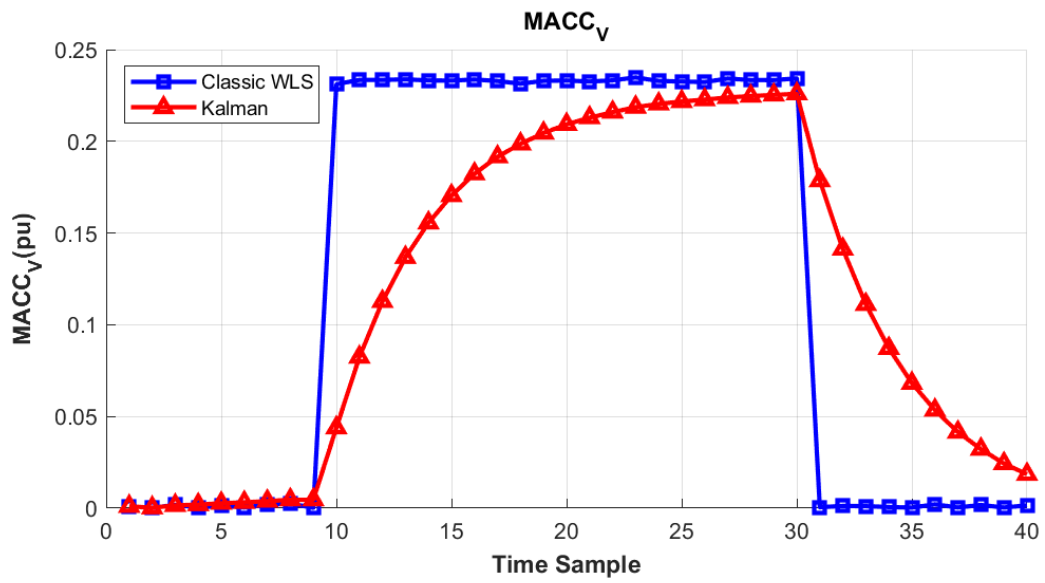
Οι γραφικές παραστάσεις της 3^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



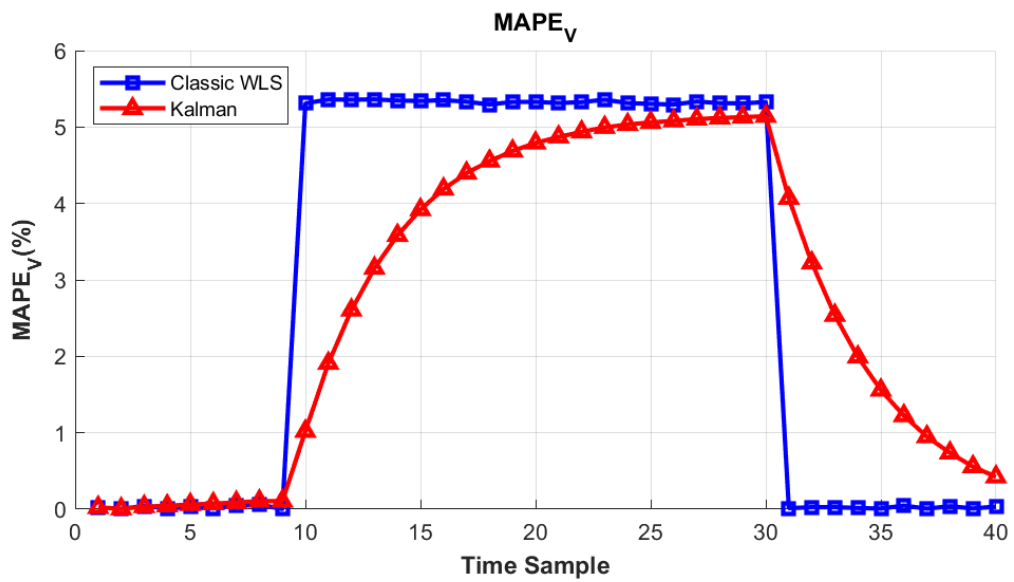
Σχήμα 8.48: Δείκτης MAE_V 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.49: Δείκτης MAE_A 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.50: Δείκτης $MACC_v$ 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

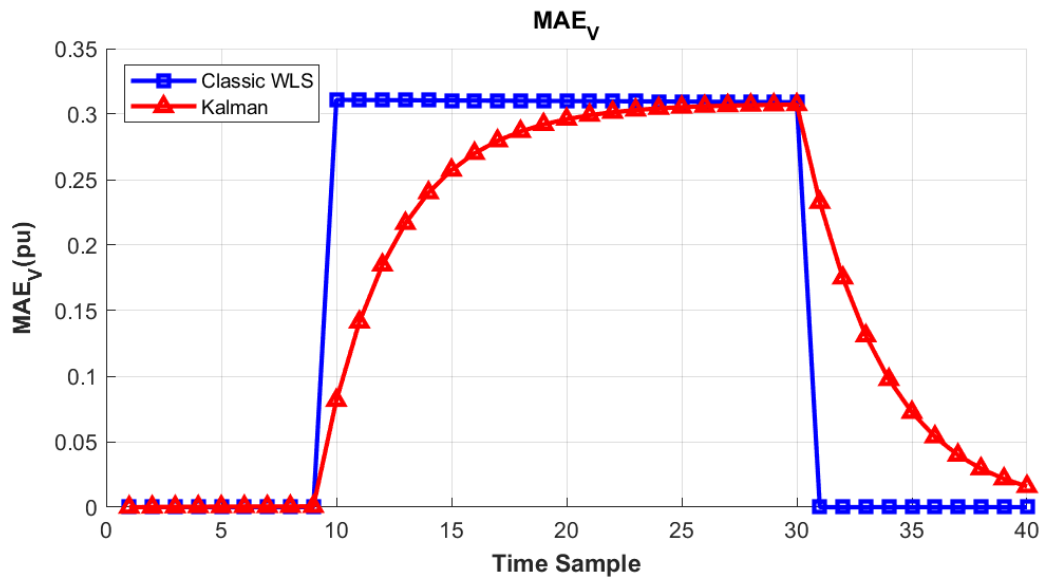


Σχήμα 8.51: Δείκτης $MAPE_v$ 3^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

