



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

**Εποπτεία Υποσταθμών Ηλεκτρικής Ενέργειας με
Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές στη Γλώσσα
Προγραμματισμού SCL**

Διπλωματική Εργασία

του

Γεωργίου Πολυχρόνη

Επιβλέπων: Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Εποπτεία Υποσταθμών Ηλεκτρικής Ενέργειας με Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές στη Γλώσσα Προγραμματισμού SCL

Διπλωματική Εργασία

του

Γεωργίου Πολυχρόνη

Επιβλέπων: Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 17^η Ιουλίου, 2015.

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

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Ιούλιος 2015

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

Copyright © – All rights reserved , 2015.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

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

Περίληψη

Με το πέρασμα των χρόνων ο αυτοματισμός των υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας διευρύνεται. Μία από τις αρχιτεκτονικές συστημάτων αυτοματοποίησης υποσταθμών βασίζεται στους Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (PLC). Τα PLC προγραμματίζονται σε διάφορες γλώσσες προγραμματισμού μεταξύ των οποίων και η ευρέως διαδεδομένη SCL. Σε αυτήν την εργασία αναπτύχθηκε λογισμικό στη γλώσσα SCL, το οποίο εστιάζει στη συλλογή δεδομένων και την εποπτεία υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας. Το λογισμικό αυτό δοκιμάζεται για χρήση σε προσομοιωμένους υποσταθμούς, αλλά και για το κέντρο ελέγχου ενέργειας. Οι υποσταθμοί συμμετέχουν στην εκτίμηση κατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου, κυρίως στην επεξεργασία τοπολογίας και την προεπεξεργασία των μετρήσεων. Χρησιμοποιούνται τοπολογικοί αλγόριθμοι, δηλαδή γραφοθεωρητικοί, στηριζόμενοι στον αλγόριθμο “διάσχισης κατά βάθος”. Το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί, είναι γενικό και ανεξάρτητο της τοπολογίας του υποσταθμού. Δύναται να ρυθμιστεί και να τροποποιηθεί για άλλη τοπολογία σχετικά εύκολα, μεταβάλλοντας με προκαθορισμένο τρόπο μόνο ένα μέρος από το συνολικό πρόγραμμα. Το πρόγραμμα του υποσταθμού προσαρμόζεται στις τρέχουσες συνθήκες, για παράδειγμα αν χαλάσει ένας μετρητής το λαμβάνει υπόψιν στους υπολογισμούς, τόσο στο αποτέλεσμα, όσο και στο αν είναι εφικτή η εξαγωγή αποτελέσματος. Παρομοίως, το λογισμικό του κέντρου ελέγχου δύναται να ρυθμιστεί και να τροποποιηθεί για άλλα δίκτυα μεταβάλλοντας ένα μέρος του αρχικού προγράμματος. Επιπλέον, η επικοινωνία του κέντρου ελέγχου με τους υποσταθμούς είναι ασύγχρονη επιτρέποντας την ανεξάρτητη λειτουργία όλων των ελεγκτών. Τέλος, έχουν αναπτυχθεί δυναμικές οθόνες οι οποίες πληροφορούν για την κατάσταση των υποσταθμών και του ηλεκτρικού δικτύου. Επισημαίνεται ότι τα προγράμματα που έχουν αναπτυχθεί είναι δυναμικά, δηλαδή το μέγεθος των δεδομένων που εισάγονται μπορεί να μεταβληθεί παρά τη στατικότητα της χρησιμοποιούμενης γλώσσας. Το λογισμικό δοκιμάστηκε σε 12 διαφορετικές τοπολογίες υποσταθμών, καθώς και στο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE.

Λέξεις Κλειδιά

Υποσταθμός ηλεκτρικής ενέργειας, Αυτοματισμός υποσταθμών, PLC, SCL, Κατανεμημένη επεξεργασία, Επεξεργασία τοπολογίας, Προεπεξεργασία μετρήσεων, Εποπτεία και έλεγχος

Abstract

Over time electric power substation automation expands. One of the substation automation architectures is based on Programmable Logic Controllers, PLCs. PLCs can be programmed using several programming languages including widespread SCL. SCL software has been developed focusing data acquisition and supervision. The software is tested “in silico” for both substations and the control center. Substation automation contributes in state estimation of electric grid, mainly in topology processing and measurement preprocessing. The used algorithms are graph algorithms doing “depth-first search”. The developed software is generic and independent of specific substation topologies. The substation program can be configured and reprogrammed to work for a different topology, by changing in a predefined way a part of the whole program. The program conforms to current situation, for example if a meter breaks down, this is taken into account in both the result and its extractability. Similarly, the control center program can be readjusted for new networks, by changing a part of the initial version. Communication between substations and the control center is asynchronous enabling independent function of the PLCs. Finally, dynamic screens inform about the situation in substations and the network. Note that the software is dynamic, meaning the amount of data inserted can change, although SCL is a static programming language. The software has been tested on 12 different substation topologies, and on the 14-bus IEEE test system.

Keywords

Substation, Substation Automation, PLC, SCL, Distributed computing, Topology processing, Measurement preprocessing, Supervision and Control

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη βοήθεια και στήριξή τους. Επίσης, ευχαριστώ πολύ τους δασκάλους και τους καθηγητές σε όλες τις βαθμίδες της εκπαίδευσης για τη γνώση που μου έδωσαν. Τέλος, ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή Γεώργιο Κορρέ για την καθοδήγηση και στήριξή του και την Κατερίνα Ιορδανίδου για τη φιλολογική επιμέλεια.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	13
Κατάλογος σχημάτων	15
Κατάλογος πινάκων	19
1 Ορισμοί	21
1.1 Συντμήσεις	21
1.2 Μικρό αγγλοελληνικό λεξικό όρων υποσταθμού ηλεκτρικής ενέργειας	22
1.3 Ειδικοί όροι	22
1.3.1 Υλικό και λογισμικό	22
1.3.2 Φυσικά μεγέθη και σφάλματα	23
1.3.3 Εκτιμητής κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	24
1.4 Τμήματα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	24
1.5 Γράφοι και κόμβοι	25
1.6 Ονόματα των τοπολογιών των υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας	26
2 Αναδρομή και σύγχρονες τάσεις στην τεχνολογία υποσταθμών	27
2.1 Ιστορική αναδρομή	27
2.1.1 Από τον ηλεκτρονόμο στα συστήματα ευρείας περιοχής	27
2.1.2 Ιστορία των τοπικών ηλεκτρονικών συστημάτων	30
2.1.3 Συλλογή δεδομένων	31
2.1.4 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας	36
2.2 Σύγχρονη τεχνολογία	38
2.2.1 Αρχιτεκτονικές συστημάτων αυτοματισμού	38
2.2.2 SCADA	39
2.2.3 Σύστημα συγχρονισμένο για μέτρηση φασιθετών	40
2.3 Τηλεμετρία	41
2.4 Ανάπτυξη των PLC	42
2.5 Τάσεις για το μέλλον	43
2.5.1 Νέες προκλήσεις αξιοπιστίας	44
2.5.2 Οπτικοποίηση πληροφοριών	45
2.5.3 Άμεση εκτίμηση κατάστασης	45
2.5.4 Ενιαίο πρωτόκολλο επικοινωνίας	45

2.5.5	Ασφάλεια στο δίκτυο διακίνησης πληροφοριών	46
2.5.6	Ευφυή συστήματα	46
2.5.7	<i>Ο υποσταθμός του μέλλοντος</i>	46
2.5.8	<i>Προστασία βασισμένη στην εκτίμηση κατάστασης</i>	47
2.5.9	Επέκταση κύκλου ζωής του εξοπλισμού	50
2.5.10	Συμβολή των κοινωνικών τάσεων	50
3	Σύστημα διαχείρισης σύγχρονων υποσταθμών	53
3.1	Αυτοματοποίηση υποσταθμών	54
3.1.1	Λόγοι αυτοματοποίησης υποσταθμού	54
3.2	Συλλογή δεδομένων	56
3.2.1	Υποσύστημα οργάνων μέτρησης	56
3.2.2	Έμμεση μέτρηση δεδομένων	57
3.3	SCADA	58
3.3.1	Επικοινωνίες	58
3.3.2	Ενιαία βάση δεδομένων	59
3.4	Σύστημα διαχείρισης ενέργειας	59
3.4.1	Στρατηγική ελέγχου	60
3.4.2	Επεξεργαστής τοπολογίας	61
3.4.3	Εκτίμηση κατάστασης	62
3.4.4	Ροές ισχύος	62
3.5	Εποπτικός έλεγχος	62
3.6	Διαφορές της εργασίας με έναν σύγχρονο υποσταθμό	63
3.6.1	Συλλογή δεδομένων	63
3.6.2	Κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων	63
3.6.3	Λογισμικό	63
4	Θεωρητική τεκμηρίωση του λογισμικού	65
4.1	Γραφοθεωρητική προσέγγιση	65
4.1.1	Γραφοθεωρητική προσέγγιση υποσταθμών	65
4.1.2	Γραφοθεωρητική προσέγγιση ηλεκτρικού δικτύου	66
4.2	Υπολογισμός κατάστασης υποσταθμού	66
4.2.1	Αλγόριθμος διάσχισης γράφου	67
4.2.2	Σφάλμα μετρητή	68
4.2.3	Τάση διασυνδεδετικού κόμβου	69
4.2.4	Ροή ισχύος διασυνδεδετικού κόμβου	70
4.2.5	Εγχύσεις ισχύος του υποσταθμού	71
4.3	Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού δικτύου	72
4.3.1	Παραδοχές ηλεκτρικού δικτύου	72
4.3.2	Διάνυσμα κατάστασης και διάνυσμα μετρήσεων	74
4.3.3	Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας	75
4.3.4	Επαναληπτική εξίσωση συστήματος	76
4.3.5	Συνθήκη παρατηρησιμότητας	77
4.3.6	Εκτίμηση ροών και εγχύσεων ισχύος	77
5	Περιγραφή του υλικού των υποσταθμών και του κέντρου ελέγχου	79
5.1	Απαιτήσεις υλικού	79
5.2	Δίκτυο	79
5.3	PLC κέντρου ελέγχου	81

5.4	PLC υποσταθμού	81
6	Περιγραφή του λογισμικού των υποσταθμών και του κέντρου ελέγχου	83
6.1	Η γλώσσα SCL	83
6.2	Πρόγραμμα υποσταθμών	84
6.2.1	Δομές δεδομένων λογισμικού υποσταθμού	84
6.2.2	Τμήμα κώδικα “Configuration”	85
6.2.3	Δομή δεδομένων “SCADA information”	87
6.2.4	Εξαγωγή αποτελεσμάτων και αποστολή στο κέντρο ελέγχου	89
6.3	Πρόγραμμα κέντρου ελέγχου	89
6.3.1	Δομές δεδομένων του κέντρου ελέγχου	91
6.3.2	Τμήμα κώδικα “Configuration”	91
6.3.3	Λήψη δεδομένων	92
6.3.4	Μετάφραση κόμβων	93
6.3.5	Δομή δεδομένων “State data”	94
6.3.6	Εκτίμηση	94
6.3.7	Δομή δεδομένων SCADA	94
6.4	Διεπιφάνεια ανθρώπου μηχανής	96
6.4.1	Οργάνωση οθονών	96
6.4.2	Οθόνη υποσταθμού	97
6.4.3	Οθόνη κέντρου ελέγχου	98
7	Διατάξεις υποσταθμών	101
7.1	Διάταξη “Single Bus, Single Breaker”	102
7.2	Διάταξη “Main and Transfer”	102
7.3	Διάταξη “Double Bus, Single Breaker”	105
7.4	Διάταξη “Double Bus, Double Breaker”	105
7.5	Διάταξη “Ring Bus”	108
7.6	Διάταξη “Breaker-and-a-Half”	110
7.7	Διάταξη “Breaker and a Third”	110
7.8	Διάταξη “Ring Tripod”	113
7.9	Διάταξη “Ring Bridge”	113
7.10	Διάταξη “Crossed Ring”	113
7.11	Διάταξη “4×6 Network”	113
7.12	Διάταξη “Pyramid Station”	118
8	Εφαρμογές	121
8.1	Δίκτυο τριών ζυγών	121
8.2	Δίκτυο δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE	123
9	Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση	131
9.1	Λογισμικό	131
9.2	Περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	131
9.3	Έλεγχοι ορθής λειτουργίας	132
9.4	Επικοινωνία υποσταθμού με κέντρο ελέγχου	132
9.5	Άλλες προτάσεις	132
10	Παράρτημα	133
	Βιβλιογραφία	161

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Σύγκριση τριών γενεών προστατευτικού εξοπλισμού($Z<,I>$ ρελέ): α Ηλεκτρομηχανικό (R1KZ4, χωρίς περίβλημα), β στατικό, γ ψηφιακό (MICOM P127) (Οι εικόνες λήφθηκαν από το εργαστήριο προστασίας στο WUT, Βρότσλαφ, Πολωνία) [RSW11, σελ. 16].	31
2.2	Ιστορικό σχέδιο υποσταθμού	32
2.3	Εισαγωγή SCADA και RTU	32
2.4	Εισαγωγή IED	33
2.5	Ενοποίηση RTU με IED	33
2.6	Διαχείριση αναγκών Συντήρησης	34
2.7	Η ιδέα του εμβόλιμου ελεγκτή	34
2.8	Τυπικό κανάλι οργάνων για λήψη δεδομένων.	35
2.9	Οι καταστάσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [Gir10, σελ. 9].	37
2.10	Το EMS το 1980, 1990 [Gir10, σελ. 20].	37
2.11	Ψηφιακές συσκευές που έχουν οι σύγχρονοι υποσταθμοί. Πάνω αριστερά IED, πάνω δεξιά RTU, κάτω αριστερά PLC, κάτω δεξιά PMU.	39
2.12	Τα συστήματα PMU συγχρονίζονται μέσω GPS.	40
2.13	ραδιοφωνικό SCADA	42
2.14	Η φιλοσοφία του κεντρικού ελέγχου έναντι της φιλοσοφίας τοπικού ελέγχου.	43
2.15	Όραμα για το μέλλον του ενεργειακού οικοσυστήματος [Gir10, σελ. 60].	44
2.16	Ιδέα για ενσωμάτωση συλλογής δεδομένων, προστασίας, ελέγχου και επικοινωνιών [Mel12, σελ. 1.42].	48
2.17	Προσέγγιση δυναμικών ρελέ με δυναμική εκτίμηση κατάστασης [Mel12, σελ. 1.43].	50
3.1	Σχέδιο σύγχρονου υποσταθμού [Kez13].	53
3.2	Αριστερά ηλεκτρολογικό σχέδιο υποσταθμού. Δεξιά η τοπολογία υπό μορφή γραφου [Mon99, σελ. 146].	61
3.3	Μετατροπή εγχύσεων (μέση) και ροών (κάτω) ισχύος από “ζυγός-διακόπτης-αποζεύκτης” σε “ζυγός-κλάδος” [Mon99, σελ. 154].	61
4.1	Μοντέλο “π” γραμμής μεταφοράς μεταξύ των κόμβων i και j	73
4.2	Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.	74
4.3	Ροή και έγχυση ισχύος.	74
4.4	Τύποι υπολογισμού στοιχείων της ιακωβιανής μήτρας H [Kor].	78
5.1	Παράδειγμα ψηφιακής και αναλογικής εισόδου ενός PLC. Η αναλογική είσοδος (τάση) απαιτεί μετρητικό μετασχηματιστή, μετρητή και μορφομετατροπέα. Η ψηφιακή απαιτεί κατάλληλο διακόπτη. Ωστόσο, λόγω της απουσίας του κατάλληλου εξοπλισμού οι εισοδοί δίνονται έτοιμες για τις ανάγκες αυτής της εργασίας.	80

5.2	Παράδειγμα δικτύου PLC και HMI σε δίκτυο τριών υποσταθμών. Αριστερά είναι το PLC του κέντρου ελέγχου, δεξιά το HMI και οι τρεις συσκευές στο κέντρο είναι PLC υποσταθμών. Συνδέονται με καλώδιο PN/IE, ενώ φαίνονται οι διευθύνσεις.	80
5.3	Πάνω δηλώνεται ο υποσταθμός στο τμήμα “Configuration” του κέντρου ελέγχου. Η διεύθυνση πρέπει να είναι ίδια με αυτήν της καρτέλας με τις διευθύνσεις των συνδέσεων.	81
5.4	Οι μονάδες που αποτελούν το PLC της διάταξης “breaker and a half”. Πάνω από κάθε μονάδα είναι η αριθμησή της. 0: μονάδα τροφοδοσίας, 1: CPU, 2: μονάδα ψηφιακών εισόδων, 3 έως 5: μονάδες αναλογικών εισόδων	82
6.1	Αριστερά: ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρολογικό σχέδιο υποσταθμού “breaker and a half”. Δεξιά: η δήλωσή της τοπολογίας του στο “Configuration”.	86
6.2	Σχεδιάγραμμα του λογισμικού των υποσταθμών. Τα κόκκινα βέλη δηλώνουν κλήση, τα πράσινα βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εντός του PLC του υποσταθμού, τα μπλε βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εκτός PLC.	90
6.3	Παραλαβή, αποκωδικοποίηση και ενσωμάτωση των δεδομένων από τους υποσταθμούς στο κέντρο ελέγχου. Στην εικόνα φαίνεται ότι υπάρχουν διαφορετικά στιγμιότυπα των δομών “Received data” και “Substation data” ανά υποσταθμό.	92
6.4	Η μετάφραση κόμβων προσδιορίζει πού πρέπει να μπει το κάθε κομμάτι, για να σχηματιστεί η συνολική εικόνα του δικτύου.	93
6.5	Σχεδιάγραμμα του λογισμικού του κέντρου ελέγχου. Τα κόκκινα βέλη δηλώνουν κλήση, τα πράσινα βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εντός του PLC του υποσταθμού, τα μπλε βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εκτός PLC.	95
6.6	Τυπική οθόνη με επισήμανση των στοιχείων της.	97
6.7	Παραδείγματα κανονικών και μη μετρήσεων.	97
6.8	Τυπική οθόνη ενός υποσταθμού εν λειτουργία με επισήμανση των στοιχείων της.	98
6.9	Τυπική οθόνη ενός κέντρου ελέγχου εν λειτουργία με επισήμανση των στοιχείων της.	99
7.1	Τοπολογία “Single Bus, Single Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	103
7.2	Τοπολογία “Main and Transfer”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέση η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.	104
7.3	Τοπολογία “Double Bus, Single Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέση η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.	106
7.4	Τοπολογία “Double Bus, Double Breaker Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	107
7.5	Τοπολογία “Ring Bus”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	109
7.6	Τοπολογία “Breaker-and-a-Half”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	111
7.7	Τοπολογία “Breaker and a Third”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	112
7.8	Τοπολογία “Ring Tripod”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	114

7.9	Τοπολογία “Ring Bridge”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέση η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.	115
7.10	Τοπολογία “Crossed Ring”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	116
7.11	Τοπολογία “4×6 Network”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.	117
7.12	Τοπολογία “Pyramid Station”, ηλεκτρολογικό σχέδιο.	118
7.13	Τοπολογία “Pyramid Station”. Πάνω η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.	119
8.1	Πάνω οθόνη του υποσταθμού 3, κάτω δίκτυο των τριών ζυγών.	122
8.2	Τοπολογία και μετρήσεις του δοκιμαστικού δικτύου 14 ζυγών [NKM09][EJ01].	125
8.3	Η τοπική αρίθμηση του υποσταθμού 10-14. Αριστερά η αρχική τοπολογία, δεξιά η τροποποιημένη.	126
8.4	Η τοπική αρίθμηση του υποσταθμού 10-14.	128
8.5	Η οθόνη του υποσταθμού 10-14, όταν αυτός είναι εν λειτουργία.	128
8.6	Η οθόνη του ηλεκτρικού δικτύου εν λειτουργία.	129

Κατάλογος πινάκων

8.1	Χαρακτηριστικά του δικτύου 14 ζυγών της IEEE [NKM09] [Chr00].	123
8.2	Οι μετρήσεις του δικτύου [NKM09].	123
8.3	Αναγωγή των άκρων των γραμμών μεταφοράς στους αντίστοιχους κόμβους [NKM09].	124
8.4	Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης, σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές.	127

Κεφάλαιο 1

Ορισμοί

Σε αυτό το κεφάλαιο είναι συγκεντρωμένοι όλοι οι όροι, οι οποίοι κρίνεται ότι πρέπει να οριστούν. Οι όροι έχουν ομαδοποιηθεί ανάλογα με τη συνάφειά τους σε υποκεφάλαια. Κάθε υποκεφάλαιο περιέχει όρους σχετικούς με αυτό που δηλώνει ο τίτλος του.

1.1 Συντμήσεις

Όλες οι συντμήσεις είναι αγγλικές, γιατί έχουν εδραιωθεί διεθνώς. Παρατίθενται ως έχουν.

- PLC: “Programmable Logic Controller”, προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής. Ηλεκτρονικό υπολογιστικό σύστημα ειδικού σκοπού, προορίζεται για τοπικό έλεγχο σε βιομηχανικές διεργασίες.
- SCL: “Structured Control Language”, *δομημένη γλώσσα ελέγχου*¹. Η δομημένη γλώσσα προγραμματισμού στην οποία προγραμματίζονται οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές της SIEMENS.
- HMI: “Human-Machine Interface”, διεπαφή ανθρώπου-μηχανής. Γραφικό περιβάλλον για ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ανθρώπου και μηχανής, για παράδειγμα μεταξύ του χειριστή και του PLC.
- CPU: “Central Processing Unit”, κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Μονάδα υλικού του PLC, κάθε PLC περιέχει μια CPU.
- SCADA: “Supervisory Control And Data Acquisition”, εποπτικός έλεγχος και συλλογή δεδομένων.
- RTU: “Remote Terminal Unit”, απομακρυσμένη τερματική μονάδα. Ηλεκτρονικό υπολογιστικό σύστημα που διαχειρίζεται την επικοινωνία του υποσταθμού, στον οποίο ανήκει, με το κέντρο ελέγχου.
- IED: “Intelligent Electronic Device”, ευφυής ηλεκτρονική συσκευή. Ηλεκτρονικό υπολογιστικό σύστημα ειδικού σκοπού. Παρέχει ηλεκτρική προστασία σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ διαθέτει δυνατότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας [Str03, σελ. 48].
- SAS: “Substation Automation System”, σύστημα αυτοματισμού υποσταθμού. Το σύνολο των αυτοματισμών του υποσταθμού ηλεκτρικής ενέργειας.

¹Η φράση “Structured Control Language” είναι όνομα, οπότε η χρήση της μετάφρασης δεν είναι δόκιμη.

- PC: “Personal Computer”, προσωπικός υπολογιστής.
Εννοείται εξειδικευμένα ο ηλεκτρονικός υπολογιστής γενικού σκοπού που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία.
- PMU: “Phasor Measurement Unit”, μονάδα μέτρησης φασιθέτη.
Πρόκειται για μετρητικό εξοπλισμό συγχρονισμένο μέσω GPS, ο οποίος μετράει φασιθέτες.
- SE: “State Estimation”, εκτίμηση κατάστασης.
Εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, για παράδειγμα ποιά είναι τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων των ζυγών.
- ECC: “Energy Control Center”, κέντρα ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας.
- EMS: “Energy Management System”, σύστημα διαχείρισης ενέργειας.
Λογισμικό που διαχειρίζεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.
- CT: “Current Transformer”, μετασχηματιστής έντασης.
Μετασχηματιστής που μετασχηματίζει την ένταση εντός των ορίων της μετρητικής συσκευής.
- VT: “Voltage Transformer”, μετασχηματιστής τάσης.
Μετασχηματιστής που μετασχηματίζει την τάση εντός των ορίων της μετρητικής συσκευής.
- LAN: “Local Area Network”, δίκτυο τοπικής περιοχής.
Εννοείται εξειδικευμένα το δίκτυο των υπολογιστικών συστημάτων του υποσταθμού.
- GPS: “Global Positioning System”, παγκόσμιο σύστημα στοιχειοθέτησης.

1.2 Μικρό αγγλοελληνικό λεξικό όρων υποσταθμού ηλεκτρικής ενέργειας

Κάποιοι όροι που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την αναφορά, αν και εδραιωμένοι στην αγγλική βιβλιογραφία, δεν αποδίδονται στην ελληνική, ή έχουν διάφορες μεταφράσεις. Οπότε παρατίθεται η αντιστοιχία των αγγλικών και ελληνικών όρων που χρησιμοποιείται σε αυτήν την εργασία.

- relay: ρελέ, αυτόματος διακόπτης
- circuit breaker: διακόπτης
- switch: αποζεύκτης ή μεταγωγός ανάλογα με τα συμφραζόμενα
- (substation) bay: οδός παροχής, κλάδος
- bus: ζυγός ή δίαυλος ανάλογα με τα συμφραζόμενα
- multifunctional relay: ρελέ πολλαπλών χρήσεων

1.3 Ειδικοί όροι

1.3.1 Υλικό και λογισμικό

- “Υλικό”: Είναι οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές, η επιφάνεια διεπαφής χρήστη και τα καλώδια, με τα οποία συνδέονται μεταξύ τους.
Όταν γίνεται λόγος για “χρησιμοποίηση” του υλικού ή κάποιου μέρους του, εννοείται η προσομοίωση του αντίστοιχου υλικού.

- “Κύκλος” ή “κύκλος λειτουργίας” (αγγλιστί “processing cycle”): Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής λαμβάνει δεδομένα από τις εισόδους, εκτελεί το πρόγραμμα που έχει φορτώσει ο χρήστης, και ύστερα εξάγει τα αποτελέσματα. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς, “κυκλικά” κατά τη λειτουργία του ελεγκτή. Μια επανάληψη αυτής της διαδικασίας ονομάζεται “κύκλος”.
- “Έτοιμη συνάρτηση” (αγγλιστί “built-in function”) ονομάζεται μια μέθοδος η οποία είναι διαθέσιμη στην εργοστασιακή έκδοση του TIA portal. Αυτές οι συναρτήσεις είναι έτοιμες για χρήση, απαιτώντας από τον προγραμματιστή να ορίσει μόνο τα ορίσματά τους.
- “Δομή”: Εννοείται η δομή δεδομένων, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Αν μια δομή δεδομένων είναι πίνακας, τότε η i -στή θέση του πίνακα αναφέρεται στον i -στό κόμβο. Σε πολυδιάστατους πίνακες, οι δύο πρώτοι δείκτες i, j αφορούν τους κόμβους i, j με φορά από τον κόμβο i προς τον κόμβο j . Εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.
- “Πληροφορίες εποπτείας”: είναι τα δεδομένα που προσπελαύνει η διεπαφή.
- “Διεπαφή”: σε αυτήν την εργασία εξειδικεύεται συσκευασμένα στη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής.
- “Οθόνη” είναι μια δυναμική εικόνα που εμφανίζεται στη διεπαφή.
- “Οθόνη υποσταθμού” ονομάζεται η οθόνη που εμφανίζει τις πληροφορίες που αφορούν τον υποσταθμό.
- Η “οθόνη κέντρου ελέγχου” εμφανίζει πληροφορίες για όλο το δίκτυο που εποπτεύεται.
- “Πλαίσιο”: Σύνολο γραφικών της οθόνης του κέντρου ελέγχου που αναφέρεται σε συγκεκριμένο υποσταθμό.
- “Σχέδιο”: Ηλεκτρολογικό σχέδιο ή δυναμικό γραφικό για εποπτεία. Ακολουθεί τις ίδιες συμβάσεις με το ηλεκτρολογικό σχέδιο

1.3.2 Φυσικά μεγέθη και σφάλματα

“Μέγεθος” είναι ένα από τα φυσικά μεγέθη: τάση, ροή ή έγχυση ενεργού ή άεργου ισχύος.

- “Αγωγιμότητα”: Εννοείται σύνθετη αγωγιμότητα.
- “Αντίσταση”: Εννοείται σύνθετη αντίσταση. Εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά, οπότε εννοείται ωμική αντίσταση.
- “Μηδενική αντίσταση”: Εννοείται αμελητέα αντίσταση.
- “Αμελητέα αντίσταση”: Αντίσταση η οποία δε λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς, γιατί είναι πολύ μικρή.
- “Πολύ μεγάλη αντίσταση”: Αντίσταση η οποία δε λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς, γιατί είναι πολύ μεγάλη.

Με τη λέξη “σφάλμα” εννοείται ένα από τα παρακάτω:

- Μετρητικό σφάλμα: Το μετρητικό σφάλμα είναι προϊόν κάποιας μέτρησης. Τα μετρητικά σφάλματα είναι εγγενή χαρακτηριστικά των μετρήσεων.

- **Τυπική απόκλιση:** Τυπικά, το μετρητικό σφάλμα ερμηνεύεται ως η τυπική απόκλιση της γκαουσιανής πυκνότητας πιθανότητας των τιμών του μετρούμενου μεγέθους.
- **Σφάλμα προγραμματισμού:** Κάποιο λάθος υπάρχει στο τμήμα “Configuration”.
- **Σφάλμα λειτουργίας:** Ο υποσταθμός ή το κέντρο ελέγχου ή κάποιο μέρος του βρίσκεται σε εσφαλμένη κατάσταση.
- **Σφάλμα του PLC:** Σφάλμα που προέκυψε από τη λειτουργία του PLC.

1.3.3 Εκτιμητής κατάστασης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

- **“Εκτιμητής”:** Εκτιμητής κατάστασης, λογισμικό το οποίο εκτιμά την κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
- **“Γωνία”:** Η γωνία του φασιθέτη της τάσης σε σχέση με τη γωνία αναφοράς.
- **“Τάση”:** Το μέτρο του φασιθέτη της τάσης.
- **“Ροή ισχύος”:** Η τιμή της ενεργού ή άεργου ισχύος.

Το “διάνυσμα κατάστασης” είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που περιέχει τις τρέχουσες εκτιμήσεις των τάσεων και των γωνιών τους.

1.4 Τμήματα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Με τη λέξη “υποσταθμός” εννοείται ο υποσταθμός ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, στα επόμενα κεφάλαια η λέξη “υποσταθμός” μπορεί να αναφέρεται συνεκδοχικά:

- στον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή του υποσταθμού
- στην οθόνη του που αντιστοιχεί στη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (HMI)
- στο γράφο τοπολογίας ή λειτουργίας που περιγράφει την τρέχουσα διάταξη των στοιχείων του υποσταθμού

Με τη φράση “κέντρο ελέγχου” εννοείται το κέντρο ελέγχου του ηλεκτρικού δικτύου. Παρομοίως, στα επόμενα κεφάλαια η φράση “κέντρο ελέγχου” μπορεί να αναφέρεται συνεκδοχικά:

- στον προγραμματιζόμενο λογικό ελεγκτή του
- στην οθόνη του, που αντιστοιχεί στη διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (HMI)

Ο όρος “υποσταθμός” μπορεί να αναφέρεται σε συγκεκριμένο υποσταθμό ή αόριστα σε κάθε υποσταθμό ακόμα κι όταν χρησιμοποιείται στον ενικό αριθμό. Το κέντρο ελέγχου στην τρέχουσα μελέτη είναι ένα, οπότε ο όρος “κέντρο ελέγχου” είναι πάντα συγκεκριμένος και στον ενικό αριθμό.

Η λέξη “δίκτυο” μπορεί να αναφέρεται:

- κατά κύριο λόγο στο ηλεκτρικό δίκτυο
- σε κάποιες περιπτώσεις αναφέρεται σε δίκτυο υπολογιστών, συνήθως ως “δίκτυο πληροφοριών”

Η φράση “ηλεκτρικό δίκτυο” μπορεί να αναφέρεται:

- στο ηλεκτρικό δίκτυο
- στο γράφο που περιγράφει την τρέχουσα διάταξη των στοιχείων του ηλεκτρικού δικτύου

Είναι πιθανό σε κάποιο σημείο της αναφοράς να έχει χρησιμοποιηθεί η φράση “κέντρο ελέγχου” αντί της φράσης “ηλεκτρικό δίκτυο”.

Με τη λέξη “σύστημα” εννοείται:

- Το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Οι εγκαταστάσεις διαχείρισης του ηλεκτρικού δικτύου, όπως το σύνολο των PLC.
- Σύστημα γραμμικών εξισώσεων.

1.5 Γράφοι και κόμβοι

- “Γράφος διάταξης” του υποσταθμού: Γράφος που περιγράφει τη διάταξη και τη συνδεσμολογία των στοιχείων του υποσταθμού.
- “Γράφος λειτουργίας” του υποσταθμού: Γράφος που περιγράφει τα τρέχοντα αγωγήματα στοιχεία του υποσταθμού.
- “Γράφος υποσταθμού”: Εννοείται ο γράφος λειτουργίας του υποσταθμού, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.
- “Γράφος”: Εννοείται γράφος τοπολογίας ή λειτουργίας υποσταθμού ή γράφος του ηλεκτρικού δικτύου.

Γενικά, οι “κόμβοι” και οι “ακμές”, όταν αφορούν υποσταθμό, αφορούν το γράφο λειτουργίας, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

- Κόμβος: Εννοείται ένας κόμβος, ο ακέραιος αριθμός που τον αναπαριστά ή ο αντίστοιχος ζυγός.
- Υπάρχων κόμβος: Κόμβος υποσταθμού ο οποίος ορίζεται μέσω της συνάρτησης “Network” (δείτε υποκεφάλαιο 6.1).
- Διασυνδεδετικός κόμβος: Κόμβος υποσταθμού ο οποίος συνδέει τον υποσταθμό με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο.
- Κόμβος έγχυσης ισχύος: Κόμβος υποσταθμού ο οποίος συνδέεται με παθητικό ή ενεργητικό στοιχείο του υποσταθμού.
- Κοινός κόμβος: Υπάρχων κόμβος υποσταθμού ο οποίος δεν είναι διασυνδεδετικός ή έγχυσης ισχύος.
- Σημαινών κόμβος: Κόμβος διασυνδεδετικός ή έγχυσης ισχύος.
- Αντιπρόσωπος: Ο κόμβος ο οποίος αντιπροσωπεύει μια συνεκτική συνιστώσα του υποσταθμού.
- Γείτονες κόμβοι: Κόμβοι οι οποίοι συνδέονται με ακμή [CLRS10, σελ. Π-27].
- Ρίζα: Κόμβος από τον οποίο αρχίζει ένας γράφος τύπου “δέντρο” (ακυκλικός και μη κατευθυντικός). Στην παρούσα αναφορά, εννοείται ένας κόμβος από τον οποίο εκκινεί ένας αλγόριθμος διάσχισης.

Οι όροι “διάταξη”, “συνδεσμολογία” και “τοπολογία” χρησιμοποιούνται ως συνώνυμα στη συγκεκριμένη αναφορά.

- “Συνεκτική συνιστώσα”: Σύνολο κόμβων υποσταθμού μεταξύ των οποίων υπάρχει αγωγήμη σύνδεση. Συνήθως εννοείται η μεγαλύτερη δυνατή συνεκτική συνιστώσα, δηλαδή όλοι οι κόμβοι για τους οποίους υπάρχει αγωγήμη σύνδεση μεταξύ τους.
- “Συνιστώσα άγνωστων ροών”: Η, όχι κατά ανάγκη μέγιστη, συνεκτική συνιστώσα στην οποία δεν είναι γνωστή η ροή ισχύος μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων της.
- “Πίνακας συνεκτικών συνιστωσών”: Ένας πίνακας με πεδίο ορισμού και τιμών τους κόμβους ενός υποσταθμού, όπου η τιμή ενός κόμβου μέσω του πίνακα είναι ένας μικρότερος κόμβος που ανήκει στην ίδια συνεκτική συνιστώσα.

1.6 Ονόματα των τοπολογιών των υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας

- “Δακτυλιοειδής”: Η τοπολογία έχει σχήμα δακτυλίου, δηλαδή ο αντίστοιχος γράφος είναι μια κλειστή γραμμή.
- “Ενάμισι διακόπτη”: Εννοείται υποσταθμός, στον οποίον ο λόγος του πλήθους των διακοπών ως προς το πλήθος των γραμμών που συνδέονται στον υποσταθμό είναι 1,5. Είναι μετάφραση του αγγλικού όρου “breaker and a half”.

Δεν υπάρχει καθιερωμένη ελληνική ονοματολογία για τις τοπολογίες των υποσταθμών. Οπότε χρησιμοποιείται γενικά η αγγλική ονοματολογία, η οποία είναι καθιερωμένη διεθνώς.

Κεφάλαιο 2

Αναδρομή και σύγχρονες τάσεις στην τεχνολογία υποσταθμών

Η αυτοματοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αναπτύχθηκε στη σημερινή προηγμένη μορφή, εξαιτίας της τεχνολογικής ανάπτυξης σε ένα πλήθος από διαφορετικές βιομηχανίες. Αυτές οι βιομηχανίες παρατήρησαν τη δυνατότητα αξιοποίησης των τεχνολογιών τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές, όπως ο μεταγωγικός εξοπλισμός. Αυτές συνέβαλαν στις διάφορες αρχιτεκτονικές που είναι διαθέσιμες σήμερα για αυτοματοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [Str03, σελ. 7].

Οι αρχές λειτουργίας, καθώς και η φιλοσοφία, των συστημάτων προστασίας εξελίχθηκαν από τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ, στα ηλεκτρονικά, τα ψηφιακά και πλέον καταλήγει στα “συστήματα μέτρησης και προστασίας ευρείας περιοχής”. Η συλλογή δεδομένων πλέον συμπεριλαμβάνει τόσο μετρητικούς μετασηματιστές, όσο και συστήματα συγχρονισμένα με GPS. Η μεγάλη συσκότιση του 1965 της Νέας Υόρκης συνέβαλλε καταλυτικά στην ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Αναπτύχθηκαν συστήματα κεντρικού ελέγχου που στηρίζονται στην τηλεμετρία, αλλά και συστήματα τοπικού ελέγχου, όπως τα PLC. Τέλος, οι τάσεις για το μέλλον διαμορφώνονται από τις προκλήσεις και τις δυνατότητες που υπάρχουν.

2.1 Ιστορική αναδρομή

2.1.1 Από τον ηλεκτρονόμο στα συστήματα ευρείας περιοχής

“Η τεχνολογία κατασκευής των ρελέ αλλάζει με τα χρόνια, όπως αλλάζει η τεχνολογία.” Έχουμε τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ κατά τη δεκαετία 1900-1910, τα ρελέ σταθεράς κατάστασης κατά το 1960 και τα ψηφιακά ή αριθμητικά ρελέ κατά το 1980.

Τα πρώτα ρελέ ήταν απλές συσκευές υπερέντασης και υπότασης (1905). Η φύση τους ήταν ηλεκτρομαγνητική και έμοιαζαν με την αντίστοιχη μετρητική συσκευή. Τα ρελέ τίθονταν σε κίνηση είτε από την ενεργό τιμή, είτε από μέσες τιμές ή από ανορθωμένα σήματα. Είχαν κινούμενα μέρη, η δε καθυστέρηση ανταπόκρισης ταυτιζόταν με τον χρόνο που χρειαζόνταν οι επαφές για να κλείσουν [RSW11, σελ. 13].

“Τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ εισήχθηκαν στα πρώτα στάδια της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ είναι ηλεκτρομηχανικά συστήματα, σχεδιασμένα να εκτελούν λογικές πράξεις βασισμένα σε συγκεκριμένες εισόδους τάσης και ρεύματος. Αυτή η τεχνολογία άρχισε από το πολύ απλό ηλεκτρομαγνητικό έμβολο και εξελίχθηκε σε πολύ περίπλοκα συστήματα που εκτελούν σύνθετες λογικές πράξεις. Για παράδειγμα, το διαμορφωμένο mho ρελέ παρακολουθεί τη σύνθετη αντίσταση του συστήματος ανηγμένη σε ένα συγκεκριμένο σημείο. Αυτό το

ρελέ θα αντιδράσει όταν η σύνθετη αντίσταση κινηθεί στα προκαθορισμένα όρια. Το ρελέ υπερέντασης αντίστροφου καθορισμένου ελαχίστου χρόνου (Inverse Definite Minimum Time, IDMT) εισήχθη περί το 1915. Αρχικά ήταν θερμικό ή περιείχε περιστρεφόμενους δίσκους, όπως ο επαγωγικός δίσκος (Westinghouse) ή το επαγωγικό κύπελλο (GE) [RSW11, σελ. 13] [Mel12, σελ. 1.9] [Str03, σελ. 7].

Μετά από 5 χρόνια υιοθετήθηκε το διαφορικό ρελέ, το οποίο ήταν ένα μεγάλο βήμα στην προστασία συσκευών ηλεκτρικής ενέργειας. Το διαφορικό ρελέ συνέκρινε δύο ρεύματα από τα τερματικά του προστατευόμενου εργοστασίου. Από τα διαφορικά ρελέ υπήρχε ένα μόνο βήμα προς τα ρελέ απόστασης (1930), το οποίο συνέκρινε ρεύματα και τάσεις, τις ενεργές ή μέσες τιμές τους. Η καθυστέρησή τους ήταν συνάρτηση της μετρούμενης αντίστασης $Z = U/I$. Όλα αυτά τα ρελέ ήταν ηλεκτρομαγνητικά, όλα είχαν κινούμενα μέρη και θεωρούνται η πρώτη γενιά προστατευτικών συσκευών [RSW11, σελ. 13] [Mel12, σελ. 1.9] [Str03, σελ. 7].

Τα πρώτα ρελέ ήταν αρκετά σταθερά και αξιόπιστα, υπό την προϋπόθεση της τακτικής συντήρησης. (σημείωση: Αξιοπιστία=Ενεργοποιούνται όταν πρέπει, Σταθερά=Δεν ενεργοποιούνται όταν δεν πρέπει). Δυστυχώς, λόγω του μεγάλου αριθμού των ρελέ που ήταν εγκατεστημένα στα περισσότερα εργοστάσια, η συντήρηση παραμελείτο συχνά, με αποτέλεσμα να πάσχει η αξιοπιστία των ρελέ. Ένα από τα πιο σοβαρά μειονεκτήματα αυτών των ρελέ ήταν η έλλειψη ευστροφίας, αν και δεν ήταν αντιληπτό εκείνη την εποχή. Τα χαρακτηριστικά των ρελέ ήταν καθορισμένα, και η αλλαγή του σήμαινε αντικατάσταση του ρελέ, συχνά με μεγάλες αλλαγές στην καλωδίωση των πινάκων [Str03, σελ. 8].

Ένα άλλο μεγάλο μειονέκτημα των ηλεκτρομηχανικών ρελέ, το οποίο ήταν αντιληπτό εκείνη την εποχή, ήταν η έλλειψη ακρίβειας. Αυτό συχνά προκαλούσε μεγάλους πονοκεφάλους για το μηχανικό προστασίας, που προσπαθούσε να πετύχει κανονική διάκριση σε κοντινά όρια. Αυτή η έλλειψη ακρίβειας, μαζί με την ανάγκη για κανονική διάκριση σε κοντινά όρια και για “φιλικά στη συντήρηση” ρελέ, οδήγησε την έρευνα για σχεδιασμό πιο προηγμένων ρελέ. Η συνεχής βελτίωση των σχεδίων, όπως τα φίλτρα RLC και τα καλύτερα κράματα εξυπηρέτησε την αύξηση της αξιοπιστίας, της σταθερότητας και της ακρίβειας των ηλεκτρομηχανικών ρελέ [Str03, σελ. 8].

Η κρυσταλλοτρίοδος εισήχθη στα ρελέ περί το 1955. Επέτρεψε την κατασκευή στατικών συσκευών (δηλαδή χωρίς κινούμενα μέρη, αν εξαιρέσουμε στοιχεία εξόδου), γνωστά και ως ρελέ “στερεάς κατάστασης”. Οι στατικές συσκευές μπορούσαν να εκτελούν λογικές πράξεις και ξεκίνησαν την εποχή της δεύτερης γενιάς προστατευτικών ρελέ. “Εκείνη την περίοδο βλέπουμε απόπειρες για να αναπτυχθούν στατικά ρελέ με λειτουργικότητα ίδια με τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ.” Ωστόσο, η λειτουργία τους βασιζόταν στην επεξεργασία σημάτων, όπως είχε διαμορφωθεί μέχρι τότε. Εξ αιτίας αυτού προσέφεραν ένα πλήθος πλεονεκτημάτων [Mel12, σελ. 1.9] [RSW11, σελ. 13]:

- βελτιωμένη συνεργασία CT και VT
- μειωμένες διαστάσεις και ανταλλάξιμα εξαρτήματα (modularity)
- διευκόλυνση της δοκιμής, της συντήρησης και των επισκευών
- σύνθετα λειτουργικά χαρακτηριστικά
- αυξημένη ταχύτητα λειτουργίας

Αν και αυτή η νέα τεχνολογία δεν έγινε ευρέως αποδεκτή, σημείωσε μια νέα κατεύθυνση στη θεώρηση των ρελέ, ξεφεύγοντας από τις παραδοσιακές ηλεκτρομηχανικές μεθόδους που ήταν εδραιωμένες με θρησκευτική ευλάβεια. Αυτά τα ρελέ προσέφεραν σημαντικά στην ακρίβεια, την αξιοπιστία και την ευστροφία, ενώ δεν ήταν τόσο εξαρτώμενα από τη συντήρηση όπως τα ηλεκτρομηχανικά. Δεν έτυχαν ευρείας αποδοχής στο πεδίο διανομής, ιδίως στην αντικατάσταση των

συμβατικών ηλεκτρομηχανικών ρελέ υπέρτασης και των ρελέ σφάλματος-γης, κυρίως για τους παρακάτω λόγους [Str03, σελ. 8]:

- Αυτά τα ρελέ εισήχθησαν σε μια περίοδο που αρκετοί μηχανικοί θεωρούσαν την ηλεκτρονική “μαύρη μαγεία”, και επέλεξαν να αποστασιοποιηθούν από αυτήν.
- Οι αρχές λειτουργίας ήταν περίπλοκες και δυσνόητες για μηχανικούς και τεχνίτες χωρίς υπόβαθρο ηλεκτρονικής, ώστε να είναι δύσκολο να τα συντηρήσουν και να τα επισκευάσουν.
- Ήταν ακριβά, οπότε λαμβάνοντας υπόψη το κόστος, θα μπορούσαν να είναι εναλλακτική επιλογή μόνο σε περίπλοκες εφαρμογές.
- Ήταν ευαίσθητα σε υπερεντάσεις, υπερτάσεις και πτώσεις τάσεις. Έτσι, απαιτείτο συχνά εγκατάσταση προστασίας από υπερτάσεις, κάνοντας το σχέδιο προστασίας πιο περίπλοκο και πιο ακριβό.
- Η κατανάλωσή τους ήταν σχετικά μεγάλη, δημιουργώντας μεγάλη ζήτηση βοηθητικού ρεύματος, ειδικά σε μεγάλους υποσταθμούς.

“Τα στατικά ρελέ είναι σύντομα καθώς η πρώτη απόπειρα για ανάπτυξη ψηφιακού (αριθμητικού) ρελέ έγινε κατά το 1970. Αυτές οι απόπειρες, σε συνδυασμό με τον μικροεπεξεργαστή κατά το 1980, οδήγησαν στην ανάπτυξη των ρελέ που βασίζονται σε μικροεπεξεργαστές (αριθμητικά ρελέ). Το πρώτο εμπορικό αριθμητικό ρελέ εισήχθη το 1984. Από τότε, το αριθμητικό ρελέ αύξησε την κυριαρχία του σε τέτοιο σημείο, ώστε σήμερα έχει σχεδόν εκτοπίσει τα ηλεκτρομηχανικά και στατικά ρελέ.” [Mel12, σελ. 1.9]

Η τρίτη γενιά προστατευτικών συσκευών ξεκίνησε με ευρείες εφαρμογές φθηνών ψηφιακών επεξεργαστών και μνημών. Η ψηφιακή επεξεργασία ρελέ μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πέντε βασικά βήματα:

- Τα αναλογικά σήματα των εισόδων, που συνήθως είναι ρεύματα και τάσεις προερχόμενα από CT και VT, εισάγονται σε αντιπαραποιητικό (antialiasing) βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο αφαιρεί τις υψηλές συχνότητες που μπορούν να αλλοιώσουν αμετάκλητα το ψηφιακό σήμα [RSW11, σελ. 14].
- Τα σήματα από το αντιπαραποιητικό φίλτρο εισάγονται στο μετατροπέα “από αναλογικό σε ψηφιακό”. Στην έξοδο αυτού του τμήματος τα σήματα έχουν μορφή τραίνων κρουστικών.
- Τα ψηφιακά σήματα εισάγονται στο τμήμα της αρχικής επεξεργασίας, όπου φιλτράρονται, ορθογωνιοποιούνται και τα λοιπά.
- Τα αποτελέσματα της αρχικής επεξεργασίας εισάγονται στο τμήμα ψηφιακών μετρήσεων, στο οποίο υπολογίζονται τα κριτήρια σήματα, οι συγκεκριμένες παράμετροί τους και οι αμοιβαίες σχέσεις.
- Το τελικό τμήμα παράγει τις αποφάσεις προστασίας, οι οποίες βασίζονται στη σύγκριση των υπολογισμένων κριτηρίων με τα καθορισμένα όρια και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά.

Στην πραγματικότητα, τα ρελέ των προηγούμενων γενεών δε μετρούσαν τα διάφορα σήματα. Οι ενέργειές τους βασίζονταν σε συγκριτές, οι οποίοι αποφαίνονταν μόνο αν η δεδομένη ποσότητα ήταν μικρότερη ή μεγαλύτερη από ένα λειτουργικό όριο. Στην περίπτωση των ψηφιακών ρελέ τα σήματα όντως μετρούνται και η σύγκριση με τα όρια έρχεται αργότερα [RSW11, σελ. 14].

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα αριθμητικά ρελέ είναι πλέον “κουτιά” με περιορισμένες οθόνες. Ωστόσο, η τεχνολογία έχει εξελιχθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε κάθε ένα από τα ψηφιακά ρελέ μπορεί να διασυνδεθεί με προσωπικό υπολογιστή μέσω περίπλοκων διεπαφών. Ολόκληρο το ρελέ

μπορεί να εποπτευθεί και να προγραμματισθεί. Η πολυπλοκότητα ενός ρελέ πολλαπλών χρήσεων (multifunctional) είναι αρκετά υψηλή απαιτώντας εκπαίδευση στη χρήση του, αλλά η επιτήδευση και οι ικανότητές του είναι τεράστιες. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αριθμητικά ρελέ πολλαπλών χρήσεων έχουν μειώσει δραματικά τις απαιτήσεις χώρου και τα σχετικά κόστη. Συγκεκριμένα, ενώ στο παρελθόν η προστασία μιας γραμμής μεταφοράς ίσως χρειαζόταν διάφορα ηλεκτρομηχανικά ρελέ απλής λειτουργίας, καταλαμβάνοντας διάφορες ράγες στον υποσταθμό, τώρα ολόκληρο το σύνολο των προστατευτικών ρελέ στεγάζεται τυπικά σε μια συσκευή 48 επί 20 εκατοστών. Επιπρόσθετα, τα ψηφιακά ρελέ είναι εξοπλισμένα με θύρες επικοινωνίας και δύνανται να συνδεθούν με δίκτυα. Έτσι οι μηχανικοί μπορούν να προσπελάσουν τα ρελέ από το γραφείο τους, να δουν τις ρυθμίσεις, να λάβουν τις καταγεγραμμένες συνθήκες του ρελέ, να προσπελάσουν νέες ρυθμίσεις, και ούτω καθεξής. Αυτό είναι πραγματικά ένα νέο περιβάλλον με καταπληκτική ευελιξία και δυναμική για νέους καινοτόμους τρόπους να προστατευθεί το σύστημα [Mel12, σελ. 1.9].

Η επεξεργασία των σημάτων των ρελέ γίνεται ολοένα και αποδοτικότερη, καθώς οι τηλεπικοινωνίες προοδεύουν συνεχώς. Έτσι, έρχεται η εποχή της τέταρτης γενιάς των προστατευτικών συσκευών. Είναι η εποχή των Συστημάτων Μέτρησης και Προστασίας Ευρείας Περιοχής (Wide-Area Measurement and Protection Systems, WAMPS), η οποία συνδυάζει περίπλοκη ψηφιακή επεξεργασία και γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών με κανάλια επικοινωνίας. Η τέταρτη γενιά έχει τις ακόλουθες ιδιότητες [RSW11, σελ. 16]:

- Μέτρηση των σημάτων σε ευρεία περιοχή και μεταφορά των αποτελεσμάτων στα σημεία αποφάσεων.
- Ενσωμάτωση της προστασίας, του ελέγχου, της παρακολούθησης και των μετρήσεων.
- Προσαρμοστικότητα στις υπάρχουσες συνθήκες
- Ευφυείς αποφάσεις, εκτίμηση πραγματικών συνθηκών και πιθανές συνέπειες κακών αποφάσεων.

