



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI με
Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την Εποπτεία
Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης

Επιβλέπων: Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI με
Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την Εποπτεία
Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης

Επιβλέπων: Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2015.

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

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

.....
Ιωάννης Γκόνος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....

Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης

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

Copyright © Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας, η ευρεία διάδοση της οποίας ξεκίνησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, έδωσε τεράστια ώθηση στην επιστημονική, τεχνολογική και οικονομική ανάπτυξη παγκοσμίως και επηρέασε ριζικά σχεδόν κάθε πτυχή της ζωής του ανθρώπου.

Εκτενείς διακοπές σε δίκτυα ηλεκτροδότησης μπορούν να έχουν τεράστιο κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο. Οι βλάβες σε σταθμούς παραγωγής ή σε τμήματα του συστήματος διανομής, οι φθορές στις γραμμές μεταφοράς και οι φυσικές καταστροφές, αποτελούν μερικά από τα αίτια που είναι σε θέση να προκαλέσουν τέτοιου είδους διακοπές.

Από τα παραπάνω συνάγεται ο καταλυτικός ρόλος της εποπτείας και του ελέγχου στον σχεδιασμό, την οργάνωση και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα σύγχρονα κέντρα ελέγχου ενέργειας λαμβάνουν πλήθος μετρήσεων από διαφορετικά σημεία ενός ηλεκτρικού δικτύου και εφαρμόζουν τεχνικές εκτίμησης κατάστασης και ανίχνευσης/εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων προκειμένου να θωρακίσουν την κανονική και ασφαλή λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει θέσει ως κύριο στόχο να εισαγάγει τον αναγνώστη στις έννοιες της εποπτείας και ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, της εκτίμησης κατάστασης και της ανίχνευσης/εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων.

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα εποπτείας και ελέγχου, το οποίο βασίζεται σε συμβατικές μετρήσεις. Το σύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί για εκπαιδευτική/εργαστηριακή χρήση ή για μικρής κλίμακας βιομηχανική χρήση.

Λέξεις-Κλειδιά: μέθοδος WLS, εκτίμηση κατάστασης, συμβατικές μετρήσεις, συστήματα SCADA, HMI, PLC, RTU, ανίχνευση εσφαλμένων μετρήσεων, εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων

ABSTRACT

Electrical power, in the short span of two centuries, has played an integral role in the industrial, technological and economic development of societies and has become an indispensable part of modern day life.

Serious disruptions to the electricity supply can lead to severe economic and social consequences. Causes of power failures include natural disasters, faults at power stations, damage to electric transmission lines, substations or other parts of the distribution systems.

On the basis of the above considerations, it can be concluded that Power System Monitoring and Control (PSMC) is of vital importance in the design, planning and operation of modern electric power systems.

Power system control centers receive several measurements from all over the electrical grid as well as implement state estimation and bad data detection/identification techniques in order to secure normal operation of the power system.

The main goal of this thesis is to introduce the reader to the concepts of PSMC, state estimation and bad data detection/identification.

In the context of this thesis, an all-around monitoring and control project, based on conventional measurements was developed. This project can be used for educational purposes or in small scale power systems.

Keywords: WLS method, state estimation, conventional measurements, SCADA systems, HMI, PLC, RTU, bad data detection, bad data identification

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Γεώργιο Κορρέ, για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξη που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς επίσης και για τις υποδείξεις, τις διορθώσεις, αλλά και την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλο αυτό το διάστημα.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους συμμετέχοντες στην εξεταστική επιτροπή κ. Παύλο Γεωργιάκη και κ. Ιωάννη Γκόνο.

Ακόμα οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλα τα μέλη της οικογένειάς μου, τα οποία με την κατανόηση, την υποστήριξη και την κάθε είδους βοήθεια που μου προσέφεραν, συνέβαλαν τα μέγιστα στην επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή	15
1.1 Στοχοθεσία της διπλωματικής εργασίας.....	17
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	17
2 Εκτίμηση κατάστασης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	19
2.1 Εισαγωγικά στοιχεία	19
2.1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	19
2.1.2 Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
2.2 Οι έννοιες της εκτίμησης κατάστασης και του εκτιμητή κατάστασης.....	21
2.2.1 Ιστορική αναδρομή	21
2.2.2 Εκτιμητής κατάστασης	22
2.3 Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συμβατικών μετρήσεων.....	24
2.3.1 Απομακρυσμένη Τερματική Μονάδα-RTU	25
2.3.2 Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής-PLC.....	30
2.3.3 RTUs και PLCs	39
2.3.4 Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων-SCADA.....	40
2.4 Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με συγχρονισμένες μετρήσεις από PMU	44
2.4.1 Μονάδες Μέτρησης Φάσης-PMU	44
2.4.2 Σύγκριση των τεχνολογιών συγχρονισμένων και μη συγχρονισμένων μετρήσεων.....	45
3 Υλοποίηση αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.....	49
3.1 Μοντέλο δικτύου-Παραδοχές.....	49
3.1.1 Γραμμές μεταφοράς.....	49
3.1.2 Εγκάρσια στοιχεία	50
3.1.3 Μετασχηματιστές.....	50
3.1.4 Γεννήτριες.....	53
3.1.5 Φορτία.....	54
3.2 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας.....	54
3.2.1 Κανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής	55
3.2.2 Συνάρτηση πιθανοφάνειας	56
3.3 Μοντέλο μετρήσεων	57
3.3.1 Η συνάρτηση των μετρήσεων $h(x)$	59

3.3.2	Η Ιακωβιανή μήτρα $H(x)$	61
3.3.3	Η μήτρα κέρδους $G(x)$	63
3.4	Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης.....	63
4	Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων	67
4.1	Εισαγωγικά στοιχεία	67
4.2	Διαδικασία ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων	68
4.2.1	Κατηγοριοποίηση των μετρήσεων	69
4.2.2	Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τον έλεγχο χ^2	70
4.2.3	Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τη χρήση κανονικοποιημένων υπολοίπων	70
4.2.4	Υλοποίηση αλγορίθμου για την ανίχνευση και τον εντοπισμό εσφαλμένων μετρήσεων.....	71
4.2.5	Σφάλματα τοπολογίας.....	73
5	Υλοποίηση εργαστηριακού συστήματος SCADA.....	75
5.1	Η υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal.....	75
5.1.1	Η γλώσσα Visual Basic	76
5.1.2	Συγγραφή προγραμματιστικών σεναρίων Visual Basic στο TIA Portal	77
5.2	Εισαγωγή των συσκευών του συστήματος αυτοματισμού	78
5.2.1	Εισαγωγή προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή-PLC	78
5.2.2	Εισαγωγή συσκευής διεπαφής χρήστη-HMI.....	79
5.2.3	Εισαγωγή συναρτήσεων μέτρησης (scaling functions).....	80
5.3	Προσομοίωση των μετρήσεων από τις μονάδες PLC	81
5.4	Συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα	85
5.4.1	Συναρτήσεις για τη διενέργεια υπολογισμών με πίνακες	85
5.4.2	Εισαγωγή των παραμέτρων του μελετώμενου δικτύου	90
5.4.3	Εισαγωγή του διανύσματος των μετρήσεων	94
5.4.4	Εισαγωγή της μήτρας διασποράς R	94
5.4.5	Εισαγωγή του πίνακα με τις συναρτήσεις μετρήσεων h σε υβριδική μορφή	95
5.4.6	Αρχικοποίηση του διανύσματος μετρήσεων x	96
5.4.7	Εισαγωγή της Ιακωβιανής μήτρας $H(x)$ σε υβριδική μορφή.....	97
5.4.8	Εκτίμηση κατάστασης	101
5.4.9	Υπολογισμός των μελετώμενων μεγεθών με βάση τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης.....	102
5.4.10	Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τη χρήση κανονικοποιημένων υπολοίπων	104

5.4.11	Διενέργεια υπολογισμών στην περίπτωση αφαίρεσης γραμμής.....	105
5.5	Δημιουργία της διεπαφής χρήστη HMI.....	106
5.5.1	Εισαγωγή τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών	107
5.5.2	Εισαγωγή των διακοπτικών στοιχείων.....	108
5.5.3	Εισαγωγή δυνατοτήτων αφαίρεσης γραμμών του συστήματος	110
5.5.4	Εισαγωγή ενδείξεων του συστήματος	112
5.6	Αποτελέσματα προσομοίωσης	116
5.7	Επαλήθευση των αποτελεσμάτων	125
6	Επίλογος	127
6.1	Προοπτικές περαιτέρω έρευνας	127
	Βιβλιογραφία	129
	Παράρτημα.....	137
	Π.1 Πίνακας συμβόλων κατά την προσομοίωση των μετρήσεων	137
	Π.2 Διενέργεια υπολογισμών και επαλήθευση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα Mathcad	139

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Σύγχρονο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας στη βόρεια Καλιφόρνια	16
Εικόνα 2: Βασική δομή ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	19
Εικόνα 3: Καταστάσεις λειτουργίας δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας	21
Εικόνα 4: Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	24
Εικόνα 5: Μονάδα RTU που χρησιμοποιεί το ασύρματο πρωτόκολλο GSM	25
Εικόνα 6: Ανατομία ενός σύγχρονου RTU	26
Εικόνα 7: Mode-A Σύστημα	27
Εικόνα 8: Τα πρωτόκολλα Modbus/ASCII και Modbus/RTU	29
Εικόνα 9: Η λειτουργία των PLCs.....	30
Εικόνα 10: Το PLC CPU 312C v3.3 της Siemens	31
Εικόνα 11: Πλαίσιο τοποθέτησης ενός PLC	34
Εικόνα 12: Λύσεις τροφοδοσίας PLCs	34
Εικόνα 13: Γαλβανική απομόνωση κυκλωμάτων του PLC	36
Εικόνα 14: Διεπαφή HMI της Siemens	41
Εικόνα 15: Βασική δομή ενός συστήματος SCADA	44
Εικόνα 16: Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με PMUs	45
Εικόνα 17: Σύγκριση συστημάτων με συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις.....	47
Εικόνα 18: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς	50
Εικόνα 19: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου	50
Εικόνα 20: 1 ^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης	51
Εικόνα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (1 ^ο μοντέλο)	52
Εικόνα 22: 2 ^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης	52
Εικόνα 23: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (2 ^ο μοντέλο)	53
Εικόνα 24: Μοντέλο γεννήτριας.....	54
Εικόνα 25: Μοντέλο φορτίου	54
Εικόνα 26: Τυποποιημένη κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας	56
Εικόνα 27: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης.....	65
Εικόνα 28: Αλγόριθμος ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων	72
Εικόνα 29: Η υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal v13	75
Εικόνα 30: Ενοποίηση διαδικασιών σε ένα module	78
Εικόνα 31: Εισαγωγή του ελεγκτή PLC.....	79
Εικόνα 32: Εισαγωγή της διεπαφής χρήστη HMI.....	80

Εικόνα 33: Η συνάρτηση μέτρησης FC105 για τη μέτρηση της ανά μονάδα τιμής τάσης του ζυγού 2	81
Εικόνα 34: Εισαγωγή εικονικών μετρήσεων από τα PLCs	83
Εικόνα 35: Εισαγωγή εικονικών μετρήσεων από τα PLCs στην περίπτωση που έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2	84
Εικόνα 36: Τοπολογία του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών	90
Εικόνα 37: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά του δικτύου	91
Εικόνα 38: Εισαγωγή τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών	107
Εικόνα 39: Εισαγωγή των διακοπτικών στοιχείων στο δίκτυο	109
Εικόνα 40: Αφαίρεση της γραμμής 1-2 από το σύστημα.....	111
Εικόνα 41: Ενδείξεις αποτελεσμάτων εκτίμησης κατάστασης	113
Εικόνα 42: Ενδείξεις των μετρητών του συστήματος	114
Εικόνα 43: Εμφάνιση προειδοποιητικού μηνύματος μετά από τον εντοπισμό εσφαλμένης μέτρησης	115
Εικόνα 44: Αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης στην κανονική κατάσταση.....	117
Εικόνα 45: Ενδείξεις των μετρητών στην κανονική κατάσταση	118
Εικόνα 46: Αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης μετά την αφαίρεση της γραμμής 1-2	119
Εικόνα 47: Ενδείξεις μετρητών μετά την αφαίρεση της γραμμής 1-2.....	120
Εικόνα 48: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P_2	121
Εικόνα 49: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P_2 στην οθόνη ενδείξεων των μετρητών	122
Εικόνα 50: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P_2 , όταν έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2	123
Εικόνα 51: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P_2 στην οθόνη ενδείξεων των μετρητών, όταν έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2.....	124
Εικόνα 52: Το υπολογιστικό εργαλείο Mathcad 15	125
Εικόνα 53: Πίνακας συμβόλων κατά την προσομοίωση των μετρήσεων.....	138

Εισαγωγή

Από τον πρώτο ηλεκτρικό λαμπτήρα, την ιδέα για τον οποίο διατύπωσαν οι Humphry Davy και Joseph Wilson Swan στις αρχές του 19^{ου} αιώνα και τον οποίο τελειοποίησε ο Thomas Edison το 1879, μέχρι τους σύγχρονους μικροεπεξεργαστές με μέγεθος κόκκου άμμου, έχουν μεσολαβήσει εκατομμύρια τεχνολογικά επιτεύγματα, τα οποία οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας. (1) (2)

Η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και των ενεργειακών αναγκών των σύγχρονων κοινωνιών, έχει οδηγήσει σε πολύ μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και στη χρησιμοποίηση ολοένα και περισσότερων πηγών για την παραγωγή της. (3)

Η χρήση του ηλεκτρικού δικτύου μιας χώρας γίνεται από το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού της. Σημαντικές αυξομειώσεις στη ζήτηση της ενέργειας, οι καιρικές συνθήκες, οι φυσικές καταστροφές, η γήρανση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο, ο ανθρώπινος παράγοντας κ.α. καθιστούν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας επιρρεπές σε βλάβες ή ακόμα και σε κατάρρευση. (4)

Στις 30 και 31 Ιουλίου του 2012, σημειώθηκαν δύο διαδοχικά μπλακάουτ μεγάλης έκτασης στο βόρειο και στο ανατολικό τμήμα της Ινδίας, τα οποία εκτιμάται ότι επηρέασαν συνολικά πάνω από 620 εκατομμύρια ανθρώπους (9% του παγκόσμιου πληθυσμού). Επίσης, μπλακάουτ καταγράφηκε στο Πακιστάν τον Ιανουάριο του 2015 και επηρέασε περίπου 140 εκατομμύρια άτομα. Οι παραπάνω περιπτώσεις αποτελούν μόλις δύο από τα πολυάριθμα παραδείγματα κατάρρευσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ευρύτερων περιοχών. (5)

Τα παραπάνω παραδείγματα καταδεικνύουν την καθοριστική σημασία της πλήρους εποπτείας και του συνεχούς ελέγχου των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να διασφαλίζεται η απρόσκοπτη κάλυψη της ζήτησης των τελικών καταναλωτών.

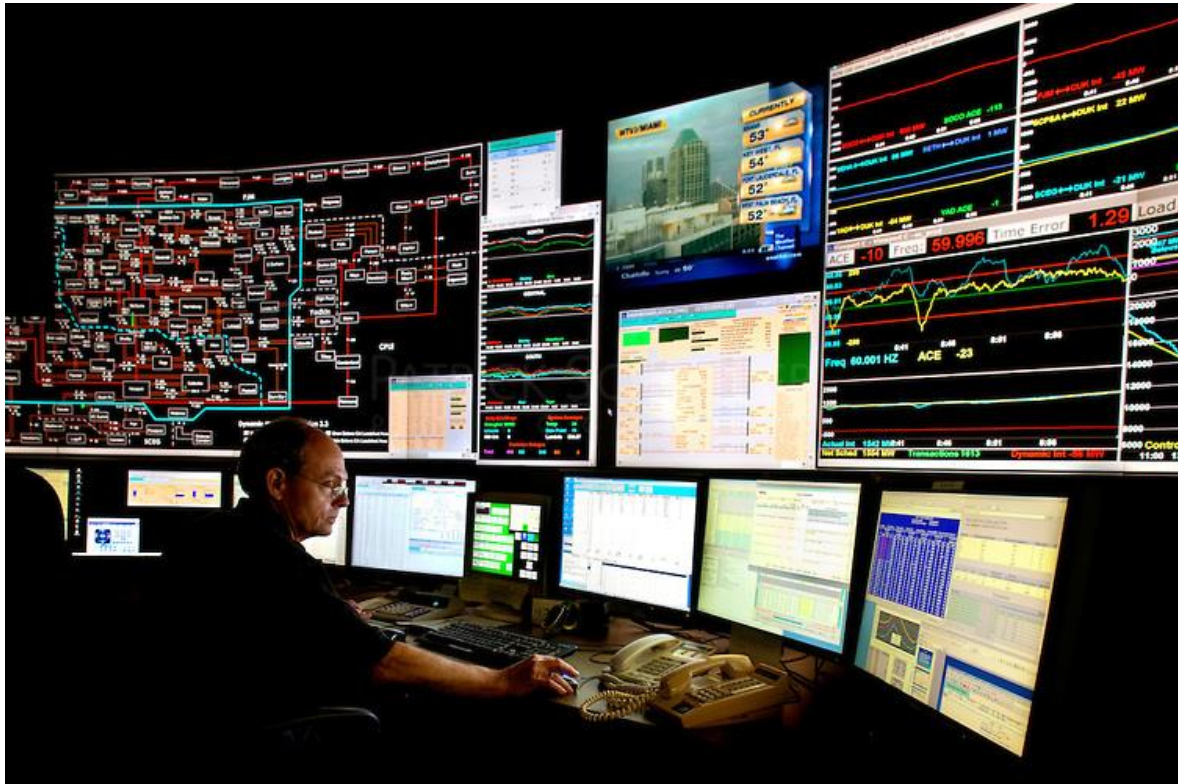
Επιφορτισμένα με την εποπτεία και διαχείριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας.

Τα Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας αποτελούν ένα νευραλγικό κομμάτι σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο σε περιπτώσεις κεντρικής παραγωγής όσο και σε περιπτώσεις καταμεμημένης παραγωγής. (6) (7)

Μέσω αυτών:

- Παρέχεται η δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ρυθμίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τεχνοοικονομικά κριτήρια και την εκάστοτε ζήτηση.
- Ανιχνεύονται βλάβες σε στοιχεία ή σε μετρητικά όργανα του συστήματος.

- Σε έκτακτες περιπτώσεις λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα ή ακόμα αποκόπτονται προσωρινά συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου, προκειμένου να επανέλθει το συντομότερο δυνατόν το σύστημα σε κανονική λειτουργία και να αποφευχθεί η κατάρρευσή του.
- Πραγματοποιείται επισκόπηση των λειτουργικών δυνατοτήτων και ορίων του συστήματος και λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα σε περιπτώσεις επέκτασης ή συρρίκνωσης αυτού. (8) (9) (10)



Εικόνα 1: Σύγχρονο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας στη βόρεια Καλιφόρνια (11)

Προκειμένου να προσδιοριστεί η κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα, είναι απαραίτητη η γνώση του μέτρου και της φάσης της τάσης σε κάθε ζυγό του μελετώμενου δικτύου. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν είναι πάντοτε εφικτό για λόγους οι οποίοι θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Σε ένα Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας με συμβατικές μετρήσεις καταφτάνει ανά πάσα στιγμή μεγάλος αριθμός μετρήσεων (μέτρα τάσεων, ροές ενεργού και αέργου ισχύος, εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος σε ζυγούς του συστήματος, καταστάσεις διακοπών κ.α.). Ωστόσο οι μετρήσεις αυτές ενδέχεται να μην καλύπτουν όλα τα μελετώμενα μεγέθη. Παράλληλα, κάποιες από τις μετρήσεις που καταφθάνουν, ενδέχεται να μην είναι απόλυτα ακριβείς, αλλά να εμπεριέχουν σφάλματα.

Στην αντιμετώπιση των δύο παραπάνω ζητημάτων που ανακύπτουν, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο εκτιμητής κατάστασης, ο οποίος κάνοντας χρήση των διαθέσιμων δεδομένων

είναι σε θέση να υπολογίσει τα μεγέθη για τα οποία δεν διαθέτουμε μετρήσεις, καθώς και να εντοπίσει πιθανά σφάλματα που υπάρχουν στο δίκτυο. (9)

1.1 Στοχοθεσία της διπλωματικής εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος εποπτείας δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενου από πέντε (5) ζυγούς. Το σύστημα αυτό θα συλλέγει αυτόματα εικοσιμία (21) συμβατικές μετρήσεις από όλο το δίκτυο, θα διενεργεί τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εκτίμηση κατάστασης και θα είναι σε θέση να εντοπίζει μετρήσεις που εμπεριέχουν σημαντικά σφάλματα.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης θα παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο σε ένα υπολογιστικό γραφικό περιβάλλον σχεδιασμένο με γνώμονα την απλότητα και την αποτελεσματικότητα.

Ειδικές προειδοποιητικές ενδείξεις θα εμφανίζονται, σε περίπτωση που εντοπιστούν μετρήσεις που εμπεριέχουν σφάλματα.

Τέλος θα είναι δυνατή μέσω του συστήματος η προσθαφαίρεση γραμμών και η εκ νέου διενέργεια των απαραίτητων υπολογισμών στην προκύπτουσα τοπολογία δικτύου.

Η χρήση του παραπάνω συστήματος μπορεί να γίνει προς δύο κατευθύνσεις:

- Εκπαιδευτική/Εργαστηριακή χρήση, για εξοικείωση των φοιτητών με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων αυτοματισμού και εποπτείας καθώς επίσης και με τις έννοιες της εκτίμησης κατάστασης και του εντοπισμού σφαλμάτων.
- Βιομηχανική χρήση, για εποπτεία και έλεγχο σε πραγματικό χρόνο συστήματος πέντε (5) ζυγών με τις κατάλληλες τροποποιήσεις κατά περίπτωση.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι (6) κεφάλαια των οποίων το περιεχόμενο παρουσιάζεται συνοπτικά παρακάτω:

Κεφάλαιο 1^ο: Στην εισαγωγή περιγράφεται η αναγκαιότητα της εποπτείας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα αποτυπώνεται η δομή και η στοχοθεσία της διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2^ο: Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται γενικές πληροφορίες για τη δομή και τις καταστάσεις λειτουργίας των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα γίνεται εισαγωγή στις έννοιες της εκτίμησης κατάστασης και της ανάλυσης ασφαλείας δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές ή συγχρονισμένες μετρήσεις.

Κεφάλαιο 3^ο: Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται ο αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης ο οποίος υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Παράλληλα, αναφέρονται οι υποθέσεις και οι παραδοχές για το μελετώμενο δίκτυο.

Κεφάλαιο 4°: Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι δυνατότητες ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων μέσω τεχνικών εκτίμησης κατάστασης.

Κεφάλαιο 5°: Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η υλοποίηση του εργαστηριακού συστήματος SCADA στην υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal της Siemens. Παράλληλα, παρατίθενται στιγμιότυπα οθόνης (screenshots) από την υλοποίηση αυτή.

Κεφάλαιο 6°: Στον επίλογο πραγματοποιείται μια ανακεφαλαίωση της διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται προοπτικές περαιτέρω έρευνας.

Εκτίμηση κατάστασης συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

2.1.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

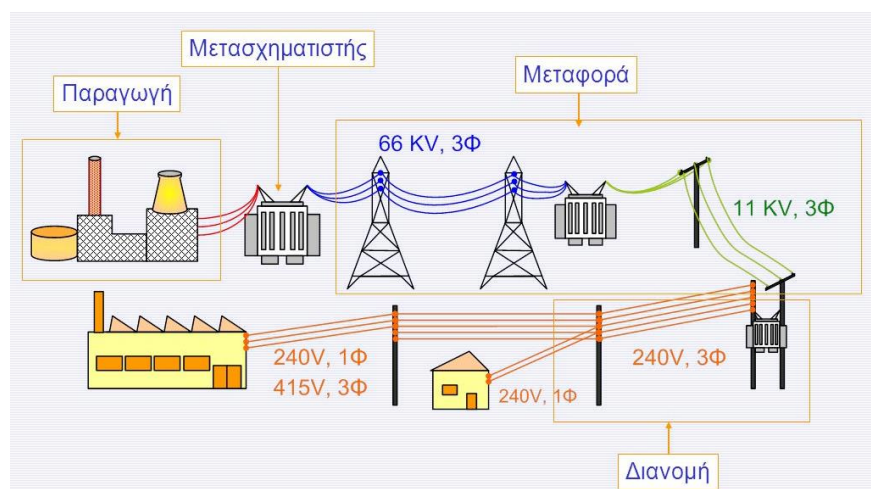
Η βασική δομή ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τα ακόλουθα τρία διασυνδεδεμένα υποσυστήματα:

- Το σύστημα παραγωγής
- Το σύστημα μεταφοράς
- Το σύστημα διανομής

Το **σύστημα παραγωγής** αποτελείται από ένα σύνολο υποσταθμών παραγωγής, στους οποίους διαφορετικές μορφές ενέργειας (χημική, ηλιακή, αιολική, πυρηνική, δυναμική κ.α.) μετατρέπονται σε ηλεκτρική ενέργεια. (12) (13)

Το **σύστημα μεταφοράς** μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς, κάνοντας χρήση υψηλής ή υπερυψηλής τάσης. Στα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς, πραγματοποιείται υποβιβασμός σε μέση τάση και ξεκινάει το σύστημα διανομής, το οποίο τελικά καταλήγει στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι καταναλωτές. (14) (15)

Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση της δομής ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:



Εικόνα 2: Βασική δομή ενός σύγχρονου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (16)

2.1.2 Καταστάσεις λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Τρεις είναι οι βασικές καταστάσεις λειτουργίας στις οποίες μπορεί να περιέλθει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας:

- Κανονική κατάσταση
- Επείγουσα κατάσταση
- Διορθωτική κατάσταση

Στην **κανονική κατάσταση** λειτουργίας, η ζήτηση σε ενέργεια καλύπτεται πλήρως από το σύστημα παραγωγής, χωρίς λειτουργικές διαταραχές στο συνολικό σύστημα και χωρίς να ξεπεραστούν τα όρια των γραμμών μεταφοράς. (17)

Ένα δίκτυο που βρίσκεται στην κανονική κατάσταση λειτουργίας μπορεί να είναι ασφαλές ή όχι, ανάλογα με το αν δύναται να παραμείνει στην κανονική κατάσταση ακόμα και αν επισυμβούν ορισμένα απρόβλεπτα σφάλματα δικτύου ή όχι.

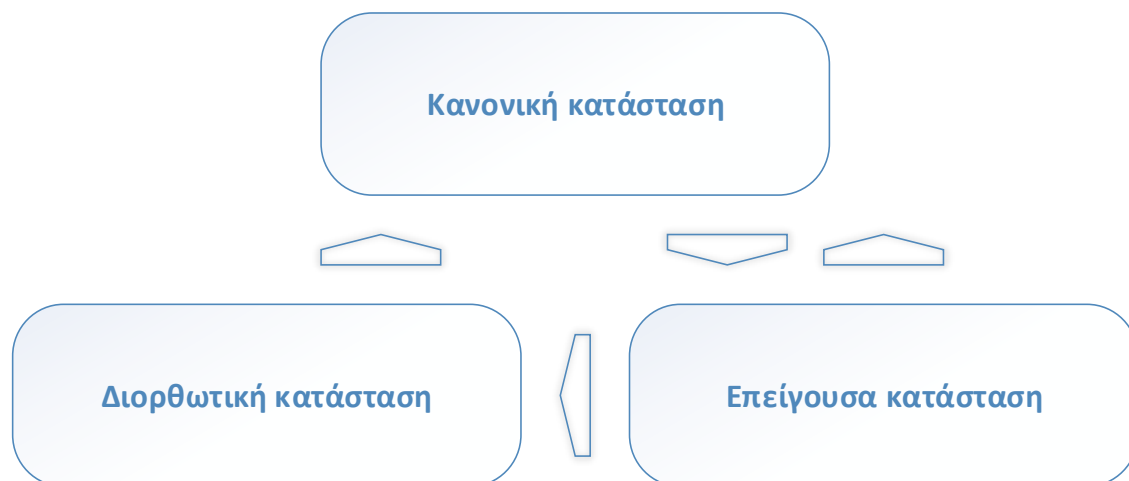
Περιπτώσεις μη ασφαλών καταστάσεων λειτουργίας χρήζουν άμεσων χειρισμών, ώστε να αντιμετωπιστούν τα εμφανιζόμενα σφάλματα.

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιέρχεται σε **επείγουσα κατάσταση** λειτουργίας, όταν συμβεί κάποιο απρόσμενο γεγονός, το οποίο διαταράσσει την ομαλή λειτουργία του, με αποτέλεσμα να μην τηρούνται κάποιοι από τους λειτουργικούς περιορισμούς του.

Ένα σύστημα, το οποίο βρίσκεται σε επείγουσα κατάσταση λειτουργίας, εξακολουθεί εν μέρει να τροφοδοτεί το δίκτυο με ισχύ, εντούτοις, προκειμένου να αποφευχθεί η συνολική κατάρρευσή του, χρειάζονται άμεσα και αποτελεσματικά μέτρα, ώστε σταδιακά να επανέλθει σε κανονική και ασφαλή λειτουργία.

Τα μέτρα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν αποκοπή τμήματος του δικτύου και διακοπή ηλεκτροδότησης σε ορισμένους καταναλωτές, μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία προσφοράς-ζήτησης στο ηλεκτρικό δίκτυο και επαναφορά σε κατάσταση κανονικής και ασφαλούς λειτουργίας. Η παραπάνω μεταβατική κατάσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται συχνά και ως **διορθωτική κατάσταση**. (17)

Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση των καταστάσεων στις οποίες μπορεί να περιέλθει ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των δυνατών μεταβάσεων από τη μια κατάσταση στην άλλη.



Εικόνα 3: Καταστάσεις λειτουργίας δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

2.2 Οι έννοιες της εκτίμησης κατάστασης και του εκτιμητή κατάστασης

2.2.1 Ιστορική αναδρομή

Το πρώτο έναυσμα, για την ανάπτυξη της θεωρίας εκτίμησης κατάστασης, δόθηκε από τον Karl Friedrich Gauss το 1795 ο οποίος, σε ηλικία 18 χρονών τότε, μελετούσε την κίνηση των πλανητών. Έκανε λοιπόν την παρατήρηση ότι, θεωρώντας ως δεδομένο ότι οι νόμοι του Kepler είναι απολύτως ακριβείς, όπως επίσης και οι μετρήσεις που λαμβάνονταν από τα μετρητικά όργανα, θα έπρεπε απαραίτητα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαφορετικούς ερευνητές και από μετρήσεις σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα να συμπίπτουν. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν συνέβαινε στην πραγματικότητα, καθώς οι επιρροπές σε σφάλματα μετρήσεις, δεν ήταν τίποτα παραπάνω από μια προσέγγιση της πραγματικότητας. (18)

Προέβλεπε λοιπόν σαν απώτερο στόχο οι όποιοι υπολογισμοί γίνονται να αναπροσαρμόζονται, ώστε να ικανοποιούν στον μέγιστο δυνατό βαθμό όλες τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί. Κάτι τέτοιο ήταν δυνατό να επιτευχθεί, λαμβάνοντας μεγάλο πλήθος μετρήσεων (ακόμα μεγαλύτερο από το πλήθος που είναι απαραίτητο θεωρητικά για τον υπολογισμό της κατάστασης του συστήματος) και ρυθμίζοντας τις μεταβλητές κατάστασης, ώστε να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων. Ως υπόλοιπο ορίζεται η διαφορά μεταξύ της τιμής που προκύπτει από το μοντέλο μελέτης και της μετρούμενης τιμής. (18)

Η μέθοδος αυτή έγινε γνωστή ως μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (Least Squares ή LS), ενώ αργότερα ο ίδιος ο Gauss διατύπωσε και την κανονική κατανομή, η οποία σε μια ένδειξη αναγνώρισης του ονόματος και της συνεισφοράς του είναι γνωστή και ως κατανομή Gauss.

Η ιδέα της εκτίμησης κατάστασης συνδέεται άμεσα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και εφαρμόστηκε μεταξύ άλλων και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπου βοήθησε στον ορθό υπολογισμό της κατάστασης ενός συστήματος, ακόμα και αν στις μετρήσεις που λαμβάνονται υπεισέρχονται σφάλματα.

2.2.2 Εκτιμητής κατάστασης

Το σύστημα το οποίο βασίζεται στις μεθόδους εκτίμησης κατάστασης, για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων, ονομάζεται εκτιμητής κατάστασης.

Ο εκτιμητής κατάστασης δέχεται ως είσοδο τις διαθέσιμες μετρήσεις από διαφορετικά σημεία του συστήματος. Αφού εντοπίσει και απομονώσει τις μετρήσεις με μεγάλο σφάλμα, προχωράει στον προσδιορισμό των άγνωστων μεταβλητών του συστήματος.

Παράλληλα διευκολύνει την ακριβή και αποδοτική παρακολούθηση των λειτουργικών περιορισμών ορισμένων ποσοτήτων, όπως ο φόρτος των γραμμών μεταφοράς ή τα μέτρα τάσεων των ζυγών.

Τέλος παρέχει μια βάση δεδομένων για το σύστημα η οποία συμπεριλαμβάνει και την τρέχουσα κατάσταση, πάνω στην οποία είναι δυνατό να εφαρμοστούν λειτουργίες ελέγχου ασφάλειας του συστήματος. (17)

Συνήθως οι εκτιμητές κατάστασης περιλαμβάνουν τις ακόλουθες λειτουργίες:

- Επεξεργασία τοπολογίας
- Ανάλυση παρατηρησιμότητας
- Εκτίμηση κατάστασης
- Επεξεργασία μη αποδεκτών μετρήσεων
- Επεξεργασία παραμέτρων και δομικών σφαλμάτων

Κατά την **επεξεργασία τοπολογίας**, συγκεντρώνονται τα δεδομένα κατάστασης των διακοπτικών στοιχείων του συστήματος και δημιουργείται το τρέχον διάγραμμα του συστήματος.

Η **ανάλυση παρατηρησιμότητας** προσδιορίζει αν μπορεί να εξαχθεί λύση από τον εκτιμητή κατάστασης, χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο σύνολο μετρήσεων. Επίσης αναγνωρίζει τους μη παρατηρήσιμους κλάδους, καθώς και τις παρατηρήσιμες νησίδες του συστήματος, αν υπάρχουν.

Κατά την **εκτίμηση κατάστασης**, πραγματοποιείται η βέλτιστη δυνατή εκτίμηση για την κατάσταση του συστήματος, η οποία προσδιορίζεται από τα μέτρα και τις γωνίες των τάσεων σε όλους τους ζυγούς που μελετώνται.

Η **επεξεργασία μη αποδεκτών μετρήσεων** εντοπίζει την ύπαρξη μεγάλων σφαλμάτων στο σύνολο των μετρήσεων. Επιπλέον αναγνωρίζει και εξαλείφει μη αποδεκτές μετρήσεις, με την προϋπόθεση ότι υπάρχει πλεόνασμα μετρήσεων.

Τέλος, η **επεξεργασία παραμέτρων και δομικών σφαλμάτων**, κάνει εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων του δικτύου και παράλληλα εντοπίζει πιθανά δομικά σφάλματα στη διαμόρφωση του δικτύου και αναγνωρίζει όσα διακοπτικά στοιχεία αναφέρουν λάθος κατάσταση. (17)

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές ότι ο εκτιμητής κατάστασης αποτελεί νευραλγικό κομμάτι της ανάλυσης ασφαλείας.

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω οικονομικών παραγόντων αλλά και τεχνικών περιορισμών, λειτουργούν συχνά κοντά στα όρια ασφαλείας τους. Εξαιτίας αυτού, είναι σημαντικό να λαμβάνονται μέτρα που θα προλαμβάνουν αποσταθεροποιητικούς παράγοντες και θα θωρακίζουν τη λειτουργία του δικτύου. (19)

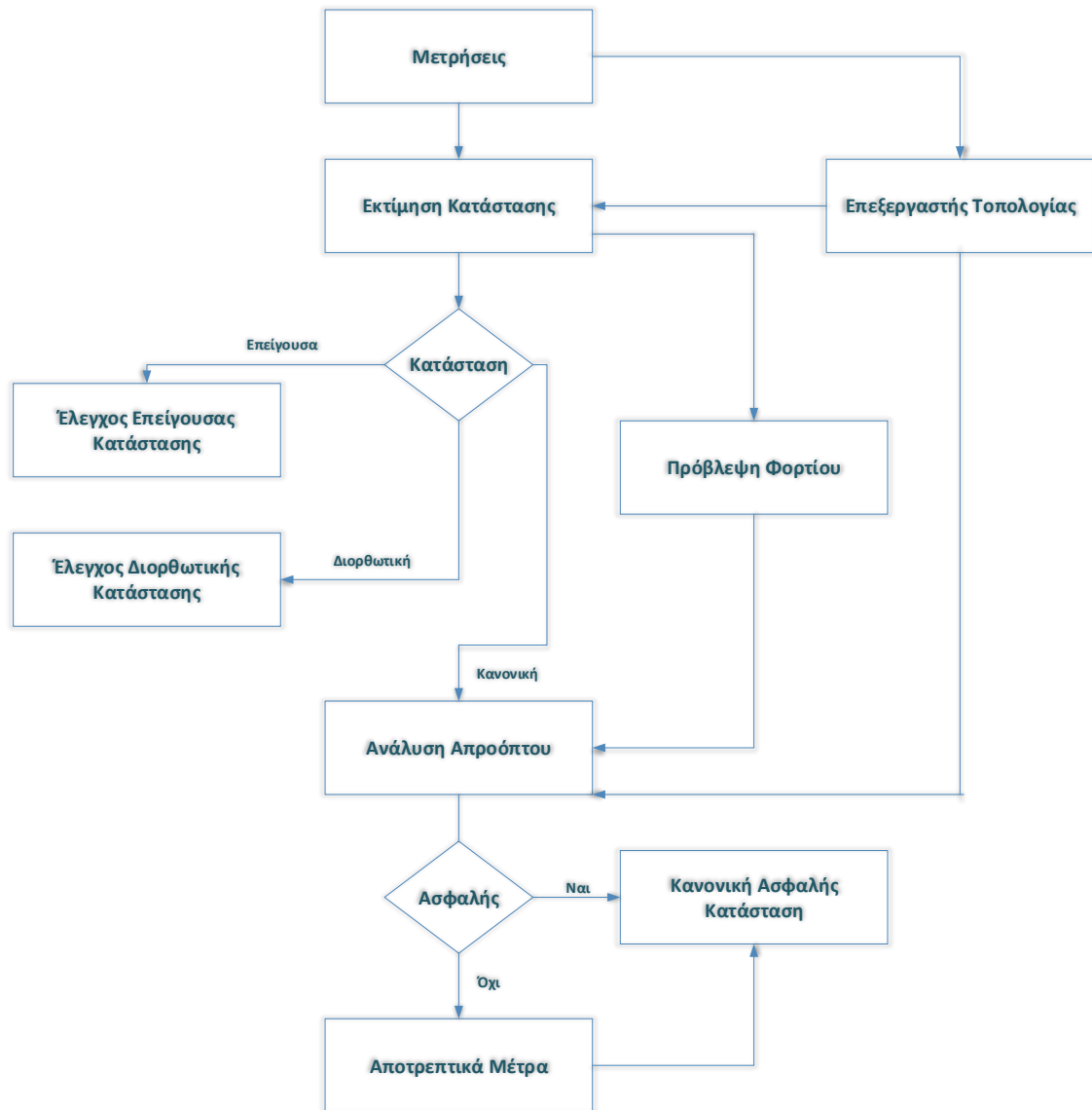
Το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται για την ορθή οργάνωση και διαχείριση του δικτύου, τη διασφάλιση της κανονικής και ασφαλούς λειτουργίας του, καθώς επίσης και για την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση πιθανών βλαβών και σφαλμάτων εντός αυτού, συνιστούν την έννοια της ανάλυσης ασφαλείας ηλεκτρικού δικτύου. (17) (20)

Οι παραστατικοί μιγαδικοί των τάσεων σε κάθε ζυγό (μέτρο και γωνία) προσδιορίζουν πλήρως ένα σύστημα και αναφέρονται ως στατική κατάσταση του συστήματος. (21)

Η ανάλυση ασφαλείας ηλεκτρικού δικτύου περιλαμβάνει τη λήψη και την επεξεργασία μετρήσεων από όλο το σύστημα για τον προσδιορισμό της κατάστασης του.

Οι μετρήσεις στις οποίες στηρίζεται η ανάλυση ασφαλείας μπορεί να είναι συμβατικές (μη συγχρονισμένες) που λαμβάνονται από συστήματα SCADA ή συγχρονισμένες που λαμβάνονται από όργανα μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units, PMUs) ή ακόμα συνδυασμός συγχρονισμένων και μη συγχρονισμένων μετρήσεων. (22) (23)

Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση της ανάλυσης ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 4: Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

2.3 Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συμβατικών μετρήσεων

Η ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές μετρήσεις βασίζεται σε μη απόλυτα συγχρονισμένες μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται από ειδικά όργανα ή αισθητήρες (sensors), που βρίσκονται διεσπαρμένα μέσα στο μελετώμενο δίκτυο.

Οι μετρήσεις αυτές καταφθάνουν με τη βοήθεια PLCs (Programmable Logic Controllers-PLCs) και RTUs (Remote Terminal Units-RTUs) σε Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (Supervisory Control and Data Acquisition-SCADA), όπου και γίνεται η επεξεργασία τους. (24) (25)

2.3.1 Απομακρυσμένη Τερματική Μονάδα-RTU

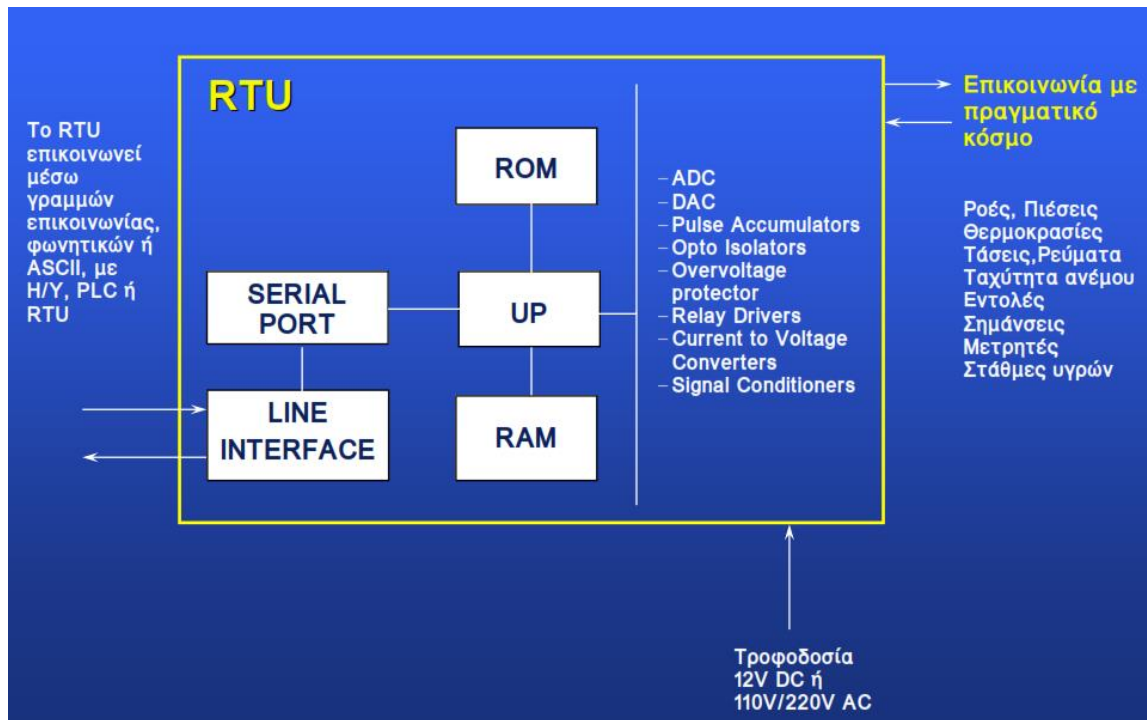
Οι Απομακρυσμένες Τερματικές Μονάδες (RTUs) είναι συσκευές οι οποίες συλλέγουν δεδομένα τηλεμετρίας, συνήθως από μια ευρεία περιοχή, και τα μεταδίδουν ενσύρματα ή ασύρματα, μέσω κάποιου πρωτοκόλλου επικοινωνίας σε κάποιο κέντρο ελέγχου, ώστε να είναι δυνατή η μετέπειτα επεξεργασία τους. (24) (26)



Εικόνα 5: Μονάδα RTU που χρησιμοποιεί το ασύρματο πρωτόκολλο GSM (27)

Το RTU μετατρέπει εισερχόμενα σήματα από τον πραγματικό κόσμο, όπως για παράδειγμα πιέσεις, ροές, τάσεις, ρεύματα, καταστάσεις διακοπών, επαφές, παλμούς κ.α. σε σήματα τα οποία μπορούν να αποσταλούν ενσύρματα ή ασύρματα.

Το RTU επίσης μετατρέπει εισερχόμενα σήματα από άλλο RTU ή από έναν κεντρικό Η/Υ σε σήματα εξόδου, ώστε να ανοίξουν ή να κλείσουν ηλεκτρονόμοι (relays), να ανοίξουν βαλβίδες, να ξεκινήσουν ή να σταματήσουν κινητήρες κλπ. Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας ενός σύγχρονου RTU.



Εικόνα 6: Ανατομία ενός σύγχρονου RTU (28)

Τα RTUs κατατάσσονται σε κατηγορίες ανάλογα με:

- Τον τύπο επικοινωνίας που χρησιμοποιούν.
- Τον αριθμό εισόδων και εξόδων (I/Os) που είναι σε θέση να διαχειριστούν.
- Το εάν είναι στοιχειώδη RTUs, δηλαδή έχουν απλώς τη δυνατότητα διαχείρισης εκθέσεων (reports) και εντολών ή είναι «έξυπνα» προγραμματιζόμενα RTUs με προχωρημένες δυνατότητες. (29)

Τα συστήματα SCADA, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω, χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας των RTUs:

- Mode-A συστήματα: όπου γίνεται κλήση (dialing) του RTU.
- Mode-B συστήματα: όπου γίνεται συνεχής σάρωση (polling) του RTU μέσω H/Y.
- Mode-C συστήματα: όπου στέλνονται μετρήσεις και εντολές από RTU σε RTU (πολυπλεξία συστήματος). (28)

2.3.1.1 Mode-A συστήματα

Τα Mode-A συστήματα χρησιμοποιούν το δημόσιο δίκτυο τηλεφωνίας και μπορούν να επικοινωνούν είτε φωνητικά είτε σε γλώσσες συμβατές με H/Y. Τα συστήματα αυτά δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η συνεχής επικοινωνία με το RTU, εντούτοις παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα όπως:

- Χαμηλό κόστος επικοινωνίας, αφού υπάρχει μονάχα κόστος για την κλήση και την σύνδεση στην τηλεφωνική υποδοχή.
- Προσπέλαση στο RTU από οποιοδήποτε σημείο στον κόσμο υπάρχει τηλέφωνο.