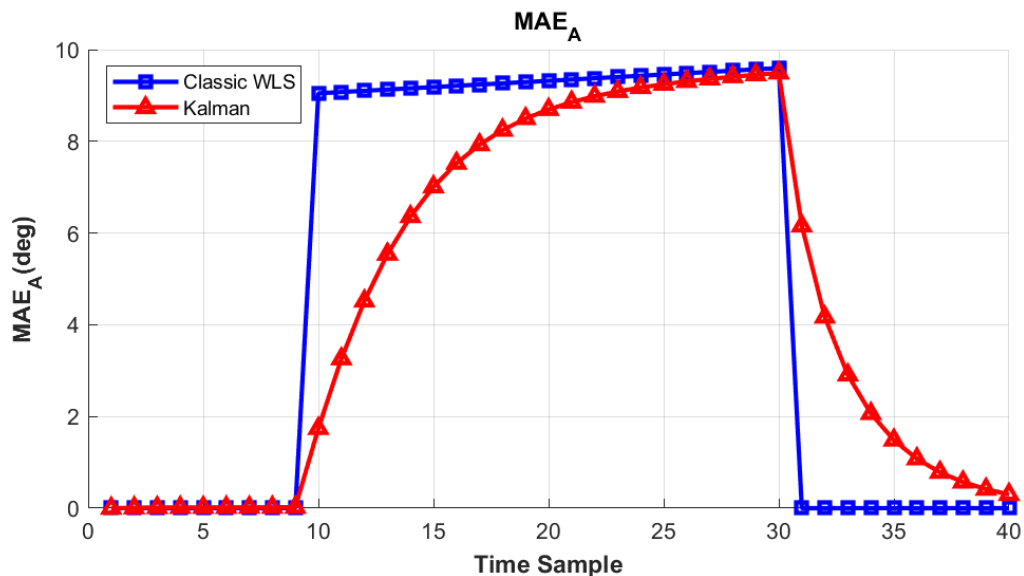
Οι συνθήκες της 4^{ης} δοκιμής είναι:

- RTU στου ζυγούς 2, 6, 8 και 9.
- PMU στου ζυγό 13.
- 40 χρονικές στιγμές (time samples).
- Συνολική μεταβολή ενεργού και αέργου καταναλισκόμενης ισχύος κατά +10%.
- Εσφαλμένη μέτρηση E_{13} κατά -50% και ροές ρευμάτων I_{13-6} , I_{13-12} και I_{13-14} κατά -20%

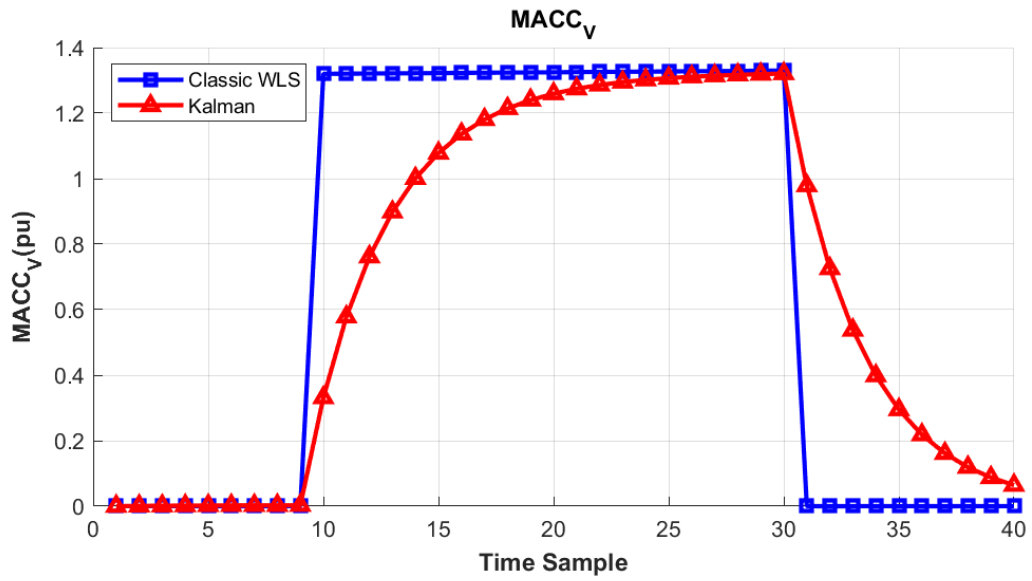
Οι γραφικές παραστάσεις της 4^{ης} δοκιμής παρουσιάζονται παρακάτω:



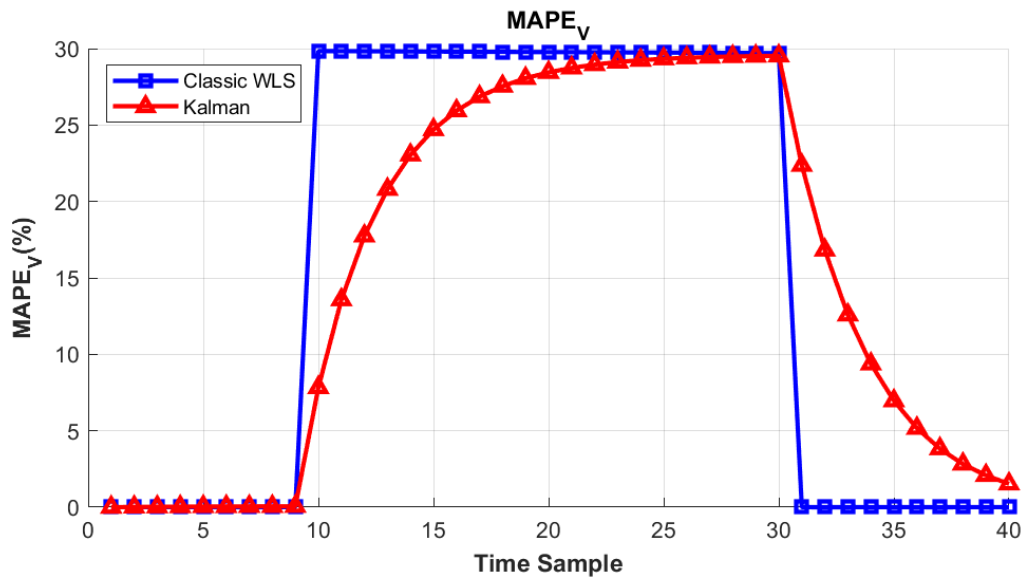
Σχήμα 8.52: Δείκτης MAE_V 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.53: Δείκτης MAE_A 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