2.1.2 Ιστορία των τοπικών ηλεκτρονικών συστημάτων

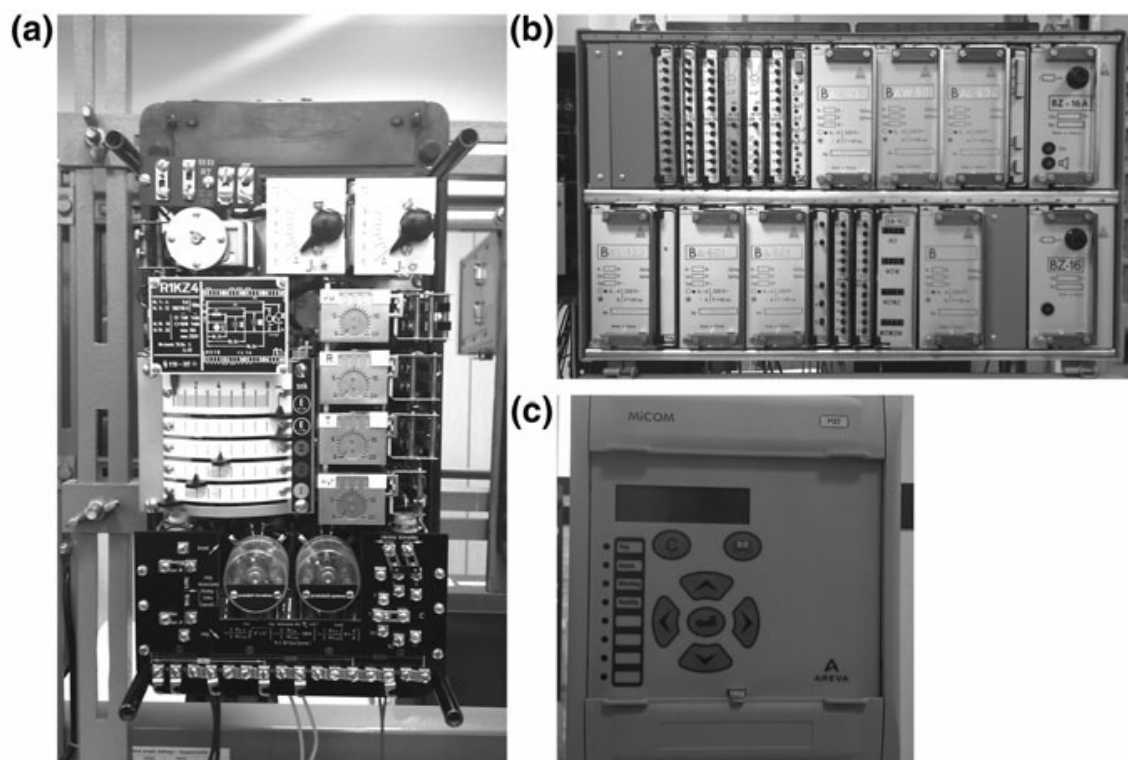
Η αυτοματοποίηση υποσταθμών γίνεται με τοπικά ηλεκτρονικά συστήματα, όπως απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (RTU), προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (PLC) και ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές (IED).

Οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές αυτοματοποιούν ηλεκτρομηχανικές διαδικασίες. Επίσης, είναι ανθεκτικοί, είναι συστήματα πραγματικού χρόνου, δηλαδή οι έξοδοι ανταποκρίνονται στην τρέχουσα χρονική στιγμή. Επιπλέον, είναι σχετικά απλές και φθηνές συσκευές.

Οι απομακρυσμένες τερματικές μονάδες εξειδικεύονται στην τηλεμετρία. Χρησιμοποιούν σειριακή επικοινωνία όπως RS232, RS485 και RS422 και υποστηρίζουν πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως Modbus, IEC 60870-5-101/104, DNP3 και IEC 61850. Έτσι, είναι πιο κατάλληλα για τηλεμετρία ευρείας περιοχής σε σχέση με τα PLC.

Οι ευφυείς ηλεκτρονικές συσκευές προσφέρουν ψηφιακά προστατευτικά ρελέ αυξημένης λειτουργικότητας. Μπορούν να διασυνδεθούν με RTU, για να αναφέρουν γεγονότα, να μετρήσουν δεδομένα ή να λάβουν εντολές από RTU/SCADA. Επίσης, μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους (οριζόντια επικοινωνία), ενώ η λειτουργία τους μπορεί να συμπεριλάβει ρύθμιση μετασχηματιστών, έλεγχο διακοπών, σύνδεση συστοιχιών πυκνωτών και ρυθμιστές τάσης.

Η αυτοματοποίηση περιλαμβάνει διάφορα πεδία, όπως τη διαχείριση διακοπτικών συστημάτων, τη διαχείριση φορτίων ή την εποπτεία εξοπλισμού. Για παράδειγμα η αυτοματοποίηση μπορεί να διασφαλίσει την ασφάλεια κατά τη διαχείριση των διακοπών, να υπολογίσει τη σωστή ακολουθία ενεργοποίησης/απενεργοποίησης διακοπών και αποζευκτών, να αποκόψει παραγωγούς υπό συγκεκριμένες συνθήκες συχνότητας, ή να αναφέρει σφάλματα.



Σχήμα 2.1: Σύγκριση τριών γενεών προστατευτικού εξοπλισμού ($Z<,I>$ ρελέ): α Ηλεκτρομηχανικό (R1KZ4, χωρίς περίβλημα), β στατικό, γ ψηφιακό (MICOM P127) (Οι εικόνες λήφθηκαν από το εργαστήριο προστασίας στο WUT, Βρότσλαφ, Πολωνία) [RSW11, σελ. 16].

Στα σχήματα 2.2 έως 2.7 φαίνεται η ιστορική εξέλιξη των υποσταθμών καθώς αυτοί αυτοματοποιούνται.

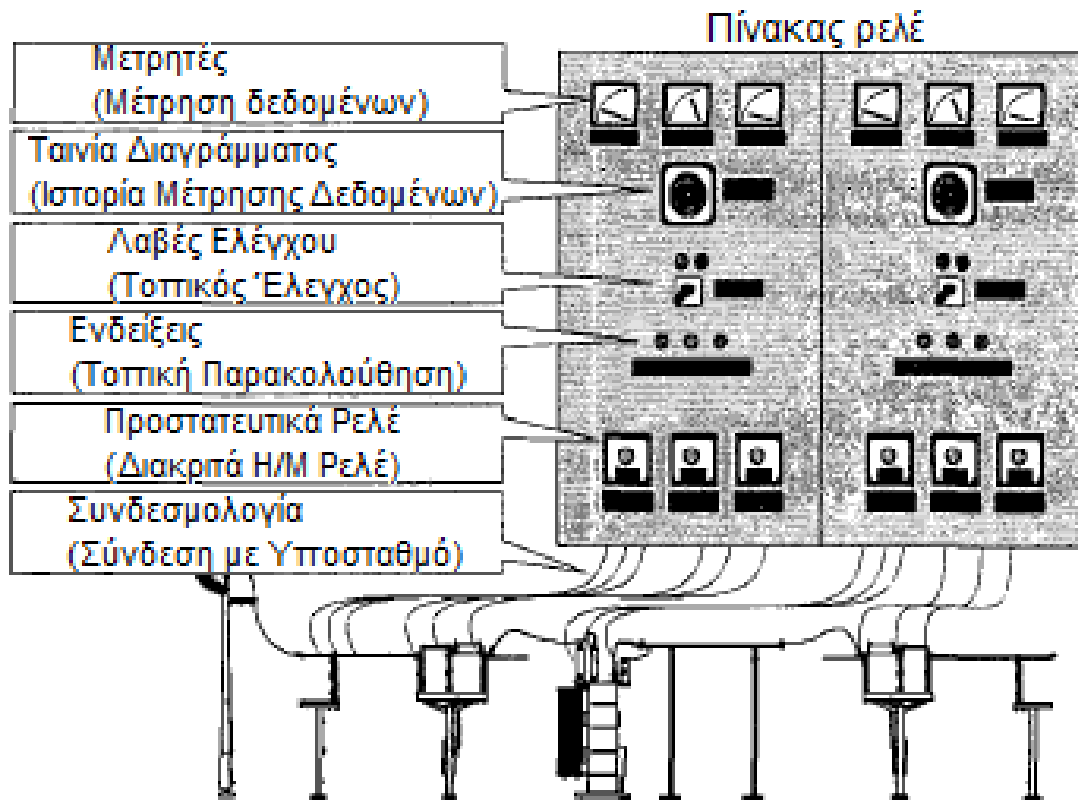
2.1.3 Συλλογή δεδομένων

“Η συλλογή δεδομένων σταθμού ηλεκτρικής ενέργειας είναι η βασική διαδικασία, στην οποία τα δεδομένα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας συλλέγονται για όλες τις διαδικασίες ελέγχου και διαχείρισής του. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην συλλογή δεδομένων σταθμού έχουν διέλθει από πολλές αλλαγές.

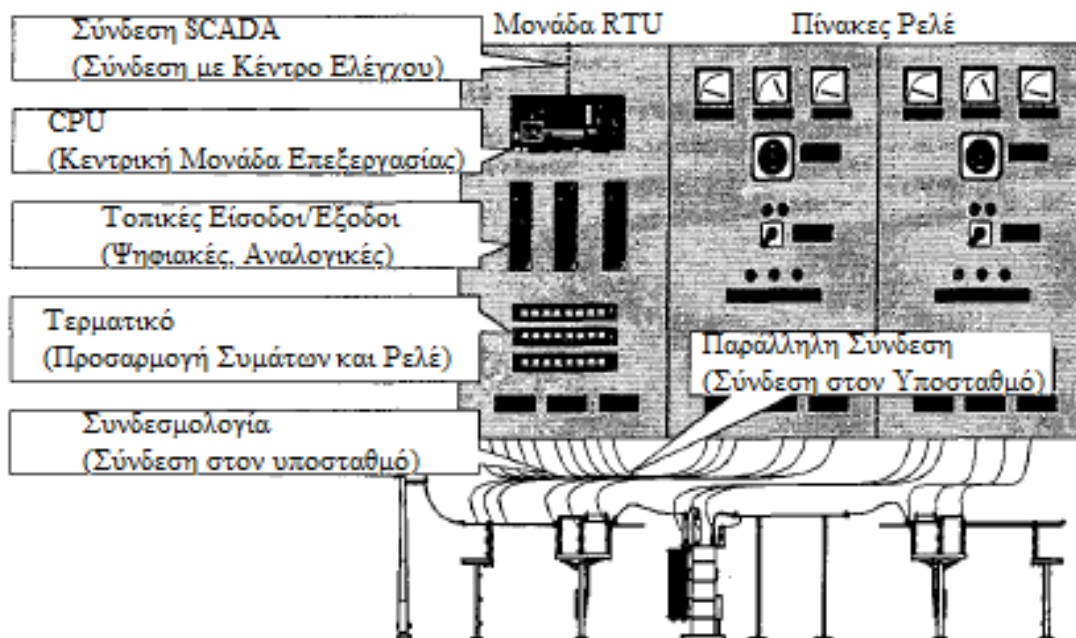
Από το 1920 έως περίπου το 1970 σε κάθε διαδικασία ένδειξης και ελέγχου υποσταθμού εμπλεκόταν ένα μοναδικό διακριτό εξάρτημα, το ηλεκτρομηχανικό ρελέ, στο χώρο ελέγχου του υποσταθμού. Κάθε διαδικασία ένδειξης και ελέγχου απαιτούσε καλωδίωση από σημείο σε σημείο για συλλογή δεδομένων για κάθε διαδικασία. Επιπρόσθετα σε αυτήν την ανάγκη μπορούμε να φανταστούμε περισσό εξοπλισμό (πρωτεύον και εφεδρικό) για κρίσιμη λειτουργικότητα και ένα πλήθος από καλώδια και χειροποίητες συνδέσεις.

Τη δεκαετία του 1970 τα πρώτα ρελέ πολλαπλών χρήσεων εισήχθησαν για να απλοποιήσουν τις απαιτήσεις καλωδίωσης της συλλογής δεδομένων. Η πιο πρόσφατη απόπειρα για απλοποίηση των απαιτήσεων καλωδίωσης είναι η χρήση τυποποιημένων συνδέσεων και εξοπλισμού διεπαφής. Ενώ η καλωδίωση γίνεται ελαφρώς απλοποιημένη με τις πιο πρόσφατες μεθόδους, η αντιμετώπιση προβλημάτων παραμένει, στο μεγαλύτερο μέρος, στρυφνή και πολύ αποθαρρυντική.

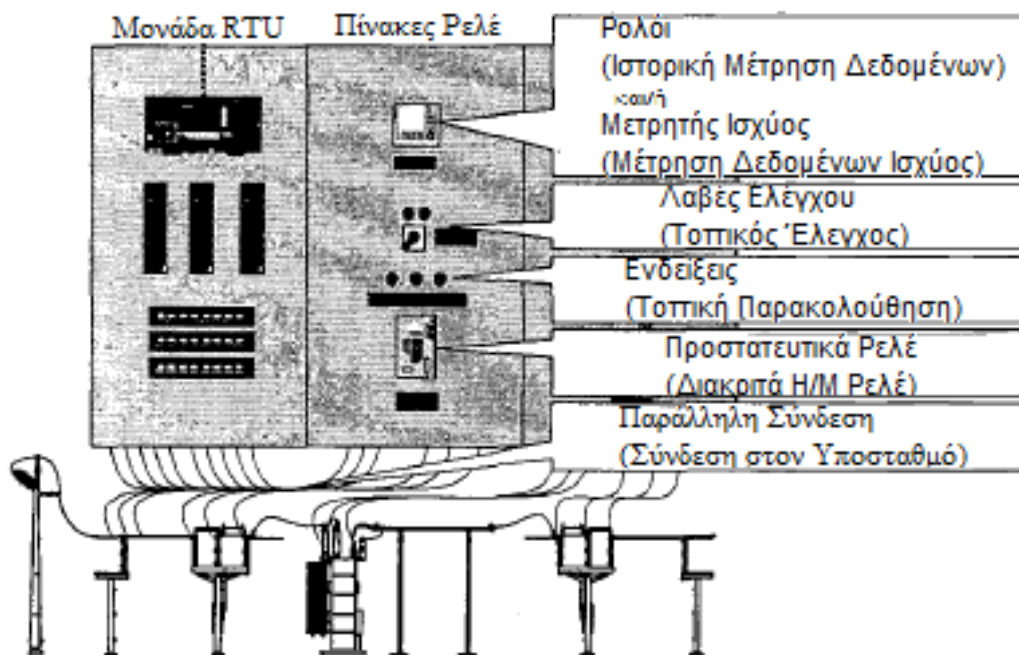
Ο βασικός εξοπλισμός για συλλογή δεδομένων είναι το κανάλι των οργάνων (σχήμα 2.8). Όλος ο εξοπλισμός του χώρου ελέγχου στηρίζεται σε κανάλια οργάνων για συλλογή δεδομένων. Τα κανάλια οργάνων περιλαμβάνουν μετασχηματιστές, καλώδια ελέγχου, φορτία, εξασθενητές και



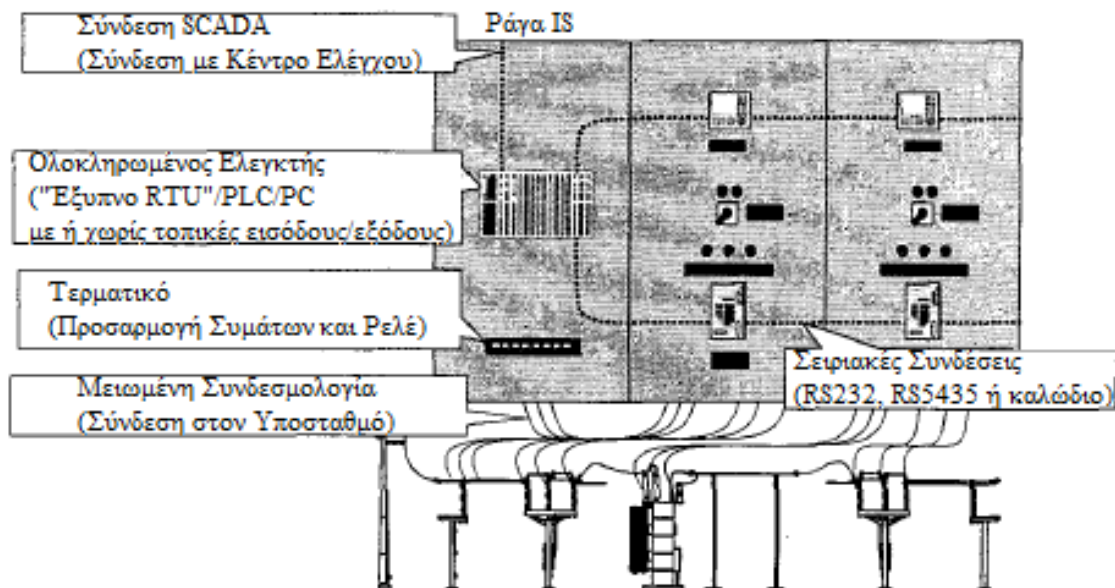
Σχήμα 2.2: Ιστορικό σχέδιο υποσταθμού



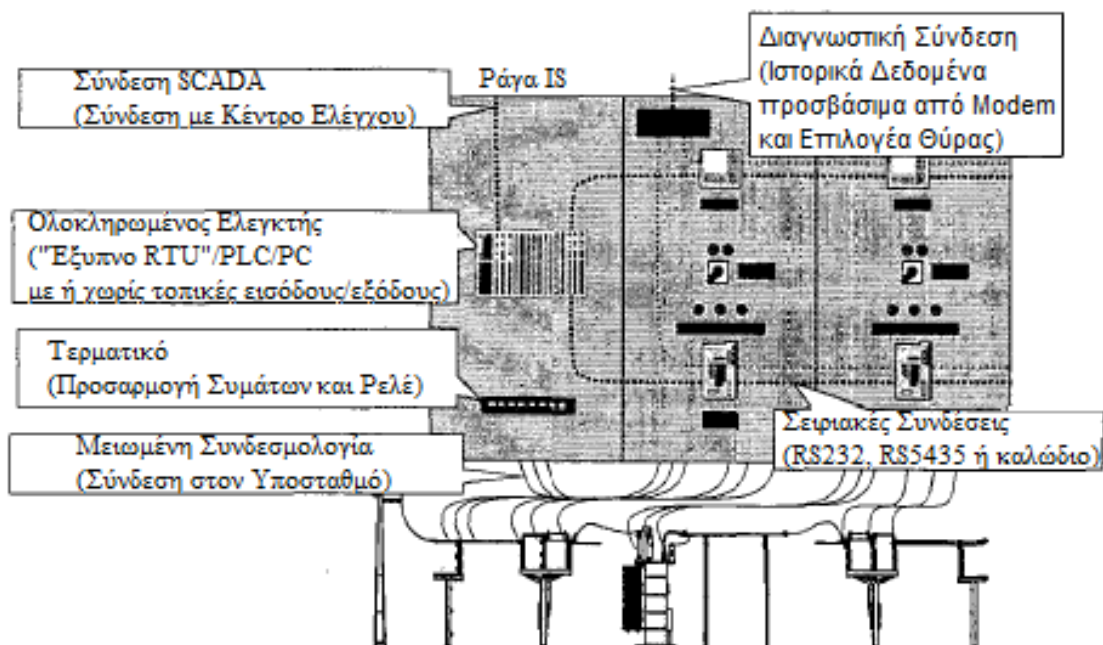
Σχήμα 2.3: Εισαγωγή SCADA και RTU



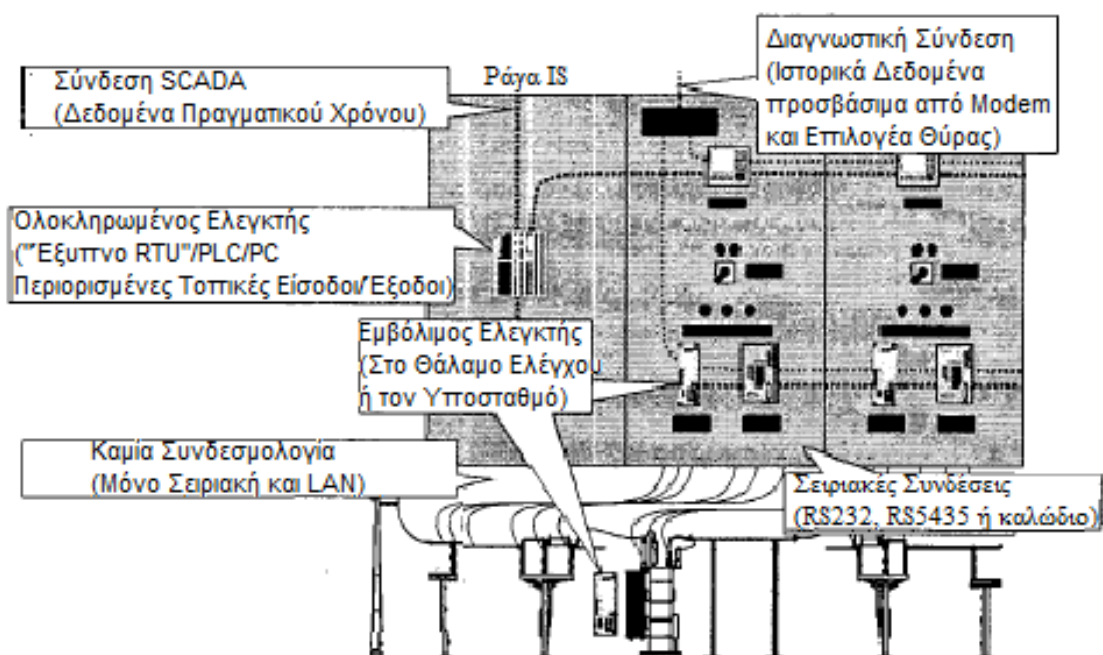
Σχήμα 2.4: Εισαγωγή IED



Σχήμα 2.5: Ενοποίηση RTU με IED

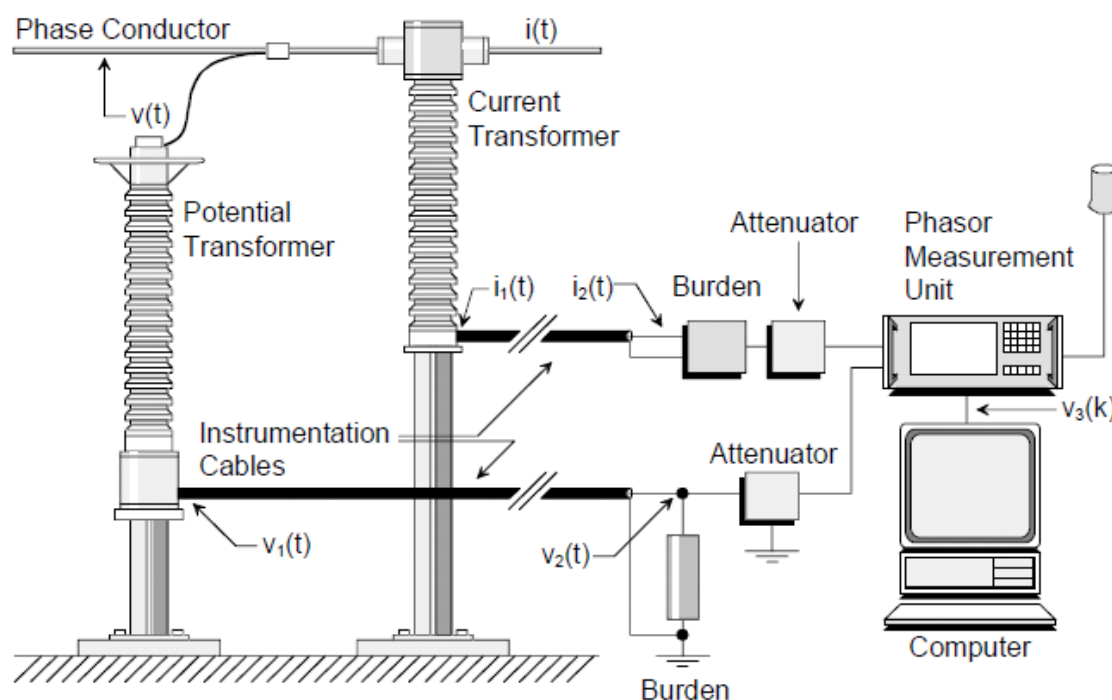


Σχήμα 2.6: Διαχείριση αναγκών Συντήρησης



Σχήμα 2.7: Η ιδέα του εμβόλιμου ελεγκτή

ψηφιακούς επεξεργαστές. Η συσκευή ψηφιακής επεξεργασίας μπορεί να είναι μονάδα μέτρησης



Σχήμα 2.8: Τυπικό κανάλι οργάνων για λήψη δεδομένων.

φασιθέτη (PMU) ή οποιαδήποτε ευφυής ηλεκτρονική συσκευή (IED). Οι πιο ακριβείς μετρήσεις δεδομένων είναι διαθέσιμες από εξοπλισμό συγχρονισμένος με το παγκόσμιο σύστημα στοιχειοθέτησης (GPS). Σήμερα αυτός ο συγχρονισμένος με το GPS μετρητικός εξοπλισμός περιλαμβάνει ρελέ, μετρητές, ψηφιακούς καταγραφείς σφαλμάτων (DFR) και άλλο ειδικό εξοπλισμό. Ένας κοινός όρος για συγχρονισμένο μετρητικό εξοπλισμό είναι PMU.

Το πλεονέκτημα της συλλογής δεδομένων με χρήση εξοπλισμού συγχρονισμένου με το GPS είναι τεράστιο αν και χρησιμοποιείται λίγο. Για μια μακρά χρονική περίοδο (1992 με 2002), ο μόνος εξοπλισμός συγχρονισμένος με το GPS ήταν το PMU της Macrodyn. Πρόσφατα επιπρόσθετος εξοπλισμός συγχρονισμένος με το GPS έχει εισαχθεί στην αγορά. Ακόμα, δεν υπάρχει τυποποίηση που προσδιορίζει ποιά πρέπει να είναι η ακρίβεια του PMU.

Ο μετρητικός εξοπλισμός συγχρονισμένος με το GPS επιτρέπει την ασύγχρονη λήψη μετρήσεων και μετά την ταυτόχρονη επεξεργασία σε κάποια άλλη στιγμή. Η συλλογή δεδομένων που χρησιμοποιεί μετρήσεις συγχρονισμένες με το GPS μπορεί να γίνει με ακρίβεια 1μs και ακρίβειας μέτρου 0,1%. Αυτή η εν δυνάμει επίδοση δεν επιτυγχάνεται στην πράξη σε πραγματική εγκατάσταση για δύο λόγους:

- διαφορετικοί πάροχοι χρησιμοποιούν διαφορετικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις που καταλήγουν σε ποικίλες επιδόσεις μεταξύ των παρόχων, για παράδειγμα χρήση πολυπλεγμένων καναλιών καταλήγει σε σφάλματα πολύ μεγαλύτερα του 1μs και
- ο εξοπλισμός συγχρονισμένος με GPS λαμβάνει εισόδους από μετρητικούς μετασχηματιστές, καλώδια ελέγχου, εξασθενητές και άλλα τα οποία εισάγουν μετρικά και φασικά σφάλματα, τα οποία είναι πολύ μεγαλύτερα από την ακρίβεια των PMU.

Θεωρητικά, το όλο θέμα της ακρίβειας μπορεί να λυθεί με πολύπλοκες μεθόδους βαθμονόμησης. Αυτή η προσέγγιση είναι ελαφρώς ακριβή και αντιμετωπίζει δύσκολα τεχνικά προβλήματα.

Συγκεκριμένα, είναι εξαιρετικά δύσκολο να βαθμονομηθούν μετρητικοί μετασχηματιστές και το κανάλι οργάνου στην πράξη. Εργαστηριακή βαθμονόμηση μετρητικών μετασχηματιστών είναι δυνατή, αλλά πολύ ακριβή. Σε μια διαδικασία βαθμονόμησης για τη NYPA (New York Power Authority, Αρχή Ηλεκτρικής Ενέργειας Νέας Υόρκης), αναπτύχθηκε ο μετρητικός μετασχηματιστής υψηλών τάσεων. Από πρακτική σκοπιά, αυτή η προσέγγιση είναι οικονομικώς αδύνατη. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση κατάλληλων διηθητικών τεχνικών για τη διόρθωση των μετρικών και φασικών σφαλμάτων, θεωρώντας γνωστά τα χαρακτηριστικά των διάφορων εξοπλισμών που είναι συγχρονισμένοι με GPS και τα όργανα που τροφοδοτούν αυτόν τον εξοπλισμό.

Σημαντικές προκλήσεις αντιμετωπίστηκαν στην επίδειξη του Υπερβαθμονομητή κατά τη σύνδεση εξοπλισμών από διάφορους παρόχους και έναν απλό υπολογιστή να στεγάζει το λογισμικό του Υπερβαθμονομητή. Οι προκλήσεις προέρχονται από τα διαφορετικά πρωτόκολλα και φυσικά μέσα για επικοινωνία.” [Mel10, σελ. 1]

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η επόμενη γενιά υποσταθμών θα έχει τυποποιημένα πρότυπα όπως το IEC61850, το οποίο θα κάνει διαθέσιμα όλα τα δεδομένα από τα ρελέ, τα PMU, τα SCADA, τους μετρητές και άλλα σε έναν κοινό δίαυλο προσβάσιμο από άλλες συσκευές. Σε αυτήν την περίπτωση το προτεινόμενο σύστημα θα προσπελάζει απλά το δίαυλο 61850 για να λάβει τα δεδομένα και να εκτελεί εκτίμηση [Mel10, σελ. 3].

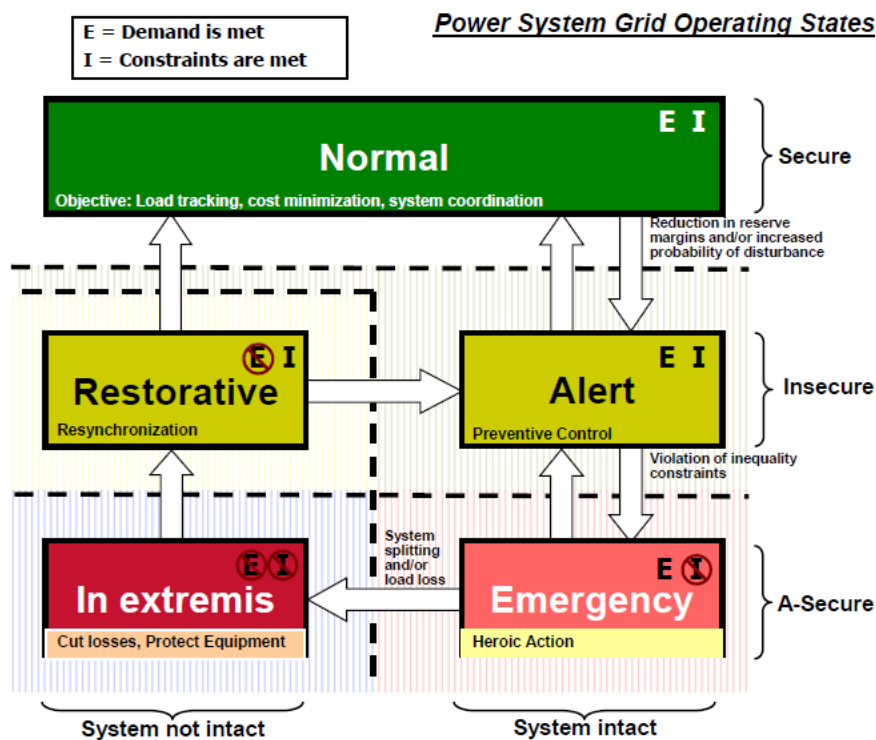
2.1.4 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Το 1965 η πολιτεία της Νέας Υόρκης βίωσε μια μεγάλη συσκότιση. Η συσκότιση διήρκεσε 13 ώρες για πολλούς, επηρέασε 30000000 ανθρώπους και 20000 τετραγωνικά χιλιόμετρα, ενώ χάθηκαν δισεκατομμύρια δολάρια, συνταράσσοντας την κοινή γνώμη. Αυτή η συσκότιση είχε στο εξής ένα διαρκή αντίκτυπο στην παρακολούθηση και έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Οδήγησε στη δημιουργία της NERC (North American Reliability Council) και της EPRI (Electric Power Research Institute). Η NERC επιβάλλει πρότυπα αξιοπιστίας, το 1968 με επιείκεια, ενώ το 2006 μετεξελίχθηκε για να τα επιβάλλει με αυστηρότητα και κυρώσεις. Εκείνη την περίοδο αναπτύχθηκε η έννοια του συστήματος Εποπτικού Ελέγχου και της Συλλογής Δεδομένων (SCADA). Ακολούθως εισήχθηκε η λύση του Συστήματος Διαχείρισης Ενέργειας (EMS), το οποίο διαθέτει ένα σύνολο λειτουργιών που στηρίζονται στα δεδομένα από το SCADA [Kez13, σελ. 4][Gir10, σελ. 9].

Διεξήχθησαν μια πληθώρα ερευνών για να δημιουργήσουν ένα νέο λειτουργικό παράδειγμα, όπου το EMS θα είχε ρόλο στην καθοδήγηση των διαχειριστών. Ο σχεδιασμός του EMS στηριζόταν στη θεωρία ότι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διέρχεται από διακριτές καταστάσεις (σχήμα 2.9), όπως η ασφαλής κανονική κατάσταση, η ανασφαλής κανονική κατάσταση, η κατάσταση ανάγκης, η κατάσταση επαναφοράς και η ακραία. Ως εκ τούτου, οι λειτουργίες του EMS χρειάζεται να στηρίζουν τις ικανότητες των διαχειριστών, για να παρακολουθούν τη συμπεριφορά του συστήματος, καθώς αυτό διέρχεται από ποικίλες λειτουργικές καταστάσεις, και για να αποφασίζουν πώς θα το κατευθύνουν ξανά στην κανονική κατάσταση (σχήμα 2.10) [Kez13, σελ. 1].

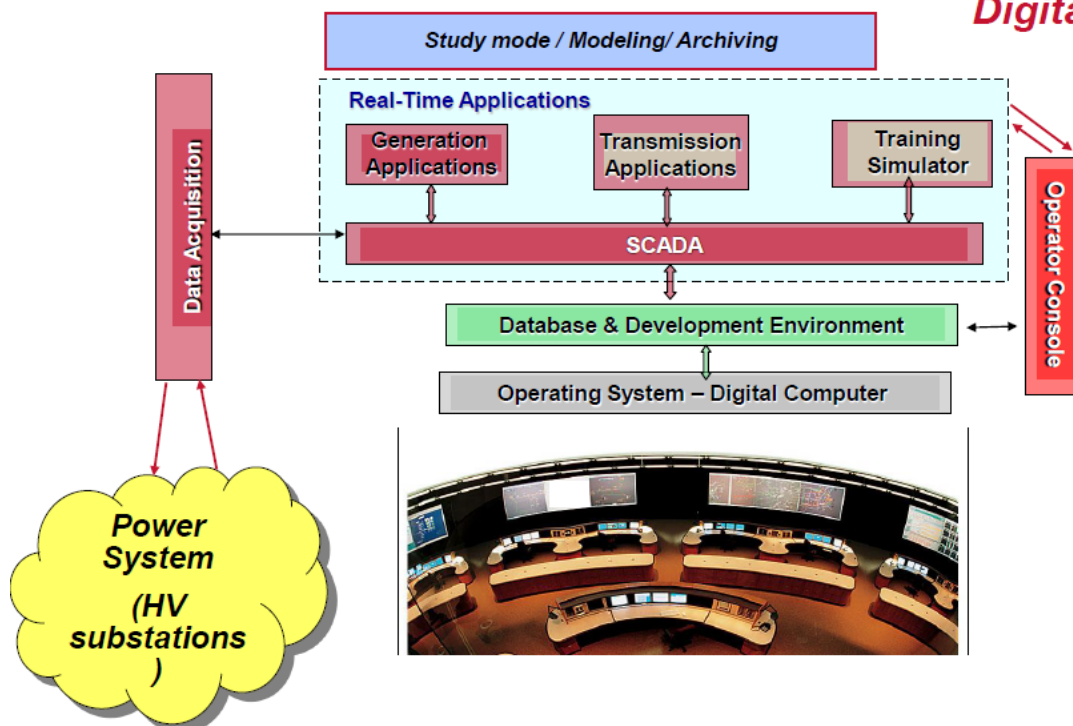
Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS) είναι λογισμικό, το οποίο διαχειρίζεται τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο [McC, σελ. 12]. Είναι το λογισμικό που λειτουργεί το ηλεκτρικό δίκτυο εντός ορίων ασφαλείας, αξιόπιστα, προλαμβάνει συσκοτίσεις, διατηρεί την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, προσαρμόζει αυτόματα την παραγωγή για να ακολουθήσει στιγμιαίες αλλαγές στο φορτίο (η ηλεκτρική ενέργεια δε μπορεί να αποθηκευτεί), ταυτοποιεί πιθανούς κινδύνους και αναλαμβάνει αποτρεπτικές δράσεις, και τέλος επισπεύδει την επαναφορά των πελατών μετά από κατάσταση ανάγκης [Gir10, σελ. 9].

Καθώς κυλούσε ο χρόνος, πολλά πράγματα άλλαξαν στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας: εισήχθησαν αγορές ενέργειας για να φιλοξενήσουν ανταγωνιστικό εμπόριο, αναπτύχθηκαν εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ισχύος για ικανοποίηση της ζήτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ανα-



Σχήμα 2.9: Οι καταστάσεις του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [Gir10, σελ. 9].

EMS – 80's and 90's Digital



Σχήμα 2.10: Το EMS το 1980, 1990 [Gir10, σελ. 20].

πτύχθηκε τεχνολογία EMS για να βελτιωθούν οι υπολογισμοί, οι επικοινωνίες, η οπτικοποίηση και άλλα. Καθώς το EMS είναι το κεντρικό “νευρικό σύστημα” της λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου και της ανοιχτής αγοράς ηλεκτρισμού, ο σχεδιασμός δέχεται τεράστιες αλλαγές για να ικανοποιήσει τις ανάγκες της εξελισσόμενης βιομηχανίας δημοσίων υπηρεσιών. Οι λύσεις SCADA βασισμένες σε ιδιωτικό υλικό και λογισμικό δυσκόλεψαν την πρόσβαση τρίτων (third-party) παρόχων λογισμικού [Kez13, σελ. 1].

Ο στόχος του σχεδιασμού της επόμενης γενιάς EMS ήταν να παρέχει μια ανοιχτή πλατφόρμα εφαρμογών. Αυτή η επόμενη γενιά EMS υιοθέτησε ανώτερες τεχνολογίες όπως η σχεσιακή βάση δεδομένων και τρισδιάστατα γραφικά με πολύ πιο ώριμες και τυποποιημένες λειτουργίες SCADA [Kez13, σελ. 1].

Παραδοσιακά, οι μετρήσεις SCADA αποστέλλονταν στο EMS κάθε δύο με δέκα δευτερόλεπτα. Αυτό ήταν επαρκές αφού αρχικά το EMS σχεδιάστηκε για να εντοπίζει ασφαλείς και ανασφαλές καταστάσεις. Η ανάπτυξη νέων γενιών EMS είναι περιζήτητη, λόγω της γρήγορης ανάπτυξης των τεχνολογιών των υπολογιστών, των επικοινωνιών, των δικτύων, των βάσεων δεδομένων, και των ευφυών ηλεκτρονικών συσκευών για υποσταθμούς (IED), καθώς και λόγω των νέων αναγκών των αγορών ηλεκτρισμού. Η ανάπτυξη οδηγείται από την προτροπή για βελτίωση των υπηρεσιών ηλεκτρικής ισχύος και τις νέες εξελίξεις προς ένα έξυπνο δίκτυο με διείσδυση έξυπνων αισθητήρων και τη διασπαρμένη παραγωγή μεταξύ άλλων. Έτσι χρειάζονται μετρήσεις SCADA πολύ μεγαλύτερης χρονικής ανάλυσης και ακριβής συγχρονισμός, καθώς και πανίσχυρες λειτουργίες για να αντεπεξέλθουν στις αναδυόμενες ανάγκες παρακολούθησης, ελέγχου και προστασίας [Kez13, σελ. 1].

2.2 Σύγχρονη τεχνολογία

Ο πρωτεύων εξοπλισμός ενός υποσταθμού διανομής απαρτίζεται από διάφορα εξαρτήματα όπως διακόπτες, αποζεύκτες, μεταγωγούς, μετρητικούς μετασχηματιστές, καινοτόμους εξοπλισμούς διακοπών, διακόπτες αερίου SF_6 , απαγωγείς υπέρτασης και μετασχηματιστές [BLW03, σελ. 45].

Ο υποσταθμός διαχωρίζεται φυσικά και λειτουργικά σε τρία επίπεδα:

- Το επίπεδο σταθμού, συχνά στεγαζόμενο σε ένα θωρακισμένο χώρο, παρέχει εποπτεία όλου του σταθμού.
- Το επίπεδο κλάδου ή οδού παροχής, το οποίο επιτρέπει τον έλεγχο ενός κλάδου. Παράδειγμα η συντήρησή του.
- Το επίπεδο επεξεργασίας, το οποίο είναι κοντά ή ακόμα και ενσωματωμένο στο διακόπτη [BLW03, σελ. 142].

2.2.1 Αρχιτεκτονικές συστημάτων αυτοματισμού

Ένας σύγχρονος υποσταθμός αποτελείται από τα εξής:

- Μία ή περισσότερες Ευφυείς Ηλεκτρονικές Συσκευές (IED). Αυτές οι συσκευές επιτελούν διάφορες λειτουργίες, όπως η προστασία ενός ρελέ.
- Ελεγκτής Κλάδου. Μια συσκευή που ελέγχει όλες τις συσκευές ενός κλάδου, επικοινωνεί με τα ρελέ για λειτουργικότητα.
- Διεπιφάνεια ανθρώπου-μηχανής (HMI). Τυπικά ένα βιομηχανικό PC με πίνακα χειρισμών για τοπικό έλεγχο και ρύθμιση.



Σχήμα 2.11: Ψηφιακές συσκευές που έχουν οι σύγχρονοι υποσταθμοί. Πάνω αριστερά IED, πάνω δεξιά RTU, κάτω αριστερά PLC, κάτω δεξιά PMU.

- Δίαυλος ή Δίαυλοι επικοινωνίας, για σύνδεση μεταξύ των συσκευών.
- Διεπιφάνεια επικοινωνίας προς τα άνω. Υλοποιείται στο HMI, το IED ή τον ελεγκτή κλάδου.

Υπάρχουν τρεις βασικές αρχιτεκτονικές για συστήματα αυτοματισμού υποσταθμών. Η βασισμένη σε HMI, η βασισμένη σε RTU, και η κατακεντημένη.

Η αρχιτεκτονική βασισμένη σε HMI είναι η απλούστερη. Το HMI υλοποιεί όλες τις λειτουργίες ελέγχου και επικοινωνίας. Τα IED υλοποιούν διακοπτικές λειτουργίες και προστασίας. Ωστόσο, η αξιοπιστία του υπολογιστή του HMI είναι ένας κίνδυνος.

Στην αρχιτεκτονική βασισμένη σε RTU, το RTU υλοποιεί τη διεπαφή με το SCADA και τον έλεγχο του υποσταθμού. Τα IED υλοποιούν διακοπτικές λειτουργίες και προστασίας. Το HMI είναι διαχωρισμένο από τον έλεγχο και τις επικοινωνίες.

Η κατακεντημένη αρχιτεκτονική είναι διαφορετική. Οι ελεγκτές κλάδων υλοποιούν έλεγχο των διακοπών και συνδέονται με IED. Τα IED υλοποιούν λειτουργίες διακοπτικές και προστασίας. Το HMI επιτρέπει τοπικό έλεγχο και ρύθμιση του συστήματος. Ο ελεγκτής του συστήματος διαχειρίζεται το σταθμό και επικοινωνεί με το SCADA.

2.2.2 SCADA

Το αρκτικόλεξο SCADA προέρχεται από το Supervisory Control And Data Acquisition system (σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων). “Υπάρχουν δύο μέρη στον όρο SCADA. Εποπτικός έλεγχος (supervisory control) δείχνει ότι ο χειριστής, οδεύοντας στο κέντρο ελέγχου ηλεκτρικής ενέργειας (ECC), έχει τη δυνατότητα να ελέγξει εξ αποστάσεως τον εξοπλισμό. Απόκτηση δεδομένων (data acquisition) δείχνει ότι οι πληροφορίες, που χαρακτηρίζουν την κατάσταση του απομακρυσμένου εξοπλισμού, συλλέγονται και στέλνονται στο χειριστή να τις παρακολουθήσει. Ο εξοπλισμός παρακολούθησης κανονικά βρίσκεται στους υποσταθμούς και συγκεντρώνεται στις επονομαζόμενες απομακρυσμένες τερματικές μονάδες (RTU).” [McC, σελ. 1.14]

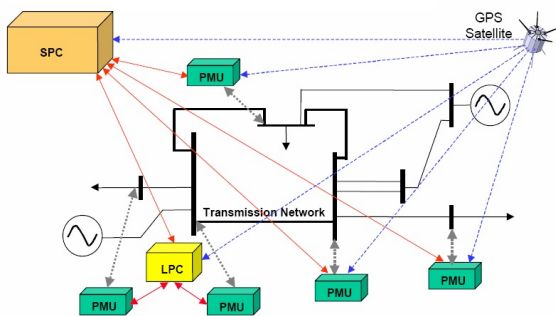
“Το υποσύστημα εποπτικού ελέγχου συνίσταται από το υλικό και λογισμικό τα οποία (α) συλλέγουν ψηφιακά δεδομένα (πχ. κατάσταση διακοπών ανοιχτός/κλειστός) και αναλογικά δεδομένα (πχ. μετρήσεις μέτρων τάσεων, ισχύος και άλλα) και μεταδίδουν αυτά τα δεδομένα σε ένα κεντρικό σημείο για επεξεργασία και εμφάνιση. (β) Επιτρέπουν εξ αποστάσεως ενεργοποίηση διακοπών, αλλαγές τάσεων σε μετασχηματιστές και τα λοιπά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εποπτικός έλεγχος είναι μια χειροκίνητη διαδικασία, πχ. ο αποστολέας στο κέντρο ελέγχου θα εκκινήσει μια διαταγή για να ανοίξει/κλείσει ένα διακόπτη και άλλα.

Το υποσύστημα συλλογής πληροφοριών συνίσταται από εξοπλισμό επικοινωνίας με τα όργανα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και τις συσκευές ελέγχου, εξοπλισμός επικοινωνίας με κανάλια και το κέντρο ελέγχου.

Εφόσον το σύστημα SCADA μεταδίδει δεδομένα από και προς το κέντρο ελέγχου, τα μέσα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα και οι ταχύτητες μετάδοσης είναι πολύ σημαντικά. Στο παρελθόν, ήταν παράδοση να υπάρχουν διαφορετικά κανάλια επικοινωνίας για τον Εποπτικό Έλεγχο και τη Συλλογή Δεδομένων. Σήμερα, ωστόσο το σύστημα είναι ενοποιημένο χρησιμοποιώντας κοινό κανάλι επικοινωνίας δύο κατευθύνσεων, το οποίο ίσως αποτελείται από διάφορα φυσικά στρώματα.” [Mel06, σελ. 7]

2.2.3 Σύστημα συγχρονισμένο για μέτρηση φασιθετών

Τελικά, η βιομηχανία υιοθέτησε την τουλάχιστον εικοσάχρονη τεχνολογία συγχρονισμένης μέτρησης φασιθέτη. Το Μάρτιο του 2012 η North American SynchroPhasor (NASPI) ανέφερε ότι υπάρχουν περίπου 500 PMU εγκατεστημένα και συνδεδεμένα και εξακολουθεί να μετράει [MBD+14, σελ. 1].



Σχήμα 2.12: Τα συστήματα PMU συγχρονίζονται μέσω GPS.

Για να αναπτυχθεί ένα πρακτικό συγχρονισμένο σύστημα με φασιθέτες πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες [Far12]. Ένα τέτοιο συγχρονισμένο σύστημα συνίσταται από ένα πλήθος από στοιχεία, όπως μετρητικές συσκευές γνωστές ως PMU (σχήμα 2.12), συσκευές επεξεργασίας δεδομένων και ευθυγράμμισης γνωστές ως Συγκεντρωτές Φασικών Δεδομένων (Phasor Data Concentrator, PDC), ποικίλες τηλεπικοινωνιακές συσκευές όπως δρομολογητές και διακόπτες, τηλεπικοινωνιακή υποδομή που εκτείνεται σε αρκετές εκατοντάδες χιλιόμετρα, και ευφυείς λειτουργίες και εφαρμογές που τρέχουν σε διάφορους υπολογιστές και επεξεργαστές καθόλην την έκταση του συγχρονισμένου συστήματος. Ένα τέτοιο συγχρονισμένο σύστημα σχεδιασμένο για την παραγωγή πρέπει να ικανοποιεί ένα πλήθος από προαπαιτούμενα-κλειδιά, όπως η διαδικτυακή ασφάλεια, μικρή υστέρηση (latency), μεγάλη διεκπεραίωση δεδομένων (εύρος ζώνης), μεγάλη διαθεσιμότητα και αξιοπιστία, και δυνατότητα συντήρησης. Επίσης, η συνέπεια μεταξύ όλων των μετρήσεων και η ανεξαρτησία λειτουργιών μεταξύ των συσκευών είναι κρίσιμες για τις λειτουργίες που αναπτύσσονται σε ένα σύστημα ευρείας περιοχής. Επομένως, η διασφάλιση της ακρίβειας των μετρητικών συσκευών και η συμμόρφωση στα προαπαιτούμενα είναι κυρίαρχα για ένα εύρυθμο και βιώσιμο σύστημα [MBD+14, σελ. 1].

Συγκρίνοντας το παραδοσιακό SCADA με τα PMU:

- Το SCADA ανανεώνεται κάθε δύο με 5 δεύτερα, ενώ το PMU έχει ρυθμό δειγματοληψίας 30 φορές το δευτερόλεπτο.

- Τα δεδομένα του SCADA έχουν υστέρηση και διαστρέβλωση, ενώ τα PMU έχουν ελάχιστη υστέρηση και χρονικές ετικέτες.
- Τα PMU είναι συμβατά με σύγχρονες τεχνολογίες επικοινωνιών.
- Το SCADA ανταποκρίνεται σε στατική συμπεριφορά, ενώ το PMU στη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος.
- Το παραδοσιακό SCADA στηρίζεται σε ανάλυση συχνότητας, έτσι αντιλαμβάνεται μόνο ότι υπάρχει διαταραχή MW στο δίκτυο. Το PMU στηρίζεται στη γωνία, έτσι αντιλαμβάνεται (με τη μέθοδο του τριγωνισμού) πού ακριβώς υπάρχει διαταραχή MW στο δίκτυο.

Σε αναλογία με ιατρικά διαγνωστικά μηχανήματα, το παραδοσιακό SCADA είναι μηχανήμα ακτίνων X, ενώ το PMU είναι μαγνητικός τομογράφος [Gir10, σελ. 49].