- Δεν απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός, αφού μπορεί να γίνει προσπέλαση στο RTU με συνδυασμό Η/Υ και modem.



Εικόνα 7: Mode-A Σύστημα (28)

2.3.1.2 Mode-B συστήματα

Τα Mode-B συστήματα επικοινωνούν συνεχώς με έναν κεντρικό σταθμό (συνήθως έναν Η/Υ). Τα πλεονεκτήματα των εν λόγω συστημάτων περιγράφονται ακολούθως:

- Συνεχής επιτήρηση όλων των απομακρυσμένων σημείων του συστήματος από μια κεντρική θέση
- Ταχεία ενημέρωση της εισερχόμενης πληροφορίας
- Ταχεία ανταπόκριση σε εισερχόμενες εντολές

Μερικά παραδείγματα διαδικασιών που απαιτούν συνεχή επικοινωνία και επιτήρηση είναι:

- Τα διυλιστήρια πετρελαίου
- Οι αγωγοί μεταφοράς καυσίμων
- Τα εργοστάσια καθαρισμού ύδατος

Σημειώνεται ότι είναι δυνατή η σύνδεση των RTUs στο Internet μέσω ενός εργαλείου Embedded Web Server (EWS). (28)

2.3.1.3 Mode-C συστήματα

Τα Mode-C συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ταχεία, οικονομική και αξιόπιστη μεταφορά μετρήσεων και ψηφιακών σημάτων από μια θέση σε κάποιον άλλη.

Σε αυτές τις περιπτώσεις δύο ή περισσότερα RTUs ή πολυπλεκτικοί (MUX) εκπομποί/δέκτες επικοινωνούν μεταξύ τους ενσύρματα ή ασύρματα, κάνοντας χρήση γλωσσών συμβατών με Η/Υ, μεταβιβάζοντας αναλογική ή ψηφιακή πληροφορία από τα κυκλώματα εισόδου ενός RTU ή MUX στα κυκλώματα εξόδου ενός η περισσότερων RTU ή MUX. (28)

Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι το χαμηλό κόστος επικοινωνιών, καθώς πολλαπλά σήματα μπορούν να μεταδοθούν μέσω μίας μονάχα ζεύξης.

2.3.1.4 Είσοδοι και έξοδοι των RTUs

Τα RTUs συνδέονται με τις γραμμές επικοινωνίας μέσω ενός ενσωματωμένου modem και με τους αισθητήρες (sensors) ή τους ενεργοποιητές μέσω κυκλωμάτων εισόδου/εξόδου (Input/Output-I/O). (29) (30)

Τα κυκλώματα εισόδου/εξόδου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Αναλογικές εισοδοί (Analog Inputs-A/I)

Στις αναλογικές εισόδους το RTU λαμβάνει πληροφορίες από αισθητήρες σχετικά με ταχύτητες ροής υγρών, πιέσεις και στάθμες υγρών, ηλεκτρικά ρεύματα, τάσεις κλπ. Αυτός ο τύπος πληροφορίας καλείται αναλογικός, καθώς τα ηλεκτρικά σήματα που λαμβάνει το RTU είναι ανάλογα των μετρούμενων φυσικών μεγεθών, προέρχονται από μετατροπείς (transducers) και είναι συνήθως της τάξης των μερικών milliamperes (mA).

- Ψηφιακές εισοδοί (Digital Inputs-D/I)

Στις ψηφιακές εισόδους το RTU μπορεί να λαμβάνει πληροφορία σχετικά με το εάν μια αντλία δουλεύει ή όχι, εάν ένας διακόπτης είναι ανοιχτός ή κλειστός κλπ. Αυτός ο τύπος πληροφορίας ονομάζεται ψηφιακός, διότι αντιπροσωπεύει δύο καταστάσεις: 0 ή 1, ON ή OFF κλπ.

- Παλμικές εισοδοί (Pulse Inputs-P/I)

Οι παλμικές εισοδοί περιλαμβάνουν μετρήσεις ροής, ηλεκτρικής ενέργειας κλπ. οι οποίες αποστέλλουν παλμούς στο RTU. Κάθε παλμός αντιστοιχεί σε μια μονάδα μέτρησης του μεγέθους. Αυτοί οι παλμοί αθροίζονται από το RTU και το συνολικό άθροισμα απεικονίζεται από το RTU. Αφορούν συνήθως επίπεδα τάσης περίπου 5V.

- Αναλογικές έξοδοι (Analog Outputs-A/O)

Το σήμα εντολής θέσης (setpoint) μιας βαλβίδας, ένα αναλογικό σήμα θέσης σε ένα PLC ή ένα σήμα σε ένα καταγραφικό, απαιτούν από το RTU να δώσει στην έξοδο του ένα μεταβλητό ρεύμα μερικών mA ανάλογο της εντολής από τον κεντρικό Η/Υ ή της αναλογικής εισόδου από κάποιο άλλο RTU.

➤ Ψηφιακές εξόδους (Digital Outputs-D/O)

Εντολές από RTU για άνοιγμα ή κλείσιμο βαλβίδων, εκκίνηση ή σταμάτημα κινητήρων, άνοιγμα ή κλείσιμο διακοπών ισχύος, απαιτούν ψηφιακές εξόδους που να προέρχονται είτε από κεντρικό Η/Υ είτε από εισόδους άλλων RTUs.

➤ Παλμικές εξόδους (Pulse Outputs-P/O)

Παλμοσειρές επιπέδου τάσεων μερικών Volt (μια συνήθης τιμή είναι τα 12 V DC), αποσπελλόμενες από ένα σημείο σε ένα άλλο αποτελούν παράδειγμα παλμικών εξόδων. Το RTU μέσω ειδικού προγράμματος επιτρέπει στα ψηφιακά κυκλώματα εξόδου να δώσουν παλμούς ακριβώς αντίστοιχους με τους παλμούς εισόδου του RTU σε κάποιο άλλο άκρο.

2.3.1.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας RTU

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας στην ουσία αποτελούν τη γλώσσα με την οποία επικοινωνούν μεταξύ τους RTUs, PLCs, Η/Υ και άλλες συσκευές. (31)

Τα RTUs επιτυγχάνουν τη μεταξύ τους επικοινωνία με τον γνωστό κώδικα ASCII ή με άλλα βιομηχανικά πρωτόκολλα όπως το MODBUS, το PROFIBUS κ.α. (32)

Ο κώδικας ASCII (American Standard Code for Information Interchange) χρησιμοποιείται πρακτικά από κάθε Η/Υ, μιας και είναι από τα πλέον συνηθισμένα πρωτόκολλα. Οι ASCII ακολουθίες χαρακτήρων, αρχίζοντας και τελειώνοντας με Line Feed και Carriage Return, προγραμματίζονται, διαβάζονται και τυπώνονται εύκολα. Το δε μήνυμα σάρωσης (rolling message) του RTU αποτελείται απλώς από το όνομά του και το RTU πληροφορεί για τη δομή του και εκθέτει όλες τις αναλογικές, ψηφιακές και παλμικές εισόδους και εξόδους. (33)

Τα πρωτόκολλα MODBUS, PROFIBUS κ.α. είναι πρωτόκολλα ειδικά σχεδιασμένα για PLCs και RTUs και βρίσκουν πλήθος εφαρμογών σε βιομηχανικούς αυτοματισμούς. Χρησιμοποιούν τη λογική master/slave για διασυνδεδεμένες συσκευές.

Παρατίθενται ακολούθως ενδεικτικά κάποιες ιδιότητες των πρωτοκόλλων Modbus/ASCII και Modbus/RTU.

	Modbus/ASCII		Modbus/RTU	
Characters	ASCII 0...9 and A..F		Binary 0... 255	
Error check	LRC Longitudinal Redundancy Check		CRC Cyclic Redundancy Check	
Frame start	character:'!		3.5 chars silence	
Frame end	characters CR/LF		3.5 chars silence	
Gaps in message	1 sec		1.5 times char length	
Start bit	1		1	
Data bits	7		8	
Parity	even/odd	none	even/odd	none
Stop bits	1	2	1	2

Εικόνα 8: Τα πρωτόκολλα Modbus/ASCII και Modbus/RTU (32)

Επίσης ενδέχεται τα RTUs να είναι εξοπλισμένα με θύρες για την επικοινωνία τους με άλλες συσκευές, όπως για παράδειγμα με θύρα RS-232. (34)

Σημαντικός παράγοντας για τις επικοινωνίες των RTUs είναι η ταχύτητα επικοινωνίας, γνωστή και ως baudrate. Για παράδειγμα το baudrate ενός RTU με θύρα RS-232 είναι μεταξύ 1200 baud και 9600 baud (9600 symbols per second). (32) (35)

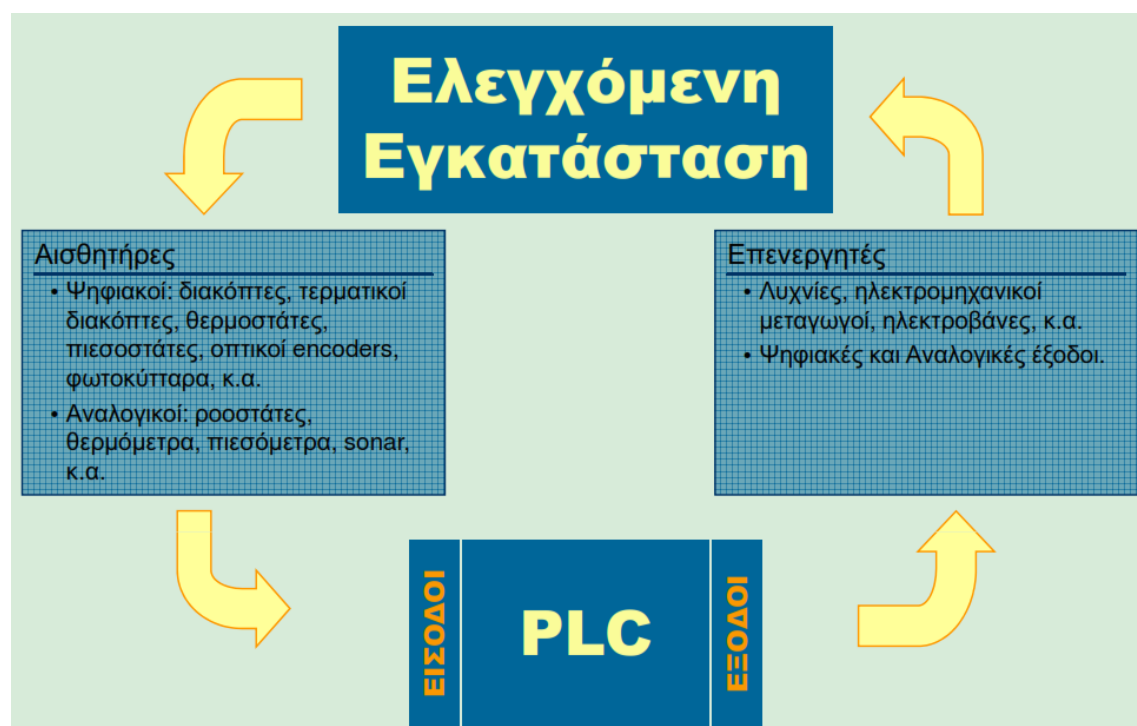
2.3.2 Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής-PLC

Ο Προγραμματιζόμενος Λογικός Ελεγκτής PLC (Programmable Logical Unit-PLC) αποτελεί μια ηλεκτρονική προγραμματιζόμενη συσκευή βασισμένη σε μικροεπεξεργαστή. Διαφέρει από έναν Η/Υ στα εξής σημεία:

- Μπορεί να εγκατασταθεί, να χρησιμοποιηθεί και να συντηρηθεί εύκολα από τεχνικούς βιομηχανικών εγκαταστάσεων.
- Η ένδειξη βλαβών του γίνεται μέσω ενδεικτικών λυχνιών.
- Λειτουργεί σταθερά σε βιομηχανικό περιβάλλον.

Έχει παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με τον Η/Υ, μιας και εκτελεί προγράμματα που βρίσκονται αποθηκευμένα στη μνήμη του.

Τα προγράμματα των PLCs αποτελούν ακολουθιακές λειτουργίες ελέγχου οι οποίες εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο σε βιομηχανικό περιβάλλον. (36)



Εικόνα 9: Η λειτουργία των PLCs

Ακολουθεί η μορφή ενός μοντέλου PLC της Siemens, το οποίο μάλιστα χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας:



Εικόνα 10: Το PLC CPU 312C v3.3 της Siemens (37)

2.3.2.1 Πλεονεκτήματα των PLCs

Τα PLCs είναι πιο ευέλικτα από άλλα συμβατικά συστήματα που χρησιμοποιούνται σε αυτοματισμούς, αφού είναι ηλεκτρονικές συσκευές και όχι μηχανικά συστήματα, άρα απαιτούν μειωμένη συντήρηση. (36) (38) (39) (40)

Πιο συγκεκριμένα παρέχουν:

- Μεγάλη ευκολία και χαμηλό κόστος απόκτησης και εγκατάστασης.
- Μεγάλη ταχύτητα επαναπρογραμματισμού.
- Μεγάλη ταχύτητα λειτουργίας, αφού είναι καθαρά ηλεκτρονικές συσκευές χωρίς μηχανικά μέρη. Οι διαδικασίες επιταχύνονται κατά μία τάξη μεγέθους (x10).
- Προστασία του προγράμματος και της λειτουργίας τους με κωδικούς ασφαλείας.
- Συστήματα ασφαλείας και διάγνωσης βλαβών (επίβλεψη τάσης τροφοδοσίας, ενδεικτικά LEDs εισόδων εξόδων κ.α.).
- Ικανότητα άμεσης επικοινωνίας με Η/Υ.
- Αυξημένη αξιοπιστία για λειτουργία σε βιομηχανικό περιβάλλον.
- Μείωση του κόστους συντήρησης.
- Μείωση του κόστους εγκατεστημένου υλικού.
- Αποτελεσματικότερη διαχείριση της κατανάλωσης ή της παραγωγής ενέργειας.
- Μείωση λειτουργικού κόστους.

2.3.2.2 Μειονεκτήματα των PLCs

Παρά τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα και την πληθώρα δυνατοτήτων αυτοματισμού που προσφέρουν, τα PLCs παρουσιάζουν και κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Σε πολύ απλές εφαρμογές, η χρήση PLC είναι ακριβότερη από μια αντίστοιχη υλοποίηση με ηλεκτρονόμους (relays).
- Σε περιπτώσεις εμφάνισης βλαβών στο PLC, είναι πιθανό να χρειάζεται αντικατάσταση τμήματος ή και ολοκλήρου του PLC, ενώ, σε μια αντίστοιχη υλοποίηση με ηλεκτρονόμους, θα ήταν αρκετό να αντικατασταθεί ένας μονάχα ηλεκτρονόμος.
- Ο ηλεκτρονικός θόρυβος, στα περιβάλλοντα λειτουργίας των PLCs, απαιτεί ειδικές κατασκευές και προστασίες, οι οποίες ανεβάζουν το τελικό κόστος απόκτησής τους.
- Η εγκατάσταση, η παρακολούθηση της λειτουργίας και η συντήρηση ενός PLC απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό ή εκπαίδευση του ήδη υπάρχοντος, κάτι που συνεπάγεται αύξηση του κόστους. (36) (39)

2.3.2.3 Λειτουργία PLCs σε βιομηχανικό περιβάλλον

Οι αντίξοες συνθήκες που επικρατούν σε ένα βιομηχανικό χώρο μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στη λειτουργία ηλεκτρικών κυκλωμάτων με μεταγωγούς και στους Η/Υ.

Ωστόσο τα PLCs έχουν σχεδιαστεί με τις κατάλληλες προδιαγραφές λειτουργίας σε ένα τέτοιο περιβάλλον. (41)

Το βιομηχανικό περιβάλλον περιλαμβάνει:

- Παράγοντες φυσικού και μηχανικού περιβάλλοντος όπως: ταλαντώσεις, κρουστικά φορτία, υγρασία και θερμοκρασία.
- Παράγοντες χημικής ρύπανσης όπως: αέρια, ατμούς και λεπτόκοκκη σκόνη που δρουν διαβρωτικά στις επαφές των αγωγών και στα ηλεκτρικά κυκλώματα.
- Ηλεκτρικό θόρυβο ο οποίος αφορά παρεμβολές στα κυκλώματα και στις καλωδιώσεις, θερμοηλεκτρική Ηλεκτρεγερτική Δύναμη (ΗΕΔ), δυναμικά βολταϊκής σύνδεσης, ηλεκτροστατικό θόρυβο, ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (π.χ. ηλεκτροσυγκολλήσεις) κ.α.

2.3.2.4 Χρήσεις των PLCs

Αν και δεν υπάρχει τεχνικό εμπόδιο για τη χρησιμοποίηση των PLCs, οι βασικές εφαρμογές τους περιορίζονται στον χώρο της βιομηχανίας. (36)

Κάποιες από τις εφαρμογές των PLCs είναι οι ακόλουθες:

- Στη μεταλλουργία: επεξεργασία κωκ, τροφοδοσία κλιβάνων, αυτοματισμοί χυτηρίων, ανάλυση φωταερίου, έλεγχος ποιότητας κ.λπ.
- Στις βιομηχανίες κατασκευών και τις αυτοκινητοβιομηχανίες: γραμμές παραγωγής και συναρμολόγησης, εργαλειομηχανές κ.λπ.
- Χημικές βιομηχανίες: έλεγχος μονάδων παραγωγής, μέτρηση ή ανάμιξη, επεξεργασία πλαστικών, σύνδεση με μηχανές ελαστικών κ.λπ.

- Πετροχημικές βιομηχανίες: σταθμοί άντλησης, έλεγχος και επίβλεψη αγωγών, διανομή αερίων και υγρών καυσίμων κ.λπ.
- Βιομηχανίες αγροτικών προϊόντων και τροφίμων: γραμμή παραγωγής, διαδικασία ξήρανσης, κλιματισμός στην αποθήκευση κ.λπ.
- Μεταφορά και διαχείριση υλικών: συσκευασία κιβωτίων, παλετών, έλεγχος μεταφορικών και ανυψωτικών μηχανημάτων κ.λπ.

2.3.2.5 Χαρακτηριστικές λειτουργίες των PLCs

Παρατίθενται ακολούθως κάποια χαρακτηριστικά σημεία των λειτουργιών που προσφέρουν τα σύγχρονα PLCs.

- Μπορούν να επαναπρογραμματιστούν πολλές φορές από τον χειριστή.
- Περιέχουν διαγνωστικά μηνύματα λάθους.
- Παρέχουν δυνατότητες απεικόνισης των καταστάσεων των μεταβλητών.
- Περιλαμβάνουν έτοιμες προγραμματιστικές ρουτίνες.
- Είναι συνδεδεμένα σε διάφορα σημεία της παραγωγής, απ' όπου μέσω αισθητήρων και μορφοτροπέων (transducers) λαμβάνουν σήματα (ψηφιακά ή αναλογικά) στις εισόδους τους.
- Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU) επεξεργάζεται τα σήματα αυτά σύμφωνα με τις αποθηκευμένες εντολές στη μνήμη, εκτελεί λογικές και αριθμητικές πράξεις, και τα αποτελέσματα των λογικών επεξεργασιών (RLO) μεταβιβάζονται στις αντίστοιχες εξόδους του ελεγκτή.
- Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται συνεχής έλεγχος και παρακολούθηση της πορείας της παραγωγής, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα πρόβλεψης, για την αντιμετώπιση ενδεχόμενων βλαβών ή σφαλμάτων.

Τα PLCs διαθέτουν ένα σύνολο εισόδων και εξόδων που τους επιτρέπει να λαμβάνουν αναλογικές ή ψηφιακές μετρήσεις, καθώς και έναν μικροεπεξεργαστή (microprocessor) που τους επιτρέπει να κάνουν χρήσιμους υπολογισμούς γύρω από τις μετρήσεις. Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε τοπικό επίπεδο. (36) (38)

2.3.2.6 Τμήματα ενός PLC

Σε κάθε προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή μπορούμε να διακρίνουμε τα παρακάτω μέρη:

- Πλαίσιο τοποθέτησης μονάδων (Rack)
- Μονάδα τροφοδοσίας (Power supply)
- Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Central Processing Unit-CPU)
- Τμήμα εισόδων/εξόδων (Input/Output-I/O)

Το **πλαίσιο τοποθέτησης** αποτελείται συνήθως από ανθεκτικό μεταλλικό υλικό και χρησιμεύει για να τοποθετούνται και να στερεώνονται σε αυτό οι μονάδες PLC. Συχνά είναι απαραίτητο το βίδωμα των PLCs στα πλαίσια τοποθέτησης, λόγω των μηχανικών καταπονήσεων που δέχονται στα ως επί το πλείστον βιομηχανικά περιβάλλοντα στα οποία λειτουργούν. (38)



Εικόνα 11: Πλαίσιο τοποθέτησης ενός PLC (42)

Η **μονάδα τροφοδοσίας του PLC** μετατρέπει την τάση εισόδου σε τάσεις που απαιτούνται για τη λειτουργία των εσωτερικών κυκλωμάτων του PLC. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα δημιουργεί απομονωμένη συνεχή τάση VDC, που είναι απαραίτητη για τη λειτουργία συγκεκριμένων κυκλωμάτων, διακοπών και ενδείξεων. (43)



Εικόνα 12: Λύσεις τροφοδοσίας PLCs (43)

Για τα υπόλοιπα τμήματα του PLC θα ακολουθήσει λεπτομερής ανάλυση.

2.3.2.7 Η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας-CPU

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit-CPU) είναι επιφορτισμένη με όλη την εφαρμογή της λογικής, την αποθήκευση και την εκτέλεση του προγράμματος. Επίσης οργανώνει τη ροή των πληροφοριών μέσα στο PLC. (38) (43)

Πιο συγκεκριμένα:

- Διαβάζει τα δεδομένα από τις συσκευές ανίχνευσης και τα μετρητικά όργανα που είναι συνδεδεμένα στις εισόδους του PLC.
- Εκτελεί το αποθηκευμένο πρόγραμμα, για να εκτιμήσει τα παραπάνω δεδομένα και να αποφασίσει για τη δράση που θα υλοποιηθεί.

- Στέλνει τις εντολές δράσης του προγράμματος στις συσκευές ελέγχου που βρίσκονται συνδεδεμένες στις εξόδους του PLC.

Η CPU περιέχει έναν ή περισσότερους μικροεπεξεργαστές, πιθανώς κάποια επιπλέον μνήμη και κυκλώματα επικοινωνίας με τα υπόλοιπα μέρη του PLC.

Ο μικροεπεξεργαστής είναι ένα είδος ημιαγωγού που περιέχει ενσωματωμένες τις λειτουργίες ενός υπολογιστή. Τις λειτουργίες τις πραγματοποιεί εκτελώντας ένα πρόγραμμα που ονομάζεται λειτουργικό σύστημα. (44)

Οι βασικές λειτουργίες του μικροεπεξεργαστή είναι:

- Λειτουργίες εισόδων/εξόδων: Επικοινωνία του μικροεπεξεργαστή με τα υπόλοιπα μέρη της CPU.
- Διενέργεια αριθμητικών και λογικών πράξεων.
- Διαχείριση των περιεχομένων της μνήμης (δεδομένα και εντολές).

Όπως προαναφέρθηκε, η CPU ενδέχεται να περιέχει περισσότερους από ένα μικροεπεξεργαστές. Εφόσον υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις στη χρήση του PLC, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποια συσκευή που ενσωματώνει δύο ή τρεις μικροεπεξεργαστές, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους. (45)

Όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας μικροεπεξεργαστές, ο καθένας αναλαμβάνει έναν διαφορετικό ρόλο. Έτσι προκύπτουν:

- Ο μικροεπεξεργαστής ελέγχου: Είναι υπεύθυνος για το σύστημα ελέγχου του PLC. Οι διαδικασίες είναι συνήθως σύνθετες και περιλαμβάνουν τον χειρισμό των δεδομένων.
- Ο λογικός μικροεπεξεργαστής: Είναι υπεύθυνος για τον χρονισμό, τις μετρήσεις, τον λογικό χειρισμό και την εκτέλεση του προγράμματος του χρήστη.
- Ειδικευμένοι μικροεπεξεργαστές: Αναλαμβάνουν αποκλειστικά μαθηματικές, μετρητικές, διαγνωστικές, επικοινωνιακές λειτουργίες κ.α.

2.3.2.8 Η Κεντρική Μνήμη

Η κεντρική μνήμη χρησιμοποιείται, για να διατηρεί όλες τις πληροφορίες που αφορούν το PLC. Έτσι στη μνήμη αυτή αποθηκεύονται:

- Το λειτουργικό σύστημα
- Το πρόγραμμα
- Οι καταστάσεις των εισόδων και των εξόδων του PLC
- Πληροφορίες και ενδιάμεσα αποτελέσματα του προγράμματος κ.α. (44)

Η μνήμη είναι οργανωμένη σε bytes, που είναι η ελάχιστη πληροφορία που χρησιμοποιεί ο μικροεπεξεργαστής σε κάθε εντολή του. Το ίδιο το byte αναλύεται σε 8 bits, τα οποία αποτελούν τα πιο βασικά στοιχεία πληροφορίας. Το κάθε bit μπορεί να έχει την τιμή μηδέν (0) ή την τιμή ένα (1).

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες μπορεί να ανήκει κάποια μνήμη:

- Η πρώτη κατηγορία είναι αυτή των πτητικών (volatile) μνημών, οι οποίες διατηρούν τα περιεχόμενά τους όσο διατηρείται η τροφοδοσία τους με ρεύμα.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή των μη πτητικών (non-volatile) μνημών που μπορούν και διατηρούν τα περιεχόμενά τους μόνιμα. (38) (46)

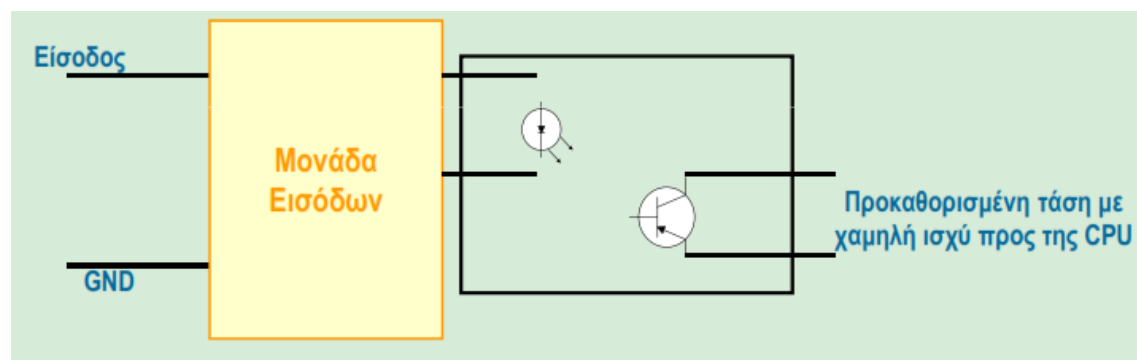
Προκύπτουν επίσης οι ακόλουθες υποκατηγορίες μνημών που είναι χρήσιμες μεταξύ άλλων και στα PLCs:

- Μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory-RAM): στην πτητική μνήμη αυτή διατηρούνται πληροφορίες του προγράμματος, ενίοτε και το ίδιο το πρόγραμμα.
- Μνήμη μόνο ανάγνωσης (Read Only Memory-ROM): τα περιεχόμενα αυτής της μη πτητικής μνήμης δεν είναι δυνατόν να μεταβληθούν. Μόνο η ανάγνωση επιτρέπεται από μια ROM. Μπορεί να περιέχει το λειτουργικό σύστημα, αλλά όχι και το πρόγραμμα, αφού αυτό μπορεί να αλλάξει κάποια στιγμή.
- Προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο ανάγνωσης: η μη πτητική αυτή μνήμη λειτουργεί όπως η μνήμη ROM, αλλά είναι δυνατόν να μεταβληθούν τα περιεχόμενά της, εάν διαγραφούν πρώτα, μέσω φωτισμού της μνήμης σε ειδικό σημείο με υπεριώδες φως (EPROM) ή επιβάλλοντας προκαθορισμένη τάση σε ειδικό ακροδέκτη της (EEPROM). Η δεύτερη κατηγορία προγραμματιζόμενης μνήμης είναι πιο ευέλικτη (απαιτεί πολύ μικρότερο χρόνο διαγραφής). (47)

2.3.2.9 Τμήμα εισόδων/εξόδων

Το τμήμα εισόδων/εξόδων (Input/Output-I/O) αποτελείται από τη μονάδα διασύνδεσης εισόδων, η οποία επιτρέπει τη μετατροπή των πραγματικών σημάτων που λαμβάνει το PLC από τους αισθητήρες (οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι στις εισόδους) σε σήματα χαμηλής ισχύος, κατάλληλα για τη CPU. Ταυτόχρονα προστατεύει τη CPU από το εξωτερικό περιβάλλον (δηλαδή από τις τάσεις και τα ρεύματα που έρχονται στις εισόδους) χρησιμοποιώντας την τεχνική της γαλβανικής απομόνωσης. (44) (48)

Η γαλβανική απομόνωση (για την περίπτωση μιας ψηφιακής εισόδου) πραγματοποιείται με ένα κύκλωμα ανάλογο αυτού που φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 13: Γαλβανική απομόνωση κυκλωμάτων του PLC

Το δεύτερο τμήμα είναι η μονάδα διασύνδεσης εξόδων, η οποία περιλαμβάνει ένα τμήμα αναλογικών και ένα τμήμα ψηφιακών εξόδων.

Η πρώτη επιτρέπει την έξοδο τάσεων με αρκετά μεγάλη δυνατότητα διαβάθμισης της τιμής τους, ενώ οι έξοδοι της δεύτερης (ψηφιακής) μονάδας λειτουργούν περισσότερο σαν διακόπτες.

Και στις εξόδους εφαρμόζεται η τεχνική της γαλβανικής απομόνωσης.

Η επικοινωνία του τμήματος εισόδων/εξόδων με την CPU δεν είναι συνεχόμενη στον χρόνο. Αντίθετα πραγματοποιείται κατά τακτά χρονικά διαστήματα. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται κύκλος σάρωσης.

Οι ψηφιακές εισοδοι και έξοδοι του PLC μπορούν να βρεθούν μόνο σε μία από δύο καταστάσεις. Μπορούν να είναι μόνο ενεργές (ON) ή ανενεργές (OFF), δηλαδή είναι δυνατόν να περιγραφούν από ένα μόνο bit. Το bit αυτό ονομάζεται bit κατάστασης.

Οι έξοδοι αυτές μπορεί να οδηγούν δυσανάλογα μεγάλα φορτία και αυτό συμβαίνει αρκετά συχνά. Το PLC όμως δεν μπορεί να δώσει πολύ μεγάλα ρεύματα στις εξόδους του και εξαιτίας αυτού συχνά χρησιμοποιούνται βοηθητικές τροφοδοσίες.

Οι τιμές τάσης που συναντώνται στις ψηφιακές I/O είναι 5, 12, 24, 48, 120, 220 Volts, συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος.

Οι αναλογικές εισοδοι και έξοδοι του PLC μπορούν να πάρουν τιμές από ένα εύρος διαθέσιμης τάσης. Το εύρος αυτό μπορεί να είναι (0-5) VDC, (0-10) VDC ή (-10, +10) VDC.

Το πλήθος των διαφορετικών αναλογικών τάσεων που μπορεί να χειριστεί η κάθε μονάδα ταυτόχρονα (πλήθος καναλιών), διαφέρει από PLC σε PLC. Ωστόσο, κατά κανόνα, τα κανάλια των εισόδων είναι περισσότερα από αυτά των εξόδων.

Η μονάδα αναλογικών εξόδων εκτελεί μια ψηφιοαναλογική μετατροπή (Digital to Analog-D/A). Το αντίστροφο συμβαίνει με τη μονάδα αναλογικών εισόδων, που εκτελεί μια αναλογοψηφιακή μετατροπή (Analog to Digital-A/D).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των μετατροπών αυτών είναι η ανάλυση (resolution), δηλαδή το πλήθος των διαφορετικών τιμών που μπορεί να πάρει η κάθε έξοδος (ή είσοδος) στο δεδομένο εύρος. (49) (50)

Η ανάλυση μετριέται σε bits. Ο συνδυασμός n πλήθους από bits δίνει 2^n διαφορετικές πιθανές τιμές, άρα $2^n - 1$ διαστήματα στα οποία χωρίζεται το δεδομένο εύρος.

Η ακρίβεια της τιμής της τάσης που παράγει ή «διαβάζει» μια αναλογική μονάδα επηρεάζεται από:

- Τις απαιτήσεις της τάσης τροφοδοσίας: πρέπει να μπορεί να εντοπίσει πόσο ρεύμα της χρειάζεται κάθε στιγμή.
- Τον συντελεστή θερμοκρασίας και την παρέκκλιση εξόδου: αφορά την απόκλιση που παρουσιάζει η μονάδα, όταν η θερμοκρασία κινείται έξω από ένα δεδομένο εύρος.

Εκφράζεται σε ποσοστό παρέκκλισης σε σχέση με την πλήρη κλίμακα για κάθε βαθμό θερμοκρασίας.

- Την εμπέδηση και τη χωρητικότητα εισόδου: είναι δεδομένες και πρέπει να υπάρχει και αντίστοιχη συσκευή συνδεδεμένη.
- Τον βαθμό απόρριψης θορύβου: είναι η ικανότητα της μονάδας να αφαιρεί τον θόρυβο που δημιουργείται κατά τη μεταφορά των σημάτων.

Οι μονάδες I/O πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να είναι όλες συγκεντρωμένες σε μία περιοχή κοντά στο PLC. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση σειριακών (ή τηλεχειριζόμενων) μονάδων I/O. (46)

Η σύνδεσή τους γίνεται:

- Με ζεύγος συνεστραμμένων καλωδίων, τα οποία παρουσιάζουν μειωμένο θόρυβο, λόγω της συστροφής τους και έχουν χαμηλό κόστος.
- Με οπτικές ίνες, οι οποίες παρουσιάζουν μηδενικό θόρυβο, μπορούν να φτάσουν αποστάσεις των 30 km και μεταδίδουν δεδομένα με πολύ υψηλή ταχύτητα.

2.3.2.10 Τερματικά

Τερματικό ονομάζεται μια συσκευή που επιτρέπει στον χρήστη να αλληλεπιδρά με το PLC σε ό,τι αφορά την κατάστασή του και το πρόγραμμα που περιέχει. Η σύνδεση γίνεται συνήθως με σειριακό καλώδιο (RS-232). Οι βασικοί τύποι τερματικών είναι τέσσερις:

- Απλό τερματικό (Dumb terminal): χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος, δεν διαθέτει δική του CPU και η κύρια λειτουργία του είναι να στέλνει χαρακτήρες από το πληκτρολόγιο και να λαμβάνει χαρακτήρες επίσης τους οποίους εμφανίζει στην οθόνη χειρισμού.
- Ειδικό βιομηχανικό τερματικό (Dedicated Industrial Terminal): χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος απόκτησης, συνεργάζεται συνήθως μονάχα με PLC μιας συγκεκριμένης εταιρείας και παρέχει δυνατότητες προγραμματισμού μέσω οθόνης και πληκτρολογίου, χρησιμοποιώντας δικό του λογισμικό. Λειτουργεί συνδεδεμένο (online) ή και ανεξάρτητα (offline programming) από το PLC ή και μέσω LAN. Τέλος επιτρέπει την παρακολούθηση εκτέλεσης του προγράμματος και ανίχνευσης των λαθών του.
- Προγραμματιστής χειρός (Handheld programmer), ο οποίος λειτουργεί ως απλό τερματικό, είναι μικρός σε μέγεθος, ενώ έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης προγράμματος και ανίχνευσης σφαλμάτων.
- Ο Η/Υ με λογισμικό για PLC: αυτή η περίπτωση αποτελεί μια πολύ οικονομική λύση, αφού οι Η/Υ υπάρχουν και για άλλους λόγους στον βιομηχανικό χώρο. Παρέχουν ό,τι και οι προηγμένες λύσεις, ενώ επίσης επιτρέπουν: λογισμικό προγραμματισμού, λογισμικό τεκμηρίωσης, λογισμικό συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, λογισμικό διασύνδεσης λειτουργίας πραγματικού χρόνου, λογισμικό προσομοίωσης κ.α. (44) (46) (51)

2.3.2.11 Περιφερειακά

Οι περιφερειακές συσκευές είναι συσκευές που συνεργάζονται με ένα PLC, αλλά δεν είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του. Τέτοιες συσκευές είναι:

- Οι φορτωτές προγράμματος
- Οι μαζικές μνήμες (για αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων)
- Οι μονάδες σκληρών δίσκων
- Οι εκτυπωτές
- Τα modems, τα οποία αποτελούν ενδιάμεσους για άλλα περιφερειακά κ.α.

2.3.3 RTUs και PLCs

2.3.3.1 Σύγκριση RTUs και PLCs

Τα RTUs και τα PLCs μοιράζονται αρκετές λειτουργίες, μιας και πλέον αρκετά RTUs ενσωματώνουν λειτουργίες PLCs και αντιστρόφως.

Εντούτοις τα RTUs:

- Προσφέρουν συνήθως περισσότερες δυνατότητες από τα PLCs σε θέματα επικοινωνίας και αποστολής μετρήσεων και εντολών από και προς απομακρυσμένα σημεία.
- Διαθέτουν ενσωματωμένα modems σε αντίθεση με τα περισσότερα PLCs.
- Δεν εμφανίζουν καμία απαίτηση προγραμματισμού, μιας και συνήθως ξεκινούν αυτόματα μόλις τεθούν υπό τάση, κάτι που δεν συμβαίνει στα PLCs.
- Το κόστος ανά σημείο I/O ενός RTU είναι μικρότερο από ενός PLC. (28)

Από την άλλη πλευρά τα PLCs:

- Είναι συνήθως πιο αποτελεσματικά από τα RTUs για τοπικό έλεγχο βιομηχανικών διαδικασιών.
- Προγραμματίζονται, ώστε να εκτελούν αυτόματα πολύπλοκες διαδικασίες ελέγχου, μια δυνατότητα που δεν προσφέρουν στον ίδιο βαθμό τα RTUs.

2.3.3.2 Συνεργασία RTUs και PLCs

Εάν απαιτείται αυτόματος έλεγχος σε ένα σημείο (site), είναι δυνατόν να προστεθεί ένα PLC σε κάποιο RTU.

Πιο συγκεκριμένα το PLC αναλαμβάνει τη λήψη ψηφιακών ή/και αναλογικών επιθυμητών σημείων (setpoints) από το RTU.

Το RTU συνήθως χρησιμοποιείται για εκθέσεις (reporting), απομακρυσμένες εντολές (remote commands) και επιθυμητά σημεία (setpoints) και εν συνεχεία το συνεργαζόμενο PLC αναλαμβάνει τον τοπικό έλεγχο. (28)

2.3.4 Συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων-SCADA

Τα συστήματα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (Supervisory Control And Data Acquisition-SCADA) επιτρέπουν την εποπτεία διεργασιών, οι οποίες βρίσκονται κατανεμημένες μεταξύ διαφόρων απομακρυσμένων σημείων του μελετώμενου συστήματος. (52) (53) (54)

Η διαδικασία λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος περιλαμβάνει:

- Τη συλλογή πληροφοριών
- Την αποστολή τους σε ένα κεντρικό σημείο επεξεργασίας
- Την εκτέλεση της απαραίτητης ανάλυσης και ελέγχου
- Την παρουσίαση της πληροφορίας σε διάφορες οθόνες χειρισμού και εποπτείας σε πραγματικό χρόνο ή κατ' απαίτηση

Ο έλεγχος μπορεί να είναι αυτόματος ή να ενεργοποιείται κατόπιν εντολής του χειριστή.

Ένα σύστημα SCADA επιτρέπει στους χειριστές του να παρατηρούν και να ελέγχουν διαδικασίες κατανεμημένες σε μεγάλο εύρος περιοχών από μια κεντρική τοποθεσία. Επομένως ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των συστημάτων SCADA είναι ότι καταργούν την ανάγκη να αποστέλλεται προσωπικό σε διαφορετικά σημεία του συστήματος, προκειμένου να προβούν σε μετρήσεις ή ρυθμίσεις του συστήματος, μιας και η εποπτεία και ο έλεγχος του συνολικού συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί από μια τοποθεσία με μεγάλες ταχύτητες απόκρισης. (55) (56)

2.3.4.1 Λειτουργία των συστημάτων SCADA

Τα συστήματα SCADA περιλαμβάνουν λογισμικό εποπτείας και ελέγχου σε συνδυασμό με ένα σύνολο αισθητήρων (sensors) και διατάξεων μετατροπής (transducers) που συνδέονται με τα RTUs σε διάφορα σημεία του μελετώμενου δικτύου. Τα RTUs εν συνεχεία επικοινωνούν με έναν κεντρικό υπολογιστή ή Κεντρική Τερματική Μονάδα (Master Terminal Unit-MTU).

Η επικοινωνία μεταξύ της MTU και των RTUs μπορεί να είναι ενσύρματη (σειριακή επικοινωνία μέσω θυρών RS232 ή RS485, δίκτυα Profibus, δίκτυα Ethernet, τηλεφωνική σύνδεση, διαδίκτυο) ή ασύρματη (ραδιοκύματα, δορυφορική σύνδεση, μικροκύματα).

Οι πληροφορίες μεταφέρονται από τα RTUs στην MTU, όπου, αφού επεξεργαστούν κατάλληλα, καταγράφονται και προβάλλονται σε υπολογιστές που διαθέτουν λογισμικό HMI (Human Machine Interface). (28) (52)

2.3.4.2 Συστήματα HMI

Τα συστήματα διεπαφής ανθρώπου μηχανής (Human Machine Interface-HMI) αποτελούν σημαντικό μέρος της λειτουργίας των συστημάτων SCADA.

Τέτοιου είδους συστήματα αποτελούν συνήθως μια οπτική απεικόνιση της εκτελούμενης διεργασίας, πάνω στην οποία εμφανίζονται τιμές μεταβλητών, καταστάσεις διακοπών, υπολογισμοί, κουμπιά, γραφικά στοιχεία, ειδικά διαγράμματα κ.α.

Επιπρόσθετα, τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την κατ' απαίτηση εμφάνιση του ιστορικού των τιμών των μελετώμενων μεταβλητών, ειδικών διαγραμμάτων κτλ. Οι πληροφορίες αυτές αντλούνται από τη βάση δεδομένων του συστήματος SCADA.

Από τα παραπάνω εύκολα συνάγεται ότι τα συστήματα SCADA και HMI είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Οι περισσότεροι κατασκευαστές συστημάτων SCADA ενσωματώνουν την δυνατότητα ανάπτυξης HMI εφαρμογών στα πακέτα SCADA που προσφέρουν. (57) (58)



Εικόνα 14: Διεπαφή HMI της Siemens (59)

2.3.4.3 Χαρακτηριστικά συστημάτων SCADA

Παρατίθενται ακολούθως κάποια από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των συστημάτων SCADA:

- Εξωτερική πρόσβαση: αναφέρεται στη φυσική σύνδεση με το περιβάλλον. Μέσα διασύνδεσης συμπεριλαμβάνουν σειριακές επικοινωνίες (RS232, RS485), πρόσβαση με PC κάρτες (AB DH+, ARCNET, Modbus Plus) ή αναλογικές και ψηφιακές εισόδους (Analog I/O, Digital I/O). Πιο σύγχρονες συνδέσεις είναι τα fieldbuses όπως τα DeviceNet, Profibus, τα δίκτυα Ethernet ή ο Ενιαίος Σειριακός Δίαυλος (Universal Serial Bus-USB).
- Ενημέρωση για κρίσιμες τιμές μεταβλητών και συμβάντα.
- Καταγραφή και παρουσίαση δεδομένων.
- Αποστολή σημάτων ελέγχου στον απομακρυσμένο εξοπλισμό.
- Μηχανή υπολογισμών: επιτρέπει στο σύστημα να υπολογίζει υπόλοιπα, μέσες τιμές, διάφορα στατιστικά και πολλούς ακόμα υπολογισμούς για το μελετώμενο σύστημα.
- Δικτυακή πρόσβαση, δηλαδή δυνατότητα να γίνεται εποπτεία και έλεγχος από απομακρυσμένα σημεία.
- Πρόσβαση σε βάσεις Δεδομένων: πολλά πακέτα SCADA προσφέρουν απευθείας καταχώρηση και ανάκτηση δεδομένων από κεντρικούς διακομιστές όπως Oracle,

Sybase, Microsoft SQL Server και γενικά όλες τις συμβατές με ODBC ή ADO βάσεις δεδομένων.