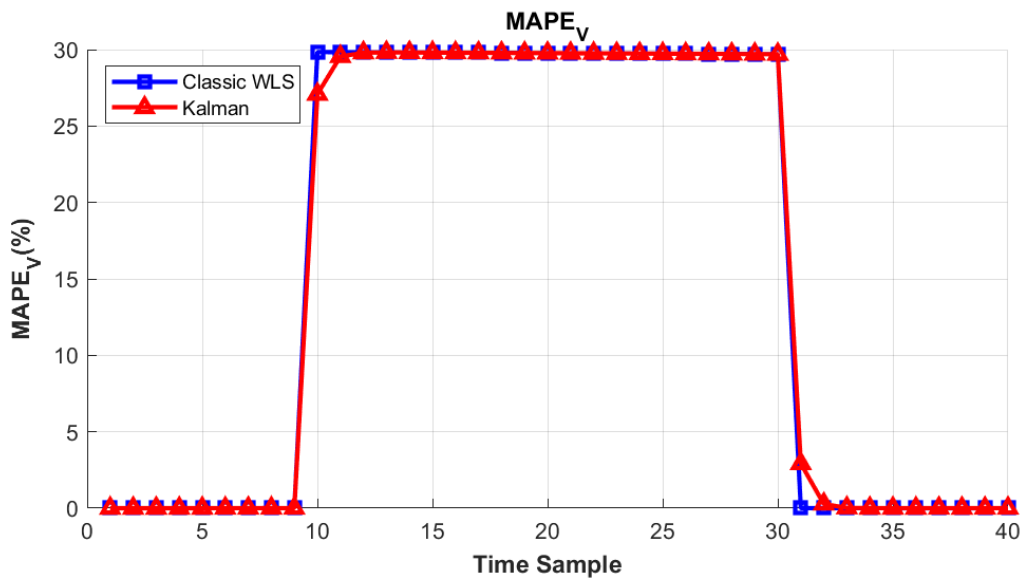
Σχήμα 8.54: Δείκτης $MACC_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).



Σχήμα 8.55: Δείκτης $MAPE_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών).

8.6 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Πριν γίνει η ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε δοκιμή έγινε δυναμική επιλογή του πίνακα συνδιασποράς Q_k ώστε το ΙΕΚF να παρουσιάζει την βέλτιστη συμπεριφορά στην εκτίμηση κατάστασης. Ως βέλτιστη συμπεριφορά ορίστηκε η ισορροπημένη λειτουργία του φίλτρου δίνοντας έμφαση στην προηγούμενη κατάσταση όταν οι μετρήσεις παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα ενώ δίνεται έμφαση στις διαθέσιμες μετρήσεις όταν αυτές είναι υψηλής ακρίβειας και αξιόπιστες. Επειδή όμως το ΙΕΚF τείνει να δίνει έμφαση στις μετρήσεις που έχουν χαμηλή διασπορά σ^2 και επομένως μεγάλο βάρος $R = 1/\sigma^2$, όπως είναι αυτές των PMU, η συμπεριφορά του ΙΕΚF όταν οι εν λόγω μετρήσεις περιέχουν bad data όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

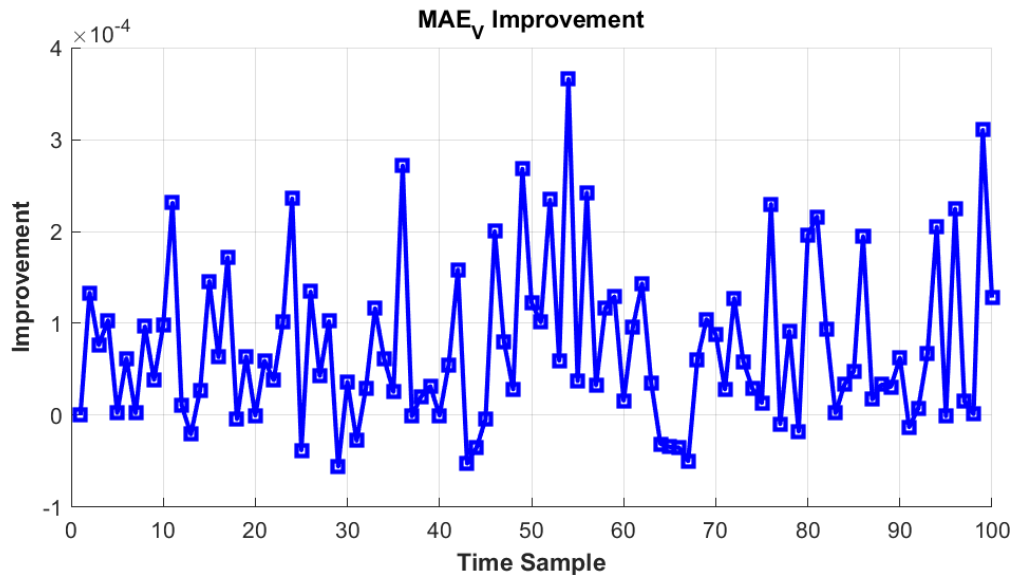


Σχήμα 8.56: Δείκτης $MAPE_V$ 4^{ης} δοκιμής (δίκτυο 14 ζυγών) με $Q_k = diag(10^{-5})_{m \times n}$.