2.3 Τηλεμετρία

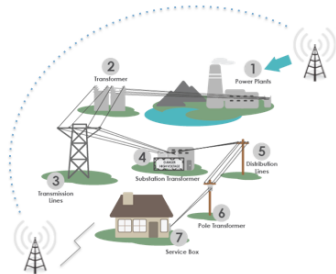
Οι μορφές επικοινωνίας που απαιτεί το SCADA είναι η “τηλεμετρία”. Τηλεμετρία είναι η μέτρηση μιας ποσότητας με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ερμηνεύσιμη μακριά από τον αρχικό ανιχνευτή. Το διακριτικό στοιχείο της τηλεμετρίας είναι η φύση του ενδιάμεσου μέσου, η οποία επιτρέπει τη μετατροπή της μέτρησης σε μια άλλη ποσότητα, επαρκώς μετρήσιμη από απόσταση. Η πραγματική απόσταση είναι ασήμαντη. Η τηλεμετρία μπορεί να είναι αναλογική ή ψηφιακή. Στην αναλογική τηλεμετρία αναπτύσσεται μια τάση, ένα ρεύμα ή μια συχνότητα ανάλογη της μετρούμενης ποσότητας και μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού επικοινωνίας στην περιοχή λήψης. Εκεί το παραληφθέν σήμα εφαρμόζεται σε έναν μετρητή βαθμονομημένο να δείχνει την ποσότητα που μετράται, ή εφαρμόζεται απ’ ευθείας σε μια συσκευή ελέγχου όπως ένας υπολογιστής ECC. Οι διαμορφώσεις αναλογικής τηλεμετρίας περιλαμβάνουν μεταβλητό ρεύμα, εύρος παλμού, μήκος παλμού και συχνότητα παλμού, με πιο κοινά τα δύο τελευταία. Στη ψηφιακή τηλεμετρία, η ποσότητα που μετράται μετατρέπεται σε κώδικα, όπου η ακολουθία των μεταδιδόμενων παλμών δείχνει την ποσότητα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της ψηφιακής τηλεμετρίας είναι ότι κατά τη μετάδοση από τη μία τοποθεσία στην άλλη τα δεδομένα δε χάνουν την ακρίβειά τους. Η ψηφιακή τηλεμετρία χρειάζεται μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό (A/D) και πιθανώς από ψηφιακό σε αναλογικό (D/A) [McC, σελ. 9].

Το πρώτο κύκλωμα σήματος για τηλεμετρία με SCADA συνίσταται από συστραμμένο ζεύγος συρμάτων. Παρόλο που ήταν απλό και οικονομικό για μικρές αποστάσεις, έχει θέματα αξιοπιστίας από θραύση, διείσδυση νερού και δυναμικό γης κατά τα σφάλματα. Οι βελτιώσεις στο συστραμμένο ζεύγος συρμάτων οδήγησαν στον παραδοσιακό, όπως γνωρίζουμε σήμερα, τύπο μέσων για τηλεμετρία SCADA, μισθωμένο καλώδιο, σήμα ισχύος, ή μικροκύματα. Αυτά είναι ακουστικές μορφές τηλεμετρίας. Δηλαδή αντιπροσωπεύουν κανάλια επικοινωνίας, ψηφιακά ή αναλογικά, κατάλληλα για μετάδοση ομιλίας. Η συχνότητα κυμαίνεται γενικά μεταξύ 300 με 3000Hz.

Το μισθωμένο καλώδιο σημαίνει χρήση τυπικών τηλεφωνικών κυκλωμάτων. Αυτή είναι μια βολική και απλή τηλεμετρία όταν είναι διαθέσιμη, αν και μπορεί να γίνει αναξιόπιστη και χρειάζεται διαρκείς μισθώσεις. Επιπρόσθετα, δεν ελέγχεται από το χρήστη και απαιτεί προσεκτική επικοινωνία με το χρήστη και την εταιρεία τηλεφωνίας. Το σήμα ισχύος προσφέρει μια φθηνή και τυπικά πιο αξιόπιστη εναλλακτική στο μισθωμένο καλώδιο. Εδώ, το ίδιο το κύκλωμα μετάδοσης χρησιμοποιείται, για να διαμορφώσει ένα σήμα επικοινωνίας σε μια συχνότητα πολύ υψηλότερη από τα 60hz. Οι περισσότερες διαμορφώσεις συμβαίνουν στα 30-500khz.

Η ασφάλεια των σημάτων ισχύος είναι πολύ υψηλή, αφού ο εξοπλισμός επικοινωνιών βρίσκεται εντός των υποσταθμών. Ένα μειονέκτημα του σήματος ισχύος είναι ότι η επικοινωνία δεν

μπορεί να γίνει όταν η γραμμή επικοινωνίας έχει διακοπεί, για παράδειγμα μέσω ανοιχτών αποζευκτών. Συνήθως, αυτή είναι η στιγμή, όπου το σήμα επικοινωνίας χρειάζεται περισσότερο. Επιπρόσθετα, το σήμα ισχύος είναι ευαίσθητο σε θόρυβο και χρειάζεται προσεκτική ανάλυση του πηλίκου του σήματος δια το θόρυβο. Τα περισσότερα σήματα ισχύος ήταν αποκλειστικά αναλογικά, πλέον είναι διαθέσιμα και ψηφιακά σήματα ισχύος.



Σχήμα 2.13: ραδιοφωνικό

SCADA

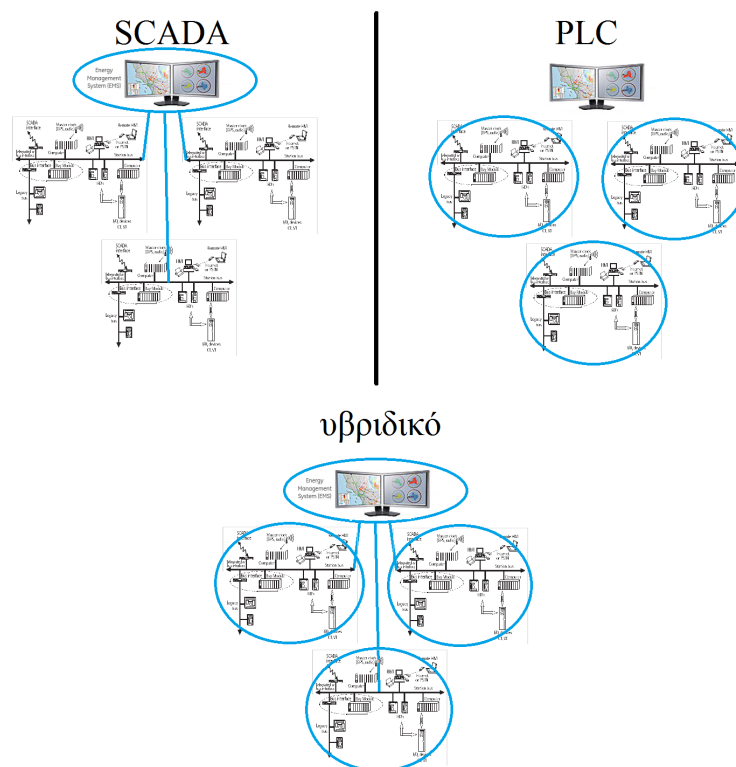
η τεχνολογία επιτρέπει επικοινωνίες εξαιρετικής ταχύτητας. Αν και το κόστος ήταν αρχικά απαγορευτικό, έχει μειωθεί σε σημείο που να είναι οικονομικά βιώσιμο. Οι οπτικές ίνες μπορεί να διατρέχουν το υπέδαφος μέσα στα καλώδια ισχύος ή μπορούν να στερεωθούν στους πυλώνες ακριβώς κάτω από τις γραμμές. Μπορούν επίσης να διατρέχουν τον οπλισμό των συρμάτων αναρτημένα πάνω στις γραμμές μεταφοράς. Άλλες μορφές επικοινωνίας είναι οι δορυφόροι, VHF και UHF, ραδιοφωνική επικοινωνία διευρυμένου εύρους και συστήματα διαδικτύου/intranet [McC, σελ. 10].

2.4 Ανάπτυξη των PLC

Η ψηφιακή τεχνολογία σύντομα έβγαλε τα πρώτα συστήματα RTU και SCADA, τα οποία αργότερα αναπτύχθηκαν σε μεγάλα Συστήματα Κατανεμημένου Ελέγχου (Distributed Control Systems, DCS) για κεντρικό έλεγχο εργοστασίων. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκαν και τα PLC, τα οποία προορίζονται για τοπικό επεξεργαστικό έλεγχο. Αρχικά, το SCADA και τα PLC αντιμετώπιζονταν ως δύο αντίθετες και ανταγωνιστικές ιδέες [BW03, σελ. 15]. Μία αφθονία άρθρων εκδιδόταν σε τεχνικά περιοδικά με θέμα “SCADA ή PLC” (σχήμα 2.14), με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας [Str03, σελ. 10].

Το SCADA (και αργότερα το DCS) προοριζόταν για κεντρικό έλεγχο του εργοστασίου. Ως εκ τούτου ήταν ισχυρά στον εποπτικό έλεγχο και στις επικοινωνίες με τα RTU. Τότε αναπτύχθηκαν πραγματικά οι βιομηχανικές επικοινωνίες σε ένα τεράστιο βαθμό, και εισήχθησαν τα πρώτα πρωτόκολλα επικοινωνίας. Η αρχική λειτουργία του RTU ήταν η συλλογή πληροφοριών από συνδεδεμένα όργανα, η μετάφραση των πληροφοριών στη γλώσσα που απαιτούσε ο επόπτης, η αποστολή τους στον επόπτη, η λήψη οδηγιών και η μεταβίβασή τους. Επομένως, το RTU αρχικά λειτουργούσε μόνο ως προσωρινή μνήμη για τις επικοινωνίες και ως μεταφραστής μεταξύ του επόπτη και των οργάνων [Str03, σελ. 11].

Η τεχνολογία των PLC προοριζόταν για τοπικό επεξεργαστικό έλεγχο [ΚΔ01][Βο15][ΒΒ97], ώστε ήταν δυνατό σε τοπική ευφυΐα και κατάλληλο για επεξεργασία αναλογικών σημάτων (τα γνωστά 0/4-20mA, ±10V και άλλα πρότυπα). Τα PLC αρχικά προοριζόταν για να αντικαταστήσουν δυσκίνητους πίνακες λογικών ρελέ, και δεν προοριζόταν να ελέγχονται αποκλειστικά από έναν επόπτη. Επομένως, δεν είχαν ισχυρές δυνατότητες επικοινωνίας. Τα PLC λειτουργούσαν ανεξάρτητα, το πρώτο “εποπτικό” λογισμικό λάμβανε πληροφορίες από τα PLC, κυρίως για να διατηρούν το χειριστή της αίθουσας ελέγχου ενήμερο για το τί συμβαίνει στο εργοστάσιο. Αυτές οι πληροφορίες ήταν πολύ περιορισμένες, περιορίζονταν κυρίως στις τρέχουσες καταστάσεις, συνήθως χωρίς ιστορικά δεδομένα. Ο εποπτικός έλεγχος ήταν περιορισμένος, ενώ τα πρώτα PLC δεν μπορούσαν



Σχήμα 2.14: Η φιλοσοφία του κεντρικού ελέγχου έναντι της φιλοσοφίας τοπικού ελέγχου.

καν να προγραμματιστούν από απόσταση. Ωστόσο, η ευστροφία, η ευκολία εφαρμογών και το σχετικά χαμηλό κόστος των PLC σε σχέση με τα RTU διευκόλυνε την εξάπλωσή τους σε πολλούς βιομηχανικούς υποσταθμούς, κυρίως στη Βόρεια Αμερική [Str03, σελ. 11].

Ωστόσο, η γρήγορη τεχνολογική πρόοδος ήταν στην ημερήσια διάταξη. Στα RTU παραχωρήθηκε τοπική ευφυΐα, τα PLC έγιναν πιο φιλικά στις επικοινωνίες, οι διαφορές μεταξύ των δύο τεχνολογιών μειώθηκαν. Ο πεφωτισμένος μηχανικός συνειδητοποίησε ότι και οι δύο τεχνολογίες είχαν να προσφέρουν κάτι στο εργοστάσιό του. Σταδιακά εμφανίστηκαν υβριδικά συστήματα έχοντας επικοινωνούντα PLC και RTU σε ένα πανίσχυρο εποπτικό σύστημα.

Η ικανότητα των PLC να εκτελούν λογικές πράξεις αντιγράφηκε σε προηγμένα ρελέ συγκεκριμένων κατασκευαστών. Αυτοί δημιούργησαν ρελέ που έχουν αυτήν την ικανότητα, ώστε να διαθέτουν τοπική ελεγκτική λειτουργικότητα, όντας τα “ευφυή ρελέ” [Str03, σελ. 12].

Μέχρι πολύ πρόσφατα ένας σοβαρός περιορισμός για το συνδυασμό των τεχνολογιών ήταν ότι τα πρώτα εποπτικά υλικά και λογισμικά, όπως τα RTU και τα PLC, ήταν εξαιρετικά κτητικά. Κάθε κατασκευαστής ανέπτυξε το δικό του πρωτόκολλο επικοινωνίας. Έτσι, προϊόντα από διαφορετικούς κατασκευαστές δε μπορούσαν να επικοινωνήσουν στο ίδιο δίκτυο [Str03, σελ. 12].

2.5 Τάσεις για το μέλλον

“Λαμβάνοντας υπόψη την παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας στην παρακολούθηση, προστασία και έλεγχο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, είναι εύκολο να συνειδητοποιήσουμε ότι οι πιθανότητες να δημιουργήσουμε ένα σύστημα προστασίας και ελέγχου πλήρως αυτοματοποιημένο, που αυτοοργανώνεται, αξιόπιστο και ασφαλές είναι τεράστιες. Επίσης, η τεχνολογία δημιουργεί τη δυνατότητα βιώσιμων εξοικονομήσεων στη συνολική υλοποίηση του σχεδιασμού και τη διαχείριση ενός τέτοιου συστήματος. Η επίτευξη αυτών των στόχων απαιτεί να επεκταθεί

πολλή ερευνητική προσπάθεια στην ανάπτυξη νέων προσεγγίσεων για προστασία και έλεγχο, που αξιοποιούν πλήρως τις δυνατότητες της τεχνολογίας.”[Mel12, σελ. 1.40]

Αύριο θα χρησιμοποιούμε ευρεία διασυνδεδεμένα προστατευτικά σχήματα ελέγχου, τα οποία προσαρμόζουν δυναμικά τις τρέχουσες συνθήκες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και διευθετούν αυτόματα γρήγορους χειρισμούς, για να διατηρήσουν την ακεραιότητα όλου του δικτύου [Gir10, σελ. 58].



Σχήμα 2.15: Όραμα για το μέλλον του ενεργειακού οικοσυστήματος [Gir10, σελ. 60].

2.5.1 Νέες προκλήσεις αξιοπιστίας

Καθώς το σύστημα ενέργειας εξελίσσεται, εμφανίζονται νέες απαιτήσεις που καταλήγουν σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα λειτουργίας [Gir10, σελ. 30]:

- Γήρανση διαχειριστών, λιγότερες ικανότητες και εμπειρία. Το 50% είχε δικαίωμα συνταξιοδότησης το 2010.
- Γήρανση εξοπλισμού συστήματος μετάδοσης, λίγες επενδύσεις. Αυξημένη συμφόρηση, περιορισμένα όρια λειτουργίας, αναβαλλόμενη διαχείριση, έλλειψη σχεδιασμού ενσωματωμένων συστημάτων.
- Απορυθμισμένο περιβάλλον, απρόβλεπτη φόρτιση δικτύου. Η ανταλλαγή δεδομένων, ο προγραμματισμός και η λειτουργία γίνεται από τις αγορές.
- Απειλές ασφαλείας διαδικτύου (διείσδυση, ιοί). Εξουσιοδότηση/Ταυτοποίηση χρηστών, προστασία από επιθέσεις.
- Τρομοκρατικές απειλές (Φυσική ασφάλεια). Προστασία περιοχών και δεδομένων.
- Απειλές οικονομικού ελέγχου (Sarbanes - Oxley)

2.5.2 Οπτικοποίηση πληροφοριών

Οι διαχειριστές μπορούν να χειριστούν μόνο 5 με 9 κομμάτια πληροφορίας, κατά τον Miller το 1956 [Gir10, σελ. 36]. Με το πέρασμα των χρόνων, η ποσότητα των πληροφοριών αυξάνεται δραματικά. Οπότε χρειάζεται η επεξεργασία αυτών των δεδομένων και να οπτικοποιηθούν με έξυπνο τρόπο.

2.5.3 Άμεση εκτίμηση κατάστασης

“Πρόσφατες τεχνολογίες βασισμένες στο Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης (GPS) επιτρέπουν τη μέτρηση των γωνιών των φασιθετών των τάσεων.”[Mel06, σελ. 3] Έτσι, είναι εφικτό να υπολογιστούν “οι ροές ισχύος εν λειτουργία αξιοποιώντας ένα μέρος των διαθέσιμων μετρήσεων οι οποίες επαρκούν για να επιλυθεί το πρόβλημα των ροών ισχύος. Η λύση του προβλήματος των ροών ισχύος εξάγει την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.”[Mel06, σελ. 3]

Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι είναι γνωστές οι γωνίες των τάσεων και των μέτρων των τάσεων. Σε αυτήν την περίπτωση, γνωρίζοντας τις αγωγιμότητες όλων των στοιχείων του δικτύου είναι εφικτή η εκτίμηση της κατάστασης λειτουργίας μόνο από τα δεδομένα τάσης. Αυτή η μέθοδος είναι αμφιλεγόμενη, ενώ είναι αντικείμενο αρκετής έρευνας. Αφενός οδηγεί από την “εκτίμηση κατάστασης” σε “μέτρηση κατάστασης”, αφετέρου είναι επιρρεπής σε λάθη.

Όταν γίνει διαθέσιμη η εκτίμηση κατάσταση της διανομής σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, θα παρέχει την αναγκαία, ακριβή, πλήρη και συνεπή βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου. Αυτή η βάση δεδομένων είναι προαπαιτούμενη για τη λειτουργία μιας αφθονίας αυτοματοποιημένων διαδικασιών του δικτύου διανομής. Κάποιες από αυτές είναι η αποκατάσταση δικτύου (μετά από σφάλμα), παρακολούθηση συστήματος σε πραγματικό χρόνο, ελαχιστοποίηση απωλειών ενέργειας, διαχείριση διακοπών μέσω ανάλυσης υποθετικών σεναρίων (“what-if” analysis), αξιολόγηση ασφαλείας, βελτιστοποίηση τάσης/άεργου ισχύος, έλεγχος γεννητριών και νοήμονα διαχείριση φορτίων. Η χρήση αυτών των διαδικασιών θα είναι ένα βασικό μέρος των μελλοντικών έξυπνων δικτύων διανομής [Tay11, σελ. 50].

2.5.4 Ενιαίο πρωτόκολλο επικοινωνίας

Οι τάσεις είναι να χρησιμοποιούνται ανοιχτά πρωτόκολλα αντί για εμπορικά. Οι επικοινωνίες είναι πανταχού παρούσες, φθηνότερες, καλύτερες και ταχύτερες. Επίσης το SCADA διασυνδέεται με άλλα συστήματα, όπως επιχειρηματικά και διοικητικά, για να αποκτήσουν παραγωγικότητα, ενώ είναι υποχρεωτική η ανταλλαγή πληροφοριών και η ανοιχτή πρόσβαση. Επιπλέον, το SCADA βασίζεται όλο και περισσότερο στο δημόσιο δίκτυο τηλεπικοινωνιών και του διαδικτύου [Dag05, σελ. 22].

Οι προγραμματιστές συνειδητοποίησαν γρήγορα τις τεράστιες δυνατότητες του λογισμικού SCADA, που μπορεί να επικοινωνεί με τα διάφορα προϊόντα των κατασκευαστών. Έτσι, τα πρώτα ανεξάρτητα ανοιχτά λογισμικά SCADA βγήκαν στην αγορά, υποστηρίζοντας διάφορα πρωτόκολλα. Επιτέλους, αυτή η ανάπτυξη έκανε δυνατό να υπάρχει ένας κεντρικός σταθμός εποπτικού ελέγχου, που ελέγχει εξοπλισμό από διαφορετικούς κατασκευαστές [Str03, σελ. 13].

Ορισμένοι κατασκευαστές, ωστόσο, επέμεναν να διατηρήσουν τον εξοπλισμό τους, το λογισμικό SCADA, και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας κτητικά, άλλοτε υπέρ τους, άλλοτε εναντίον τους. Το ερώτημα αν αυτή η πρακτική θα είναι μακροπρόθεσμα πιο ευεργετική ή επιβλαβής, θα γίνει σύντομα παρωχημένο. Καθώς η κίνηση για ένα διεθνές πρότυπο πρωτόκολλο επικοινωνιών πλησιάζει προς την οριστικοποίησή του, οι κατασκευαστές εξοπλισμού μη συμβατού με το πρότυπο θα εξαφανιστούν σύντομα από την αγορά [Str03, σελ. 13].

2.5.5 Ασφάλεια στο δίκτυο διακίνησης πληροφοριών

Η αυξανόμενη χρήση του διαδικτύου και του δημόσιου δικτύου οδηγεί σε ζητήματα ασφαλείας. Ο κίνδυνος είναι πραγματικός. Οι μη οργανωμένοι αντίπαλοι είναι οι *cracker*, οι *hacker*, οι ανταγωνιστές και οι εγκληματίες. Οι οργανωμένοι είναι οι τρομοκράτες, οι *χακτιβιστές*, το οργανωμένο έγκλημα και τα ξένα κράτη [Dag05, σελ. 60].

Το πρότυπο 1402-2000 της IEEE είναι οδηγός φυσικής και ηλεκτρονικής ασφαλείας για Υποσταθμούς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Παρέχει ορισμούς και παραμέτρους που επηρεάζουν απειλές διείσδυσης και δίνουν κριτήρια για την ασφάλεια του υποσταθμού. Οι ηλεκτρονικές μέθοδοι που μελετήθηκαν είναι οι κωδικοί ασφαλείας, η επαλήθευση ανατροφοδότησης (*dial-back*), η επιλεκτική πρόσβαση, η σάρωση για ιούς, η κρυπτογράφηση και η κωδικοποίηση [Dag05, σελ. 91].

2.5.6 Ευφυή συστήματα

Τα “ευφυή συστήματα” περιλαμβάνουν συστήματα ασαφούς λογικής και νευρωνικά δίκτυα.

Η ασαφής λογική ξεκίνησε σε εφαρμογές ελέγχου ως ένα σύστημα οδηγούμενο από τη γνώση για άμεσο ή εποπτικό ελεγκτή. Με το πέρασμα των χρόνων η ασαφής λογική αναδύεται ως μια ισχυρή μη γραμμική τεχνική για να λύσει διαφορετικά προβλήματα σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Ήταν ιδιαίτερα επιτυχής για εργασίες που εμπλέκουν ανθρώπινη διαισθητική προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος [Uki07, σελ. 35]. Έχει μελετηθεί η επίλυση διάφορων προβλημάτων με ασαφή λογική όπως η εξισορρόπηση φορτίου, η διαχείριση ενέργειας, η διαχείριση ζήτησης, ο έλεγχος ροών ισχύος, η ανάλυση σφαλμάτων, η προστασία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και άλλα.[Uki07]

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι εμπνευσμένο από το βιολογικό νευρωνικό δίκτυο. Η αρχή του είναι η λειτουργία ενός δικτύου απλών στοιχείων διασυνδεδεμένων μεταξύ τους. Το νευρωνικό δίκτυο “εκπαιδεύεται” να λύνει συγκεκριμένα προβλήματα, δηλαδή προσδιορίζονται συγκεκριμένα “βάρη”. Τα βάρη αυτά είναι τα στοιχεία-κλειδιά του τεχνητού νευρωνικού δικτύου [Uki07, σελ. 75]. Προβλήματα για τα οποία έχει μελετηθεί η επίλυση με νευρωνικά δίκτυα είναι η πρόβλεψη και εξισορρόπηση φορτίου, η ταξινόμηση σφαλμάτων, η ανάλυση ευστάθειας, η αρμονική ανάλυση και άλλα [Uki07, σελ. 75].

2.5.7 Ο υποσταθμός του μέλλοντος

“Υπάρχει μια ξεκάθαρη τάση προς [RSW11, σελ. 13]:

- *Ολοκλήρωση Υποσταθμού* Ενσωμάτωση των λειτουργιών προστασίας, ελέγχου και απόκτησης δεδομένων σε έναν ελάχιστο αριθμό προγραμμάτων για να μειωθούν τα κόστη κεφαλαίου, να μειωθεί ο χώρος της αίθουσας ελέγχου και των πινάκων, και να εξαλειφθούν ο περισσότες εξοπλισμός και οι περισσότες βάσεις δεδομένων.
- *Αυτοματοποίηση Υποσταθμού* Ανάπτυξη του υποσταθμού, των λειτουργιών και εφαρμογών τροφοδότησης. Η ανάπτυξη θα συμπεριλαμβάνει από το SCADA και την επεξεργασία συναγερμών έως τον ενσωματωμένο έλεγχο, για να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση των κεφαλαίουχικών προσόντων και να ενισχυθούν οι δραστηριότητες λειτουργίας και συντήρησης με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση.

Ο υποσταθμός αλλάζει. Ήταν μια δομή *παραδοσιακής προστασίας και ελέγχου*, μια συσσώρευση από τελειώς διαφορετικές συσκευές (ρελέ, μετρητές, πίνακας διακοπών και RTU), που συγκροτείται από συγκεντρωτική λύση με εκτεταμένη παράλληλη καλωδίωση, έλεγχο με μιμική οθόνη, κουμπιά, δείκτες τοποθεσίας, παρεμβατικά ρελέ (*interposing relays*), τοπικό/ασύρματο διακόπτη και άλλα. Γίνεται ένα σύγχρονο σύστημα *ισόβαθμης προστασίας και ελέγχου* με τα εξής χαρακτηριστικά [RSW11, σελ. 13]:

- αποκεντρωμένη προστασία και δομή ελέγχου,
- λίγες, ευφυείς συσκευές πολλαπλών χρήσεων με ομοιόμορφο σχέδιο,
- λίγες σειριακές συνδέσεις αντί για εκτεταμένη παράλληλη καλωδίωση,
- ο έλεγχος του υποσταθμού γίνεται με τη βοήθεια καταλόγου σε μια κεντρική Μονάδα Οπτικής Παρουσίασης (Visual Display Unit).

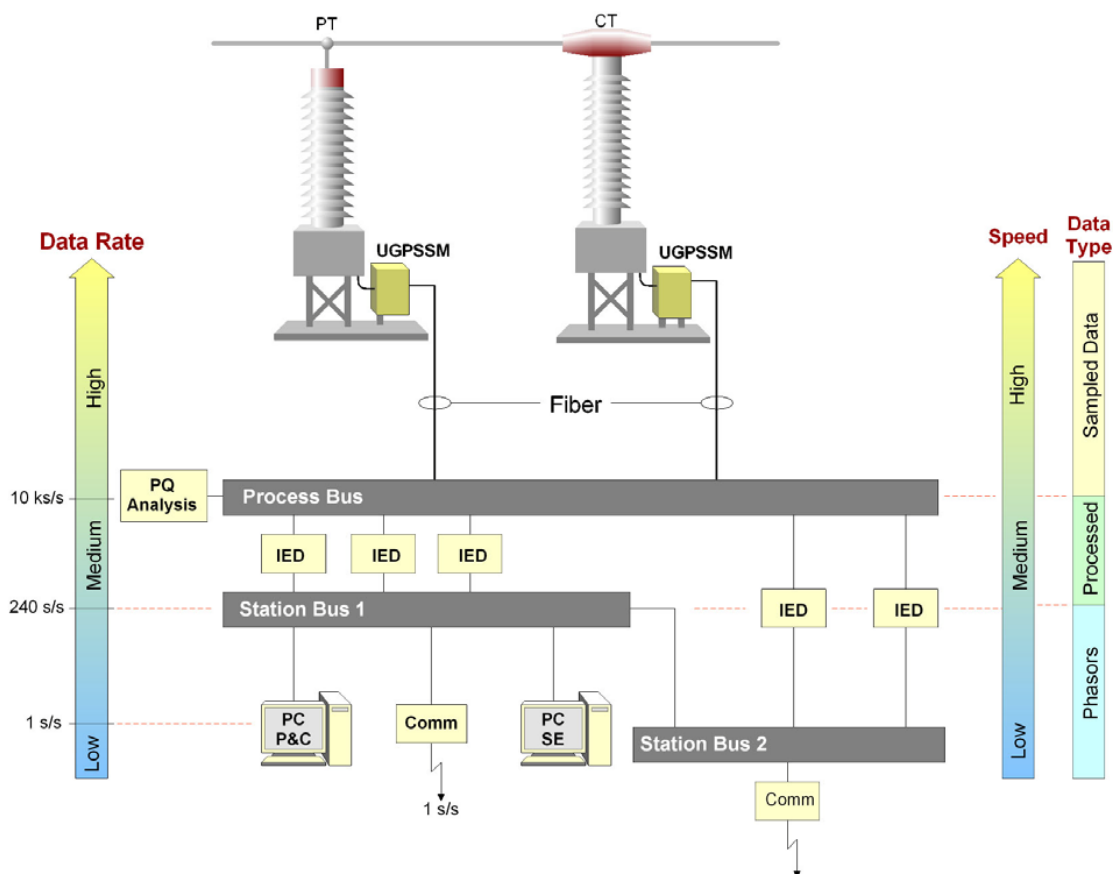
“Η πρώτη εξονυχιστική (far looking) προσέγγιση είναι να αναγνωρίσουμε ότι η τρέχουσα κατακερματισμένη προσέγγιση για προστασία και έλεγχο μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί με την τρέχουσα τεχνολογία.” “Η συλλογή δεδομένων σε οποιοδήποτε σύνθετο υποσταθμό μπορεί να γίνει με μονάδες συγχρονισμένες με GPS, τοποθετημένες δίπλα από τους μετρητικούς μετασχηματιστές. Αυτό το σχήμα ενσωματώνει τη συλλογή δεδομένων σε ένα απλό ενσωματωμένο υποσύστημα που συνδέει όλες τις μονάδες με ένα δίαυλο επεξεργασίας στο χώρο ελέγχου του υποσταθμού [ΚΜΗ+08]. Ο δίαυλος επεξεργασίας μπορεί να είναι μια απλή συσκευή, ή πολλαπλές συσκευές. Αυτό το σύστημα επιτρέπει την περίσσεια, για παράδειγμα μπορεί να υπάρχουν περισσότεροι από έναν μετρητικό μετασχηματιστή (VT ή CT) συνδεδεμένοι στο ίδιο σημείο του συστήματος. Στο δίαυλο επεξεργασίας όλα τα συλλεγμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα. Τα διάφορα IED (ρελέ, PMU, εγγραφείς και τα λοιπά) μπορούν να συνδεθούν στο δίαυλο επεξεργασίας. Αυτές οι συσκευές επεξεργάζονται τα δεδομένα και δημιουργούν τα “επεξεργασμένα δεδομένα”, πχ. υπολογίζουν ποσότητες όπως ενεργές τιμές, φασιθέτες (μέτρο και γωνία), ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς, αρμονικές και άλλα. Τα επεξεργασμένα δεδομένα είναι διαθέσιμα στο δίαυλο του σταθμού. Τα IED, PMU μπορούν επίσης να εκτελούν τις δικές τους λειτουργίες, πχ. εκτέλεση μιας συγκεκριμένης προστατευτικής λειτουργίας, ή όταν πρέπει, να δώσουν εντολή σε έναν διακόπτη. Η εντολή θα σταλεί με οπτική ίνα στη μονάδα για την πραγματική εκτέλεση της εντολής.

Αν και αναφέρονται πολλαπλά IED, είναι πιθανό ένα απλό PC, με την κατάλληλη υπολογιστική ισχύ, να εκτελεί την επεξεργασία των δεδομένων και την εκτέλεση των διάφορων προστατευτικών και ελεγκτικών διαδικασιών. Γενικά όμως, η περίσσεια υπολογιστή ισχύς ίσως να είναι αναγκαία για να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος.

Το προτεινόμενο σχήμα επιτρέπει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στην προστασία. Σήμερα, τα προστατευτικά ρελέ στηρίζονται σε ένα μικρό αριθμό εισόδων, για να αναγνωρίσουν τις συνθήκες λειτουργίας της συσκευής (ζώνης) που προστατεύουν, πριν λάβουν μια απόφαση. Αν και οι έξυπνοι μηχανικοί έχουν σχεδιάσει αξιοσημείωτους αλγορίθμους, για να εντοπίζονται ανυπόφορες συνθήκες, από περιορισμένο πλήθος δεδομένων, υπάρχουν γκρίζες περιοχές όπου αυτοί οι αλγόριθμοι δεν προσφέρουν καμία απάντηση με σιγουριά. Περισσότερες πληροφορίες θα προσφέρουν περισσότερη σιγουριά σε αυτούς τους αλγορίθμους. Με το προτεινόμενο σχήμα είναι δυνατό να σχεδιαστεί ένας αλγόριθμος για ρελέ, ο οποίος χρησιμοποιεί όλα τα διαθέσιμα δεδομένα στο δίαυλο επεξεργασίας, για να εντοπίζει ανυπόφορες συνθήκες και την αιτία της συνθήκης. Σε αυτήν την περίπτωση, η απόφαση προστασίας (ποιός διακόπτης θα ενεργοποιηθεί και ποιός όχι) είναι μάλλον μια απλούστερη αρμοδιότητα. Η προσέγγιση επιτρέπει τη σύνδεση των τρεχόντων ρελέ πολλαπλών χρήσεων με το δίαυλο επεξεργασίας και τη λειτουργία των προστατευτικών διαδικασιών όπως εκτελούνται σήμερα. Ωστόσο, επιτρέπει επίσης την ενσωμάτωση όλων των προστατευτικών διαδικασιών σε μια συσκευή (ένα IED).” [Me112, σελ. 1.40]

2.5.8 Προστασία βασισμένη στην εκτίμηση κατάστασης

“Πρόσφατα, μια άλλη προσέγγιση έχει αναδειχθεί. Αυτή η προσέγγιση άρχισε στο Georgia tech με χρηματοδότηση από το EPRI υπό την πρωτοβουλία μετασχηματισμού του δικτύου. Οι οδηγοί για τη νέα προσέγγιση είναι: (α) η ελαχιστοποίηση των προστατευτικών ρελέ και, αν είναι δυνατή, η εξέλιξη σε προστατευτικά συστήματα χωρίς ρυθμίσεις, (β) η παροχή ασφαλούς και αξιόπιστης



Σχήμα 2.16: Ιδέα για ενσωμάτωση συλλογής δεδομένων, προστασίας, ελέγχου και επικοινωνιών [Me112, σελ. 1.42].

προστασίας των ηλεκτρικών εξαρτημάτων όπως η γεννήτρια, η γραμμή, ο μετασχηματιστής και τα λοιπά, και (γ) η παροχή μιας εγκατάστασης που θα επιβεβαιώνει το μοντέλο των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του συστήματος.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί δυναμική εκτίμηση κατάστασης, βασισμένη στο δυναμικό μοντέλο του εξαρτήματος, το οποίο αντανακλά ακριβώς τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του, καθώς και την κατάσταση της ηλεκτρικής φόρτισης και της θερμοκρασίας του. Η μέθοδος απαιτεί ένα σύστημα παρακολούθησης του εξαρτήματος υπό προστασία και μετρά συνεχώς τα τερματικά δεδομένα (όπως το τερματικό μέτρο και τη γωνία της τάσης, τη συχνότητα, και το ρυθμό αλλαγής συχνότητας) και τα δεδομένα για την κατάσταση του εξαρτήματος (όπως τις ρυθμίσεις των μετασχηματιστών και τη θερμοκρασία). Η δυναμική εκτίμηση κατάστασης επεξεργάζεται αυτά τα μετρητικά δεδομένα, με το δυναμικό μοντέλο του εξαρτήματος, και εξάγει τις συνθήκες λειτουργίας του.

Αυτή η προσέγγιση αντιμετωπίζει κάποιες προκλήσεις οι οποίες μπορούν να ξεπεραστούν με την τρέχουσα τεχνολογία. Μερική λίστα των προκλήσεων είναι η παρακάτω:

- Δυνατότητα εκτέλεσης της δυναμικής εκτίμησης κατάστασης σε πραγματικό χρόνο (κάθε περίοδος δειγματοληψίας μπορεί να είναι πολύ μικρή, για παράδειγμα 250 μ s).
- Θέματα αρχικοποίησης.
- Επικοινωνίες σε περίπτωση εκτεταμένου γεωγραφικά εξαρτήματος (πχ. γραμμής).

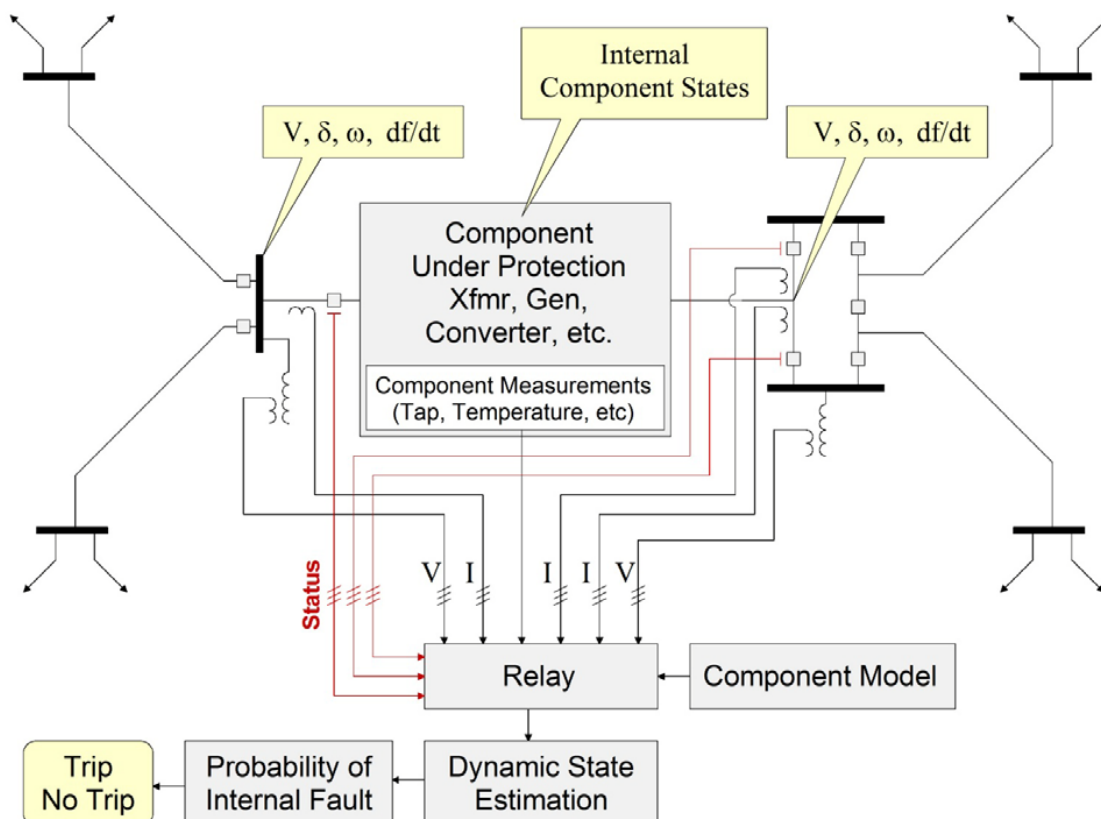
- Νέες προσεγγίσεις μοντέλων - για παράδειγμα τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού κορεσμού μπορούν να μοντελοποιηθούν.
- Απαιτήσεις για μετρήσεις συγχρονισμένες με GPS σε περιπτώσεις πολλαπλών ανεξάρτητων συστημάτων συλλογής δεδομένων, όπως σύστημα συλλογής δεδομένων από τα δύο άκρα μιας γραμμής.

Το θέμα της μοντελοποίησης είναι θεμελιώδες σε αυτήν την προσέγγιση. Για επιτυχία, το μοντέλο πρέπει να έχει μεγάλη πιστότητα, ώστε ο εκτιμητής κατάστασης του εξαρτήματος να προσδιορίσει αξιόπιστα τη κατάσταση λειτουργίας (υγεία) του εξαρτήματος. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε έναν μετασχηματιστή κατά τη φόρτισή του. Ο μετασχηματιστής θα διαπεραστεί από υψηλό ρεύμα ροής που αντιπροσωπεύει μια ανεκτή κατάσταση λειτουργίας και άρα δεν πρέπει να ενεργοποιηθεί κάποιο ρελέ. Η δυναμική εκτίμηση κατάστασης εξαρτήματος θα μπορεί να “εντοπίσει” το ρεύμα ροής και να αποφασίσει ότι αντιπροσωπεύει μια κανονική λειτουργική διαδικασία. Αυτό απαιτεί ένα μοντέλο μετασχηματιστή που μοντελοποιεί με ακρίβεια τον κορεσμό και το ρεύμα ροής του μετασχηματιστή. Μπορούμε να προβλέψουμε τη δυνατότητα ότι ένα μοντέλο υψηλής πιστότητας που χρησιμοποιείται για τα προστατευτικά ρελέ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κύρια δεξαμενή του μοντέλου η οποία μπορεί να παρέχει το κατάλληλο μοντέλο για άλλες εφαρμογές. Για παράδειγμα για εφαρμογές EMS, ένα μοντέλο θετικής ακολουθίας μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο υψηλής πιστότητας στη βάση δεδομένων του EMS. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης θα είναι ότι το EMS μοντέλο θα έρθει από το πεδίο επιβεβαίωσης του μοντέλου (η χρήση του μοντέλου από το ρελέ σε πραγματικό χρόνο παρέχει την επιβεβαίωση του μοντέλου).

Η προσέγγιση αυτή έχει επιπρόσθετα πλεονεκτήματα. Πρώτον, η δυναμική εκτίμηση κατάστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν όλο το σύστημα είναι συνεπές, οι ρυθμίσεις των μετρητικών μετασχηματιστών (VT και CT) είναι οι σωστές, οι συνδέσεις είναι συνεπείς και τα λοιπά. Οποιαδήποτε ασυμφωνία θα εμφανιστεί στα αποτελέσματα της δυναμικής εκτίμησης κατάστασης. Επιπρόσθετα, κάθε σφάλμα στα όργανα, πχ. αποτυχία VT, θα αναγνωριστεί άμεσα από τον εκτιμητή κατάστασης. Άρα, παρέχει ένα εργαλείο για εντοπισμό λανθάνοντων σφαλμάτων με αποτελεσματικό τρόπο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμήσει τις παραμέτρους του εξαρτήματος που παρακολουθεί από τα περισσά δεδομένα. Αυτό θα καταλήξει σε εξασφάλιση του ορθού και επιβεβαιωμένου μοντέλου του εξαρτήματος σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, το ρελέ τώρα μπορεί να υπηρετήσει ως “δημιουργός και κάτοχος” του επιβεβαιωμένου μοντέλου του εξαρτήματος. Το μοντέλο επίσης μπορεί να υποβληθεί σε άλλες εφαρμογές ή να σταλεί σε κεντρική δεξαμενή για την εταιρία.” [Mel12, σελ. 1.42]

“Ο υπερβαθμονομητής (SuperCalibrator) είναι θεωρητικά πολύ απλός. Η τεχνολογία βασίζεται σε έναν ευέλικτο υβριδικό φορμαλισμό εκτίμησης κατάστασης. Αυτή είναι ένας συνδυασμός από παραδοσιακό φορμαλισμό της εκτίμησης κατάστασης και του φορμαλισμού των μετρήσεων που έχουν συγχρονιστεί με GPS, το οποίο χρησιμοποιεί ένα διευρυμένο σύνολο όλων των διαθέσιμων δεδομένων του υποσταθμού. Η βασική ιδέα είναι να παρέχει ένα μοντέλο βασισμένο σε μεθοδολογία διόρθωσης σφαλμάτων εντός του υποσταθμού. Συγκεκριμένα, ένα λεπτομερές μοντέλο του υποσταθμού, (τριφασικό, εστιάζει στους διακόπτες, και συμπεριλαμβάνει κανάλια οργάνων) χρησιμοποιείται σε μια στατιστική διαδικασία (εκτίμηση κατάστασης) για να ταιριάζει όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις του υποσταθμού (εν δυνάμει παραφθαρμένες) στο μοντέλο του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση οδηγεί σε μια μεθοδολογία εκτίμησης κατάστασης σε επίπεδο υποσταθμού.

Το σύνολο μετρήσεων του Υπερβαθμονομητή περιλαμβάνει δεδομένα από PMU, SCADA, ρελέ και όλες τις άλλες τοπικές μετρήσεις. Αυτό το σύνολο μετρήσεων διευρύνεται με επιπρόσθετες ψευδομετρήσεις. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης στο επίπεδο του υποσταθμού καταλήγει σε μια τριφασική εκτίμηση. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται μετά για να υπολογιστεί η εκτίμηση θετικής ακολουθίας, η ποσοτικοποίηση του επιπέδου εμπιστοσύνης της



Σχήμα 2.17: Προσέγγιση δυναμικών ρελέ με δυναμική εκτίμηση κατάστασης [Mel12, σελ. 1.43].

εκτίμησης κατάστασης και των μετρήσεων, η ριμεία ταυτοποίηση και απομάκρυνση κακών δεδομένων, η διόρθωση τοπολογικών σφαλμάτων, η επεξεργασία συναγερωμών, και η ταυτοποίηση πρωταρχικών αιτιών.” [Mel10, σελ. 34]

2.5.9 Επέκταση κύκλου ζωής του εξοπλισμού

Στο μέλλον η μοντελοποίηση θα λαμβάνει υπόψιν τις χρονικές και χωρικές ιδιότητες των πηγών δεδομένων των IED. Οι χωρικές ιδιότητες είναι πολύ σημαντικές για ανταλλαγή πληροφοριών, μοντέλα αναπαράστασης και εφαρμογές. Τα τεράστια μεγέθη των δεδομένων που παράγονται θέτουν σοβαρές προκλήσεις στην αρχιτεκτονική των επικοινωνιών [Kez13, σελ. 22].

Αυτήν τη στιγμή ο κύκλος ζωής των EMS είναι “κυκλικός”. Επιδέχονται λίγων βελτιώσεων και δεν επιτρέπονται σημαντικές αναβαθμίσεις. Η τάση είναι να μεταβούμε σε “σπειροειδή” κύκλο ζωής. Σε αυτήν επιτρέπονται μεγάλες αναβαθμίσεις, ώστε ο κύκλος ζωής να μην σταματάει, αλλά να επεκτείνεται καθώς γίνονται αναβαθμίσεις. Το κλειδί σε αυτήν τη νέα στρατηγική είναι ένα σχέδιο στο οποίο οι διάφορες λειτουργίες είναι ανεξάρτητες (“διαλειτουργικό”). Η συζήτηση για αυτές τις απαιτήσεις είναι καλά τεκμηριωμένες από αναφορές του GridWise Architecture Council (GWAC) [Kez13, σελ. 55].

2.5.10 Συμβολή των κοινωνικών τάσεων

Γενικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται από τις τάσεις που υπάρχουν όχι μόνο στην τεχνολογία αλλά και στην κοινωνία. Έχουν ήδη αναφερθεί κίνδυνοι ασφαλείας που υπάρχουν στις επικοινωνίες. Για παράδειγμα οι τρομοκρατικές επιθέσεις είναι ένας πραγματικός κίνδυνος

που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

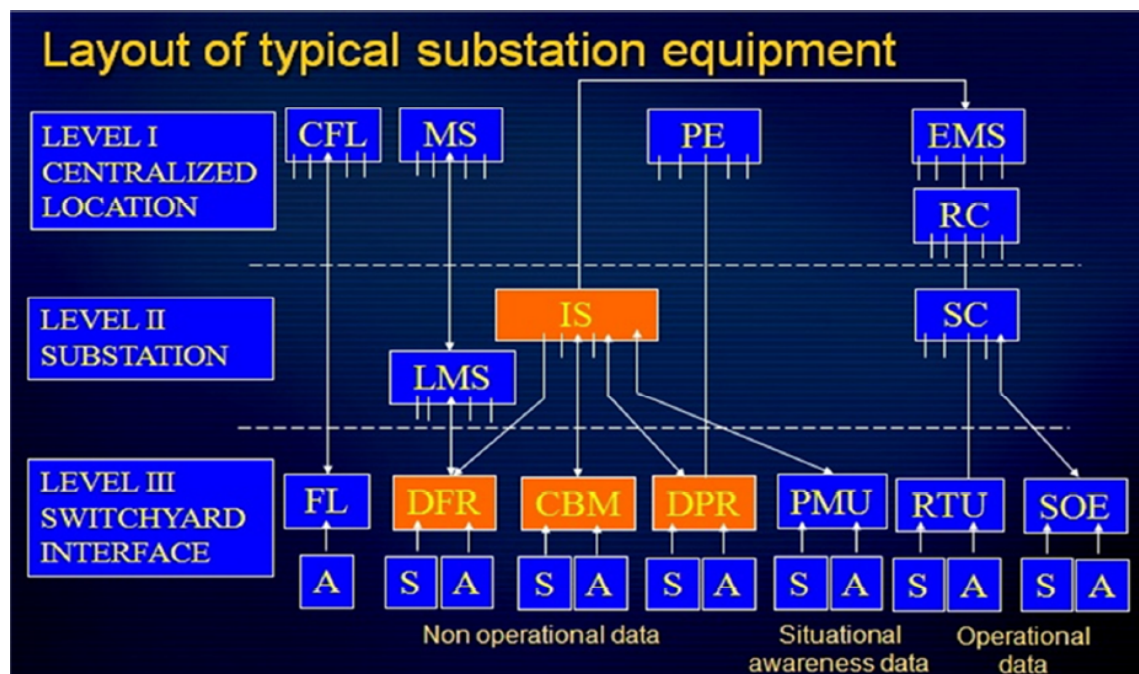
Μια άλλη τάση προκύπτει από την οικονομία. Υπάρχει η επιθυμία να αναπτυχθεί μία λειτουργική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με πολλά οικονομικά υποκείμενα. Προς το παρόν, υπάρχει ένα νέο τεχνικό πρόβλημα με το φυσικό ηλεκτρικό σύστημα, συμπεριλαμβανομένων της επικοινωνίας και του ελέγχου. Το σύστημα αυτό δεν επιτρέπει πρόθυμα την ποικιλία υποκειμένων. Επίσης, δεν επιτρέπει πρόθυμα την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ πολλών υποκειμένων, και την επεξεργασία τους για ευθυγράμμιση συχνά αντικρουόμενων στόχων [Πi14, σελ. 4]. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι να συλληφθεί η εξάρτηση των τεχνικών, κοινωνικών και θεσμικών θεμάτων, ώστε να συμβιβάσουν την ανάγκη για ποικιλία, καθώς και τις προσιτές και εύρωστες υπηρεσίες ενέργειας [Πi14, σελ. 5].

Τέλος, μια άλλη τάση προέρχεται από την οικολογία. Προτείνεται η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, για να μειωθεί ο αντίκτυπος της παραγωγής στο περιβάλλον. Επίσης, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μειώνουν την κατανάλωση πρώτων υλών.

Κεφάλαιο 3

Σύστημα διαχείρισης σύγχρονων υποσταθμών

Ο υποσταθμός υποστηρίζει το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μετρώντας και ελέγχοντας το δικό του υποδίκτυο [McD12, σελ. 1.1]. Η αυτοματοποίηση των υποσταθμών συνεισφέρει στη δημιουργία μιας ανοιχτής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και στην εξοικονόμηση κατά τη λειτουργία, τη συντήρηση και την εγκατάσταση. Επίσης, συμβάλλει στη λειτουργία του κέντρου ελέγχου [JK02], κυρίως με τη συλλογή και αποστολή δεδομένων καθώς και την παραλαβή και εκτέλεση εντολών. Η διαδικασία ελέγχου προϋποθέτει την ακριβή μοντελοποίηση του συστήματος. Η μοντελοποίηση γίνεται σε τρία στάδια: την επεξεργασία τοπολογίας, την εκτίμηση κατάσταση και τον υπολογισμό των ροών ισχύος.



Σχήμα 3.1: Σχέδιο σύγχρονου υποσταθμού [Kez13].

3.1 Αυτοματοποίηση υποσταθμών

Η αυτοματοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να οριστεί ως το σύστημα διαχείρισης, ελέγχου και προστασίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συλλογή των πληροφοριών του συστήματος σε πραγματικό χρόνο, τις ισχυρές εφαρμογές τοπικού και απομακρυσμένου ελέγχου και την προηγμένη ηλεκτρική προστασία. Ο πυρήνας ενός αυτόματου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η τοπική ευφυΐα, η ανταλλαγή δεδομένων, ο εποπτικός έλεγχος και η παρακολούθηση. Η αυτοματοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται και ως αυτοματοποίηση υποσταθμών [Str03, σελ. 1].