- Κατά περίπτωση προγραμματισμός: τα διάφορα πακέτα επιτρέπουν διάφορα επίπεδα διαμόρφωσης. Μερικά προμηθεύουν βιβλιοθήκες της γλώσσας C ή επιτρέπουν την προσθήκη modules, άλλα επιτρέπουν την εκτέλεση scripts σε VBA (Visual Basic for Applications) ή Java, ενώ άλλα επιτρέπουν στον χειριστή να θέτει triggers μέσα από το σύστημα SCADA που να καλούν και να εκτελούν άλλα προγράμματα. (28) (60) (61) (62)

2.3.4.4 Οφέλη των συστημάτων SCADA

Η εισαγωγή των συστημάτων SCADA για την εποπτεία και τον έλεγχο συστημάτων, έδωσε σημαντική ώθηση στη βιομηχανία προσφέροντας πληθώρα από οφέλη. (53) (63) (64)

Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

- Αύξηση της παραγωγής και καλύτερη αξιοποίηση των μέσων παραγωγής: μία βιομηχανική μονάδα παραγωγής για παράδειγμα, μέσω του προηγμένου ελέγχου και της αποτελεσματικής εποπτείας, είναι σε θέση να λειτουργήσει στα ανώτερα όριά της.
- Μείωση του κόστους παραγωγής, λόγω βέλτιστης χρήσης των πρώτων υλών και των πηγών ενέργειας και μείωσης του κόστους εργασίας.
- Βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων, λόγω της δυνατότητας να διατηρούνται οι συνθήκες παραγωγής μέσα σε στενά όρια ανοχών.
- Ευελιξία στην παραγωγική διαδικασία στο πλαίσιο των μεταβαλλόμενων συνθηκών της αγοράς.
- Εξομάλυνση και μέγιστη απόδοση της βιομηχανικής μονάδας μέσω της απρόσκοπτης παρακολούθησης της διαδικασίας παραγωγής.
- Αύξηση της επικοινωνίας μεταξύ όλων των επιπέδων της βιομηχανικής μονάδας.
- Δυνατότητα στο προσωπικό να λαμβάνει αποφάσεις μέσα από πληρέστερη ενημέρωση, ώστε να εκπληρώνει τις υποχρεώσεις του με μεγαλύτερη επιτυχία.
- Ταχύτερος εντοπισμός και αντιμετώπιση σφαλμάτων, που συνεπάγεται μείωση του κόστους συντήρησης.
- Βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας και παροχή ακριβέστερων και πιο εύστοχων πληροφοριών στη διοίκηση.
- Δυνατότητα στη διοίκηση και τους μηχανικούς να προβάλλουν πληροφορίες στην επιφάνεια εργασίας του υπολογιστή τους, είτε η πηγή των δεδομένων βρίσκεται δίπλα τους είτε χιλιάδες μίλια μακριά.
- Οι χειριστές μπορούν να εποπτεύουν και να ελέγχουν τον εξοπλισμό, μέσω εύχρηστων Γραφικών Περιβαλλόντων Χρήσης (Graphical User Interfaces-GUIs).
- Οι ενημερώσεις κρίσιμων καταστάσεων (alarms) μπορούν να γίνονται με ηχογραφημένα μηνύματα τα οποία μπορούν να εκπέμπονται αυτόματα μέσω τηλεφώνων, ασυρμάτων, δικτύων ηλεκτρονικών υπολογιστών κτλ.
- Δυνατότητα για αποθήκευση και ανάκτηση του ιστορικού δεδομένων, για περαιτέρω συγκρίσεις, συμπεράσματα ή διάγνωση σφαλμάτων.
- Επιτρέπει τη χρήση φθηνών και εύχρηστων προσωπικών υπολογιστών ως τερματικών συσκευών. Οι υπολογιστές αυτοί είναι πιο εύκολο και οικονομικό να αναβαθμιστούν ή να υποστούν μετατροπές από ό,τι ο εξειδικευμένος εξοπλισμός.

- Επιτρέπει τη χρήση σύγχρονων και συνηθισμένων πρωτοκόλλων και υλικών δικτύων, που είναι επίσης εύκολο και οικονομικό να αναβαθμιστούν, να προσαρμοστούν ή να αντικατασταθούν. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αξιόπιστη δικτυακή επικοινωνία μεταξύ του υλικού διαφορετικών κατασκευαστών.
- Τεχνική υποστήριξη και συντήρηση του συστήματος από τον προμηθευτή του.

2.3.4.5 Συμβατικές μετρήσεις σε σύστημα SCADA

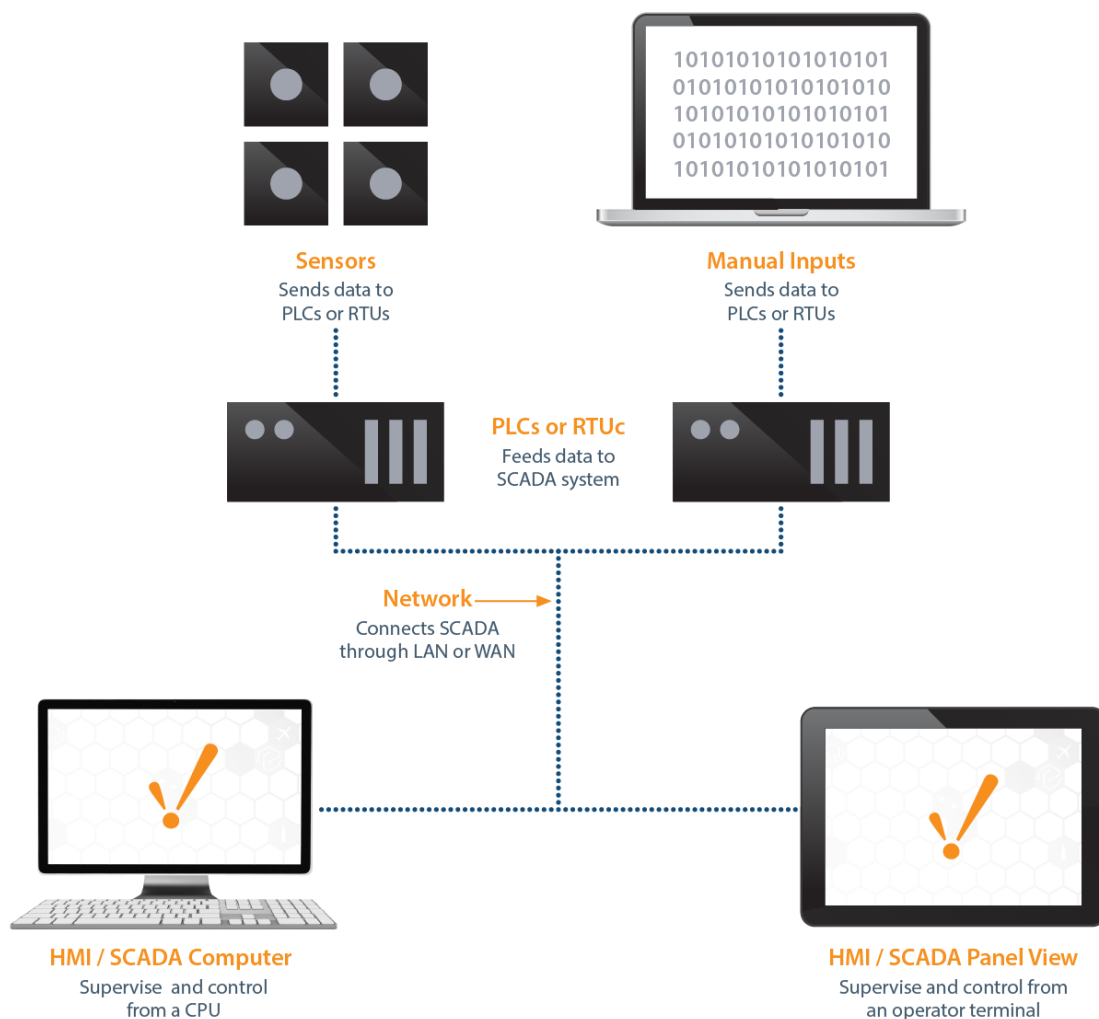
Οι συμβατικές μετρήσεις που λαμβάνονται σε ένα σύστημα SCADA δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν συνήθως:

- Ροές ενεργού και αέργου ισχύος στις γραμμές
- Εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος στους ζυγούς του συστήματος
- Ενεργό και άεργο ισχύ των γεννητριών
- Μέτρο των τάσεων των ζυγών
- Φορτία
- Πληροφορίες για τη θέση διαφόρων διακοπών
- Πληροφορίες για τη θέση λήψης μετασχηματιστών
- Ψευδομετρήσεις

Οι ψευδομετρήσεις που αναφέρθηκαν μπορεί να περιλαμβάνουν ονομαστικούς συντελεστές ισχύος ζυγών φορτίου, ονομαστικές τάσεις ζυγών παραγωγής κ.α. Οι μετρήσεις αυτές έχουν εξαχθεί με τη χρήση μεθοδολογιών προβλέψεων γι' αυτό και ονομάζονται ψευδομετρήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι συχνά δεν είναι δυνατή η χρησιμοποίηση όλων των δεδομένων εισόδου του συστήματος SCADA. Συχνά οι μετρήσεις, δεν είναι απολύτως αξιόπιστες λόγω πιθανών βλαβών στα μετρητικά όργανα ή λόγω του παρεμβαλλόμενου τηλεπικοινωνιακού θορύβου. Τέλος, δεν είναι πάντα τεχνοοικονομικά εφικτή η μετάδοση και η επεξεργασία όλων των μετρήσεων που λαμβάνονται σε κάθε σημείο του δικτύου. (28)

Η εισαγωγή αλγορίθμων εκτίμησης κατάστασης τα τελευταία χρόνια σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν συμβατικές μετρήσεις έχει συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των προαναφερθεισών δυσκολιών. Επίσης έχει οδηγήσει σε σημαντική διεύρυνση των δυνατοτήτων διαχείρισης και εποπτείας των συστημάτων ενέργειας, καθώς και στην εδραίωση των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης (Energy Management Systems ή EMS). (28)



Εικόνα 15: Βασική δομή ενός συστήματος SCADA

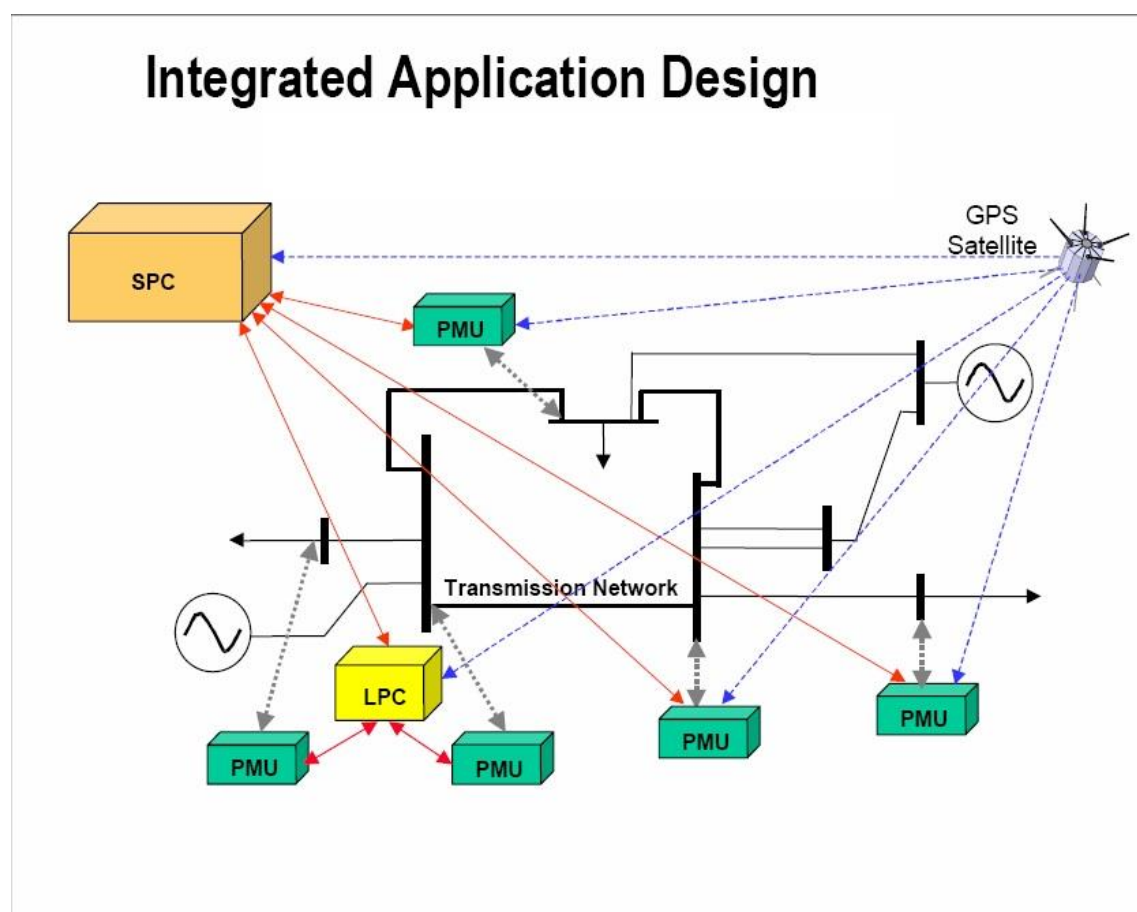
2.4 Ανάλυση ασφαλείας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με συγχρονισμένες μετρήσεις από PMU

2.4.1 Μονάδες Μέτρησης Φάσης-PMU

Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 εμφανίστηκαν οι πρώτοι Μετρητές Φάσης (Phasor Measurement Units, PMU, ή Synchrophasors). (65)

Οι Μετρητές Φάσης είναι ειδικά όργανα που συνδέονται σε δίκτυα χαμηλής, μεσαίας ή υψηλής τάσης και πραγματοποιούν μέτρηση της συχνότητας, τάσης και έντασης των γραμμών. Ταυτόχρονα είναι σε θέση να μετρούν τη γωνία φάσης της τάσης και της έντασης αποδίδοντας τα μετρούμενα μεγέθη ως ανύσματα με χαρακτηριστικό μέτρο και διεύθυνση. Αναφορά για τη μέτρηση της φάσης αποτελεί το παγκόσμιο σήμα χρόνου UTC (Universal Time Coordinated), διαθέσιμο σε οποιαδήποτε γεωγραφική θέση μέσω του παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης GPS (Global Positioning System). (66)

Τα PMUs μπορεί να είναι αυτόνομες συσκευές ή επίσης να ενσωματώνονται σε κάποια άλλη συσκευή όπως για παράδειγμα σε έναν ηλεκτρονόμο ασφαλείας. (67) (68) (69) (70)



Εικόνα 16: Δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας με PMUs (71)

2.4.2 Σύγκριση των τεχνολογιών συγχρονισμένων και μη συγχρονισμένων μετρήσεων

Η εισαγωγή των PMUs προσέδωσε νέες δυνατότητες εποπτείας των ηλεκτρικών συστημάτων και οδήγησε σε εξέλιξη και ποιοτική αναβάθμιση των διαδικασιών ελέγχου τους. Ακολούθως παρατίθενται κάποιοι από τους τομείς, στους οποίους οι συγχρονισμένες μετρήσεις (που λαμβάνονται με τη βοήθεια PMUs) προσφέρουν συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τις συμβατικές μετρήσεις που λαμβάνονται σε συστήματα SCADA. (72)

- Ταχύτητα λήψης μετρήσεων

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των PMUs είναι οι πολύ υψηλές ταχύτητες λήψης των μετρήσεων (τυπικά 20, 30 ή 60 παρατηρήσεις το δευτερόλεπτο), συγκριτικά με ένα σύστημα SCADA με συμβατικές μετρήσεις, όπου έχουμε τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων ανά 1-2 δευτερόλεπτα ή και πιο αραιά. Μάλιστα αν συμπεριληφθεί ο χρόνος που απαιτείται για τους

υπολογισμούς των μελετώμενων μεγεθών, προκύπτει ότι οι συγχρονισμένες μετρήσεις προσφέρουν πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από τις συμβατικές, δίνοντας δυνατότητες εποπτείας στους χειριστές σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.

➤ Ύπαρξη χρονικής σφραγίδας των μετρήσεων

Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα των μετρήσεων από PMUs είναι η ύπαρξη χρονικής σφραγίδας, δηλαδή μια χρονική τιμή μεγάλης ακρίβειας που παράγεται στο σημείο της μέτρησης από έναν δέκτη GPS. Η χρονική πληροφορία ενσωματώνεται στα δεδομένα, ώστε οι μετρήσεις που λαμβάνονται σε διαφορετικές περιοχές ή από διαφορετικούς χειριστές να συγχρονίζονται και να ταξινομούνται χρονικά σε έναν κεντρικό σταθμό. Οι μετρήσεις με κοινή χρονική σφραγίδα χρησιμοποιούνται στη διαδικασία εκτίμησης κατάστασης του μελετώμενου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα σε ένα σύστημα με συμβατικές μετρήσεις κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό, αφού εκεί τα δεδομένα των μετρήσεων ταξινομούνται με βάση τον χρόνο άφιξης στον κεντρικό σταθμό. Άρα δεν είναι δυνατή η πλήρης γνώση της χρονικής στιγμής της λήψης των μετρήσεων.

➤ Ακρίβεια μετρήσεων

Οι μετρήσεις που προέρχονται από τα PMUs έχουν συνήθως μικρότερα σφάλματα από τις συμβατικές μετρήσεις. Αυτό το πόρισμα πηγάζει από μία έρευνα, της οποίας τα αποτελέσματα προέκυψαν από έλεγχο έξι περιπτώσεων με σταδιακή αύξηση του αριθμού των συγχρονισμένων μετρήσεων. Παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της ακρίβειας των μετρήσεων λόγω των συγχρονισμένων μετρήσεων είχε σαν αποτέλεσμα η εκτίμηση κατάστασης να έχει πιο ακριβή αποτελέσματα. (73)

➤ Εποπτεία και έλεγχος ευρύτερων περιοχών

Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την εκτίμηση κατάστασης είναι σημαντικά πιο πολύπλοκοι στην περίπτωση των συμβατικών μετρήσεων. Μάλιστα όσο μεγαλύτερη και πιο σύνθετη είναι η τοπολογία του μελετώμενου δικτύου, τόσο πιο πολύπλοκοι είναι και οι απαιτούμενοι υπολογισμοί, οι οποίοι περιέχουν πλήθος μη γραμμικών σχέσεων και πράξεων μεταξύ πινάκων. Οι απλούστερες εξισώσεις στην περίπτωση της εκτίμησης κατάστασης με χρήση PMUs σε συνδυασμό με τη μεγάλη ταχύτητα λήψης των μετρήσεων επιτρέπουν την εποπτεία πολύ μεγάλων δικτύων με μεγαλύτερη ευκολία απ' ό,τι στα συστήματα που στηρίζονται σε συμβατικές μετρήσεις.

➤ Εκτιμητές κατάστασης και τεχνικές παρατηρησιμότητας δικτύων δύο βημάτων

Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των συστημάτων με PMUs είναι ότι με τη χρήση των συγχρονισμένων μετρήσεων καθίσταται δυνατή η υλοποίηση εκτιμητών κατάστασης και τεχνικών παρατηρησιμότητας δικτύων δύο βημάτων. Δίνεται δηλαδή η δυνατότητα οι συμβατικές μετρήσεις να συνδυαστούν με τις συγχρονισμένες μετρήσεις για αύξηση της αξιοπιστίας και τη δημιουργία ενός υβριδικού εκτιμητή κατάστασης. Τέλος είναι δυνατή η χρησιμοποίηση των συγχρονισμένων μετρήσεων για την επαλήθευση της εκτίμησης κατάστασης που έχει γίνει με τις συμβατικές μετρήσεις και αντιστρόφως.

Πέραν ωστόσο των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν, το βασικότερο μειονέκτημα των μονάδων PMU είναι το κόστος, παρά το γεγονός ότι η τιμή τους έχει μειωθεί σε σχέση με μερικά χρόνια πριν.

Έτσι παρά το γεγονός ότι η αυξημένη ακρίβεια των PMUs και οι ταχύτατες μετρήσεις που δίνουν μπορούν να συμβάλουν στη σημαντική αύξηση της παραγωγικότητας και συνακόλουθα να αποφέρουν οικονομικό όφελος στις βιομηχανίες που τα χρησιμοποιούν, το υψηλό κόστος απόκτησής τους και το πλήθος μονάδων που απαιτούνται για ένα μεγάλο δίκτυο αποτελούν συχνά ανασταλτικό παράγοντα για τη χρησιμοποίησή τους. (74) (75) (76) (77)

	Συστήματα SCADA με συμβατικές μετρήσεις	Συστήματα με μετρήσεις από PMUs
Συχνότητα Δειγματοληψίας	1 δείγμα κάθε 2-4 δευτερόλεπτα	έως και 60 δείγματα ανά δευτερόλεπτο
Δυνατότητα Παρατήρησης	Μόνιμη κατάσταση	Μόνιμη κατάσταση και μεταβατικές καταστάσεις
Μετρούμενες Ποσότητες	Μονάχα μέτρο	Μέτρο και φάση
Συγχρονισμός Μετρήσεων	Όχι	Ναι
Εστίαση	Τοπική εποπτεία και έλεγχος	Εποπτεία και έλεγχος ευρείας περιοχής

Εικόνα 17: Σύγκριση συστημάτων με συμβατικές και συγχρονισμένες μετρήσεις

Υλοποίηση αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης

Στις σελίδες που ακολουθούν θα πραγματοποιηθεί λεπτομερής περιγραφή όλων των βημάτων του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης που ακολουθήθηκαν και όλων των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.

3.1 Μοντέλο δικτύου-Παραδοχές

Το μελετώμενο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι λειτουργεί υπό φυσιολογικές συνθήκες και ότι βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση. Όλα τα φορτία θεωρούνται τριφασικά, όπως τριφασικές θεωρούνται και όλες οι ροές ισχύος.

Οι γραμμές μεταφοράς θεωρείται ότι είναι γραμμές με αντιμετατεθειμένους αγωγούς και γενικά όλα τα στοιχεία, είτε εγκάρσια είτε σε σειρά, θεωρούνται συμμετρικά και τριφασικά.

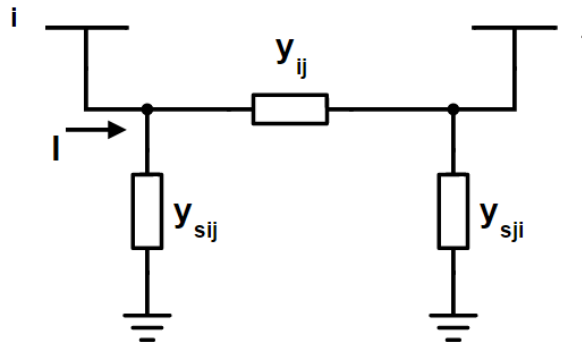
Οι παραπάνω παραδοχές επιτρέπουν τη χρήση του μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος θετικής ακολουθίας, στη μοντελοποίηση του συνολικού συστήματος. Η λύση που θα προκύψει από το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα θα αποτελεί επίσης μια συνιστώσα θετικής ακολουθίας της κατάστασης του δικτύου, όταν αυτό λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης όλες οι παράμετροι του συστήματος εκφράζονται σε ανά μονάδα σύστημα. Ακολουθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των διαφόρων στοιχείων του δικτύου. (17) (28)

3.1.1 Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π». Το μοντέλο αυτό, που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , αποτελείται από μια εν σειρά σύνθετη αγωγιμότητα y_{ij} και δύο εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες y_{sij} , μια συνδεδεμένη στον ζυγό i και μια στον ζυγό j , οι οποίες θεωρούνται ίσες. Για τις προαναφερθείσες αγωγιμότητες ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.1)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (3.2)$$



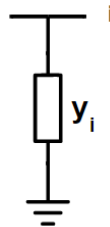
Εικόνα 18: Μοντέλο γραμμής μεταφοράς

3.1.2 Εγκάρσια στοιχεία

Τα εγκάρσια στοιχεία είναι πυκνωτές ή πηνία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ή της αέργου ισχύος και αναπαρίστανται από την ανά φάση ισοδύναμη φανταστική αγωγιμότητα:

$$Y_i = j b_i \quad (3.3)$$

Το πρόσημο της αγωγιμότητας καθορίζει τον τύπο του εγκάρσιου στοιχείου. Θετική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε εγκάρσιο πυκνωτή και αρνητική αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε εγκάρσιο πηνίο. (17) (28) (78)



Εικόνα 19: Μοντέλο εγκάρσιου στοιχείου

3.1.3 Μετασχηματιστές

Ο μετασχηματιστής είναι μια συσκευή η οποία μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια μεταξύ δύο κυκλωμάτων, διαμέσου επαγωγικά συζευγμένων ηλεκτρικών αγωγών. Οι μετασχηματιστές συγκαταλέγονται ανάμεσα στις πιο αποδοτικές ηλεκτρικές μηχανές, με κάποιες μεγάλες μονάδες να αποδίδουν έως και το 99,75% της ισχύος εισόδου στην έξοδό τους. Οι μετασχηματιστές έχουν μεγάλο εύρος μεγεθών, που κυμαίνεται από μέγεθος νυχιού (όπως αυτοί που βρίσκονται μέσα σε ένα μικρόφωνο) έως τεράστιες μονάδες με βάρος εκατοντάδων τόνων που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση τμημάτων των εθνικών δικτύων ηλεκτροδότησης. Όλοι λειτουργούν με βάση τις ίδιες αρχές, αν και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλοποιήσεων. (28) (79) (80) (81)

Η μεγαλύτερη χρησιμότητα των μετασχηματιστών για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στη δυνατότητα ανύψωσης ή υποβιβασμού μιας εναλλασσόμενης τάσης.

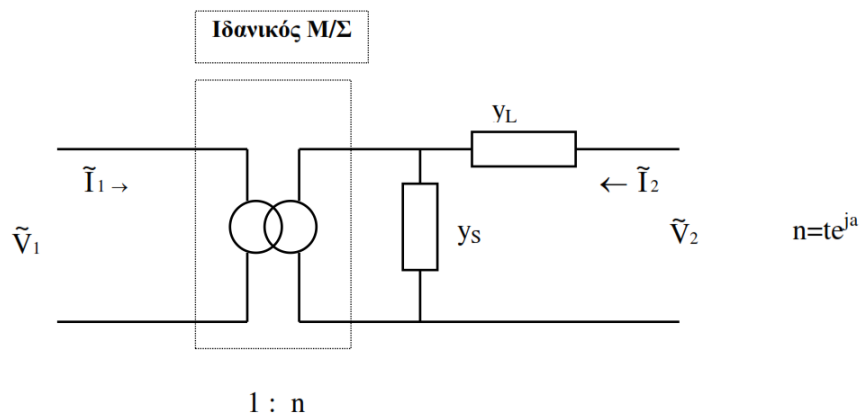
Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αυτή η δυνατότητα είναι νευραλγικής σημασίας. Για παράδειγμα, όταν απαιτείται ανύψωση της τάσης σε έναν υποσταθμό παραγωγής ενέργειας, ώστε να μεταφερθούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές απώλειες σε μεγάλες αποστάσεις, μέσω του δικτύου μεταφοράς, είναι απαραίτητη η χρήση μετασχηματιστών. Απαραίτητοι είναι οι μετασχηματιστές και για τον υποβιβασμό της τάσης στα δίκτυα διανομής, ώστε να είναι δυνατή η ασφαλής μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές σε χαμηλά επίπεδα τάσης.

Οι μετασχηματιστές παριστάνονται με ισοδύναμα κυκλώματα των οποίων οι παράμετροι εξαρτώνται από τη λειτουργία την οποία επιτελούν. Γενικά οι μετασχηματιστές μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μετασχηματιστές ανύψωσης τάσης
- Αυτομετασχηματιστές
- Μετασχηματιστές ρύθμισης

Για τους μετασχηματιστές ρύθμισης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο μοντέλα στις μελέτες ροών φορτίων. Στα μοντέλα αυτά ο λόγος μετασχηματισμού είναι μιγαδικός, έτσι ώστε να μπορεί να εξετασθεί είτε ο μετασχηματιστής ρύθμισης μέτρου τάσεως είτε ο μετασχηματιστής ρύθμισης φάσεως. Τα μοντέλα αυτά εξετάζονται ακολούθως. (17) (28) (78)

3.1.3.1 1^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης



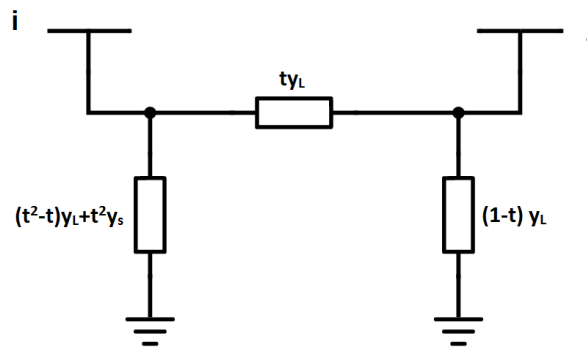
Εικόνα 20: 1^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης

Για το παραπάνω μοντέλο μετασχηματιστή ρύθμισης ισχύει:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |n|^2(y_L + y_S) & -n^*y_L \\ -ny_L & y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

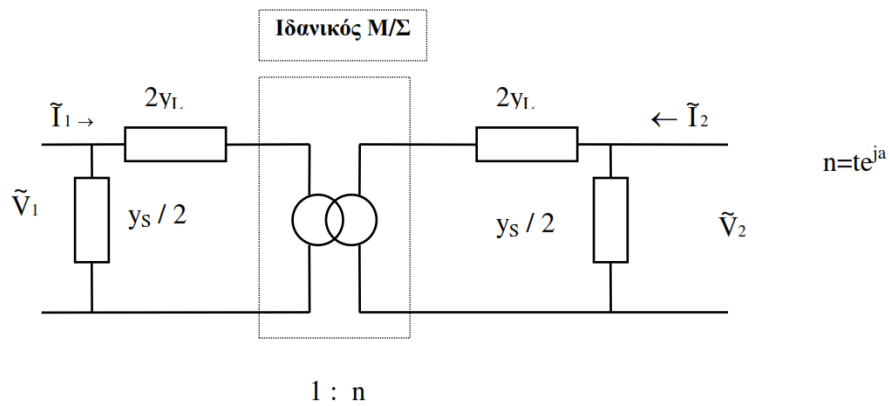
Με βάση την παραπάνω εξίσωση, ο μετασχηματιστής ρύθμισης μπορεί να παρασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα «Π», μόνο όταν ο λόγος μετασχηματισμού n είναι πραγματικός αριθμός. (28) (78)

Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε τον λεγόμενο ρυθμιστή μέτρου τάσης, του οποίου το ισοδύναμο κύκλωμα «Π» παρατίθεται ακολούθως:



Εικόνα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (1^ο μοντέλο)

3.1.3.2 2^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης

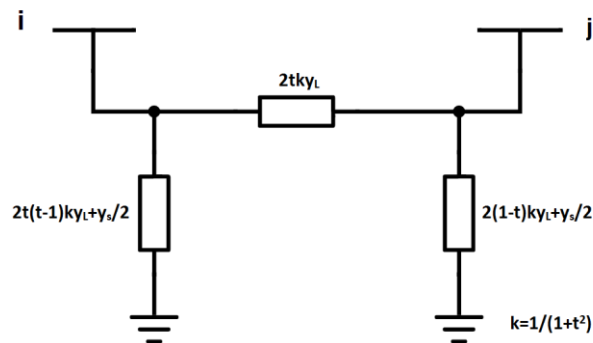


Εικόνα 22: 2^ο Μοντέλο Μετασχηματιστή Ρύθμισης

Στο 2^ο μοντέλο μετασχηματιστή ρύθμισης, θα ισχύει:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2|n|^2}{1+n^2} y_L + \frac{y_S}{2} & -\frac{2n^*}{1+n^2} y_L \\ -\frac{2n}{1+n^2} y_L & \frac{2}{1+n^2} y_L + \frac{y_S}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Στην περίπτωση του μετασχηματιστή μέτρου τάσης ($n=t$), ο μετασχηματιστής μπορεί να παρασταθεί από το ακόλουθο ισοδύναμο κύκλωμα «Π»:



Εικόνα 23: Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ρύθμισης μέτρου τάσης (2^ο μοντέλο)

3.1.4 Γεννήτριες

Η γεννήτρια ή ηλεκτρογεννήτρια είναι μια μηχανή που βασίζει τη λειτουργία της πάνω στους νόμους της ηλεκτροφυσικής και ιδιαίτερα στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής που ανακάλυψε ο διάσημος Άγγλος φυσικός Michael Faraday το 1831 και που αφορά την ενέργεια και τη μετατροπή της από τη μια μορφή σε κάποια άλλη.

Συγκεκριμένα μια γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, σύμφωνα με φαινόμενο της φυσικής κατά το οποίο εάν ένα πηνίο περιστραφεί μέσα σ' ένα μαγνητικό πεδίο, τότε στις άκρες του πηνίου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. (82)

Η γεννήτρια αποτελείται από δύο μέρη: το ακίνητο μέρος της που λέγεται στάτορας ή στατόν ή επαγωγέας ή πόλοι της μηχανής, στο οποίο υπάρχουν μαγνήτες (μόνιμοι μαγνήτες ή ηλεκτρομαγνήτες), και το κινητό μέρος της που λέγεται επαγωγίμο ή στρεπτόν ή ρότορας (εκ του αγγλικού rotor), στο οποίο υπάρχουν πηνία. Γυρίζοντας τον ρότορα μέσα στον στάτορα παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η περιστροφή του ρότορα γίνεται με ατμομηχανή, με υδροστρόβιλο κλπ. Η πιο γνωστή και απλούστερη ηλεκτρογεννήτρια είναι το γνωστό «δυναμό» των ποδηλάτων. (28) (78)

Κατά τη μοντελοποίηση ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται συνήθως ο ακόλουθος συμβολισμός για την αναπαράσταση μιας γεννήτριας:



Εικόνα 24: Μοντέλο γεννήτριας

Η μιγαδική παραγόμενη ισχύς \tilde{S}_{Gi} ενός ζυγού i ορίζεται ως:

$$\tilde{S}_{Gi} = P_{Gi} + jQ_{Gi} \quad (3.6)$$

όπου: P_{Gi} : η παραγόμενη ενεργός ισχύς του ζυγού i

Q_{Gi} : η παραγόμενη άεργος ισχύς του ζυγού i

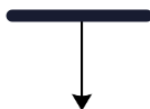
3.1.5 Φορτία

Η μιγαδική ισχύς φορτίου \tilde{S}_{Di} ενός ζυγού i ορίζεται ως:

$$\tilde{S}_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \quad (3.7)$$

όπου: P_{Di} : η παραγόμενη ενεργός ισχύς του ζυγού i

Q_{Di} : η παραγόμενη άεργος ισχύς του ζυγού i



Εικόνα 25: Μοντέλο φορτίου

3.2 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας

Οι μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης έχουν ως στόχο να προσδιορίσουν με όσο το δυνατόν ακριβέστερο τρόπο την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα σύστημα ανά πάσα στιγμή, με βάση τις διαθέσιμες μετρήσεις. Ένας τρόπος, για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, είναι η λεγόμενη Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation-MLE), μια μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη στατιστική.

Τα σφάλματα των μετρήσεων θεωρείται ότι ακολουθούν γνωστή κατανομή, με άγνωστες ωστόσο παραμέτρους. Η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όλων των μετρήσεων μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση παραμέτρων. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και λαμβάνει μέγιστη τιμή, όταν οι άγνωστες παράμετροι βρίσκονται όσο το

δυνατόν πιο κοντά στις πραγματικές τους τιμές. Ορίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας. Η λύση του παραπάνω προβλήματος θα δώσει την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας για τις ζητούμενες παραμέτρους. Τα σφάλματα των μετρήσεων θα θεωρηθεί ότι ακολουθούν κανονική κατανομή (κατανομή Gauss). (28) (83) (84) (85)

3.2.1 Κανονική κατανομή τυχαίας μεταβλητής

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μια μεταβλητής που ακολουθεί κανονική κατανομή (κατανομή Gauss) είναι η ακόλουθη:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.8)$$

Όπου:

z : η τυχαία μεταβλητή

μ : η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής z

σ : η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής z .

Η συνάρτηση $f(z)$ μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλονται οι παράμετροι μ , σ . Εντούτοις η μορφή της δύναται να σταθεροποιηθεί, πραγματοποιώντας την ακόλουθη αλλαγή μεταβλητών:

$$u = \frac{z - \mu}{\sigma} \quad (3.9)$$

Η μέση τιμή και η διασπορά της παραπάνω μεταβλητής θα είναι αντίστοιχα:

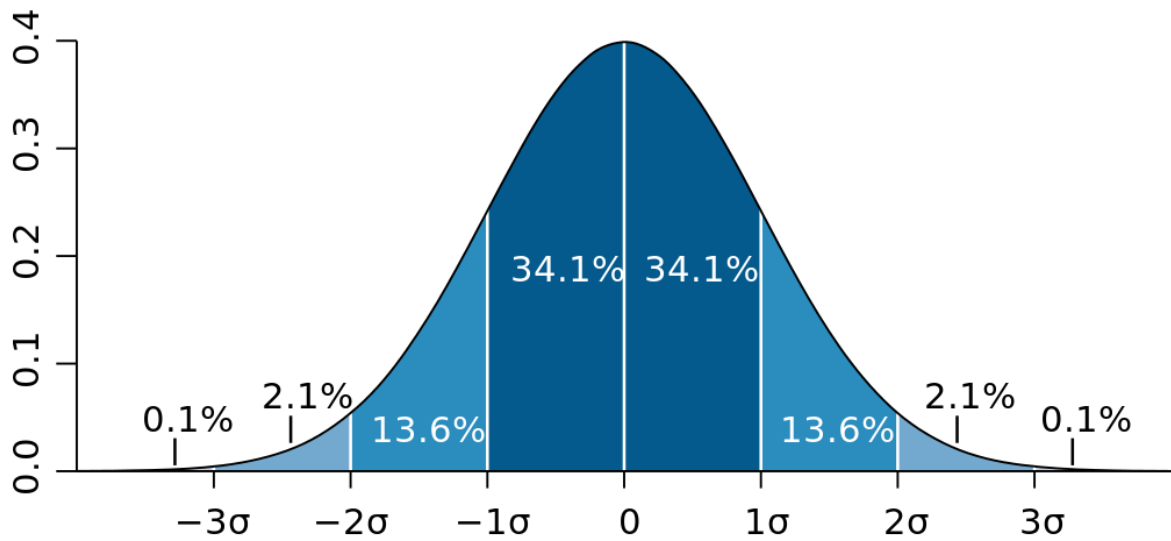
$$E(u) = \frac{E(z) - \mu}{\sigma} = \frac{\mu - \mu}{\sigma} = 0 \quad (3.10)$$

$$Var(u) = \frac{Var(z) - Var(\mu)}{\sigma^2} = \frac{\sigma^2 - 0}{\sigma^2} = 1 \quad (3.11)$$

Επομένως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής u , θα είναι:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (3.12)$$

Ακολουθεί η γραφική παράσταση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της u , η οποία ακολουθεί την αναφερόμενη βιβλιογραφικά τυποποιημένη κανονική κατανομή.



Εικόνα 26: Τυποποιημένη κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (86)

3.2.2 Συνάρτηση πιθανοφάνειας

Έστω f_m η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, m τυχαίων μεταβλητών, ανεξάρτητων μεταξύ τους, καθεμία από τις οποίες ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η f_m εκφράζεται ως το γινόμενο των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας των m τυχαίων μεταβλητών ως εξής:

$$f_m(z) = f(z_1) \cdot f(z_2) \dots f(z_m) \quad (3.13)$$

Όπου:

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

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας f_m , κατ' ουσίαν αποτελεί ένα μέτρο της πιθανότητας να παρατηρηθεί ένα συγκεκριμένο σύνολο μετρήσεων στο διάνυσμα z .

Στόχος της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας είναι η μεγιστοποίηση της προαναφερθείσας συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους του μέσου όρου μ και της τυπικής απόκλισης σ .

Προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης, η συνάρτηση f_m αντικαθίσταται από το λογάριθμο της. Η νέα συνάρτηση ονομάζεται λογαριθμική συνάρτηση πιθανότητας και συμβολίζεται με L .

$$L = \log f_m(z) = \sum_{i=1}^m \log f(z_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i \quad (3.14)$$

Όπως προαναφέρθηκε, στην εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας, μεγιστοποιείται η συνάρτηση πιθανότητας (ή λογαριθμικής πιθανότητας) για το δεδομένο σύνολο μετρήσεων Z_1, Z_2, \dots, Z_m .

Το πρόβλημα:

$$\text{maximize } \log f_m(z)$$

Ισοδυναμεί με το πρόβλημα:

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

Το σφάλμα μέτρησης ορίζεται ως εξής:

$$e_i = z_i - \mu_i = z_i - E(z_i) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.15)$$

όπου η αναμενόμενη τιμή $E(z_i)$ της μέτρησης z_i μπορεί να εκφρασθεί ως μία μη γραμμική συνάρτηση $h_i(x)$, που συνδέει το διάνυσμα κατάστασης x του συστήματος με την i -οστή μέτρηση. Το τετράγωνο κάθε σφάλματος μέτρησης e_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος:

$$W_{ii} = \sigma_i^{-2} \quad (3.16)$$

το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο της διασποράς σφάλματος της μέτρησης z_i .

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της εξίσωσης (3.14), ανάγεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σταθμισμένου αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων:

$$\sum_{i=1}^m W_{ii} e_i^2 = \min \quad (3.17)$$

όπου:

$$e_i = z_i - h_i(x) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.18)$$

Η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι γνωστή και ως μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων με συντελεστές βαρύτητας (Weighted Least Squares-WLS). (28)

3.3 Μοντέλο μετρήσεων

Για το σύνολο των μετρήσεων Z_1, Z_2, \dots, Z_m θεωρείται ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (3.19)$$

όπου:

$$h^T = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$$

$h_i(x)$: είναι η μη γραμμική συνάρτηση που συνδέει το διάνυσμα κατάστασης x του συστήματος με την i -οστή μέτρηση,

$x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$: είναι το διάνυσμα κατάστασης και

$e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$: είναι το διάνυσμα των σφαλμάτων των μετρήσεων. (28)

Επιπρόσθετα, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές για τα σφάλματα των μετρήσεων e_i :

- Η μέση τιμή τους είναι μηδενική, δηλαδή $E(e_i) = 0$, $i = 1, 2, \dots, m$
- Τα σφάλματα των μετρήσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, δηλαδή $E\{e_i e_j\} = 0$

Η διαγώνια μήτρα R ορίζεται ως ακολούθως:

$$R = Cov(e) = E\{ee^T\} = diag\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (3.20)$$

Η τυπική απόκλιση σ_i κάθε μέτρησης z_i αποτελεί ένα μέτρο για την αναμενόμενη ακρίβεια της εκάστοτε τιμής της μέτρησης.

Η εκτίμηση κατάστασης WLS ελαχιστοποιεί την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (3.21)$$

Προκειμένου να λάβει η $J(x)$ ελάχιστη τιμή, θα πρέπει να ικανοποιείται η εξής συνθήκη για την πρώτη τάξης παράγωγό της:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (3.22)$$

όπου:

$$H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right] \quad (3.23)$$

Αναπτύσσοντας σε σειρά Taylor τη μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$ γύρω από το διάνυσμα κατάστασης x^k , προκύπτει ότι:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (3.24)$$

Θεωρώντας αμελητέους τους όρους υψηλότερης τάξης, προκύπτει η ακόλουθη επαναληπτική διατύπωση της λύσης, η οποία είναι γνωστή και ως μέθοδος Gauss-Newton (28):

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1}g(x^k) \quad (3.25)$$

όπου:

k : ο δείκτης επανάληψης,

x^k : το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k ,

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \quad (3.26)$$

και

$$g(x^k) = -H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (3.27)$$

Θα ισχύει τελικά:

$$[G(x^k)]\Delta x^{k+1} = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] \quad (3.28)$$

όπου:

$$\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k \quad (3.29)$$

3.3.1 Η συνάρτηση των μετρήσεων $h(x)$

Οι συμβατικές μετρήσεις που λαμβάνονται σε ένα σύστημα SCADA περιλαμβάνουν ως επί το πλείστον εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος σε ζυγούς του συστήματος, ροές ενεργού και αέργου ισχύος γραμμών μεταφοράς και μέτρα τάσης ζυγών.

Οι συναρτήσεις που αφορούν τα παραπάνω είδη μετρήσεων μπορούν να γραφούν σε καρτεσιανή, πολική ή υβριδική μορφή:

- Στην καρτεσιανή μορφή οι τάσεις και όλες οι αγωγιμότητες που αφορούν το δίκτυο γράφονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες.
- Στην πολική μορφή οι τάσεις και όλες οι αγωγιμότητες που αφορούν το δίκτυο γράφονται σε πολικές συντεταγμένες.
- Στην υβριδική μορφή οι τάσεις γράφονται σε πολικές συντεταγμένες και όλες οι αγωγιμότητες που αφορούν το δίκτυο σε καρτεσιανές.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση της υβριδικής μορφής των συναρτήσεων μέτρησης.

Επομένως οι τάσεις θα έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$\tilde{V}_i = V_i e^{j\delta_i} = V_i \angle \delta_i \quad (3.30)$$

Ενώ για τις αγωγιμότητες θα ισχύει η ακόλουθη αναπαράσταση:

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

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (3.32)$$

Το διάνυσμα κατάστασης περιέχει $2n-1$ στοιχεία:

- $n-1$ φασικές γωνίες της τάσης και
- n μέτρα τάσης των ζυγών.

Δεν χρειάζεται να υπολογιστεί η φασική γωνία για τον ζυγό αναφοράς του συστήματος, η οποία θεωρείται σταθερή και ίση με μηδέν. Ως ζυγός αναφοράς μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε από τους ζυγούς του συστήματος. Αν ως ζυγός αναφοράς θεωρηθεί ο πρώτος ζυγός, προκύπτει το ακόλουθο διάνυσμα κατάστασης:

$$x^T = [\delta_2, \delta_3, \delta_4, \dots, \delta_N, V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_N] \quad (3.33)$$

Για τις εξισώσεις των εγχύσεων και των ροών ισχύος, ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

- Έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στον ζυγό i :

$$P_i = V_i^2 \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + V_i^2 \cdot g_i - V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot a_{ij} \quad (3.34)$$

$$Q_i = -V_i^2 \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - V_i^2 \cdot b_i - V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.35)$$

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

$$P_{ij} = V_i^2 \cdot (g_{ij} + g_{sj}) - V_i \cdot V_j \cdot a_{ij} \quad (3.36)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 \cdot (b_{ij} + b_{sj}) - V_i \cdot V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.37)$$

όπου: $\alpha(i)$ είναι το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με τον ζυγό i . (43)

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

$$a_{ij} = g_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3.38)$$

$$\beta_{ij} = g_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.39)$$

3.3.2 Η Ιακωβιανή μήτρα H(x)

Η Ιακωβιανή μήτρα ορίζεται ως εξής:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Περιλαμβάνει όλες τις μερικές παραγώγους κάθε μέτρησης ως προς κάθε μεταβλητή κατάστασης. Η σειρά με την οποία τοποθετούνται οι γραμμές στην Ιακωβιανή μήτρα μπορεί να είναι οποιαδήποτε. (28)

Παρατίθενται ακολούθως οι εξισώσεις της Ιακωβιανής μήτρας που χρησιμοποιήθηκαν για το μελετώμενο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας:

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i \cdot V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2 \cdot V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} (g_{ij} + g_{sj}) + 2 \cdot V_i \cdot g_i - \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i \cdot \alpha_{ij} \quad (3.44)$$

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

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i \cdot V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2 \cdot V_i \cdot \sum_{m \in \alpha(i)} (b_{ij} + b_{sj}) - 2 \cdot V_i \cdot b_i - \sum_{m \in \alpha(i)} V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i \cdot \beta_{ij} \quad (3.48)$$

➤ Μερική παράγωγος ρών ενεργού ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i \cdot V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i \cdot V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = 2 \cdot V_i \cdot (g_{ij} + g_{sj}) - V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \cdot \alpha_{ij} \quad (3.52)$$

➤ Μερική παράγωγος ρών αέργου ισχύος ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i \cdot V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i \cdot V_j \cdot \alpha_{ij} \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -2 \cdot V_i \cdot (b_{ij} + b_{sj}) - V_j \cdot \beta_{ij} \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \cdot \beta_{ij} \quad (3.56)$$

➤ Μερική παράγωγος μέτρου τάσεως ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \quad (3.59)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (3.60)$$

3.3.3 Η μήτρα κέρδους $G(x)$

Για να υπολογιστεί η μήτρα κέρδους $G(x)$, χρησιμοποιείται η Ιακωβιανή μήτρα $H(x)$ και η μήτρα διασποράς R . Η μήτρα R είναι διαγώνια και έχει σαν στοιχεία τις διασπορές σ^2 των μετρήσεων. Η μήτρα $G(x)$ δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$G(x^k) = H^T(x^k) * R^{-1} * H(x^k) \quad (3.61)$$

και έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι συμμετρική.
- Είναι αραιή, όχι τόσο όσο η $H(x)$.
- Είναι θετικά ορισμένη για πλήρως παρατηρήσιμα συστήματα.