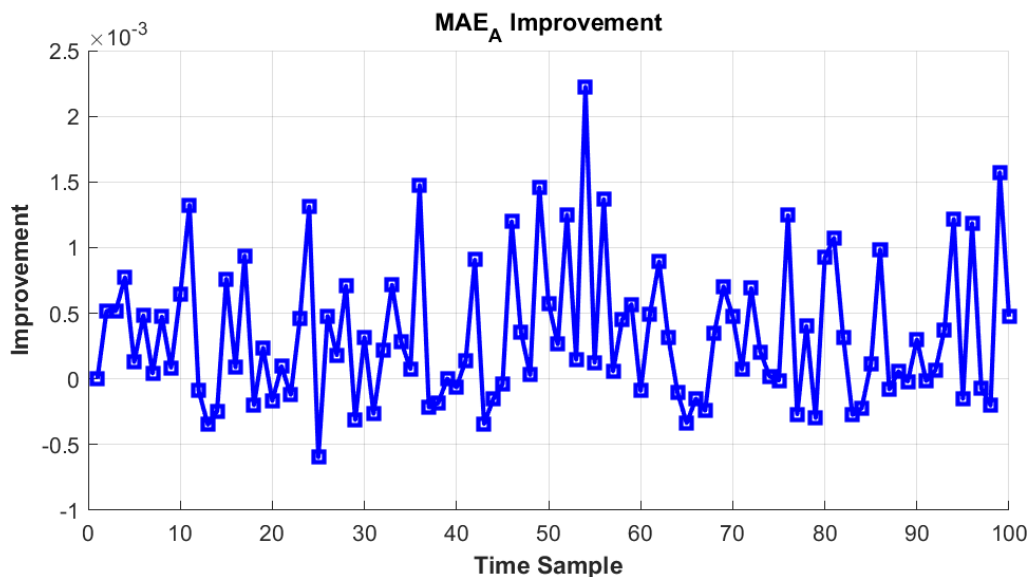
Σε αντίθεση με το Σχήμα 8.55 όπου έγινε επιλογή $Q_k = diag(10^{-7})$, επιλέχτηκε το διάνυσμα $Q_k = diag(10^{-5})$. Παρατηρούμε ότι το ΙΕΚF εμπιστεύεται απόλυτα τις μετρήσεις του PMU που έχουν σημαντικό περιεχόμενο bad data σε αντίθεση με την βέλτιστη λειτουργία του που αναγνωρίζει το σφάλμα και εμπιστεύεται την προηγούμενη κατάσταση περισσότερο. Το ΙΕΚF δεν έχει τρόπο να αναγνωρίζει ότι η εν λόγω μέτρηση παρουσιάζει μεγάλο σφάλμα παρά μόνο από τον πίνακα συνδιασπορών σφαλμάτων P_k το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο του Q_k . Επομένως η επιλογή του βέλτιστου πίνακα Q_k σε κάθε δοκιμή είναι κρίσιμη για την αποδοτική λειτουργία του ΙΕΚF.

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

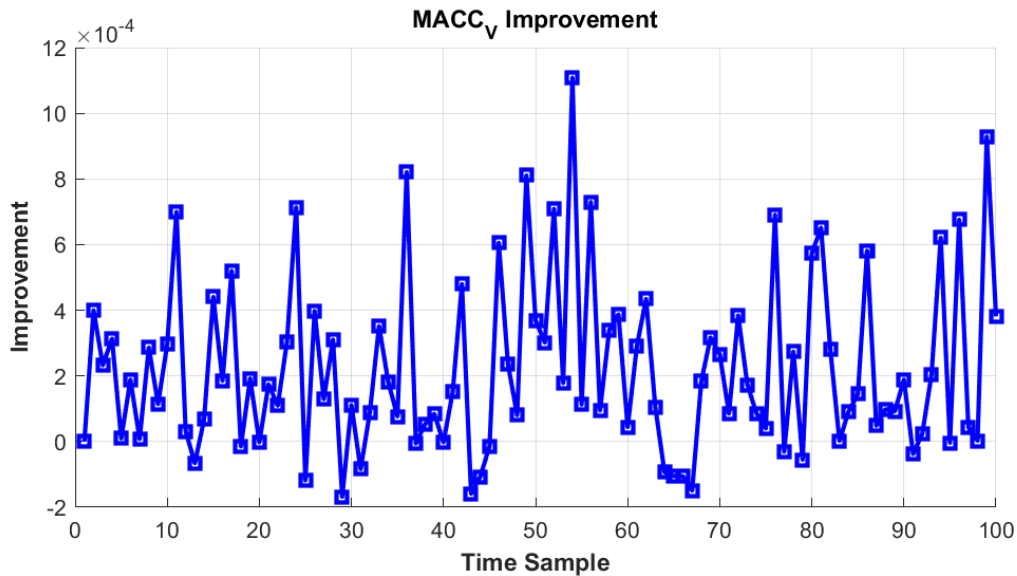
κατάστασης. Για θεμελιωθεί η βελτίωση η μη του ΙΕΚF έναντι της κλασσικής εκτίμησης με αξιόπιστες μετρήσεις, δημιουργήθηκαν οι διαφορές των δεικτών απόδοσης των δύο μεθόδων για κάθε χρονική στιγμή για το δίκτυο 9 ζυγών μόνο με RTU. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που συγκρίνουν τους δείκτες απόδοσης της εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF με την κλασσική εκτίμηση κατάστασης καθώς και τον απαιτούμενο αριθμό επαναλήψεων της εκάστοτε εκτίμησης.