Η αυτοματοποίηση υποσταθμών περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία [Str03, σελ. 1]:

- Ηλεκτρική προστασία
- Έλεγχος
- Μετρήσεις
- Παρακολούθηση
- Ανταλλαγή δεδομένων

Η ηλεκτρική προστασία είναι ακόμα ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία κάθε πίνακα διακοπών, για να προστατέψει τον εξοπλισμό και το προσωπικό, και να περιορίσει τη ζημιά σε περίπτωση ηλεκτρικού σφάλματος. Η ηλεκτρική προστασία είναι μια τοπική λειτουργία. Πρέπει να λειτουργεί ανεξάρτητα από τον αυτοματισμό του ηλεκτρικού συστήματος αν είναι αναγκαίο, αν και είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του αυτοματισμού του ηλεκτρικού συστήματος υπό κανονικές συνθήκες. Οι λειτουργίες ηλεκτρικής προστασίας δεν πρέπει ποτέ να διακινδυνεύσουν ή να περιοριστούν σε οποιοδήποτε αυτόματο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [Str03, σελ. 2].

Ο έλεγχος περιλαμβάνει τοπικό και απομακρυσμένο έλεγχο. Ο τοπικός έλεγχος συνίσταται από δράσεις που μπορεί λογικά να αποφασίσει μόνη της η συσκευή ελέγχου, για παράδειγμα σύμπλεξη με οδό παροχής (bay interlocking), ακολουθίες μεταγωγών, και έλεγχος συγχρονισμού. Η ανθρώπινη παρέμβαση περιορίζεται και ο κίνδυνος ανθρώπινου λάθους μειώνεται σε μεγάλο βαθμό. Επίσης, ο τοπικός έλεγχος πρέπει να συνεχίζει να λειτουργεί ακόμα και χωρίς την υποστήριξη του υπόλοιπου αυτοματισμού του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο απομακρυσμένος έλεγχος λειτουργεί, για να ελέγξει τους υποσταθμούς από απομακρυσμένους διακομιστές SCADA. Οι ρυθμίσεις των ρελέ μπορούν να αλλάξουν από το σύστημα και οι αιτήσεις για συγκεκριμένες πληροφορίες μπορούν να εκκινήσουν από τους διακομιστές SCADA. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη να πάει το προσωπικό στον υποσταθμό, για να εκτελέσει μεταγωγικές ενέργειες. Οι μεταγωγικές ενέργειες μπορούν να εκτελεστούν πολύ πιο γρήγορα, το οποίο είναι ένα τεράστιο πλεονέκτημα σε καταστάσεις ανάγκης. Το περιβάλλον εργασίας είναι ασφαλέστερο για το προσωπικό, και μπορούν να αποφευχθούν τεράστιες απώλειες παραγωγής. Επιπρόσθετα, ο χειριστής ή μηχανικός του τερματικού SCADA έχει μια συνολική εικόνα του τί συμβαίνει στο ηλεκτρικό δίκτυο σε όλο το εργοστάσιο, βελτιώνοντας την ποιότητα της λήψης αποφάσεων [Str03, σελ. 2].

3.1.1 Λόγοι αυτοματοποίησης υποσταθμού

Υπάρχουν οικονομικοί και τεχνικοί λόγοι για την αυτοματοποίηση των υποσταθμών.

Η αγορά ενέργειας επιδέχεται μεγάλων αλλαγών, ενώ αναμένονται περισσότερες αλλαγές στο μέλλον. Σε μια παραδοσιακή αγορά, όπου εθνικά κέντρα ελέγχου εμπορεύονται την ενέργεια, δεν

υπάρχουν άλλοι πάροχοι για τους πελάτες. Σε μια απορρυθμισμένη αγορά, αυτή η κατάσταση εξοφάνίζεται σταδιακά, και αυτή η τάση θα ενισχυθεί στο άμεσο μέλλον. Οι εταιρίες υπηρεσιών ενέργειας αντικαθιστούν τις εταιρίες συστημάτων ενέργειας, και νέοι λιανέμποροι ενέργειας μπαίνουν στην αγορά. Επίσης, η ιδιωτικοποίηση/απορύθμιση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας έχουν εισάγει μη εθνικές εταιρίες στην αγορά, ώστε να επιτρέπουν την είσοδο νέων παραγωγών και λιανεμπόρων. Οι πάροχοι προσφέρουν καθημερινά πληροφορίες για τις δυνατότητες μεταφοράς και οι έμποροι λαμβάνουν πληροφορίες κατανάλωσης. Αυτό προϋποθέτει γρήγορη ανταλλαγή πληροφοριών παροχής και τιμών. Επιπλέον, οι πελάτες χρειάζεται να ξέρουν το καθημερινό κόστος λειτουργίας, για να σχεδιάσουν κατάλληλα την παραγωγή, να ελαχιστοποιήσουν το κόστος και να αυξήσουν το κέρδος. Οι υπάρχοντες υποσταθμοί ίσως πρέπει να αναβαθμιστούν, για να παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες με έγκαιρο τρόπο, για να υποστηρίξουν τις αποφάσεις της αγοράς ενέργειας [BNA+03, σελ. 3].

Η αυτοματοποίηση οδηγεί σε εξοικονόμηση κατά τη λειτουργία. Ο έλεγχος του εξοπλισμού από απόσταση εξαλείφει την ανάγκη να βρίσκεται ένας άνθρωπος για τοπικό έλεγχο. Τα σφάλματα εντοπίζονται και εκκαθαρίζονται πιο γρήγορα, μειώνοντας το χρόνο διακοπής, το οποίο έχει άμεσο αντίκτυπο στο κόστος. Τα σφάλματα ελέγχου και προστασίας του εξοπλισμού ταυτοποιούνται γρήγορα, και ακολουθούν έγκαιρες διορθωτικές δράσεις. Αυτό γίνεται με ακολουθία μεταγωγών και έμπειρα συστήματα που εκτελούν περίπλοκες πράξεις με μεγαλύτερη ακρίβεια από ανθρώπινο χειριστή. Οι ελεγκτικές διαδικασίες δικτύου, όπως ο έλεγχος τάσης ή άεργου ισχύος, η ρύθμιση δικτύου και η αποκατάσταση προσφοράς μετά από σφάλματα, γίνονται πιο γρήγορα και συντεταγμένα [BV+03, σελ. 2].

Η αυτοματοποίηση οδηγεί σε εξοικονόμηση κατά τη συντήρηση. Εξαλείφεται ο περιοδικός έλεγχος και η επιθεώρηση των ηλεκτρομηχανικών ρελέ και μετρητών. Ο χρόνος και η προσπάθεια για επίλυση προβλημάτων καλωδίωσης μειώνεται, γιατί μειώνεται η πολυπλοκότητα των σχημάτων καλωδίωσης. Η κατάσταση του πρωταρχικού εξοπλισμού παρακολουθείται μειώνοντας την τακτική του συντήρησης. Για παράδειγμα τα νέα IED προσφέρουν πληροφορίες για το πόσες φορές διέκοψε ένας διακόπτης σε συνθήκες σφάλματος και το συνολικό ρεύμα του μετάχρησε. Αυτή η πληροφορία μπορεί να προσδιορίσει πότε χρειάζεται συντήρηση ο διακόπτης. Η συντήρηση, αντί να στηρίζεται σε χρονοδιάγραμμα, στηρίζεται στη συνεχή παρακολούθηση και διάγνωση της εγκατάστασης, ώστε να γίνεται έγκαιρα [BV+03, σελ. 2].

Η εξοικονόμηση στην εγκατάσταση αρχίζει από την καλοσχεδιασμένη αρχιτεκτονική. Η χρήση του LAN του υποσταθμού είναι η κύρια ευκαιρία για να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης. Αντί για εκτεταμένα χάλκινα καλώδια αρκεί μία μόνο οπτική ίνα, για να επικοινωνήσει ο αρχικός εξοπλισμός με την αίθουσα ελέγχου ή τον δίαυλο επεξεργασίας. Στο σύγχρονο δευτερεύον εξοπλισμό μπορεί να εκτελεστεί ένα πλήθος λειτουργιών σε ένα μόνο IED, ενώ στον παραδοσιακό χρειάζονται πολλές μονάδες [BV+03, σελ. 2].

Από τεχνική άποψη τα IED παρέχουν έγκαιρα δεδομένα για υποστήριξη των επιχειρησιακών λειτουργιών, διευκολύνουν την αναβάθμιση προσθήκης ή τροποποίησης των λειτουργιών του IED, τη διάγνωση και τη διόρθωση των προβλημάτων με έναν έγκαιρο τρόπο, και διατηρούν ακριβή τεκμηρίωση των λειτουργικών ρυθμίσεων του υποσταθμού. Οι σύγχρονοι υποσταθμοί πρέπει να παρέχουν ακριβείς, έγκαιρες και έμπιστες πληροφορίες στα κέντρα ελέγχου και στα κέντρα πληροφοριών. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα, η χρήση των IED εξοικονομεί εργασία. Η ικανότητα διάγνωσης προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο στα σύγχρονα συστήματα, προσφέρει ακριβή πληροφόρηση για το σύστημα, συντομεύει το χρόνο διάγνωσης, καταλήγει σε πιο γρήγορη αποκατάσταση μετά από σφάλμα, και αυξάνει την αξιοπιστία του υποσταθμού [BV+03, σελ. 3].

3.2 Συλλογή δεδομένων

“Ο αποτελεσματικός έλεγχος και η διαχείριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν ακριβή και αξιόπιστη γνώση του μοντέλου και της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος σε τρέχοντα χρόνο. Για αυτόν το λόγο, τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτουν ένα εκτεταμένο σύστημα συλλογής δεδομένων. Τοπικά αναλογικά και ψηφιακά μεγέθη, όπως το μέτρο της τάσης, οι ροές ενεργού και άεργου ισχύος, τα φορτία, η κατάσταση των διακοπών (ανοιχτοί/κλειστοί) και τα λοιπά, μετρούνται και αποστέλλονται σε ένα κεντρικό σημείο. Οι μετρήσεις είναι απλές, απαιτούν απλά όργανα μέτρησης.” [Mel06, σελ. 3]

Οι τυπικές αναλογικές μετρήσεις περιλαμβάνουν [Mel06, σελ. 7]:

- Μετρήσεις ροών MW
- Μετρήσεις ροών MVAR
- Μετρήσεις μέτρων τάσεων (kV)
- Μετρήσεις μέτρων ρευμάτων (kA)
- Μετρήσεις διαφορών φασιθετικών γωνιών (°)

Οι τυπικές ψηφιακές μετρήσεις περιλαμβάνουν [Mel06, σελ. 7]:

- Κατάσταση διακοπών
- Κατάσταση αποζευκτών
- Ρυθμίσεις μετασχηματιστών

“Όλες οι μετρήσεις λαμβάνονται κάθε ένα ή περισσότερα δευτερόλεπτα, αποστέλλονται σε κεντρικό σημείο (στο Κέντρο Διαχείρισης Ενέργειας ή Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας), όπου επεξεργάζονται για να εξαχθεί η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.” [Mel06, σελ. 3]

3.2.1 Υποσύστημα οργάνων μέτρησης

“Το αντικείμενο του υποσυστήματος οργάνων είναι να παρέχουν την αρμόζουσα σύνδεση μεταξύ συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υψηλών τάσεων και των ρελέ που λειτουργούν σε σχετικά χαμηλή τάση. Συγκεκριμένα, με το πέρασμα των χρόνων έχουν τυποποιηθεί οι είσοδοι τάσεων και ρευμάτων προς τα ρελέ. Οι τυπικές τάσεις είναι 69V και 115V. Τα τυπικά ρεύματα είναι 5 Ampere και 1 Ampere. Το υποσύστημα οργάνων συνδέεται με το σύστημα υψηλής τάσης και παράγει πανομοιότυπα των τάσεων και των ρευμάτων στα τυποποιημένα επίπεδα των ρελέ. Γενικά, το υποσύστημα οργάνων υποσταθμού απαρτίζεται από μετασχηματιστές τάσης και μετασχηματιστές ρεύματος. Υπάρχουν τέσσερις τύποι μετασχηματιστών τάσης (Voltage Transformers VT):

- (α) μετασχηματιστής δυναμικού τύπου πλήγματος (wound type, PT)
- (β) μετασχηματιστής τάσης συζευγμένου πυκνωτή (CCVT)
- (γ) ωμικός καταμεριστής τάσης (VD) και
- (δ) οπτικός μετασχηματιστής τάσης (EOVT)

Στο παρελθόν μόνο οι πρώτες δύο τεχνολογίες χρησιμοποιούνταν και οι δευτερεύουσες τάσεις ήταν 69V, 3V ή 15V.

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι αισθητό με μετασχηματιστές ρεύματος. Υπάρχουν τέσσερις τύποι μετασχηματιστών ρεύματος που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μετασχηματιστές ρεύματος με έξοδο ρεύματος CT/C ή απλά CT αντιπροσωπεύουν την κινητήριο δύναμη για εφαρμογές με ρελέ. Αυτοί οι μετασχηματιστές εφαρμόζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το ρελέ είναι μέρος του δευτερεύοντος κυκλώματος. Το “φορτίο”, πχ. η σύνθετη αντίσταση του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι η σύνθετη αντίσταση του ρελέ ή το άθροισμα των συνθέτων αντιστάσεων όλων των ρελέ που συνδέονται στο δευτερεύον κύκλωμα του CT. Η σύνθετη αντίσταση του ρελέ είναι τυπικά μια πολύ μικρή αντίσταση, τυπικά 0,1Ω. Γενικά, διάφορα ρελέ μπορούν να συνδεθούν (σε σειρά) στο ίδιο δευτερεύον κύκλωμα ενός μόνο CT. Οι συσκευές CT/V είναι εξοπλισμένες με μια σύνθετη αντίσταση στο δευτερεύον και η έξοδος είναι η τάση κατά μήκος της αντίστασης. Η έξοδος αυτών των CT συνδέεται κανονικά σε μια συσκευής μεγάλης αντίστασης εισόδου. Σε πολλές εφαρμογές το πρωτεύον ρεύμα μπορεί να έχει πολύ υψηλή τιμή. CT σιδηρού πυρήνα ίσως κορεστούν για πολύ μεγάλα ρεύματα και άρα να διακινδυνεύουν την κανονική λειτουργία των ρελέ. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι επιθυμητό να υπάρχουν CT που είναι γραμμικοί και δεν κορέννται. Τα CT πυρήνα αέρος (γνωστά και ως σπείρες Rogowski) μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αυτά τα CT δεν κορέννται. Το θέμα με τα CT είναι η ακρίβειά τους και ίσως χρειάζονται βαθμονόμηση κάθε φορά που εγκαθίστανται σε νέα θέση. Πρόσφατα τα οπτικά CT έχουν εισαχθεί (MOCT).” [Mel12, σελ. 1.14]

3.2.2 Έμμεση μέτρηση δεδομένων

Τα δεδομένα αναλογικών μετρήσεων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των ηλεκτρικών ποσοτήτων (τάση και ρεύμα) απ’ ευθείας (μέτρηση μέτρου τάσης, μετρήσεις εγχύσεων ισχύος στο ζυγό, μετρήσεις ροής ισχύος στους κλάδους) ή έμμεσα (μέτρηση μέτρου τάσης κόμβου, μέτρησης έγχυσης ισχύος κόμβου, μέτρηση ροής ισχύος διακοπών και άλλα). Επιπρόσθετα και περισσά δεδομένα από πολλαπλά IED μπορούν να βελτιώσουν την ευρωστία του προσδιορισμού τοπολογίας [Kez13, σελ. 13][JRE+05].

Τα IED που εστιάζουν σε αυτήν την εφαρμογή είναι ο Ψηφιακός Καταγραφέας Σφαλμάτων (Digital Fault Recorder, DFR), το Ψηφιακό Προστατευτικό Ρελέ (Digital Protective Realy, DPR), ο Παρακολουθητής Διακοπών (Circuit Breaker Monitor, CBM). Αυτά τα IED προσφέρουν πολλαπλές μετρήσεις των ίδιων τιμών. Όλα τα παραπάνω IED μετρούν:

- ρεύματα φάσεων
- βοηθητικές επαφές “α” και “β” διακοπών
- σήμα της διαδρομής του ρελέ

Αυτά τα περισσά δεδομένα ίσως χρησιμοποιηθούν για να επαληθεύσουν την ακρίβεια των μετρήσεων. Τα επιπρόσθετα σήματα που εγγράφονται από τα IED είναι [Kez13, σελ. 13]:

- Εσωτερικά σήματα ελέγχου διακοπών, καταγεγραμμένα από CBM, παρέχοντας περισσότερη επίγνωση για τη λειτουργία του διακόπτη.
- Μεταβατικά, καταγεγραμμένα από DFR, περιγράφοντας τη συμπεριφορά της φάσης ρεύματος υπό διακοπτικές λειτουργίες και γεγονότα εκκαθάρισης σφαλμάτων.
- Λογικά σήματα προστατευτικών ρελέ, συλλεγμένα από το DPR, περιγράφοντας λεπτομέρειες από τις αρχικές δράσεις του ρελέ, καθώς και το επακόλουθο κλείσιμο, αυτόματο κλείσιμο και δράσεις αποτυχίας του διακόπτη.

Αν τα καταγεγραμμένα δεδομένα από τα παραπάνω IED έχουν αποθηκευτεί στη βάση δεδομένων του υποσταθμού, είναι εφικτό να προσδιοριστεί εύρωστα και βελτιωμένα η τοπολογία, χρησιμοποιώντας επιπρόσθετα και περισσά δεδομένα από την ακόλουθη ανάλυση [Kez13, σελ. 13]:

- Χρονική συσχέτιση ανάμεσα σε αναλογικά και ψηφιακά δεδομένα. Είναι πολύ γνωστό ότι μια αλλαγή στην τοπολογία ακολουθείται από αντίστοιχη αλλαγή σε αναλογικό σήμα και γίνεται αντιληπτή σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Τα DFR είναι ικανά να ανιχνεύσουν τις αναλογικές (τάσεις και ρεύματα) και ψηφιακές πληροφορίες για τους διακόπτες. Συνδυάζοντας αυτήν την πληροφορία με το αίτιο-αποτέλεσμα, μπορεί κάποιος να επιβεβαιώσει αν ο διακόπτης άνοιξε/έκλεισε, παρακολουθώντας τις αναμενόμενες αλλαγές στα σχετικά αναλογικά σήματα.
- Λειτουργική συσχέτιση. Συσχετίζοντας τα καταγεγραμμένα σήματα με τη δράση που σχετίζεται το ρελέ μπορεί να εξάγει επιπρόσθετες πληροφορίες για την κατάσταση του διακόπτη. Τα DPR καταγράφουν τα σήματα εσόδου (ρεύμα και τάση) καθώς και τις αυτόματες δράσεις ελέγχου του διακόπτη. Παρακολουθώντας την ακολουθία αυτών των σημάτων δίνει την πραγματική τελική κατάσταση (ανοιχτό/κλειστό) του διακόπτη, και έτσι επιτρέπει τον έλεγχο της πραγματικής κατάστασης στην οποία κατέληξε ο διακόπτης σε σχέση με την αναμενόμενη.
- Έλεγχος ακολουθίας διακοπτικών λειτουργιών. Πολλές διακοπτικές λειτουργίες αρχίζουν από εντολές που προκαλούν αλλαγή στον έλεγχο των επαφών του κυκλώματος του διακοπτικού ή ελεγκτικού εξοπλισμού. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από το CBM μπορεί κάποιος να επιβεβαιώσει αν η αρχική ακολουθία διακοπτικών έχει ολοκληρωθεί αναμενόμενα, αφού η απόκλιση από την αναμενόμενη ακολουθία μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα κοιτάζοντας τις πιθανές αποκλίσεις στα σήματα των κυκλωμάτων ελέγχου των διακοπτικών.

3.3 SCADA

Οι λειτουργίες του SCADA περιλαμβάνουν εποπτικό έλεγχο, συλλογή δεδομένων, βάσεις δεδομένων πραγματικού χρόνου, διεπιφάνεια χειριστή με γραφικά, επεξεργασία συναγερωμών, αρχειοθέτηση δεδομένων/καταγραφείας τάσεων σε διαγράμματα ταινίας, διεπιφάνεια χάρτη [Dag05, σελ. 6].

Το SCADA επικοινωνεί με RTU, PLC και IED.

3.3.1 Επικοινωνίες

Οι επικοινωνίες διαμορφώνουν τον πυρήνα κάθε αυτοματισμού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, και είναι πρακτικά η κόλα που κρατά το σύστημα ενωμένο. Χωρίς επικοινωνίες, οι λειτουργίες ηλεκτρικής προστασίας και τοπικού ελέγχου θα συνεχίσουν, και η τοπική συσκευή μπορεί να αποθηκεύει κάποια δεδομένα, αλλά ο αυτοματισμός του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να λειτουργήσει. Η μορφή επικοινωνίας θα εξαρτάται από την χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική, και το αντίστροφο, η αρχιτεκτονική εξαρτάται από τη μορφή επικοινωνιών που έχει επιλεγεί [Str03, σελ. 3][Poz03].

“Οι επικοινωνίες είναι ενσωματωμένες στην απομακρυσμένη τερματική μονάδα (RTU), η οποία διαχειρίζεται τη συλλογή δεδομένων, τις διαδικασίες ελέγχου και την επικοινωνία με τον κεντρικό σταθμό. Ο κεντρικός σταθμός έχει πολλά κανάλια επικοινωνίας με απομακρυσμένες τερματικές μονάδες. Πολλές φορές ένα ξεχωριστό κανάλι αντιστοιχεί σε κάθε απομακρυσμένη τερματική μονάδα. Σε άλλες περιπτώσεις, υπάρχουν λιγότερα κανάλια από τις απομακρυσμένες τερματικές μονάδες, οπότε τουλάχιστον ένα τερματικό χρειάζεται να μοιραστεί το κανάλι του. Τα

αναλογικά δεδομένα σαρώνονται περιοδικά, τυπικά κάθε ένα ή περισσότερα δευτερόλεπτα. Κάθε σάρωση σκανδαλίζεται από το σύστημα του κέντρου ελέγχου σε προκαθορισμένο χρόνο, αποστέλλοντας αίτηση σε όλους τους απομακρυσμένους σταθμούς να στείλουν δεδομένα.” [Me106, σελ. 4]

“Η ποσότητα των δεδομένων που συλλέγονται και μεταδίδονται είναι πολύ μεγάλη για τυπικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα μεταφέρονται με κανάλια επικοινωνίας. Για να ελαχιστοποιηθεί η κίνηση πληροφοριών χρησιμοποιείται κάποια μορφή συμπίεσης [DSF06]. Για παράδειγμα, για δεδομένα κατάστασης μπορεί κάποιος να στείλει μόνο τις αλλαγές των καταστάσεων. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί την ποσότητα των δεδομένων που μεταδίδονται και την ποσότητα της επεξεργασίας που χρειάζεται από τον κεντρικό σταθμό. Τα αναλογικά δεδομένα μπορούν επίσης να συμπιεστούν με διάφορες μεθόδους.

Ανεξάρτητα από τη ρύθμιση του συστήματος, τον παραγωγό του συστήματος SCADA, το λογισμικό επικοινωνίας και τις ρυθμίσεις του υπολογιστή, το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας ενός συστήματος SCADA θα είναι η συλλογή πληροφοριών του συστήματος για κάθε περίοδο δειγματοληψίας.” [Me106, σελ. 7]

3.3.2 Ενιαία βάση δεδομένων

Η βασική ιδέα ενοποίησης των βάσεων δεδομένων είναι να συλλεχθούν τα δεδομένων όλων των IED σε μια ενιαία βάση δεδομένων υποσταθμού [Bru08], η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτόματα για εξαγωγή πληροφοριών [SG05][SY07].

Ένα μεγάλο θέμα είναι πώς θα μετατραπούν τα δεδομένα παρεχόμενα υπό διαφορετικές μορφές σε αυτήν που χρησιμοποιείται από τις εφαρμογές. Ένα προαπαιτούμενο είναι η συνεπής σημασιολογική μοντελοποίηση των δεδομένων IED. Το πρότυπο IEC61970 για ενοποίηση πληθώρας περίπλοκων εφαρμογών αναπτύχθηκε από διαφορετικούς παρόχους στο ίδιο σημασιολογικό πλαίσιο. Αυτό το πρότυπο χρησιμοποιεί το Κοινό Μοντέλο Πληροφοριών (Common Information Model, CIM) για αναπαράσταση των δεδομένων SCADA. Η προσέγγιση του CIM εστιάζει κυρίως στην μοντελοποίηση λειτουργικών δεδομένων και των αντίστοιχων μερών του υποσταθμού. Είναι αντικειμενοστραφές και επιτρέπει επεκτάσεις. Στην πράξη, η δημοσιευμένη έκδοση δεν ανταποκρίνεται στα προαπαιτούμενα κάποιων σημαντικών αναπαραστάσεων για συσκευές πραγματικού χρόνου, όπως ο Εντοπιστής Σφαλμάτων (FL). Το CBM, το DFR και κάποια άλλα IED μπορεί να εισάγουν νέες λειτουργίες που δεν έχουν αναπαράσταση CIM [Kez13, σελ. 16].

Το πρότυπο IEC61970 περιγράφει λεπτομερώς τη συνδεσιμότητα μεταξύ των διάφορων εξοπλισμών, των υποσταθμών και των στατικών και δυναμικών πληροφοριών [IEC02]. Το IEC61850 έχει την πιο λεπτομερή περιγραφή του εξοπλισμού των υποσταθμών καθώς και των ελεγκτικών και εποπτικών όψεων του [IEC][IEC+03a][IEC+03b][IEC+03c][IEC03a]. Το IEC61850 ορίζει ένα δέντρο αντικειμένων για μοντελοποίηση των IED ξεκινώντας από το αντικείμενο-διακομιστής (αντιπροσωπεύοντας φυσικό IED), και περιέχοντας μια ιεραρχία Λογικών Συσκευών (Logical Device, LD), Λογικών Κόμβων (Logical Node, LN), και Αντικειμένων Δεδομένων (Data Object, DO). Το IEC61968 ορίζει το Κατανεμημένο Σύστημα Διαχείρισης (Distributed Management System) [IEC03b]. Γίνεται απόπειρα εναρμόνισης των δύο προτύπων 61850 και 61970 [Kez13, σελ. 16] [Hos07] [KWU+05] [IEC90] [Ste03].

3.4 Σύστημα διαχείρισης ενέργειας

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας (EMS) είναι λογισμικό. Οι περισσότερες εταιρίες δημόσιων υπηρεσιών αγοράζουν το δικό τους EMS από έναν ή περισσότερους παρόχους. Αυτοί οι πάροχοι EMS είναι εταιρίες εξειδικευμένες στο σχεδιασμό, την ανάπτυξη, την εγκατάσταση και τη συντήρηση του EMS στα κέντρα ελέγχου (ECC). Υπάρχουν πολλοί πάροχοι EMS στις ΗΠΑ,

και δραστηριοποιούνται πολύ στην απασχόληση ηλεκτρολόγων μηχανικών με καλές δυνατότητες προγραμματισμού και προγραμματιστές με υπόβαθρο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας [McC, σελ. 12].

Το EMS συνίσταται από τέσσερις κύριες λειτουργίες: μοντελοποίηση του δικτύου (συμπεριλαμβάνοντας την επεξεργασία τοπολογίας και την εκτίμηση κατάστασης), εκτίμηση ασφάλειας, αυτόματο έλεγχο, και επικοινωνία. Άλλες λειτουργίες περιλαμβάνουν υπολογισμό βέλτιστης ροής ισχύος, δέσμευση μονάδων παραγωγής, δρομολόγηση καυσίμων, υδροθερμικό συντονισμό και κοστολόγηση παραγωγής [McC, σελ. 12].

Το μοντέλο του συστήματος είναι απαραίτητο, για να προσδιοριστεί εάν οι συνθήκες λειτουργίας είναι ασφαλείς για την τρέχουσα τοπολογία, και αν ένα ή περισσότερα εξαρτήματα αποτύχουν και αποσυνευχθούν. Το μοντέλο του συστήματος πρέπει να αντανακλά την ορθή τοπολογία και τις ορθές συνθήκες λειτουργίας σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες του δικτύου [McC, σελ. 12]. Η διαδικασία μοντελοποίησης του συστήματος συνίσταται από δύο προβλήματα ανάλυσης: (α) προσδιορισμός της τοπολογίας του δικτύου, (β) προσδιορισμός της κατάστασης λειτουργίας. Οι πληροφορίες που διατίθενται για τη μοντελοποίηση του συστήματος είναι τα δεδομένα κατάστασης και οι αναλογικές μετρήσεις. Η τοπολογία του συστήματος προκύπτει από την κατάσταση των διακοπών και των αποζευκτών. Η κατάσταση λειτουργίας του συστήματος προέρχεται από τις αναλογικές μετρήσεις με δύο διαφορετικές υπολογιστικές διαδικασίες: (α) ροές ισχύος των γραμμών εν λειτουργία και (β) εκτίμηση κατάστασης. Το αποτέλεσμα του προσδιορισμού κατάστασης είναι ένα μοντέλο ροών ισχύος [McC, σελ. 12] [Mel06, σελ. 3].

“Οι ροές ισχύος των γραμμών εν λειτουργία αξιοποιούν ένα μέρος των διαθέσιμων μετρήσεων οι οποίες επαρκούν για να επιλυθεί το πρόβλημα των ροών ισχύος. Η λύση του προβλήματος των ροών ισχύος εξάγει την κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Επειδή οι μετρήσεις συνήθως ενέχουν σφάλμα (αποτέλεσμα από ανακρίβειες μετασχηματιστών δυναμικού ή ρεύματος, σφάλμα μέτρησης, σφάλμα αποστολής και τα λοιπά), το σφάλμα μεταδίδεται απ’ ευθείας στην εκτιμώμενη κατάσταση λειτουργίας. Επίσης, ίσως κάποια μέτρηση να ενέχει ένα μεγάλο σφάλμα (τεράστιο λάθος - εξ αιτίας δυσλειτουργίας του μετρητή ή σφάλμα επικοινωνίας), καταλήγοντας σε ένα μη-επιλύσιμο πρόβλημα ροών ισχύος, ή ενδεχομένως σε μια λύση που διαφέρει λίγο από την πραγματική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος.

Σε ένα περιβάλλον πραγματικού χρόνου, είναι σημαντική η ικανότητα εντοπισμού εσφαλμένων μετρήσεων ή σφαλμάτων στις μετρήσεις (bad data). Για αυτό το λόγο, είναι αναγκαίο να αξιοποιηθούν οι περισσές μετρήσεις. Οι περισσές μετρήσεις αξιοποιούνται για να υπολογιστεί η βέλτιστη εκτίμηση της κατάστασης λειτουργίας του συστήματος με στατιστικές μεθόδους. Η υπολογιστική διαδικασία ονομάζεται εκτίμηση κατάστασης. Οφείλουμε να πούμε ότι η εκτίμηση κατάστασης παρέχει μηχανισμό για: (α) να προσδιοριστεί εάν η κατάσταση του συστήματος μπορεί να υπολογιστεί από τα υπάρχοντα δεδομένα (παρατηρησιμότητα), (β) να φιλτραριστούν συνήθη μετρητικά σφάλματα, και άρα να υπολογιστεί η κατάσταση του συστήματος με το ελάχιστο σφάλμα, (γ) να προσδιοριστούν και να απορριφθούν κακά δεδομένα, και (δ) να προσδιοριστεί ο βαθμός εμπιστοσύνης της εκτιμημένης κατάστασης του συστήματος.” [Mel06, σελ. 3] “Επειδή κανονικά υπάρχουν περισσές μετρήσεις, είναι εφικτή η χρήση των μετρήσεων προς προσδιορισμό ή βελτίωση των παραμέτρων του μοντέλου του συστήματος, ή της βαθμονόμησης των μετρητών εξ αποστάσεως.”

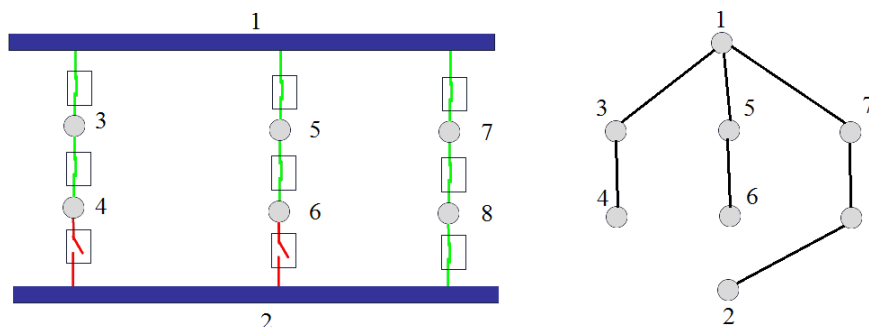
3.4.1 Στρατηγική ελέγχου

Το κέντρο ελέγχου ασκεί εποπτικό έλεγχο και αποκτά δεδομένα. Εξισορροπεί την παραγωγή με τη ζήτηση (αποκοπή). Παρακολουθεί τις ροές και παρατηρεί τα όρια του συστήματος. Συντονίζει ενέργειες συντήρησης, και τη λειτουργία επείγουσας ανταπόκρισης.

Ο τοπικός έλεγχος αφορά τα εργοστάσια ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς. Προ-

σφέρει ανάδραση στον έλεγχο (για παράδειγμα ρυθμιστές τάσης) και προστασία (προστατευτικά ρελέ, διακόπτες). Οι προτεραιότητες είναι η ασφάλεια, η προστασία του εξοπλισμού από ζημιές, η αξιοπιστία και τα οικονομικά [Dag05, σελ. 3].

3.4.2 Επεξεργαστής τοπολογίας

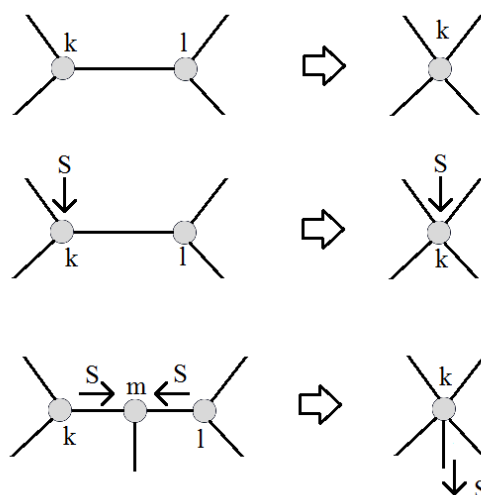


Σχήμα 3.2: Αριστερά ηλεκτρολογικό σχέδιο υποσταθμού. Δεξιά η τοπολογία υπό μορφή γράφου [Mon99, σελ. 146].

Η τοπολογία του δικτύου χαρακτηρίζει τη συνδεσιμότητα μεταξύ των ζυγών (κόμβων), τα στοιχεία κλάδων σε κάθε ζυγό, και ποιές γεννήτριες συνδέονται σε κάθε ζυγό (σχήμα 3.2). Αυτές οι πληροφορίες λαμβάνονται από το EMS μέσω SCADA υπό μορφή καταστατικών δεικτών για κάθε διακόπτη και αποζεύκτη σε όλους τους ζυγούς. Αυτές οι πληροφορίες αναφέρονται ως τα “δεδομένα τμήματος ζυγός-διακόπτης-αποζεύκτης”, παρέχουν μια χαρτογράφηση των ατομικών τμημάτων των ζυγών σε κάθε υποσταθμό, και πώς αυτά συνδέονται.

Διαφορετικά τμήματα ζυγών που συνδέονται με κλειστούς διακόπτες ή αποζεύκτες είναι ηλεκτρικά ένα κόμβος. Ένα βήμα κλειδί στην επεξεργασία τοπολογίας είναι να αναγνωριστούν αυτές οι καταστάσεις, για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των κόμβων, καταλήγοντας στο μοντέλο του δικτύου [McC, σελ. 12].

“Το λογισμικό που λαμβάνει τα δεδομένα κατάστασης και υπολογίζει τη ρύθμιση του δικτύου του συστήματος είναι γνωστό ως ρυθμιστής δικτύου συστήματος.” [Mel06, σελ. 7] Λοιπόν, η επεξεργασία τοπολογίας μετατρέπει τα δεδομένα τμήματος ζυγός-διακόπτης-αποζεύκτης στα επονομαζόμενα δεδομένα “ζυγός-κλάδος” (σχήμα 3.3). Τα δεδομένα ζυγός-κλάδος είναι κατάλληλα για μοντελοποίηση των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών σε σχέση με τις ακριβείς συνδέσεις των τμημάτων των ζυγών σε κάθε υποσταθμό. Οι σύνθετες αντιστάσεις όλων των στοιχείων του δικτύου είναι αποθηκευμένες σε



Σχήμα 3.3: Μετατροπή εγχύσεων (μέση) και ροών (κάτω) ισχύος από “ζυγός-διακόπτης-αποζεύκτης” σε “ζυγός-κλάδος” [Mon99, σελ. 154]. Αυτές οι πληροφο-

φορίες συνδυάζονται με το αποτέλεσμα της επεξεργασίας της τοπολογίας, και επαρκούν, για να περιγράψουν το σύστημα τοπολογίας [McC, σελ. 12].

3.4.3 Εκτίμηση κατάστασης

Δεδομένης της τοπολογίας του συστήματος, παραμένει ο προσδιορισμός των συνθηκών λειτουργίας, πχ. οι τάσεις των ζυγών, τα επίπεδα φόρτισης, και τα επίπεδα παραγωγής. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ένα απλό πρόβλημα - “*απλά δες τα αντίστοιχα δεδομένα από το SCADA*”. Ωστόσο, στην πραγματικότητα υπάρχουν περιπτώσεις μη διαθεσιμότητας δεδομένων και τα σφάλματα των δεδομένων. Η μη διαθεσιμότητα των δεδομένων προέρχεται από δύο πηγές. Πρώτον, μπορεί κάποιιο υποσταθμοί να μην έχουν καθόλου SCADA. Δεύτερον, σε κάποιους υποσταθμούς μπορεί τα RTU ή τα συστήματα τηλεμετρίας να συντηρούνται ή να έχουν κάποιο άλλο απροσδόκητο πρόβλημα. Τα σφάλματα των δεδομένων προέρχονται από το γεγονός ότι όλες οι συσκευές αναλογικών μετρήσεων περιέχουν κάποιο σφάλμα. Τυπικά, το σφάλμα είναι μικρό για κάθε συσκευή, αλλά η χρήση πολλών εκατοντάδων συσκευών, όπου η κάθε μία έχει μικρό σφάλμα, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική ανακρίβεια σε ότι αφορά τη συνολική ανάλυση του συστήματος.

Η εκτίμηση κατάστασης είναι ένα πρόγραμμα που λαμβάνει τις μετρητικές πληροφορίες από το SCADA. Μετά χρησιμοποιεί στατιστικές διαδικασίες, για να εξάγει τη βέλτιστη εκτίμηση της πραγματικής κατάστασης του συστήματος. Το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης είναι ένα μοντέλο ροών ισχύος, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αξιολόγηση ασφαλείας [McC, σελ. 12].

3.4.4 Ροές ισχύος

Το πρόβλημα των ροών ισχύος είναι πολύ γνωστό στη μηχανική των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος. Ζητούνται τα μέτρα και οι γωνίες των τάσεων για ένα σύνολο ζυγών, δεδομένων των μέτρων των τάσεων και των επιπέδων ισχύος για ένα άλλο σύνολο ζυγών, και ενός μοντέλου ρύθμισης δικτύου (δέσμευση μονάδων και τοπολογία δικτύου). Το πρόβλημα των ροών ισχύος επιλύεται με αριθμητική μέθοδο, και περιέχει τις τάσεις και γωνίες όλων των ζυγών. Από αυτές τις πληροφορίες μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγωγή και κατανάλωση ενεργού και άεργου ισχύος όλων των ζυγών καθώς και τις ροές ενεργού και άεργου ισχύος σε όλα τα κυκλώματα. Η παραπάνω ορολογία συχνά χρησιμοποιείται με τον όρο “φορτίο” αντί για “ισχύς” πχ. πρόβλημα ροών φορτίου, διαδικασία επίλυσης ροών φορτίου, πρόγραμμα ροών φορτίου και λύση ροών φορτίου. Ωστόσο, η αρχική ορολογία προτιμάται, γιατί κανονικά το “φορτίο” δεν είναι αντιληπτό ως κάτι που “ρέει”. [McC, σελ. 12]

3.5 Εποπτικός έλεγχος

Η οθόνη χειριστή εμφανίζει την κατάσταση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο σε γεωγραφικούς και σχηματικούς χάρτες, ελέγχει τους διακόπτες και τους αποζευκτες. Η διεπιφάνεια χρήστη προσφέρει μεγέθυνση, τακτοποιεί τα δεδομένα, χρωματίζεται δυναμικά τα γραφικά, για να δείξει τις αλλαγές. Τα δεδομένα διαμορφώνονται σε σύνδεση για κατασκευή και συντήρηση. Υπάρχουν λειτουργίες βελτιστοποίησης και υποστήριξη αποφάσεων [Dag05, σελ. 14].

Η παρακολούθηση αφορά τις εγγραφές της ακολουθίας των γεγονότων και την παρακολούθηση της κατάστασης και των συνθηκών, συμπεριλαμβανομένων των πληροφοριών συντήρησης, τις ρυθμίσεις των ρελέ και άλλα. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να βοηθήσουν στην ανάλυση σφαλμάτων, στον προσδιορισμό του τί έγινε, πότε έγινε, πού έγινε, και σε ποιά σειρά (τον χώρο, το χρόνο και την ακολουθία ενός σφάλματος). Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να βελτιώσει την απόδοση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και την προστασία τους. Οι

πληροφορίες από την παρακολούθηση των συνθηκών μπορούν να χρησιμοποιηθούν από διαδικασίες προληπτικής συντήρησης [Str03, σελ. 2].

3.6 Διαφορές της εργασίας με έναν σύγχρονο υποσταθμό

Το σύστημα που έχει αναπτυχθεί σε αυτήν την εργασία διαφέρει από το σύστημα που αφορά ένα σύγχρονο υποσταθμό. Αυτές οι διαφορές δεν επιδιώχθηκαν εξ αρχής, προέκυψαν κατά την ανάπτυξη της τρέχουσας εφαρμογής. Οι διαφορές αυτές υπάρχουν κυρίως για τρεις λόγους.

Πρώτον, η εργασία περιορίζεται από το θέμα της. Πιο συγκεκριμένα δεν περιλαμβάνει έλεγχο. Η παρούσα εργασία εστιάζει αποκλειστικά στην εποπτεία και τη συλλογή δεδομένων.

Δεύτερον, η παρούσα εργασία είναι προσομοίωση με συγκεκριμένο εμπορικό λογισμικό της SIEMENS. Έτσι, από τη φύση της εστιάζει στο λογισμικό του συστήματος. Κάποιο υλικό είναι προσομοιωμένο σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ενώ ένα άλλο μέρος είναι ανύπαρκτο. Το ανύπαρκτο υλικό “προσομοιώνεται” με εισόδους που δίνονται από εμάς. Επίσης, σημειώνεται ότι είναι εφικτή η προσομοίωση το πολύ δύο διαφορετικών PLC και όχι περισσότερων.

Τρίτον, κάποια θέματα δεν αναπτύχθηκαν, ώστε η εργασία να παραμείνει εντός των ορίων μιας συνήθους διπλωματικής εργασίας. Αυτά τα θέματα προτείνονται ως αντικείμενα προς επέκταση στο κεφάλαιο “προτάσεις”. Μπορούν κάλλιστα να αποτελέσουν αντικείμενο άλλων εργασιών.

3.6.1 Συλλογή δεδομένων

Τα δεδομένα που λαμβάνονται είναι μόνο τάσεις, ροές ενεργού και ροές άεργου ισχύος. Η βάση δεδομένων του κάθε υποσταθμού είναι ενσωματωμένη στο PLC και διαμορφώνεται μόνο από τα δεδομένα που λαμβάνει το ίδιο το PLC. Δεν υπάρχουν IED που συμβάλλουν σε αυτήν. Ωστόσο υπάρχει μια ομοιότητα σε αυτό το σημείο, ο κάθε υποσταθμός έχει μια βάση δεδομένων την οποία προσπελαύνει το κέντρο ελέγχου μέσω συμπίεσης.

Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει τα δεδομένα εμμέσως κατόπιν επεξεργασίας και όχι άμεσα. Τέτοιες πρακτικές είναι αντικείμενο έρευνας όπως το Dynamic Utilization of Substation Measurements (DUSM) [Kez13, σελ. 13]. Αν διαφωνούν τα δεδομένα ροής ισχύος με τα δεδομένα για την κατάσταση των διακοπών, τότε αξιολογείται η σοβαρότητα της διαφωνίας και απλά αναφέρεται.

3.6.2 Κατανεμημένη επεξεργασία δεδομένων

Σε αυτήν την εργασία ο κάθε υποσταθμός σαρώνει τα δεδομένα ανεξάρτητα. Επιπλέον, το κέντρο ελέγχου τα λαμβάνει ανεξάρτητα από τη λειτουργία των υποσταθμών. Η επικοινωνία γίνεται με πρωτόκολλο STEP7 χρησιμοποιώντας ενσωματωμένο λογισμικό και τη συνάρτηση GET.

Σε αυτήν την εργασία ένα μέρος του υπολογιστικού φόρτου του κέντρου ελέγχου έχει ληφθεί από τα PLC. Έτσι, ο υπολογισμός του μοντέλου “ζυγός-κλάδος” γίνεται κατανεμημένα από κάθε υποσταθμό. Ο υπολογισμός είναι συνεχής, δεν σκανδαλίζεται από αλλαγές στην κατάσταση. Επιπλέον, αυτός ο υπολογισμός μειώνει τα δεδομένα που χρειάζεται να αποσταλούν στο κέντρο ελέγχου συμμετέχοντας στη συμπίεση δεδομένων. Δεν υπάρχει σύστημα που να έχει πλήρη εποπτεία όλου του υπολογισμού τοπολογίας.

3.6.3 Λογισμικό

Το κέντρο ελέγχου δεν αναλαμβάνει τον υπολογισμό της τοπολογίας, κάθε υποσταθμός έχει υπολογίσει τη δικιά του. Το κέντρο ελέγχου απλά ενημερώνεται ποιά είναι αυτή. Οι προαποθηκευμένες πληροφορίες ορίζονται με τυποποιημένο τρόπο σε κομμάτια κώδικα που λέγονται ρυθμιστές (“Configurator”).

Το λογισμικό αυτής της εργασίας υπολογίζει μέχρι την εκτίμηση κατάστασης. Στην εκτίμηση κατάστασης αυτής της εργασίας εξάγονται οι τάσεις κατά μέτρο και γωνία. Οι ροές ισχύος υπολογίζονται αργότερα με βάση τις τάσεις.

Κεφάλαιο 4

Θεωρητική τεκμηρίωση του λογισμικού

Το λογισμικό των PLC εμπεριέχει μαθηματικούς τύπους, αλγορίθμους και φυσικές αρχές. Σε αυτό το κεφάλαιο επισημαίνεται οτιδήποτε κρίνεται ότι χρήζει θεωρητικής τεκμηρίωσης. Πιο συγκεκριμένα αναλύεται η γραφοθεωρητική προσέγγιση που ακολουθείται σε αυτήν την αναφορά. Επιπλέον, αναλύονται οι αλγόριθμοι και τεκμηριώνονται οι μαθηματικοί τύποι, που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της κατάστασης των υποσταθμών και του ηλεκτρικού δικτύου.

4.1 Γραφοθεωρητική προσέγγιση

Στην τρέχουσα μελέτη χρησιμοποιείται ευρέως η γραφοθεωρητική προσέγγιση των υποσταθμών και του κέντρου ελέγχου [Oep12].

4.1.1 Γραφοθεωρητική προσέγγιση υποσταθμών

Η διάταξη ενός υποσταθμού είναι ένας γράφος, δηλαδή μια δομή με κόμβους και ακμές. Οι κόμβοι του υποσταθμού χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- διασυνδεδετικοί κόμβοι
- κόμβοι έγχυσης ισχύος
- κοινοί κόμβοι

Οι διασυνδεδετικοί κόμβοι είναι κόμβοι που συνδέουν τον υποσταθμό με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι διασυνδεδετικοί ανήκουν ταυτόχρονα και στο γράφο του ηλεκτρικού δικτύου. Οι υπόλοιποι κόμβοι συνδέονται με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο μόνο μέσω των διασυνδεδετικών κόμβων.

Οι κόμβοι έγχυσης ισχύος είναι κόμβοι του υποσταθμού που συνδέονται σε τοπικές πηγές ισχύος και φορτία, χωρίς να είναι διασυνδεδετικοί κόμβοι. Για παράδειγμα ένας κόμβος στον οποίο συνδέονται πυκνωτές αντιστάθμισης ή μια μικρή γεννήτρια είναι κόμβοι έγχυσης ισχύος.

Οι υπόλοιποι κόμβοι είναι οι κοινοί κόμβοι. Αυτοί οι κόμβοι συνδέονται αποκλειστικά με άλλους κόμβους του υποσταθμού. Οι κόμβοι του υποσταθμού είναι στατικοί. Δηλαδή, δεν προστίθενται ή αφαιρούνται κόμβοι από τον υποσταθμό κατά τη λειτουργία του προγράμματος.

Σε κάθε υποσταθμό μπορούμε να θεωρήσουμε δύο γράφους, τον γράφο διάταξης και τον γράφο λειτουργίας. Στο γράφο διάταξης οι ακμές είναι στοιχεία του υποσταθμού, όπως αποζεύκτες, διακόπτες και στοιχεία προστασίας. Ο γράφος διάταξης είναι στατικός, γιατί η συνδεσμολογία και τα στοιχεία που απαρτίζουν τον υποσταθμό δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας.

Στο γράφο λειτουργίας κάθε ακμή αντιπροσωπεύει μια αγωγήμη σύνδεση μηδενικής αντίστασης. Ο γράφος λειτουργίας ενός υποσταθμού είναι δυναμικός, πιο συγκεκριμένα οι ακμές του μπορεί να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Ο γράφος λειτουργίας προκύπτει από το γράφο διάταξης λαμβάνοντας υπόψη την κατάσταση των στοιχείων του δεύτερου. Αν μια ακμή του γράφου διάταξης επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, η αντίστοιχη ακμή υπάρχει και στο γράφο λειτουργίας. Αν μια ακμή του γράφου διάταξης δεν επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, η αντίστοιχη ακμή δεν υπάρχει στο γράφο λειτουργίας. Στο γράφο διάταξης μπορεί να υπάρχουν περισσότερες από μία ακμές μεταξύ δύο κόμβων. Στο γράφο λειτουργίας μεταξύ δύο κόμβων υπάρχει το πολύ μία ακμή. Αν στο γράφο διάταξης μεταξύ δύο κόμβων υπάρχουν περισσότερα του ενός στοιχεία, που επιτρέπουν τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, τότε στο γράφο λειτουργίας όλα αυτά τα στοιχεία αντιπροσωπεύονται από μία μόνο ακμή. Παρακάτω όπου γίνεται αναφορά σε γράφο υποσταθμού εννοείται ο γράφος λειτουργίας του. Επιπλέον, όπου γίνεται αναφορά σε κόμβους και ακμές αναφέρονται στο γράφο λειτουργίας, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά.

4.1.2 Γραφοθεωρητική προσέγγιση ηλεκτρικού δικτύου

Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι ένας γράφος [PDL+07]. Ωστόσο, αυτός ο γράφος είναι διαφορετικός από τους γράφους των υποσταθμών. Οι ακμές των υποσταθμών αντιπροσωπεύουν στοιχεία τους ή αγωγιμες συνδέσεις μηδενικής αντίστασης. Οι ακμές του ηλεκτρικού δικτύου αντιπροσωπεύουν γραμμές μεταφοράς, οι οποίες έχουν αντίσταση. Οι ακμές των υποσταθμών είναι δυναμικές, ενώ στο γράφο του ηλεκτρικού δικτύου είναι στατικές.

Όλοι οι διασυνδεδετικοί κόμβοι των υποσταθμών ανήκουν επίσης στο γράφο του ηλεκτρικού δικτύου. Θεωρείται ότι σε κάθε διασυνδεδετικό κόμβο συνδέεται μόνο μία γραμμή μεταφοράς. Οι κόμβοι των υποσταθμών είναι στατικοί. Ωστόσο, μπορούμε να θεωρήσουμε τους κόμβους του ηλεκτρικού δικτύου δυναμικούς. Είναι δυνατό δύο ή παραπάνω κόμβοι του ηλεκτρικού δικτύου να ταυτιστούν μεταξύ τους.