3.4 Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης WLS δίνει λύση της εξίσωσης (3.28) μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Gauss-Newton. (28)

Τα βασικά βήματα της επαναληπτικής μεθόδου είναι τα ακόλουθα:

1. Αρχικοποίηση του δείκτη επαναλήψεων k με μηδενική τιμή.
2. Αρχικοποίηση του διανύσματος κατάστασης x^k με την τιμή x^0 . Στο διάνυσμα x^0 , όλες οι τάσεις των ζυγών θεωρούνται ίσες με τη μονάδα και με μηδενικές γωνίες.
3. Υπολογισμός της μήτρας $H(x^k)$ και του πίνακα κέρδους $G(x^k)$.
4. Υπολογίζεται ο όρος:

$$\Delta x^k = x^{k+1} - x^k = \left(H^T(x^k) R^{-1} H(x^k) \right)^{-1} H^T(x^k) R^{-1} (z - h(x^k)) \quad (3.62)$$

5. Πραγματοποιείται έλεγχος σύγκλισης, μέσω της σχέσης:

$$\max |\Delta x^k| \leq \varepsilon \quad (3.63)$$

Το όριο ανοχής ε , ισούνταν με 10^{-3} στην παρούσα εργασία.

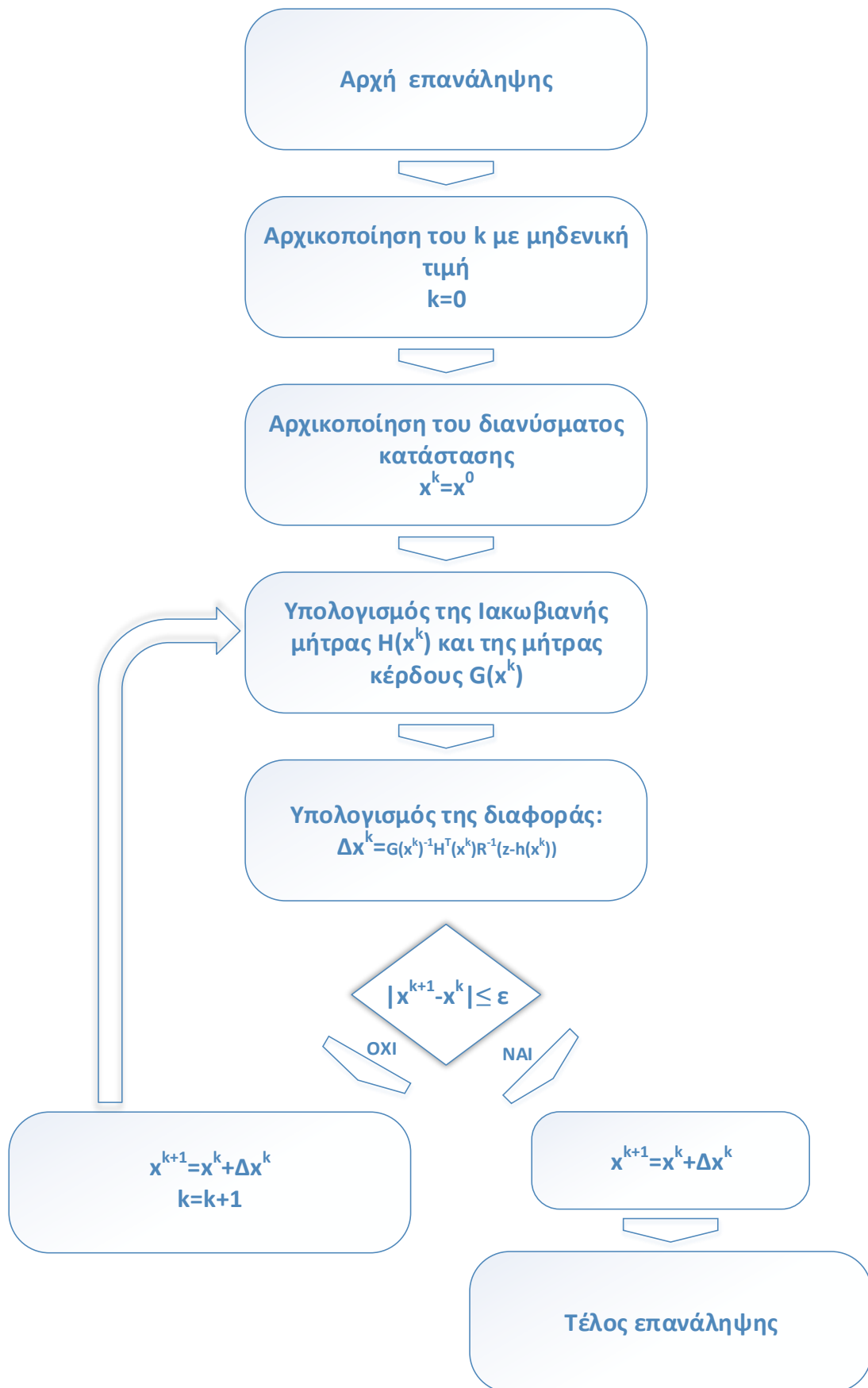
6. Σε περίπτωση που δεν επιτευχθεί σύγκλιση, το διάνυσμα κατάστασης και ο δείκτης επαναλήψεων λαμβάνουν τις ακόλουθες τιμές:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (3.64)$$

$$k = k + 1 \tag{3.65}$$

και η μέθοδος επαναλαμβάνεται από το βήμα 3. Αν επιτευχθεί σύγκλιση, η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται.

Ακολουθεί ένα διάγραμμα ροής της παραπάνω επαναληπτικής μεθόδου, που απεικονίζει σχηματικά τα βήματα που ακολουθούνται.



Εικόνα 27: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου εκτίμησης κατάστασης

Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Οι μετρήσεις που καταφθάνουν σε ένα Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας, για την εποπτεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι εξαιρετικά πιθανό να εμπεριέχουν μικρότερα ή μεγαλύτερα σφάλματα. Τέτοιου είδους σφάλματα μπορεί να οφείλονται στην ακρίβεια των μετρητικών οργάνων, σε παρεμβολές που υπεισέρχονται στο σύστημα μέτρησης, αλλά και στον εμφανιζόμενο θόρυβο κατά τη μετάδοση των μετρήσεων μέσω ενός ασύρματου ή ενσύρματου δικτύου. (17) (69) (87)

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα παραπάνω σφάλματα είναι δυνατόν να εντοπιστούν και να εκκαθαριστούν αποτελεσματικά. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν τα αρνητικά μέτρα τάσεων, πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τάσεις ή ακόμα μετρήσεις με αντίθετο πρόσημο από το αναμενόμενο.

Πολύ μεγάλα σφάλματα μπορούν να προκύψουν, όταν έχει πραγματοποιηθεί εσφαλμένη τοποθέτηση ή παραμετροποίηση των μετρητικών οργάνων, ή ακόμα όταν η μοντελοποίηση του μελετώμενου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα λανθασμένης μοντελοποίησης ενός δικτύου είναι να έχουν παραλειφθεί συγκεκριμένες γεννήτριες, καταναλώσεις ή γραμμές του δικτύου. Τα παραπάνω σφάλματα ονομάζονται και σφάλματα τοπολογίας και μπορούν να οδηγήσουν τον εκτιμητή κατάσταση σε αποτελέσματα που απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα. (28)

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι η ανίχνευση, ο εντοπισμός και η εκκαθάριση των εσφαλμένων μετρήσεων, αποτελούν διαδικασία καθοριστικής σημασίας για την κατάλληλη εποπτεία και την ορθή λειτουργία ενός δικτύου.

Η έννοια της ανίχνευσης εσφαλμένων μετρήσεων (bad data detection) έγκειται στη διαπίστωση ότι κάπου στο σύστημα υπάρχουν εσφαλμένες μετρήσεις, ενώ η έννοια του εντοπισμού (bad data identification) ταυτοποιεί ποιες ακριβώς από τις μετρήσεις του συστήματος είναι εσφαλμένες. (88) (89) (90)

Σημαντικές δυνατότητες εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων παρέχουν οι μέθοδοι εκτίμησης κατάστασης, οι οποίες δύνανται να φιλτράρουν τις μετρήσεις ενός συστήματος, ώστε να εκκαθαριστούν όσες από αυτές εμπεριέχουν σημαντικά σφάλματα. (91) (92) (93)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γίνεται χρήση της μεθόδου σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων (μέθοδος WLS).

Σημαντικό ρόλο στην απόδοση του εντοπισμού σφαλμάτων διαδραματίζει η ύπαρξη περίσσειας μετρήσεων (περισσότερες μετρήσεις από τον αριθμό των άγνωστων μεγεθών), αλλά και ο αριθμός των εσφαλμένων μετρήσεων. Ιδιαιτέρως χρήσιμες είναι επίσης οι κρίσιμες μετρήσεις οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω. (28) (94) (95)

4.2 Διαδικασία ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων

Η διαδικασία εντοπισμού των εσφαλμένων μετρήσεων στηρίζεται σε μια γραμμική ανάλυση της εκτίμησης ελάχιστων τετραγώνων (WLS).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εκτίμηση κατάστασης WLS ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (4.1)$$

όπου:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\hat{x}))^2}{R_{ii}} \quad (4.2)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι:

$$H^T(\hat{x})R^{-1}(z - h(\hat{x})) = 0 \quad (4.3)$$

Το σφάλμα κατάστασης ορίζεται ως εξής:

$$\delta_x = x - \hat{x} \quad (4.4)$$

Αν υποτεθεί ότι το σφάλμα κατάστασης είναι πολύ μικρό, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$h(x) = h(\hat{x}) + H(\hat{x})\delta_x \quad (4.5)$$

$$z = h(\hat{x}) + H(\hat{x})\delta_x + e \quad (4.6)$$

όπου e είναι ο θόρυβος των μετρήσεων.

Αντικαθιστώντας τη σχέση (4.6) στην εξίσωση (4.3) προκύπτει ότι:

$$H^T(\hat{x})R^{-1}(H(\hat{x})\delta_x + e) = 0 \quad (4.7)$$

επομένως:

$$\delta_x = -(H^T(\hat{x})R^{-1}H(\hat{x}))^{-1}H^T(\hat{x})R^{-1}e = -G^{-1}H^T(\hat{x})R^{-1}e \quad (4.8)$$

Ακολούθως ορίζεται το διάνυσμα των υπολοίπων ως εξής:

$$\begin{aligned} r &= z - \hat{z} = h(x) + e - h(\hat{x}) = H(\hat{x})\delta_x + e \\ &= -H(\hat{x})G^{-1}H^T(\hat{x})R^{-1}e + e = (I - H(\hat{x})G^{-1}H^T(\hat{x})R^{-1})e \\ &= \Omega e \end{aligned} \quad (4.9)$$

Θα ισχύει ότι:

$$\Omega R \Omega^T = \Omega R \quad (4.10)$$

Τα σφάλματα των μετρήσεων, σύμφωνα με τον εκτιμητή ελαχίστων τετραγώνων, ακολουθούν κανονική κατανομή (κατανομή Gauss) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$e_i = N(0, R_{ii}) \quad (4.11)$$

όπου i το πλήθος των μετρήσεων.

Από τη σχέση (4.9) θα ισχύουν τα ακόλουθα για τα υπόλοιπα των μετρήσεων:

$$E\{r\} = E\{\Omega e\} = \Omega E\{e\} = 0 \quad (4.12)$$

$$\Sigma_r = Cov\{r\} = E\{rr^T\} = \Omega E\{rr^T\}\Omega^T = \Omega R \Omega^T = \Omega R \quad (4.13)$$

Η Σ_r ονομάζεται μήτρα διασποράς των υπολοίπων, ενώ τα διαγώνια της στοιχεία χρησιμοποιούνται, ώστε να αναγνωριστούν οι μετρήσεις με τη μεγαλύτερη ακρίβεια. (28)

Είναι μια συμμετρική μήτρα που περιλαμβάνει μονάχα πραγματικούς παράγοντες και ικανοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Sigma_{r,ij}^2 \leq \Sigma_{r,ii}\Sigma_{r,jj} \quad (4.14)$$

$$\Sigma_{r,ij} \leq (\Sigma_{r,ii} + \Sigma_{r,jj})/2 \quad (4.15)$$

4.2.1 Κατηγοριοποίηση των μετρήσεων

Σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν διαδραματίζουν όλες οι μετρήσεις τον ίδιο ρόλο κατά την εκτίμηση κατάστασης και τον εντοπισμό σφαλμάτων. Γι' αυτόν τον λόγο έχει νόημα η κατηγοριοποίηση των μετρήσεων ως εξής:

- **Κρίσιμες μετρήσεις:** Είναι οι μετρήσεις η αφαίρεση των οποίων καθιστά ένα παρατηρήσιμο σύστημα μη παρατηρήσιμο. Οι στήλες στη μήτρα διασποράς που αφορούν τις εν λόγω μετρήσεις θα περιέχουν μηδενικά στοιχεία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το υπόλοιπο των μετρήσεων αυτών να είναι πάντα μηδενικό.
- **Πλεονάζουσες μετρήσεις:** Είναι οι μη κρίσιμες μετρήσεις οι οποίες δίνουν μη μηδενικό υπόλοιπο μετρήσεων.

- **Κρίσιμο ζεύγος:** Είναι ένα ζεύγος πλεοναζουσών μετρήσεων που αν αφαιρεθούν ταυτόχρονα, θα καταστήσουν το σύστημα μη παρατηρήσιμο.
- **Κρίσιμες k-πλήθους (k-tuple):** Είναι το σύνολο k πλεοναζουσών μετρήσεων που αν αφαιρεθούν ταυτόχρονα, θα καταστήσουν το σύστημα μη παρατηρήσιμο. Καμία από τις k μετρήσεις δεν θα πρέπει να ανήκει σε σύνολο κρίσιμων μετρήσεων μικρότερου πλήθους. Οι k αντίστοιχες στήλες στη μήτρα διασποράς θα είναι γραμμικά εξαρτημένες.

Εντοπίζοντας τις γραμμικές εξαρτήσεις της Ιακωβιανής μήτρας, είναι δυνατόν να εντοπιστούν οι κρίσιμες μετρήσεις σε κάποιο δίκτυο. Έχουν αναπτυχθεί μάλιστα ειδικοί αλγόριθμοι στη βιβλιογραφία για τον εντοπισμό των κρίσιμων μετρήσεων. (28) (96)

4.2.2 Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τον έλεγχο χ^2

Η ανίχνευση και ο εντοπισμός σφαλμάτων με έλεγχο χ^2 κάνει χρήση του λόγου τετραγώνου της διαφοράς πειραματικής και αναμενόμενης τιμής προς την αναμενόμενη τιμή και είναι δυνατόν να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα. Αν και ως μέθοδος έχει πολλαπλές εφαρμογές στη στατιστική, δεν δίνει πάντοτε ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω κάποιων περιορισμών που εμφανίζει. Κατά την εκτίμηση κατάστασης σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι προσεγγίσεις που γίνονται στον έλεγχο χ^2 δεν την καθιστούν ως το ενδεδειγμένο εργαλείο εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων. (97) (98) (99)

4.2.3 Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τη χρήση κανονικοποιημένων υπολοίπων

Το κανονικοποιημένο υπόλοιπο r_i^N ορίζεται ως ο λόγος της απόλυτης τιμής του υπολοίπου μιας μέτρησης προς την τετραγωνική ρίζα του αντίστοιχου διαγώνιου στοιχείου της μήτρας διασποράς υπολοίπων ως εξής:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}} \quad (4.16)$$

Το διάνυσμα r^N , που περιέχει το σύνολο των κανονικοποιημένων υπολοίπων όλων των μετρήσεων, ακολουθεί κανονική κατανομή και η μέγιστη τιμή του μπορεί να συγκριθεί με ένα στατιστικό κατώφλι, ώστε να διαπιστωθεί αν κάποια μέτρηση εμπεριέχει μεγάλο σφάλμα ή όχι. (28)

Για το διάνυσμα κανονικοποιημένων υπολοίπων θα ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

- 1) Σε περίπτωση που στο σύστημα υπάρχει μια μονάχα εσφαλμένη μέτρηση η οποία δεν είναι κρίσιμη, τότε το μέγιστο από τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα είναι αυτό που αντιστοιχεί στην εσφαλμένη μέτρηση. Η ιδιότητα αυτή επεκτείνεται και σε περιπτώσεις πολλαπλών εσφαλμένων μετρήσεων. Για την απόδειξη του παραπάνω ισχυρισμού, θεωρούμε ότι η k-οστή μέτρηση είναι εσφαλμένη ($e_k \neq 0$), ενώ όλες οι υπόλοιπες μετρήσεις δεν περιέχουν σφάλματα ($e_j = 0, j \neq k$). Βάσει της ιδιότητας (4.13) θα ισχύει διαδοχικά:

$$r_j^N = \frac{\Omega_{jk}e_k}{\sqrt{R_{jj}}\sqrt{\Omega_{jk}}} = \frac{\Sigma_{r,jk}e_k}{\sqrt{\Sigma_{r,jj}}R_{kk}} \leq \frac{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}\sqrt{\Sigma_{r,kk}e_k}}{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}R_{kk}} \quad (4.17)$$

$$r_j^N = \frac{\sqrt{\Sigma_{r,kk}e_k}}{R_{kk}} = \frac{\Omega_{kk}e_k}{\sqrt{R_{kk}}\sqrt{\Omega_{kk}}} = r_k^N \quad (4.18)$$

- 2) Στην παραπάνω ανισότητα ισχύει η ισότητα, μόνο στην περίπτωση που η μέτρηση k -οστή και η j -οστή αποτελούν κρίσιμο ζεύγος μετρήσεων, αφού οι αντίστοιχες στήλες της μήτρας διασποράς θα είναι γραμμικά εξαρτημένες. Συνεπώς τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα ενός κρίσιμου ζεύγους θα είναι πάντα ίσα και θα καθιστούν τον εντοπισμό της εσφαλμένης μέτρησης αδύνατο, ακόμα και αν αυτή η μέτρηση ανιχνεύεται. Το ίδιο θα ισχύει και στην περίπτωση που εμφανίζεται κρίσιμη πλειάδα μετρήσεων. (28)

4.2.4 Υλοποίηση αλγορίθμου για την ανίχνευση και τον εντοπισμό εσφαλμένων μετρήσεων

Ο εντοπισμός των εσφαλμένων μετρήσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με επεξεργασία των κανονικοποιημένων υπολοίπων. Παρουσιάζεται ακολούθως ένας από τους διαθέσιμους βιβλιογραφικά αλγορίθμους, ο αλγόριθμος των μέγιστων κανονικοποιημένων υπολοίπων (Largest Normalized Residuals- r_{max}^N):

- 1) Εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (WLS) και υπολογισμός του διανύσματος υπολοίπων των μετρήσεων ως εξής:

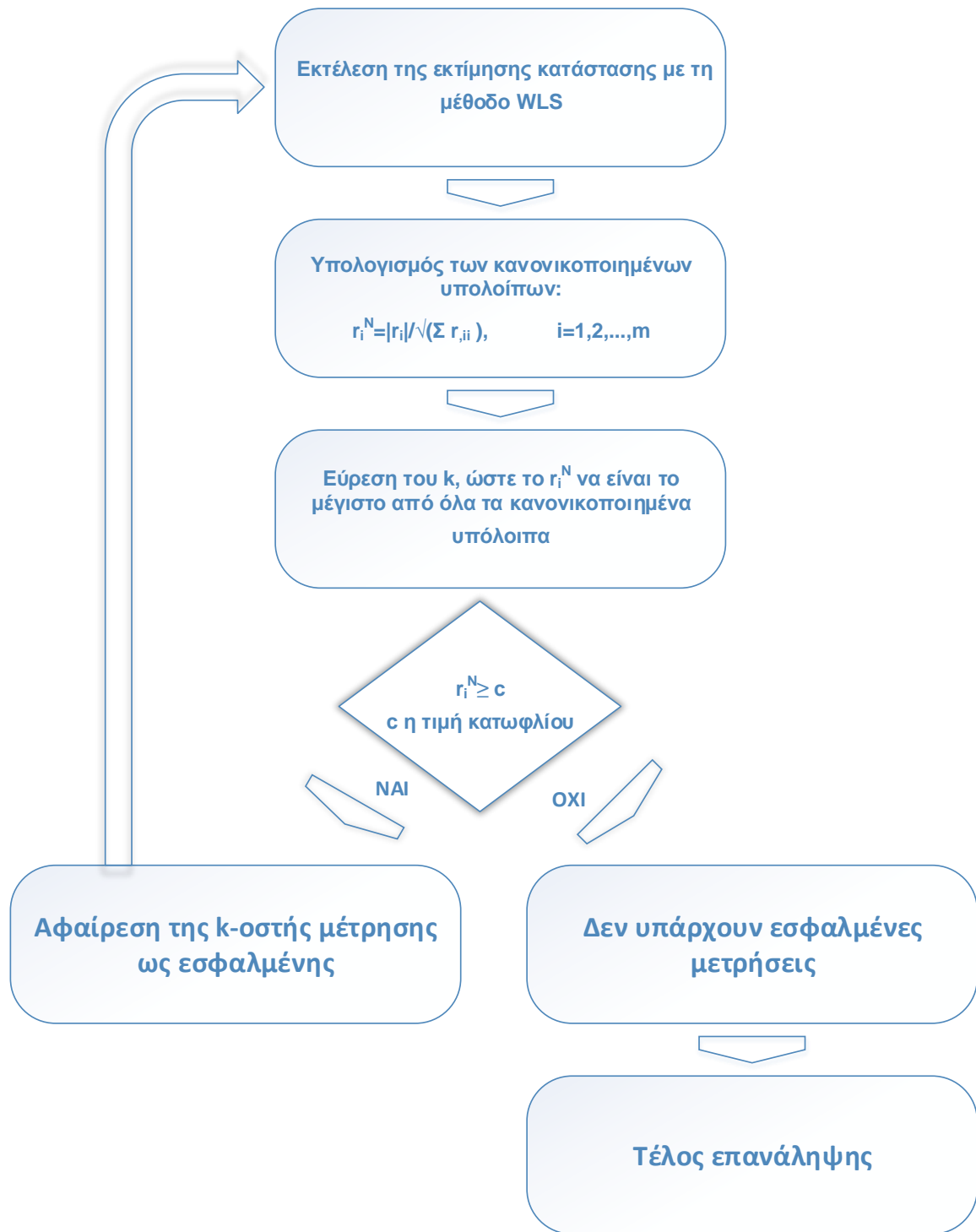
$$r_i = z_i - h_i(\hat{x}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.19)$$

- 2) Υπολογισμός των κανονικοποιημένων υπολοίπων ως εξής:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Sigma_{r,ii}}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.20)$$

- 3) Εύρεση του k , ώστε το r_k^N να είναι το μέγιστο από όλα τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα.
 4) Αν $r_k^N > c$, όπου το c είναι ένα κατώφλι αναγνώρισης εσφαλμένων (μια συνήθης τιμή που χρησιμοποιείται είναι το τρία), τότε έχει εντοπιστεί εσφαλμένη μέτρηση. Αν $r_k^N \leq c$, ο αλγόριθμος τερματίζεται και στο εξεταζόμενο σύστημα δεν έχουν ανιχνευθεί εσφαλμένες μετρήσεις.
 5) Αφαίρεση της μέτρησης που αντιστοιχεί στο k -οστό κανονικοποιημένο υπόλοιπο και επιστροφή στο βήμα 1 του αλγορίθμου.

Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση των βημάτων του παραπάνω αλγορίθμου:



Εικόνα 28: Αλγόριθμος ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων

4.2.5 Σφάλματα τοπολογίας

Για την αποτελεσματική εποπτεία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του δικτύου που συμπεριλαμβάνει και την τοπολογική του ανάλυση.

Σχεδιάζεται λοιπόν το μοντέλο του δικτύου που περιλαμβάνει όλους τους ζυγούς, τους κλάδους και τα στοιχεία του, ενώ παράλληλα, κατά την τοπολογική ανάλυση, ελέγχεται η κατάσταση όλων των διακοπτικών μηχανισμών.

Σε ορισμένες περιπτώσεις τα δεδομένα που λαμβάνονται για την κατάσταση των διακοπών ενδέχεται να μην είναι ορθά, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα μοντέλο του δικτύου που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα.

Τα τοπολογικά σφάλματα χωρίζονται σε δύο (2) κατηγορίες:

- **Σφάλματα κατάστασης κλάδων:** Αφορούν την κατάσταση των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών. Μια περίπτωση τέτοιου σφάλματος εμφανίζεται, όταν αποσυνδέεται κάποιο στοιχείο του δικτύου το οποίο θεωρείται εντός δικτύου. Μια ακόμα περίπτωση είναι να θεωρείται ένα στοιχείο εκτός δικτύου, ενώ στη πραγματικότητα είναι συνδεδεμένο σε αυτό.
- **Σφάλματα ρυθμίσεων υποσταθμών:** Αφορούν σφάλματα στους διακόπτες που συνδέουν ζυγούς εσωτερικά σε έναν υποσταθμό. Έτσι λοιπόν μπορεί να προκύψει σφάλμα διαίρεσης, όταν ένας ζυγός λανθασμένα χωρίζεται στα δύο, ή σφάλμα συγχώνευσης, όταν δύο ξεχωριστοί ζυγοί λανθασμένα θεωρούνται ως ένας. (73)

Η ύπαρξη τοπολογικών σφαλμάτων οδηγεί σε αποτελέσματα με σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα. Είναι λοιπόν καταλυτικής σημασίας η ανάπτυξη αποτελεσματικών μηχανισμών για την αντιμετώπισή τους. Τα τοπολογικά σφάλματα σε ένα δίκτυο είναι δυνατόν να εντοπιστούν και να αναγνωριστούν κατά την εκτίμηση κατάστασης με τη χρήση κανονικοποιημένων υπολοίπων για τοπολογικά σφάλματα. Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα για τοπολογικά σφάλματα ακολουθούν την ίδια λογική με την ανάλυση που προηγήθηκε σχετικά με τις εσφαλμένες μετρήσεις. (28) (73)

Υλοποίηση εργαστηριακού συστήματος SCADA

5.1 Η υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal

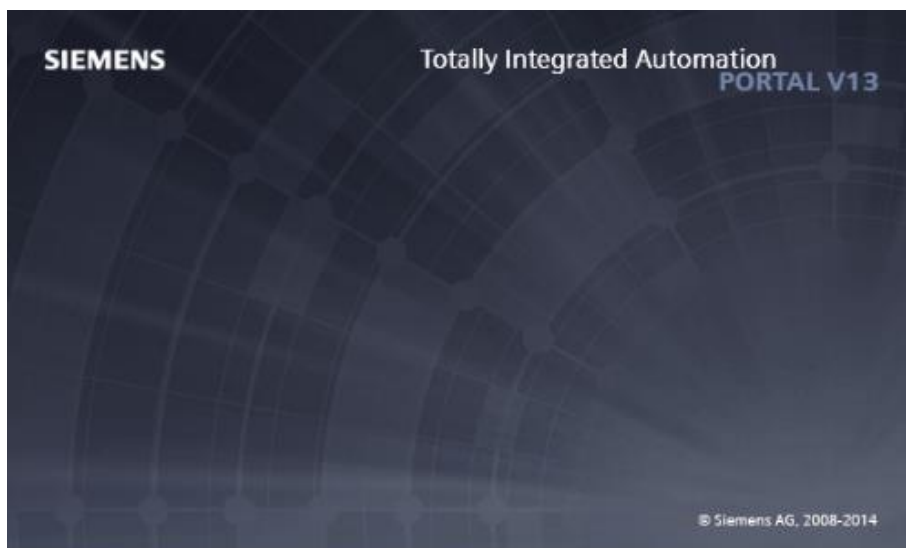
Το εργαστηριακό σύστημα SCADA, το οποίο υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αναπτύχθηκε με τη βοήθεια της υπολογιστικής πλατφόρμας TIA Portal V13.

Η υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) αναπτύχθηκε από την εταιρία Siemens S.A. και αποτελεί ένα εργαλείο αυτοματισμού που ενσωματώνει πληθώρα δυνατοτήτων σε ένα ενοποιημένο υπολογιστικό περιβάλλον.

Μέσω του TIA Portal, είναι δυνατός ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός και η οργάνωση ακόμα και ενός πολύπλοκου συστήματος αυτοματισμού. Παράλληλα η λειτουργικότητα προσομοίωσης και γραφικής απεικόνισης του συστήματος προσφέρει αυξημένες δυνατότητες εποπτείας και ελέγχου αυτού. (100)

Ένα σύστημα αυτοματισμού που υλοποιείται μέσω του TIA Portal μπορεί να περιλαμβάνει μεταξύ άλλων:

- Διαφορετικά είδη ελεγκτών (controllers)
- Συσκευές εισόδου/εξόδου (Input/Output devices)
- Κινητήρες
- Συστήματα ελέγχου κινητήρων
- Διεπαφές χρήστη HMI (Human Machine Interface)
- Ολοκληρωμένες γραμμές παραγωγής



Εικόνα 29: Η υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal v13 (101)

Πέραν των δυνατοτήτων σχεδιασμού και προσομοίωσης, είναι δυνατή μέσω του TIA Portal η σύνταξη και η εκτέλεση προγραμματιστικών σεναρίων (scripts), τα οποία ελέγχουν συγκεκριμένα στοιχεία του συστήματος αυτοματισμού.

Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι η Visual Basic, σε μια εξειδικευμένη έκδοση (custom version) από τη Siemens.

5.1.1 Η γλώσσα Visual Basic

Η γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic αποτελεί την πρώτη και πλέον διαδεδομένη υλοποίηση αντικειμενοστραφούς γλώσσας προγραμματισμού σε περιβάλλον MS-Windows. Η σύνταξη της βασίζεται στην Quick BASIC που αποτελούσε την πλέον προωθημένη υλοποίηση της BASIC για το λειτουργικό σύστημα MS-DOS. Η Visual Basic είναι μία εξαιρετικά πλούσια γλώσσα και περιέχει κάποια χαρακτηριστικά από τη γλώσσα C. Κύρια διαφοροποίησή της από τις άλλες γλώσσες είναι το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης λογισμικού που την συνοδεύει και επιτρέπει την γραφική (οπτική, visual) σύνθεση των διαφόρων στοιχείων που αποτελούν το μέσο επικοινωνίας με τον χρήστη του τελικού προγράμματος, δηλαδή τα παράθυρα, τα μενού, τα κουμπιά κλπ. Είναι γλώσσα υψηλού επιπέδου. Πρωτοπαρουσιάστηκε το 1991 και από τότε έχει εξελιχθεί, αναπτυχθεί και διαδοθεί ευρύτατα για προγραμματισμό κάθε είδους εφαρμογών, και ιδιαίτερα επιστημονικών και τεχνικών εφαρμογών σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η έννοια της γλώσσας υψηλού επιπέδου αφορά μια συμβολική γλώσσα προγραμματισμού με στοιχεία γλωσσικά και αριθμητικά, συνηθισμένα σε επιστήμονες και τεχνικούς, που επιτρέπει την σύνταξη προγραμμάτων, χωρίς καμία απαίτηση γνώσης της εσωτερικής δομής και λειτουργίας του υπολογιστή. Το όνομά της προέρχεται από τις λέξεις Visual (Οπτική) και BASIC (Beginners All Purpose Symbolic Instruction Code), δηλαδή είναι γλώσσα που επιτρέπει την ανάπτυξη κώδικα για κάθε χρήση από ανθρώπους που δεν είναι αυστηρά επαγγελματίες προγραμματιστές. Είναι πολύ καλή για την έκφραση μαθηματικών τύπων και τον χειρισμό συμβολοσειρών. Συνοπτικά αναφέρεται σαν «VB».

Η γλώσσα VB έγινε το κατ' εξοχήν εργαλείο προγραμματισμού σε πολλά πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και γραφεία μελετών. Αποτελεί ιδιοκτησία της εταιρίας Microsoft που την αναπτύσσει και, λόγω της διάδοσης της, αποτελεί ένα τυποποιημένο εργαλείο, ώστε τα προγράμματα να είναι μεταφερόμενα από υπολογιστή σε υπολογιστή.

Εκτός από τις παραπάνω υπάρχει και η Visual BASIC for Applications ή VBA και η Embedded Visual BASIC ή EBD.

Η VBA ξεκίνησε σαν αντικαταστάτης των μακροεντολών στο πακέτο MS-OFFICE και σήμερα διαδίδεται με ταχύτητα σαν τυποποιημένο εργαλείο σύνταξης πρόσθετων εντολών και διαδικασιών (scripts) σε μεγάλα πακέτα λογισμικού, όπως είναι το AutoCAD, Geomedia, Arc Info, TIA Portal κλπ.

Η EBD απευθύνεται στον προγραμματισμό των υπολογιστών «παλάμης» (PDA), καθώς και τον προγραμματισμό ειδικών συστημάτων υπολογιστών σε αυτοκίνητα και διάφορες οικιακές συσκευές.

Όπως και κάθε άλλη γλώσσα προγραμματισμού η VB περιλαμβάνει εντολές για την επεξεργασία δεδομένων. Επιπλέον περιλαμβάνει και «αντικείμενα». Πρόκειται για στοιχεία του περιβάλλοντος των Windows, όπως παράθυρα, μενού, κουμπιά κλπ.

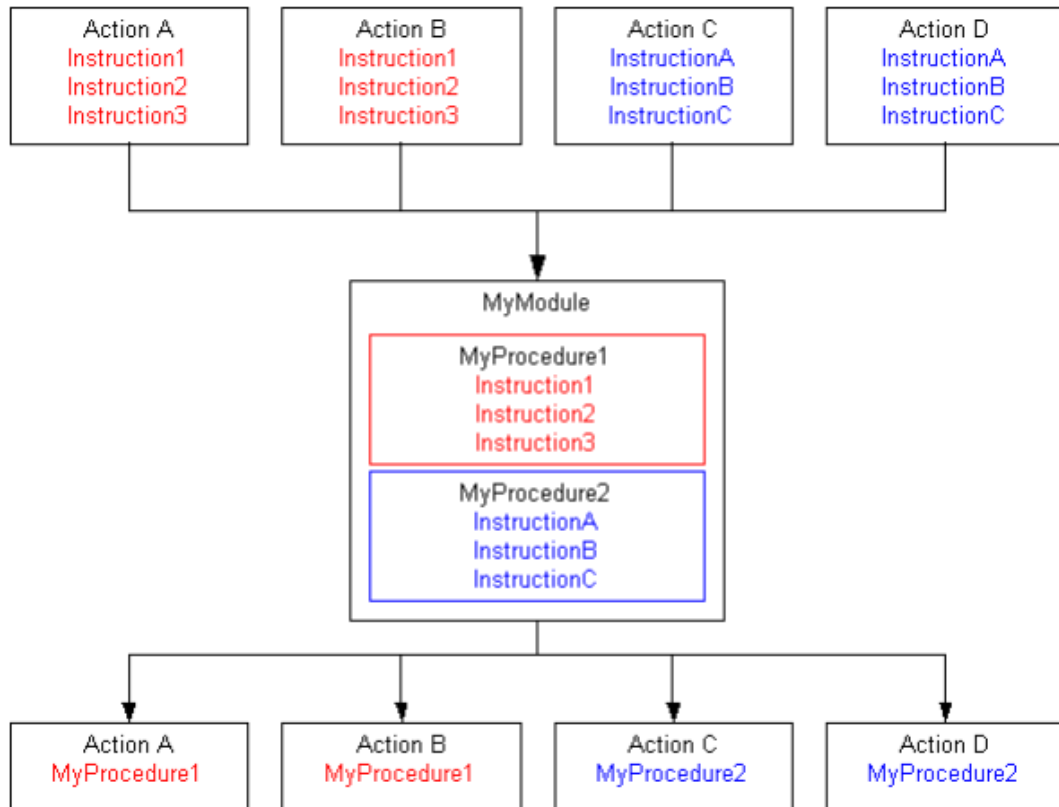
Οι εντολές περιλαμβάνουν δηλώσεις και εκτελέσιμες εντολές. Οι δηλώσεις προσδιορίζουν διάφορες παραμέτρους και χαρακτηριστικά του προγράμματος. Οι εκτελέσιμες εντολές εφαρμόζουν λογικές ή μαθηματικές πράξεις στα δεδομένα με τη βοήθεια τελεστών και ειδικών συναρτήσεων ή ρυθμίζουν τη ροή του όλου προγράμματος, την εισαγωγή δεδομένων και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. (102) (103)

5.1.2 Συγγραφή προγραμματιστικών σεναρίων Visual Basic στο TIA Portal

Στο TIA Portal πραγματοποιείται χρήση VBScripts. Το VBScript (Visual Basic Scripting Edition), αποτελεί μια εκδοχή της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic.

Η χρήση VBScripts (Visual Basic Scripting Edition) διευρύνει σημαντικά τις δυνατότητες αυτοματισμού καθώς υποστηρίζει:

- Κλασικές δομές ελέγχου συνθηκών και επαναληπτικών διαδικασιών (If...Then...Else, Do loops, While loops, For loops).
- Σύνδεση με δικτυακές συσκευές και υποστήριξη πλήθους διαφορετικών πρωτοκόλλων.
- Προχωρημένες δυνατότητες debugging με επισήμανση της γραμμής του προγραμματιστικού σεναρίου όπου έχει εντοπιστεί λάθος.
- Σύνδεση με προγραμματιστικές βιβλιοθήκες (Libraries).
- Χρήση tags, στα οποία μπορούν να εκτελεστούν υπολογισμοί καθώς και να γίνει η σύνδεση τους με άλλα tags που προέρχονται από άλλες συσκευές, όπως είναι τα HMI tags ή τα PLC tags.
- Χρήση αντικειμένων (objects) στα οποία μπορούν να δοθούν δυναμικές ιδιότητες και ιδιότητες αλληλεπίδρασης με τον χρήστη.
- Χρήση προχωρημένων μενού (menus) ή toolbars που μπορούν να οριστούν ή να εξατομικευτούν από τον χρήστη.
- Χρήση διαδικασιών (procedures) και δυνατότητα κλήσης των διαδικασιών από διαφορετικά σημεία του κώδικα.
- Χρήση modules τα οποία δίνουν τη δυνατότητα ενοποίησης συναφών διαδικασιών, όπως για παράδειγμα συναφών μαθηματικών συναρτήσεων.
- Χρήση Actions, ενεργειών δηλαδή που είναι δυνατόν να εκτελεστούν μετά από κάποιο έναυσμα που δίνεται από τον χρήστη ή από κάποια διαδικασία.
- Αυξημένη ασφάλεια με δυνατότητα ελέγχου εισόδου χρήστη και δυνατότητα προστασίας με προσωπικό κωδικό συγκεκριμένων procedures ή actions. (102) (104)

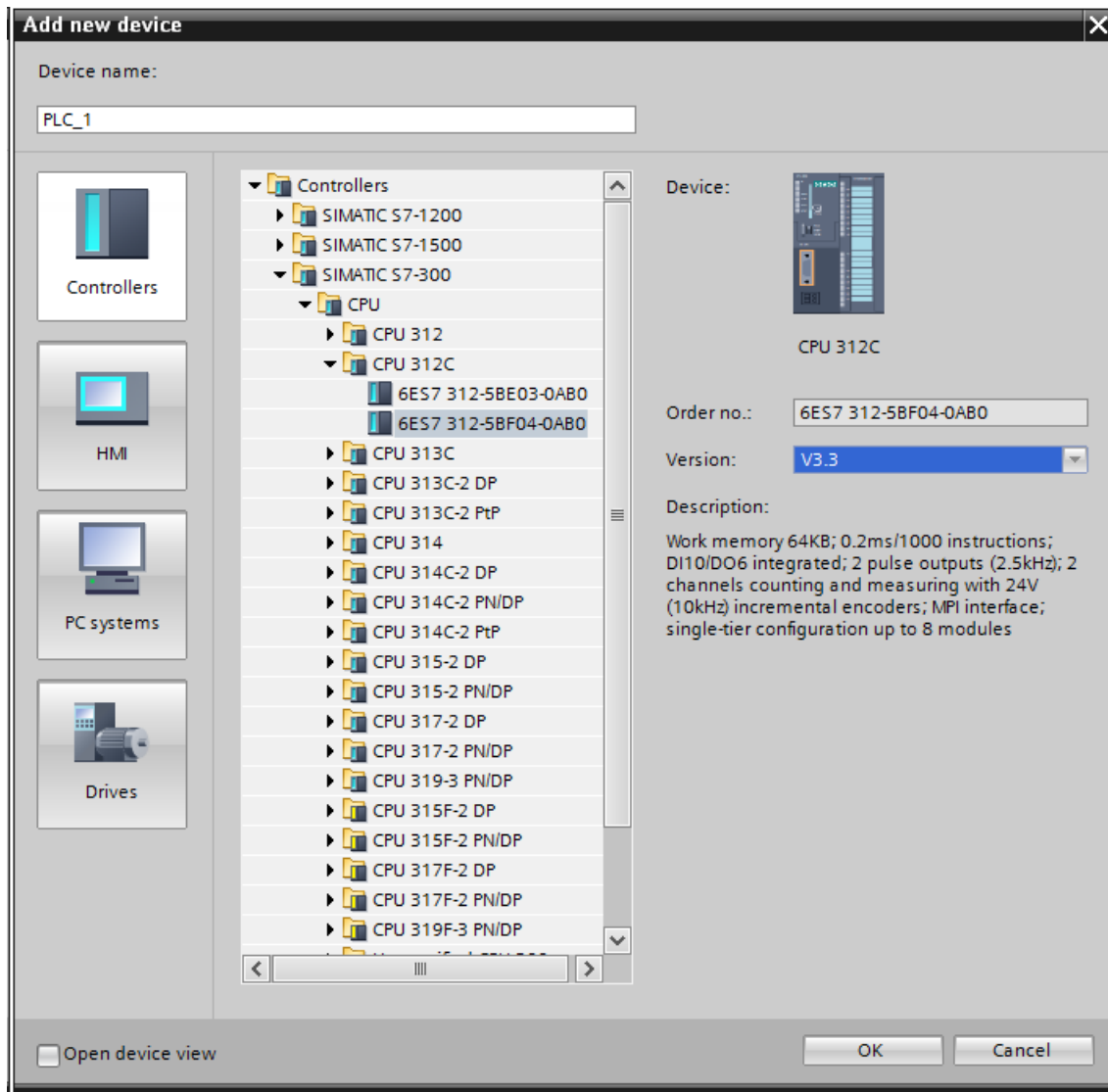


Εικόνα 30: Ενοποίηση διαδικασιών σε ένα module (104)

5.2 Εισαγωγή των συσκευών του συστήματος αυτοματισμού

5.2.1 Εισαγωγή προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή-PLC

Το πρώτο βήμα για τον σχεδιασμό του συστήματος αυτοματισμού ήταν η εισαγωγή του μοντέλου του Προγραμματιζόμενου Λογικού Ελεγκτή (PLC) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 31: Εισαγωγή του ελεγκτή PLC

Το PLC που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο: CPU 312C v3.3 της Siemens και το οποίο διαθέτει:

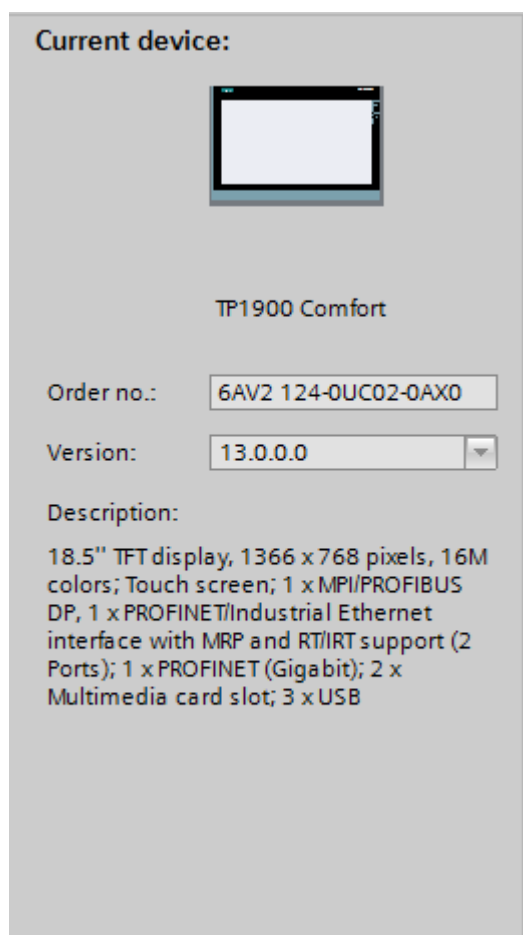
- 8 αναλογικές εισόδους.
- 10 ψηφιακές εισόδους.
- 6 ψηφιακές εξόδους.

5.2.2 Εισαγωγή συσκευής διεπαφής χρήστη-HMI

Το επόμενο βήμα για την υλοποίηση του εργαστηριακού συστήματος ήταν η εισαγωγή της αντίστοιχης συσκευής διεπαφής χρήστη HMI. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το TP1900 Comfort της Siemens.

Το TP1900 Comfort διαθέτει έγχρωμη οθόνη αφής 18,5 ιντσών και χρησιμεύει στον χειρισμό και την εποπτεία του συστήματος αυτοματισμού, καθώς μέσω αυτού παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης, αλλά και της ανίχνευσης και εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων.

Σημειώνεται ότι έχει πραγματοποιηθεί η κατάλληλη σύνδεση του συστήματος HMI με το PLC.