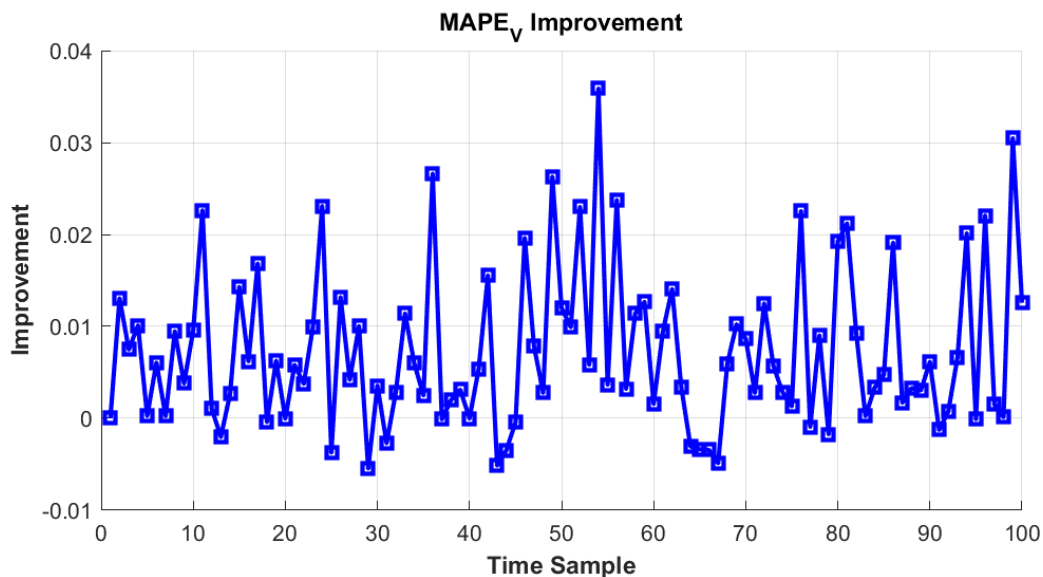
Σχήμα 8.57: Βελτίωση δείκτη MAE_V για το δίκτυο 9 ζυγών.



Σχήμα 8.58: Βελτίωση δείκτη MAE_A για το δίκτυο 9 ζυγών.



Σχήμα 8.59: Βελτίωση δείκτη $MACC_V$ για το δίκτυο 9 ζυγών.



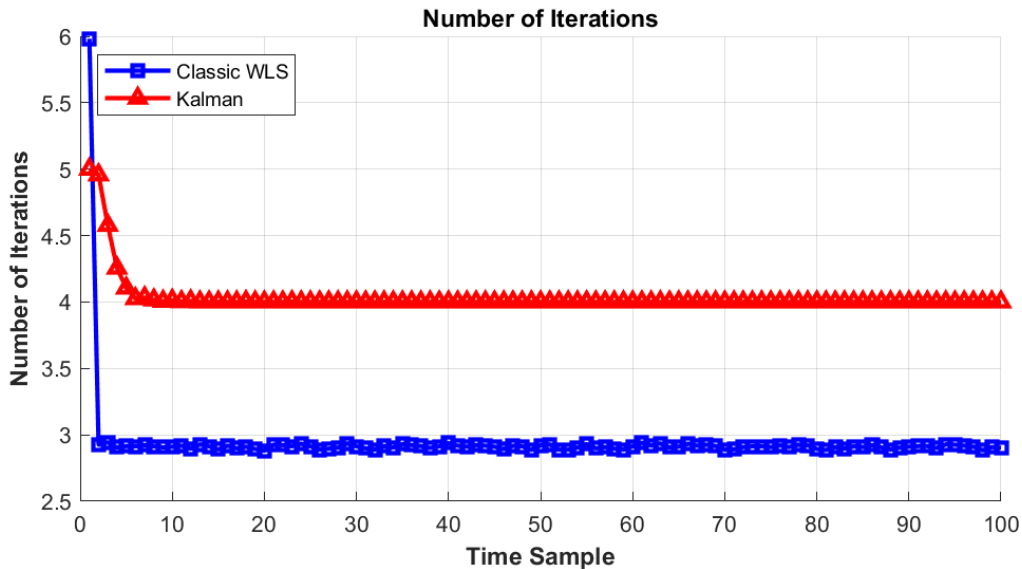
Σχήμα 8.60: Βελτίωση δείκτη $MAPE_V$ για το δίκτυο 9 ζυγών.

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις, υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος όρος των δεικτών απόδοσης και τα αποτελέσματα είναι τα εξής:

- Μέση βελτίωση δείκτη MAE_V : 0.0001 pu.
- Μέση βελτίωση δείκτη MAE_A : 0.0003°.
- Μέση βελτίωση δείκτη $MACC_V$: 0.0002 pu.
- Μέση βελτίωση δείκτη $MAPE_V$: 0.0073 %.

Παρατηρείται ότι υπάρχει μικρή αλλά μετρήσιμη βελτίωση της εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF σε σχέση με την κλασική εκτίμηση κατάστασης. Αυτό οφείλεται στις αναδρομικές σχέσεις που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος ΙΕΚF καθιστώντας τον λιγότερο ευαίσθητο στο τυχαίο θόρυβο των μετρήσεων.

Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι επαναλήψεις που χρειάζεται ο εκάστοτε αλγόριθμος για να εκτελέσει την εκτίμηση κατάστασης. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ο αριθμός επαναλήψεων που χρειάζεται η κάθε μέθοδος να εκτιμήσει το διάνυσμα κατάστασης \hat{x}_k . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι επαναλήψεις αυτές για κάθε χρονική στιγμή των δύο μεθόδων:



Σχήμα 8.61: Αριθμός επαναλήψεων για σύγκλιση για το δίκτυο 9 ζυγών.

Από τις γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 8.61, παρατηρείται αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων για την εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης. Αυτό οφείλεται στο είδος των εξισώσεων που χρησιμοποιεί το ΙΕΚΦ που αυξάνουν το υπολογιστικό κόστος της μονάδας που εκτελεί την εκτίμηση κατάστασης.