4.2 Υπολογισμός κατάστασης υποσταθμού

Ο υπολογισμός της κατάστασης του υποσταθμού περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τάσεων των κόμβων και τις εισροές ή εκροές ισχύος από τους διασυνδεδετικούς κόμβους. Οι καταστάσεις των διασυνδεδετικών κόμβων είναι οι πιο ενδιαφέρουσες, γιατί οι πληροφορίες αυτών των κόμβων λαμβάνονται από το κέντρο ελέγχου.

Για τον υπολογισμό της κατάστασης ενός γράφου εφαρμόζονται ευρέως μέθοδοι από τη Θεωρία Δικτύων. Οι μέθοδοι αυτοί είναι παραλλαγές ή συνδυασμοί της μεθόδου των κόμβων ή της μεθόδου των βρόχων. Για να εφαρμοστεί μία από αυτές τις μεθόδους, απαιτείται μήτρα αγωγιμοτήτων ή αντιστάσεων του γράφου λειτουργίας.

Οι υποσταθμοί είναι ειδική περίπτωση. Οι ακμές του γράφου λειτουργίας έχουν αμελητέα αντίσταση και πολύ μεγάλη αγωγιμότητα. Επίσης, μεταξύ δύο κόμβων που δεν υπάρχει ακμή, η αντίσταση είναι πολύ μεγάλη και η αγωγιμότητα αμελητέα. Οπότε, είναι δύσκολο ή αυθαίρετο να κατασκευαστεί κάποια από τις δύο μήτρες [KM14]. Μία λύση στο πρόβλημα είναι να αποδοθούν πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές τιμές, αυθαίρετες ή πραγματικές [Gri07, σελ. 14][MG91]. Επιπλέον, είναι γνωστό συνήθως μόνο ένα μέρος των τάσεων και των ροών ισχύος κάποιου υποσταθμού. Έτσι, θεωρήθηκε καλύτερο να εφαρμοστούν άλλοι αλγόριθμοι, γνωστοί στη Επιστήμη των Υπολογιστών για επίλυση γραφοθεωρητικών προβλημάτων.

4.2.1 Αλγόριθμος διάσχισης γράφου

Πολύ χρήσιμοι αλγόριθμοι για τον υπολογισμό της κατάστασης του υποσταθμού είναι οι αλγόριθμοι διάσχισης γράφων. Οι ακμές είναι αποθηκευμένες σε μια μήτρα πρόσπτωσης με θετική λογική (το 1 σημαίνει ύπαρξη ακμής, το 0 απουσία). Για την εκτέλεση του αλγορίθμου χρησιμοποιούνται δύο δομές: μία στοίβα, και ένας πίνακας με τους κόμβους που έχουν προσπελαστεί. Παρακάτω, δύο κόμβοι είναι “γείτονες” αν συνδέονται με ακμή.

Κατά την εκτέλεση αποτρέπεται η προσπέλαση της ίδιας ακμής δυο φορές. Επιπλέον, κατά την εκτέλεση της διάσχισης σημειώνονται οι κόμβοι του υποσταθμού που έχουν επισκεφθεί. Έτσι, η διάσχιση επαναλαμβάνεται μόνο σε κόμβους που δεν έχουν επισκεφθεί αποφεύγοντας τη διάσχιση των ίδιων συνεκτικών συνιστωσών.

Υπολογισμός συνεκτικών συνιστωσών

“Συνεκτική συνιστώσα” είναι “κλάση ισοδυναμίας των κόμβων ως προς τη σχέση «είναι προσπελάσιμος από τον»”. [CLRS10, σελ. Π25] Με άλλα λόγια στην παρούσα εργασία, δύο κόμβοι ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα, αν και μόνο αν υπάρχει αγωγήμη σύνδεση από τον έναν κόμβο στον άλλον. Επομένως, κατά τη διάσχιση του γράφου από μία ρίζα προσπελάζονται μόνο όλοι οι κόμβοι που ανήκουν στη συνεκτική συνιστώσα της ρίζας.

Σε κάθε συνεκτική συνιστώσα αντιστοιχίζεται ένας κόμβος-αντιπρόσωπος. “Δεν έχει σημασία ποιός κόμβος θα επιλεγεί ως αντιπρόσωπος, αρκεί κάθε φορά που ζητείται ο αντιπρόσωπος ενός συνόλου η απάντηση να είναι η ίδια.” [CLRS10, σελ. 501] Στην παρούσα εργασία, κάθε κόμβος αναπαρίσταται από έναν διαφορετικό ακέραιο αριθμό. Επιλέγεται ως αντιπρόσωπος μιας συνεκτικής συνιστώσας ο μικρότερος κόμβος της. Έτσι, ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη της μοναδικής απάντησης. Παρακάτω, όταν γίνεται αναφορά σε αντιπρόσωπο κόμβου, εννοείται ο κόμβος που αντιπροσωπεύει τη συνεκτική συνιστώσα του.

Η αποθήκευση των συνεκτικών συνιστωσών γίνεται με έναν πίνακα συνεκτικών συνιστωσών. Ο πίνακας αυτός έχει πεδίο ορισμού και τιμών όλους τους κόμβους. Ισχύει η εξής πρόταση: “Ένας κόμβος είναι αντιπρόσωπος, αν και μόνο αν η τιμή του μέσω του πίνακα συνεκτικών συνιστωσών είναι ο εαυτός του”. Το ζητούμενο είναι “οι τιμές του πίνακα συνεκτικών συνιστωσών να είναι οι αντιπρόσωποι”. Αν ισχύει αυτή η συνθήκη, ο υπολογισμός συνεκτικών συνιστωσών έχει ολοκληρωθεί.

Αυτός ο πίνακας υπολογίζεται κατά τη διάσχιση κατά βάθος. Αρχικά, ο αντιπρόσωπος κάθε κόμβου είναι ο εαυτός του. Αν κατά τη διάσχιση βρεθεί ακμή μεταξύ δύο κόμβων, τότε τίθεται ως αντιπρόσωπος η ρίζα της διάσχισης (γνωστή και ως “ρίζα του δέντρου αναζήτησης”). Η διάσχιση εκκινεί από τον μικρότερο δυνατό κόμβο, ώστε να ικανοποιείται η πρόταση “αντιπρόσωπος μιας συνεκτικής συνιστώσας είναι ο μικρότερος κόμβος της”.

Ο πίνακας συνεκτικών συνιστωσών χρησιμοποιείται για διάκριση των κόμβων σε υπάρχοντες και μη υπάρχοντες. Δεν υπάρχει κόμβος 0, οπότε στους μη υπάρχοντες κόμβους τίθεται ως αντιπρόσωπος το 0. Έτσι, από τον πίνακα των συνεκτικών συνιστωσών μπορούν να εξαχθούν οι εξής πληροφορίες:

- Αν ένας κόμβος είναι υπάρχων ή όχι.
- Αν ένας κόμβος είναι αντιπρόσωπος συνεκτικής συνιστώσας.
- Η συνεκτική συνιστώσα κάθε υπάρχοντα κόμβου.

Εύρεση βρόχων

Το ζητούμενο είναι η εύρεση ενός οποιουδήποτε βρόχου στο γράφο. Η εύρεση βρόχων γίνεται με τον αλγόριθμο αναζήτησης κατά βάθος. Εκτελείται μία αναζήτηση ανά συνεκτική συνιστώσα,

οπότε η ρίζα κάθε αναζήτησης είναι ένας αντιπρόσωπος. Αν υπάρχει βρόχος, τότε ο αλγόριθμος αναζήτησης κατά βάθος βρίσκει μια “ανιούσα ακμή” (γνωστή και ως “πίσω ακμή”) [CLRS10, σελ. 548]. Δηλαδή βρίσκει μια ακμή από τον τρέχων κόμβο που επισκέπτεται σε έναν κόμβο που έχει επισκεφθεί.

Ψευδοκώδικας

Ο αλγόριθμος της διάσχισης διατυπωμένος σε απλοποιημένο ψευδοκώδικα:

- *Σπρώξε τη ρίζα στη στοίβα.*
- *Όσο υπάρχουν κόμβοι στη στοίβα, εξερεύνησε τον επόμενο γείτονα του τρέχοντος κόμβου.*
- *Αν όλοι οι γείτονες έχουν εξερευνηθεί, η εξερεύνηση του τρέχοντος κόμβου τερματίστηκε, οπότε τράβα τον από τη στοίβα.*
- *Αλλιώς, σπρώξε τον επόμενο γείτονα στη στοίβα.*
- *Θέσε ως αντιπρόσωπο του γείτονα τη ρίζα.*

Η διάσχιση κατά βάθος εκτελείται για κάθε συνεκτική συνιστώσα:

- *Για κάθε κόμβο από τον μικρότερο στο μεγαλύτερο:*
- *Αν ο τρέχων κόμβος είναι αντιπρόσωπος εκτέλεσε διάσχιση κατά βάθος.*

Ο αλγόριθμος συμπεριλαμβάνει τους υπολογισμούς βρόχων και συνεκτικών συνιστωσών:

- *Σπρώξε τη ρίζα στη στοίβα.*
- *Όσο υπάρχουν κόμβοι στη στοίβα, εξερεύνησε τον επόμενο γείτονα του τρέχοντος κόμβου.*
- *Αν όλοι οι γείτονες έχουν εξερευνηθεί, η εξερεύνηση του τρέχοντος κόμβου τερματίστηκε, οπότε τράβα τον από τη στοίβα.*
- *Αλλιώς, σπρώξε τον επόμενο γείτονα στη στοίβα.*
- *Θέσε ως αντιπρόσωπο του γείτονα τη ρίζα.*
- *Αν έχεις επισκεφτεί το γείτονα, τότε βρήκες βρόχο.*

4.2.2 Σφάλμα μετρητή

Σε μερικές περιπτώσεις οι μετρητές παρουσιάζουν σφάλμα. Επίσης, ίσως υπάρξει περίπτωση όπου ένας διακόπτης φαίνεται να είναι ανοικτός, αλλά ο μετρητής να δείχνει ροή ισχύος ή ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις ελέγχεται αν η ένδειξη του μετρητή είναι εντός των ορίων (-τυπική απόκλιση, +τυπική απόκλιση). Αν η ένδειξη είναι εντός αυτών των ορίων, τότε θεωρείται σφάλμα του μετρητή. Αλλιώς, θεωρείται ότι είναι λάθος η πληροφορία για τον διακόπτη [CSG+10][SG91].

4.2.3 Τάση διασυνδετικού κόμβου

Ο υποσταθμός υπολογίζει τις τάσεις των διασυνδετικών κόμβων. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζει αν η τάση είναι γνωστή, την τιμή της και την τυπική απόκλιση.

Κάθε διασυνδετικός κόμβος ανήκει σε κάποια συνεκτική συνιστώσα. Η τάση είναι ίδια σε όλους τους κόμβους μιας συνεκτικής συνιστώσας, γιατί συνδέονται αγωγή μεταξύ με αμελητέα αντίσταση. Παρακάτω όταν γίνεται αναφορά στην “τάση συνεκτικής συνιστώσας”, εννοείται η τάση των κόμβων της. Αν μετράται η τάση τουλάχιστον ενός κόμβου της συνεκτικής συνιστώσας, τότε η τάση του διασυνδετικού κόμβου είναι γνωστή. Αλλιώς είναι άγνωστη.

Επομένως, εντοπίζουμε τις μετρήσεις που ανήκουν στη συνεκτική συνιστώσα. Οι τιμές των μετρήσεων δεν είναι κατά ανάγκη ίδιες, γιατί προέρχονται από διαφορετικούς μετρητές. Για τον υπολογισμό της τάσης λαμβάνονται υπόψη όλες οι μετρήσεις τάσης της συνεκτικής συνιστώσας. Οπότε η υπολογισμένη τιμή είναι ο σταθμισμένος μέσος όρος των μετρήσεων [Θεο07, σελ. 60]:

$$V = \frac{\sum(w_i \cdot V_i)}{\sum w_i}, w_i = \frac{\mu_i^2}{s_i^2}, \sum w_i = w = \frac{\mu^2}{s^2}$$

Όπου V_i, s_i η τάση και τυπική απόκλιση της ίστης μέτρησης, V και s η τάση και τυπική απόκλιση που ζητούνται.

Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης είναι να θεωρηθεί το πρόβλημα ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Η κάθε εξίσωση του συστήματος είναι της μορφής $V_i = V$. Έστω ο πίνακας των μετρήσεων:

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Τότε το σύστημα γραμμικών εξισώσεων έχει την εξής μορφή:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} \times [V] = \underline{V}$$

Αν υπάρχει έστω ένα ζεύγος διαφορετικών μετρήσεων, το παραπάνω σύστημα είναι αδύνατο. Το σύστημα είναι υπερορισμένο. Οπότε, εφαρμόζουμε τη μέθοδο της ψευδοαντίστροφης με χρήση διασπορών [Κογ]. Έτσι, προκύπτουν τα εξής:

$$[1 \quad 1 \quad \dots] \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \frac{1}{s_2^2} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{s_i^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} [V] = [1 \quad 1 \quad \dots] \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \frac{1}{s_2^2} & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{s_i^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \underline{V}$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} & \frac{1}{s_2^2} & \cdots & \frac{1}{s_i^2} & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} [V] = \begin{bmatrix} \frac{1}{s_1^2} & \frac{1}{s_2^2} & \cdots & \frac{1}{s_i^2} & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \left(\sum \frac{1}{s_i^2}\right) \cdot V = \sum \left(\frac{1}{s_i^2} \cdot V_i\right) \Leftrightarrow V = \frac{\sum \left(\frac{1}{s_i^2} \cdot V_i\right)}{\sum \frac{1}{s_i^2}}$$

Συγκρίνοντας με τις εξισώσεις του σταθμισμένου μέσου όρου προκύπτουν:

$$w_i = \frac{1}{s_i^2}, \mu_i = 1$$

Οπότε οι εξισώσεις υπολογισμού της τάσης συνεκτικής συνιστώσας και του σφάλματός της είναι:

$$V = \frac{\sum(w_i \cdot V_i)}{\sum w_i}, w_i = \frac{1}{s_i^2}, \sum w_i = w, s = \frac{1}{\sqrt{w}}$$

4.2.4 Ροή ισχύος διασυνδεδετικού κόμβου

Το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός των ροών ενεργού και άεργου ισχύος από τους διασυνδεδετικούς κόμβους προς το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και των αποκλίσεών τους. Οι μαθηματικές αρχές που διέπουν τις ροές ισχύος είναι οι ίδιες ανεξάρτητα από το είδος τους. Οπότε και οι δύο υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο. Παρακάτω όταν γίνεται αναφορά για ροή ισχύος υπονοείται ότι είναι του ίδιου είδους καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας.

Αρχή διατήρησης της ενέργειας σε συνιστώσα άγνωστων ροών

Σε κάποιες ακμές είναι γνωστή η ροή ισχύος. Έστω “συνιστώσα άγνωστων ροών” το σύνολο των κόμβων, οι οποίοι ανά δύο συνδέονται μεταξύ τους με αγωγήμη σύνδεση χωρίς να είναι γνωστή η ροή ισχύος. Αυτή η συνεκτική συνιστώσα διαφέρει από τις συνεκτικές συνιστώσες που έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Η διαφορά είναι ότι η αγωγήμη σύνδεση διέρχεται αποκλειστικά από ακμές με άγνωστη ροή ισχύος.

Θεωρείται μια συνιστώσα άγνωστων ροών που περιέχει το διασυνδεδετικό κόμβο. Εξαιρώντας τον διασυνδεδετικό κόμβο υπάρχουν δύο περιπτώσεις: όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι να είναι κοινοί, ή να υπάρχει τουλάχιστον ένας σημαίων κόμβος. Στη δεύτερη περίπτωση, η συνιστώσα άγνωστων ροών περιέχει το διασυνδεδετικό κόμβο και τουλάχιστον έναν σημαίων κόμβο. Σε αυτήν την περίπτωση, πιθανώς ρέει ισχύς από το διασυνδεδετικό κόμβο στον σημαίων. Αυτή η ροή είναι άγνωστη, γιατί δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί από τις υπάρχουσες μετρήσεις. Οπότε η ροή ισχύος του διασυνδεδετικού κόμβου προς το ηλεκτρικό δίκτυο είναι άγνωστη.

Στην άλλη περίπτωση εφαρμόζεται η αρχή διατήρησης της ενέργειας [WKK06]. Στη συνιστώσα άγνωστων εισρέουν ισχείς από τις ακμές με γνωστή ροή ισχύος, ενώ εκρέει ισχύς από το διασυνδεδετικό κόμβο στο υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, η ισχύς που ρέει από τον διασυνδεδετικό κόμβο στο ηλεκτρικό δίκτυο ισούται με το άθροισμα των ισχύων που ρέουν προς τη συνιστώσα άγνωστων ροών [LP06, σελ. 298].

Εφαρμόζοντας τη αρχή διατήρησης ενέργειας προκύπτει:

$$S = \sum S_i$$

Όπου S η ισχύς που εξέρχεται από τον διασυνδεδετικό κόμβο στο ηλεκτρικό δίκτυο και S_i η ροή ισχύος της i -στης ακμής. Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης θεωρείται ότι οι μετρήσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Ο τύπος υπολογισμού της είναι [AAB+99, σελ. 31]:

$$s = \sqrt{\sum s_i^2}$$

Όπου s η τυπική απόκλιση της ισχύος που εξέρχεται από τον διασυνδεδετικό κόμβο στο ηλεκτρικό δίκτυο και s_i η τυπική απόκλιση της ροής ισχύος της i -στης ακμής.

Ψευδοκώδικας

Η εύρεση της συνιστώσας άγνωστων ροών γίνεται με αλγόριθμο διάσχισης παρόμοιο με αυτόν που έχει αναλυθεί παραπάνω. Οι δύο αλγόριθμοι διαφέρουν στα εξής:

- να διασχίζει μόνο ακμές με άγνωστη ροή ισχύος
- να υπολογίζει τη ζητούμενη ροή ισχύος και το σφάλμα της
- να εντοπίζει αν υπάρχει σημαίων κόμβος στη συνιστώσα άγνωστων ροών

Η ρίζα του αλγορίθμου είναι ο διασυνδεδετικός κόμβος που μας ενδιαφέρει. Ο αλγόριθμος καλείται μια φορά για την ενεργό ισχύ και μια φορά για την άεργο.

- *Θέσε άθροισμα και συνολική απόκλιση μηδενικά.*
- *Σπρώξε τη ρίζα στη στοίβα.*
- *Όσο υπάρχουν κόμβοι στη στοίβα, εξερεύνησε τον επόμενο γείτονα του τρέχοντος κόμβου.*
- *Αν η κεφαλή της στοίβας είναι σημαίων κόμβος χωρίς να είναι η ρίζα, τερμάτισε και απέτυχε.*
- *Αν όλοι οι γείτονες έχουν εξερευνηθεί, η εξερεύνηση του τρέχοντος κόμβου τερματίστηκε, οπότε τράβα τον από τη στοίβα.*
- *Αλλιώς, αν είναι γνωστή η ροή ισχύος προς τον επόμενο γείτονα, πρόσθεσε τη ροή στο άθροισμα και το τετράγωνο της απόκλισής της στη συνολική απόκλιση.*
- *Αλλιώς, σπρώξε τον επόμενο γείτονα στη στοίβα.*
- *Όταν τελειώσεις, θέσε στη συνολική απόκλιση την τετραγωνική της ρίζα.*

4.2.5 Εγχύσεις ισχύος του υποσταθμού

Όπως ζητείται ο υπολογισμός των ροών ισχύος, έτσι ζητείται και ο υπολογισμός των εγχύσεων ισχύος. Μια σημαντική διαφορά με τις ροές ισχύος είναι ότι οι εγχύσεις αναφέρονται σε συνεκτικές συνιστώσες και όχι σε κόμβους. Οι πηγές της εγγεόμενης ισχύος είναι συνδεδεμένες στους κόμβους έγχυσης ισχύος. Τέτοιες πηγές είναι γεννήτριες, συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης ή φορτία. Για τις ανάγκες των υπολογισμών όλα θεωρούνται πηγές ισχύος.

Ο υπολογισμός των εγχύσεων γίνεται σε δύο βήματα. Πρώτα, υπολογίζεται η ισχύς που εγχύεται από κάθε κόμβο έγχυσης ισχύος. Ο υπολογισμός γίνεται με τον ίδιο αλγόριθμο που υπολογίζει τις ροές ισχύος σε διασυνδεδετικό κόμβο, ο οποίος αναφέρεται παραπάνω. Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται η έγχυση ισχύος ανά συνεκτική συνιστώσα. Η έγχυση ισχύος της συνεκτικής συνιστώσας ισούται με το άθροισμα των εγχύσεων των κόμβων έγχυσης ισχύος που ανήκουν σε αυτήν [JRE+05][LP06, σελ. 298].

4.3 Εκτίμηση κατάστασης ηλεκτρικού δικτύου

Το κέντρο ελέγχου συλλέγει τα δεδομένα από τους επιμέρους υποσταθμούς και εκτιμά την κατάσταση του συστήματος. Συνήθως οι εκτιμητές κατάστασης περιλαμβάνουν [Kor]:

- Επεξεργαστή τοπολογίας
- Ανάλυση παρατηρησιμότητας
- Εκτίμηση κατάστασης
- Ανίχνευση και εντοπισμός εσφαλμένων μετρήσεων [MWY86][Leã+93]
- Εκτίμηση παραμέτρων και δομικών σφαλμάτων [AGR05]

Η ανίχνευση της τοπολογίας [KK02][KKC06], και ο εντοπισμός σημαντικά μη αποδεκτών μετρήσεων (bad data) και δομικών σφαλμάτων γίνεται καταναμεμένα από κάθε υποσταθμό [LCC+06][Kor11a]. Στο τρέχον σύστημα το κέντρο ελέγχου λαμβάνει αυτές τις πληροφορίες και υπολογίζει δύο μόνο βήματα: την ανάλυση παρατηρησιμότητας και την εκτίμηση κατάστασης.

Κατά την εκτίμηση κατάστασης επιλέγεται ένας ζυγός ως ζυγός αναφοράς. Έπειτα, εκτιμάται η τάση όλων των ζυγών και οι γωνίες των τάσεων τους ως προς το ζυγό αναφοράς [SW70]. Οι ροές ισχύος εκτιμώνται μετά αξιοποιώντας την εκτίμηση των τάσεων [Kor].

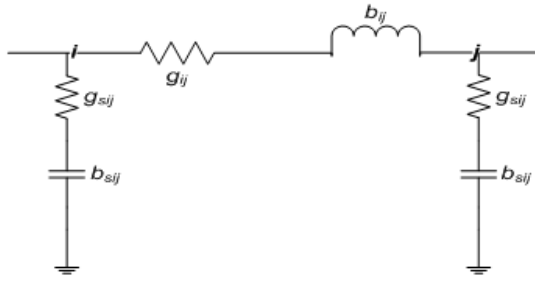
Η στατική εκτίμηση κατάστασης αναφέρεται στη διαδικασία λήψης των μετρήσεων τάσεων (μέτρου και φάσης), σε όλους τους ζυγούς του συστήματος, κάθε χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με άμεση λήψη συγχρονισμένων μετρήσεων από όλους τους ζυγούς του συστήματος [Kor11b][KM11]. Ωστόσο, μια τέτοια μέθοδος δε θα ήταν αξιόπιστη, εξαιτίας των σφαλμάτων των μετρήσεων αλλά και της αδυναμίας απόλυτα ταυτόχρονης λήψης μετρήσεων από απομακρυσμένους ζυγούς [Sch70][AE04]. Αντί αυτής της μεθόδου, η εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιεί ένα επαρκές σύνολο μετρήσεων, προκειμένου να φιλτράρει τα σφάλματα και αν υπολογίσει τη βέλτιστη εικόνα του συστήματος [SR70]. Όπως προαναφέρθηκε, ταυτόχρονες μετρήσεις από διαφορετικά μέρη του συστήματος είναι πρακτικά αδύνατες και για αυτό το λόγο μια χρονική απόκλιση ανάμεσα στις μετρήσεις είναι ανεκτή. Η ανοχή δικαιολογείται εξαιτίας των αργά μεταβαλλόμενων συνθηκών ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας στην κανονική λειτουργία [Kor].

Ο ορισμός της κατάστασης του συστήματος περιλαμβάνει μόνο τις μιγαδικές τάσεις των ζυγών του συστήματος, στη μόνιμη κατάσταση. Βέβαια, υπονοείται ότι η τοπολογία του δικτύου και οι παράμετροί του είναι πλήρως γνωστά [LCC+04]. Ωστόσο, σφάλματα στις παραμέτρους ή την τοπολογία εμφανίζονται μερικές φορές, εξαιτίας βλαβών σε εξοπλισμό. Τέτοια σφάλματα μπορούν να ανισταθμιστούν από τον εκτιμητή κατάστασης [Kor].

4.3.1 Παραδοχές ηλεκτρικού δικτύου

«Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας θεωρείται ότι λειτουργεί στη μόνιμη συμμετρική κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία, οι ροές ισχύος, οι γραμμές μεταφοράς και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες του δικτύου θα είναι τριφασικά και συμμετρικά. Οι παραπάνω προϋποθέσεις επιτρέπουν τη χρήση του μονοφασικού ισοδύναμου για την εξαγωγή των μοντέλων των διαφόρων στοιχείων και τελικά του μοντέλου όλου του συστήματος. Επιπλέον, όλα τα μεγέθη εκφράζονται στο ανά-μονάδα σύστημα.»[Kor]

«Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το δίθυρο ισοδύναμο “π”. Το μοντέλο μιας τέτοιας γραμμής μεταφοράς, που συνδέει τον ζυγό i με τον ζυγό j , αποτελείται από μια εν σειρά σύνθετη αγωγιμότητα $y_{ij} = g_{ij} + ib_{ij}$ και δύο εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες γραμμής $y_{sij} = g_{sij} + ib_{sij}$, μία συνδεδεμένη στο ζυγό i και μία στο ζυγό j .» [Kor] Αυτό το μοντέλο έχει το πλεονέκτημα ότι δε δημιουργεί επιπλέον κόμβους διατηρώντας καλή ακρίβεια.



Σχήμα 4.1: Μοντέλο “π” γραμμής μεταφοράς μεταξύ των κόμβων i και j .

παριστάνεται με το ισοδύναμο «Π» μοντέλο. Στο ζυγό i είναι επίσης συνδεδεμένη μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα y_{si} , που παριστάνει οποιονδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής σύνθετης αγωγιμότητας. Η γεννήτρια που συνδέεται στον ζυγό i εγχέει μιγαδική ισχύ S_{Gi} , ενώ το αντίστοιχο φορτίο σταθερής ισχύος απορροφά μιγαδική ισχύ S_{Di} . Η μιγαδική τάση στο ζυγό i συμβολίζεται με \tilde{V}_i και η μιγαδική τάση στο ζυγό j με \tilde{V}_j . Μετασηματιστής δεν υπάρχει στο ζυγό i , αλλά αν υπήρχε θα ήταν συνδεδεμένος εν σειρά με τη γραμμή μεταφοράς, οπότε θα μπορούσε να υπολογιστεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα που θα αποτελούταν από μια σύνθετη αγωγιμότητα γραμμής y_{ij} και δύο εγκάρσιες αγωγιμότητες y_{sij} . Τα μιγαδικά μεγέθη των τάσεων μπορούν να εκφραστούν σε τριγωνομετρική μορφή, ενώ οι σταθερές σύνθετες αγωγιμότητες σε καρτεσιανή μορφή:» [Kor]

- $\tilde{V}_i = V_i \cos \theta_i + i V_i \sin \theta_i$
- $\tilde{V}_j = V_j \cos \theta_j + i V_j \sin \theta_j$
- $y_{ij} = g_{ij} + i b_{ij}$
- $y_{sij} = g_{sij} + i b_{sij}$
- $y_i = g_i + i b_i$

Οι εξισώσεις έγχυσης και ροής ισχύος συναρτήσει των μέτρων τάσεων, γωνιών τάσεων και αγωγιμοτήτων είναι οι παρακάτω [Kor]:

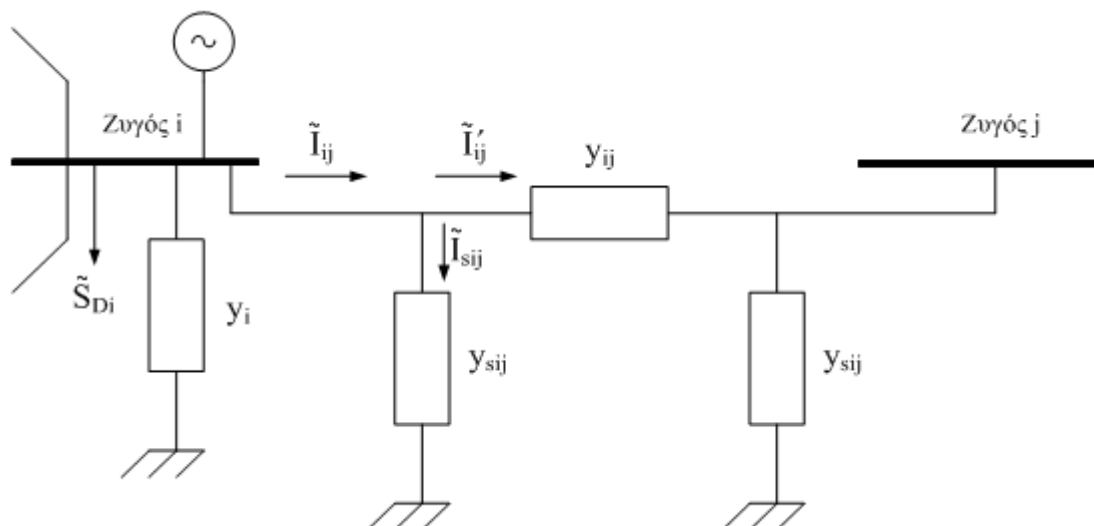
- (1) $P_i = V_i^2 \sum_{j \in a(j)} (g_{ij} + g_{sij}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{j \in a(j)} V_j (g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j))$
- (2) $Q_i = -V_i^2 \sum_{j \in a(j)} (b_{ij} + b_{sij}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{j \in a(j)} V_j (g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j))$
- (3) $P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sij}) - V_i V_j (g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j))$
- (4) $Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sij}) - V_i V_j (g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j))$

Στις εξισώσεις ισχύος υπάρχουν το σύνολο a_i και η διαφορά $\theta_i - \theta_j$. Το σύνολο a_i είναι το σύνολο των ζυγών που είναι συνδεδεμένοι με τον ζυγό i και η διαφορά $\theta_i - \theta_j$ θα γράφεται για λόγους συντομίας $\theta_i - \theta_j = \theta_{ij}$.

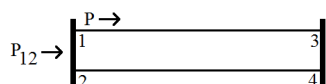
Οι εγχύσεις ισχύος υπολογίζονται στους υποσταθμούς. Ο κάθε υποσταθμός υπολογίζει τις εγχύσεις ισχύος του στο ηλεκτρικό δίκτυο.

«Τα φορτία σταθερής ισχύος και οι γεννήτριες αναπαρίστανται ως ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος και ως εκ τούτου δεν έχουν καμία επίδραση στο μοντέλο του δικτύου. Η γεννήτρια έχει μιγαδική έγχυση $S_{Gi} = P_{Gi} + i Q_{Gi}$ με θετική ενεργό ισχύ, ενώ το φορτίο σταθερής ισχύος έχει μιγαδική έγχυση $S_{Di} = P_{Di} + i Q_{Di}$ με αρνητική ενεργό ισχύ.» [Kor]

«Ας θεωρήσουμε τον γενικευμένο ζυγό ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας i . Σε αυτόν συνδέεται μια γραμμή μεταφοράς, της οποίας το άλλο άκρο συνδέεται στο ζυγό j και



Σχήμα 4.2: Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4.3: Ροή και έγχυση ισχύος.

Οι δείκτες ij που αναφέρονται στις παραπάνω εξισώσεις αντιμετωπίζονται διαφορετικά στις ροές ισχύος σε σχέση με τις εγχύσεις ισχύος. Για να γίνει αυτό κατανοητό ας θεωρήσουμε το παράδειγμα του σχήματος 4.3. Σε αυτό το παράδειγμα οι κόμβοι 1 και 2 ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα, όπως και οι κόμβοι 3 και 4. Η ροή ισχύος P_{13} αφορά τους κόμβους 1, 3 και τη γραμμή μεταφοράς 13. Η έγχυση ισχύος P_1 αφορά τους κόμβους 1 και 2, και τις γραμμές μεταφοράς 13 και 24. Παρατηρούμε δηλαδή ότι οι μεταβλητές P_1 και P_2 αφορούν ακριβώς το ίδιο μέγεθος. Η έγχυση ισχύος αφορά τη συνεκτική συνιστώσα, ενώ η ροή ισχύος αφορά ζεύγος κόμβων.

Κάθε διασυνδεδετικός κόμβος συνδέεται με έναν άλλο διασυνδεδετικό κόμβο μέσω ενός ισοδύναμου “π”. Θεωρούμε ότι η σύνδεση αυτή είναι αμφιμονοσήμαντη, δηλαδή από κάθε διασυνδεδετικό κόμβο ξεκινά μόνο μία γραμμή μεταφοράς.

Οι συνδέσεις του ηλεκτρικού δικτύου ορίζονται στο ανά μονάδα σύστημα. Οι αντιστάσεις των μετασηματιστών οφείλουν να είναι ενσωματωμένες στον ορισμό των αντιστάσεων των γραμμών μεταφοράς.

4.3.2 Διάνυσμα κατάστασης και διάνυσμα μετρήσεων

Το διάνυσμα κατάστασης είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που περιέχει τις τρέχουσες εκτιμήσεις των τάσεων και των γωνιών τους [Μον93]. Για κάθε κόμβο υπάρχει ένα ζεύγος στοιχείων του διανύσματος κατάστασης, ένα για την τάση και ένα για τη γωνία της. Αν δύο κόμβοι ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα, έχουν την ίδια τάση και γωνία τάσης [AVSM98]. Οπότε στο διάνυσμα κατάστασης υπάρχει μόνο ένα ζεύγος στοιχείων που το περιγράφει. Η γωνία του κόμβου αναφοράς είναι πάντα 0 ακτίνια. Δηλαδή, το διάνυσμα κατάστασης x θα είναι [Κοτ]:

$$x^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]$$

Το διάνυσμα μετρήσεων είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που περιέχει τα γνωστά δεδομένα για τους κόμβους. Αυτά τα δεδομένα προέρχονται από τους υποσταθμούς και έχει παραλάβει το κέντρο ελέγχου. Είναι αυτά που έχουν υπολογίσει οι υποσταθμοί, όπως περιγράφεται παραπάνω.

Οι τιμές των δύο διανυσμάτων είναι στο ανά μονάδα σύστημα, ενώ οι γωνίες είναι σε ακτίνια. Παρακάτω το διάνυσμα κατάστασης συμβολίζεται με x , ενώ το διάνυσμα μετρήσεων με z .

4.3.3 Εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας

«Ο στόχος της εκτίμησης κατάστασης είναι ο προσδιορισμός της πιο πιθανής κατάστασης του συστήματος, βάσει κάποιων μετρούμενων ποσοτήτων. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, είναι με χρήση της Εκτίμησης Μέγιστης Πιθανοφάνειας. Τα σφάλματα των μετρήσεων υποτίθεται ότι έχουν γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους. Η μικτή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όλων των μετρήσεων, μπορεί να γραφεί βάσει αυτών των άγνωστων παραμέτρων. Αυτή η συνάρτηση αναφέρεται ως συνάρτηση πιθανοφάνειας και παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν οι άγνωστοι παράμετροι επιλεγούν ώστε να είναι πιο «κοντά» στις πραγματικές τους τιμές. Επομένως, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να οριστεί, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση πιθανοφάνειας, συναρτήσει των άγνωστων παραμέτρων [MS71].

Συνήθως, τα σφάλματα των μετρήσεων υποτίθεται πως έχουν Κανονική Κατανομή και οι παράμετροι μιας τέτοιας κατανομής είναι η μέση τιμή μ και η διασπορά σ^2 . Κατόπιν, το πρόβλημα της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας επιλύεται για αυτές τις δύο παραμέτρους [Kor][CRM84][CCM09].

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Κανονικής Κατανομής για μια τυχαία μεταβλητή z ορίζεται ως:

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

όπου:

z : τυχαία μεταβλητή

μ : μέση τιμή της z , δηλαδή $E(z)$

σ : τυπική απόκλιση της z

Η συνάρτηση $f(z)$ αλλάζει σχήμα ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων μ και σ .

Έστω η μικτή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που αναπαριστά την πιθανότητα μέτρησης m ανεξάρτητων [CCM+11] μετρήσεων, κάθε μία από τις οποίες έχει την ίδια Κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Η μικτή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο όλων των συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας, αφού κάθε μέτρηση θεωρείται ανεξάρτητη από τις άλλες [Kor]:

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

όπου z_i : η i -οστή μέτρηση

$$z^T : [z_1, z_2, \dots, z_m]$$

Η συνάρτηση $f_m(z)$ ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας της τυχαίας μεταβλητής z . Ουσιαστικά, εκφράζει ένα μέτρο της πιθανότητας να παρατηρηθεί ένα συγκεκριμένο σύνολο μετρήσεων στο διάνυσμα z .

Ο στόχος της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας είναι να μεγιστοποιήσει αυτή τη συνάρτηση πιθανοφάνειας, μεταβάλλοντας, εν προκειμένω, τις παραμέτρους μ και σ . Για διευκόλυνση στους υπολογισμούς, η συνάρτηση αντικαθίσταται από το λογάριθμό της. Η νέα συνάρτηση λέγεται συνάρτηση Λογαριθμο-Πιθανοφάνειας, συμβολίζεται με L και δίνεται από [Kor]:

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

Η συνάρτηση Λογαριθμο-Πιθανοφάνειας μεγιστοποιείται, αν μεγιστοποιηθεί η $\log f_m(z)$ ή ελαχιστοποιηθεί το $\sum_{i=1}^m \log f(z_i)$, αφού οι υπόλοιποι όροι του αθροίσματος είναι σταθεροί. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να γραφεί συναρτήσει της διαφοράς $r_i = z_i - \mu_i = z_i - E(z_i)$.

Η μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής μ , μπορεί να εκφραστεί ως $h_i(x)$, δηλαδή ως μια μη γραμμική συνάρτηση που συνδέει το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος x με την i -οστή μέτρηση. Το τετράγωνο της διαφοράς r_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος $W_{ii} = \sigma_i^{-2}$. Τελικά, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του όρου $\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2$ θα είναι ισοδύναμο με το εξής [Kor]:

Ελαχιστοποίηση του $\sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2$ με $z_i = h_i(x) + r_i, i = 1, \dots, m$. Η λύση του παραπάνω προβλήματος λέγεται σταθμισμένη εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων για το διάνυσμα κατάστασης x .» [Kor]

4.3.4 Επαναληπτική εξίσωση συστήματος

Έστω το παρακάτω σύνολο μετρήσεων [Kor]:

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

όπου:

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

$h_i(x)$ είναι η μη γραμμική συνάρτηση που συνδέει τη i -οστή μέτρηση με το διάνυσμα κατάστασης x .

$x^T = [x_1, x_2, \dots, x_m]$ είναι το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος

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

Συνήθως, γίνονται οι παρακάτω υποθέσεις, σχετικά με τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων των μετρήσεων:

- $E(e_i) = 0, i = 1, \dots, m$
- Τα σφάλματα των μετρήσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους: $E[e_i e_j] = 0$. Άρα, $Cov(e) = E[ee^T] = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\}$. Η σταθμισμένη εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων θα πρέπει να ελαχιστοποιήσει την παρακάτω συνάρτηση:

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

Για να είναι ελάχιστη η $J(x)$, πρέπει τουλάχιστον οι συνθήκες πρώτης τάξης πρέπει να ικανοποιούνται, δηλαδή [Kor]:

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

όπου $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$. Αναπτύσσουμε την $g(x)$ σε σειρά Taylor, γύρω από το διάνυσμα κατάστασης x^k :

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

Αγνοούμε τους όρους υψηλότερης τάξης ώστε να φτάσουμε μια επαναληπτική λύση που είναι γνωστή ως Μέθοδος Gauss-Newton:

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

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

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

$$g(x^k) = -H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x^k))$$

Ο πίνακας $G(x)$ λέγεται πίνακας κέρδους. Είναι αραιός, θετικά ορισμένος και συμμετρικός, υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο. Γενικά, κατά την επίλυση, ο δεν αντιστρέφεται, αλλά παραγοντοποιείται σε 2 τριγωνικούς πίνακες¹ και κατόπιν το σύστημα εξισώσεων επιλύεται με πίσω-αντικατάσταση σε κάθε επανάληψη k [Kor02][Kor10]:

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

όπου $\Delta x^{k+1} = x^{k+1} - x^k$. Το παραπάνω σύνολο εξισώσεων αναφέρεται ως Κανονικές Εξισώσεις [Kor]:

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι διαφόρων ειδών. Όμως, οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετρήσεων είναι ροές ισχύος γραμμών, εγχύσεις ισχύος ζυγών και μέτρα τάσεων ζυγών [KK03]. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των μεταβλητών κατάστασης του διανύσματος x^k , είτε σε καρτεσιανό είτε σε πολικό σύστημα συντεταγμένων. Αν χρησιμοποιηθεί πολικό σύστημα συντεταγμένων για ένα σύστημα N ζυγών, το διάνυσμα κατάστασης x^k θα έχει $2N$ στοιχεία, N μέτρα τάσεων ζυγών και N γωνίες τάσεων ζυγών. Δηλαδή, το διάνυσμα x^k θα είναι [Kor]:

$$x^T = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]$$

Οι αναλυτικές εκφράσεις των παραπάνω τύπων μετρήσεων δίνονται από τις εξισώσεις ροών και εγχύσεων ισχύος (1), (2), (3) και (4).

4.3.5 Συνθήκη παρατηρησιμότητας

«Η μήτρα $G(x)$ ονομάζεται μήτρα κέρδους. Η μήτρα αυτή είναι αραιή, θετικά ορισμένη και συμμετρική διασφαλίζοντας ότι το σύστημα είναι πλήρως παρατηρήσιμο.»[Kor] Αφού η μήτρα $G(x)$ είναι θετικά ορισμένη, η ορίζουσά της είναι θετική, άρα αντιστρέφεται, επομένως το παραπάνω σύστημα επιλύεται κατά Gauss [KKC+03].

Η συνθήκη παρατηρησιμότητας δεν ελέγχεται. Θεωρείται ότι το σύστημα είναι επιλύσιμο. Ωστόσο, αν το σύστημα είναι αδύνατο ή αόριστο, αυτό γίνεται αντιληπτό κατά την επίλυση κατά Gauss. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπολογίζεται εκτίμηση.

4.3.6 Εκτίμηση ροών και εγχύσεων ισχύος

Οι τύποι υπολογισμού των εκτιμήσεων ροών και εγχύσεων ισχύος είναι ίδιοι με τους τύπους υπολογισμού των στοιχείων της μήτρας h , δηλαδή υπολογίζονται από τις εξισώσεις (1), (2), (3) και (4). Η εκτίμηση αυτή στηρίζεται στην εκτίμηση των τάσεων.

¹ Σε αυτήν την εργασία δεν αποθηκεύεται ο κάτω τριγωνικός πίνακας, αλλά μεταβάλλεται το άλλο μέρος της εξίσωσης [Φελ09].

$\frac{d}{d\delta_i}\{\}$	$\frac{d}{d\delta_j}\{\}$	$\frac{d}{dV_i}\{\}$	$\frac{d}{dV_j}\{\}$
$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i \sum_{j \in a(i)} (g_{ij} + g_{sij}) + 2V_i g_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij}$
$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \alpha_{ij} + 2V_i (g_{ij} + g_{sij})$	$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \alpha_{ij}$
$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{j \in a(i)} V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i \sum_{j \in a(i)} (b_{ij} + b_{sij}) - 2V_i b_i - \sum_{j \in a(i)} V_j \beta_{ij}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij}$
$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij}$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -V_j \beta_{ij} - 2V_i (b_{ij} + b_{sij})$	$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij}$
$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0$	$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0$	$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1$	$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0$

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

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

Σχήμα 4.4: Τύποι υπολογισμού στοιχείων της ιακωβιανής μήτρας H [Kor].

Κεφάλαιο 5

Περιγραφή του υλικού των υποσταθμών και του κέντρου ελέγχου

Το υλικό είναι ένα δίκτυο από PLC και μια διεπαφή, τα οποία παράγονται από τη SIEMENS [Τζο01][Παν97][Μαρ00][Βερ09][Βερ12]. Το προϊόντα αυτά είναι γνωστά και ευρέως διαδεδομένα στην αγορά. Το υλικό που χρησιμοποιείται δεν έχει φυσική υπόσταση, το σύστημα προσομοιώνεται με κατάλληλο λογισμικό [Σια06]. Ωστόσο, θεωρείται ότι αν αποκτηθεί το απαιτούμενο υλικό το σύστημα μπορεί να υλοποιηθεί. Κάθε PLC είναι “αρθρωτό” και αποτελείται από διάφορες μονάδες [Βερ14a, σελ. 46].

5.1 Απαιτήσεις υλικού

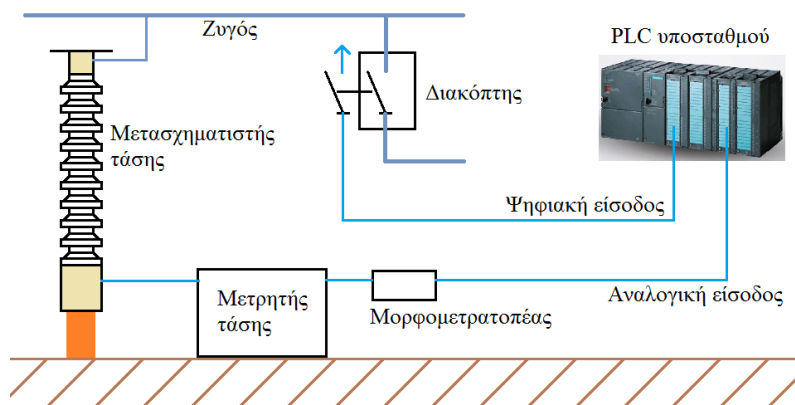
Οι συσκευές που συναποτελούν το δίκτυο PLC είναι:

- Μια συσκευή διεπαφής ανθρώπου μηχανής προγραμματίσιμη με λογισμικό της SIEMENS.
- Ένα PLC για το κέντρο ελέγχου και ένα PLC ανά υποσταθμό. Τα PLC πρέπει να είναι προγραμματίσιμα με λογισμικό STEP7 της SIEMENS έκδοσης που περιέχει την SCL και όλες τις χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις. Το κάθε PLC πρέπει να μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις μνήμης του προγράμματός του.
- Τα PLC και το HMI πρέπει να είναι συνδέσιμα μεταξύ τους.
- Τα κατάλληλα καλώδια για τη διασύνδεση του υπόλοιπου υλικού.
- Διακοπτικός εξοπλισμός κατάλληλος για ενημέρωση PLC του υποσταθμού (εξαρτάται από τις απαιτήσεις του κάθε υποσταθμού).
- Μετρητές και μορφομετατροπείς ανά υποσταθμό (εξαρτάται από τις απαιτήσεις του κάθε υποσταθμού).

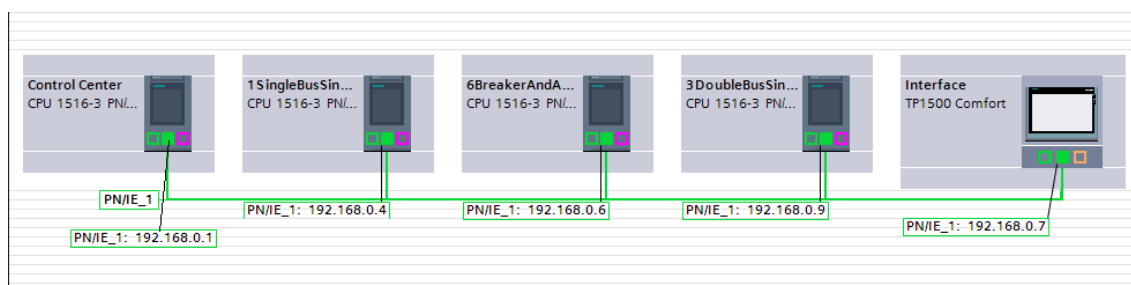
Η έκδοση που χρησιμοποιείται είναι firmware V1.5 . Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλη έκδοση. Αρκεί η έκδοση να περιέχει την SCL και όλες τις χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις, όπως τη GET_DB.

5.2 Δίκτυο

Τα PLC και το HMI πρέπει να μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Το δίκτυο που χρησιμοποιείται είναι PN/IE [CRW04], οπότε χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα καλώδια. Χρησιμοποιούνται ένα καλώδιο PN/IE ανά υποσταθμό.



Σχήμα 5.1: Παράδειγμα ψηφιακής και αναλογικής εισόδου ενός PLC. Η αναλογική είσοδος (τάση) απαιτεί μετρητικό μετασχηματιστή, μετρητή και μορφομετρατοπέα. Η ψηφιακή απαιτεί κατάλληλο διακόπτη. Ωστόσο, λόγω της απουσίας του κατάλληλου εξοπλισμού οι εισοδοί δίνονται έτοιμες για τις ανάγκες αυτής της εργασίας.



Σχήμα 5.2: Παράδειγμα δικτύου PLC και HMI σε δίκτυο τριών υποσταθμών. Αριστερά είναι το PLC του κέντρου ελέγχου, δεξιά το HMI και οι τρεις συσκευές στο κέντρο είναι PLC υποσταθμών. Συνδέονται με καλώδιο PN/IE, ενώ φαίνονται οι διευθύνσεις.

Το υλικό που χρησιμοποιείται διαθέτει όλες τις απαραίτητες θύρες. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί υλικό άλλης έκδοσης. Σε αυτήν την περίπτωση είναι πιθανό να απαιτούνται κάρτες δικτύου.

Γενικά, το πρωτόκολλο και ο τρόπος σύνδεσης είναι στην ευχέρεια της κάθε υλοποίησης. Αρκεί όλοι οι υποσταθμοί να συνδέονται στο κέντρο ελέγχου και το HMI με όλα τα PLC.

Κατά τη δήλωση των συνδέσεων, για παράδειγμα των συνδέσεων των PLC των υποσταθμού με το PLC του κέντρου ελέγχου, σε κάθε συνδεδεμένη συσκευή ανατίθεται μια σχετική διεύθυνση, η οποία ονομάζεται ID. Το ID είναι ένας δεκαεξαδικός αριθμός. Για να λειτουργήσει ορθά η συνάρτηση GET_DB, άρα και η επικοινωνία μεταξύ κέντρου ελέγχου και των υποσταθμών, χρειάζεται η γνώση του ID. Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται το ID του υποσταθμού, γιατί η συνάρτηση GET_DB καλείται από το κέντρο ελέγχου. Το ID του υποσταθμού ορίζεται αυτόματα κατά τη δήλωση των συνδέσεων. Αλλά χρειάζεται να αναφερθεί κατά τη δήλωσή του στο τμήμα “configuration” του κέντρου ελέγχου (δείτε υποκεφάλαιο 6.3.2). Πιο συγκεκριμένα είναι το πεδίο “connection address” στην αντίστοιχη κλήση της συνάρτησης “Define substation”. Στο σχήμα 5.3 φαίνεται παράδειγμα δήλωσης του ID για τον υποσταθμό 6 του προαναφερμένου δικτύου.


```

20 //6 Breaker&1/2
21 "Define substation"(
22     "first node id" := 16,
23     "number of interconnection nodes" := 4,
24     "connection address" := W#16#103,
25     "voltage base" := 150000 //150kV
26 );

```

Network overview	Connections	Relations	I/O communication	VPN
Local connection name	Local end point	Local ID (hex)	Partner ID (hex)	Partner
S7_Connection_2	Control Center	102	100	1SingleBusSingleBr...
S7_Connection_3	Control Center	103	100	6BreakerAndAHalf
S7_Connection_5	Control Center	105	100	3DoubleBusSingleB..
S7_Verbindung_1_1	1SingleBusSingleBr...	100	102	Control Center
S7_Verbindung_1_1_2	3DoubleBusSingleB..	100	105	Control Center
S7_Verbindung_1_2	6BreakerAndAHalf	100	103	Control Center
HMI_Connection_4	Interface			Control Center
HMI_Connection_5	Interface			1SingleBusSingleBr...
HMI_Connection_7	Interface			3DoubleBusSingleB..
HMI_Connection_10	Interface			6BreakerAndAHalf

Σχήμα 5.3: Πάνω δηλώνεται ο υποσταθμός στο τμήμα “Configuration” του κέντρου ελέγχου. Η διεύθυνση πρέπει να είναι ίδια με αυτήν της καρτέλας με τις διευθύνσεις των συνδέσεων.