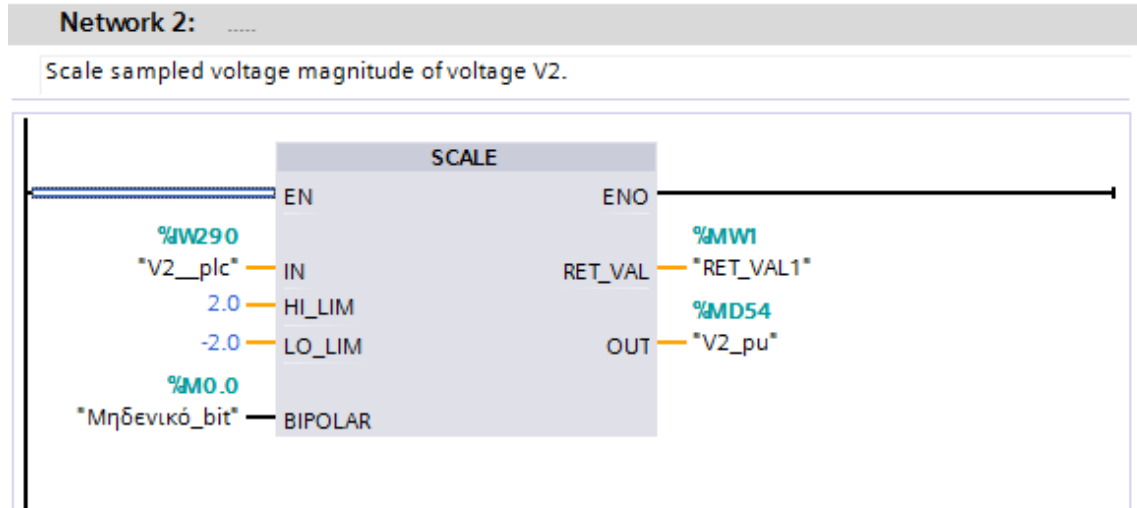
Εικόνα 32: Εισαγωγή της διεπαφής χρήστη HMI

5.2.3 Εισαγωγή συναρτήσεων μέτρησης (scaling functions)

Οι συναρτήσεις μέτρησης (scaling functions) δίνουν σαν έξοδο τιμές σε ένα συγκεκριμένο εύρος το οποίο ορίζει ο χρήστης και σαν είσοδο παίρνουν έναν ακέραιο αριθμό ο οποίος αφορά την αναλογική τιμή ρεύματος ή τάσης που παρέχει ο μορφοτροπέας (transducer).

Στην παρούσα εργαστηριακή υλοποίηση, η συνάρτηση μέτρησης είναι η FC105.

Συνολικά εισήχθησαν εικοσιμία (21) συναρτήσεις μετρήσεων, όσες δηλαδή και οι μετρήσεις του μελετώμενου συστήματος.



Εικόνα 33: Η συνάρτηση μέτρησης FC105 για τη μέτρηση της ανά μονάδα τιμής τάσης του ζυγού 2

Η FC105 δέχεται ως είσοδο την αναλογική τιμή από έναν μορφοτροπέα που προηγείται και ο οποίος διαθέτει 27649 διαβαθμίσεις στο εύρος (0, 27648).

Στην περίπτωση εικονικών μετρήσεων η παράμετρος που επηρεάζει ο χειριστής είναι η είσοδος από τον μορφοτροπέα που προηγείται.

Ως έξοδο, η παραπάνω συνάρτηση δίνει τιμή στο εύρος που δηλώνεται από τα πεδία LO_LIM και HI_LIM.

Οι παράμετροι EN και ENO πρέπει να δέχονται τη δυαδική τιμή ένα (1), ώστε η συνάρτηση να δέχεται είσοδο και να δίνει έξοδο αντίστοιχα.

Το πεδίο BIPOLAR λαμβάνει δυαδική τιμή ένα (1), όταν ο χειριστής επιθυμεί ένα αρχικά θετικά δηλωμένο εύρος, όπως για παράδειγμα το εύρος (0, 2), να επεκταθεί στο εύρος (-2, 2) ώστε το σύστημα να μπορεί να λαμβάνει και αρνητικές τιμές.

Το πεδίο RET_VAL επιτρέπει την εκτέλεση της συνάρτησης, μονάχα όταν δεν βρεθεί σφάλμα στην υλοποίηση δίνοντας τη δεκαεξαδική τιμή W#16#0000.

5.3 Προσομοίωση των μετρήσεων από τις μονάδες PLC

Η υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής είναι σε θέση να λαμβάνει μετρήσεις από πραγματικά PLCs και να διενεργεί όλους τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εκτίμηση κατάστασης και την ανίχνευση και εντοπισμό εσφαλμένων μετρήσεων.

Ωστόσο, στο πλαίσιο της εργαστηριακής συνιστώσας της διπλωματικής άσκησης και με στόχο την καλύτερη εξοικείωση του χειριστή με τα συστήματα εποπτείας και ελέγχου, παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης των μετρήσεων από τα PLCs και χρησιμοποίησης του υλοποιηθέντος εργαστηριακού συστήματος, ακόμα και όταν δεν είναι διαθέσιμη κάποια μονάδα PLC.

Η προσομοίωση των μετρήσεων γίνεται με τη βοήθεια του προγράμματος S7-PLCSIM που βρίσκεται ενσωματωμένο στην υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα μέσω των μπαρών κύλισης που διατίθενται να καθορίζει τις εικονικές τιμές των μεγεθών του συστήματος (μεγέθη με κατάληξη _pic) μέσα σε ένα προκαθορισμένο εύρος και να εποπτεύει τις τιμές των ανά μονάδα μετρήσεων (μεγέθη με κατάληξη _ru).

Για μεγαλύτερη κατανόηση των μεγεθών που εισάγει ο χρήστης έχει δημιουργηθεί κατάλληλος πίνακας συμβόλων (symbol table) που εμφανίζει το όνομα των μεγεθών εισόδου του συστήματος. Ο πίνακας αυτός παρατίθεται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.

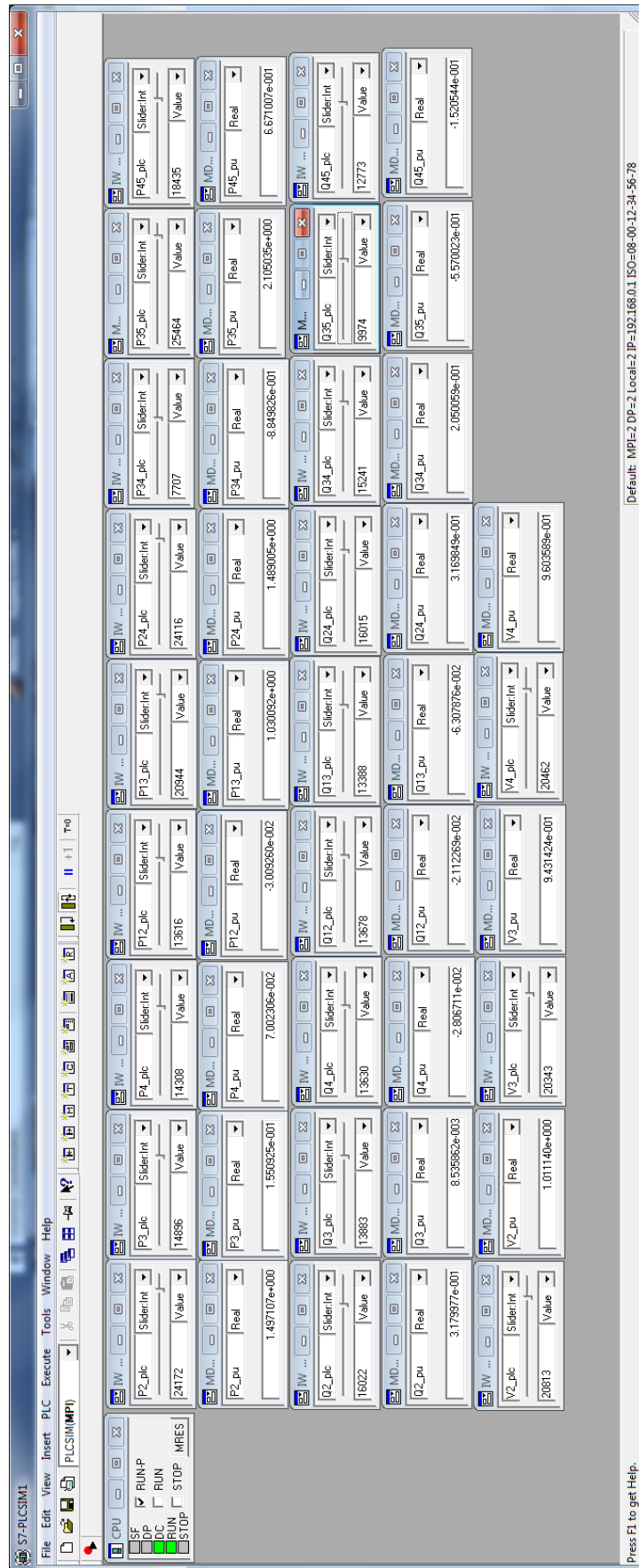
Ακολουθούν στιγμιότυπα οθόνης από το πρόγραμμα S7-PLCSIM για τις εξής δύο περιπτώσεις:

- 1) Δεν υπάρχει καμία εσφαλμένη μέτρηση και δεν έχει αφαιρεθεί καμία γραμμή από το μελετώμενο δίκτυο.
- 2) Δεν υπάρχει καμία εσφαλμένη μέτρηση και έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2 από το μελετώμενο δίκτυο.

The screenshot displays the SIMATIC Manager interface for a PLC system. The main area shows a grid of 48 modules, organized into columns for digital inputs (I), digital outputs (Q), and analog inputs/outputs (AI/AO). Each module is represented by a small icon and a text box containing its name, a value field, and a unit. The status bar at the bottom indicates the current mode (RUN) and provides help information.

Module Name	Value	Unit
I1	23778	Value
I2	13962	Value
I3	11647	Value
I4	22990	Value
I5	21114	Value
I6	9521	Value
I7	5621	Value
I8	17156	Value
Q1	1440104e+000	Real
Q2	3096	Value
Q3	14245	Value
Q4	13809	Value
Q5	16797	Value
Q6	13764	Value
Q7	14730	Value
Q8	14567	Value
Q9	10112	Value
Q10	13119	Value
AI1	1.440104e+000	Real
AI2	3.616929e-003	Real
AI3	1.99517e-002	Real
AI4	1.265100e-000	Real
AI5	1.098090e+000	Real
AI6	1.973018e+000	Real
AI7	4.820610e-001	Real
AO1	-1.552082e+000	Real
AO2	6.090956e-002	Real
AO3	2.170086e-003	Real
AO4	4.301214e-001	Real
AO5	-6.690982e-003	Real
AO6	1.310753e-001	Real
AO7	1.060474e-001	Real
AO8	5.370370e-001	Real
AO9	-1.019955e-001	Real
AI10	1.310753e-001	Real
AI11	1.060474e-001	Real
AI12	5.370370e-001	Real
AI13	-1.019955e-001	Real
AO14	9.660013e-001	Real
AO15	9.660013e-001	Real
AO16	9.660013e-001	Real
AO17	9.660013e-001	Real
AO18	9.660013e-001	Real
AO19	9.660013e-001	Real
AO20	9.660013e-001	Real
AO21	9.660013e-001	Real
AO22	9.660013e-001	Real
AO23	9.660013e-001	Real
AO24	9.660013e-001	Real
AO25	9.660013e-001	Real
AO26	9.660013e-001	Real
AO27	9.660013e-001	Real
AO28	9.660013e-001	Real
AO29	9.660013e-001	Real
AO30	9.660013e-001	Real
AO31	9.660013e-001	Real
AO32	9.660013e-001	Real
AO33	9.660013e-001	Real
AO34	9.660013e-001	Real
AO35	9.660013e-001	Real
AO36	9.660013e-001	Real
AO37	9.660013e-001	Real
AO38	9.660013e-001	Real
AO39	9.660013e-001	Real
AO40	9.660013e-001	Real
AO41	9.660013e-001	Real
AO42	9.660013e-001	Real
AO43	9.660013e-001	Real
AO44	9.660013e-001	Real
AO45	9.660013e-001	Real
AO46	9.660013e-001	Real
AO47	9.660013e-001	Real
AO48	9.660013e-001	Real

Εικόνα 34: Εισαγωγή εικονικών μετρήσεων από τα PLCs



Εικόνα 35: Εισαγωγή εικονικών μετρήσεων από τα PLCs στην περίπτωση που έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2

5.4 Συγγραφή προγραμματιστικού κώδικα

5.4.1 Συναρτήσεις για τη διενέργεια υπολογισμών με πίνακες

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, στην πλατφόρμα TIA Portal, τα προγραμματιστικά σενάρια (scripts) γράφονται σε μια ειδική έκδοση της γλώσσας Visual Basic.

Μια γραμμή στο προγραμματιστικό σενάριο που ξεκινάει με το σύμβολο «'» καταγράφεται σαν σχόλιο στο πρόγραμμα.

Κατά την εκτίμηση κατάστασης είναι απαραίτητοι πολύπλοκοι υπολογισμοί με πίνακες μεγάλων διαστάσεων. Για τη διενέργεια αυτών των υπολογισμών δημιουργήθηκαν έξι (6) συναρτήσεις, των οποίων ο κώδικας θα παρατεθεί στις επόμενες σελίδες:

1. Η συνάρτηση `dimensions_calculator`

Η συνάρτηση αυτή βρίσκει τις διαστάσεις ενός πίνακα και τις τοποθετεί σε έναν πίνακα γραμμή 1x2, με το πρώτο στοιχείο να αντιπροσωπεύει τον αριθμό των γραμμών και το δεύτερο, τον αριθμό των στηλών. Η συνάρτηση αυτή ήταν πολύ σημαντική, καθώς για τους υπολογισμούς μεταξύ πινάκων σε αρκετές από τις συναρτήσεις που ακολουθούν ήταν απαραίτητο να είναι γνωστός ο ακριβής αριθμός γραμμών και στηλών κάθε πίνακα. Ο αντίστοιχος προγραμματιστικός κώδικας είναι ο ακόλουθος:

```
Function dimensions_calculator(ByRef arraydemo)
    Dim L(0,1)
    L(0,0)=UBound(arraydemo,1)
    L(0,1)=UBound(arraydemo,2)
    dimensions_calculator=L
End Function
```

2. Η συνάρτηση `add_arrays`

Η συνάρτηση `add_arrays` λαμβάνει ως παραμέτρους δύο πίνακες και επιστρέφει τον πίνακα του αθροίσματος τους:

```
Function add_arrays(ByRef array_1, ByRef array_2)
    Dim i,j,R1,C1,R2,C2,T,array_1_dimensions,array_2_dimensions
    array_1_dimensions=dimensions_calculator(array_1)
    array_2_dimensions=dimensions_calculator(array_2)
    R1=array_1_dimensions(0,0)
```

```

C1=array_1_dimensions(0,1)
R2=array_2_dimensions(0,0)
C2=array_2_dimensions(0,1)

ReDim T(R1,C1)
For i = 0 To R1
    For j = 0 To C1
        T(i,j)= array_1(i,j)+array_2(i,j)
    Next
Next

add_arrays=T

End Function

```

3. Η συνάρτηση subtract_arrays

Η συνάρτηση subtract_arrays λαμβάνει ως παραμέτρους δύο πίνακες και επιστρέφει τον πίνακα της διαφοράς του πρώτου από τον δεύτερο πίνακα:

```

Function subtract_arrays(ByRef array_1, ByRef array_2)

Dim i,j,R1,C1,R2,C2,T,array_1_dimensions,array_2_dimensions

array_1_dimensions=dimensions_calculator(array_1)
array_2_dimensions=dimensions_calculator(array_2)

R1=array_1_dimensions(0,0)
C1=array_1_dimensions(0,1)
R2=array_2_dimensions(0,0)
C2=array_2_dimensions(0,1)

ReDim T(R1,C1)
For i = 0 To R1
    For j = 0 To C1
        T(i,j)= array_1(i,j)-array_2(i,j)
    Next
Next

subtract_arrays=T

End Function

```

4. Η συνάρτηση multiply_arrays

Η συνάρτηση multiply_arrays λαμβάνει ως παραμέτρους δύο πίνακες και επιστρέφει τον πίνακα του γινομένου τους:

```

Function multiply_arrays(ByRef array_1, ByRef array_2)

```

```

Dim i,j,k

Dim array_1_dimensions,array_2_dimensions,result_array,mul_add

array_1_dimensions=dimensions_calculator(array_1)
array_2_dimensions=dimensions_calculator(array_2)

ReDim result_array(array_1_dimensions(0,0),array_2_dimensions(0,1))

For i=0 To array_1_dimensions(0,0)
    For j=0 To array_2_dimensions(0,1)
        For k=0 To array_1_dimensions(0,1)
            mul_add=mul_add+array_1(i,k)*array_2(k,j)
        Next
        result_array(i,j)=mul_add
        mul_add=0
    Next
Next

multiply_arrays=result_array

End Function

```

5. Η συνάρτηση transpose_array

Η συνάρτηση transpose_array λαμβάνει ως παράμετρο έναν πίνακα και επιστρέφει τον ανάστροφο του πίνακα αυτού:

```

Function transpose_array(ByRef array_1)
Dim i,j,R,C,T,array_1_dimensions
array_1_dimensions=dimensions_calculator(array_1)

R=array_1_dimensions(0,0)
C=array_1_dimensions(0,1)

ReDim T(C,R)

For i = 0 To R
    For j = 0 To C
        T(j,i)= array_1(i,j)
    Next
Next

transpose_array=T

End Function

```

6. Η συνάρτηση `inverse_array`

Η συνάρτηση `inverse_array` δέχεται ως παράμετρο έναν τετραγωνικό αντιστρέψιμο πίνακα και επιστρέφει τον αντίστροφο πίνακα. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την αντιστροφή στηρίζεται στη μέθοδο απαλοιφής Gauss:

```
Function inverse_array(ByRef array_1)

'Εύρεση αριθμού γραμμών και στηλών
Dim R,C,array_1_dimensions,dimension

array_1_dimensions=dimensions_calculator(array_1)

R=array_1_dimensions(0,0)
C=array_1_dimensions(0,1)
dimension=R+1

'Χρησιμοποιείται η μέθοδος απαλοιφής Gauss για την αντιστροφή του πίνακα A

'Μεθοδολογία: Ο πίνακας A τοποθετείται στα αριστερά και στα δεξιά δημιουργείται ένας
μοναδιαίος πίνακας ως ακολούθως:
'[ a11 a12 a13 | 1 0 0 ]
'[ a21 a22 a23 | 0 1 0 ]
'[ a31 a32 a33 | 0 0 1 ]

'Εν συνεχεία με γραμμικούς υπολογισμούς επιχειρούμε να εμφανίσουμε τον μοναδιαίο
πίνακα στα αριστερά:

'Όταν αυτό ολοκληρωθεί, στα δεξιά του πίνακα θα βρίσκεται ο αντίστροφος πίνακας
'[ 1 0 0 | b11 b12 b13 ]
'[ 0 1 0 | b21 b22 b23 ]
'[ 0 0 1 | b31 b32 b33 ]

Dim N,m,k,line_1,temporary_1,elem1, multiplier_1,O_M(),Inverse_Matrix()
ReDim O_M(R,C+dimension)

'Τοποθέτηση των τιμών του πίνακα A στα αριστερά:

For N = 0 To R
    For m = 0 To C
        O_M(N, m) = array_1(N, m)
    Next
Next

'Τοποθέτηση των στοιχείων του μοναδιαίου πίνακα στα δεξιά:

For N = 0 To R
    For m = 0 To C
        If N = m Then
            O_M(m, N + dimension) = 1
        Else
            O_M(m, N + dimension) = 0
        End If
    Next
Next
```



```

    End If
  Next
Next

'Επιχειρούμε εν συνεχεία να εμφανίσουμε τον μοναδιαίο πίνακα στα αριστερά:

For k = 0 To R

'Τοποθέτηση ενός μη μηδενικού στοιχείου στην αρχή αλλάζοντας γραμμές αν χρειαστεί:

    If O_M(k, k) = 0 Then
        For N = k To R
            If O_M(N, k) <> 0 Then line_1 = N: Exit For
'Εύρεση γραμμής με μη μηδενικό το πρώτο στοιχείο
        Next

'Αλλαγή της γραμμής k με τη γραμμή 1:
        For m = k To ((2*dimension)-1)
            temporary_1 = O_M(k, m)
            O_M(k, m) = O_M(line_1, m)
            O_M(line_1, m) = temporary_1
        Next

    End If

    elem1 = O_M(k, k)
    For N = k To ((2*dimension)-1)
        O_M(k, N) = O_M(k, N) / elem1
    Next

'Για τις υπόλοιπες γραμμές δημιουργία μηδενικού στοιχείου με τον εξής μετασχηματισμό:
'Ai1=Aij-A11*(Aij/A11)
'το ίδιο πραγματοποιείται για όλες τις υπόλοιπες γραμμές και τα υπόλοιπα στοιχεία:

    For N = 0 To R
        If N = k And N = R Then Exit For 'Ολοκλήρωση
        If N = k And N < R Then N = N + 1 'Δεν αλλάζει ένα στοιχείο που είναι ήδη 1
            If O_M(N, k) <> 0 Then 'αν είναι μηδέν, παραμένει ως έχει
                multiplier_1 = O_M(N, k) / O_M(k, k)
                For m = k To ((2*dimension)-1)
                    O_M(N, m) = O_M(N, m) - O_M(k, m) * multiplier_1
                Next
            End If
        Next
    Next

'εκχώρηση στοιχείων του αντιστρόφου πίνακα:
ReDim Inverse_Matrix(R,C)

For N = 0 To R
    For k = 0 To C
        Inverse_Matrix(N, k) = O_M(N, dimension + k)
    Next
Next
inverse_array=Inverse_Matrix
End Function

```

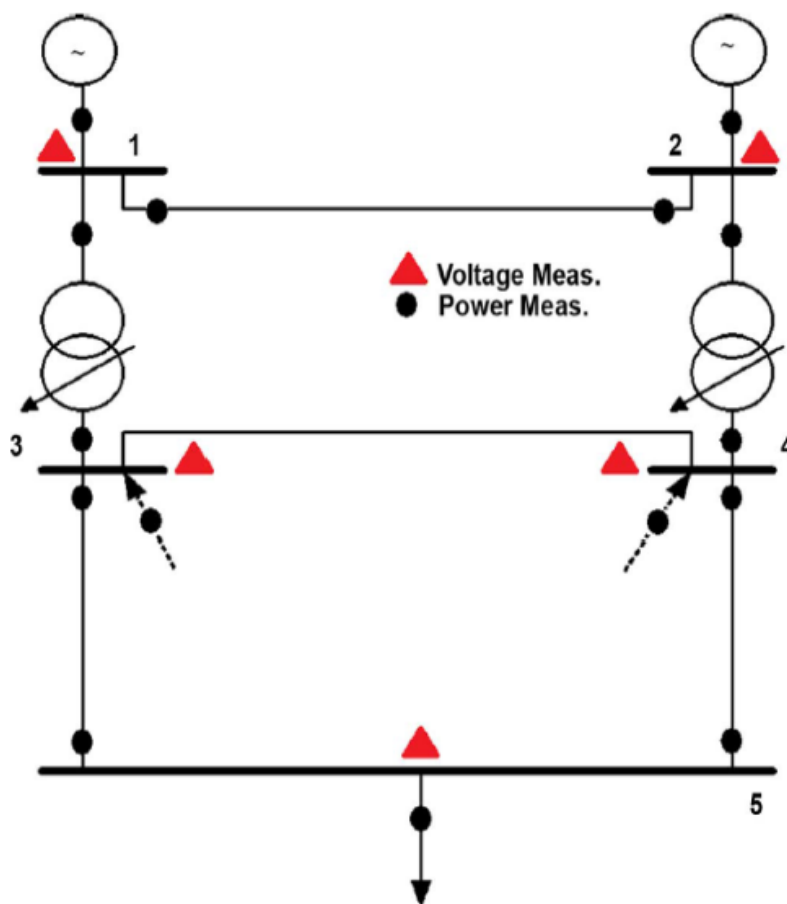
Σημειώνεται ότι η αρίθμηση όλων των εμπλεκόμενων μεγεθών ξεκινάει από το μηδέν (0) και όχι από το ένα (1).

5.4.2 Εισαγωγή των παραμέτρων του μελετώμενου δικτύου

Το ηλεκτρικό δίκτυο, γύρω από τη μελέτη του οποίου περιστράφηκε η παρούσα διπλωματική, αποτελούνταν από πέντε ζυγούς:

- Τον ζυγό 1, ο οποίος θεωρείται ζυγός αναφοράς (slack bus), του οποίου η φασική γωνία της τάσης θεωρείται σταθερή και ίση με 0 και η ανά μονάδα τιμή του μέτρου της τάσης, θεωρείται σταθερή και ίση με 1,05.
- Τον ζυγό παραγωγής 2 (PV bus), όπου η ανά μονάδα τιμή του μέτρου της εγχύσεως της ενεργού ισχύος θεωρείται σταθερή και ίση με 1,433 και η ανά μονάδα τιμή του μέτρου της τάσης θεωρείται σταθερή και ίση με 1.
- Τους ζυγούς φορτίου (PQ buses) 3,4 και 5, όπου θεωρούνται σταθερές οι εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος. Οι ανά μονάδες τιμές των μέτρων των εγχύσεων ενεργού ισχύος ισούνται με 0, 0 και 2,402 στους ζυγούς 3, 4 και 5 αντίστοιχα. Ομοίως οι ανά μονάδα τιμές των μέτρων των εγχύσεων αέργου ισχύος θεωρούνται ίσες με 0, 0 και 0,596 (επαγωγικό) αντίστοιχα.

Η τοπολογία του παραπάνω δικτύου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Εικόνα 36: Τοπολογία του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών

Τα χαρακτηριστικά των γραμμών και των μετασχηματιστών ρύθμισης φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Είδος στοιχείου	Από ζυγό	Προς ζυγό	Αντίσταση R (α.μ)	Αντίδραση Χ(α.μ)	Εγκάρσια αγωγιμότητα (B/2) (α.μ)	Ρύθμιση Taps (t)
Γραμμή	1	2	0,01	0,05	0,625	-
Μετασχηματιστής	1	3	0	0,25	0	0,85
Μετασχηματιστής	2	4	0	0,25	0	0,95
Γραμμή	3	4	0,0241	0,108	0,0142	-
Γραμμή	3	5	0,0001	0,0006	0,0625	-
Γραμμή	4	5	0,0415	0,142	0,0183	-

Εικόνα 37: Πίνακας με τα χαρακτηριστικά του δικτύου

Το μελετώμενο δίκτυο δέχεται ως είσοδο εικοσιμία (21) μετρήσεις:

- 6 μετρήσεις ρών ενεργού ισχύος
- 6 μετρήσεις ρών αέργου ισχύος
- 3 μετρήσεις εγχύσεων ενεργού ισχύος
- 3 μετρήσεις εγχύσεων αέργου ισχύος
- 3 μετρήσεις μέτρου τάσεων

Ακολουθεί ο αντίστοιχος κώδικας, όπου δηλώνονται τα χαρακτηριστικά του παραπάνω δικτύου.

```
'Εισάγουμε τους πίνακες g και b οι οποίοι ουσιαστικά αποτελούν το πραγματικό
'και φανταστικό μέρος αντίστοιχα του πίνακα αγωγιμοτήτων και θα μας φανούν χρήσιμοι
'στους μετέπειτα υπολογισμούς
```

```
Dim g(4,4),b(4,4),pi
```

```
Dim b_transformer_13,b_transformer_24,t_13,t_24
```

```
Dim bs_13,bs_31,bs_24,bs_42
```

```
pi=3.14159
```

```
'Αγωγιμότητα μετασχηματιστή που βρίσκεται στον κλάδο 1-3
```

```
b_transformer_13=-4
```

```
'Αγωγιμότητα του μετασχηματιστή που βρίσκεται στον κλάδο 2-4
```

```
b_transformer_24=-4
```

```
'Η ρύθμιση των taps στον μετασχηματιστή που βρίσκεται στον κλάδο 1-3
```

```
t_13=0.85
```

```
'Η ρύθμιση των taps στον μετασχηματιστή που βρίσκεται στον κλάδο 2-4
```

```
t_24=0.95
```

```
bs_13=2*t_13*(t_13-1)*(1/(1+t_13^2))*b_transformer_13
```

```
bs_31=2*(1-t_13)*(1/(1+t_13^2))*b_transformer_13
```

```
'=b13
```

```
b(0,2)=2*t_13/(1+t_13^2)*b_transformer_13
```

```
'=b31
```

```
b(2,0)=b(0,2)
```

```

bs_24=2*t_24*(t_24-1)*(1/(1+t_24^2))*b_transformer_24
bs_42=2*(1-t_24)*(1/(1+t_24^2))*b_transformer_24
'b24
b(1,3)=2*t_24/(1+t_24^2)*b_transformer_24
'b42
b(3,1)=b(1,3)

Dim bs_12,bs_34,bs_35,bs_45
bs_12=0.625
bs_34=0.0142
bs_35=0.0625
bs_45=0.0183
'=g12
g(0,1)=3.84615
'=g13
g(0,2)=0
'=g14
g(0,3)=0
'=g15
g(0,4)=0
'=g11
g(0,0)=g(0,1)
'=g21
g(1,0)=g(0,1)
'=g23
g(1,2)=0
'=g24
g(1,3)=0
'=g25
g(1,4)=0
'=g21+g24
g(1,1)=g(1,0)
'=g31
g(2,0)=0
'=g32
g(2,1)=0
'=g34
g(2,3)=1.96818
'=g35
g(2,4)=270.27027
'=g31+g34
g(2,2)=g(2,3)+g(2,4)
'=g41
g(3,0)=g(0,3)
'=g42
g(3,1)=g(1,3)
'=g43
g(3,2)=1.96818
'=g45
g(3,4)=1.89617
=g42+g43+g45
g(3,3)=g(3,1)+g(3,2)+g(3,4)
'=g51
g(4,0)=g(0,4)
'=g52
g(4,1)=g(1,4)

```

```

'=g53
g(4,2)=g(2,4)
'=g54
g(4,3)=g(3,4)
'=g55
g(4,4)=g(4,2)+g(4,3)
=b12
b(0,1)=-19.23077
'=b14
b(0,3)=0
'=b15
b(0,4)=0
'=b12+bs12+b13+bs13
b(0,0)=b(0,1)+bs_12+b(0,2)+bs_13
'=b21
b(1,0)=b(0,1)
'=b23
b(1,2)=0
'=b25
b(1,4)=0
'=b21+bs21+b24+bs24
b(1,1)=b(1,0)+bs_12+b(1,3)+bs_24
'=b31
b(2,0)=b(0,2)
'=b32
b(2,1)=b(1,2)
'=b34
b(2,3)=-8.82006
'=b35
b(2,4)=-1621.62
'=b31+bs31+b34+bs34+bs35+b35
b(2,2)=b(2,0)+bs_31+b(2,3)+bs_34+bs_35+b(2,4)
'=b41
b(3,0)=b(0,3)
'=b42
b(3,1)=b(1,3)
'=b43
b(3,2)=b(2,3)
'=b45
b(3,4)=-6.48809
'=b42+bs42+b43+bs43+b45+bs45
b(3,3)=b(3,1)+bs_42+b(3,2)+bs_45+bs_34+b(3,4)
'=b51
b(4,0)=b(0,4)
=b52
b(4,1)=b(1,4)
'=b53
b(4,2)=b(2,4)
'=b54
b(4,3)=b(3,4)
'=b53+bs53+b54+bs54
b(4,4)=b(4,2)+bs_35+b(4,3)+bs_45

```

5.4.3 Εισαγωγή του διανύσματος των μετρήσεων

Το διάνυσμα των μετρήσεων περιέχει τις μετρήσεις που δίνουν τα PLCs (πραγματικά PLCs ή εικονικά PLCs στην περίπτωση εκτέλεσης προσομοίωσης):

```
Dim z_final(20,0)

z_final(0,0)=P12_pu
z_final(1,0)=P13_pu
z_final(2,0)=P24_pu
z_final(3,0)=P34_pu
z_final(4,0)=P35_pu
z_final(5,0)=P45_pu
z_final(6,0)=P2_pu
z_final(7,0)=P3_pu
z_final(8,0)=P4_pu
z_final(9,0)=Q12_pu
z_final(10,0)=Q13_pu
z_final(11,0)=Q24_pu
z_final(12,0)=Q34_pu
z_final(13,0)=Q35_pu
z_final(14,0)=Q45_pu
z_final(15,0)=Q2_pu
z_final(16,0)=Q3_pu
z_final(17,0)=Q4_pu
z_final(18,0)=V2_pu
z_final(19,0)=V3_pu
z_final(20,0)=V4_pu
```

5.4.4 Εισαγωγή της μήτρας διασποράς R

Για την εισαγωγή της μήτρας διασποράς R, η οποία αποτελεί έναν διαγώνιο πίνακα που περιλαμβάνει τις διασπορές των μετρήσεων, αρχικά δημιουργείται ένας πίνακας διαστάσεων 21x21 με μηδενικά στοιχεία και στη συνέχεια δηλώνονται ένα προς ένα τα διαγώνια στοιχεία του.

Οι τιμές των διασπορών τοποθετήθηκαν με βάση τα χαρακτηριστικά των μετρητικών οργάνων που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διενεργηθείσας εργαστηριακής υλοποίησης.

Ακολουθεί ο αντίστοιχος προγραμματιστικός κώδικας.

```
R(0,0)=4.584*10^(-6)
R(1,1)=7.79*10^(-5)
R(2,2)=5.373*10^(-5)
R(3,3)=1.69*10^(-5)
R(4,4)=1.692*10^(-4)
R(5,5)=9.922*10^(-6)
R(6,6)=1*10^(-4)
```

```

R(7,7)=1*10^(-4)
R(8,8)=1*10^(-4)
R(9,9)=8.304*10^(-6)
R(10,10)=1*10^(-4)
R(11,11)=7.878*10^(-7)
R(12,12)=5.083*10^(-7)
R(13,13)=1.292*10^(-5)
R(14,14)=4.791*10^(-7)
R(15,15)=1.0698172*10^(-4)
R(16,16)=1.646*10^(-7)
R(17,17)=10^(-4)
R(18,18)=4.444*10^(-5)
R(19,19)=4.031*10^(-5)
R(20,20)=4.071*10^(-5)

```

5.4.5 Εισαγωγή του πίνακα με τις συναρτήσεις μετρήσεων h σε υβριδική μορφή

Ο πίνακας h αποτελείται από εικοσιένα (21) στοιχεία, όσες και οι διαθέσιμες μετρήσεις, και περιλαμβάνει τις θεωρητικές εξισώσεις υπολογισμού των μεγεθών που αφορούν οι μετρήσεις. Ακολουθεί ο αντίστοιχος προγραμματιστικός κώδικας.

```

'hP12:
h(0,0)=x(4,0)^2*g(0,1)-x(4,0)*x(5,0)*(g(0,1)*Cos(0-x(0,0))+b(0,1)*Sin(0-x(0,0)))
'hP13:
h(1,0)=x(4,0)^2*g(0,2)-x(4,0)*x(6,0)*(g(0,2)*Cos(0-x(1,0))+b(0,2)*Sin(0-x(1,0)))
'hP24:
h(2,0)=x(5,0)^2*g(1,3)-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))
'hP34:
h(3,0)=x(6,0)^2*g(2,3)-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))
'hP35:
h(4,0)=x(6,0)^2*g(2,4)-x(6,0)*x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))
'hP45:
h(5,0)=x(7,0)^2*g(3,4)-x(7,0)*x(8,0)*(g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))
'hP2:
h(6,0)=x(5,0)^2*g(1,1)-
x(5,0)*x(4,0)*(g(1,0)*Cos(x(0,0))+b(1,0)*Sin(x(0,0)))+x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-
x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))
'hP3:
h(7,0)=x(6,0)^2*g(2,2)-
x(6,0)*x(4,0)*(g(2,0)*Cos(x(1,0))+b(2,0)*Sin(x(1,0)))+x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-
x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))+x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))
'hP4:
h(8,0)=x(7,0)^2*g(3,3)-x(7,0)*x(5,0)*(g(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0))+b(3,1)*Sin(x(2,0)-
x(0,0)))+x(6,0)*(g(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0))+b(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0)))+x(8,0)*(g(3,4)*Cos(x(2,0)-
x(3,0))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))
'hQ12:
h(9,0)=-x(4,0)^2*(b(0,1)+bs_12)-x(4,0)*x(5,0)*(g(0,1)*Sin(0-x(0,0))-b(0,1)*Cos(0-x(0,0)))
'hQ13:
h(10,0)=-x(4,0)^2*(b(0,2)+bs_13)-x(4,0)*x(6,0)*(g(0,2)*Sin(0-x(1,0))-b(0,2)*Cos(0-x(1,0)))
'hQ24:
h(11,0)=-x(5,0)^2*(b(1,3)+bs_24)-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-
x(2,0)))

```

```

'hQ34:
h(12,0)=-x(6,0)^2*(b(2,3)+bs_34)-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))
'hQ35:
h(13,0)=-x(6,0)^2*(b(2,4)+bs_35)-x(6,0)*x(8,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))
'hQ45:
h(14,0)=-x(7,0)^2*(b(3,4)+bs_45)-x(7,0)*x(8,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))
'hQ2:
h(15,0)=-x(5,0)^2*b(1,1)-x(5,0)*x(4,0)*(g(1,0)*Sin(x(0,0))-b(1,0)*Cos(x(0,0)))+x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))))
'hQ3:
h(16,0)=-x(6,0)^2*b(2,2)-x(6,0)*x(4,0)*(g(2,0)*Sin(x(1,0))-b(2,0)*Cos(x(1,0)))+x(7,0)*(g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))+x(8,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))))
'hQ4:
h(17,0)=-x(7,0)^2*b(3,3)-x(7,0)*x(5,0)*(g(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0)))+x(6,0)*(g(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0)))+x(8,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))))
'hV2:
h(18,0)=x(5,0)
'hV3:
h(19,0)=x(6,0)
'hV4:
h(20,0)=x(7,0)

```

5.4.6 Αρχικοποίηση του διανύσματος μετρήσεων x

Το διάνυσμα κατάστασης x αρχικοποιείται με μηδενικές τιμές στις φάσεις και μοναδιαία τιμή στα μέτρα των τάσεων.

```

'Εισάγουμε το διάνυσμα κατάστασης x, αρχικοποιώντας τις τάσεις στην τιμή 1 και
'τις γωνίες στην τιμή 0.
Dim x(8,0)
x(0,0)=0 '=-δ2
x(1,0)=0 '=-δ3
x(2,0)=0 '=-δ4
x(3,0)=0 '=-δ5
x(4,0)=1 '=V1
x(5,0)=1 '=V2
x(6,0)=1 '=V3
x(7,0)=1 '=V4
x(8,0)=1 '=V5

```


5.4.7 Εισαγωγή της Ιακωβιανής μήτρας $H(x)$ σε υβριδική μορφή

Η Ιακωβιανή μήτρα $H(x)$, στο μελετώμενο σύστημα, αποτελεί έναν πίνακα εικοσιενός (21) γραμμών (όσες και οι μετρήσεις) και εννέα (9) στηλών (όσες και οι μεταβλητές του διανύσματος κατάστασης). Κάθε γραμμή περιλαμβάνει τις παραγώγους μιας εξίσωσης μετρήσεων h ως προς καθεμία από τις μεταβλητές κατάστασης. Παρατίθεται ακολούθως ο υπολογιστικός κώδικας.

```
'dhP12/dδ2:
hc(0,0)=-x(4,0)*x(5,0)*(g(0,1)*Sin(0-x(0,0))-b(0,1)*Cos(0-x(0,0)))
'dhP24/dδ2:
hc(2,0)=-x(5,0)*x(7,0)*(-g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0)))
'dhP2/dδ2:
hc(6,0)=-x(5,0)*(x(4,0)*(-g(1,0)*Sin(x(0,0))+b(1,0)*Cos(x(0,0)))+x(7,0)*(-g(1,3)*Sin(x(0,0)-
x(2,0))+b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))))
'dhP4/dδ2:
hc(8,0)=-x(7,0)*(x(5,0)*(g(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0))))
'dhQ12/dδ2:
hc(9,0)=-x(4,0)*x(5,0)*(-g(0,1)*Cos(0-x(0,0))-b(0,1)*Sin(0-x(0,0)))
'dhQ24/dδ2:
hc(11,0)=-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))
'dhQ2/dδ2:
hc(15,0)=-x(5,0)*(x(4,0)*(g(1,0)*Cos(x(0,0))+b(1,0)*Sin(x(0,0)))+x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-
x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))))
'dhQ4/dδ2:
hc(17,0)=-x(7,0)*(x(5,0)*(-g(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0))))

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 2ης στήλης hc, δηλαδή την παράγωγο ως προς δ3
του h, όπου αυτή δεν είναι μηδέν

'dhP13/dδ3:
hc(1,1)=-x(4,0)*x(6,0)*(g(0,2)*Sin(0-x(1,0))-b(0,2)*Cos(0-x(1,0)))
'dhP34/dδ3:
hc(3,1)=-x(6,0)*x(7,0)*(-g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))
'dhP35/dδ3:
hc(4,1)=-x(6,0)*x(8,0)*(-g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))
'dhP3/dδ3:
hc(7,1)=-x(6,0)*(x(4,0)*(g(2,0)*Sin(x(1,0))-b(2,0)*Cos(x(1,0)))+x(7,0)*(g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))-
b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))+x(8,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))))
'dhP4/dδ3:
hc(8,1)=-x(7,0)*x(6,0)*(g(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0)))
'dhQ13/dδ3:
hc(10,1)=-x(4,0)*x(6,0)*(-g(0,2)*Cos(0-x(1,0))-b(0,2)*Sin(0-x(1,0)))
'dhQ34/dδ3:
hc(12,1)=-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))
'dhQ35/dδ3:
hc(13,1)=-x(6,0)*x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))
'dhQ3/dδ3:
hc(16,1)=-x(6,0)*(x(4,0)*(g(2,0)*Cos(x(1,0))+b(2,0)*Sin(x(1,0)))+x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-
x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))+x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))))
'dhQ4/dδ3:
hc(17,1)=-x(7,0)*(x(6,0)*(-g(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0))))
```

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 3ης στήλης, hc δηλαδή την παράγωγο ως προς $\delta 4$ του h , όπου αυτή δεν είναι μηδέν

'dhP24/d $\delta 4$:

$$hc(2,2)=-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0)))$$

'dhP34/d $\delta 4$:

$$hc(3,2)=-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))$$

'dhP45/d $\delta 4$:

$$hc(5,2)=-x(7,0)*x(8,0)*(-g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))$$

'dhP2/d $\delta 4$:

$$hc(6,2)=-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0)))$$

'dhP3/d $\delta 4$:

$$hc(7,2)=-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0)))$$

'dhP4/d $\delta 4$:

$$hc(8,2)=-x(7,0)*x(6,0)*(g(3,2)*(-Sin(x(2,0)-x(1,0)))+b(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0)))+x(8,0)*(g(3,4)*(-Sin(x(2,0)-x(3,0)))+b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))+x(5,0)*(g(3,1)*(-Sin(x(2,0)-x(0,0)))+b(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0)))$$

'dhQ24/d $\delta 4$:

$$hc(11,2)=-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*(-Cos(x(0,0)-x(2,0)))-b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))$$

'dhQ34/d $\delta 4$:

$$hc(12,2)=-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*(-Cos(x(1,0)-x(2,0)))-b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))$$

'dhQ45/d $\delta 4$:

$$hc(14,2)=-x(7,0)*x(8,0)*(g(3,4)*(Cos(x(2,0)-x(3,0)))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))$$

'dhQ2/d $\delta 4$:

$$hc(15,2)=-x(5,0)*x(7,0)*(g(1,3)*(-Cos(x(0,0)-x(2,0)))-b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))$$

'dhQ3/d $\delta 4$:

$$hc(16,2)=-x(6,0)*x(7,0)*(g(2,3)*(-Cos(x(1,0)-x(2,0)))-b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))$$

'dhQ4/d $\delta 4$:

$$hc(17,2)=-x(7,0)*x(5,0)*(g(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0))+b(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0)))+x(6,0)*(g(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0))+b(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0)))+x(8,0)*(g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))$$

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 4ης στήλης hc , δηλαδή την παράγωγο ως προς $\delta 5$ του h , όπου αυτή δεν είναι μηδέν

'dhP35/d $\delta 5$:

$$hc(4,3)=-x(6,0)*x(8,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))$$

'dhP45/d $\delta 5$:

$$hc(5,3)=-x(7,0)*x(8,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))$$

'dhP3/d $\delta 5$:

$$hc(7,3)=-x(6,0)*x(8,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))$$

'dhP4/d $\delta 5$:

$$hc(8,3)=-x(7,0)*x(8,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))$$

'dhQ35/d $\delta 5$:

$$hc(13,3)=-x(6,0)*x(8,0)*(-g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))$$

'dhQ45/d $\delta 5$:

$$hc(14,3)=-x(7,0)*x(8,0)*(-g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))$$

'dhQ3/d $\delta 5$:

$$hc(16,3)=-x(6,0)*x(8,0)*(-g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))$$

'dhQ4/d $\delta 5$:

$$hc(17,3)=-x(7,0)*x(8,0)*(-g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))$$

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 5ης στήλης hc , δηλαδή την παράγωγο ως προς $V1$ του h , όπου αυτή δεν είναι μηδέν

```
'dhP12/dV1:
hc(0,4)=2*x(4,0)*g(0,1)-x(5,0)*(g(0,1)*Cos(0-x(0,0))+b(0,1)*Sin(0-x(0,0)))
'dhP13/dV1:
hc(1,4)=2*x(4,0)*g(0,2)-x(6,0)*(g(0,2)*Cos(0-x(1,0))+b(0,2)*Sin(0-x(1,0)))
'dhP2/dV1:
hc(6,4)=-x(5,0)*(g(1,0)*Cos(x(0,0))+b(1,0)*Sin(x(0,0)))
'dhP3/dV1:
hc(7,4)=-x(6,0)*(g(2,0)*Cos(x(1,0))+b(2,0)*Sin(x(1,0)))
'dq12/dV1:
hc(9,4)=-2*x(4,0)*(b(0,1)+bs_12)-x(5,0)*(g(0,1)*Sin(0-x(0,0))-b(0,1)*Cos(0-x(0,0)))
'dq13/dV1:
hc(10,4)=-2*x(4,0)*(b(0,2)+bs_13)-x(6,0)*(g(0,2)*Sin(0-x(1,0))-b(0,2)*Cos(0-x(1,0)))
'dhQ2/dV1:
hc(15,4)=-x(5,0)*(g(1,0)*Sin(x(0,0))-b(1,0)*Cos(x(0,0)))
'dhQ3/dV1:
hc(16,4)=-x(6,0)*(g(2,0)*Sin(x(1,0))-b(2,0)*Cos(x(1,0)))
```