Επιπρόσθετα, η εκτίμηση κατάστασης με ΙΕΚΦ παρέχει την δυνατότητα επιλογής της συμπεριφοράς του φίλτρου με αποτέλεσμα να ρυθμίζεται να έχει πιο σταθερή συμπεριφορά (trend over time) καθώς συνδυάζει τις ακριβείς διαθέσιμες μετρήσεις με την αξιόπιστη προηγούμενη εκτίμηση κατάστασης φιλτράροντας έτσι και τον ελάχιστο θόρυβο που υπάρχει στις μετρήσεις. Χρειάζεται αρκετή προσοχή, όμως, με την προσθήκη μονάδων μέτρησης φασιθετών PMU καθώς ο καθορισμός της μήτρας Q_k είναι αρκετά δύσκολος αφού τα σφάλματα και οι διασπορές από τις μονάδες PMU είναι σχετικά μικρά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ΙΕΚΦ να δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στις μετρήσεις κάτι το οποίο είναι επιθυμητό όταν οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες αλλά μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αποκλίσεις αν οι μονάδες PMU δεν είναι σωστά βαθμονομημένες ή παρουσιάσουν μεγάλα σφάλματα.

Η μεγάλη βελτίωση που προσφέρει το φίλτρο Kalman σε σχέση με την κλασική εκτίμηση κατάστασης φαίνεται στην περίπτωση παρουσίας μετρήσεων με σχετικά υψηλά απόλυτα σφάλματα ($> 10\%$) ή εσφαλμένων μετρήσεων (bad data) ($> 20\%$) κάποια χρονική στιγμή k πριν από την οποία είχε προηγηθεί ακριβής εκτίμηση κατάστασης την χρονική στιγμή $(k - 1)$. Όπως παρατηρείται από τις δοκιμές με bad data, σε όλες τις περιπτώσεις η κλασική εκτίμηση κατάστασης WLS αδυνατεί να φιλτράρει τις μετρήσεις με μεγάλο σφάλμα και τις λαμβάνει υπόψη στην εκτίμηση

κατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης να έχει σημαντική απόκλιση από το πραγματικό διάνυσμα κατάσταση καθιστώντας τα αποτελέσματα αναξιόπιστα και ανακριβή.

Σε συγκριτικά μεγάλη αντίθεση, την στιγμή που εμφανίζεται το σφάλμα και για ένα αριθμό χρονικών στιγμών, το ΙΕΚF έχει καλύτερους δείκτες απόδοσης σε σχέση με την κλασσική εκτίμηση κατάστασης. Συγκεκριμένα, όταν εμφανίζεται το σφάλμα την χρονική στιγμή $time_sample = 10$ ο δείκτης $MAPE_V$ στο Σχήμα 8.55, έχει τιμή κάτω από 10% και σύμφωνα με τον Πίνακα 7.1 η εκτίμηση κατάστασης αξιολογείται με «Πολύ Καλή» ενώ η κλασσική εκτίμηση κατάστασης έχει $MAPE_V$ πάνω από 30% και η εκτίμησης κατάστασης του αξιολογείται «Μέτρια». Αξίζει να αναφερθεί ότι το σφάλμα διατηρείται για αρκετές χρονικές στιγμές για να τονισθεί ότι ακόμα και αν το σφάλμα δεν διορθωθεί, το ΙΕΚF παράγει πιο ακριβή εκτίμηση κατάστασης από το WLS (όλοι οι δείκτες απόδοσης του ΙΕΚF έχουν γραφικές παραστάσεις πιο χαμηλά από του δείκτες απόδοσης της κλασσικής εκτίμησης κατάστασης). Βέβαια η ποιότητα του εκτιμώμενου διανύσματος κατάστασης του ΙΕΚF θα χειροτερεύει συνεχώς με την πάροδο του χρόνου καθώς η a priori εκτίμηση κατάστασης θα έχει ολοένα αυξανόμενο σφάλμα. Παρόλα αυτά, η εκτίμηση κατάστασης με το ΙΕΚF θα έχει συνεχώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την κλασσική εκτίμηση κατάστασης.

Η μνήμη που έχει το ΙΕΚF, αν και πλεονέκτημα την στιγμή που εμφανίζεται το σφάλμα, αποτελεί μειονέκτημα την στιγμή που διορθώνονται τα σφάλματα στις μετρήσεις και το διάνυσμα μετρήσεων είναι πλέον αξιόπιστο. Επειδή το ΙΕΚF έχει μνήμη, λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη εκτίμηση κατάστασης με συγκριτικά υψηλό σφάλμα και την συνδυάζει με τις πλέον διαθέσιμες αξιόπιστες μετρήσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το νέο εκτιμώμενο διάνυσμα κατάστασης να έχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αλλά επίσης να περιέχει σημαντικό ποσοστό σφάλματος μέχρι το ΙΕΚF να αποσβέσει τελείως το σφάλμα. Η κλασσική εκτίμηση κατάστασης, εφόσον εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαθέσιμες μετρήσεις, παράγει απευθείας αξιόπιστα αποτελέσματα με μικρό σφάλμα.

Η παραπάνω ιδιότητα του ΙΕΚF οφείλεται στο γεγονός ότι το φίλτρο Kalman είναι ένας αναδρομικός αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης που λαμβάνει υπόψη όλες τις προηγούμενες καταστάσεις με τις εκάστοτε μετρήσεις και αντίστοιχες διασπορές [6]. Επομένως, θα υπάρχει πάντα μια περίοδος μετάβασης προτού αποκατασταθεί η αποδοτική λειτουργία του ΙΕΚF, καθώς οι προηγούμενες εκτιμήσεις παρουσιάζουν σημαντικό, αλλά συνεχώς μειούμενο σφάλμα.