5.3 PLC κέντρου ελέγχου

Το PLC του κέντρου ελέγχου αποτελείται από τις εξής μονάδες:

- Μονάδα τροφοδοσίας.
- Μονάδα CPU.
- Μονάδες δικτύου (εξαρτάται από τις απαιτήσεις δικτύου και τη CPU).

Η CPU απαιτείται να μπορεί να καταλαβαίνει τη συνάρτηση GET_DB. Επίσης, απαιτείται να διαθέτει αρκετή μνήμη για τις απαιτήσεις του λογισμικού.

Χρησιμοποιείται το μοντέλο CPU 1516-3 PN/DP, το οποίο ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις. Το μοντέλο αυτό έχει ενσωματωμένες τις θύρες PN/IE, οπότε απαιτούνται λιγότερες έως καμία μονάδα δικτύου.

5.4 PLC υποσταθμού

Το PLC του υποσταθμού αποτελείται από τις εξής μονάδες:

- Μονάδα τροφοδοσίας.
- Μονάδα CPU.
- Μονάδα ή μονάδες ψηφιακών εισόδων.
- Μονάδα ή μονάδες αναλογικών εισόδων.

- Μονάδα δικτύου (εξαρτάται από τις απαιτήσεις δικτύου και τη CPU).

Παράδειγμα των μονάδων ενός PLC υποσταθμού είναι το σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4: Οι μονάδες που αποτελούν το PLC της διάταξης “breaker and a half”. Πάνω από κάθε μονάδα είναι η αρίθμηση της. 0: μονάδα τροφοδοσίας, 1: CPU, 2: μονάδα ψηφιακών εισόδων, 3 έως 5: μονάδες αναλογικών εισόδων

Το PLC του υποσταθμού δε χρειάζεται να καταλαβαίνει τη συνάρτηση GET_DB. Ωστόσο, απαιτείται να είναι δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων μέσω αυτής της συνάρτησης. Επίσης, απαιτείται να διαθέτει αρκετή μνήμη για τις απαιτήσεις του λογισμικού.

Χρησιμοποιείται το μοντέλο CPU 1516-3 PN/DP, το οποίο ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις. Το μοντέλο αυτό έχει ενσωματωμένες θύρες PN/IE, οπότε δεν απαιτείται κάποια μονάδα δικτύου.

Οι μονάδες ψηφιακών εισόδων λαμβάνουν ως είσοδο την κατάσταση των διακοπών. Ακολουθείται θετική λογική, δηλαδή το 1 σημαίνει κλειστός διακόπτης και το 0 ανοιχτός. Οι μονάδες αναλογικών εισόδων λαμβάνουν ως είσοδος τις εξόδους των μορφομετατροπέων των μετρητών. Οι ρυθμίσεις των μετρητών και μορφομετατροπέων πρέπει να είναι σε συμφωνία με τις ρυθμίσεις των μετρητών στο τμήμα κώδικα “Configuration” του υποσταθμού. Οι διευθύνσεις των μονάδων εισόδων πρέπει να είναι σε συμφωνία με τις διευθύνσεις που αναφέρονται στο τμήμα κώδικα “Configuration” του υποσταθμού.

Κεφάλαιο 6

Περιγραφή του λογισμικού των υποσταθμών και του κέντρου ελέγχου

Το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί είναι σύστημα εποπτείας υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας στη γλώσσα SCL. Αποτελείται από δυο προγράμματα και ένα σύστημα διεπαφής χρήστη (HMI). Το ένα πρόγραμμα είναι το πρόγραμμα του υποσταθμού και το άλλο το πρόγραμμα του κέντρου ελέγχου. Τα δύο προγράμματα τροποποιούνται κατάλληλα, υπολογίζουν τις πληροφορίες εποπτείας και τις θέτουν στις δομές δεδομένων SCADA και “SCADA information”. Το HMI εμφανίζει τη διεπαφή χρήστη σύμφωνα με τις πληροφορίες που αναφέρονται στις προαναφερθείσες δομές. Στην περιγραφή του λογισμικού είναι ενσωματωμένες οι συμβάσεις που έχουν γίνει. Επίσης, έχουν ενσωματωθεί οι αλγόριθμοι, οι τύποι και οι έννοιες που έχουν αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 4.

Το λογισμικό δε δέχεται ελληνικούς χαρακτήρες. Ως εκ τούτου, τα ονόματα των συναρτήσεων, των μεταβλητών, των σταθερών και των δομών δεδομένων είναι στα αγγλικά.

6.1 Η γλώσσα SCL

Η γλώσσα SCL είναι γλώσσα προγραμματισμού ειδικού σκοπού, για προγραμματισμό PLC, μοιάζει με την Pascal. Υποστηρίζεται από το πρότυπο IEC 61131-3 [Ber14b][TJ10][SIEb][SIEa].

Η γλώσσα SCL είναι υψηλή γλώσσα προγραμματισμού. Η ομοιότητα με την Pascal την καθιστά εύκολη στη μάθηση και χρήση, ενώ έχει τη θεωρητική δυνατότητα επίλυσης οποιουδήποτε επιλύσιμου προβλήματος. Για παράδειγμα έχει τη δυνατότητα εκτέλης διαδικασιών γραμμικής άλγεβρας, διαχείρισης σφαλμάτων, λήψης αποφάσεων και άλλα.

Ένα μειονέκτημα της γλώσσας είναι η στατικότητα της. Συνέπεια αυτού του μειονεκτήματος είναι η ανάγκη για διάκριση των κόμβων ενός υποσταθμού σε “υπάρχοντες” και “μη υπάρχοντες”. Το μέγεθος των διανυσμάτων είναι στατικό, αν και τα δεδομένα είναι δυναμικά [Web, σελ. 12]. Οπότε ακολουθείτε η συνήθης πρακτική σε αυτές τις περιπτώσεις, δηλαδή τα διανύσματα ορίζονται για ένα μέγιστο πλήθος κόμβων. Το μέγιστο πλήθος έχει επιλεγεί ίσο με 20, αλλά είναι δυνατό να αλλάξει. Επομένως, ενώ ένας υποσταθμός αποτελείται πιθανώς από λιγότερους κόμβους, τα διανύσματα έχουν τυπικά πληροφορίες και για τους 20. Έτσι, προκύπτει η διάκριση μεταξύ “υπαρχόντων” και “μη υπαρχόντων κόμβων”. Οι υπάρχοντες κόμβοι ανήκουν στον υποσταθμό, ενώ μη υπάρχοντες είναι οι επιπλέον κόμβοι, οι οποίοι δε λαμβάνονται υπόψιν στους υπολογισμούς.

Τέλος, θα ήταν επιθυμητό η γλώσσα SCL να ήταν αντικειμενοστραφής. Η απουσία αντικειμενοστρέφειας δεν αποτελεί εμπόδιο, αλλά σίγουρα διευκολύνει την υιοθέτηση πιο αφηρημένων υπολογιστικών μοντέλων.

6.2 Πρόγραμμα υποσταθμών

Το πρόγραμμα ενός υποσταθμού υπολογίζει τις πληροφορίες εποπτείας ενός υποσταθμού με τα δεδομένα εισόδου [JK03]. Τα δεδομένα εισόδου προέρχονται από τρεις πηγές:

- ψηφιακές εισοδοί του PLC
- αναλογικές εισοδοί του PLC
- οι υπόλοιπες είναι ενσωματωμένες στο τμήμα κώδικα “Configuration” του προγράμματος

Από τις εισόδους και το Configuration υπολογίζεται η κατάσταση του υποσταθμού. Η κατάσταση αποτυπώνεται στο δομή δεδομένων “SCADA information”. Επιπλέον, στέλνονται στο κέντρο ελέγχου οι πληροφορίες που χρειάζεται, δηλαδή οι πληροφορίες που περιγράφουν τους διασυνδεδετικούς κόμβους [KVA+13].

Οι ψηφιακές εισοδοί περιγράφουν την κατάσταση των διακοπών. Ανοιχτός διακόπτης αντιστοιχεί στην κατάσταση “false”, ενώ κλειστός διακόπτης αντιστοιχεί στην κατάσταση “true”.

Οι αναλογικές εισοδοί περιγράφουν μετρήσεις. Ισχύουν οι συμβάσεις της SIEMENS για τις αναλογικές εισόδους, δηλαδή θεωρούνται ως έξοδοι μορφομετατροπών. Οι μετρήσεις αναπαριστώνται από μεταβλητές τύπου WORD, ενώ η τιμή ανήκει στο διάστημα [-27648,27648] [SIE99, σελ. 10].

Η συνάρτηση “Configuration” περιγράφει ποιές είναι οι εισοδοί του PLC και πώς ερμηνεύονται. Δηλαδή προσθέτει τη σημειολογία, ενώ ταυτόχρονα προσδιορίζει τις διευθύνσεις των δεδομένων εισόδου.

6.2.1 Δομές δεδομένων λογισμικού υποσταθμού

Οι δομές δεδομένων που υπάρχουν στο λογισμικό των υποσταθμών είναι:

- Measured state: Περιέχει τις πληροφορίες μετρήσεων και τις πληροφορίες τοπολογίας. Οι πληροφορίες μετρήσεων είναι οι ίδιες οι μετρήσεις, ποιές είναι γνωστές και έγκυρες και τα σφάλματα μέτρησης. Οι πληροφορίες τοπολογίας είναι η μήτρα πρόσπτωσης, οι συνεκτικές συνιστώσες, ποιοί κόμβοι είναι διασυνδεδετικοί κόμβοι, ποιοί κόμβοι είναι έγχυσης ισχύος, και οι κωδικοί σφάλματος.
- Estimated state: Περιέχει τις επεξεργασμένες μετρήσεις. Οι επεξεργασμένες μετρήσεις αφορούν τους διασυνδεδετικούς κόμβους. Πιο συγκεκριμένα ποιά μεγέθη είναι γνωστά για αυτούς, οι τις τιμές τους και τα σφάλματά τους. Τα μεγέθη αυτά είναι η τάση, η εξερχόμενες ροές ενεργού και άεργου ισχύος, και οι εγχύσεις ισχύος στη συνεκτική συνιστώσα του διασυνδεδετικού κόμβου.
- SCADA Information: Περιέχει τις πληροφορίες εποπτείας. Αναλύεται παρακάτω σε ειδικό υποκεφάλαιο.
- Sent Data: Πληροφορίες διασυνδεδετικών κόμβων για αποστολή στο κέντρο ελέγχου. Αναλύεται παρακάτω στο υποκεφάλαιο για αποστολή στο κέντρο ελέγχου.

Μία άλλη σημαντική ομάδα δεδομένων είναι οι εισοδοί του προγράμματος. Όλες οι εισοδοί του προγράμματος έχουν πρόθεμα I, για παράδειγμα I124.7. Οι δομές δεδομένων διατηρούν την ίδια δομή για όλους τους υποσταθμούς, αλλά η ομάδα των δεδομένων εισόδου είναι διαφορετική από υποσταθμό σε υποσταθμό.

6.2.2 Τμήμα κώδικα “Configuration”

Έστω ότι δυο διαφορετικοί υποσταθμοί χρησιμοποιούν το παρών σύστημα εποπτείας. Τότε το μόνο τμήμα κώδικα στο οποίο διαφέρουν είναι το τμήμα κώδικα “configuration”. Αυτό το τμήμα κώδικα περιέχει τα δεδομένα που διαφοροποιούν τους υποσταθμούς, και πιο συγκεκριμένα τη σημασιολογία των δεδομένων εισόδου. Το τμήμα κώδικα “Configuration” περιγράφει με ποιόν τρόπο ερμηνεύονται τα δεδομένα εισόδου, και θέτει τα δεδομένα στη δομή “Measured state”.

Για μεγαλύτερη αξιοπιστία συνιστάται να χρησιμοποιούνται μόνο οι συναρτήσεις που αναφέρονται εδώ. Παραδείγματα τέτοιου κώδικα υπάρχουν στο παράρτημα. Διαφορετικά το πρόγραμμα μπορεί να έχει αθέμιτα αποτελέσματα. Στο Configuration δηλώνονται:

- η τοπολογία του υποσταθμού
- οι μετρητές

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη δήλωση των παραπάνω είναι:

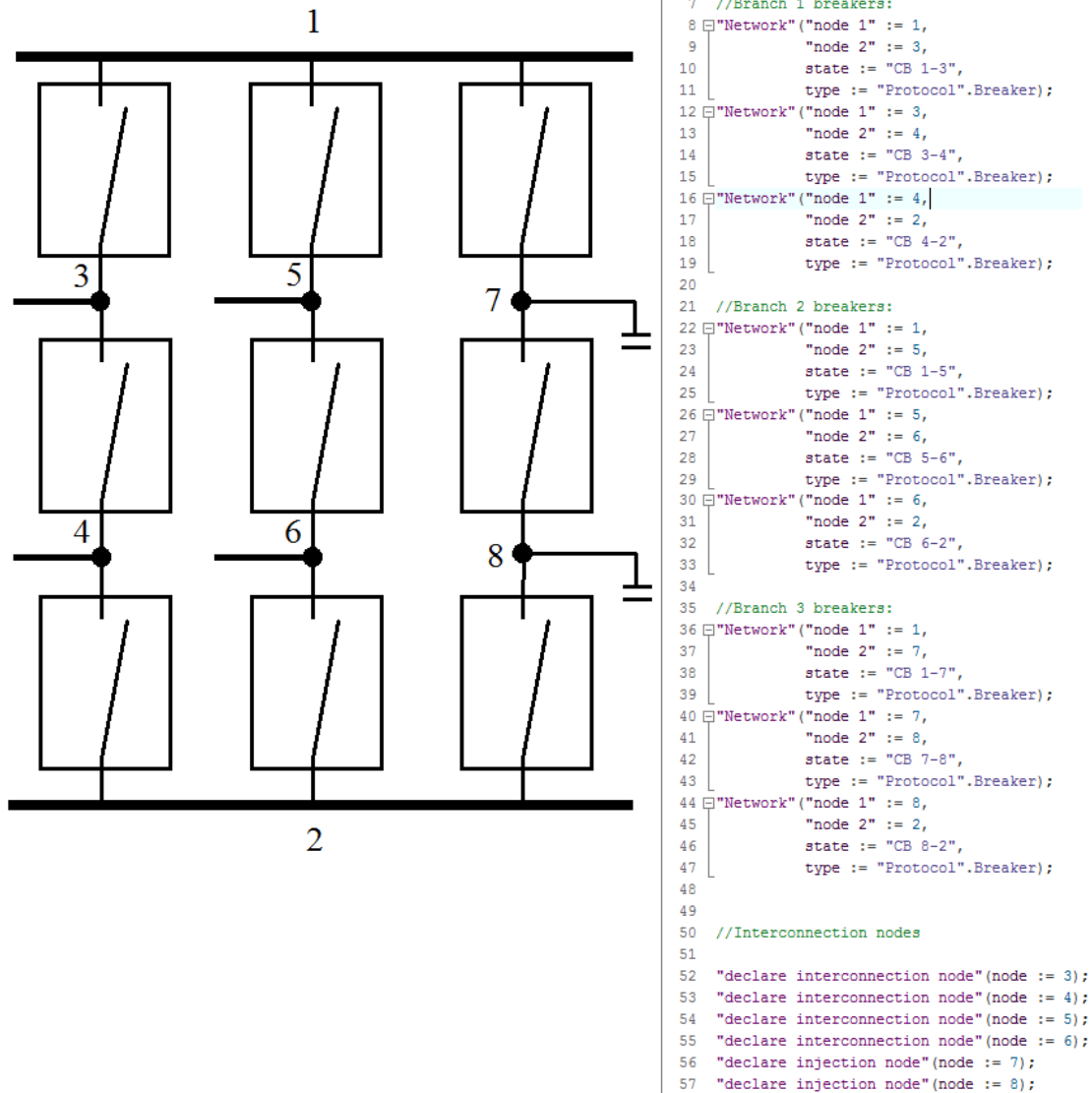
- “Network”: Δηλώνει διακοπτικά στοιχεία
- “declare interconnection node”: Δηλώνει διασυνδεδετικό κόμβο.
- “declare injection node”: Δηλώνει κόμβο έγχυσης ισχύος.
- “Define display units”: Ορίζει το σύστημα μονάδων στο οποίο εμφανίζονται οι μετρήσεις.
- “measure voltage”: Δηλώνει μέτρηση τάσης.
- “measure active flow”: Δηλώνει μέτρηση ενεργού ροής ισχύος.
- “measure inactive flow”: Δηλώνει μέτρηση άεργου ροής ισχύος.

Με τη συνάρτηση “Network” δηλώνονται τα διακοπτικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα δηλώνονται μεταξύ ποιών κόμβων είναι ο τύπος του διακοπτικού στοιχείου και ποιά ψηφιακή είσοδος περιγράφει την κατάστασή του. Με αυτόν τον τρόπο δηλώνεται ο γράφος διάταξης του υποσταθμού, ενώ δημιουργείται αυτόματα ο γράφος λειτουργίας. Αν δύο διακόπτες συνδέουν τους ίδιους κόμβους, τότε θεωρείται ότι οι δύο διακόπτες συνδέονται παράλληλα. Αν δύο κόμβοι συνδέονται μόνιμα μεταξύ τους, τότε η δήλωση γίνεται με την ίδια συνάρτηση και ως διακόπτης ορίζεται η τιμή “true”. Μόνο οι κόμβοι που δηλώνονται με αυτή τη συνάρτηση ανήκουν στον υποσταθμό. Αυτοί οι κόμβοι ονομάζονται “υπάρχοντες” κόμβοι.

Συνολικά, οι κλήσεις της συνάρτησης “Network” δηλώνουν το γράφο τοπολογίας του υποσταθμού. Από αυτόν το γράφο εξάγεται ο γράφος λειτουργίας με τη σύμβαση θετικής λογικής. Δηλαδή, αν ένα στοιχείο επιτρέπει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος, η τιμή του πρέπει να είναι “true”, αλλιώς πρέπει να είναι “false”. Ο τύπος του διακοπτικού στοιχείου μπορεί να είναι “Switch”, δηλαδή αποζεύκτης, ή “Breaker”, δηλαδή διακόπτης. Παράδειγμα δήλωσης τοπολογίας υπάρχει στο σχήμα 6.1 .

Η συνάρτηση “declare interconnection node” δηλώνει ένα διασυνδεδετικό κόμβο. Το πρόγραμμα του υποσταθμού στέλνει πληροφορίες μόνο για τους διασυνδεδετικούς κόμβους στο κέντρο ελέγχου. Τυπικά οι διασυνδεδετικοί κόμβοι είναι άκρα γραμμών μεταφοράς. Η συνάρτηση “declare injection node” δηλώνει έναν κόμβο έγχυσης ισχύος. Οι κόμβοι έγχυσης ισχύος τυπικά είναι συστοιχίες πυκνωτών, γεννήτριες ή φορτία. Οι ζυγοί δε δηλώνονται. Τυπικά κόμβοι οι κοινοί κόμβοι είναι ζυγοί. Παράδειγμα της δήλωσης κόμβων είναι στο σχήμα 6.1 .

Η συνάρτηση “Define display units” ορίζει σε ποιές μονάδες εμφανίζονται οι μετρήσεις στο HMI. Οι μονάδες αυτής της συνάρτησης είναι σε Volt και VA. Για παράδειγμα η κλήση: “Define



Σχήμα 6.1: Αριστερά: ισοδύναμο μονοφασικό ηλεκτρολογικό σχέδιο υποσταθμού “breaker and a half”. Δεξιά: η δήλωσή της τοπολογίας του στο “Configuration”.

display units” (power := 1000000, voltage := 1000); Οι τάσεις πρέπει να εμφανίζονται σε kV=1000V, ενώ οι ισχείς σε MVA=1000000VA.

Οι συναρτήσεις “measure voltage”, “measure active flow” και “measure inactive flow” είναι συναρτήσεις δήλωσης μετρητών. Έχουν παρόμοια σύνταξη, η οποία εμπεριέχει τα ορίσματα της έτοιμης συνάρτησης FC 105 “SCALE” της SCL. Στη μεταβλητή IN τίθεται η αναλογική είσοδος που αντιστοιχεί στη μέτρηση, συνιστάται να ακολουθείται από τους δύο χαρακτήρες :P.

Η συνάρτηση “measure voltage” ορίζει μετρητή τάσης και έχει επιπλέον τα ορίσματα node και deviation. Η μεταβλητή node ορίζει ποιόν κόμβο αφορά η μέτρηση τάσης, ενώ η μεταβλητή deviation την τυπική απόκλιση σε V.

Οι συναρτήσεις ορίζουν μετρητή ροής ισχύος “measure active flow” και “measure inactive flow” και έχουν επιπλέον τα ορίσματα “from node”, “to node” και deviation. Τα ορίσματα “from node” και “to node” ορίζουν μεταξύ ποιών κόμβων συντελείται η ροή ισχύος, καθώς και τη σύμβαση για θετικές τιμές με φορά από τον “from node” στον “to node”. Η μεταβλητή deviation ορίζει την τυπική απόκλιση σε VA. Η συνάρτηση “measure active flow” ορίζει ενεργό ροή ισχύος, ενώ η “measure inactive flow” ορίζει άεργο.

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος ελέγχεται κατά πόσον είναι ορθή η δήλωση των δεδομένων εισόδου στο Configuration. Αυτός ο έλεγχος εκτελείται από τη συνάρτηση “Coherence error check”. Παραδείγματα εσφαλμένης δήλωσης είναι αρνητικός κόμβος, μηδενική τυπική απόκλιση, μετρητής τάσης ή διασυνδεδετικός κόμβος σε μη υπάρχων κόμβο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το πρόγραμμα εμφανίζει στο HMI “conherence error” και δε θα εκτελεί κάτι άλλο. Το “conherence error” είναι στατικό, δεν επηρεάζεται από τις εισόδους του PLC και μπορεί να εμφανιστεί κατά τη προσομοίωση. Επιπλέον, αν δεν εμφανιστεί κατά τη προσομοίωση δε θα εμφανιστεί κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Συνιστάται πριν την εφαρμογή του συστήματος υπό πραγματικές συνθήκες, να προσομοιώνεται ώστε να εκσφαλματωθούν εσφαλμένες δηλώσεις στο Configuration. Επίσης, το πρόγραμμα λειτουργεί ορθά μόνο όταν δεν εμφανίζεται αυτό το σφάλμα.

Το τμήμα κώδικα Configuration για τα είδη υποσταθμών που αναφέρονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο υπάρχουν στο παράρτημα.

6.2.3 Δομή δεδομένων “SCADA information”

Το HMI αντλεί όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται από αυτήν τη δομή δεδομένων. Οι πληροφορίες αυτές είναι αποθηκευμένες υπό μορφή πινάκων. Οι πίνακες αυτοί είναι:

- switches situation: κατάσταση διακοπών
- connected components: συνεκτικές συνιστώσες
- Voltages: τάσεις
- Active flows: ροές ενεργού ισχύος
- Inactive flows: ροές άεργου ισχύος
- Measured voltages: ποιές τάσεις είναι γνωστές
- Measured active flows: ποιές ροές ενεργού ισχύος είναι γνωστές
- Measured inactive flows: ποιές ροές άεργου ισχύος είναι γνωστές
- σφάλματα του υποσταθμού

Ο πίνακας “switches situation” δηλώνει αν μεταξύ δύο κόμβων υπάρχει κλειστός διακόπτης ή συνδέονται μόνιμα.

Ο γράφος αναλύεται σε συνεκτικές συνιστώσες. Σε κάθε συνεκτική συνιστώσα τίθεται ένας κόμβος μέλος της συνεκτικής συνιστώσας ως αντιπρόσωπος. Ο πίνακας connected components περιέχει τους αντιπροσώπους των κόμβων. Αν ο κόμβος δεν είναι υπάρχων, τότε ο αντιπρόσωπός του είναι 0.

Ο πίνακας “Voltages” περιέχει τις μετρημένες τάσεις των κόμβων. Ποιές μετρήσεις στα Voltages είναι μετρούμενες και ποιές όχι είναι δηλωμένο στον πίνακα “Measured voltages”.

Ο πίνακας “Active flows” περιέχει τις ροές ενεργού ισχύος. Έστω “Active flows”[i,j] μια ροή, τότε η σύμβαση είναι θετική για ροή από τον κόμβο i στον κόμβο j. Ο πίνακας “Measured active flows” δηλώνει ποιές μετρήσεις στα “Active flows” είναι μετρούμενες και ποιές όχι.

Ο πίνακας “Inactive flows” περιέχει τις ροές ενεργού ισχύος. Έστω “Inactive flows”[i,j] μια ροή, τότε η σύμβαση είναι θετική για ροή από τον κόμβο i στον κόμβο j. Ο πίνακας “Measured inactive flows” δηλώνει ποιές μετρήσεις στα “Inactive flows” είναι μετρούμενες και ποιές όχι.

Οι πίνακες Measured voltages, Measured active flows και Measured inactive flows δηλώνουν την κατάσταση της μέτρησης με κωδικό νούμερο. Η σύμβαση είναι ίδια και στις τρεις περιπτώσεις:

- Το 0 δηλώνει απουσία μετρητή.
- Το 1 δηλώνει κανονική μέτρηση.
- Το 2 δηλώνει σφάλμα μετρητή. Πιο συγκεκριμένα η αναλογική είσοδος είναι εκτός ορίων. (status W#16#0008 της FC 105 SCALE)
- Το 3 δηλώνει γενικό σφάλμα μετρητή. (error είναι true της FC 105 SCALE)
- Το 4 δηλώνει ασυμφωνία μεταξύ της κατάστασης δύο κόμβων και τις μέτρησης. Αφορά τις μετρήσεις ροών ισχύων και προκύπτει όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, αλλά η μέτρηση δείχνει ότι υπάρχει ροή ισχύος που ξεφεύγει των ορίων (-τυπική απόκλιση,+τυπική απόκλιση).

Το πεδίο “error code” είναι ο κωδικός σφάλματος. Οι τιμές του μπορεί να είναι 0, 1 ή κάποια άλλη τιμή.

- 0: Δεν υπάρχει σφάλμα.
- 1: Έχει οριστεί λάθος ο υποσταθμός στο “Configuration”.
- Υπόλοιπες τιμές: Υπάρχει κάποιο άλλο σφάλμα. Σε δυαδική μορφή το κάθε ψηφίο αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο σφάλμα. Το 1 σημαίνει ότι το σφάλμα υπάρχει, το 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει.

Η αρίθμηση των ψηφίων γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά. Το πρώτο ψηφίο δηλώνει “Coherence error”, δηλαδή έχει οριστεί λάθος ο υποσταθμός. Το δεύτερο δηλώνει ότι υπάρχει βρόχος. Το τρίτο και τέταρτο δηλώνουν πρόβλημα σε μετρητή. Το τρίτο δηλώνει ότι η είσοδος είναι εκτός ορίων. Το τέταρτο δηλώνει ότι υπάρχει κάποιο άλλο πρόβλημα. Το πέμπτο και έκτο δηλώνουν πρόβλημα με τον ορισμό των μονάδων βάσης. Το τέταρτο δηλώνει ότι δεν έχουν δηλωθεί. Το πέμπτο δηλώνει ότι έχουν δηλωθεί περισσότερες από μία φορές.

Επίσης, οι πληροφορίες μόνο αυτής της δομής ανανεώνονται μόνο όταν υπάρξει αλλαγή κάποιας τιμής. Δεν ισχύει το ίδιο για τις υπόλοιπες δομές δεδομένων καθιστώντας τες ακατάλληλες για εμφάνιση στο HMI.

Οι πληροφορίες για την οθόνη του HMI υπολογίζονται από τη συνάρτηση “SCADA Calculation” και τίθενται στη “SCADA information”. Οι οθόνες που παρακολουθούν τους υποσταθμούς αφορούν τις μετρήσεις, ενώ οι οθόνες του κέντρου ελέγχου αφορούν την εκτίμηση κατάστασης του

δικτύου. Ως εκ τούτου, η συνάρτηση “SCADA Calculation” χρησιμοποιεί τα δεδομένα από τη δομή “Measured state” αντί από τη δομή “Estimated state”. Επομένως, εμφανίζει τις μετρήσεις πριν αυτές υποστούν επεξεργασία.

6.2.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων και αποστολή στο κέντρο ελέγχου

Το πρόγραμμα του υποσταθμού υπολογίζει την κατάσταση των διασυνδεδετικών κόμβων και αποστέλλει τα αποτελέσματα στο κέντρο ελέγχου. Υπολογίζονται για κάθε διασυνδεδετικό κόμβο τα εξής μεγέθη:

- η τάση
- η εξερχόμενη ροή ενεργού ισχύος
- η έγχυση ενεργού ισχύος, η οποία εισέρχεται στη συνεκτική συνιστώσα που ανήκει ο διασυνδεδετικός κόμβος
- η εξερχόμενη ροή άεργου ισχύος
- η έγχυση άεργου ισχύος, η οποία εισέρχεται στη συνεκτική συνιστώσα που ανήκει ο διασυνδεδετικός κόμβος

Επίσης, για κάθε μέγεθος υπολογίζονται τα εξής:

- αν το μέγεθος είναι γνωστό
- η τιμή
- το σφάλμα

Επιπλέον υπολογίζεται η τοπολογία, δηλαδή ποιοί διασυνδεδετικοί κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους. Οι αλγόριθμοι αυτών των υπολογισμών αναλύονται στο κεφάλαιο 4.2 και εκτελούνται από τη συνάρτηση “Interconnection and injection nodes state estimation”.

Μετά τον υπολογισμό οι πληροφορίες τοποθετούνται στη δομή δεδομένων Sent Data από τη συνάρτηση “Send”. Η παραλαβή των δεδομένων από τη δομή DB1 γίνεται από το κέντρο ελέγχου. Για να γίνει ορθά η αποστολή των δεδομένων πρέπει:

- Η δομή Sent Data να έχει δείκτη DB1.
- Να επιτρέπεται η πρόσβαση από μέθοδο GET.
- Να μην είναι ενεργοποιημένη η επιλογή βέλτιστης πρόσβασης.

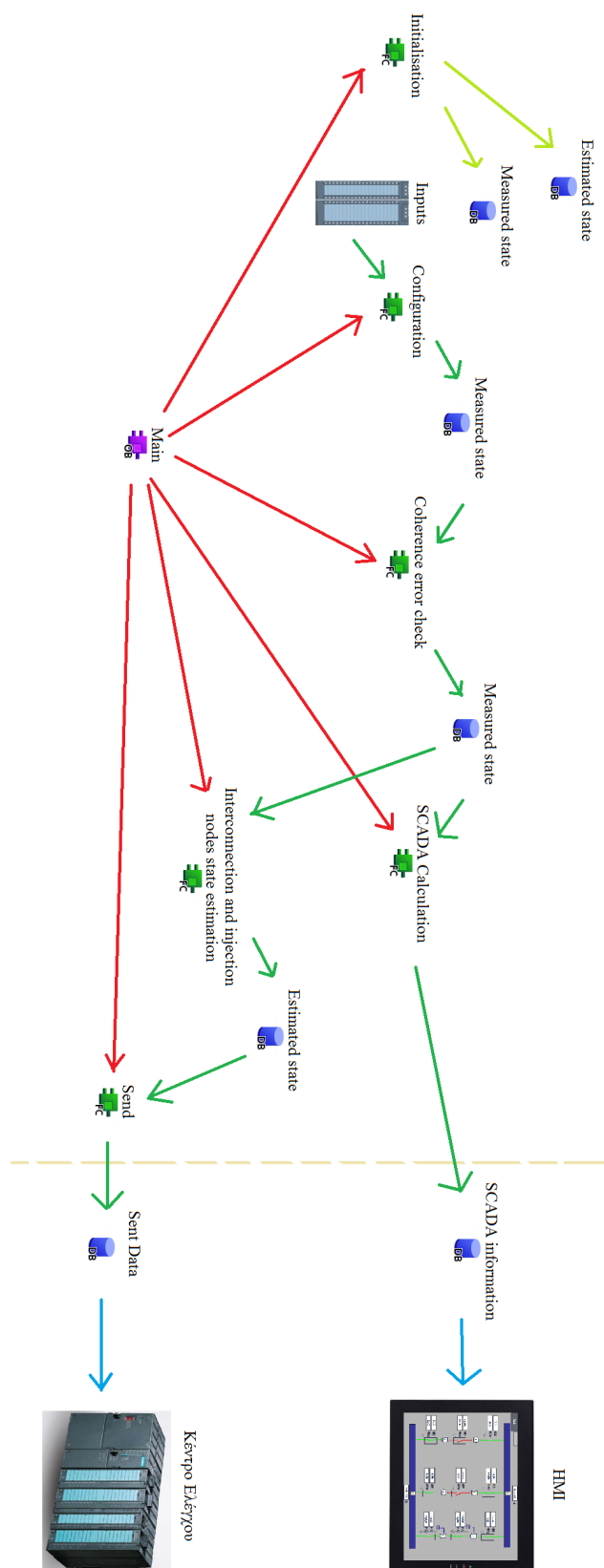
Σε διαφορετική περίπτωση η αποστολή δεδομένων ενδέχεται να αποτύχει, ή να σταλούν εσφαλμένα δεδομένα.

6.3 Πρόγραμμα κέντρου ελέγχου

Το κέντρο ελέγχου παραλαμβάνει τα δεδομένα από τους υποσταθμούς και τα θέτει σε μια ενιαία βάση δεδομένων, την “State data”. Επίσης, έχει αναπτυχθεί υποπρόγραμμα εκτίμησης της κατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου. Η εκτίμηση τίθεται στη δομή δεδομένων “SCADA”. Για την ορθή λειτουργία του το κέντρο ελέγχου αντλεί δεδομένα από τρεις πηγές:

- Το τμήμα κώδικα “Configuration”.
- Τους άλλους υποσταθμούς.

Το τμήμα “Configuration” ρυθμίζει με ποιόν τρόπο το κέντρο ελέγχου λαμβάνει δεδομένα από τους υποσταθμούς.



Σχήμα 6.2: Σχεδιάγραμμα του λογισμικού των υποσταθμών. Τα κόκκινα βέλη δηλώνουν κλήση, τα πράσινα βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εντός του PLC του υποσταθμού, τα μπλε βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εκτός PLC.

6.3.1 Δομές δεδομένων του κέντρου ελέγχου

Οι δομές δεδομένων που υπάρχουν στο κέντρο ελέγχου είναι:

- “Configuration data”: Περιέχει σφάλματα και τα χαρακτηριστικά των υποσταθμών, όπως ποιοί κόμβοι ανήκουν σε έναν υποσταθμό.
- “State data”: Περιέχει τα γνωστά στοιχεία του ηλεκτρικού δικτύου, όπως η τοπολογία, οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς και τη μήτρα μετρήσεων. Αναλύεται παρακάτω.
- “Recieved Data”: Η δομή δεδομένων που λαμβάνει τα δεδομένα από τους υποσταθμούς.
- “Substation data”: Η δομή στην οποία αποθηκεύονται προσωρινά τα δεδομένα των υποσταθμών πριν τη μετάφραση κόμβων.
- “Estimation Data”: Περιέχει το διάνυμα κατάστασης που έχει εκτιμηθεί.
- “SCADA”: Περιέχει τις πληροφορίες παρακολούθησης, αναλύεται παρακάτω.

6.3.2 Τμήμα κώδικα “Configuration”

Σε αυτό το τμήμα του κώδικα ορίζονται:

- Οι διασυνδεδετικοί κόμβοι των υποσταθμών.
- Τα χαρακτηριστικά του μοντέλου “Π” των γραμμών μεταφοράς.
- Γνωστές εγχύσεις και ροές ισχύος.

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για τη δήλωση των παραπάνω είναι:

- “Define substation”
- “Define impedance”
- “Define measurement”

Η συνάρτηση “Define substation” ορίζει τα χαρακτηριστικά ενός υποσταθμού. Ορίζει τους κόμβους που ανήκουν στον υποσταθμό, τη διεύθυνση σύνδεσης και τη τάση βάσης. Η αρίθμηση των κόμβων ενός υποσταθμού είναι διαδοχικά νούμερα. Έτσι αρκεί η διευκρίνιση του μικρότερου νούμερου και του πλήθους των διασυνδεδετικών κόμβων του υποσταθμού. Επίσης, ελέγχεται αν τα νούμερα αυτά δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για άλλους κόμβους.

Η διεύθυνση σύνδεσης προσδιορίζεται από το Υλικό. Η διεύθυνση σύνδεσης είναι το ID του κέντρου ελέγχου της αντίστοιχης σύνδεσης υποσταθμού-κέντρου ελέγχου. Χρειάζεται προσοχή, γιατί συνήθως το υλικό την εμφανίζει σε δεκαεξαδική μορφή. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτείται το πρόθεμα W#16# για να γίνει ορθά η ρύθμιση.

Η τάση βάσης προσδιορίζεται από τους μετασχηματιστές. Θεωρείται ότι η τάση βάσης είναι αμετάβλητη κατά την εκτέλεση του προγράμματος και γνωστή από το κέντρο ελέγχου. Η τάση βάσης ορίζεται σε V.

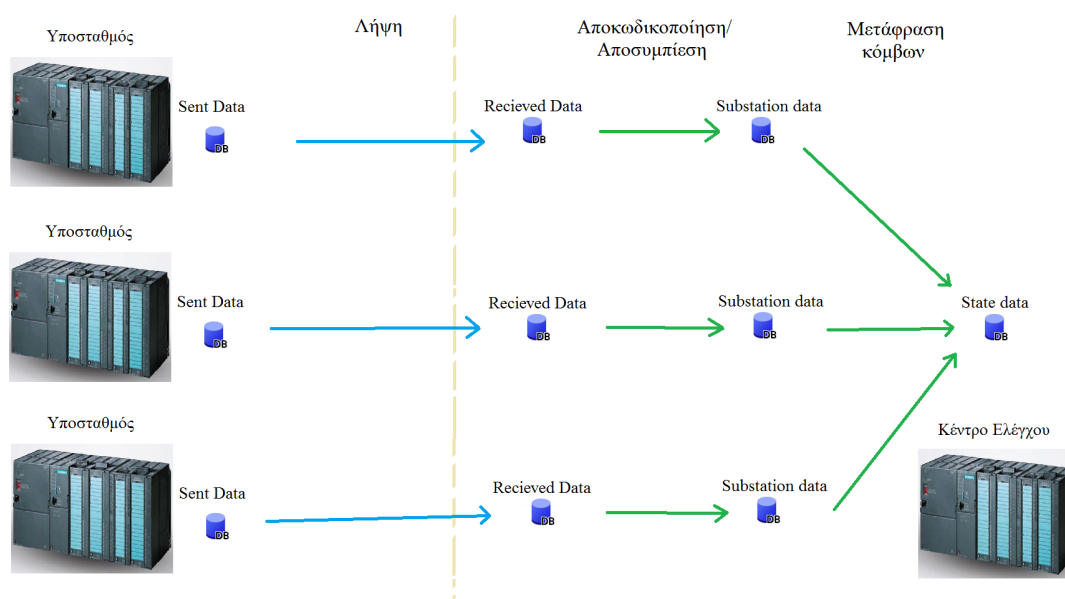
Η συνάρτηση “Define impedance” ορίζει τα χαρακτηριστικά του μοντέλου “Π” των γραμμών μεταφοράς. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η κατά μήκος ωμική αντίσταση, η κατά μήκος επαγωγική αντίσταση, η εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα και η εγκάρσια χωρητική αγωγιμότητα. Επίσης συμπεριλαμβάνει και τη σύνθετη αντίδραση στοιχείων που παρεμβάλλονται μεταξύ γραμμών μεταφοράς και ζυγών, όπως μετασχηματιστές. Οι μονάδες είναι στο ανά μονάδα σύστημα.

Η συνάρτηση “Define measurement” ορίζει μια γνωστή έγχυση ή ροή ισχύος ή τάση. Ο τύπος της μέτρησης μπορεί να είναι:

- “voltage” (τάση)
- “active flow” (ενεργός ισχύς)
- “inactive flow” (άεργος ισχύς)

Αν η μέτρηση αφορά διαφορετικούς κόμβους, τότε πρόκειται για ροή ισχύος από τον “from node” στον “to node”. Η μέτρηση τάσης δεν μπορεί να αναφέρεται σε διαφορετικούς κόμβους. Αν η μέτρηση αφορά τους ίδιους κόμβους και ισχύ, τότε πρόκειται για έγχυση ισχύος. Δεν επιτρέπεται να ορίζεται μέτρηση για υποσταθμό. Οι μονάδες είναι στο ανά μονάδα σύστημα.

6.3.3 Λήψη δεδομένων



Σχήμα 6.3: Παραλαβή, αποκωδικοποίηση και ενσωμάτωση των δεδομένων από τους υποσταθμούς στο κέντρο ελέγχου. Στην εικόνα φαίνεται ότι υπάρχουν διαφορετικά στιγμιότυπα των δομών “Recieved data” και “Substation data” ανά υποσταθμό.

Η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται περισσότερο κατανοητή από το μοντέλο “αφήνω-παίρνω” παρά από το μοντέλο “πέμπω-λαμβάνω”. Ο κάθε υποσταθμός θέτει τα δεδομένα του συμπιεσμένα στη δομή του με δείκτη DB1. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει τα δεδομένα του υποσταθμού στη δικιά του δομή με δείκτη DB1. Η δομή αυτή πρέπει να είναι η δομή δεδομένων “Recieved Data”. Η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται με κλήση της έτοιμης συνάρτησης GET_DB από το κέντρο ελέγχου. Η συνάρτηση GET_DB δημιουργεί ένα αντίγραφο της DB1 του υποσταθμού στη DB1 του κέντρου ελέγχου. Αν η ανταλλαγή είναι επιτυχής, το κέντρο ελέγχου αποσυμπίεζει τα δεδομένα στη “Substation data” με τη συνάρτηση “Decode substation data”. Το κέντρο ελέγχου συνεχίζει στη λήψη δεδομένων από άλλον υποσταθμό χρησιμοποιώντας ξανά τη δομή DB1. Τα δεδομένα του προηγούμενου υποσταθμού είναι πλέον ενσωματωμένα στη δομή “State data”. Μια απεικόνιση αυτής της διαδικασίας είναι στο σχήμα 6.3 .

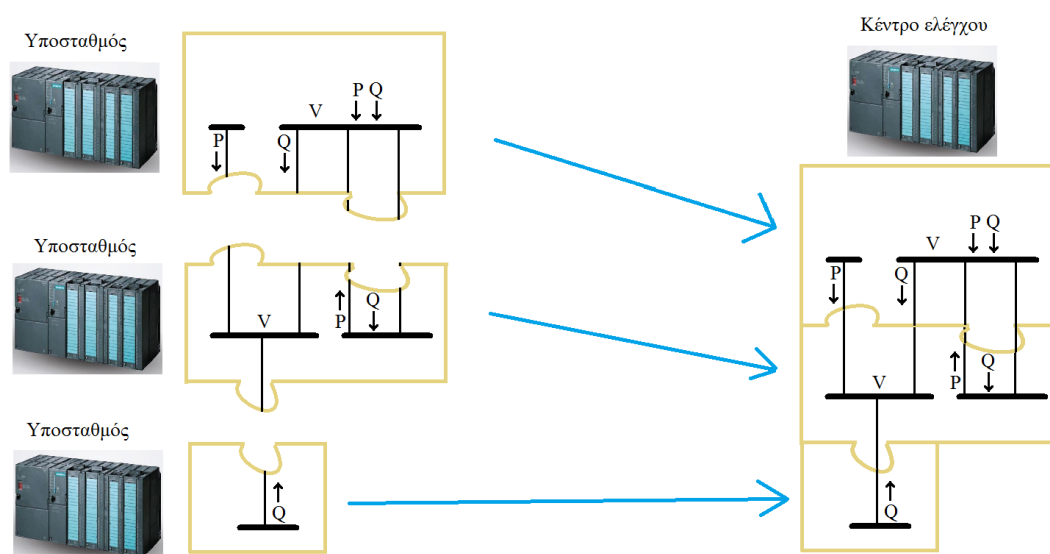
Η παραπάνω διαδικασία αποτρέπει τη διακριτή δέσμευση μνήμης για κάθε υποσταθμό. Η ίδια μνήμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλους τους υποσταθμούς. Έτσι, μειώνονται δραστικά οι απαιτήσεις μνήμης, ενώ αυξάνεται ο αριθμός των υποσταθμών που μπορούν να συνδεθούν στο κέντρο ελέγχου.

Για να λειτουργήσει ορθά η παραλαβή δεδομένων πρέπει:

- Να πληρούνται οι αντίστοιχες προϋποθέσεις στους υποσταθμούς.
- Να είναι απενεργοποιημένη η επιλογή βέλτιστης πρόσβασης στη δομή DB1.
- Η δομή DB1 να είναι η δομή “Recieved Data”.

Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει διαδοχικά τα δεδομένα από όλους τους υποσταθμούς και ύστερα κάνει την εκτίμηση. Η παραλαβή των δεδομένων μπορεί να χρειαστεί περισσότερους από έναν κύκλο. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει δεδομένα το πολύ για 8 διασυνδεδετικούς κόμβους ανά υποσταθμό.

6.3.4 Μετάφραση κόμβων



Σχήμα 6.4: Η μετάφραση κόμβων προσδιορίζει πού πρέπει να μπει το κάθε κομμάτι, για να σχηματιστεί η συνολική εικόνα του δικτύου.

Το πρόγραμμα του υποσταθμού αναφέρεται στους κόμβους του με αρίθμηση. Παρομοίως, το πρόγραμμα του κέντρου ελέγχου αναφέρεται στους κόμβους του δικτύου με αρίθμηση. Κάποιοι κόμβοι είναι εμφανείς τόσο στο κέντρο ελέγχου όσο και σε κάποιον υποσταθμό. Αν το νούμερο κάθε τέτοιου κόμβου ήταν ίδιο στο κέντρο ελέγχου και στον υποσταθμό, τότε θα ήταν αναγκαίο όλα τα προγράμματα ακολουθούν μια ενιαία σύμβαση αρίθμησης. Μια τέτοια σύμβαση θα έκανε τα πρόγραμμα ευάλωτα σε λάθη, ενώ θα δυσκόλευε δραστικά την αναφορά σε κόμβους. Για αυτό ο κάθε υποσταθμός και το κέντρο ελέγχου διατηρούν τη δικιά τους αρίθμηση κόμβων. Ωστόσο, αυτό οδηγεί στη μετάφραση κόμβων.

Μετάφραση κόμβων είναι η μετατροπή της αρίθμησης των κόμβων του υποσταθμού στην καθολική αρίθμηση του κέντρου ελέγχου. Η μετάφραση κόμβων μοιάζει με την επίλυση ενός παζλ (σχήμα 6.4). Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει από κάθε υποσταθμό ένα κομμάτι του δικτύου, η μετάφραση κόμβων προσδιορίζει πού θα μπει το κάθε κομμάτι, ώστε να σχηματιστεί η συνολική εικόνα του δικτύου. Για να λειτουργήσει ορθά η μετάφραση πρέπει η διαδοχή των κόμβων να είναι ίδια στον υποσταθμό και το κέντρο ελέγχου. Επιπλέον, το κέντρο ελέγχου πρέπει να γνωρίζει πόσους κόμβους αφορούν οι πληροφορίες που λαμβάνει από κάθε υποσταθμό.

Μετά τη λήψη τα δεδομένα έχουν αποσυμπίεστεί στη δομή “Substation data”. Η μετάφραση κόμβων γίνεται από τη συνάρτηση “Translate substation data and measurement definer”. Αυτή η συνάρτηση ενημερώνει τη δομή δεδομένων “State data”.

Η μετάφραση κόμβων είναι η συμβολή του κέντρου ελέγχου στον υπολογισμό της τοπολογίας του δικτύου και ολοκληρώνει αυτόν τον υπολογισμό.

6.3.5 Δομή δεδομένων “State data”

Μετά την παραλαβή όλων των δεδομένων από τους υποσταθμούς αυτά είναι οργανωμένα στη δομή δεδομένων “State data”. Τα πεδία αυτής της δομής είναι:

- “number of nodes”: Το πλήθος των κόμβων του ηλεκτρικού δικτύου.
- “connected components”: Οι συνεκτικές συνιστώσες του δικτύου.
- “measurements”: Οι μετρήσεις στο ανά μονάδα σύστημα. Αν ο κόμβος δε συμμετέχει στο δίκτυο είναι 0.
- “standard deviations”: Οι τυπικές αποκλίσεις στο ανά μονάδα σύστημα.
- “type of measurement”: Τα είδη των μετρήσεων. Η κωδικοποίηση γίνεται με αριθμούς. Το 1 είναι ενεργός ισχύς, 2 η άεργος ισχύς, 3 η τάση και 4 η γωνία.
- “nodes of measurement”: Οι κόμβοι των μετρήσεων. Το στοιχείο nodes of measurement[i,1] είναι ο κόμβος αναχώρησης, ενώ nodes of measurement[i,2] ο κόμβος άφιξης.
- “number of measurements”: Το πλήθος των μετρήσεων.

Όλα τα μεγέθη είναι στο ανά μονάδα σύστημα. Η δομή αυτή είναι πλήρως συμπληρωμένη μετά την εκτέλεση του προγράμματος. Αν είναι επιθυμητή η παραλαβή δεδομένων πρέπει να γίνει πριν την ολοκλήρωση του κύκλου.

6.3.6 Εκτίμηση

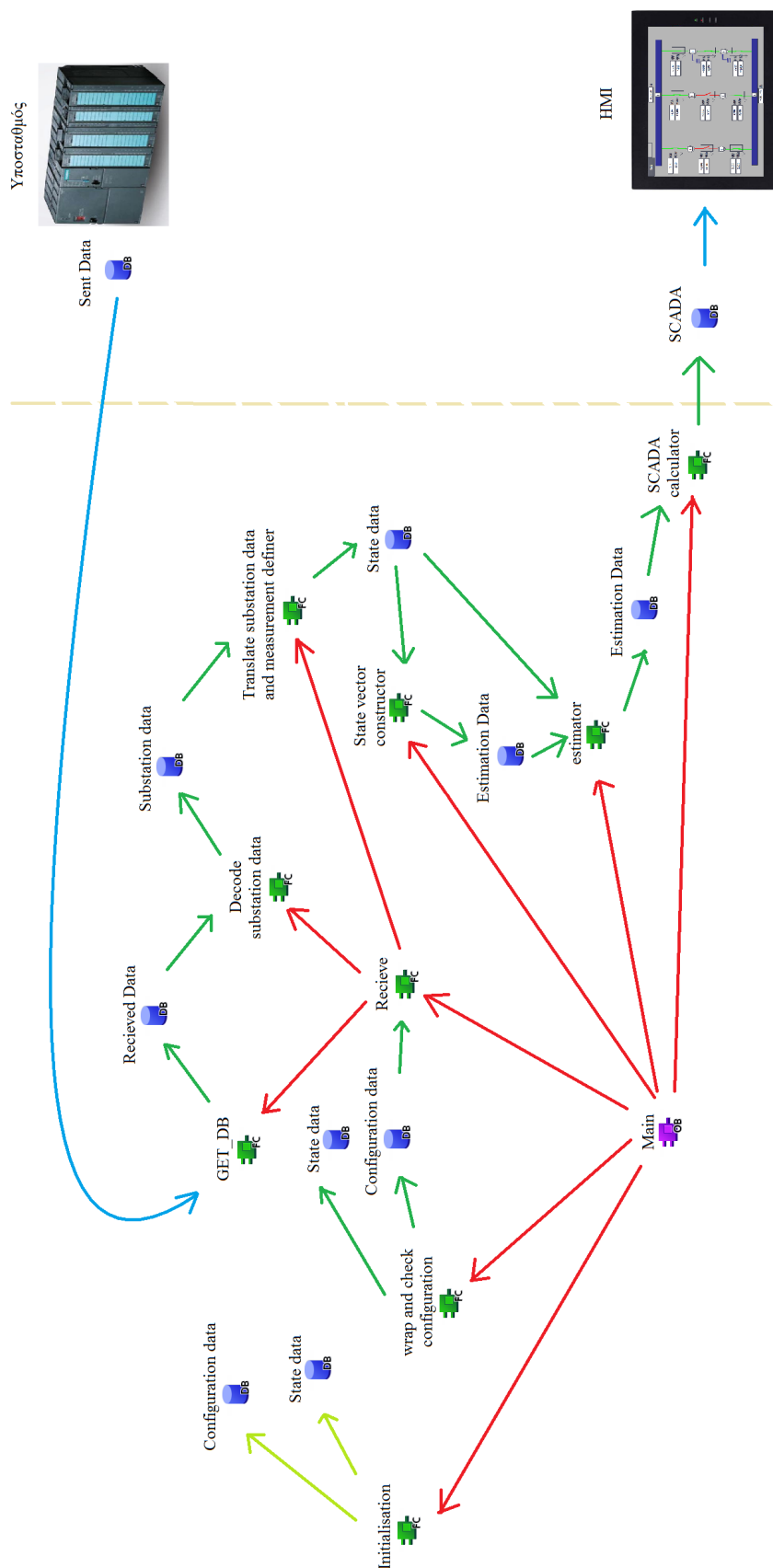
Είναι δυνατό να ληφθούν τα δεδομένα από τη δομή “State data” για εκτίμηση από άλλο λογισμικό. Αν για εποπτεία του δικτύου είναι επιθυμητή η χρήση του ελεγκτή του κέντρου ελέγχου, τότε πρέπει ο εκτιμητής να θέσει τα αποτελέσματα στη δομή “SCADA”. Έχει αναπτυχθεί ένας εκτιμητής για αυτό το σκοπό, η συνάρτηση estimator(), η οποία εκτελεί την εκτίμηση με βάση την επαναληπτική εξίσωση που αναλύεται στο κεφάλαιο 4.