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 6ης στήλης hc, δηλαδή την παράγωγο ως προς V2 του h, όπου αυτή δεν είναι μηδέν

```
'dhP12/dV2:
hc(0,5)=-x(4,0)*(g(0,1)*Cos(0-x(0,0))+b(0,1)*Sin(0-x(0,0)))
'dhP24/dV2:
hc(2,5)=2*x(5,0)*g(1,3)-x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0)))
'dhP2/dV2:
hc(6,5)=2*x(5,0)*g(1,1)-
(x(4,0)*(g(1,0)*Cos(x(0,0))+b(1,0)*Sin(x(0,0)))+x(7,0)*(g(1,3)*Cos(x(0,0)-
x(2,0))+b(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))))
'dhP4/dV2:
hc(8,5)=-x(7,0)*(g(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0))+b(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0)))
'dhQ12/dV2:
hc(9,5)=-x(4,0)*(g(0,1)*Sin(0-x(0,0))-b(0,1)*Cos(0-x(0,0)))
'dQ24/dV2:
hc(11,5)=-2*x(5,0)*(b(1,3)+bs_24)-x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0)))
'dhQ2/dV2:
hc(15,5)=-2*x(5,0)*b(1,1)-(x(4,0)*(g(1,0)*Sin(x(0,0))-
b(1,0)*Cos(x(0,0)))+x(7,0)*(g(1,3)*Sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*Cos(x(0,0)-x(2,0))))
'dhQ4/dV2:
hc(17,5)=-x(7,0)*(g(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0)))
'dhV2/dV2:
hc(18,5)=1
```

'Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 7ης στήλης hc, δηλαδή την παράγωγο ως προς V3 του h, όπου αυτή δεν είναι μηδέν

```
'dhP13/dV3:
hc(1,6)=-x(4,0)*(g(0,2)*Cos(0-x(1,0))+b(0,2)*Sin(0-x(1,0)))
'dhP34/dV3:
hc(3,6)=2*x(6,0)*g(2,3)-x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))
'dhP35/dV3:
hc(4,6)=2*x(6,0)*g(2,4)-x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))
'dhP3/dV3:
hc(7,6)=2*x(6,0)*g(2,2)-
(x(4,0)*(g(2,0)*Cos(x(1,0))+b(2,0)*Sin(x(1,0)))+x(7,0)*(g(2,3)*Cos(x(1,0)-
x(2,0))+b(2,3)*Sin(x(1,0)-x(2,0)))+x(8,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))))
'dhP4/dV3:
```

$hc(8,6)=-x(7,0)*(g(3,2)*\cos(x(2,0)-x(1,0))+b(3,2)*\sin(x(2,0)-x(1,0)))$
'dhQ13/dV3:
 $hc(10,6)=-x(4,0)*(g(0,2)*\sin(0-x(1,0))-b(0,2)*\cos(0-x(1,0)))$
'dhQ34/dV3:
 $hc(12,6)=-2*x(6,0)*(b(2,3)+bs_{34})-x(7,0)*(g(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhQ35/dV3:
 $hc(13,6)=-2*x(6,0)*(b(2,4)+bs_{35})-x(8,0)*(g(2,4)*\sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*\cos(x(1,0)-x(3,0)))$
'dhQ3/dV3:
 $hc(16,6)=-2*x(6,0)*b(2,2)-(x(4,0))*(g(2,0)*\sin(x(1,0))-b(2,0)*\cos(x(1,0)))+(x(7,0))*(g(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0)))+(x(8,0))*(g(2,4)*\sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*\cos(x(1,0)-x(3,0)))$
'dhQ4/dV3:
 $hc(17,6)=-x(7,0)*(g(3,2)*\sin(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*\cos(x(2,0)-x(1,0)))$
'dhV3/dV3:
 $hc(19,6)=1$

Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 8ης στήλης hc, δηλαδή την παράγωγο ως προς V4 του h, όπου αυτή δεν είναι μηδέν

'dhP24/dV4:
 $hc(2,7)=-x(5,0)*(g(1,3)*\cos(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*\sin(x(0,0)-x(2,0)))$
'dhP34/dV4:
 $hc(3,7)=-x(6,0)*(g(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhP45/dV4:
 $hc(5,7)=2*x(7,0)*g(3,4)-x(8,0)*(g(3,4)*\cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*\sin(x(2,0)-x(3,0)))$
'dhP2/dV4:
 $hc(6,7)=-x(5,0)*(g(1,3)*\cos(x(0,0)-x(2,0))+b(1,3)*\sin(x(0,0)-x(2,0)))$
'dhP3/dV4:
 $hc(7,7)=-x(6,0)*(g(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0))+b(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhP4/dV4:
 $hc(8,7)=2*x(7,0)*g(3,3)-(x(6,0))*(g(3,2)*\cos(x(2,0)-x(1,0))+b(3,2)*\sin(x(2,0)-x(1,0)))+(x(8,0))*(g(3,4)*\cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*\sin(x(2,0)-x(3,0)))+(x(5,0))*(g(3,1)*\cos(x(2,0)-x(0,0))+b(3,1)*\sin(x(2,0)-x(0,0)))$
'dhQ24/dV4:
 $hc(11,7)=-x(5,0)*(g(1,3)*\sin(x(0,0)-x(2,0))-b(1,3)*\cos(x(0,0)-x(2,0)))$
'dhQ34/dV4:
 $hc(12,7)=-x(6,0)*(g(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhQ45/dV4:
 $hc(14,7)=-2*x(7,0)*(b(3,4)+bs_{45})-x(8,0)*(g(3,4)*\sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*\cos(x(2,0)-x(3,0)))$
'dhQ2/dV4:
 $hc(15,7)=-x(5,0)*(g(1,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0))-b(1,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhQ3/dV4:
 $hc(16,7)=-x(6,0)*(g(2,3)*\sin(x(1,0)-x(2,0))-b(2,3)*\cos(x(1,0)-x(2,0)))$
'dhQ4/dV4:
 $hc(17,7)=-2*x(7,0)*b(3,3)-(x(5,0))*(g(3,1)*\sin(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*\cos(x(2,0)-x(0,0)))+(x(6,0))*(g(3,2)*\sin(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*\cos(x(2,0)-x(1,0)))+(x(8,0))*(g(3,4)*\sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*\cos(x(2,0)-x(3,0)))$
'dhV4/dV4:
 $hc(20,7)=1$

Εισάγουμε τα μη μηδενικά στοιχεία της 9ης στήλης hc, δηλαδή την παράγωγο ως προς V5 του h, όπου αυτή δεν είναι μηδέν

'dhP35/dV5:
 $hc(4,8)=-x(8,0)*(g(2,4)*\cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*\sin(x(1,0)-x(3,0)))$
'dhP45/dV5:

```

hc(5,8)=-x(7,0)*(g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))
'dhP3/dV5:
hc(7,8)=-x(6,0)*(g(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0))+b(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0)))
'dhP4/dV5:
hc(8,8)=-x(7,0)*(g(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0))+b(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0)))
'dhQ35/dV5:
hc(13,8)=-x(6,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))
'dhQ45/dV5:
hc(14,8)=-x(7,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))
'dhQ3/dV5:
hc(16,8)=-x(6,0)*(g(2,4)*Sin(x(1,0)-x(3,0))-b(2,4)*Cos(x(1,0)-x(3,0)))
'dhQ4/dV5:
hc(17,8)=-x(7,0)*(g(3,4)*Sin(x(2,0)-x(3,0))-b(3,4)*Cos(x(2,0)-x(3,0)))

```

5.4.8 Εκτίμηση κατάστασης

Για την εκτίμηση κατάστασης του μελετώμενου συστήματος, ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο 3^ο κεφάλαιο ως εξής:

```

Dim t1,t2,t3,t4,t5,t6,t7,t8,t9,x1,flag
t1=subtract_arrays(z_final,h) 'z_final-h
t2=inverse_array(R) 'R^-1
t3=multiply_arrays(t2,t1) '(R^-1)*(z_final-h)
t4=transpose_array(hc) 'H^T
t5=multiply_arrays(t4,t3) 'H^T*(R^-1)*(z_final-h)

t6=multiply_arrays(t4,t2) 'H^T*R^-1
t7=multiply_arrays(t6,hc) 'H^T*R^-1*H
t8=inverse_array(t7) '(H^T*R^-1*H)^-1
t9=multiply_arrays(t8,t5) '(H^T*R^-1*H)^-1*(H^T*(R^-1)*(z_final-h))

x1=add_arrays(x,t9) 'x1=x0+(H^T*R^-1*H)^-1*(H^T*(R^-1)*(z_final-h))

flag=0

For i = 0 To 8
    If Abs(x1(i,0)-x(i,0))>0.001 Then
        flag=1
    End If
Next

For i=0 To 8
    x(i,0)=x1(i,0)
Next
Loop Until flag=0

```

Η μεταβλητή flag είναι μια δυαδική μεταβλητή (boolean), η οποία λειτουργεί σαν «σημαία» που καταδεικνύει εάν έχει επιτευχθεί σύγκλιση κατά την εκτέλεση της εκτίμησης κατάστασης. Ως όριο ανοχής για τη διαφορά τιμής ενός μεγέθους από τη μία επανάληψη στην επόμενη έχει τεθεί για την παρούσα υλοποίηση η τιμή 0,001.

5.4.9 Υπολογισμός των μελετώμενων μεγεθών με βάση τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης

Αφού ολοκληρωθεί η επαναληπτική διαδικασία της εκτίμησης κατάστασης, υπολογίζονται εν συνεχεία όλα τα μελετώμενα μεγέθη του συστήματος και πιο συγκεκριμένα:

- Οι τάσεις όλων των ζυγών (μέτρο και φάση)
- Οι μελετώμενες ροές ενεργού και αέργου ισχύος
- Οι εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος σε όλους τους ζυγούς

Ως τιμή της βασικής τάσης στο σύστημα θεωρούνται τα **15kV** στους ζυγούς οι οποίοι περιέχουν τις γεννήτριες του συστήματος και τα **150 kV** σε όλους τους υπόλοιπους ζυγούς.

Επίσης, η βασική τιμή της ισχύος στο μελετώμενο σύστημα είναι τα **100MVA**. Ακολουθεί ο αντίστοιχος προγραμματιστικός κώδικας.

Τιμές των ροών ενεργού ισχύος σε MW

$$P12_AC=h(0,0)*100$$

$$P13_AC=h(1,0)*100$$

$$P24_AC=h(2,0)*100$$

$$P34_AC=h(3,0)*100$$

$$P35_AC=h(4,0)*100$$

$$P45_AC=h(5,0)*100$$

$$P21_AC=100*(x(5,0)^2*g(1,0)-x(4,0)*x(5,0)*(g(1,0)*\cos(x(0,0))+b(1,0)*\sin(x(0,0))))$$

$$P31_AC=100*(x(6,0)^2*g(2,0)-x(4,0)*x(6,0)*(g(2,0)*\cos(x(1,0))+b(2,0)*\sin(x(1,0))))$$

$$P42_AC=100*(x(7,0)^2*g(3,1)-x(5,0)*x(7,0)*(g(3,1)*\cos(x(2,0)-x(0,0))+b(3,1)*\sin(x(2,0)-x(0,0))))$$

$$P43_AC=100*(x(7,0)^2*g(3,2)-x(6,0)*x(7,0)*(g(3,2)*\cos(x(2,0)-x(1,0))+b(3,2)*\sin(x(2,0)-x(1,0))))$$

$$P53_AC=100*(x(8,0)^2*g(4,2)-x(6,0)*x(8,0)*(g(4,2)*\cos(x(3,0)-x(1,0))+b(4,2)*\sin(x(3,0)-x(1,0))))$$

$$P54_AC=100*(x(8,0)^2*g(4,3)-x(7,0)*x(8,0)*(g(4,3)*\cos(x(3,0)-x(2,0))+b(4,3)*\sin(x(3,0)-x(2,0))))$$

Τιμές των εγχύσεων ενεργού ισχύος σε MW

$$P1_AC=100*(-x(4,0)^2*g(0,0)-x(4,0)*x(5,0)*(g(0,1)*\cos(0-x(0,0))+b(0,1)*\sin(0-x(0,0)))+x(6,0)*(g(0,2)*\cos(0-x(1,0))+b(0,2)*\sin(0-x(1,0))))$$

$$P2_AC=h(6,0)*100$$

$$P3_AC=h(7,0)*100$$

$$P4_AC=h(8,0)*100$$

$$P5_AC=100*(-x(8,0)^2*g(4,4)-x(8,0)*x(6,0)*(g(4,2)*\cos(x(3,0)-x(1,0))+b(4,2)*\sin(x(3,0)-x(1,0)))+x(7,0)*(g(4,3)*\cos(x(3,0)-x(2,0))+b(4,3)*\sin(x(3,0)-x(2,0))))$$

Τιμές των ροών αέργου ισχύος σε MVar

$$Q12_AC=h(9,0)*100$$

$$Q13_AC=h(10,0)*100$$

$$Q24_AC=h(11,0)*100$$

$$Q34_AC=h(12,0)*100$$

$$Q35_AC=h(13,0)*100$$

$$Q45_AC=h(14,0)*100$$

$$Q21_AC=100*(-(x(5,0)^2)*b(1,0)+bs_12)-x(4,0)*x(5,0)*(g(1,0)*Sin(x(0,0))-b(1,0)*Cos(x(0,0)))$$

$$Q31_AC=100*(-(x(6,0)^2)*b(2,0)+bs_31)-x(4,0)*x(6,0)*(g(2,0)*Sin(x(1,0))-b(2,0)*Cos(x(1,0)))$$

$$Q42_AC=100*(-(x(7,0)^2)*b(3,1)+bs_42)-x(5,0)*x(7,0)*(g(3,1)*Sin(x(2,0)-x(0,0))-b(3,1)*Cos(x(2,0)-x(0,0)))$$

$$Q43_AC=100*(-(x(7,0)^2)*b(3,2)+bs_34)-x(6,0)*x(7,0)*(g(3,2)*Sin(x(2,0)-x(1,0))-b(3,2)*Cos(x(2,0)-x(1,0)))$$

$$Q53_AC=100*(-(x(8,0)^2)*b(4,2)+bs_35)-x(6,0)*x(8,0)*(g(4,2)*Sin(x(3,0)-x(1,0))-b(4,2)*Cos(x(3,0)-x(1,0)))$$

$$Q54_AC=100*(-(x(8,0)^2)*b(4,3)+bs_45)-x(7,0)*x(8,0)*(g(4,3)*Sin(x(3,0)-x(2,0))-b(4,3)*Cos(x(3,0)-x(2,0)))$$

Τιμές των εγχύσεων αέργου ισχύος σε MVA_r

$$Q1_AC=100*(-(x(4,0)^2)*b(0,0)-x(4,0)*x(5,0)*(g(0,1)*Sin(0-x(0,0))-b(0,1)*Cos(0-x(0,0)))+x(6,0)*(g(0,2)*Sin(0-x(1,0))-b(0,2)*Cos(0-x(1,0))))$$

$$Q2_AC=h(15,0)*100$$

$$Q3_AC=h(16,0)*100$$

$$Q4_AC=h(17,0)*100$$

$$Q5_AC=100*(-(x(8,0)^2)*b(4,4)-x(8,0)*x(6,0)*(g(4,2)*Sin(x(3,0)-x(1,0))-b(4,2)*Cos(x(3,0)-x(1,0)))+x(7,0)*(g(4,3)*Sin(x(3,0)-x(2,0))-b(4,3)*Cos(x(3,0)-x(2,0))))$$

Μέτρα των τάσεων ζυγών

$$V1=x(4,0)*15$$

$$V2=x(5,0)*15$$

$$V3=x(6,0)*150$$

$$V4=x(7,0)*150$$

$$V5=x(8,0)*150$$

Γωνίες (σε μοίρες) των τάσεων ζυγών

$$d1=0$$

$$d2=x(0,0)*180/\pi$$

$$d3=x(1,0)*180/\pi$$

$$d4=x(2,0)*180/\pi$$

$$d5=x(3,0)*180/\pi$$

Εκτός από τις τιμές που προκύπτουν από την εκτίμηση κατάστασης, υπολογίζονται και οι τιμές των μετρητών τάσης σε kV, των μετρητών ενεργού ισχύος σε MW και των μετρητών αέργου ισχύος σε MVA_r ως εξής:

$$P12_meter=z_final(0,0)*100$$

$$P13_meter=z_final(1,0)*100$$

$$P24_meter=z_final(2,0)*100$$

$$P34_meter=z_final(3,0)*100$$

$$P35_meter=z_final(4,0)*100$$

```

P45_meter=z_final(5,0)*100
P2_meter=z_final(6,0)*100
P3_meter=z_final(7,0)*100
P4_meter=z_final(8,0)*100
Q12_meter=z_final(9,0)*100
Q13_meter=z_final(10,0)*100
Q24_meter=z_final(11,0)*100
Q34_meter=z_final(12,0)*100
Q35_meter=z_final(13,0)*100
Q45_meter=z_final(14,0)*100
Q2_meter=z_final(15,0)*100
Q3_meter=z_final(16,0)*100
Q4_meter=z_final(17,0)*100
V2_meter=z_final(18,0)*15
V3_meter=z_final(19,0)*150
V4_meter=z_final(20,0)*150

```

5.4.10 Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων με τη χρήση κανονικοποιημένων υπολοίπων

Για τον υπολογισμό των κανονικοποιημένων υπολοίπων, σχηματίζονται:

- Η μήτρα διασποράς των υπολοίπων
- Η μήτρα των υπολοίπων

Ειδικό αναβοσβήνον προειδοποιητικό μήνυμα εμφανίζεται, όταν εντοπιστεί σφάλμα στο συνολικό σύστημα (ανίχνευση σφαλμάτων), όταν δηλαδή έστω και μια από τις μετρήσεις εμφανίσει κανονικοποιημένο υπόλοιπο μεγαλύτερο κατ' απόλυτη τιμή από την τιμή κατωφλίου, που στην παρούσα μελέτη ανέρχεται στο τρία (3). Για την ανίχνευση σφαλμάτων χρησιμοποιείται και η δυαδική μεταβλητή `rlc_flag` η οποία λειτουργεί σαν «σημαία» που καταδεικνύει εάν στο σύστημα έχει ανιχνευθεί σφάλμα ή όχι.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται και εντοπισμός και εμφάνιση, στην οθόνη του HMI, των εσφαλμένων μετρήσεων, των συγκεκριμένων μετρήσεων δηλαδή, που στην περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας, εμφανίζουν μεγαλύτερο κανονικοποιημένο υπόλοιπο από όλες τις υπόλοιπες.

```

Dim t10,t11,t12,t13,t14
t10=multiply_arrays(hc,t8)'H*(H^T*R^-1*H)^-1
t11=multiply_arrays(t10,t6)'H*(H^T*R^-1*H)^-1*H^T*R^-1

Dim ID(20,20)
For i=0 To 20
    For j = 0 To 20
        If i<>j Then
            ID(i,j)=0
        Else
            ID(i,j)=1
        End If
    Next
Next

```



```

Next
t12=subtract_arrays(ID,t11)      'identity(21)-H*(H^T*R^-1*H)^-1*H^T*R^-1
t13=multiply_arrays(t12,R)      'identity(21)-H*(H^T*R^-1*H)^-1*H^T*R^-1*R
t14=subtract_arrays(z_final,h)  'z_final-h

Dim r2(20,0),flag2,max,max_place,measurement_name(20,0)

measurement_name(0,0)="P12"
measurement_name(1,0)="P13"
measurement_name(2,0)="P24"
measurement_name(3,0)="P34"
measurement_name(4,0)="P35"
measurement_name(5,0)="P45"
measurement_name(6,0)="P2"
measurement_name(7,0)="P3"
measurement_name(8,0)="P4"
measurement_name(9,0)="Q12"
measurement_name(10,0)="Q13"
measurement_name(11,0)="Q24"
measurement_name(12,0)="Q34"
measurement_name(13,0)="Q35"
measurement_name(14,0)="Q45"
measurement_name(15,0)="Q2"
measurement_name(16,0)="Q3"
measurement_name(17,0)="Q4"
measurement_name(18,0)="V2"
measurement_name(19,0)="V3"
measurement_name(20,0)="V4"
plc_flag=0
max=0

For i = 0 To 20
    r2(i,0)=t14(i,0)/t13(i,i)^0.5
    If Abs(r2(i,0))>Abs(max) Then
        max=Abs(r2(i,0))
        max_place=i
    End If
Next

If max>3 Then
    plc_flag=1
    wrong_measurement_0=measurement_name(max_place,0)
End If

```

5.4.11 Διενέργεια υπολογισμών στην περίπτωση αφαίρεσης γραμμής

Στην περίπτωση που από το σύστημα αφαιρεθούν μια ή περισσότερες γραμμές, πραγματοποιούνται οι κατάλληλες μεταβολές στον κώδικα, ώστε αυτός να ανταποκρίνεται στα νέα τοπολογικά δεδομένα. Παρατίθεται ακολούθως ο αντίστοιχος κώδικας, ενδεικτικά για την περίπτωση αφαίρεσης της γραμμής 1-2.

```

If line_12_cut=-1 Then
g(0,1)=0
b(0,1)=0
g(1,0)=g(0,1)
b(1,0)=b(0,1)
bs_12=0
b(0,0)=b(0,1)+bs_12+b(0,2)+bs_13
g(0,0)=g(0,1)
b(1,1)=b(1,0)+bs_12+b(1,3)+bs_24
g(1,1)=g(1,0)

R(0,0)=1*10^(-4)
R(1,1)=4.83*10^(-5)
R(2,2)=9.794*10^(-5)
R(3,3)=3.442*10^(-5)
R(4,4)=1.92*10^(-4)
R(5,5)=2.032*10^(-5)
R(6,6)=9.794*10^(-5)
R(7,7)=1.081*10^(-6)
R(8,8)=1*10^(-4)
R(9,9)=1*10^(-4)
R(10,10)=1.863*10^(-7)
R(11,11)=4.618*10^(-6)
R(12,12)=1.946*10^(-6)
R(13,13)=1.381*10^(-5)
R(14,14)=1.04*10^(-6)
R(15,15)=4.618*10^(-6)
R(16,16)=1*10^(-4)
R(17,17)=10^(-4)
R(18,18)=4.444*10^(-5)
R(19,19)=3.946*10^(-5)
R(20,20)=3.972*10^(-5)
End If

```

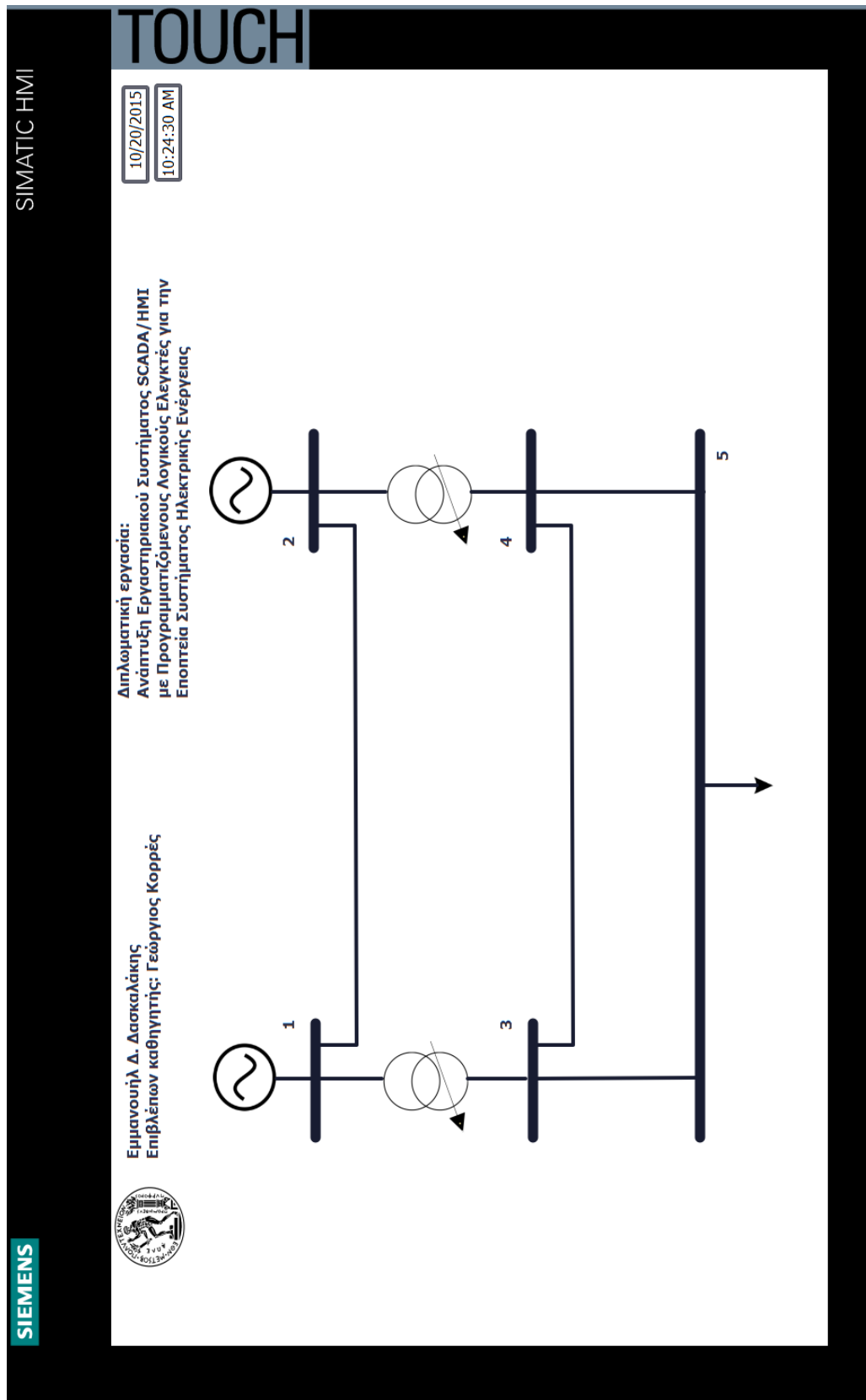
5.5 Δημιουργία της διεπαφής χρήστη HMI

Η διεπαφή χρήστη (HMI), που σχεδιάστηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είχε ως στόχο να είναι εύκολα κατανοητή από τον χειριστή, προσφέροντας παράλληλα προχωρημένες δυνατότητες εποπτείας και ελέγχου του μελετώμενου συστήματος.

Τα στιγμιότυπα οθόνης που ακολουθούν δίνονται σε οριζόντιο προσανατολισμό για μεγαλύτερη ευκρίνεια.

Ακολουθούν τα βήματα σχεδιασμού της διεπαφής χρήστη.

5.5.1 Εισαγωγή τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών



Εικόνα 38: Εισαγωγή τοπολογίας του μελετώμενου δικτύου 5 ζυγών

Οι γραμμές σχεδιάστηκαν μέσω ειδικού εργαλείου που παρέχει το πρόγραμμα, ενώ η αναπαράσταση των γεννητριών, των μετασχηματιστών ρύθμισης και του φορτίου έγινε με την εισαγωγή των κατάλληλων εικόνων.

5.5.2 Εισαγωγή των διακοπτικών στοιχείων

Έγινε εισαγωγή όλων των διακοπτικών στοιχείων του συστήματος. Όταν οι διακόπτες του συστήματος είναι κλειστοί, εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα, ενώ όταν είναι ανοικτοί, με πράσινο.

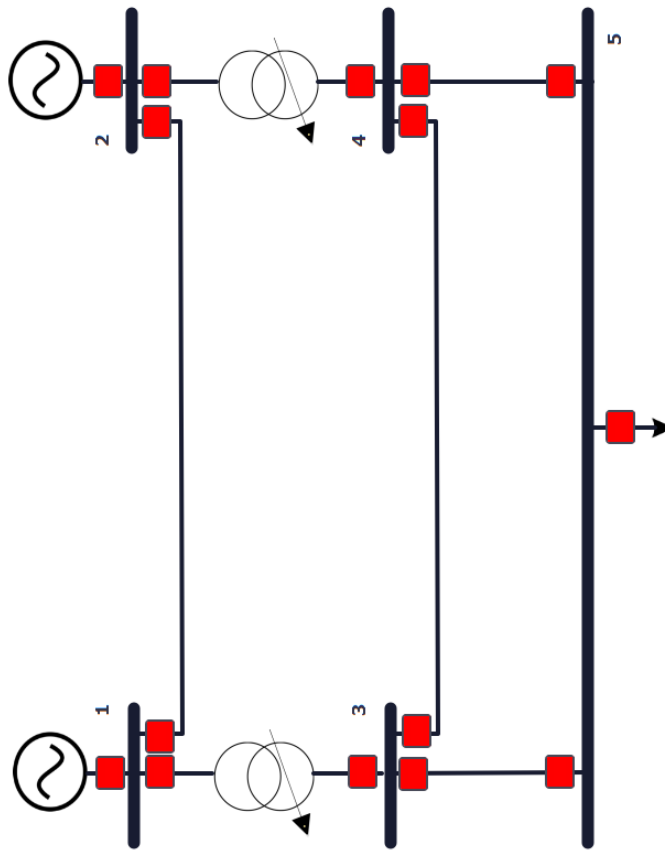
Η αλλαγή του χρώματος είναι δυνατή με τη σύνδεση του κάθε χρώματος με μια δυαδική μεταβλητή που επικοινωνεί με το εκτελούμενο προγραμματιστικό σενάριο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση αφαίρεσης της γεννήτριας 1, μέσω του αντίστοιχου διακόπτη, αρχικά ο διακόπτης είναι κόκκινος, αφού η γραμμή βρίσκεται συνδεδεμένη στο δίκτυο. Αν ο χρήστης πατήσει πάνω στον διακόπτη της γεννήτριας, τότε η μεταβλητή `generator_1_cut` έχει ρυθμιστεί, ώστε να λαμβάνει την τιμή 1 (αρχικά είχε την τιμή 0). Η τιμή 1 της προαναφερθείσας μεταβλητής έχει αντιστοιχιστεί στο πράσινο χρώμα. Αν ο χρήστης πατήσει ξανά πάνω στον ίδιο διακόπτη, η μεταβλητή `generator_1_cut` έχει ρυθμιστεί, ώστε να λάβει ξανά μηδενική τιμή και ο αντίστοιχος διακόπτης να εμφανιστεί ξανά με κόκκινο χρώμα κ.ο.κ.

Ακολουθεί το στιγμιότυπο οθόνης που αφορά την εισαγωγή των διακοπτικών στοιχείων.

10/20/2015
10:32:35 AM

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Εποπτεία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ερμάνουηλ Δ. Δασκαλάκης
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές



Εικόνα 39: Εισαγωγή των διακοπτικών στοιχείων στο δίκτυο

5.5.3 Εισαγωγή δυνατοτήτων αφαίρεσης γραμμών του συστήματος

Η αφαίρεση μιας γραμμής είναι δυνατή, αν ο χρήστης πατήσει έναν από τους δύο διακόπτες που βρίσκονται στα άκρα της. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, το πάτημα του διακόπτη ενεργοποιεί μια δυαδική μεταβλητή η οποία επικοινωνεί με τον προγραμματιστικό κώδικα.

Για παράδειγμα, η μεταβλητή `line_12_cut` είναι συνδεδεμένη με την εμφάνιση της γραμμής 1-2, καθώς και με το χρώμα των διακοπών που βρίσκονται στα άκρα της. Εάν ο χρήστης πατήσει έναν από τους διακόπτες της γραμμής 1-2, η δυαδική μεταβλητή `line_12_cut` λαμβάνει την τιμή 1, αφαιρείται από την οθόνη εντελώς η εν λόγω γραμμή και οι αντίστοιχοι διακόπτες εμφανίζονται με πράσινο χρώμα. Εάν ο χρήστης πατήσει πάλι πάνω σε έναν από τους διακόπτες της γραμμής 1-2, η δυαδική μεταβλητή `line_12_cut` λαμβάνει πάλι την τιμή 0, επανέρχεται στην οθόνη η εν λόγω γραμμή και οι αντίστοιχοι διακόπτες εμφανίζονται ξανά με κόκκινο χρώμα.

Ακολουθεί ένα στιγμιότυπο οθόνης με την αφαίρεση της γραμμής 1-2.



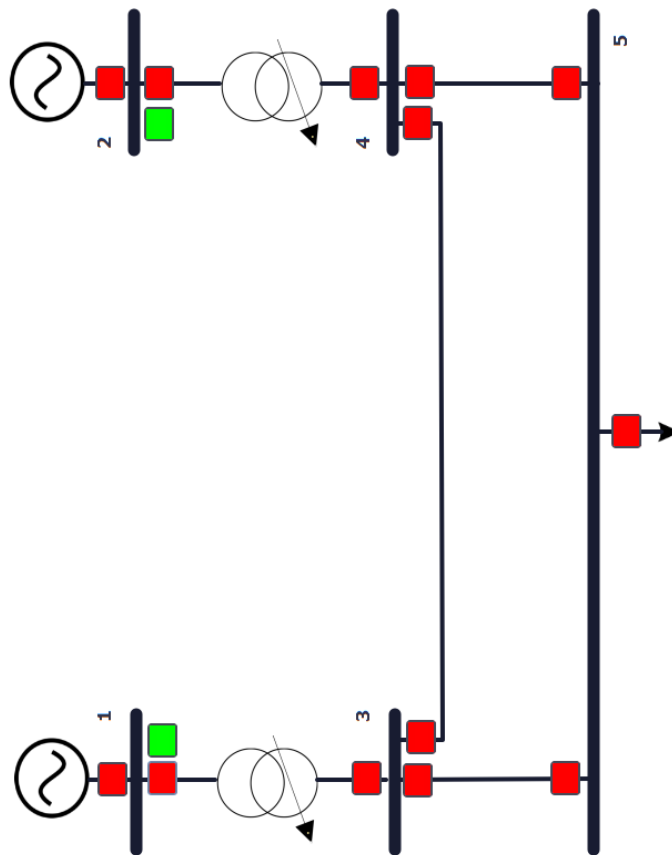
Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Εποπτεία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

10/20/2015

10:34:19 AM

TOUCH



Εικόνα 40: Αφαίρεση της γραμμής 1-2 από το σύστημα

5.5.4 Εισαγωγή ενδείξεων του συστήματος

Προκειμένου να παρέχεται στον χρήστη η δυνατότητα πλήρους εποπτείας του συστήματος, η διεπαφή HMI περιλαμβάνει δύο (2) οθόνες:

- Στην πρώτη οθόνη εμφανίζονται οι ενδείξεις που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης.
- Στη δεύτερη οθόνη εμφανίζονται οι ενδείξεις που καταφτάνουν από τα μετρητικά όργανα.

Φυσιολογικά οι ενδείξεις των δύο οθονών που αφορούν το ίδιο μέγεθος δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους.

Ο χρήστης είναι σε θέση να προβαίνει σε σύγκριση των τιμών από τις δύο οθόνες και, σε περίπτωση μεγάλων αποκλίσεων, να διαπιστώνει ότι υπάρχει σφάλμα στο σύστημα.

Η εισαγωγή των ενδείξεων γίνεται με τη βοήθεια ειδικών πεδίων εισόδου/εξόδου (I/O fields), το καθένα από τα οποία είναι συνδεδεμένο με τη μεταβλητή του προγραμματιστικού σεναρίου που αντιστοιχεί στο μέγεθος το οποίο αντιπροσωπεύει.

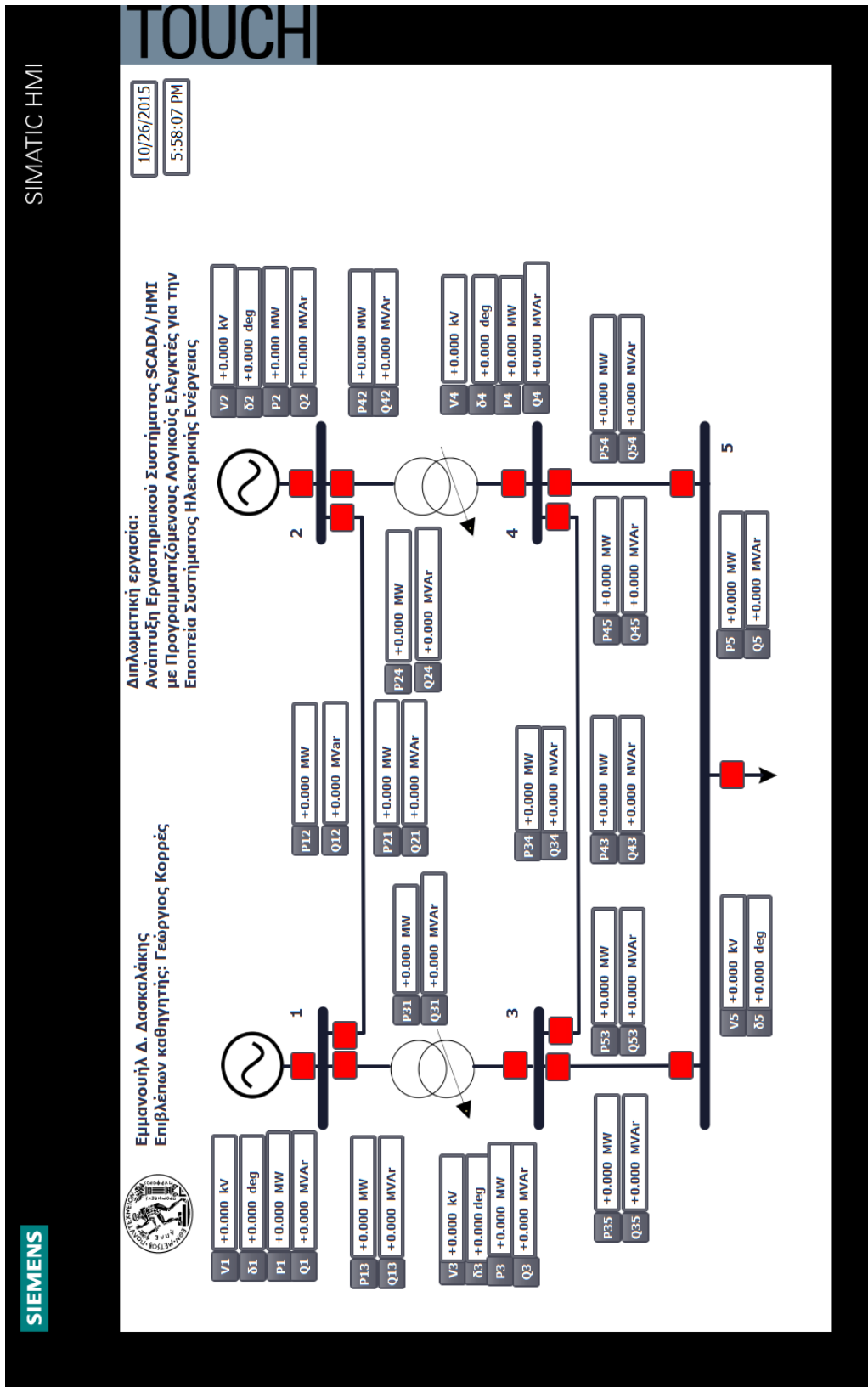
Επίσης έχει εισαχθεί ειδική ένδειξη που θα προειδοποιεί τον χρήστη για την ύπαρξη εσφαλμένης μέτρησης.

Ειδικό αναβοσβήνον μήνυμα εμφανίζεται στην οθόνη που προειδοποιεί τον χρήστη σχετικά με το ποια μέτρηση είναι εσφαλμένη. Η δυνατότητα εντοπισμού εσφαλμένης μέτρησης είναι διαθέσιμη και στην περίπτωση αφαίρεσης γραμμής. Όταν η εσφαλμένη μέτρηση επανέλθει στη φυσιολογική της τιμή, η ένδειξη παύει να εμφανίζεται στην οθόνη.

Η δυνατότητα εντοπισμού εσφαλμένης μέτρησης ενεργοποιείται, όταν για κάποια από τις τιμές που προκύπτουν από την εκτίμηση κατάστασης βρεθεί κανονικοποιημένο υπόλοιπο με τιμή μεγαλύτερη του τρία (3). Παρόμοια με τα προηγούμενα, ο εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων ενεργοποιεί δυαδική μεταβλητή δίνοντάς της την τιμή 1 (ενώ η αρχική τιμή της ήταν το 0).

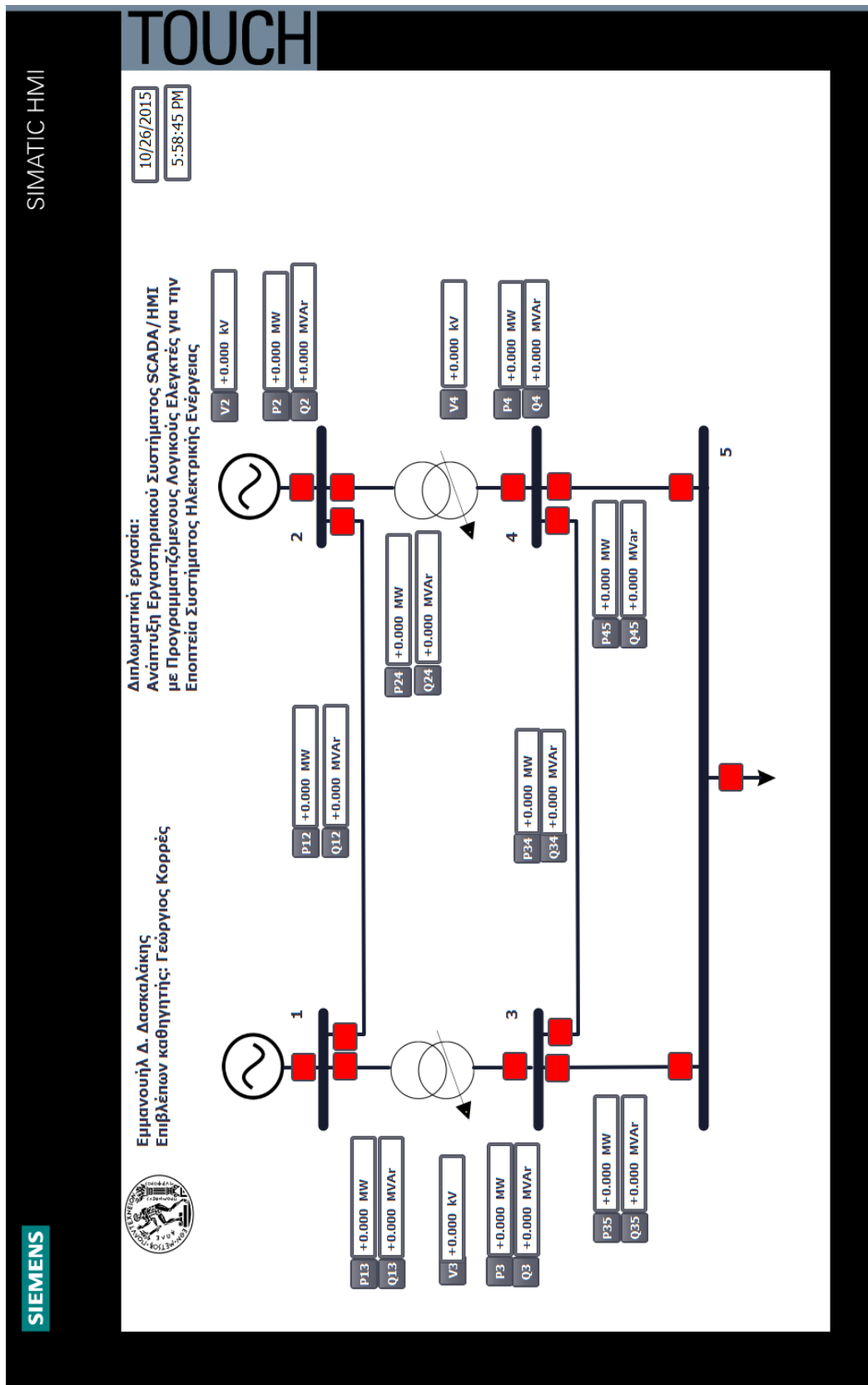
Τέλος, για οποιαδήποτε αλλαγή που σημειώνεται στις μετρήσεις, έχει εφαρμοσθεί ρύθμιση, ώστε να εκτελείται ολόκληρο το προγραμματιστικό σενάριο εκ νέου, να γίνονται οι υπολογισμοί με τα νέα δεδομένα και να επικαιροποιούνται οι εμφανιζόμενες τιμές.

5.5.4.1 Εισαγωγή ενδείξεων για τα αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης



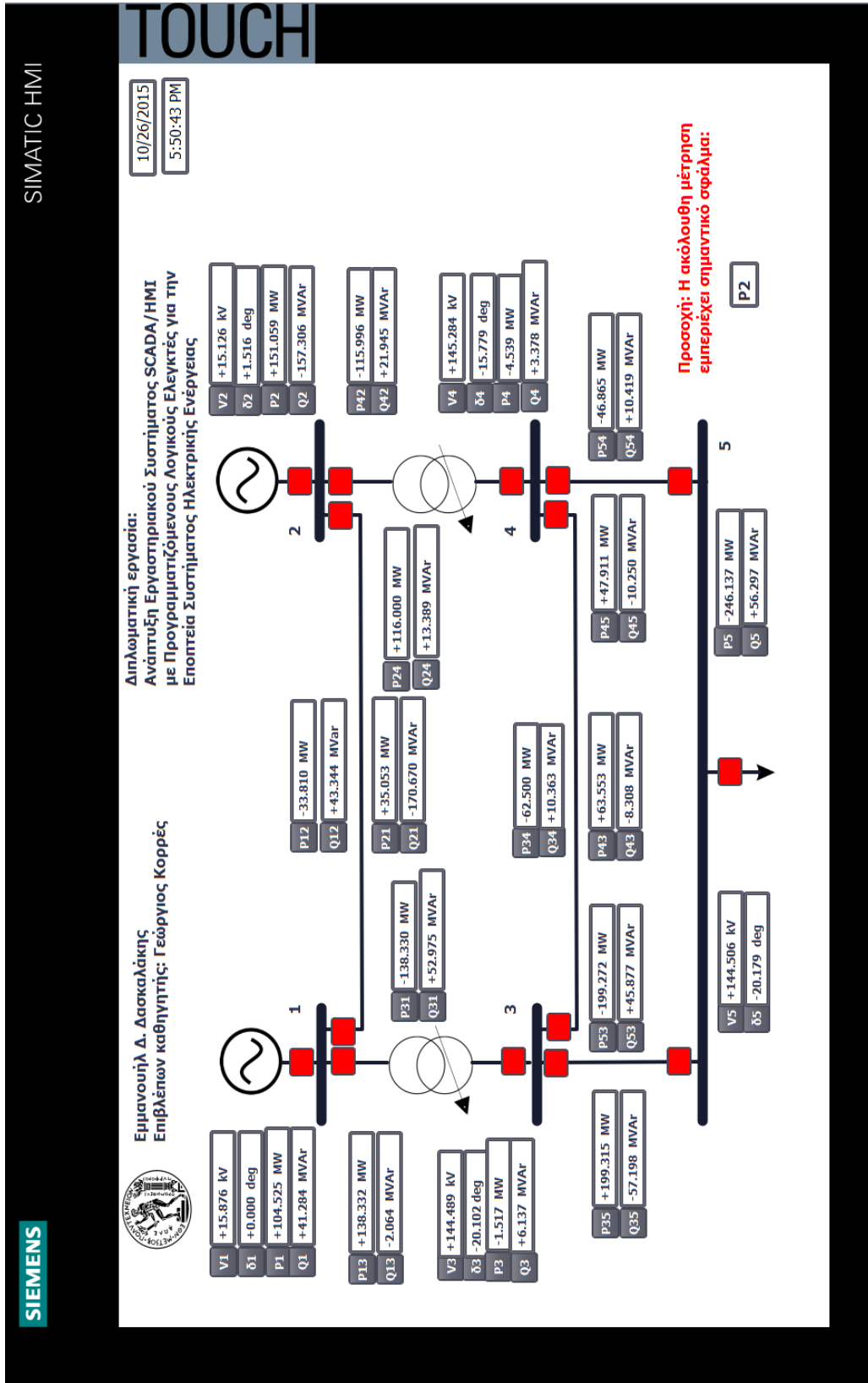
Εικόνα 41: Ενδείξεις αποτελεσμάτων εκτίμησης κατάστασης

5.5.4.2 Εισαγωγή ενδείξεων των μετρητών του συστήματος



Εικόνα 42: Ενδείξεις των μετρητών του συστήματος

5.5.4.3 Ρύθμιση προειδοποιητικών μηνυμάτων



Εικόνα 43: Εμφάνιση προειδοποιητικού μηνύματος μετά από τον εντοπισμό εσφαλμένης μέτρησης

5.6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, της οποίας τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν στις επόμενες σελίδες, αφορά τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις:

1) Κανονική κατάσταση

Οι μετρήσεις που εισάγονται στο σύστημα σαν είσοδοι προέκυψαν από τα αποτελέσματα της AC ροής φορτίου μετά την προσθήκη τυχαίων σφαλμάτων στο διάστημα $(-3\sigma, 3\sigma)$. Οι αναλυτικοί υπολογισμοί παρατίθενται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας.