9 Συμπεράσματα και παρατηρήσεις

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τη δημιουργία ενός βελτιωμένου αλγορίθμου δυναμικής υβριδικής εκτίμησης κατάστασης για ηλεκτρικά δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με μετρήσεις από SCADA και PMU χρησιμοποιώντας φίλτρο Kalman. Λόγω της ταχείας εξάπλωσης των μονάδων μέτρησης φασιθετών PMU, η συμβατική εκτίμηση κατάστασης που βασίζεται σε μη γραμμικές εξισώσεις, αναμένεται να αντικατασταθεί από την εκτίμηση κατάστασης που χρησιμοποιεί γραμμικό μοντέλο μετρήσεων. Βέβαια, λόγω του κόστους των μονάδων PMU, η διαδικασία αυτή δεν θα είναι άμεση και ίσως χρειαστούν κάποιες δεκαετίες μέχρι κάθε ΚΕΕ να εκτελεί εκτίμηση κατάστασης του ΣΗΕ αξιοποιώντας μόνο μονάδες PMU υψηλής ακρίβειας. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία ενός αλγορίθμου που θα συνδυάζει τις μετρήσεις από αυτές τις μονάδες και θα παράγει βελτιωμένα αποτελέσματα επιλύοντας ταυτόχρονα τα προβλήματα που προκύπτουν από την συμπερίληψη διαφορετικών τύπων μετρήσεων.

Στην παρούσα διπλωματική κατασκευάστηκε αλγόριθμος υβριδικής δυναμικής εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF για τα ΣΗΕ ενώ μελετήθηκε σε μεγάλο βαθμό η επιρροή του μεγάλου θορύβου και των bad data στην αξιοπιστία και ορθότητα των αποτελεσμάτων της εκτίμησης κατάστασης. Συγκεκριμένα ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης με ΙΕΚF σχεδιάστηκε με γνώμονα να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε δίκτυο και οποιοδήποτε κατάσταση λειτουργίας. Ο χρήστης εισάγει αρχικά την τοπολογία του δικτύου στο MATLAB[®] με την βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου επίλυσης ροής φορτίου MATPOWER και έπειτα καθορίζει την τοποθέτηση των RTU και PMU στους επιθυμητούς ζυγούς επιλέγοντας ποιες μετρήσεις θα εισαχθούν στο διάλυμα μετρήσεων. Το πρόγραμμα εκτελεί τόσο την κλασσική όσο και την ΙΕΚF εκτίμησης κατάστασης παρουσιάζει τα μέτρα τάσεων και τις γωνίες όλων των ζυγών. Ξεχωριστά για τους δύο τρόπους εκτίμησης.

Έγινε φανερό από τις γραφικές παραστάσεις της Ενότητας 8.5, που έκαναν χρήση αρκετών χρονικών στιγμών με προσομοιώσεις Monte Carlo, ότι η εκτίμηση κατάστασης με ΙΕΚF έχει βελτιωμένη απόδοση και μεγαλύτερη ακρίβεια από την κλασσική εκτίμηση κατάστασης. Η αυξημένη ακρίβεια επιτρέπει την λήψη ενός αξιόπιστου στιγμιότυπου της κατάστασης του δικτύου, γεγονός ύψιστης σημασίας για την ορθή και στρατηγική λήψη αποφάσεων στα ΚΕΕ. Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η οικονομικότερη λειτουργία των ΣΗΕ καθώς και η αποφυγή άσκοπων διακοπών ηλεκτρικής ισχύος και δυσλειτουργιών εντός του ΚΕΕ, λόγω εσφαλμένων μετρήσεων.

Εν κατακλείδι, μέσω της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναδείχθηκαν και πολλά ανοιχτά ερευνητικά θέματα που αφορούν την εκτίμηση κατάστασης των ηλεκτρικών δικτύων με φίλτρα τύπου Kalman. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον η δυναμική μοντελοποίηση της μήτρας συνδιασπορών Q_k που καθορίζει την συμπεριφορά του ΙΕΚF, η βέλτιστη αρχικοποίηση της μήτρας συνδιασπορών σφαλμάτων P_0 και του αρχικού διανύσματος κατάστασης \hat{x}_0 . Επιπρόσθετα, πιο λεπτομερή μοντέλα της συνάρτησης μετάβασης F_k μέσω τεχνικών μηχανικής

μάθησης μπορούν να αυξήσουν περαιτέρω την ακρίβεια και ποιότητα των αποτελεσμάτων. Τέλος, η χρήση αποσβεννύμενης μνήμης (fading memory) θα δώσει την δυνατότητα στο ΙΕΚΦ να αγνοεί τα σφάλματα στις παλιές εκτιμήσεις και να δίνει έμφαση στις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις και μετρήσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] T. E. Dy Liacco, “The Role of State Estimation in Power System Operation,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 15, no. 4, pp. 1531–1533, Jun. 1982, doi: 10.1016/S1474-6670(17)63216-6.
- [2] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. in Power Electronics and Power Systems. Boston, MA: Springer US, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-76537-2.
- [3] “Northeast blackout of 2003,” *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Northeast_blackout_of_2003&oldid=1160720435
- [4] “Final Report on the August 14th Blackout in the United States and Canada Causes and Recommendations.” [Online]. Available: <https://www.energy.gov/oe/articles/blackout-2003-final-report-august-14-2003-blackout-united-states-and-canada-causes-and>
- [5] H. W. Sorenson, “Least-squares estimation: from Gauss to Kalman,” *IEEE Spectr.*, vol. 7, no. 7, pp. 63–68, Jul. 1970, doi: 10.1109/MSPEC.1970.5213471.
- [6] J. Humpherys, P. Redd, and J. West, “A Fresh Look at the Kalman Filter,” *SIAM Rev.*, vol. 54, no. 4, pp. 801–823, Jan. 2012, doi: 10.1137/100799666.
- [7] P. S. Maybeck, *Stochastic models, estimation and control*. in Mathematics in science and engineering, no. v. 141. New York: Academic Press, 1979.
- [8] “Kalman filter,” *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Kalman_filter&oldid=1160108771
- [9] “ΑΔΜΗΕ Α.Ε, Περιγραφή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ).” [Online]. Available: <https://www.admie.gr/systema/perigrافي/basika-stoixeia>
- [10] “ΑΔΜΗΕ Α.Ε., Έκθεση για την απόδοση του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2021.” [Online]. Available: <https://www.admie.gr/sites/default/files/attached-files/type-file/2022/06/performance-report-2021.pdf>
- [11] “ΑΔΜΗΕ Α.Ε, Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2022-2031 Προκαταρκτικό Σχέδιο.” [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/diaboyleyseis/attached-files2021/01/kurio-teuxos_0.pdf
- [12] “ΑΔΜΗΕ Α.Ε., Χάρτης του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας.” [Online]. Available: <https://www.admie.gr/i-etaireia/me-mia-matia>
- [13] A. J. Conejo and L. Baringo, *Power System Operations*. in Power Electronics and Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-69407-8.
- [14] M. S. Thomas and J. D. McDonald, *Power system SCADA and smart grids*. Boca Raton London New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- [15] Γ. Κονταξής and Ν. Χατζηαργυρίου, *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.
- [16] “C is for Connections | Lightbox.” [Online]. Available: <https://lightbox.terna.it/en/insight/connections-transmission-grid>