Η συνάρτηση estimator εκτιμά τις τάσεις των κόμβων κατά μέτρο και γωνία, οι οποίες τίθενται στην “Estimated data”. Σε έναν κόμβο, τον κόμβο αναφοράς, η γωνία θεωρείται 0. Ο κόμβος αναφοράς επιλέγεται τυχαία. Η εκτίμηση των ροών ισχύος γίνεται από τη συνάρτηση “SCADA calculator” με βάση τις εκτιμήσεις των τάσεων. Ο εκτιμητής υπολογίζει αποτέλεσμα υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι παρατηρήσιμο [Kor, σελ. 1].

6.3.7 Δομή δεδομένων SCADA

Η δομή αυτή περιέχει όλες τις πληροφορίες που έχουν εκτιμηθεί, τάσεις, ροές και εγχύσεις ισχύος. Τα πεδία της είναι:

- angles: γωνίες
- voltages: τάσεις



Σχήμα 6.5: Σχεδιάγραμμα του λογισμικού του κέντρου ελέγχου. Τα κόκκινα βέλη δηλώνουν κλήση, τα πράσινα βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εντός του PLC του υποσταθμού, τα μπλε βέλη δηλώνουν ροή δεδομένων εκτός PLC.

- active flows: ροές ενεργού ισχύος
- inactive flows: ροές άεργου ισχύος
- active node flows: εγχύσεις ενεργού ισχύος
- inactive node flows: εγχύσεις άεργου ισχύος
- connected components: συνεκτικές συνιστώσες
- processing flash: Κωδικός κατάστασης του προγράμματος. Το 1 και το 2 σημαίνουν ότι εκτελεί επαναλήψεις του αλγορίθμου σύγκλισης. Το 0 σημαίνει ότι ασχολείται με κάτι άλλο, πιθανώς παραλαβή δεδομένων.
- number of loops: Πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου εκτίμησης.

Τα αποτελέσματα στη δομή SCADA είναι σε φυσικές μονάδες. Οι μονάδες μετρήσεις έχουν οριστεί στις εξής μεταβλητές: “Configuration data”. “voltage bases” (υπενθυμίζεται ότι ορίζεται κατά τη δήλωση των υποσταθμών στο “Configuration”) “Configuration data”. “power base” Έχουν προεπιλεγεί οι εξής τιμές: Για την τάση 150kV. Για την ισχύ 7,5MVA.

6.4 Διεπιφάνεια ανθρώπου μηχανής

Δυστυχώς, η δημιουργία της διεπαφής με την τεχνολογία SIEMENS που χρησιμοποιήθηκε δεν είναι τυποποιημένη. Έτσι, κάθε διεπιφάνεια υποσταθμού χρειάζεται να αναπτυχθεί εκ νέου.

Οι πληροφορίες εποπτείας, δηλαδή όλες οι πληροφορίες που απαιτούνται για την εποπτεία, είναι στις δομές “SCADA information” των υποσταθμών και “SCADA” του κέντρου ελέγχου. Οι υπόλοιπες δομές υπολογίζονται ξανά από μηδενική βάση, οπότε δεν είναι κατάλληλες για χρήση στη διεπαφή. Οι πληροφορίες αυτές είναι εκτιμήσεις, μετρήσεις, καταστάσεις διακοπών, συνεκτικές συνιστώσες, καταστάσεις μετρητών, κωδικούς σφαλμάτων και χαρακτηριστικά του αλγορίθμου σύγκλισης. Όλες αυτές οι πληροφορίες είναι πληροφορίες εξόδου. Δεν υπάρχει ροή πληροφοριών από τη διεπαφή στους ελεγκτές.

6.4.1 Οργάνωση οθονών

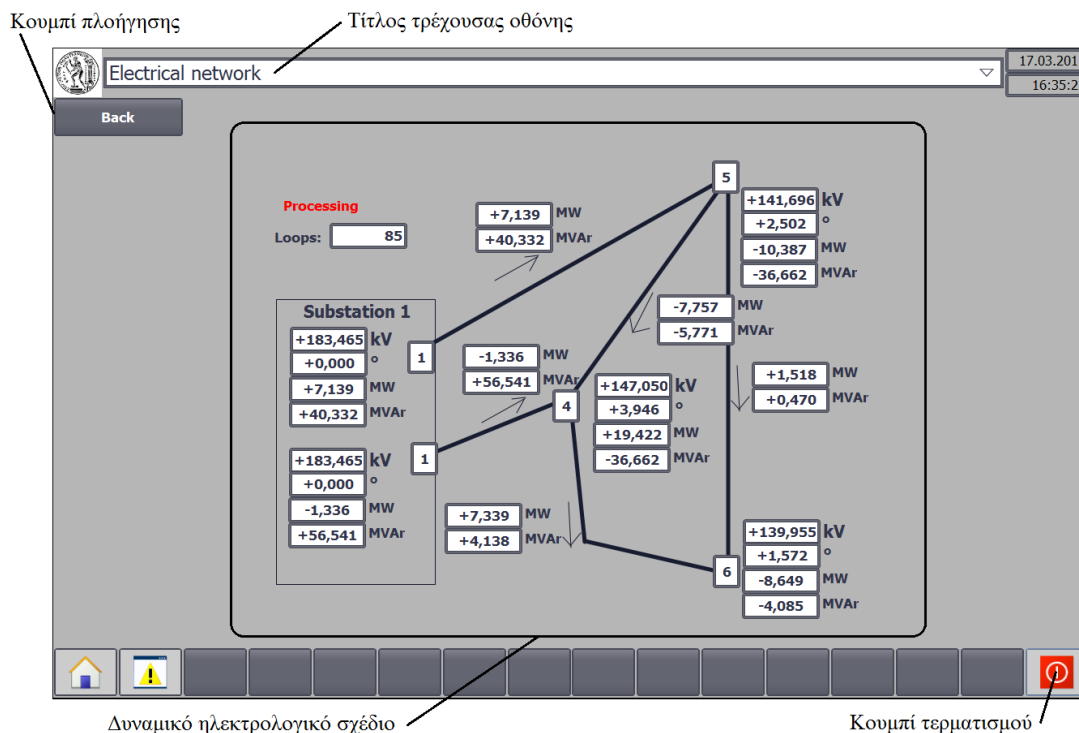
Οι παραπάνω πληροφορίες οργανώνονται σε οθόνες, μία οθόνη ανά ελεγκτή. Υπάρχει μία επιπλέον οθόνη, η αρχική, η οποία εμφανίζεται κατά την έναρξη της διεπαφής. Κάθε οθόνη περιέχει (σχήμα 6.5):

- κουμπιά που οδηγούν στις υπόλοιπες οθόνες
- πεδίο με το τίτλο της τρέχουσας οθόνης
- κουμπί τερματισμού
- δυναμικό ηλεκτρολογικό σχέδιο που απεικονίζει το αντικείμενο της οθόνης

Το ηλεκτρολογικό σχέδιο του κέντρου ελέγχου και των υποσταθμών είναι διαφορετικά.

Το σχέδιο του κέντρου ελέγχου απεικονίζει το δίκτυο. Οι κόμβοι είναι ζυγοί και κόμβοι υποσταθμών, ενώ οι ακμές είναι γραμμές μεταφοράς και ενδιάμεσα στοιχεία.

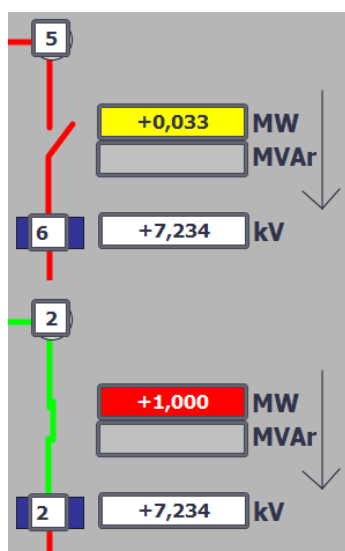
Τα σχέδια των υποσταθμών απεικονίζουν τους υποσταθμούς. Οι ακμές είναι αγωγίμες συνδέσεις μηδενικής αντίστασης.



Σχήμα 6.6: Τυπική οθόνη με επισήμανση των στοιχείων της.

6.4.2 Οθόνη υποσταθμού

Η οθόνη κάθε υποσταθμού (σχήμα 6.7) περιγράφεται από μια δομή “SCADA information” και περιέχει μετρήσεις, συνεκτικές συνιστώσες, καταστάσεις διακοπών και κωδικούς σφραλμάτων. Οι μετρήσεις και οι συνεκτικές συνιστώσες αναπαρίστανται από νόυμερα.



Σχήμα 6.7: Παραδείγματα κανονικών και μη μετρήσεων.

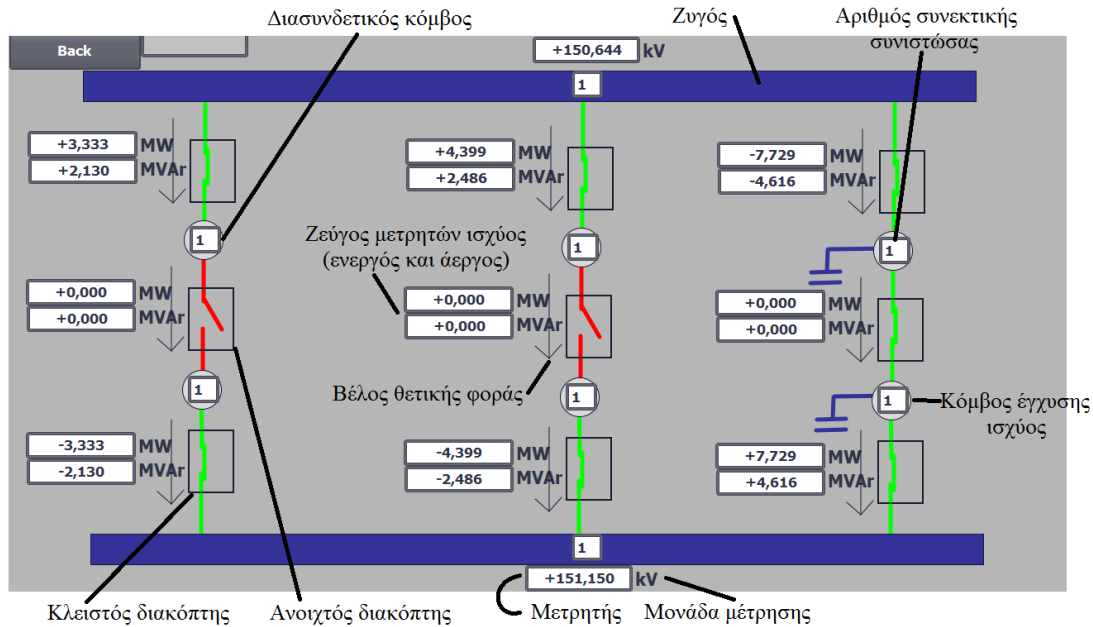
Οι διασυνδεδετικοί κόμβοι και οι κόμβοι έγχυσης ισχύος αναπαρίστανται από ένα μικρό κυκλάκι. Οι κοινοί κόμβοι αναπαρίστανται από κυανά ορθογώνια. Σε κάθε κόμβο υπάρχει ένα αριθμητικό πεδίο που δείχνει σε ποιά συνεκτική συνιστώσα ανήκει.

Οι ακμές αναπαρίστανται μόνιμες συνδέσεις, αποζεύκτες και διακόπτες. Οι κλειστοί αποζεύκτες και διακόπτες αναπαρίστανται με πράσινο χρώμα, ενώ οι ανοιχτοί με κόκκινο. Οι διακόπτες συμβολίζονται σαν αποζεύκτες που περιβάλλονται από ορθογώνιο πλαίσιο.

Οι μετρητές αναπαρίστανται από το αριθμητικό πεδίο και δίπλα τη μονάδα μέτρησης. Η εμφάνιση του μετρητή εξαρτάται από την κατάσταση του (σχήμα 6.6). Αν ο μετρητής είναι ανενεργός ή ανύπαρκτος, τότε εμφανίζεται σαν ένα γκριζό ορθογώνιο χωρίς μέτρηση. Αν ο μετρητής λειτουργεί κανονικά η μέτρηση εμφανίζεται μαύρη σε άσπρο φόντο. Αν η μέτρηση διαφωνεί με τον αντίστοιχο διακόπτη, τότε εμφανίζεται με κίτρινο φόντο. Αν ο μετρητής παρουσιάζει σφάλμα, τότε η μέτρηση εμφανίζεται άσπρη σε κόκκινο φόντο. Κάθε μετρητής τάσης βρίσκεται δίπλα στο μετρούμενο κόμβο. Κάθε μετρητής ισχύος βρίσκεται δίπλα στη μετρούμενη ακμή, και συνοδεύεται από βέλος που δείχνει τη σύμβαση

θετικής φοράς.

Δίπλα στο κουμπί “Back” υπάρχει το πεδίο σφάλματος. Αν δεν υπάρχει σφάλμα, τότε το πεδίο έχει το χρώμα του φόντου. Αν υπάρχει “coherence error”, το οποίο είναι το πιο σοβαρό σφάλμα, τότε το πεδίο είναι κόκκινο με άσπρα γράμματα. Αν υπάρχει κάποιο άλλο σφάλμα το πεδίο είναι κίτρινο με μαύρα γράμματα. Ο κωδικός σφάλματος είναι σε δυαδική μορφή, κάθε ψηφίο αντιστοιχεί σε διαφορετικό σφάλμα.



Σχήμα 6.8: Τυπική οθόνη ενός υποσταθμού εν λειτουργία με επισήμανση των στοιχείων της.

6.4.3 Οθόνη κέντρου ελέγχου

Η οθόνη του κέντρου ελέγχου (σχήμα 6.8) περιγράφεται από τη δομή “SCADA” και περιέχει εκτιμήσεις, συνεκτικές συνιστώσες, κωδικούς σφαλμάτων και χαρακτηριστικά του αλγορίθμου σύγκλισης. Οι εκτιμήσεις και οι συνεκτικές συνιστώσες αναπαρίστανται από νούμερα.

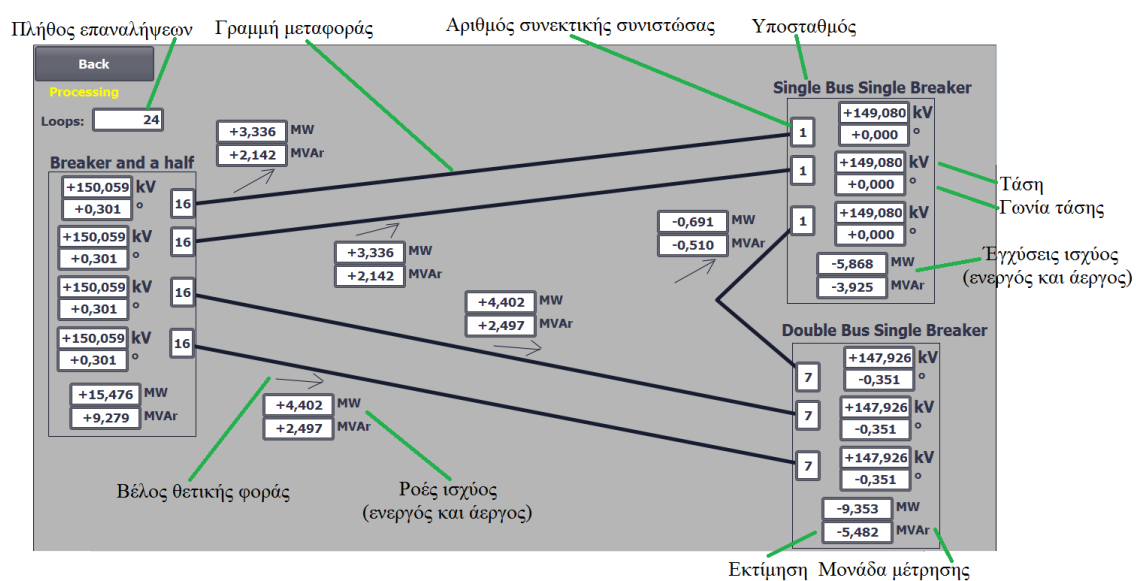
Ο κάθε υποσταθμός αναπαριστάται από ένα ορθογώνιο περίγραμμα, το οποίο περικλείει το όνομά του και τους κόμβους του. Σε κάθε κόμβο υπάρχει ένα αριθμητικό πεδίο που δείχνει σε ποιά συνεκτική συνιστώσα ανήκει.

Οι ακμές αναπαριστούν γραμμές μεταφοράς. Οι γραμμές μεταφοράς έχουν μη μηδενική αντίσταση.

Οι εκτιμήσεις αναπαρίστανται από το αριθμητικό πεδίο και δίπλα τη μονάδα μέτρησης. Οι κόμβοι συνοδεύονται από εκτίμηση τάσης, γωνίας, έγχυσης ενεργού ισχύος και έγχυσης άεργου ισχύος. Οι ακμές συνοδεύονται από εκτίμηση ροής ενεργούς ισχύος και ροής άεργου ισχύος. Οι εκτιμήσεις ροών συνοδεύονται από βέλος θετικής φοράς.

Οι κωδικοί σφάλματος είναι μηνύματα με κόκκινα γράμματα σε κίτρινο φόντο. Ένας κωδικός σφάλματος εμφανίζεται μόνο αν το αντίστοιχο σφάλμα συμβαίνει. Όλα τα μηνύματα σφάλματος είναι συγκεντρωμένα στη δεξιά πλευρά της οθόνης.

Στην οθόνη υπάρχει ένα πεδίο που δείχνει το πλήθος των επαναλήψεων του αλγορίθμου σύγκλισης. Πάνω από αυτό το πεδίο υπάρχει μια δυναμική ένδειξη. Το χρώμα της ένδειξης εναλλάσσεται ανάμεσα σε κόκκινο και κίτρινο, όταν εκτελείται ο αλγόριθμος εκτίμησης. Η ίδια ένδειξη γίνεται γκριζα όταν ο αλγόριθμος εκτίμησης έχει ολοκληρωθεί.



Σχήμα 6.9: Τυπική οθόνη ενός κέντρου ελέγχου εν λειτουργία με επισήμανση των στοιχείων της.

Κεφάλαιο 7

Διατάξεις υποσταθμών

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη σχεδίαση και την εφαρμογή των συστημάτων προστασίας, σ' ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί η διάταξη των διακοπτικών μέσων. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές διατάξεις, κάθε μια από τις οποίες έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στην αρχή θα εξετασθούν μερικές από τις πιο κοινές διατάξεις υποσταθμών και θα μελετηθούν τα χαρακτηριστικά τους.

Γενικά κάθε τύπος υποσταθμού διαθέτει διάφορα είδη εξοπλισμού όπως :

- αυτόματους διακόπτες
- αποζεύκτες
- ζυγούς
- αναχωρήσεις γραμμών και μετασχηματιστών

Από τα παραπάνω είδη, οι αυτόματοι διακόπτες αποτελούν τα μόνα ενεργά στοιχεία ενώ τα υπόλοιπα είναι παθητικά. Αυτό σημαίνει ότι οι αυτόματοι διακόπτες είναι γενικά λιγότερο αξιόπιστοι με τάση προς αποτυχία εξαιτίας της ύπαρξης μετακινούμενων μερών. Η διαθεσιμότητα των διακοπτικών διατηρείται σε γενικά υψηλό επίπεδο μέσω προγραμματισμένης διαδικασίας συντήρησης. Για το συγκεκριμένο υποσταθμό ένας διακόπτης μπορεί να τεθεί σε συντήρηση αφού πρώτα χειροκίνητα απομονωθούν οι ακροδέκτες του. Αποζεύκτες οι οποίοι συνδέονται σε σειρά με διακόπτη, δε λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς και δεν εμφανίζονται στις οθόνες.

Δεν υπάρχει κάποια βέλτιστη διάταξη διακοπών σε υποσταθμό και η διάταξη που χρησιμοποιείται για έναν δεδομένο υποσταθμό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι το σύστημα προστασίας. Είναι σημαντικό το σύστημα αυτό να είναι διαθέσιμο για επισκευή και να μην είναι υπερβολικά σύνθετο. Ένα σύστημα προστασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε διακοπτική διάταξη του υποσταθμού. Μερικά μπορεί να απαιτούν τον σκανδαλισμό πολλαπλών διακοπών με σκοπό να διορθώσει κάποια σφάλματα, αλλά αυτό δεν δημιουργεί πρόβλημα στον μηχανικό.

Ενδεικτικά έχουν τοποθετηθεί μετρητές. Σε κάθε διακόπτη έχουν τοποθετηθεί μετρητές ενεργού και άεργου ισχύος. Σε κάθε ζυγό έχει τοποθετηθεί μετρητής τάσης. Αν στην τοπολογία δεν υπάρχει ζυγός, τότε κάθε διασυνδεδεμένος κόμβος έχει μετρητή τάσης.

7.1 Διάταξη “Single Bus, Single Breaker”

Η πρώτη και απλούστερη των διατάξεων. Η διάταξη αυτή έχει σχετικά χαμηλό κόστος και είναι απλή σε υλοποίηση και εφαρμογή. Ωστόσο παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα που περιορίζουν αυτή τη σχεδίαση σε σταθμούς τηλεχειρισμού όπου η συνεχής συντήρηση μπορεί να περιοριστεί έτσι ώστε να μην θίγεται μεγάλος αριθμός καταναλωτών.

Για παράδειγμα, ο μόνος τρόπος για να συντηρηθεί ένας διακόπτης είναι να απομονωθούν οι πόλοι του και έτσι να τεθεί εκτός το φορτίο που διανέμεται από αυτόν. Βέβαια στα συστήματα Υψηλής Τάσης δεν πρέπει να θυσιάζεται η χρήση μιας γραμμής ή ενός μετασχηματιστή για τη συντήρηση και μόνο ενός διακόπτη.

Άλλη μια αδυναμία αυτής της διάταξης είναι το ότι κάθε γραμμή συνοδεύεται από έναν και μόνο διακόπτη, έτσι αν ο μηχανισμός του κολλήσει στην ανοικτή θέση δεν υπάρχει τρόπος ενεργοποίησης του κυκλώματος. Επιπρόσθετα αν ο διακόπτης αποτύχει να ανοίξει όταν υπάρξει σφάλμα στον υπό προστασία κλάδο, τότε όλοι οι διακόπτες στο ζυγό που παρέχουν δίοδο στο ρεύμα βραχυκύκλωσης πρέπει να ανοίξουν έτσι ώστε να εκκαθαριστεί το σφάλμα.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η διάταξη απαιτεί μόνο ένα διακόπτη ανά κύκλωμα, κάτι που την κάνει πολύ οικονομική.

7.2 Διάταξη “Main and Transfer”

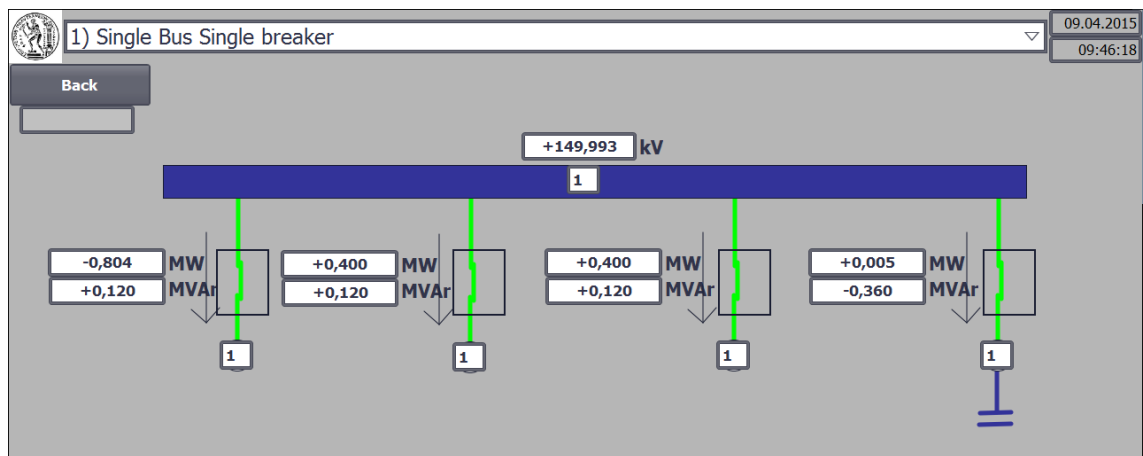
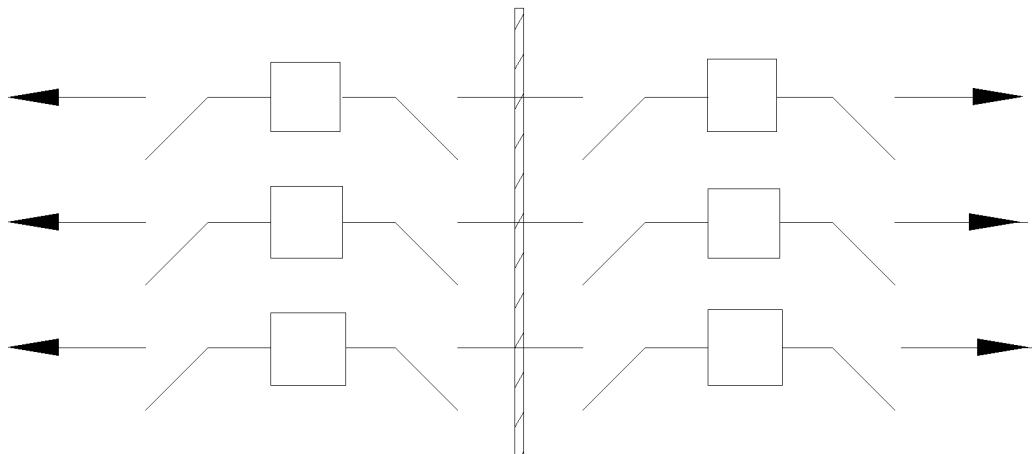
Η κανονική λειτουργία του υποσταθμού συνίσταται από την τροφοδοσία κάθε κλάδου, μέσω ενός αυτόματου διακόπτη, από τον κάτω ζυγό (main bus) με τον “bus tie” ανοικτό. Για τη συντήρηση ενός διακόπτη ο “bus tie” και ο αποζεύκτης ανάμεσα στον υπό συντήρηση αυτόματο και στον πάνω ζυγό (transfer bus) κλείνουν. Κατά τη διάρκεια της συντήρησης ο κλάδος τροφοδοτείται από τον “transfer bus” και προστατεύεται από τον “bus tie”. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι τα ακόλουθα:

- Χαμηλό αρχικό κόστος.
- Ευέλικτη λειτουργία.
- Οι διακόπτες ή τα ρελέ γραμμών μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας για συντήρηση με μια μικρή μετατροπή στην προστασία γραμμής μέσω του “bus tie”.
- Όλες οι διατάξεις δυναμικού μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον “main bus” για την διακοπή

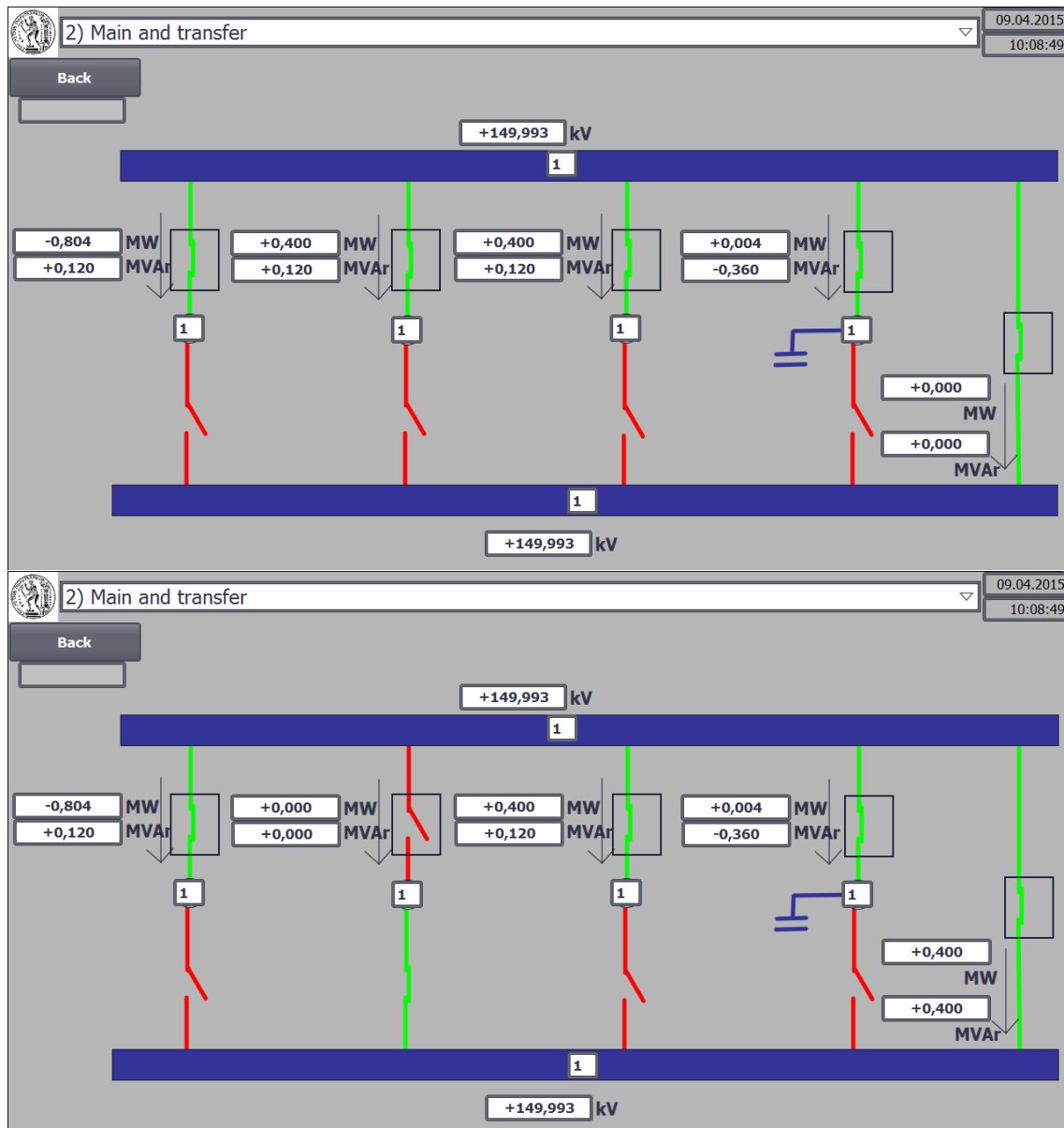
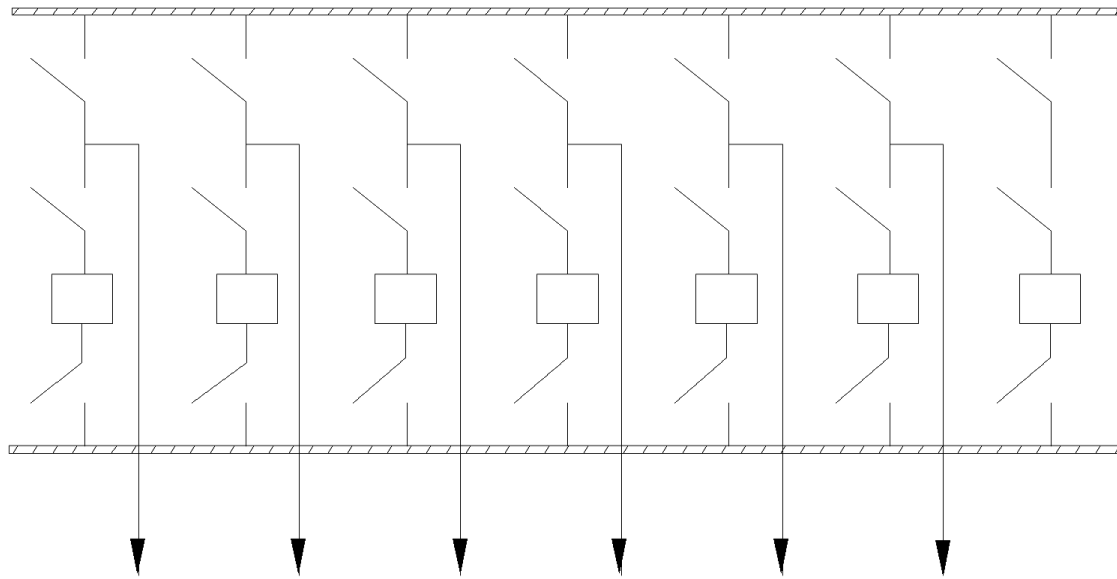
Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου υποσταθμού είναι τα ακόλουθα:

- Απαιτείται επιπλέον διακόπτης για τον “bus tie”.
- Η απόζευξη είναι σχετικά πολύπλοκη όταν κάποιος διακόπτης πρόκειται να αποκοπεί για συντήρηση.
- Η ρύθμιση της προστασίας για τον “bus tie” περιπλέκεται, αφού πρέπει να είναι σε θέση να αντικαθιστά οποιονδήποτε άλλο διακόπτη.
- Απαιτεί ξεχωριστή προστασία ζυγού για κάθε ζυγό.
- Μία αποτυχία σε κάποιο διακόπτη θέτει εκτός λειτουργίας ολόκληρο τον υποσταθμό έως ότου εκκαθαριστεί το σφάλμα.

Η συγκεκριμένη διάταξη υποσταθμού απαιτεί έναν επιπλέον διακόπτη από το συνολικό αριθμό αναχωρήσεων, κάνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης λίγο υψηλότερο από την αντίστοιχη διάταξη “Single Bus, Single breaker”, παρέχοντας ωστόσο μεγαλύτερη ευχέρεια στη συντήρηση.



Σχήμα 7.1: Τοπολογία “Single Bus, Single Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.



Σχήμα 7.2: Τοπολογία “Main and Transfer”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέση η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.

7.3 Διάταξη “Double Bus, Single Breaker”

Σε αυτή τη διάταξη χρησιμοποιούνται δύο ζυγοί και ένας διακόπτης “bus tie” που τους συνδέει. Η διαφορά σε σχέση με την προηγούμενη διάταξη συνίσταται στη σύνδεση του διακόπτη και στη χρήση ενός αποζεύκτη για γεφύρωση. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι:

- Πολύ ευέλικτη λειτουργία.
- Οι διακόπτες ή τα ρελέ γραμμών μπορούν να τεθούν εκτός λειτουργίας για συντήρηση με μια μικρή μετατροπή στο σύστημα προστασίας.
- Ακόμα και ο κύριος ζυγός μπορεί να απομονωθεί για συντήρηση.

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- Απαιτείται επιπλέον διακόπτης για τον “bus tie”.
- Για κάθε αναχώρηση χρησιμοποιούνται πέντε αποζεύκτες.
- Η διακοπή περιπλέκεται όταν ένας διακόπτης πρόκειται να συντηρηθεί.
- Η ρύθμιση προστασίας του “bus tie” είναι μια πολύ σύνθετη διαδικασία, αφού πρέπει να είναι ικανός να αντικαταστήσει οποιονδήποτε αυτόματο διακόπτη.
- Απαιτεί ξεχωριστό και πολύπλοκο σύστημα προστασίας για κάθε ζυγό.
- Χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη έκθεση σε σφάλματα ζυγών από τις προηγούμενες διατάξεις.
- Μία αποτυχία σε διακόπτη γραμμής θέτει εκτός λειτουργίας τον μισό υποσταθμό.
- Ενδεχόμενη αποτυχία του διακόπτη “bus tie” θέτει εκτός λειτουργίας ολόκληρο τον υποσταθμό έως ότου το σφάλμα εκκαθαριστεί.

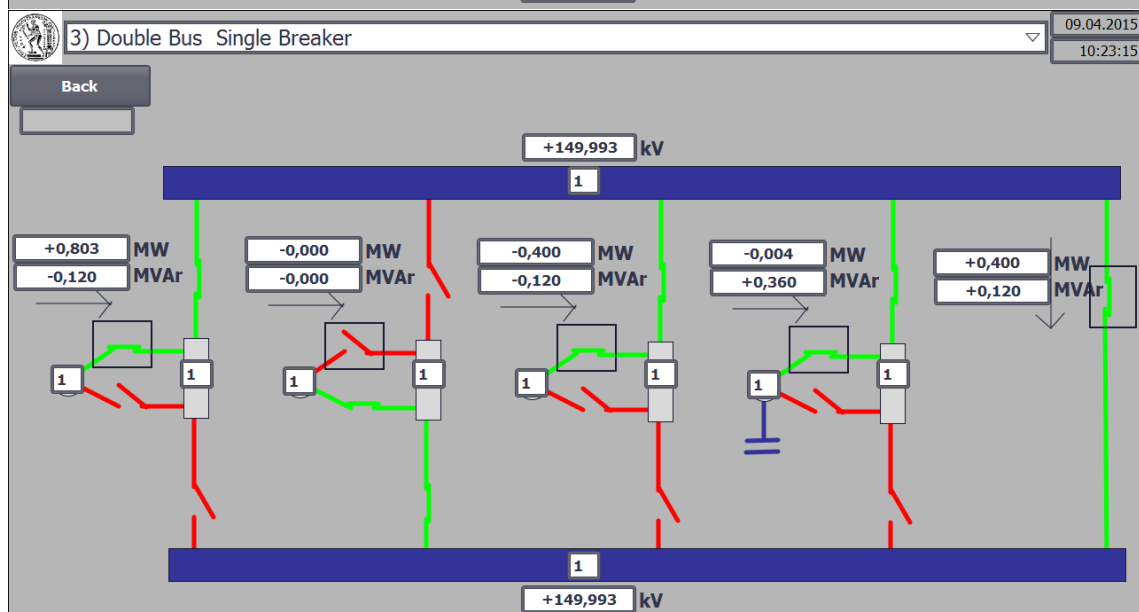
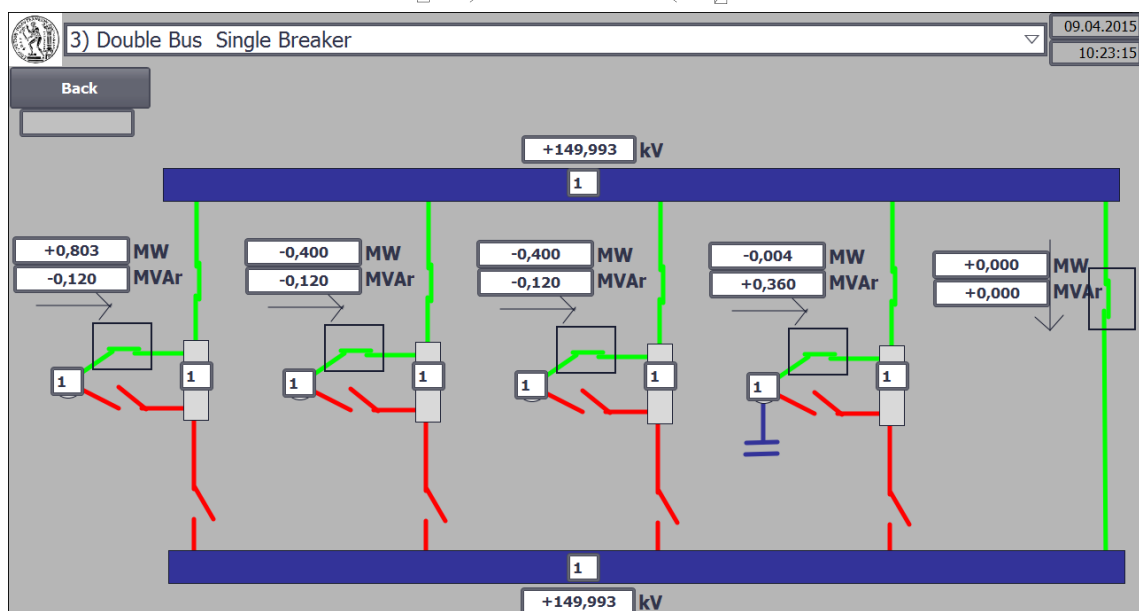
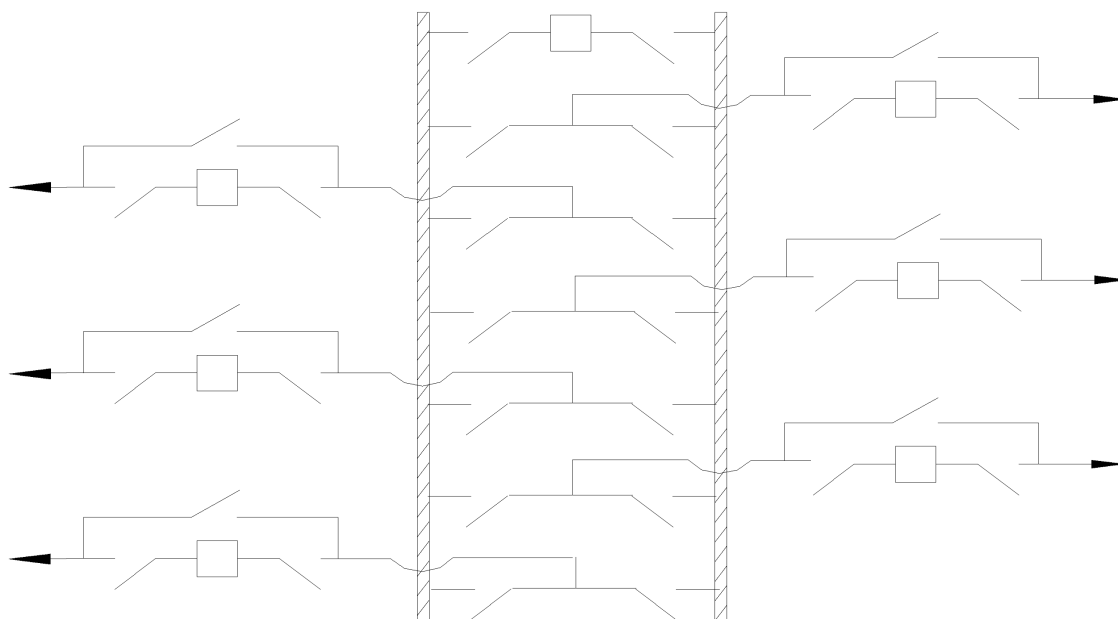
7.4 Διάταξη “Double Bus, Double Breaker”

Πρέπει να παρατηρηθεί ότι αυτή η διάταξη χρησιμοποιεί δύο αυτόματους διακόπτες για κάθε αναχώρηση, εξ ου και ο όρος “double breaker”. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης φαίνονται ακολούθως:

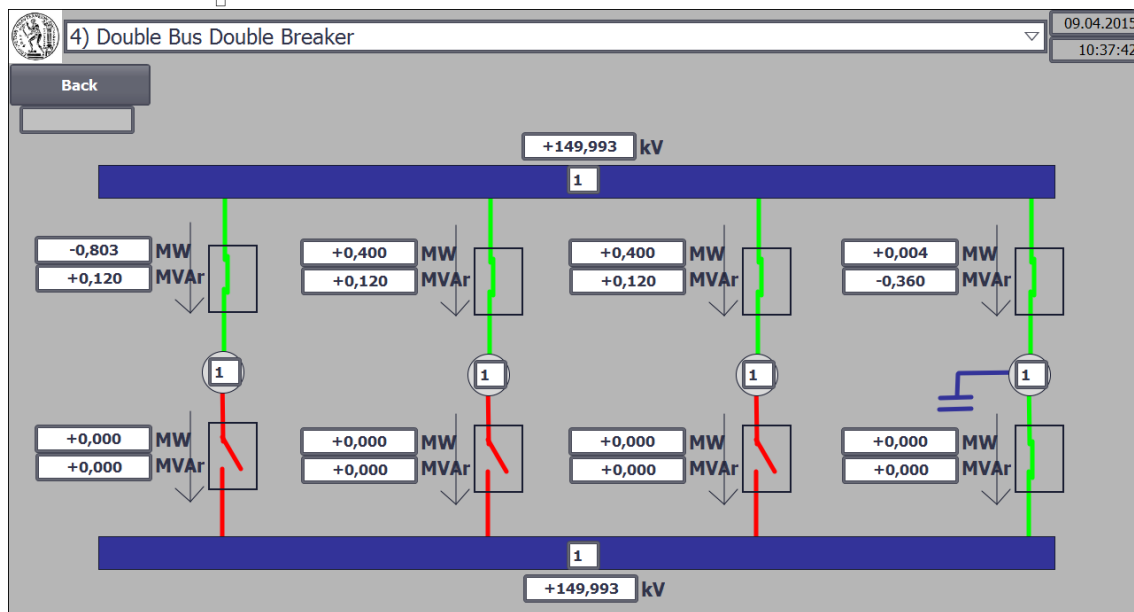
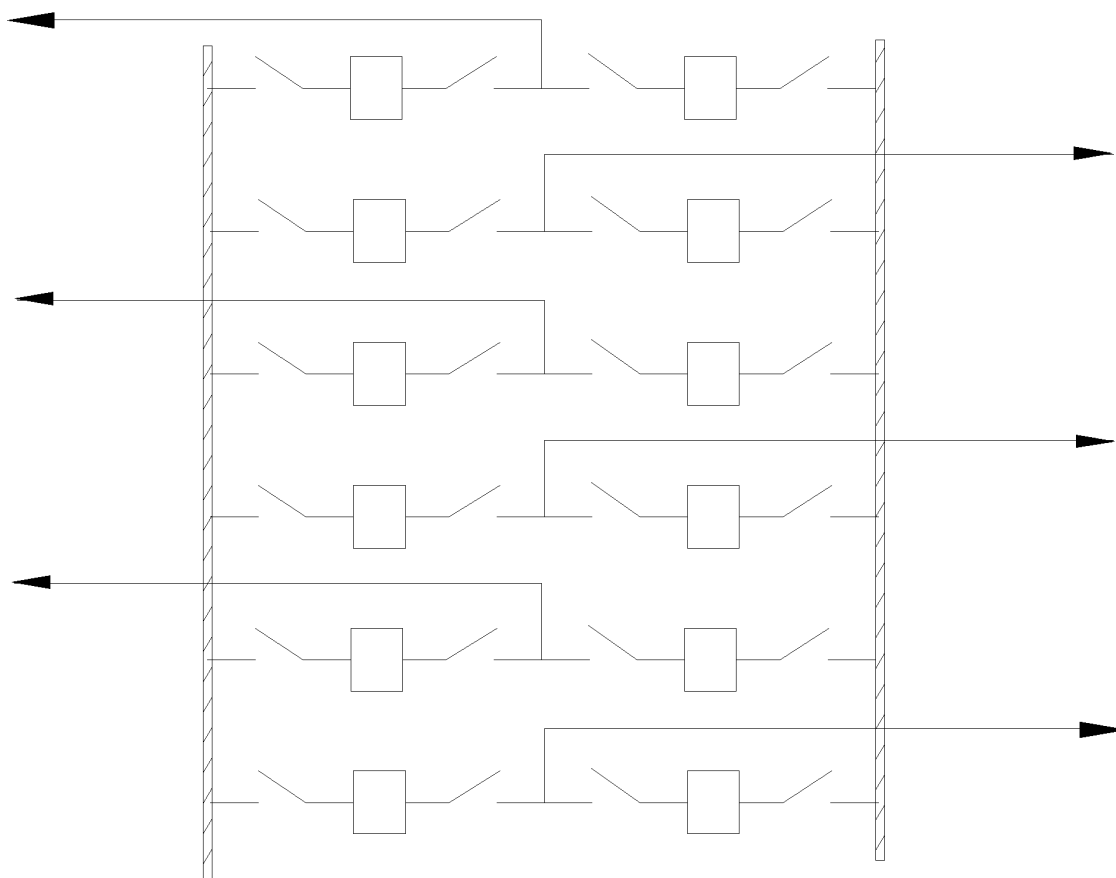
- Ευέλικτη λειτουργία.
- Μεγάλη αξιοπιστία.
- Όλοι οι χειρισμοί γίνονται με αυτόματους διακόπτες.
- Ακόμα και ο κυρίως ζυγός τίθεται εκτός λειτουργίας οποιαδήποτε στιγμή για συντήρηση.
- Κάποιο σφάλμα ζυγού δεν θέτει εκτός λειτουργίας κάποιο κύκλωμα.

Τα μειονεκτήματα αυτής της συνδεσμολογίας είναι τα ακόλουθα:

- Οι δύο διακόπτες ανά κύκλωμα εκτινάσσουν το κόστος το κόστος του υποσταθμού.
- Η ρύθμιση της προστασίας πρέπει να ενεργοποιεί δύο διακόπτες για να απομονώσουν μία εσφαλμένη γραμμή.
- Με την ενεργοποίηση δύο διακοπών για την εκκαθάριση του σφάλματος σε κάποιο κλάδο αυξάνεται η πιθανότητα αποτυχίας της επιτυχούς εκκαθάρισης.



Σχήμα 7.3: Τοπολογία “Double Bus, Single Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέσω η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.



Σχήμα 7.4: Τοπολογία “Double Bus, Double Breaker Breaker”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.