2) Αφαίρεση γραμμής

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης αφαιρέθηκε από το σύστημα η γραμμή 1-2. Η γραμμή στην περίπτωση αυτή παύει να εμφανίζεται στην οθόνη, ενώ ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να την επαναφέρει πατώντας πάνω στο αντίστοιχο διακοπτικό στοιχείο που είναι ανοιχτό.

3) Εσφαλμένη μέτρηση

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, σε συγκεκριμένες μετρήσεις του συστήματος, εισήχθησαν σημαντικά σφάλματα, οι οποίες δίνουν κανονικοποιημένα υπόλοιπα πάνω από το στατιστικό κατώφλι που έχει οριστεί (με την τιμή 3) και ενεργοποιούν το αντίστοιχο προειδοποιητικό μήνυμα.

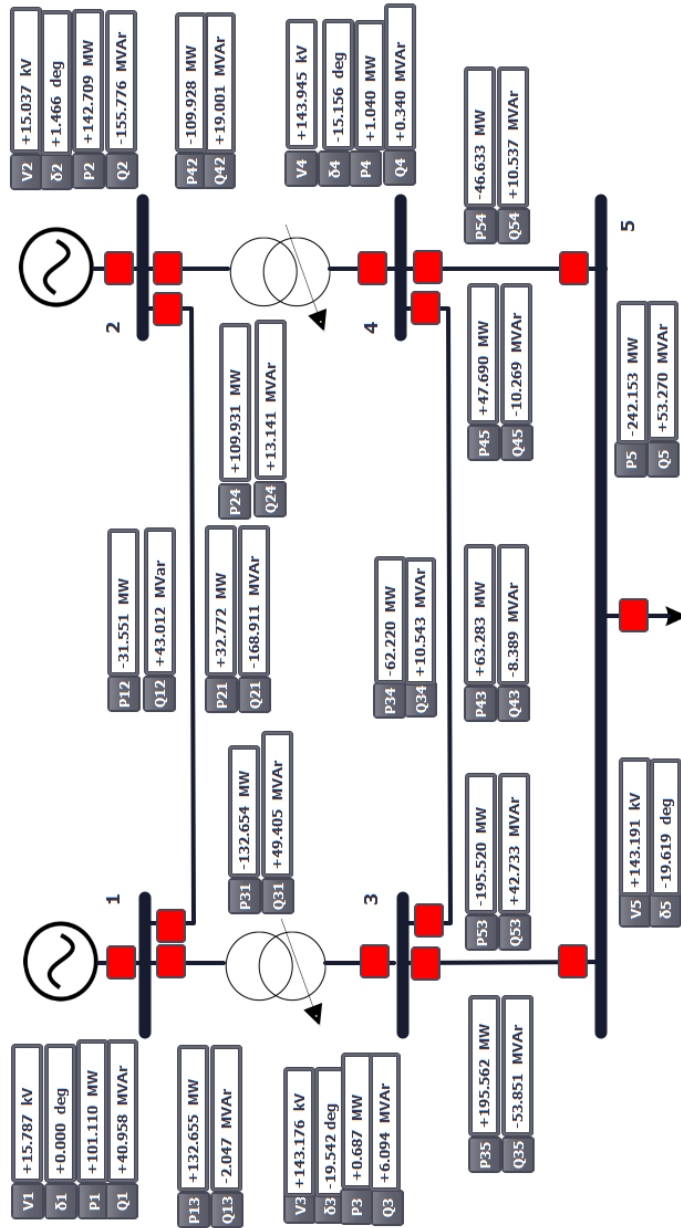
Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις εμφανίζονται τα αποτελέσματα τόσο της οθόνης με τα αποτελέσματα από την εκτίμηση κατάστασης όσο και της οθόνης με τις ενδείξεις των μετρητών.

Οι τιμές των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται παραπάνω στο κεφάλαιο 5.3.

10/26/2015
5:45:27 PM

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Επιβολή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ειμανουήλ Δ. Δασκαλάκης
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές

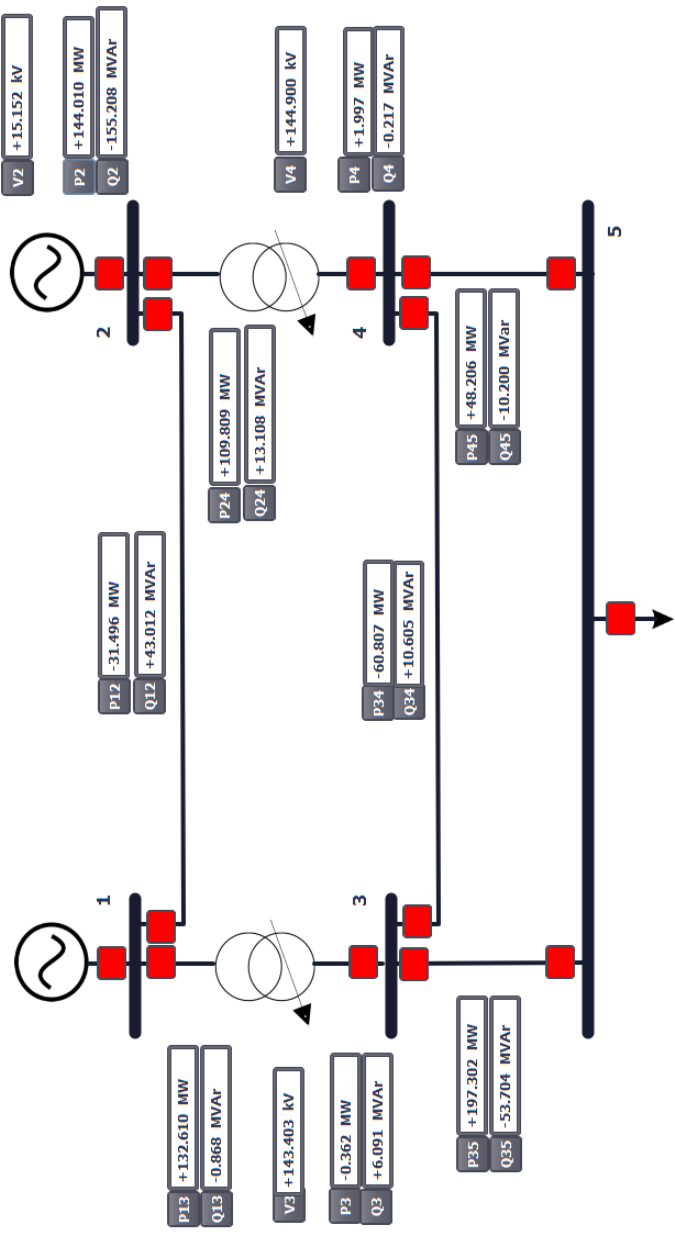


Εικόνα 44: Αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης στην κανονική κατάσταση

10/26/2015
5:48:36 PM

Επιμανουήλ Δ. Δασκαλάκης
Επιβλέπων καθηγητής, Γεωργιος Κορρές

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Εποπτεία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

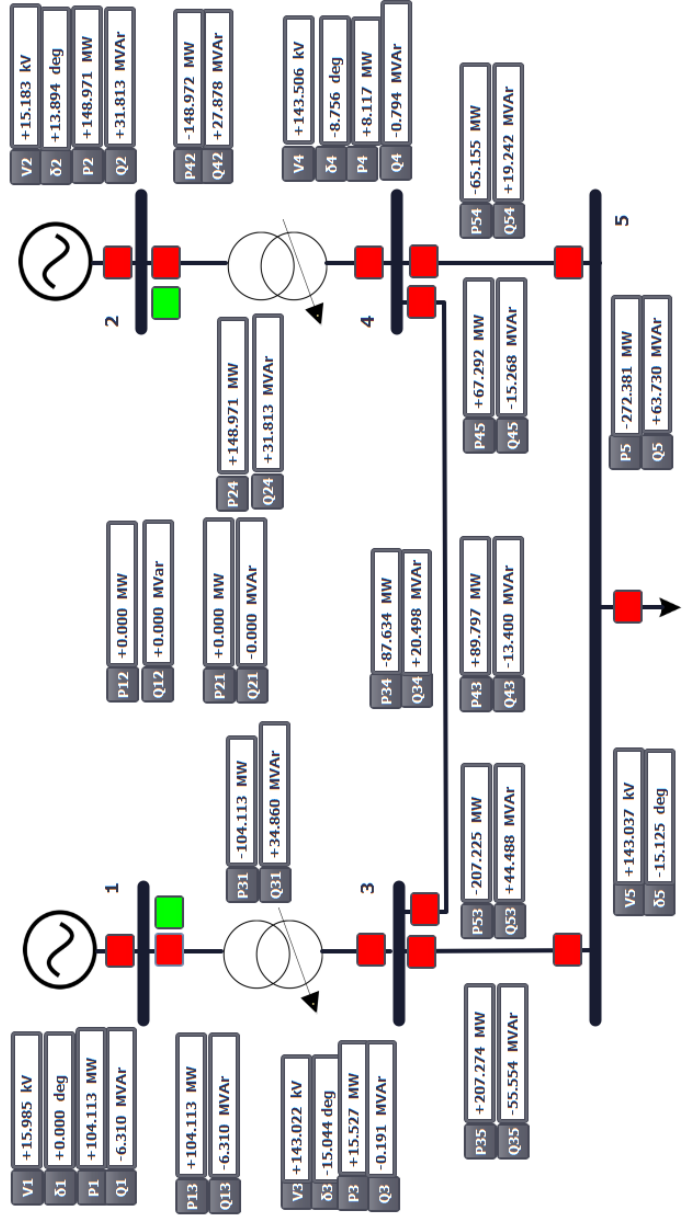


Εικόνα 45: Ενδείξεις των μετρητών στην κανονική κατάσταση

10/26/2015
5:52:32 PM

Διλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Εποπτεία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Εμμανουήλ Δ. Δασκαλάκης
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές

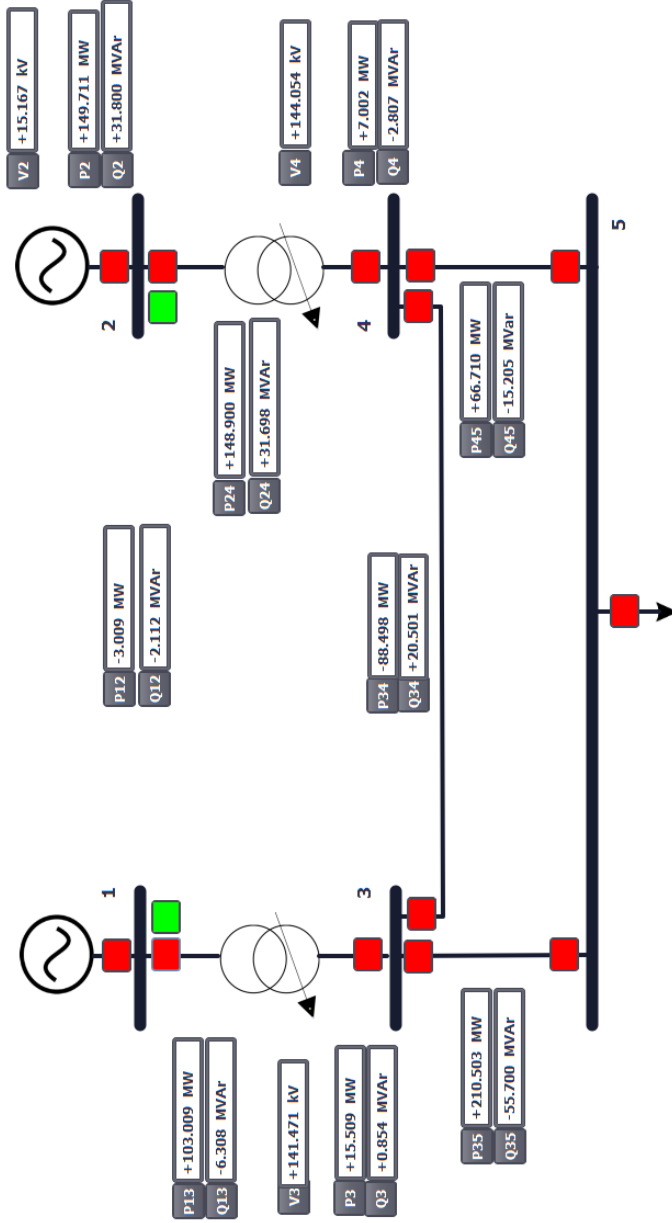


Εικόνα 46: Αποτελέσματα εκτίμησης κατάστασης μετά την αφαίρεση της γραμμής 1-2

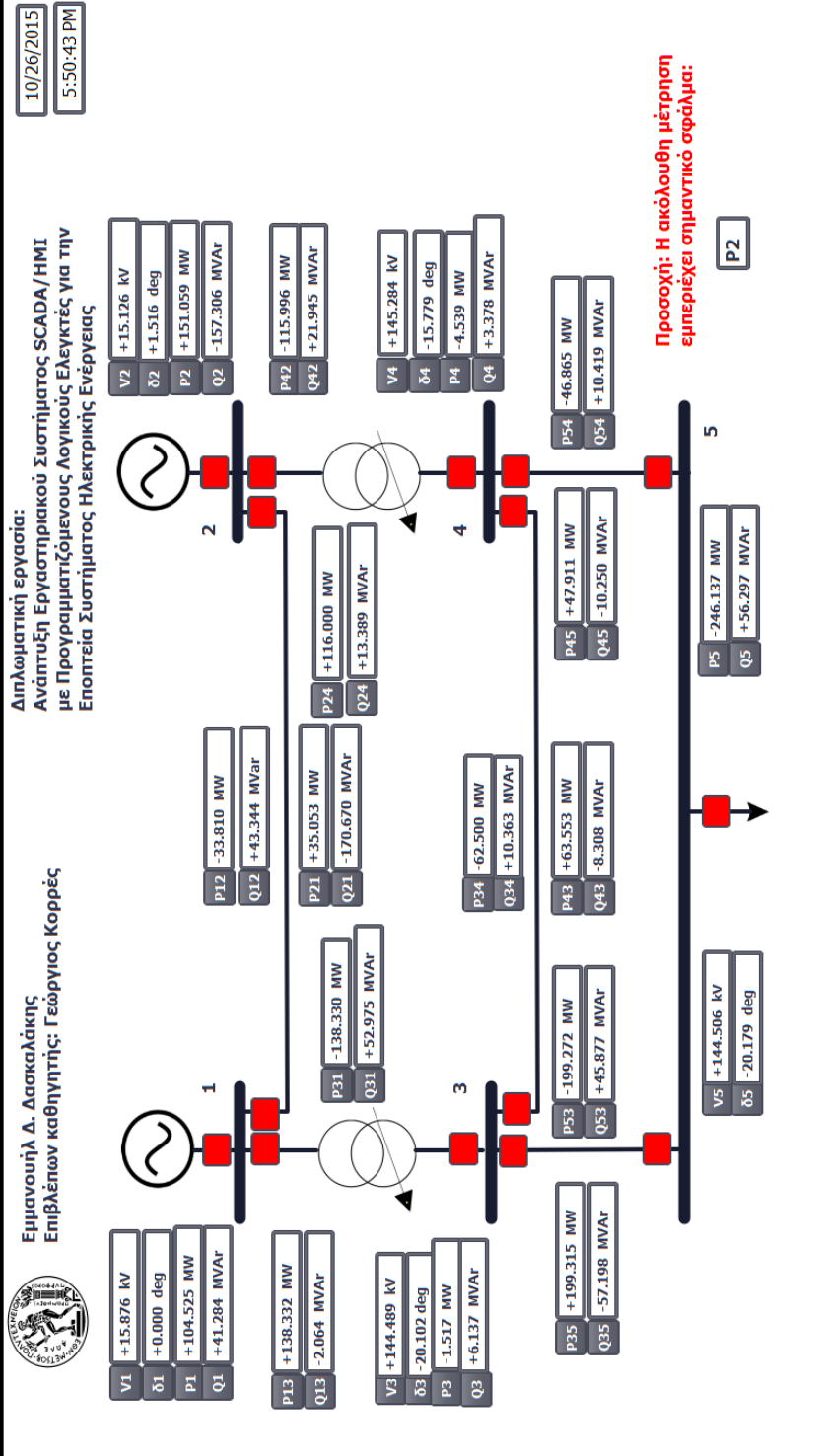
10/26/2015
5:53:13 PM

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Επιότητα Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

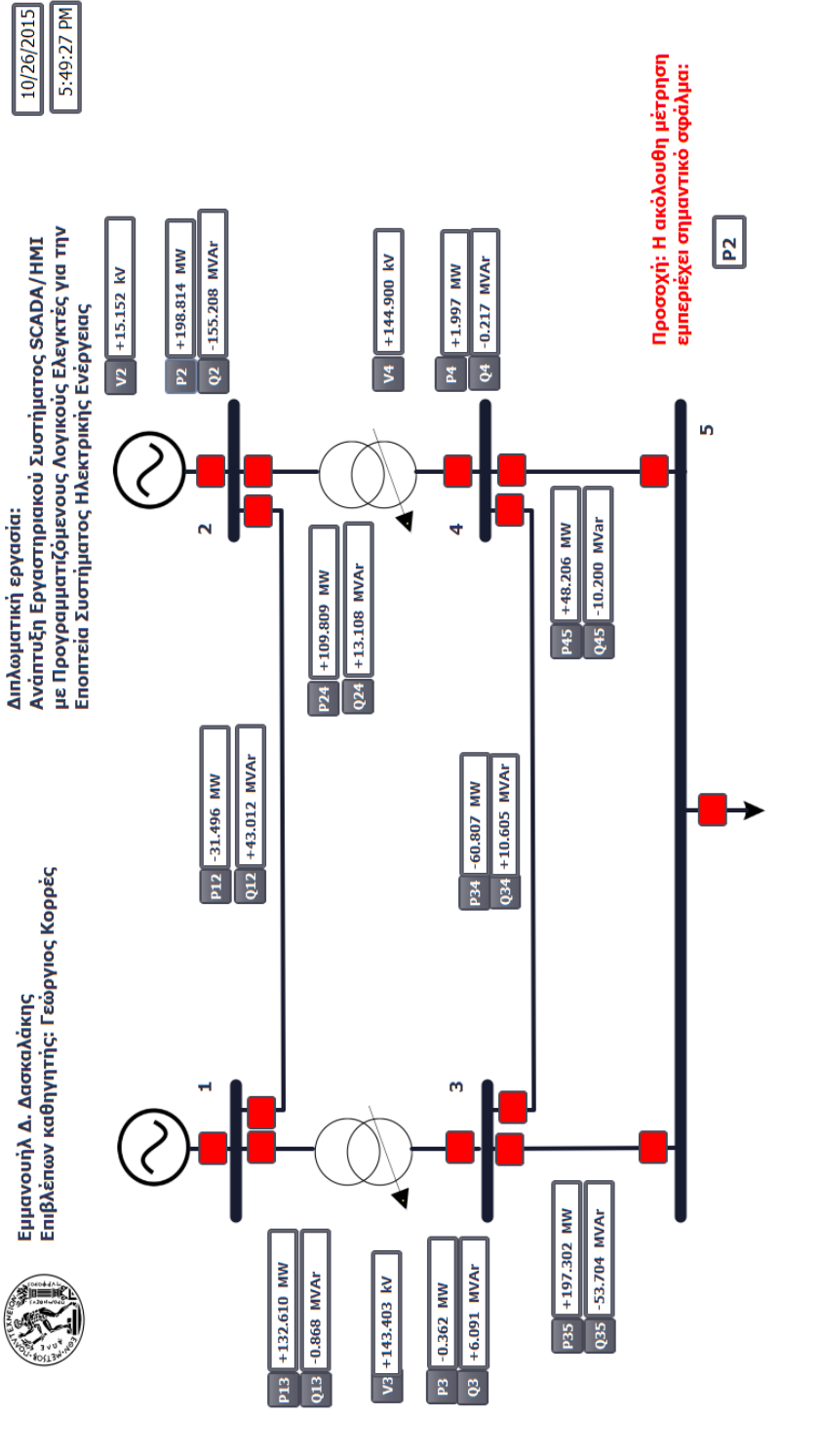
Εμμανουήλ Δ. Δασκαλακης
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές



Εικόνα 47: Ενδείξεις μετρητών μετά την αφαίρεση της γραμμής 1-2



Εικόνα 48: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P2

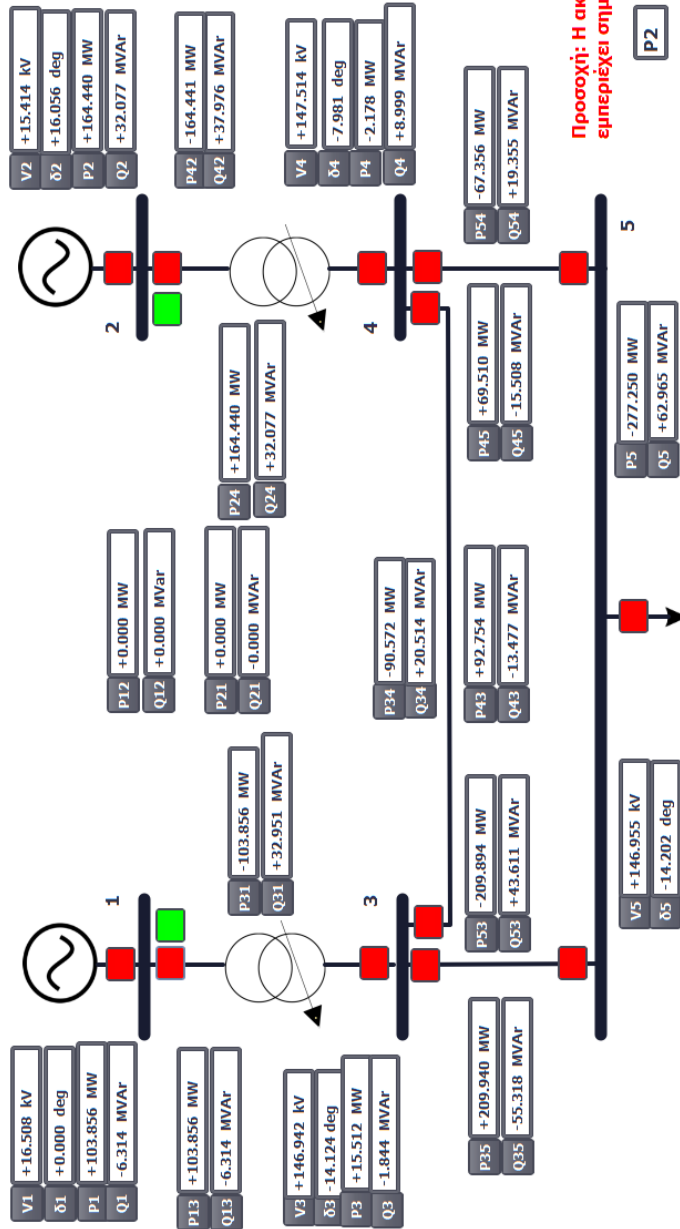


Εικόνα 49: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P₂ στην οθόνη ενδείξεων των μετρητών

10/26/2015
5:55:06 PM

Διπλωματική εργασία:
Ανάπτυξη Εργαστηριακού Συστήματος SCADA/HMI
με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές για την
Επιτήρηση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

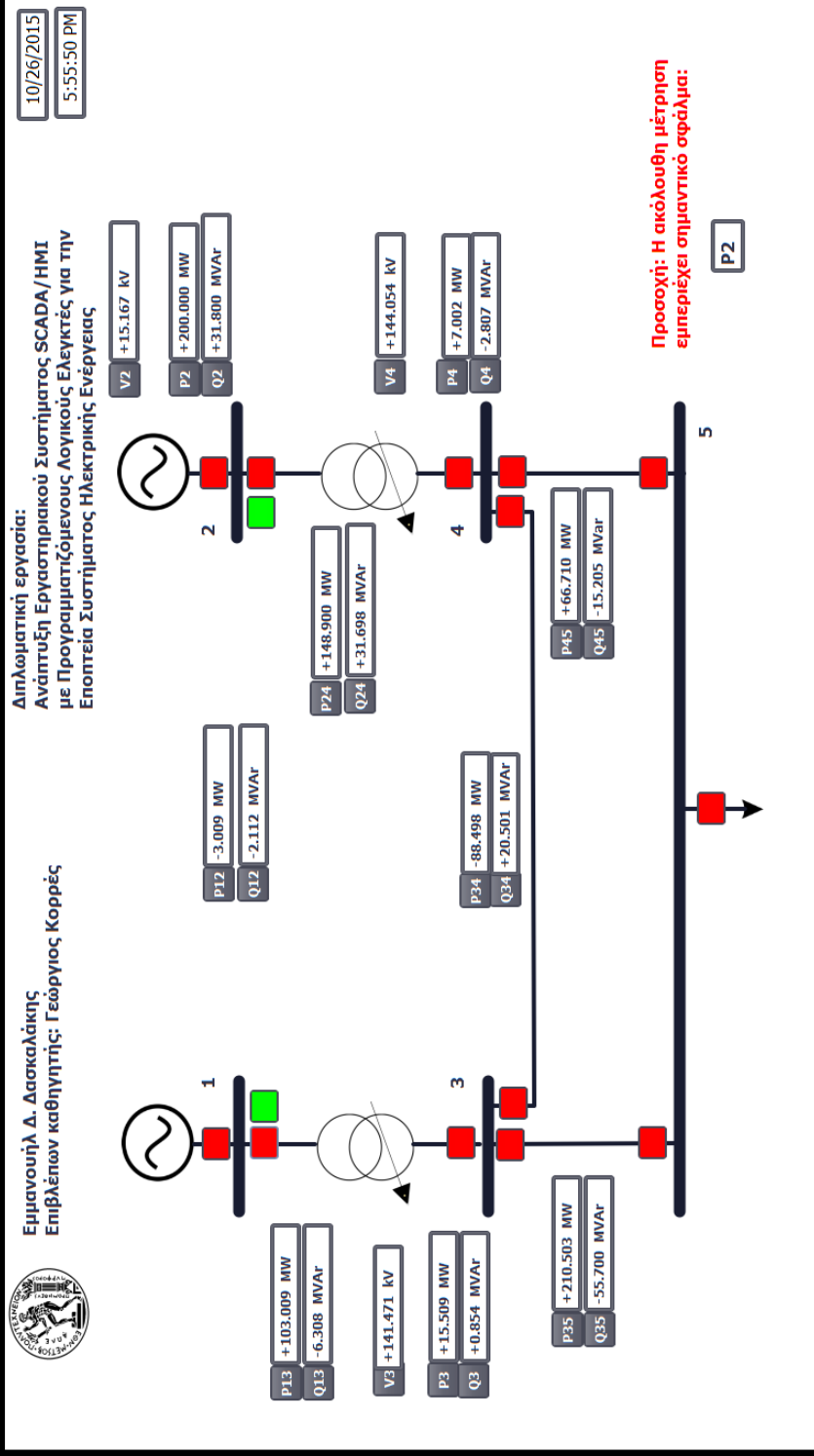
Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Κορρές



Προσοχή: Η ακόλουθη μέτρηση
εμπεριέχει σημαντικό σφάλμα:

P2

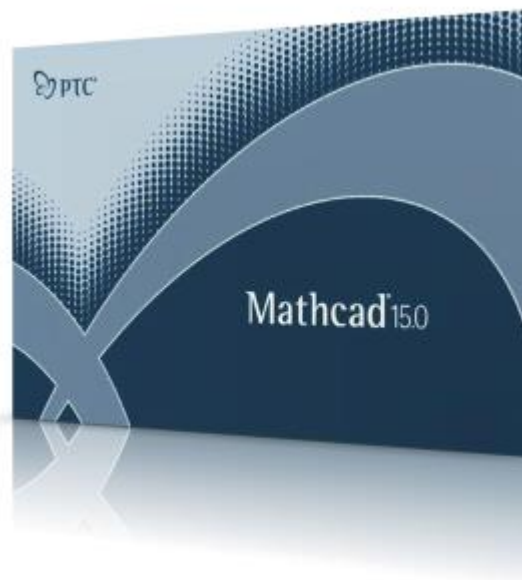
Εικόνα 50: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P₂, όταν έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2



Εικόνα 51: Ένδειξη μηνύματος σφάλματος στη μέτρηση P₂ στην οθόνη ενδείξεων των μετρητών, όταν έχει αφαιρεθεί η γραμμή 1-2

5.7 Επαλήθευση των αποτελεσμάτων

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εκτίμηση κατάστασης, την αφαίρεση γραμμών, αλλά και την ανίχνευση και αναγνώριση εσφαλμένων μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε με την παράλληλη υλοποίηση των παραπάνω διαδικασιών στο υπολογιστικό εργαλείο Mathcad 15.



Εικόνα 52: Το υπολογιστικό εργαλείο Mathcad 15 (105)

Το πρόγραμμα Mathcad 15 αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον σύγχρονο μηχανικό, μιας και προσφέρει μέσα από ένα εύχρηστο περιβάλλον χρήστη (user interface) προχωρημένες δυνατότητες μαθηματικών υπολογισμών. Επίσης προσφέρει πλήθος εργαλείων για τις πράξεις μεταξύ πινάκων που είναι απαραίτητες για τις διαδικασίες εποπτείας και ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. (106)

Η υλοποίηση στο πρόγραμμα Mathcad των απαραίτητων υπολογισμών για την εκτίμηση κατάστασης και την ανίχνευση και αναγνώριση εσφαλμένων μετρήσεων παρατίθεται στο παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχείρησε να εισαγάγει τον αναγνώστη στις έννοιες της εκτίμησης κατάστασης, της ανίχνευσης και του εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων, αλλά και σε άλλες βασικές έννοιες της εποπτείας και ελέγχου συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Παράλληλα, μέσω του υλοποιηθέντος υπολογιστικού περιβάλλοντος, είναι σε θέση να εξοικειώσει τον αναγνώστη με τη χρήση ειδικών βιομηχανικών προγραμμάτων για τον έλεγχο και την εποπτεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να του προσδώσει τα απαραίτητα εφόδια, που θα του επιτρέψουν να χρησιμοποιήσει πλήθος εφαρμογών αυτοματισμού του ίδιου κατασκευαστή ή άλλων κατασκευαστών.

Η χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος μπορεί επίσης να βρει εφαρμογή και σε βιομηχανικό επίπεδο σε μικρής κλίμακας συστήματα, με τις απαραίτητες τροποποιήσεις κατά περίπτωση.

Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης που προέκυψαν κατά την προσομοίωση των μετρήσεων αποτελούν μια πολύ καλή προσέγγιση της πραγματικότητας, μιας και συμφωνούν τόσο με τους υπολογισμούς επαλήθευσης που παρατίθενται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας όσο και με τα αποτελέσματα της ροής φορτίου.

6.1 Προοπτικές περαιτέρω έρευνας

Η διπλωματική αυτή εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν έναυσμα για περαιτέρω έρευνα. Πιο συγκεκριμένα προτείνεται:

- Η ανάπτυξη υπολογιστικών περιβαλλόντων για την εποπτεία και τον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούμενων από εκατοντάδες ζυγούς.
- Παράλληλη υλοποίηση εκτίμησης κατάστασης με συγχρονισμένες μετρήσεις από PMUs για σύγκριση των αποτελεσμάτων και την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας.
- Η επέκταση της παρούσας υλοποίησης, με την εισαγωγή τόσο συγχρονισμένων μετρήσεων από PMUs όσο και συμβατικών μετρήσεων και η δημιουργία υβριδικού εκτιμητή κατάστασης.
- Ανάπτυξη εφαρμογής διεπαφής χρήστη (HMI), διαθέσιμη σε smartphones, με πλήθος λειτουργιών. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας εφαρμογής θα είναι σε θέση να αλλάξει ριζικά το τοπίο στην εποπτεία και τον έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ή βιομηχανικών συστημάτων.

Βιβλιογραφία

1. [www.enchantedlearning.com](http://www.enchantedlearning.com/inventors/edison/lightbulb.shtml). [Ηλεκτρονικό] 2000. [Παραπομπή: 10 Μαΐου 2015.] <http://www.enchantedlearning.com/inventors/edison/lightbulb.shtml>.
2. [www.phonearena.com](http://www.phonearena.com/news/Worlds-smallest-ARM-chip-is-the-size-of-a-grain-of-sand-made-to-be-swallowed_id40293). [Ηλεκτρονικό] 27 Φεβρουαρίου 2013. [Παραπομπή: 10 Μαΐου 2015.] http://www.phonearena.com/news/Worlds-smallest-ARM-chip-is-the-size-of-a-grain-of-sand-made-to-be-swallowed_id40293.
3. <http://1lyk-vyron.att.sch.gr/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 16 Αυγούστου 2015.] http://1lyk-vyron.att.sch.gr/A1b_kaplani.pdf.
4. <http://www.ices.cmu.edu/>. [Ηλεκτρονικό] 28 Μαρτίου 2007. [Παραπομπή: 13 Μαΐου 2015.] http://www.ices.cmu.edu/censcir/resources/CenSCIR_presentation_20070328.pdf.
5. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages#cite_note-ndtv.com-1). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 13 Μαΐου 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_major_power_outages#cite_note-ndtv.com-1.
6. <http://www.dg.history.vt.edu/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Μαΐου 2015.] <http://www.dg.history.vt.edu/ch1/introduction.html>.
7. *CIGRE WG D2.24 report, "EMS for the 21st Century-System Requirements," CIGRE Technical Brochure 452*. Paris : s.n., 2011.
8. Wu Xingping, Zhang Yang, Wang Xiwei. "A New Generation EMS," *Power System Technology, PowerCon 2002*. 13-17 Oct 2002. pp. 190-194. Vol. 1.
9. F. F. Wu, K. Moslehi, A. Bose. "Power System Control Centers: Past, Present, and Future", *Proc. IEEE, vol. 93, no. 11*. Nov 2005.
10. C.H. Hauser, D.E. Bakken, A. Bose, I. Dionysiou, K.H. Gjermundrød, V.S. Irava and J. Helkey. "Security, Trust and QoS in Next-Generation Control and Communication for Large Power Systems," *International Journal of Critical Infrastructures (Interscience), vol4, Nos.1/2*. 2008.
11. [patrickschneider.photoshelter.com](http://patrickschneider.photoshelter.com/image/I0000Y_S8U_pUyDs). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Μαΐου 2015.] http://patrickschneider.photoshelter.com/image/I0000Y_S8U_pUyDs.
12. [www.webpages.uidaho.edu/](http://www.webpages.uidaho.edu/sustainability/chapters/ch06/ch06-p3a.asp). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 20 Μαΐου 2015.] <http://www.webpages.uidaho.edu/sustainability/chapters/ch06/ch06-p3a.asp>.
13. [http://www.nptel.ac.in](http://www.nptel.ac.in/courses/108104051/chapter_1/1_1b.html). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 20 Μαΐου 2015.] http://www.nptel.ac.in/courses/108104051/chapter_1/1_1b.html.
14. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_generation). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 21 Μαΐου 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_generation.
15. [www.rae.gr](http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/distribution.csp). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 21 Μαΐου 2015.] http://www.rae.gr/site/categories_new/consumers/know_about/electricity/distribution.csp.

16. slideplayer.gr. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 3 Ιουλίου 2015.] <http://slideplayer.gr/slide/2023509/>.
17. A.G.Expósito, A.Abur. *“Power system state estimation: Theory and implementation”*, 1st. Marcel & Dekker Publishers. 2004.
18. GAUSS, CARL FRIEDRICH. *THEORIA MOTUS CORPORUM COELESTIUM IN SECTIONIBUS CONICIS SOLEM AMBIENTIUM*. HAMBURG : s.n., 1809.
19. *Power Engineering Society General Meeting*. Montreal : IEEE, 2006.
20. K. A. Clements, G. W. Woodzell, and R. C. Burchett, *“A new method for solving equality-constrained power system static-state estimation,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, no. 4, pp. 1260–1266, Nov 1990.*
21. A. Monticelli, *“State estimation in electric power systems: A generalized approach”*, 1st, M. A. Pai, Ed. Kluwer Academic Publishers, 1999.
22. E. Caro and A. J. Conejo, *“State estimation via mathematical programming: A comparison of different estimation algorithms”*, *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 6, no. 6, p. 545, 2012.
23. G. N. Korres, *“A robust method for equality constrained state estimation,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 2, pp. 305–314, May 2002.*
24. www.automationworld.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 25 Μαΐου 2015.] <http://www.automationworld.com/rtu-or-plc-which-right-you>.
25. Van Gorp, J.C. *“Enterprising Energy Management,” Power and Energy Magazine, IEEE, vol.2, no.1, pp. 59- 63, Jan-Feb 2004.*
26. Sorenson, H W. *Least-squares estimation:from Gauss to Kalman*. San Diego : s.n., 1970.
27. img.china-telecommunications.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 25 Μαΐου 2015.] http://img.china-telecommunications.com/nimg/79/b1/40416c1f4760a54027597360ead7-0x0-0/strong_style_color_b82220_gsm_strong_sms_remote_telemetry_controller_4din_4dout_rs232.jpg.
28. mycourses.ntua.gr. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 20 Ιουλίου 2015.] http://mycourses.ntua.gr/document/goto/?url=%2FNOTES_KEE.rar&cidReq=ECE1220.
29. www.ff-automation.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 7 Ιουλίου 2015.] <http://www.ff-automation.com/products/rtu-remote-terminal-unit.shtml>.
30. www.rmsystems.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Μαΐου 2015.] http://www.rmsystems.com/rtu_port_types.htm.
31. www.techopedia.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 17 Ιουλίου 2015.] <https://www.techopedia.com/definition/25705/communication-protocol>.

32. [www.rtaautomation.com](http://www.rtaautomation.com/technologies/modbus-rtu/). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Μαΐου 2015.]
http://www.rtaautomation.com/technologies/modbus-rtu/.
33. [www.theasciicode.com.ar](http://www.theasciicode.com.ar/ascii-control-characters/line-feed-ascii-code-10.html). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 29 Μαΐου 2015.]
http://www.theasciicode.com.ar/ascii-control-characters/line-feed-ascii-code-10.html.
34. [www.windmill.co.uk](http://www.windmill.co.uk/modbussettings.html). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Μαΐου 2015.]
http://www.windmill.co.uk/modbussettings.html.
35. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/baudrate.html?refresh=true). [Ηλεκτρονικό] 29 Μαΐου 2015.
http://www.mathworks.com/help/matlab/matlab_external/baudrate.html?refresh=true.
36. Hackworth, John R και Hackworth, Frederick D. *Programmable Logic Controlers: Programming Methods and Applications*. 2004.
37. [mall.industry.siemens.com](https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7312-5BF04-0AB0). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 30 Μαΐου 2015.]
https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7312-5BF04-0AB0.
38. [www.plcdev.com](http://www.plcdev.com/how_plcs_work). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 1 Ιουνίου 2015.]
http://www.plcdev.com/how_plcs_work.
39. [ibrahim6060.weebly.com](http://ibrahim6060.weebly.com/advantage--disadvantage-of-plc.html). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Ιουνίου 2015.]
http://ibrahim6060.weebly.com/advantage--disadvantage-of-plc.html.
40. [www.kronotech.com](http://www.kronotech.com/PLC/Advantages.htm). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 3 Ιουνίου 2015.]
http://www.kronotech.com/PLC/Advantages.htm.
41. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_interference). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Ιουνίου 2015.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_interference.
42. [i.ebayimg.com](http://i.ebayimg.com/12/!Bq2H4)wB2k~$(KGrHqUH-DcEucSwE6hLBL)KiZvO,w~~_35.JPG). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 1 Ιουνίου 2015.]
http://i.ebayimg.com/12/!Bq2H4)wB2k~\$(KGrHqUH-DcEucSwE6hLBL)KiZvO,w~~_35.JPG.
43. [www.galco.com](http://www.galco.com/comp/prod/plc.htm#anchor2). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Ιουνίου 2015.]
http://www.galco.com/comp/prod/plc.htm#anchor2.
44. [davidlu.net](http://davidlu.net/Topic_8_PLC.pdf?G=736). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 7 Ιουλίου 2015.]
http://davidlu.net/Topic_8_PLC.pdf?G=736.
45. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Microprocessor). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 9 Ιουλίου 2015.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Microprocessor.
46. [courseware.mech.ntua.gr](http://courseware.mech.ntua.gr/ml23194/extras/PLC_Lesson1.pdf). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 16 Ιουλίου 2015.]
http://courseware.mech.ntua.gr/ml23194/extras/PLC_Lesson1.pdf.
47. [users.cis.fiu.edu](http://users.cis.fiu.edu/~downeyt/cda4101/memory.html). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 12 Ιουλίου 2015.]
http://users.cis.fiu.edu/~downeyt/cda4101/memory.html.
48. [en.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_isolation). [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 16 Ιουλίου 2015.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Galvanic_isolation.

49. www.iamechatronics.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Ιουλίου 2015.]
<http://www.iamechatronics.com/notes/general-engineering/258-plc-inputoutput-io-capabilities>.
50. www.iamechatronics.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Ιουλίου 2015.]
<http://www.iamechatronics.com/notes/general-engineering/258-plc-inputoutput-io-capabilities>.
51. industrial.omron.eu. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 20 Ιουλίου 2015.]
<https://industrial.omron.eu/en/news/product-news/plc-i-o-terminal-blocks>.
52. Boyer and Stuart. *SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition*. s.l. : Instrument Society of America, Research Triangle, 1993.
53. Daneels , A and Salter , W. *What is SCADA?* Trieste : International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics, 1999.
54. K. Tomsovic, D.E. Bakken, V. Venkatasubramanian and A. Bose. “*Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems,*” *Invited Paper, Proceedings of the IEEE, vol. 93, No. 5, pp. 965-979.* May 2005.
55. inductiveautomation.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 31 Μαΐου 2015.]
<https://inductiveautomation.com/what-is-scada>.
56. M. Kezunovic, A. Abur. “*Merging the Temporal and Spatial Aspects of Data and Information for Improved Power System Monitoring Applications,*” *IEEE Proceedings, Vol. 93, No. 11, pp 1909-1919.* Nov 2005.
57. en.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 25 Ιουλίου 2015.]
https://en.wikipedia.org/wiki/User_interface.
58. w3.siemens.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 25 Ιουλίου 2015.]
<http://w3.siemens.com/mcims/automation/en/human-machine-interface/pages/default.aspx>.
59. www.elprocus.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 7 Ιουνίου 2015.]
<https://www.elprocus.com/wp-content/uploads/2014/05/74.jpg>.
60. www.yokogawa.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 12 Ιουνίου 2015.]
<http://www.yokogawa.com/us/products/supervisory-control-and-data-acquisition-scada/index.htm>.
61. www.schneider-electric.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Ιουνίου 2015.]
http://www.schneider-electric.com/solutions/ww/en/med/20340568/application/pdf/1485_se-whitepaper-letter-scadaoverview-v005.pdf.
62. EPRI EL, “*Human Factors Review of Electric Power Dispatch Control Centers*”, vol. 1–6, *Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.*

63. Χασάπης, Γ. *Αρχιτεκτονική&Προγραμματισμός Συστημάτων Βιομηχανικού Ελέγχου*. s.l. : Εκδόσεις Ζήτη, 2001.
64. "IEC 61970 *Energy management system application program interface (EMS-API)–Part 301: Common Information Model (CIM) Base*", IEC, Edition 1.0. Nov 2003.
65. en.m.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 17 Ιουλίου 2015.] https://en.m.wikipedia.org/wiki/Frequency_Disturbance_Recorder#Frequency_Disturbance_Recorder.
66. M. Zhou, V. A. Centeno, J. S. Thorp, A. G. Phadke, "An alternative for including phasor measurements in state estimators", *IEEE Trans. Power Syst.* 21 (4) (2006) 1930–1937.
67. www.arbiter.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 1 Ιουλίου 2015.] [http://www.arbiter.com/solutions/phasor-measurement-unit-\(pmu\)-solutions.php](http://www.arbiter.com/solutions/phasor-measurement-unit-(pmu)-solutions.php).
68. en.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 1 Ιουλίου 2015.] https://en.wikipedia.org/wiki/Phasor_measurement_unit.
69. www.technicalreview.gr. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 17 Ιουλίου 2015.] <http://www.technicalreview.gr/index.php/dummy-category-4/item/286-pmu/286-pmu>.
70. www8.garmin.com/. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 17 Ιουλίου 2015.] <http://www8.garmin.com/aboutGPS/>.
71. www.intechopen.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 17 Ιουλίου 2015.] <http://www.intechopen.com/source/html/17564/media/image2.jpg>.
72. www.epcc-workshop.net. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 19 Ιουλίου 2015.] <http://www.epcc-workshop.net/archive/2013/assets/downloads/wenbin-presentation-comparison-of-differences.pdf>.
73. Yoon, Y J. *Study of the utilization and benefits of phasor measurement units for large scale power system state estimation*. Texas : A&M University, 2005.
74. mycourses.ntua.gr. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 22 Ιουλίου 2015.] http://mycourses.ntua.gr/courses/ECE1220/document/Phasor_Measurement_Units.pdf.
75. J. S. Thorp, A. G. Phadke, and K. J. Karimi, "Real time voltage-phasor measurements for static state estimation," *IEEE Trans. Power App. Sys.*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3098–3106, Nov 1985.
76. A. G. Phadke, J. S. Thorp, and K. J. Karimi, "State estimation with phasor measurements," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 233–241, Feb 1986.
77. A. G. Phadke and J. S. Thorp, "Synchronized Phasor Measurements and Their Applications", New York: Springer, 2008.
78. Κονταξής, Γ. και Χατζηαργυρίου, Ν. *Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας*. s.l. : Εκδόσεις ΕΜΠ, 2003.