- [17] “Transmission system operator,” *Wikipedia*. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Transmission_system_operator&oldid=1149892553
- [18] M. Ahmad, *Power system state estimation*. in Artech House power engineering series. Boston, Mass. ; London: Artech House, 2013.
- [19] E. Handschin and A. Petroianu, *Energy Management Systems*. in EESSES Electric Energy Systems and Engineering Series. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. doi: 10.1007/978-3-642-84041-8.
- [20] P. Leader and S. Meliopoulos, “The Substation of the Future: A Feasibility Study”.
- [21] L. L. Grigsby, Ed., *The electric power engineering handbook*. in The electrical engineering handbook series. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
- [22] M. Kezunovic, S. Meliopoulos, V. Venkatasubramanian, and V. Vittal, *Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks*. in Power Electronics and Power Systems. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-06218-1.
- [23] G. R. Clarke, D. Reynders, and E. Wright, *Practical modern SCADA protocols: DNP3, 60870.5 and related systems*. in Practical professional books from Elsevier. Oxford ; Boston: Newnes, 2004.
- [24] “SIMATIC RTU3000C.” [Online]. Available: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6NH3112-4BB00-0XX0>
- [25] A. Monti, Ed., *Phasor measurement units and wide area monitoring systems: from the sensors to the system*. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [26] A. G. Phadke, “Synchronized phasor measurements-a historical overview,” in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan: IEEE, 2002, pp. 476–479. doi: 10.1109/TDC.2002.1178427.
- [27] “VCL-PMU-30, Phasor Measurement Unit”.
- [28] Π. Σ. Γεωργιλάκης, «*Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*». ΣΕΑΒ, 2015.
- [29] A. Abur and A. Gómez Expósito, *Power system state estimation: theory and implementation*. in Power engineering. New York, NY: Marcel Dekker, 2004.
- [30] F. Schweppe and J. Wildes, “Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–125, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292678.
- [31] F. Schweppe and D. Rom, “Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 125–130, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292679.
- [32] F. Schweppe, “Power System Static-State Estimation, Part III: Implementation,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Syst.*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 130–135, Jan. 1970, doi: 10.1109/TPAS.1970.292680.

- [33] O. Darmis and G. Korres, “A Survey on Hybrid SCADA/WAMS State Estimation Methodologies in Electric Power Transmission Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 618, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020618.
- [34] G. Welch, “An Introduction to the Kalman Filter,” 1997.
- [35] J. Zhao, M. Netto, and L. Mili, “A Robust Iterated Extended Kalman Filter for Power System Dynamic State Estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 3205–3216, Jul. 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2628344.
- [36] K.-R. Shih and S.-J. Huang, “Application of a Robust Algorithm for Dynamic State Estimation of a Power System,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 17, no. 1, 2002.
- [37] T. Lacey, “Tutorial: The Kalman Filter”.
- [38] C. Gu and P. Jirutitijaroen, “Dynamic State Estimation Under Communication Failure Using Kriging Based Bus Load Forecasting,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 2831–2840, Nov. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2382102.
- [39] M. Brown Do Coutto Filho and J. C. S. de Souza, “Forecasting-Aided State Estimation—Part I: Panorama,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1667–1677, Nov. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030295.
- [40] M. Brown Do Coutto Filho, J. C. S. de Souza, and R. S. Freund, “Forecasting-Aided State Estimation—Part II: Implementation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 4, pp. 1678–1685, Nov. 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2030297.
- [41] F. Camoes, J. A. D. Massignan, V. Miranda, and J. B. A. London, “Sliding-Priors for Bayesian Information Fusion in SCADA+PMU-based State Estimation,” in *2022 17th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Manchester, United Kingdom: IEEE, Jun. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/PMAPS53380.2022.9810558.
- [42] S. Zhao and B. Huang, “On initialization of the Kalman filter,” in *2017 6th International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (AdCONIP)*, Taipei, Taiwan: IEEE, May 2017, pp. 565–570. doi: 10.1109/ADCONIP.2017.7983842.
- [43] P. Abbeel, A. Coates, M. Montemerlo, A. Y. Ng, and S. Thrun, “Discriminative Training of Kalman Filters,” in *Robotics: Science and Systems I*, Robotics: Science and Systems Foundation, Jun. 2005. doi: 10.15607/RSS.2005.I.038.
- [44] “Metrics for determining the impact of phasor measurements on power system state estimation (KEMA).pdf.”
- [45] “What is a good MAE score? (simply explained),” Stephen Allwright. Accessed: Aug. 28, 2023. [Online]. Available: <https://stephenallwright.com/good-mae-score/>
- [46] “What is a good MAPE score? (simply explained),” Stephen Allwright. Accessed: Aug. 28, 2023. [Online]. Available: <https://stephenallwright.com/good-mape-score/>
- [47] “MATPOWER-manual.pdf.” [Online]. Available: <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual.pdf>