79. Flanagan, William M. . *Handbook of Transformer Design and Applications*. s.l. : McGraw-Hill Professional, 1993.
80. <http://www.seai.ie/>. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 23 Μαΐου 2015.] <http://www.seai.ie/uploadedfiles/Energyandbusiness/REP009THERMIEFinalreport.pdf>.
81. el.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 26 Μαΐου 2015.] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9C%CE%B5%CF%84%CE%B1%CF%83%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%AE%CF%82>.
82. el.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Ιουλίου 2015.] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%B5%CE%BD%CE%BD%CE%AE%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%B1>.
83. F. C. Schweppe and J. Wildes, “Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 1, pp. 120–125, 1970.
84. F. C. Schweppe and D. Rom, “Power System Static-State Estimation, Part II: Approximate Model”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 125–130, Jan. 1970.
85. G. N. Korres and T. A. Alexopoulos, “A constrained ordering for solving the equality constrained state estimation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 1998–2005, Nov 2012.
86. commons.wikimedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 14 Ιουλίου 2015.] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_deviation_diagram.svg.
87. Vijayaraghavan , Brown και Barnes . *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection, 1st Edition*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2004.
88. Freeman, M. *Serial State Estimation, M.S. Thesis*. Texas : A&M University, 2006.
89. E. Handschin, F. C. Schweppe, J. Kohlas, and A. Fiechter, “Bad Data Analysis for Power System State Estimation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, no. 2, pp. 329–337, 1975.
90. F. Zhuang and R. Balasubramanian, “Bad Data Suppression in Power System State Estimation with a Variable Quadratic-Constant Criterion”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 857–863, Jul. 1985.
91. L. Mili, T. V. Cutsem, and M. Ribbens-Pavella, “Bad data identification methods in power system state estimation - A comparative study”, *Power*, vol. PAS-104, no. 11, pp. 3037–3049, 1985.
92. A. Monticelli, F. F. Wu, and M. Yen, “Multiple bad data identification for state estimation by combinatorial optimization”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PWRD-1, no. 3, pp. 361–369, 1986.

93. E. Caro, A. J. Conejo, R. Mínguez, M. Zima, and G. Andersson, "Multiple bad data identification considering measurement dependencies", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 1953–1961, 2011.
94. C. Gomez-Quiles, A. Gomez-Exposito, and A. de la Villa Jaen, "State Estimation for Smart Distribution Substations", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 986–995, 2012.
95. G. N. Korres and N. M. Manousakis, "State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements", *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1514–1524, Jul. 2011.
96. Kun. *State Estimation with Angle Measurements*, Ph.D. dissertation . s.l. : A&M University, 2005.
97. learn.bu.edu. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Ιουλίου 2015.]
https://learn.bu.edu/bbcswebdav/pid-826908-dt-content-rid-2073693_1/courses/13sprgmetcj702_ol/week05/metcj702_W05S02T05_limitations.html.
98. Yates, F. *Contingency Tables Involving Small Numbers and the χ^2 Test*. s.l. : Royal Statistical Society, 1934.
99. www.napce.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 28 Ιουλίου 2015.]
http://www.napce.org/documents/research-design-yount/23_chisq_4th.pdf.
100. www.industry.siemens.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Ιουλίου 2015.]
<http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/tia-portal/pages/default.aspx>.
101. dump.bz/. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 5 Ιουλίου 2015.]
<https://dump.bz/storage0/0714/Vb7tYJAA0mlGmExZAVuk0xZCYmbAY96U.jpg>.
102. en.wikipedia.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Οκτωβρίου 2015.]
https://en.wikipedia.org/wiki/Visual_Basic.
103. Βαφειάδης, Μάριος. *Συνοπτικός οδηγός της γλώσσας προγραμματισμού Visual Basic*. Θεσσαλονίκη : s.n., 2005.
104. cache.industry.siemens.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 15 Οκτωβρίου 2015.]
https://cache.industry.siemens.com/dl/files/640/73453640/att_67202/v1/WinCCInformationSystemScripting_en-US.pdf.
105. img.skybit.org. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Σεπτεμβρίου 2015.]
<http://img.skybit.org/posts/3XmV3MnXpcLo15iZ5bxhqOPNu9G36JScelJijiqB0f6Kwl7zjvKls5Yplu83ro/mathcad-15-0-0-436-repack-silent-install-1.png>.
106. www.ptc.com. [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: 2 Σεπτεμβρίου 2015.]
<http://www.ptc.com/engineering-math-software/mathcad>.

Παράρτημα

Π.1 Πίνακας συμβόλων κατά την προσομοίωση των μετρήσεων

Η εισαγωγή των μετρήσεων από τον χρήστη κατά την υλοποίηση της προσομοίωσης γίνεται σε συγκεκριμένες διευθύνσεις μνήμης. Για μεγαλύτερη κατανόηση των μεγεθών που εισάγει ο χρήστης, έχει δημιουργηθεί κατάλληλος πίνακας συμβόλων (symbol table) που αντιστοιχίζει στις θέσεις μνήμης τα ονόματα των μεγεθών που αντιπροσωπεύουν. Ο πίνακας αυτός παρατίθεται στην επόμενη σελίδα:

Σύμβολο	Διεύθυνση	Τύπος δεδομένων
V2_plc	IW 290	INT
V3_plc	IW 292	INT
V4_plc	IW 294	INT
P2_plc	IW 300	INT
P3_plc	IW 302	INT
P4_plc	IW 304	INT
Q2_plc	IW 310	INT
Q3_plc	IW 312	INT
Q4_plc	IW 314	INT
P12_plc	IW 318	INT
P13_plc	IW 320	INT
P24_plc	IW 322	INT
P34_plc	IW 324	INT
P35_plc	MW 152	INT
P45_plc	IW 326	INT
Q12_plc	IW 328	INT
Q13_plc	IW 330	INT
Q24_plc	IW 332	INT
Q34_plc	IW 334	INT
Q35_plc	MW 158	INT
Q45_plc	IW 336	INT
V2_pu	MD 54	REAL
V3_pu	MD 58	REAL
V4_pu	MD 62	REAL
P1_pu	MD 70	REAL
P2_pu	MD 74	REAL
P3_pu	MD 78	REAL
P4_pu	MD 82	REAL
P5_pu	MD 86	REAL
Q2_pu	MD 94	REAL
Q3_pu	MD 98	REAL
Q4_pu	MD 102	REAL
P12_pu	MD 110	REAL
P13_pu	MD 114	REAL
P24_pu	MD 118	REAL
P34_pu	MD 122	REAL
P35_pu	MD 154	REAL
P45_pu	MD 126	REAL
Q12_pu	MD 130	REAL
Q13_pu	MD 134	REAL
Q24_pu	MD 138	REAL
Q34_pu	MD 142	REAL
Q35_pu	MD 160	REAL
Q45_pu	MD 146	REAL

Εικόνα 53: Πίνακας συμβόλων κατά την προσομοίωση των μετρήσεων

Π.2 Διενέργεια υπολογισμών και επαλήθευση αποτελεσμάτων στο πρόγραμμα Mathcad

Μέσω του προγράμματος Mathcad δόθηκε η δυνατότητα διενέργειας υπολογισμών και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων της εργαστηριακής υλοποίησης που προέρχονται από την υπολογιστική πλατφόρμα TIA Portal. Ακολουθεί αυτούσιος ο κώδικας από το πρόγραμμα Mathcad:

1.Υπολογισμός μήτρας αγωγιμοτήτων:

Υπολογισμός των ανά μονάδα τιμών των αγωγιμοτήτων των γραμμών:

$$y_{12} := \frac{1}{0.01 + 0.05i} \quad y_{21} := y_{12} = 3.84615 - 19.23077i$$

$$y_{34} := \frac{1}{0.0241 + 0.108i} \quad y_{43} := y_{34} = 1.96818 - 8.82006i$$

$$y_{35} := \frac{1}{0.0001 + 0.0006i} \quad y_{53} := y_{35} = 270.27027 - 1.62162i \times 10^3$$

$$y_{45} := \frac{1}{0.0415 + 0.142i} \quad y_{54} := y_{45} = 1.89617 - 6.48809i$$

Υπολογισμός μοντέλου ισοδύναμου "Π" του μετασχηματιστή με χρήση του 2ου μοντέλου μετασχηματιστών ρύθμισης:

Έχουμε για την αντίδραση του μετασχηματιστή με taps ότι:

$$y_{M\Sigma 1} := \frac{1}{0.25i} = -4i$$

$$y_{M\Sigma 2} := \frac{1}{0.25i} = -4i$$

$$t1 := 0.85 \quad (\text{Η ρύθμιση των taps του μετασχηματιστή})$$

$$t2 := 0.95$$

Οπότε λαμβάνουμε τελικά για τα στοιχεία του ισοδυνάμου "Π" ότι:

$$k1 := \frac{1}{1 + t1^2} = 0.581$$

$$k2 := \frac{1}{1 + t2^2} = 0.526$$

$$y_{s13} := 2t1 \cdot (t1 - 1) \cdot k1 \cdot y_{M\Sigma1} = 0.592i$$

$$y_{13} := 2 \cdot t1 \cdot k1 \cdot y_{M\Sigma1} = -3.948i$$

$$y_{31} := y_{13} = -3.948i$$

$$y_{s31} := 2(1 - t1) \cdot k1 \cdot y_{M\Sigma1} = -0.697i$$

$$y_{s24} := 2t2 \cdot (t2 - 1) \cdot k2 \cdot y_{M\Sigma2} = 0.2i$$

$$y_{24} := 2 \cdot t2 \cdot k2 \cdot y_{M\Sigma2} = -3.995i$$

$$y_{42} := y_{24} = -3.995i$$

$$y_{s42} := 2(1 - t2) \cdot k2 \cdot y_{M\Sigma2} = -0.21i$$

Υπολογισμός των ανά μονάδα τιμών των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων:

Μας δίνεται ότι:

$$y_{s12} := 0.625j \quad y_{s21} := y_{s12} = 0.625i$$

$$y_{s34} := 0.0142j \quad y_{s43} := y_{s34} = 0.0142i$$

$$y_{s35} := 0.0625j \quad y_{s53} := y_{s35} = 0.0625i$$

$$y_{s45} := 0.0183j \quad y_{s54} := y_{s45} = 0.0183i$$

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα σχηματίζουμε τελικά τον πίνακα αγωγιμοτήτων:

$$Y = \begin{pmatrix} 3.846 - 21.961i & -3.846 + 19.231i & 3.948i & 0 & 0 \\ -3.846 + 19.231i & 3.846 - 22.401i & 0 & 3.995i & 0 \\ 3.948i & 0 & 272.238 - 1.635i \times 10^3 & -1.968 + 8.82i & -270.27 + 1.622i \times 10^3 \\ 0 & 3.995i & -1.968 + 8.82i & 3.864 - 19.481i & -1.896 + 6.488i \\ 0 & 0 & -270.27 + 1.622i \times 10^3 & -1.896 + 6.488i & 272.166 - 1.628i \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Σε υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν είναι χρήσιμο να διαχωρίσουμε το πραγματικό από το φανταστικό μέρος της μήτρας αγωγιμοτήτων, προκειμένου να λάβουμε τελικά τις τιμές για τα g_{ij} και b_{ij} . Ωστόσο το αρνητικό πρόσημο που είχαμε προκειμένου να σχηματίσουμε τη μήτρα αγωγιμοτήτων πλέον πρέπει να αφαιρεθεί:

$$y_{\text{Re}} := -\text{Re}(Y) = \begin{pmatrix} -3.846 & 3.846 & 0 & 0 & 0 \\ 3.846 & -3.846 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -272.238 & 1.968 & 270.27 \\ 0 & 0 & 1.968 & -3.864 & 1.896 \\ 0 & 0 & 270.27 & 1.896 & -272.166 \end{pmatrix}$$

$$y_{\text{Im}} := -\text{Im}(Y) = \begin{pmatrix} 21.961 & -19.231 & -3.948 & 0 & 0 \\ -19.231 & 22.401 & 0 & -3.995 & 0 \\ -3.948 & 0 & 1.635 \times 10^3 & -8.82 & -1.622 \times 10^3 \\ 0 & -3.995 & -8.82 & 19.481 & -6.488 \\ 0 & 0 & -1.622 \times 10^3 & -6.488 & 1.628 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Πρόβλημα εκτίμησης κατάστασης με μετρήσεις SCADA

1.Καθορισμός των τιμών μετρήσεων-Προσθήκη σφαλμάτων

Αποτελέσματα ροής φορτίου σε ανά μονάδα τιμές:

$$\begin{aligned}V_1 &:= 1.05 & \delta_1 &:= 0\text{deg} \\V_2 &:= 1 & \delta_2 &:= 1.4883\text{deg} \\V_3 &:= 0.9523 & \delta_3 &:= -19.596\text{deg} \\V_4 &:= 0.9571 & \delta_4 &:= -15.2242\text{deg} \\V_5 &:= 0.9524 & \delta_5 &:= -19.673\text{deg}\end{aligned}$$

Έχοντας υπολογίσει παραπάνω τις εγχύσεις ενεργού ισχύος, θα υπολογίσουμε ακολούθως όλες τις εμπλεκόμενες ροές και εγχύσεις ενεργού και αέργου ισχύος οι οποίες θα μας φανούν χρήσιμες παρακάτω.

Χρησιμοποιώντας τους τύπους της θεωρίας έχουμε τα εξής:

$P_i = (V_i)^2 \Sigma(g_{sij} + g_{ij}) + V_i^2 g_i - V_i \Sigma(V_j a_{ij})$, όπου $a_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)$ οπότε:

$$\begin{aligned}P_1 &:= -(V_1)^2 y_{Re_{1,1}} - V_1 \left[V_2 \left(y_{Re_{1,2}} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2) + y_{Im_{1,2}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \right) \right. \\&+ \left. V_3 \left(y_{Re_{1,3}} \cdot \cos(\delta_1 - \delta_3) + y_{Im_{1,3}} \sin(\delta_1 - \delta_3) \right) \right] \\P_2 &:= -(V_2)^2 y_{Re_{2,2}} - V_2 \left[V_1 \left(y_{Re_{2,1}} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1) + y_{Im_{2,1}} \sin(\delta_2 - \delta_1) \right) \right. \\&+ \left. V_4 \left(y_{Re_{2,4}} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_4) + y_{Im_{2,4}} \sin(\delta_2 - \delta_4) \right) \right] \\P_3 &:= -(V_3)^2 y_{Re_{3,3}} - V_3 \left[V_1 \left(y_{Re_{3,1}} \cdot \cos(\delta_3 - \delta_1) + y_{Im_{3,1}} \sin(\delta_3 - \delta_1) \right) \right. \\&+ \left. V_4 \left(y_{Re_{3,4}} \cdot \cos(\delta_3 - \delta_4) + y_{Im_{3,4}} \sin(\delta_3 - \delta_4) \right) + V_5 \left(y_{Re_{3,5}} \cdot \cos(\delta_3 - \delta_5) + y_{Im_{3,5}} \sin(\delta_3 - \delta_5) \right) \right] \\P_4 &:= -(V_4)^2 y_{Re_{4,4}} - V_4 \left[V_2 \left(y_{Re_{4,2}} \cdot \cos(\delta_4 - \delta_2) + y_{Im_{4,2}} \sin(\delta_4 - \delta_2) \right) \right. \\&+ \left. V_3 \left(y_{Re_{4,3}} \cdot \cos(\delta_4 - \delta_3) + y_{Im_{4,3}} \sin(\delta_4 - \delta_3) \right) + V_5 \left(y_{Re_{4,5}} \cdot \cos(\delta_4 - \delta_5) + y_{Im_{4,5}} \sin(\delta_4 - \delta_5) \right) \right] \\P_5 &:= -(V_5)^2 y_{Re_{5,5}} - V_5 \left[V_3 \left(y_{Re_{5,3}} \cdot \cos(\delta_5 - \delta_3) + y_{Im_{5,3}} \sin(\delta_5 - \delta_3) \right) \right. \\&+ \left. V_4 \left(y_{Re_{5,4}} \cdot \cos(\delta_5 - \delta_4) + y_{Im_{5,4}} \sin(\delta_5 - \delta_4) \right) \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{12} &:= V_1^2 \operatorname{Re}(y_{12}) - V_1 \cdot V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{12}) \cos(\delta_1 - \delta_2) + \operatorname{Im}(y_{12}) \sin(\delta_1 - \delta_2)) \\
P_{21} &:= V_2^2 \operatorname{Re}(y_{12}) - V_1 \cdot V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{21}) \cos(\delta_2 - \delta_1) + \operatorname{Im}(y_{21}) \sin(\delta_2 - \delta_1)) \\
P_{13} &:= V_1^2 \operatorname{Re}(y_{13}) - V_1 \cdot V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{13}) \cos(\delta_1 - \delta_3) + \operatorname{Im}(y_{13}) \sin(\delta_1 - \delta_3)) \\
P_{24} &:= V_2^2 \operatorname{Re}(y_{24}) - V_2 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4)) \\
P_{34} &:= V_3^2 \operatorname{Re}(y_{34}) - V_3 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4)) \\
P_{35} &:= V_3^2 \operatorname{Re}(y_{35}) - V_3 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5)) \\
P_{45} &:= V_4^2 \operatorname{Re}(y_{45}) - V_4 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5)) \\
Q_1 &:= -V_1^2 (\operatorname{Im}(Y_{1,1})) - V_1 \cdot [V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{12}) \sin(\delta_1 - \delta_2) - \operatorname{Im}(y_{12}) \cos(\delta_1 - \delta_2)) \\
&\quad + V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{13}) \sin(\delta_1 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{13}) \cos(\delta_1 - \delta_3))] \\
Q_2 &:= -V_2^2 (\operatorname{Im}(Y_{2,2})) - V_2 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{21}) \sin(\delta_2 - \delta_1) - \operatorname{Im}(y_{21}) \cos(\delta_2 - \delta_1)) \\
&\quad + V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4))] \\
Q_3 &:= -V_3^2 (\operatorname{Im}(Y_{3,3})) - V_3 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{31}) \sin(\delta_3 - \delta_1) - \operatorname{Im}(y_{31}) \cos(\delta_3 - \delta_1)) \\
&\quad + V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5))] \\
Q_4 &:= -V_4^2 (\operatorname{Im}(Y_{4,4})) - V_4 \cdot [V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{42}) \sin(\delta_4 - \delta_2) - \operatorname{Im}(y_{42}) \cos(\delta_4 - \delta_2)) \\
&\quad + V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{43}) \sin(\delta_4 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{43}) \cos(\delta_4 - \delta_3)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5))] \\
Q_5 &:= -V_5^2 (\operatorname{Im}(Y_{5,5})) - V_5 \cdot [V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{53}) \sin(\delta_5 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{53}) \cos(\delta_5 - \delta_3)) \\
&\quad + V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{54}) \sin(\delta_5 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{54}) \cos(\delta_5 - \delta_4))] \\
Q_{12} &:= -V_1^2 \operatorname{Im}(y_{12} + y_{s12}) - V_1 \cdot V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{12}) \sin(\delta_1 - \delta_2) - \operatorname{Im}(y_{12}) \cos(\delta_1 - \delta_2)) \\
Q_{13} &:= -V_1^2 \operatorname{Im}(y_{13} + y_{s13}) - V_1 \cdot V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{13}) \sin(\delta_1 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{13}) \cos(\delta_1 - \delta_3)) \\
Q_{24} &:= -V_2^2 \operatorname{Im}(y_{24} + y_{s24}) - V_2 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4)) \\
Q_{34} &:= -V_3^2 \operatorname{Im}(y_{34} + y_{s34}) - V_3 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4)) \\
Q_{35} &:= -V_3^2 \operatorname{Im}(y_{35} + y_{s35}) - V_3 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5)) \\
Q_{45} &:= -V_4^2 \operatorname{Im}(y_{45} + y_{s45}) - V_4 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5))
\end{aligned}$$

Σημείωση: $\Sigma(g_{ij}+g_{sj})=Re(\gamma_{ii})=-\gamma_{Rei,i}$ και

$\Sigma(b_{ij}+b_{sj})=Im(\gamma_{ii})=-\gamma_{Imi,i}$ για κάθε ζυγό j που συνδέεται με το ζυγό i .

Συγκεντρωτικά έχουμε λοιπόν:

$$P_i := \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.003 \\ 1.433 \\ 0.011 \\ 6.632 \times 10^{-5} \\ -2.413 \end{pmatrix} \quad Q_i := \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.413 \\ -1.551 \\ 0.061 \\ 4.017 \times 10^{-4} \\ 0.535 \end{pmatrix}$$

$$P_{ij} := \begin{pmatrix} P_{12} \\ P_{13} \\ P_{24} \\ P_{34} \\ P_{35} \\ P_{45} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.321 \\ 1.324 \\ 1.099 \\ -0.617 \\ 1.951 \\ 0.472 \end{pmatrix} \quad Q_{ij} := \begin{pmatrix} Q_{12} \\ Q_{13} \\ Q_{24} \\ Q_{34} \\ Q_{35} \\ Q_{45} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.432 \\ -0.019 \\ 0.133 \\ 0.107 \\ -0.539 \\ -0.104 \end{pmatrix}$$

Οι τιμές που θα επιλέξουμε, προκειμένου εν συνεχεία να σχηματίσουμε το διάνυσμα κατάστασης, θα είναι οι ακόλουθες: οι τάσεις V_2, V_3, V_4 , τα παραπάνω ζεύγη ρών P, Q , και τα ζεύγη εγχύσεων P, Q στους κλάδους 2,3 και 4. Σχηματίζουμε λοιπόν έναν πίνακα με τις μετρήσεις αυτές. Ο πίνακας παρατίθεται στην επόμενη σελίδα.

$$z := \begin{pmatrix} P_{12} \\ P_{13} \\ P_{24} \\ P_{34} \\ P_{35} \\ P_{45} \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ Q_{12} \\ Q_{13} \\ Q_{24} \\ Q_{34} \\ Q_{35} \\ Q_{45} \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & -0.321 \\ \hline 2 & 1.324 \\ \hline 3 & 1.099 \\ \hline 4 & -0.617 \\ \hline 5 & 1.951 \\ \hline 6 & 0.472 \\ \hline 7 & 1.433 \\ \hline 8 & 0.011 \\ \hline 9 & 6.632 \cdot 10^{-5} \\ \hline 10 & 0.432 \\ \hline 11 & -0.019 \\ \hline 12 & 0.133 \\ \hline 13 & 0.107 \\ \hline 14 & -0.539 \\ \hline 15 & -0.104 \\ \hline 16 & -1.551 \\ \hline 17 & 0.061 \\ \hline 18 & 4.017 \cdot 10^{-4} \\ \hline 19 & 1 \\ \hline 20 & 0.952 \\ \hline 21 & 0.957 \\ \hline \end{array}$$

Υπολογισμός τυπικής απόκλισης:

Οι παραπάνω μετρήσεις οι οποίες προέρχονται από τη δοθείσα AC ανάλυση θεωρούνται οι σωστές. Ακολουθώντας υπολογίζουμε την τυπική απόκλιση κάθε μέτρησης i σύμφωνα με τον τύπο: $\sigma_i = (0.02/3) * |z_{true}|$ όπου z_{true} η σωστή μέτρηση.

$$\sigma := \frac{0.02}{3} \cdot \begin{pmatrix} |P_{12}| \\ |P_{13}| \\ |P_{24}| \\ |P_{34}| \\ |P_{35}| \\ |P_{45}| \\ |P_2| \\ |P_3| \\ |P_4| \\ |Q_{12}| \\ |Q_{13}| \\ |Q_{24}| \\ |Q_{34}| \\ |Q_{35}| \\ |Q_{45}| \\ |Q_2| \\ |Q_3| \\ |Q_4| \\ |V_2| \\ |V_3| \\ |V_4| \end{pmatrix} = \begin{array}{|c|c|} \hline & 1 \\ \hline 1 & 2.141 \cdot 10^{-3} \\ \hline 2 & 8.826 \cdot 10^{-3} \\ \hline 3 & 7.33 \cdot 10^{-3} \\ \hline 4 & 4.111 \cdot 10^{-3} \\ \hline 5 & 0.013 \\ \hline 6 & 3.15 \cdot 10^{-3} \\ \hline 7 & 9.553 \cdot 10^{-3} \\ \hline 8 & 7.041 \cdot 10^{-5} \\ \hline 9 & 4.422 \cdot 10^{-7} \\ \hline 10 & 2.882 \cdot 10^{-3} \\ \hline 11 & 1.283 \cdot 10^{-4} \\ \hline 12 & 8.876 \cdot 10^{-4} \\ \hline 13 & 7.129 \cdot 10^{-4} \\ \hline 14 & 3.595 \cdot 10^{-3} \\ \hline 15 & 6.922 \cdot 10^{-4} \\ \hline 16 & 0.01 \\ \hline 17 & 4.057 \cdot 10^{-4} \\ \hline 18 & 2.678 \cdot 10^{-6} \\ \hline 19 & 6.667 \cdot 10^{-3} \\ \hline 20 & 6.349 \cdot 10^{-3} \\ \hline 21 & 6.381 \cdot 10^{-3} \\ \hline \end{array}$$

Όσες τιμές είναι πολύ χαμηλές υπολογίζονται εκ νέου, προκειμένου να αποφύγουμε σφάλματα στους παρακάτω υπολογισμούς των κανονικοποιημένων υπολοίπων:

$$\sigma_7 := 0.01$$

$$\sigma_8 := 0.01$$

$$\sigma_9 := 0.01$$

$$\sigma_{11} := 0.01$$

$$\sigma_{18} := 0.01$$

Θα πάρουμε λοιπόν τελικά:

	1
1	$2.141 \cdot 10^{-3}$
2	$8.826 \cdot 10^{-3}$
3	$7.33 \cdot 10^{-3}$
4	$4.111 \cdot 10^{-3}$
5	0.013
6	$3.15 \cdot 10^{-3}$
7	0.01
8	0.01
9	0.01
10	$2.882 \cdot 10^{-3}$
11	0.01
12	$8.876 \cdot 10^{-4}$
13	$7.129 \cdot 10^{-4}$
14	$3.595 \cdot 10^{-3}$
15	$6.922 \cdot 10^{-4}$
16	0.01
17	$4.057 \cdot 10^{-4}$
18	0.01
19	$6.667 \cdot 10^{-3}$
20	$6.349 \cdot 10^{-3}$
21	$6.381 \cdot 10^{-3}$

$\sigma =$

Εισαγωγή σφάλματος:

Η εισαγωγή του τυχαίου σφάλματος εύρους από -3σ έως 3σ θα γίνει με τη βοήθεια της συνάρτησης `runif` η οποία παράγει τυχαίους αριθμούς μέσα σ' ένα δοθέν διάστημα:

	1
1	-2.992
2	-1.84
3	0.51
4	-0.898
5	1.937
6	-1.955
7	1.263
8	-1.176
9	-2.452
fault := runif(21, -3, 3) =	10 -2.116
	11 2.931
	12 -2.286
	13 -2.946
	14 0.19
	15 0.611
	16 -2.003
	17 -0.295
	18 -2.658
	19 1.7
	20 0.119
	21 2.256

Οι τελικές μετρήσεις εισάγονται ως στοιχεία του πίνακα με ονομασία z_{final} ως ακολούθως:

$$z_{final} := z + (\text{diag}(\text{fault})) \cdot \sigma$$

	1
1	-0.328
2	1.308
3	1.103
4	-0.62
5	1.976
6	0.466
7	1.446
8	$-1.199 \cdot 10^{-3}$
9	-0.024
10	0.426
11	0.01
12	0.131
13	0.105
14	-0.539
15	-0.103
16	-1.572
17	0.061
18	-0.026
19	1.011
20	0.953
21	0.971

2.Υπολογισμός του διανύσματος κατάστασης με εφαρμογή της ανακυκλωτικής μεθόδου εκτίμησης κατάστασης Newton-Raphson στην υβριδική μορφή

Ονομάζουμε x το διάνυσμα κατάστασης της διάταξης μας το οποίο θα έχει την εξής μορφή:

$$x := \begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix}$$

Αρχικοποιούμε το διάνυσμα κατάστασης τοποθετώντας μηδενικές τιμές για τις γωνίες και μοναδιαίες τιμές για τις τάσεις:

$$x_0 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Σχηματισμός του πίνακα h:

Θα χρησιμοποιήσουμε τους ακόλουθους τύπους της θεωρίας προκειμένου τελικά να σχηματίσουμε τον πίνακα h:

Ενεργός ροή ισχύος P_{ij} : $h_{p_{ij}} = (V_i)^2(g_{sij}+g_{ij})-V_iV_ja_{ij}$, όπου $a_{ij} = g_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)+b_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)$

Έγχυση ενεργού ισχύος P_i : $h_{p_i} = (V_i)^2\Sigma(g_{sij}+g_{ij}) + V_i^2g_i-V_i\Sigma(V_ja_{ij})$, όπου $a_{ij}=g_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)+b_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)$

Άεργος ροή ισχύος Q_{ij} : $h_{q_{ij}} = -(V_i)^2(b_{sij}+b_{ij})-V_iV_jb_{ij}$, όπου $b_{ij} = g_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)-b_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)$

Έγχυση αέργου ισχύος Q_i : $h_{q_i} = -(V_i)^2\Sigma(b_{sij}+b_{ij}) - V_i^2b_i-V_i\Sigma(V_jb_{ij})$, όπου $b_{ij} = g_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)-b_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)$

Μέτρο τάσης: $h_{v_i} = V_i$

Επομένως θα έχουμε:

$$h_{p_{12}}(\delta_2, V_1, V_2) := V_1^2 \operatorname{Re}(y_{12}) - V_1 \cdot V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{12}) \cos(\delta_1 - \delta_2) + \operatorname{Im}(y_{12}) \sin(\delta_1 - \delta_2))$$

$$h_{p_{13}}(\delta_3, V_1, V_3) := V_1^2 \operatorname{Re}(y_{13}) - V_1 \cdot V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{13}) \cos(\delta_1 - \delta_3) + \operatorname{Im}(y_{13}) \sin(\delta_1 - \delta_3))$$

$$h_{p_{24}}(\delta_2, \delta_4, V_2, V_4) := V_2^2 \operatorname{Re}(y_{24}) - V_2 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4))$$

$$h_{p_{34}}(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4) := V_3^2 \operatorname{Re}(y_{34}) - V_3 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4))$$

$$h_{p_{35}}(\delta_3, \delta_5, V_3, V_5) := V_3^2 \operatorname{Re}(y_{35}) - V_3 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5))$$

$$h_{p_{45}}(\delta_4, \delta_5, V_4, V_5) := V_4^2 \operatorname{Re}(y_{45}) - V_4 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5))$$

$$h_{p_2}(\delta_2, \delta_4, V_1, V_2, V_4) := V_2^2 (\operatorname{Re}(Y_{2,2})) - V_2 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{21}) \cos(\delta_2 - \delta_1))$$

$$+ \operatorname{Im}(y_{21}) \sin(\delta_2 - \delta_1)) + V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4))]]$$

$$h_{p_3}(\delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_3, V_4, V_5) := V_3^2 (\operatorname{Re}(Y_{3,3})) - V_3 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{31}) \cos(\delta_3 - \delta_1) + \operatorname{Im}(y_{31}) \sin(\delta_3 - \delta_1))$$

$$+ V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4) + \operatorname{Im}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5))]]$$

$$h_{p_4}(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_2, V_3, V_4, V_5) := V_4^2 (\operatorname{Re}(Y_{4,4})) - V_4 \cdot [V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{42}) \cos(\delta_4 - \delta_2) + \operatorname{Im}(y_{42}) \sin(\delta_4 - \delta_2))$$

$$+ V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{43}) \cos(\delta_4 - \delta_3) + \operatorname{Im}(y_{43}) \sin(\delta_4 - \delta_3)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5) + \operatorname{Im}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5))]]$$

$$\begin{aligned}
h_{q13}(\delta_3, V_1, V_3) &:= -V_1^2 \operatorname{Im}(y_{13} + y_{s13}) - V_1 \cdot V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{13}) \sin(\delta_1 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{13}) \cos(\delta_1 - \delta_3)) \\
h_{q24}(\delta_2, \delta_4, V_2, V_4) &:= -V_2^2 \operatorname{Im}(y_{24} + y_{s24}) - V_2 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4)) \\
h_{q34}(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4) &:= -V_3^2 \operatorname{Im}(y_{34} + y_{s34}) - V_3 \cdot V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4)) \\
h_{q35}(\delta_3, \delta_5, V_3, V_5) &:= -V_3^2 \operatorname{Im}(y_{35} + y_{s35}) - V_3 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5)) \\
h_{q45}(\delta_4, \delta_5, V_4, V_5) &:= -V_4^2 \operatorname{Im}(y_{45} + y_{s45}) - V_4 \cdot V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5)) \\
h_{q2}(\delta_2, \delta_4, V_1, V_2, V_4) &:= -V_2^2 (\operatorname{Im}(Y_{2,2})) - V_2 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{21}) \sin(\delta_2 - \delta_1) - \operatorname{Im}(y_{21}) \cos(\delta_2 - \delta_1)) \\
&+ V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{24}) \sin(\delta_2 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{24}) \cos(\delta_2 - \delta_4))] \\
h_{q3}(\delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_3, V_4, V_5) &:= -V_3^2 (\operatorname{Im}(Y_{3,3})) - V_3 \cdot [V_1 \cdot (\operatorname{Re}(y_{31}) \sin(\delta_3 - \delta_1) - \operatorname{Im}(y_{31}) \cos(\delta_3 - \delta_1)) \\
&+ V_4 \cdot (\operatorname{Re}(y_{34}) \sin(\delta_3 - \delta_4) - \operatorname{Im}(y_{34}) \cos(\delta_3 - \delta_4)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{35}) \sin(\delta_3 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{35}) \cos(\delta_3 - \delta_5))] \\
h_{q4}(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_2, V_3, V_4, V_5) &:= -V_4^2 (\operatorname{Im}(Y_{4,4})) - V_4 \cdot [V_2 \cdot (\operatorname{Re}(y_{42}) \sin(\delta_4 - \delta_2) - \operatorname{Im}(y_{42}) \cos(\delta_4 - \delta_2)) \\
&+ V_3 \cdot (\operatorname{Re}(y_{43}) \sin(\delta_4 - \delta_3) - \operatorname{Im}(y_{43}) \cos(\delta_4 - \delta_3)) + V_5 \cdot (\operatorname{Re}(y_{45}) \sin(\delta_4 - \delta_5) - \operatorname{Im}(y_{45}) \cos(\delta_4 - \delta_5))] \\
h_{v2}(V_2) &:= V_2 \\
h_{v3}(V_3) &:= V_3 \\
h_{v4}(V_4) &:= V_4
\end{aligned}$$

Σχηματισμός του πίνακα h:

$$h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) := \begin{pmatrix} h_{p12}(\delta_2, V_1, V_2) \\ h_{p13}(\delta_3, V_1, V_3) \\ h_{p24}(\delta_2, \delta_4, V_2, V_4) \\ h_{p34}(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4) \\ h_{p35}(\delta_3, \delta_5, V_3, V_5) \\ h_{p45}(\delta_4, \delta_5, V_4, V_5) \\ h_{p2}(\delta_2, \delta_4, V_1, V_2, V_4) \\ h_{p3}(\delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_3, V_4, V_5) \\ h_{p4}(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_2, V_3, V_4, V_5) \\ h_{q12}(\delta_2, V_1, V_2) \\ h_{q13}(\delta_3, V_1, V_3) \\ h_{q24}(\delta_2, \delta_4, V_2, V_4) \\ h_{q34}(\delta_3, \delta_4, V_3, V_4) \\ h_{q35}(\delta_3, \delta_5, V_3, V_5) \\ h_{q45}(\delta_4, \delta_5, V_4, V_5) \\ h_{q2}(\delta_2, \delta_4, V_1, V_2, V_4) \\ h_{q3}(\delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_3, V_4, V_5) \\ h_{q4}(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_2, V_3, V_4, V_5) \\ h_{v2}(V_2) \\ h_{v3}(V_3) \\ h_{v4}(V_4) \end{pmatrix}$$

Υπολογισμός διασποράς σ^2 :

	1
1	$4.5843264 \cdot 10^{-6}$
2	$7.7899085 \cdot 10^{-5}$
3	$5.3727365 \cdot 10^{-5}$
4	$1.6896342 \cdot 10^{-5}$
5	$1.6918144 \cdot 10^{-4}$
6	$9.9220307 \cdot 10^{-6}$
7	$1 \cdot 10^{-4}$
8	$1 \cdot 10^{-4}$
9	$1 \cdot 10^{-4}$
10	$8.3041941 \cdot 10^{-6}$
11	$1 \cdot 10^{-4}$
12	$7.8780155 \cdot 10^{-7}$
13	$5.0828483 \cdot 10^{-7}$
14	$1.2921904 \cdot 10^{-5}$
15	$4.7914383 \cdot 10^{-7}$
16	$1.0698172 \cdot 10^{-4}$
17	$1.6458754 \cdot 10^{-7}$
18	$1 \cdot 10^{-4}$
19	$4.4444444 \cdot 10^{-5}$
20	$4.0305568 \cdot 10^{-5}$
21	$4.0712907 \cdot 10^{-5}$

Ο πίνακας R προκύπτει με τριγωνοποίηση του πίνακα της διασποράς σ^2 :

$$R := \text{diag}(\sigma^2)$$

diag(R) =

	1
1	$4.584 \cdot 10^{-6}$
2	$7.79 \cdot 10^{-5}$
3	$5.373 \cdot 10^{-5}$
4	$1.69 \cdot 10^{-5}$
5	$1.692 \cdot 10^{-4}$
6	$9.922 \cdot 10^{-6}$
7	$1 \cdot 10^{-4}$
8	$1 \cdot 10^{-4}$
9	$1 \cdot 10^{-4}$
10	$8.304 \cdot 10^{-6}$
11	$1 \cdot 10^{-4}$
12	$7.878 \cdot 10^{-7}$
13	$5.083 \cdot 10^{-7}$
14	$1.292 \cdot 10^{-5}$
15	$4.791 \cdot 10^{-7}$
16	$1.07 \cdot 10^{-4}$
17	$1.646 \cdot 10^{-7}$
18	$1 \cdot 10^{-4}$
19	$4.444 \cdot 10^{-5}$
20	$4.031 \cdot 10^{-5}$
21	$4.071 \cdot 10^{-5}$

1^η επανάληψη της μεθόδου Newton Raphson:

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} := x_0$$

Υπολογισμός του πίνακα H:

$$i := 1..21$$

$$H_{i,1} := \frac{d}{d\delta_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,2} := \frac{d}{d\delta_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,3} := \frac{d}{d\delta_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,4} := \frac{d}{d\delta_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,5} := \frac{d}{dV_1} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,6} := \frac{d}{dV_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,7} := \frac{d}{dV_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,8} := \frac{d}{dV_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,9} := \frac{d}{dV_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$x_1 := x_0 + \left(H^T \cdot R^{-1} \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \left(z_{\text{final}} - h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) \right) = \begin{pmatrix} 0.02844 \\ -0.31827 \\ -0.25231 \\ -0.31942 \\ 1.16242 \\ 1.10634 \\ 1.01756 \\ 1.01944 \\ 1.01745 \end{pmatrix}$$

$$x_1 - x_0 = \begin{pmatrix} 0.028 \\ -0.318 \\ -0.252 \\ -0.319 \\ 0.162 \\ 0.106 \\ 0.018 \\ 0.019 \\ 0.017 \end{pmatrix}$$

2^η επανάληψη της μεθόδου Newton Raphson:

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} := x_1$$

$i := 1..21$

$$H_{i,1} := \frac{d}{d\delta_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,2} := \frac{d}{d\delta_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,3} := \frac{d}{d\delta_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,4} := \frac{d}{d\delta_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,5} := \frac{d}{dV_1} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,6} := \frac{d}{dV_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,7} := \frac{d}{dV_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,8} := \frac{d}{dV_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$H_{i,9} := \frac{d}{dV_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5); i$$

$$x_2 := x_1 + \left(H^T \cdot R^{-1} \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \left(z_{\text{final}} - h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) \right) = \begin{pmatrix} 0.026 \\ -0.336 \\ -0.262 \\ -0.337 \\ 1.061 \\ 1.011 \\ 0.96 \\ 0.965 \\ 0.96 \end{pmatrix}$$

$$x_2 - x_1 = \begin{pmatrix} -2.038 \times 10^{-3} \\ -0.017 \\ -9.298 \times 10^{-3} \\ -0.018 \\ -0.101 \\ -0.095 \\ -0.058 \\ -0.055 \\ -0.057 \end{pmatrix}$$

3^η επανάληψη της μεθόδου Newton Raphson:

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{pmatrix} := x_2$$

$i := 1..21$

$$H_{i,1} := \frac{d}{d\delta_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,2} := \frac{d}{d\delta_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,3} := \frac{d}{d\delta_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,4} := \frac{d}{d\delta_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,5} := \frac{d}{dV_1} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,6} := \frac{d}{dV_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,7} := \frac{d}{dV_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,8} := \frac{d}{dV_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,9} := \frac{d}{dV_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$x_3 := x_2 + \left(H^T \cdot R^{-1} \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \left(z_{\text{final}} - h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) \right) = \begin{pmatrix} 0.026 \\ -0.336 \\ -0.261 \\ -0.337 \\ 1.059 \\ 1.009 \\ 0.96 \\ 0.965 \\ 0.961 \end{pmatrix}$$

$$x_3 - x_2 = \begin{pmatrix} -4.99 \times 10^{-4} \\ -4.597 \times 10^{-4} \\ 1.656 \times 10^{-4} \\ -4.725 \times 10^{-4} \\ -2.709 \times 10^{-3} \\ -2.4 \times 10^{-3} \\ 5.026 \times 10^{-4} \\ 6.764 \times 10^{-4} \\ 5.167 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

4^η επανάληψη της μεθόδου Newton Raphson:

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} := x_3$$

$i := 1..21$

$$H_{i,1} := \frac{d}{d\delta_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,2} := \frac{d}{d\delta_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,3} := \frac{d}{d\delta_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,4} := \frac{d}{d\delta_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,5} := \frac{d}{dV_1} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,6} := \frac{d}{dV_2} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,7} := \frac{d}{dV_3} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,8} := \frac{d}{dV_4} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$H_{i,9} := \frac{d}{dV_5} h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5);$$

$$x_4 := x_3 + \left(H^T \cdot R^{-1} \cdot H \right)^{-1} \cdot H^T \cdot R^{-1} \left(z_{\text{final}} - h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) \right) = \begin{pmatrix} 0.026 \\ -0.336 \\ -0.261 \\ -0.337 \\ 1.059 \\ 1.009 \\ 0.96 \\ 0.965 \\ 0.961 \end{pmatrix}$$

$$x_4 - x_3 = \begin{pmatrix} -2.615 \times 10^{-6} \\ 8.318 \times 10^{-6} \\ 5.813 \times 10^{-6} \\ 8.361 \times 10^{-6} \\ 1.566 \times 10^{-6} \\ 2.202 \times 10^{-6} \\ 7.005 \times 10^{-6} \\ 6.814 \times 10^{-6} \\ 7.013 \times 10^{-6} \end{pmatrix}$$

Παρατήρηση: Οι επαναλήψεις δε θα συνεχιστούν, εφόσον η διαφορά κάθε στοιχείου του ενός διανύσματος από το προηγούμενο έπεσε κάτω από το επιθυμητό όριο του 10^{-3} .

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} := x_4$$

$$\begin{pmatrix} \delta_2 \\ \delta_3 \\ \delta_4 \\ \delta_5 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.026 \\ -0.336 \\ -0.261 \\ -0.337 \\ 1.059 \\ 1.009 \\ 0.96 \\ 0.965 \\ 0.961 \end{pmatrix}$$

$$\delta_1 = 0 \cdot \text{deg}$$

$$\delta_2 = 1.484 \cdot \text{deg}$$

$$\delta_3 = -19.255 \cdot \text{deg}$$

$$\delta_4 = -14.979 \cdot \text{deg}$$

$$\delta_5 = -19.331 \cdot \text{deg}$$

3. Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένης μέτρησης-Μήτρα διασποράς της εκτίμησης κατάστασης-Μήτρα διασποράς των υπολοίπων

Υπολογισμός μήτρας διασποράς της εκτίμησης κατάστασης:

$$\Sigma_{\hat{x}} := \left(H^T R^{-1} H \right)^{-1}$$

$$w := \text{identity}(21) - H \cdot \Sigma_{\hat{x}} \cdot H^T R^{-1}$$

Υπολογισμός μήτρας διασποράς των υπολοίπων:

$$\Sigma_r := w R$$

Υπολογισμός της μήτρας των υπολοίπων:

$$r := z_{\text{final}} - h(\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) =$$

	1
1	$2.749 \cdot 10^{-5}$
2	-0.016
3	$8.714 \cdot 10^{-4}$
4	$-6.554 \cdot 10^{-3}$
5	0.025
6	$-3.839 \cdot 10^{-3}$
7	$3.371 \cdot 10^{-3}$
8	-0.015
9	-0.016
10	$-7.137 \cdot 10^{-4}$
11	0.039
12	$-5.284 \cdot 10^{-4}$
13	$-1.17 \cdot 10^{-5}$
14	$5.354 \cdot 10^{-4}$
15	$1.083 \cdot 10^{-4}$
16	$-2.043 \cdot 10^{-3}$
17	$-6.789 \cdot 10^{-6}$
18	-0.025
19	$2.555 \cdot 10^{-3}$
20	$-7.365 \cdot 10^{-3}$
21	$6.248 \cdot 10^{-3}$

Υπολογισμός κανονικοποιημένων υπολοίπων:

$i := 1..21$

$$r_{N_i} := \frac{|r_i|}{\sqrt{\sum r_{i,i}}}$$

	1
1	0.06
2	1.981
3	0.134
4	1.984
5	2.577
6	1.531
7	0.367
8	2.546
9	1.929
10	1.08
11	3.989
12	2.567
13	0.028
14	0.198
15	0.207
16	0.264
17	0.198
18	2.589
19	0.417
20	1.245
21	1.05