7.5 Διάταξη “Ring Bus”

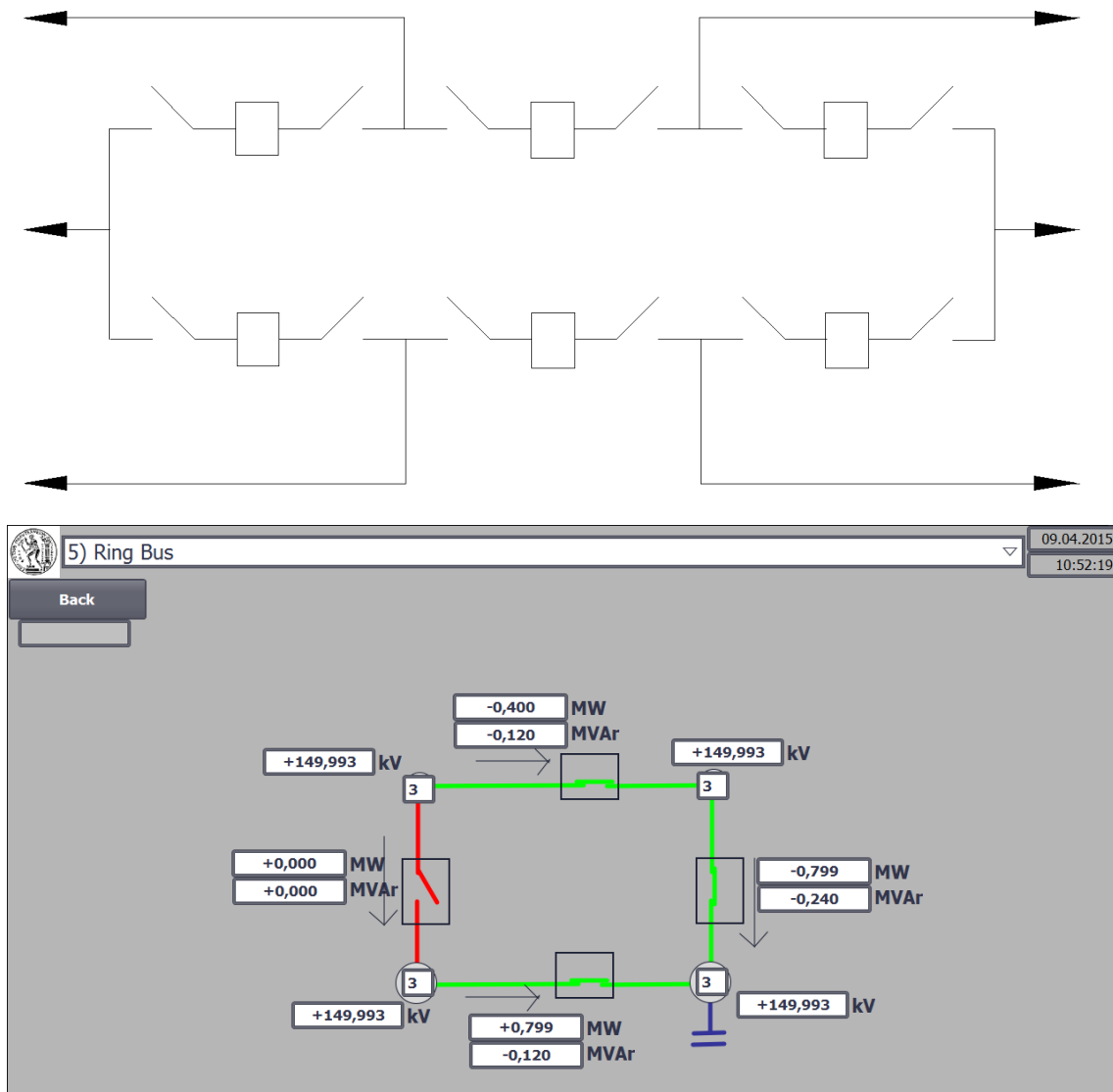
Αυτή η συνδεσμολογία χαρακτηρίζεται από το ότι αντιστοιχεί ένας διακόπτης για κάθε αναχώρηση, ενώ η τροφοδοσία της γίνεται από δύο. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι τα ακόλουθα:

- Χαμηλό κόστος.
- Ευέλικτη λειτουργία για τη συντήρηση διακοπών χωρίς να απαιτούνται διακοπές φορτίου ή πολύπλοκοι χειρισμοί.
- Δεν απαιτείται πολύπλοκο σύστημα προστασίας ζυγών.
- Απαιτείται μόνο ένας διακόπτης ανά σύνδεση.
- Η αποτυχία κάποιου διακόπτη θέτει εκτός λειτουργίας μόνο δύο κυκλώματα.
- Κάθε κύκλωμα τροφοδοτείται από δύο αυτόματους διακόπτες.
- Όλοι οι χειρισμοί γίνονται μέσω αυτόματων διακοπών.

Τα μειονεκτήματα αυτής της συνδεσμολογίας είναι τα ακόλουθα:

- Εάν συμβεί κάποιο σφάλμα κατά τη διάρκεια που κάποια γραμμή είναι εκτός λειτουργίας τότε ο δακτύλιος μπορεί να χωριστεί σε δύο μέρη.
- Η αυτόματη επανάζευξη κυκλωμάτων είναι σύνθετη.
- Εάν χρησιμοποιείται ένα ζευγάρι από ρελέ προστασίας τότε η γραμμή μεταφοράς πρέπει να αποσυνδεθεί για την συντήρηση των ρελέ.
- Απαιτούνται διατάξεις τάσεως σε όλα τα κυκλώματα αφού δεν υπάρχει συγκεκριμένο σημείο αναφοράς δυναμικού.

Η διάταξη δακτυλίου είναι οικονομική όσον αφορά τον αριθμό αυτόματων διακοπών ανά κύκλωμα. Ωστόσο τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εγκυμονούν κινδύνους όταν κάποιος διακόπτης του δακτυλίου πρέπει να συντηρηθεί. Ποιό ρίσκο είναι αποδεκτό εξαρτάται από το επίπεδο τάσης, το μέγεθος της ενέργειας που μεταφέρεται από τον υποσταθμό και την συχνότητα των διακοπών που μπορούν να συμβούν κατά τη διάρκεια της συντήρησης.



Σχήμα 7.5: Τοπολογία “Ring Bus”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.

7.6 Διάταξη “Breaker-and-a-Half”

Η επόμενη διάταξη υποσταθμού που θα μας απασχολήσει ονομάζεται “ Breaker-and-a-Half ” επειδή χρησιμοποιεί τρεις αυτόματους διακόπτες ανά δύο κυκλώματα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι τα ακόλουθα:

- Ευέλικτη και απλή λειτουργία.
- Υψηλή αξιοπιστία.
- Σε ενδεχόμενη αποτυχία ενός από τους διακόπτες τους γειτονικούς των ζυγών, μόνο ένα κύκλωμα τίθεται εκτός λειτουργίας.
- Όλοι οι χειρισμοί γίνονται με διακόπτες.
- Ακόμα και ο κύριος ζυγός μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας οποιαδήποτε στιγμή για συντήρηση.
- Ενδεχόμενο σφάλμα σε ζυγό δεν αποσυνδέει κανένα κλάδο.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι τα εξής:

- Απαιτείται 1.5 διακόπτης ανά κύκλωμα.
- Η διαδικασία προστασίας περιπλέκεται αφού ο μεσαίος διακόπτης πρέπει να αντιδρά αυτόματα και για τα δύο κυκλώματα με τα οποία σχετίζεται.
- Η αποτυχία ενός κεντρικού διακόπτη θα προκαλέσει την απώλεια μιας μη εσφαλμένης γραμμής.

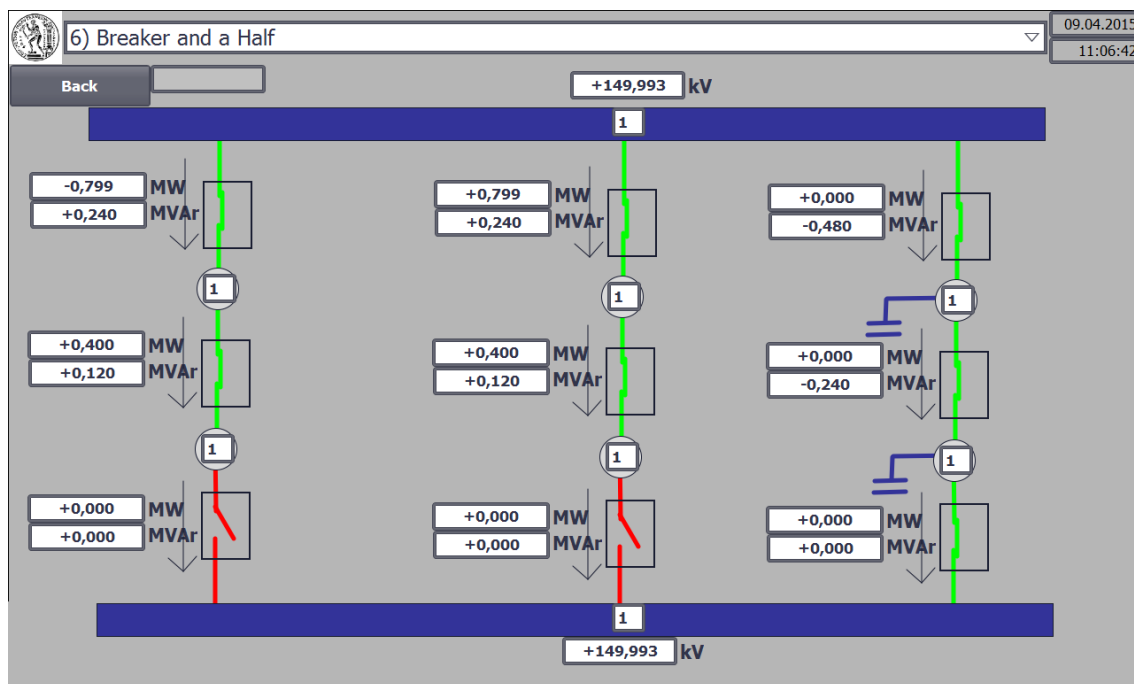
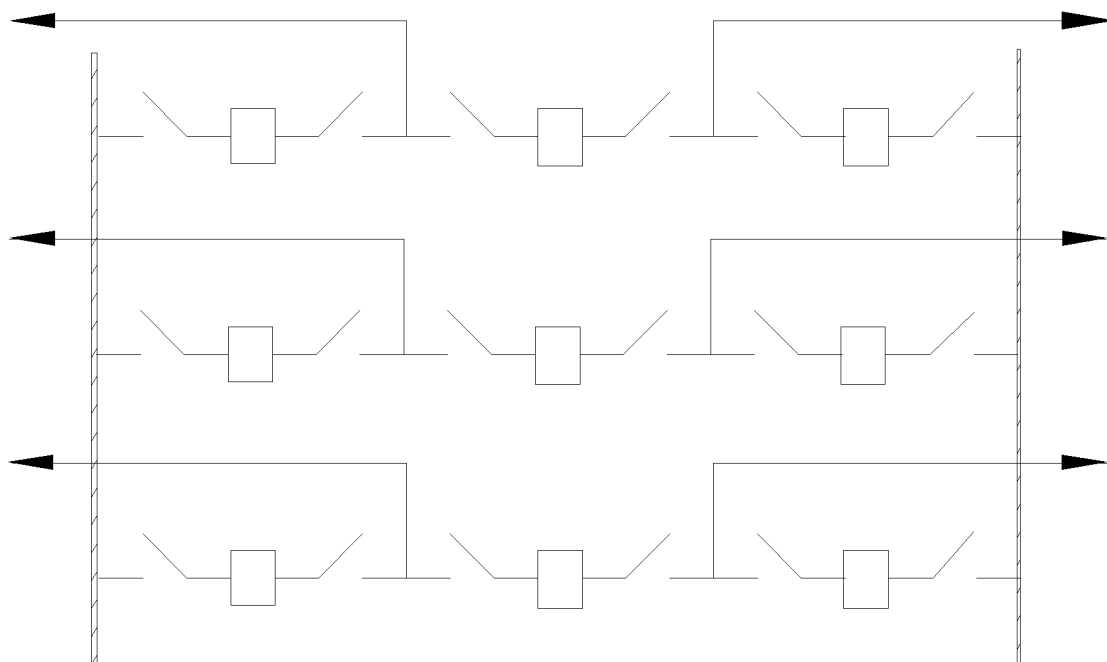
Η απαίτηση σε διακόπτες της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας είναι ενδιάμεση των πολύ ακριβών και ακριβών διατάξεων ενώ συγχρόνως εξασφαλίζει την υψηλή αξιοπιστία της διάταξης “Double Bus, Double Breaker”. Αυτοί οι παράγοντες κάνουν τη συγκεκριμένη διάταξη την πιο ευνοούμενη για τους υποσταθμούς υψηλής και υπερυψηλής τάσης.

Τα παραπάνω παριστάνουν τις πιο συνηθισμένες διακοπτικές διατάξεις και προσφέρουν ευελιξία και αξιοπιστία των διαφόρων μεγεθών. Επίσης αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο εύρος επιλογών για ευκολία επισκευής, απλότητα σε εφαρμογή διακοπών, και κόστος. Δεν αντιπροσωπεύουν επομένως τις μόνες επιλογές. Επιπρόσθετες διατάξεις υποσταθμών φαίνονται παρακάτω.

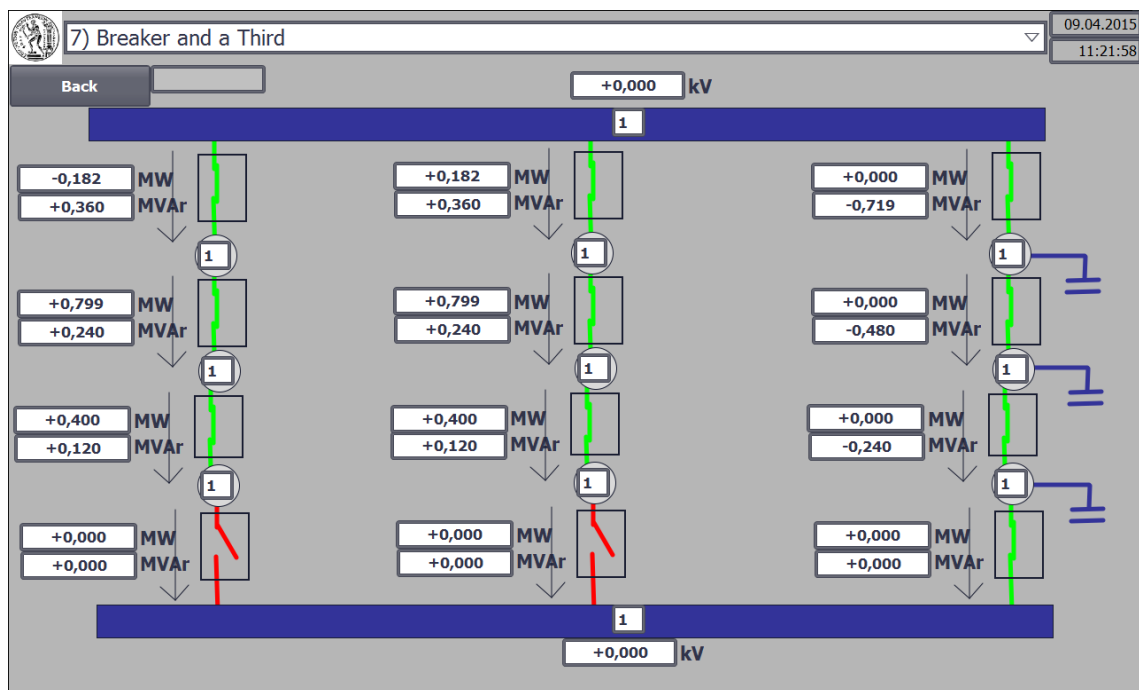
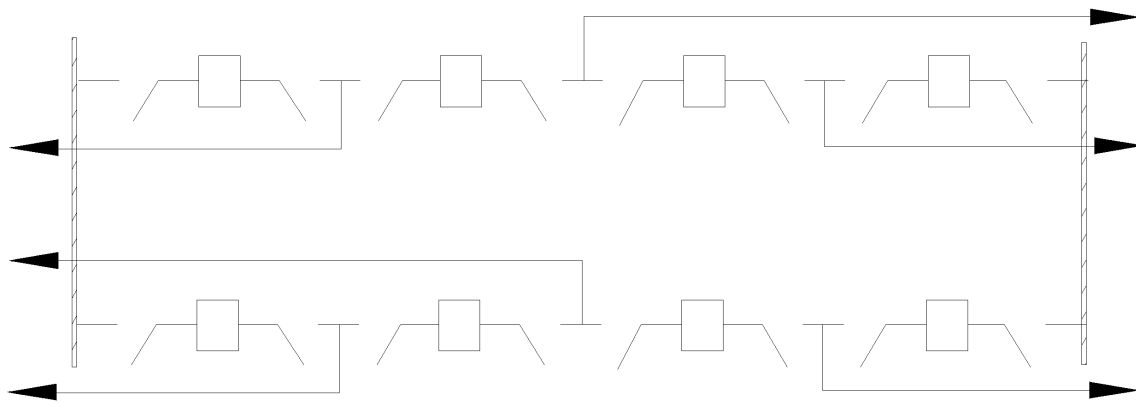
7.7 Διάταξη “Breaker and a Third”

Η διάταξη “ Breaker- and- a –Third ” είναι παρόμοια με την τοπολογία “Breaker-and-a-Half”, αλλά είναι πιο οικονομική σε ότι αφορά το κόστος διακοπών. Το παράδειγμα που φαίνεται στο σχήμα δεν είναι τυπικό, λόγω του ότι χρησιμοποιεί μόνο δυο δρόμους ανάμεσα στους ζυγούς, κάνοντας το συγκεκριμένο παράδειγμα όμοιο με αυτό του δακτυλίου. Συνήθως, η διάταξη “ Breaker-and- a –Third ” θα έχει πάνω από δυο δρόμους.

Αυτή η διάταξη έχει τα ίδια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα με την διάταξη “Breaker-and-a-Half”, αλλά έχει ένα επιπλέον μειονέκτημα. Ένας διακόπτης τοποθετημένος στο κέντρο μεταξύ δυο διακοπών θα προκαλεί πάντοτε συμπεριφορά ενός αμειψοδραστήριου κυκλώματος. Αυτό κάνει το σχέδιο λιγότερο αξιόπιστο από την διάταξη “Breaker-and-a-Half”. Ο αριθμός των διακοπών ανά σύνδεση για αυτό το σχέδιο είναι χαμηλός, κάνοντας το σχήμα οικονομικό.



Σχήμα 7.6: Τοπολογία “Breaker-and-a-Half”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.



Σχήμα 7.7: Τοπολογία “Breaker and a Third”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.

7.8 Διάταξη “Ring Tripod”

Το δακτυλιοειδές τρίποδο είναι μια από τις αρκετές διατάξεις που περιγράφονται στο κείμενο αυτό. Αυτή η διάταξη έχει ένα ικανοποιητικό δείκτη διακοπών ανά σύνδεση. Είναι ασυνήθιστο πως μερικές συνδέσεις εξυπηρετούνται καλύτερα από τρεις διακόπτες περισσότερο από έναν ή δυο διακόπτες των άλλων, πιο συνηθισμένων σχεδίων. Αυτό έχει το πλεονέκτημα πως ένας διακόπτης που αποτυγχάνει να κλείσει θα έχει πολύ χαμηλή πιθανότητα να προκαλέσει outage σ’ ένα κύκλωμα. Επομένως, έχει το μειονέκτημα πως οι τρεις διακόπτες πρέπει να λειτουργήσουν επιτυχώς για να διορθώσουν ένα λάθος.

Το δακτυλιοειδές τρίποδο έχει μια δύσκολη διασταύρωση των συνδέσεων στο κέντρο του προκαταρκτικού σχεδίου, η οποία μπορεί να κάνει δύσκολη την πραγματοποίησή του.

7.9 Διάταξη “Ring Bridge”

Η δακτυλιοειδής ζεύξη έχει επίσης περιγραφεί ως διάταξη δακτυλίου με διακόπτη ζεύξης. Ο αριθμός των διακοπών ανά σύνδεση είναι χαμηλός, κάνοντας αυτή την διάταξη οικονομική συγκρινόμενη με την διάταξη “Breaker-and-a-Half”.

Η προσθήκη και άλλου διακόπτη προσθέτει σε περίσσεια και κάνει την συντήρηση των διακοπών λιγότερο επικίνδυνη. Οι διακόπτες της ζεύξης θα πρέπει κανονικά να είναι σε ετοιμότητα, παρόμοια με τη διασύνδεση ζυγών στο κύριο και μετατιθέμενο σχήμα.

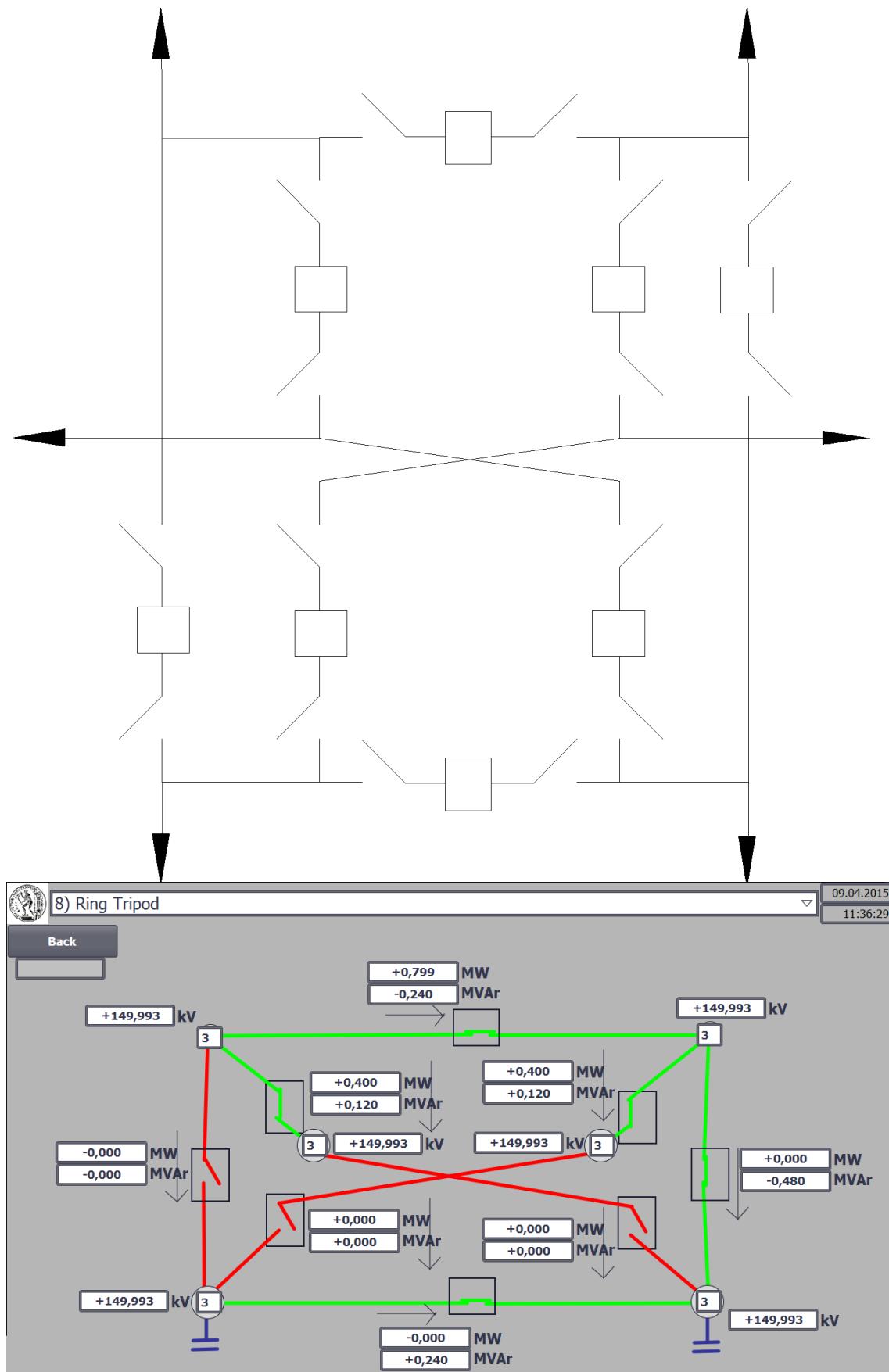
7.10 Διάταξη “Crossed Ring”

Ο διασταυρωμένος δακτύλιος παρουσιάζει τρεις διακόπτες για κάθε σύνδεση, αλλά εξαιτίας της τοπολογίας το κόστος είναι ίδιο με αυτό του σχήματος “Breaker-and-a-Half”. Αυτό έχει και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όπως σημειώθηκε παραπάνω. Η διασταύρωση των συνδέσεων μπορεί να κάνει αυτό το σχέδιο δύσκολο ως προς την υλοποίησή του. Αυτός ο υποσταθμός λειτουργεί ακριβώς όπως μια διάταξη δακτυλίου, με τους διακόπτες του δακτυλίου κανονικά ανοικτούς. Είναι επίσης δυνατό να λειτουργήσει ο υποσταθμός ως δυο επιμέρους δακτύλιοι, με τους επιμέρους δακτυλίους είτε χωρισμένους είτε ζευγνυόμενους με έναν διακόπτη.

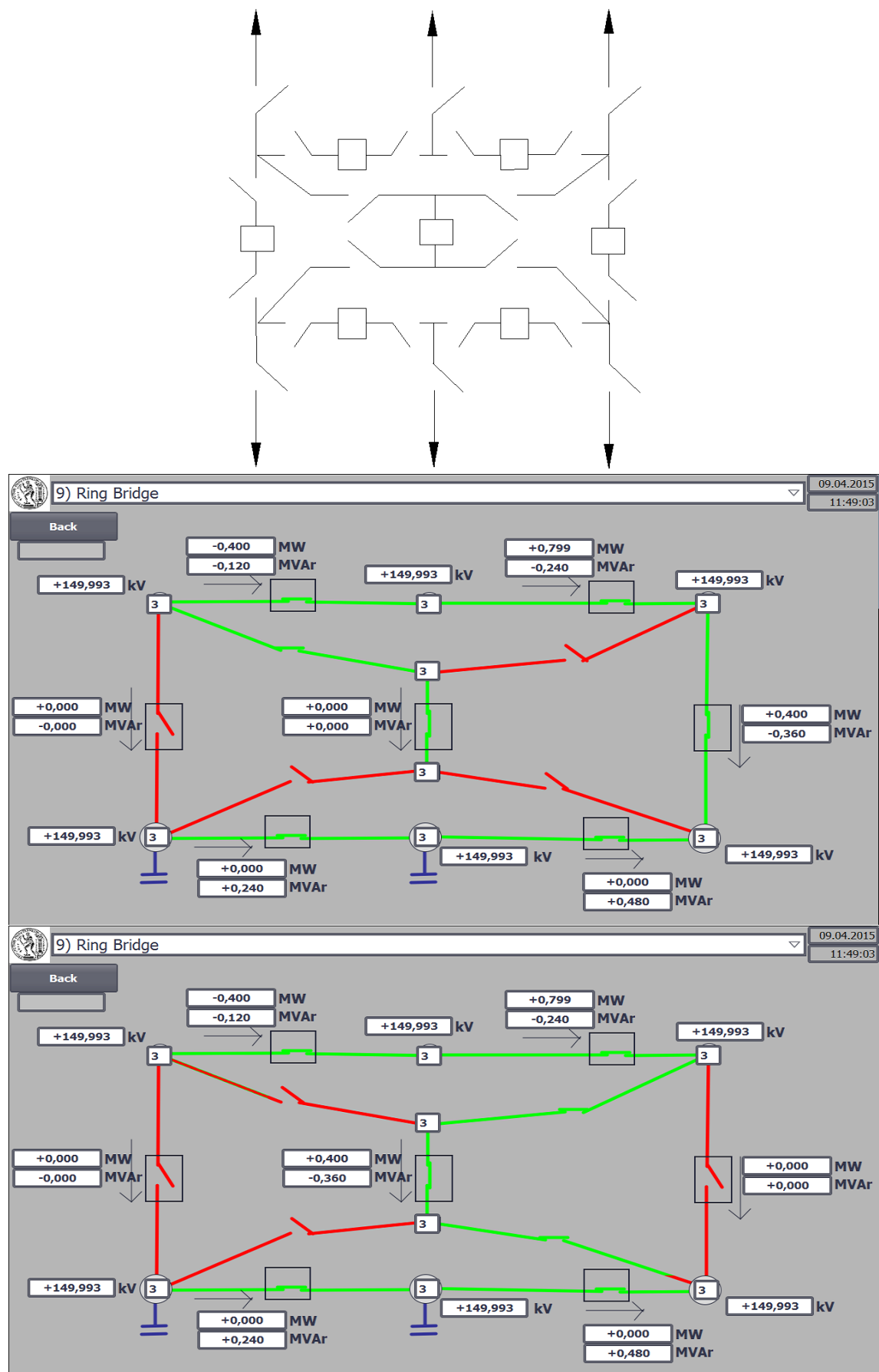
Διατάξεις αυτού του τύπου που κάνουν τρεις διακόπτες διαθέσιμους για κάθε σύνδεση προτιμούνται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει πολύ υψηλή θερμική φόρτιση και ανάγκη να διαιρεθεί το ρεύμα φορτίου ανάμεσα σε αρκετούς διακόπτες παροχής.

7.11 Διάταξη “4×6 Network”

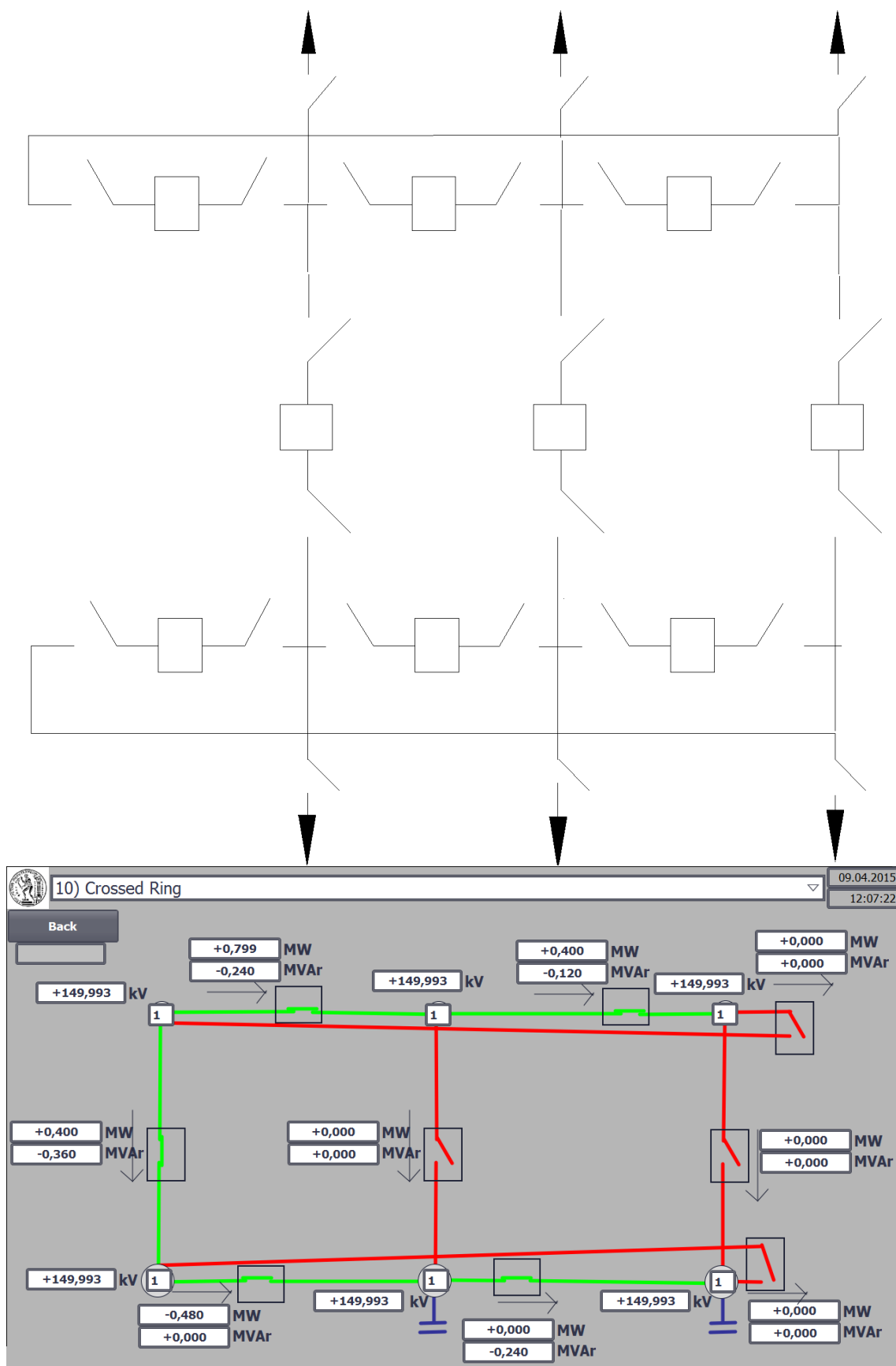
Η διάταξη δικτύου 4×6 είναι μια άλλη ακόμη παραλλαγή στο σχεδιασμό υποσταθμών που προσπαθεί να αυξήσει την περίσσεια της παροχής στα εξερχόμενα κυκλώματα. Σ’ αυτή την περίπτωση οι συνδέσεις στις γωνίες εξυπηρετούνται με τρεις διακόπτες, αλλά οι εσωτερικές συνδέσεις εξυπηρετούνται από μονάχα δύο.



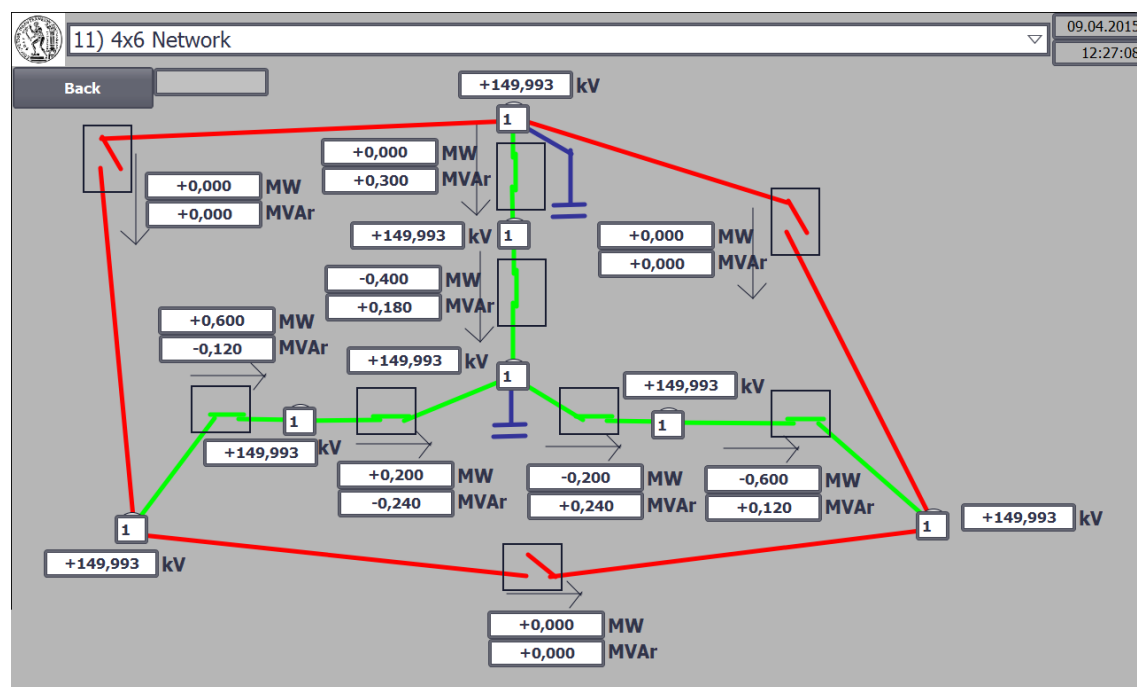
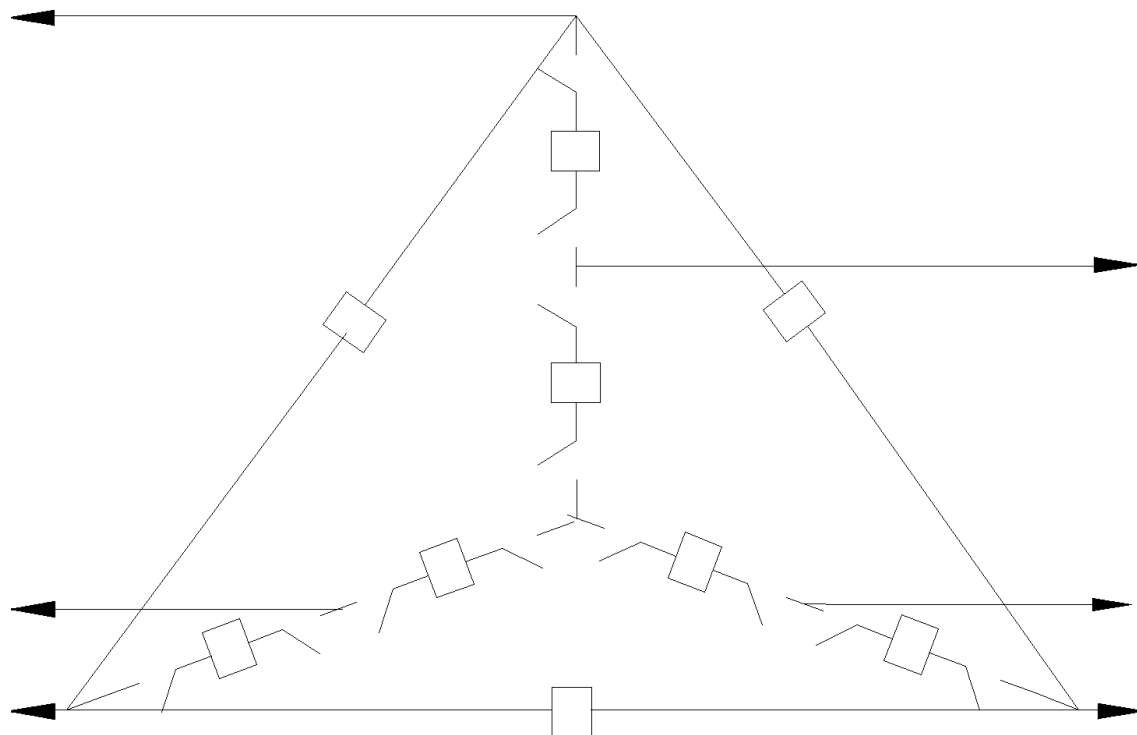
Σχήμα 7.8: Τοπολογία "Ring Tripod". Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.



Σχήμα 7.9: Τοπολογία “Ring Bridge”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, μέσω η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.



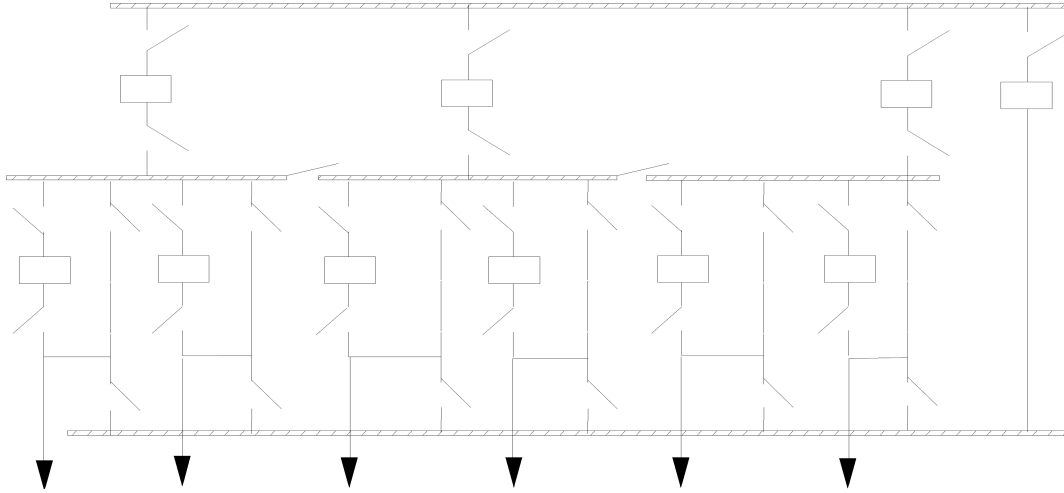
Σχήμα 7.10: Τοπολογία “Crossed Ring”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.



Σχήμα 7.11: Τοπολογία “4×6 Network”. Πάνω ηλεκτρολογικό σχέδιο, κάτω η οθόνη του υποσταθμού εν λειτουργία.

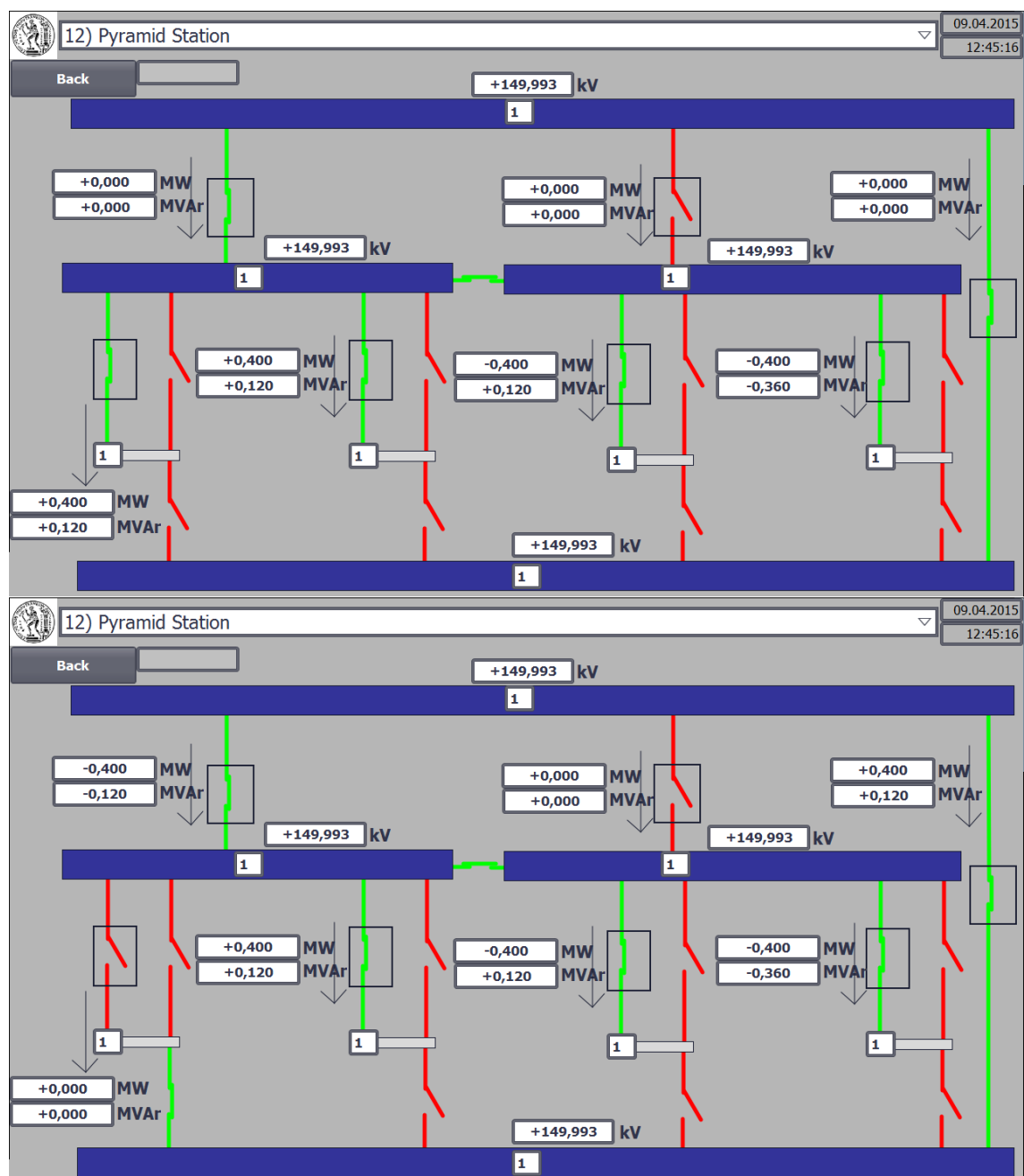
7.12 Διάταξη “Pyramid Station”

Η διάταξη πυραμιδωτού υποσταθμού είναι αρκετά διαφορετική από τις άλλες στο ότι παρέχει δύο διακόπτες εν σειρά για κάθε σύνδεση. Τα εξερχόμενα κυκλώματα χωρίζονται σε ομάδες, σ' αυτή τη περίπτωση που εικονίζεται στο σχήμα υπάρχουν δύο κυκλώματα ανά ομάδα.



Σχήμα 7.12: Τοπολογία “Pyramid Station”, ηλεκτρολογικό σχέδιο.

Κάθε κύκλωμα έχει το δικό του διακόπτη, το σφάλμα μπορεί να διορθωθεί από τον εφεδρικό διακόπτη, αλλά για τη δαπάνη της διόρθωσης ενός τέλειου κυκλώματος. Μια ακόμη πιο σύνθετη διάταξη, που χρησιμοποιεί ένα ξεχωριστό διακόπτη χρειάζεται για να επιτραπεί η επισκευή οποιουδήποτε διακόπτη.



Σχήμα 7.13: Τοπολογία “Pyramid Station”. Πάνω η οθόνη του υποσταθμού υπό κανονική λειτουργία, κάτω η οθόνη του υποσταθμού υπό εφεδρική λειτουργία.

Κεφάλαιο 8

Εφαρμογές

8.1 Δίκτυο τριών ζυγών

Αυτό το δίκτυο αποτελείται από τρεις υποσταθμούς, έναν υποσταθμό breaker-and-a-half, έναν απλό, και έναν double breaker. Ο απλός υποσταθμός είναι ο υποσταθμός 1 και περιέχει τους κόμβους 1,2 και 3. Ο double breaker είναι ο υποσταθμός 2 και περιέχει τους κόμβους 7,8 και 9. Ο breaker-and-a-half είναι ο υποσταθμός 3 και περιέχει τους κόμβους 16,17,18 και 19. Μόνο ο υποσταθμός breaker-and-a-half στέλνει στοιχεία στο κέντρο ελέγχου. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι οι άλλοι δύο υποσταθμοί λειτουργούν ως ένας ενιαίος ζυγός ο καθένας. Ζυγός αναφοράς είναι ο υποσταθμός 1. Επίσης είναι γνωστά τα στοιχεία των γραμμών (ανά μονάδα):

Άκρα γραμμής	R	X	G	B
16-1	0,005	0,015	0,001	0,005
17-2	0,005	0,015	0,001	0,005
18-8	0,01	0,025	0,005	0,01
19-9	0,01	0,025	0,005	0,01
3-7	0,03	0,08	0,01	0,02

Υπόμνημα [Παπ85, σελ. 33]:

R: Ωμική αντίσταση

X: Αντίδραση σκέδασης

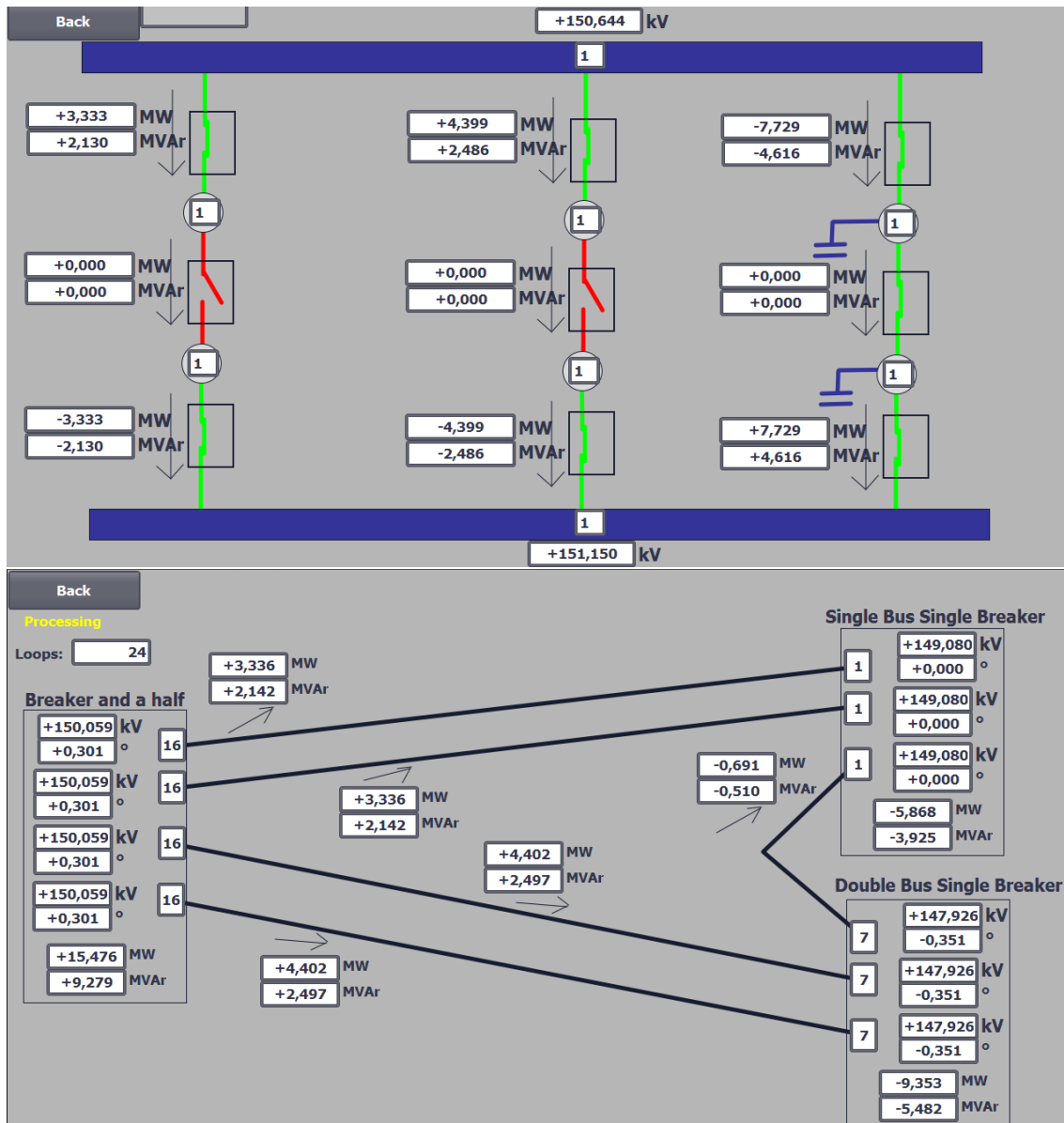
G: Εγκάρσια ωμική αγωγιμότητα

B: Εγκάρσια χωρητική αγωγιμότητα

Το κέντρο ελέγχου χρησιμοποιώντας τα γνωστά δεδομένα και τις μετρήσεις του υποσταθμού 3 εκτιμά την κατάσταση του συστήματος. Στο σχήμα 8.1 φαίνονται οι οθόνες του υποσταθμού και ηλεκτρικού δικτύου αντίστοιχα.

Ο υποσταθμός υπολογίζει την τοπολογία του και επεξεργάζεται τις μετρήσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υπολογίζει ότι όλοι οι διασυνδεδετικοί κόμβοι ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα, δηλαδή αποτελούν ηλεκτρικά έναν ενιαίο κόμβο. Αυτή η πληροφορία αποστέλλεται στο κέντρο ελέγχου. Επίσης, ο υποσταθμός πληροφορεί το κέντρο ελέγχου για την τάση των διασυνδεδετικών κόμβων, τις εξερχόμενες ροές ισχύος, καθώς και την έγχυση ισχύος στην ενιαία συνεκτική συνιστώσα.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η τάση των διασυνδεδετικών κόμβων είναι ο μέσος όρος των δύο μετρήσεων. Η εξερχόμενη ροή ισχύος ανά διασυνδεδετικό κόμβο είναι το άθροισμα των εκατέρωθεν μετρήσεων. Η έγχυση ισχύος είναι το άθροισμα των δύο εγχύσεων, αφού όλοι οι κόμβοι του υποσταθμού είναι ένας ενιαίος κόμβος.



Σχήμα 8.1: Πάνω οθόνη του υποσταθμού 3, κάτω δίκτυο των τριών ζυγών.

Ο υποσταθμός έχει 20 μετρητές, αλλά στέλνει στο κέντρο ελέγχου έτοιμες τις πληροφορίες για τους τρεις διασυνδεδετικούς κόμβους. Αυτές οι πληροφορίες είναι 9 ψευδομετρήσεις, 2 ροές ισχύος ανά κόμβο για 3 διασυνδεδετικούς κόμβους, η κοινή τάση, η ενεργός και άεργος έγχυση ισχύος.

Επιπλέον, το λογισμικό είναι εύκολα τροποποιήσιμο. Για παράδειγμα, αν ο υποσταθμός αλλάξει και προστεθεί άλλος ένας κλάδος με δύο διασυνδεδετικούς κόμβους, τότε αρκεί η τροποποίηση των δύο τμημάτων κώδικα Configuration. Η προεπεξεργασία των μετρήσεων, η επικοινωνία και η εκτίμηση κατάστασης θα εξακολουθούν να λειτουργούν κανονικά χωρίς περαιτέρω τροποποίηση λογισμικού.

8.2 Δίκτυο δεκατεσσάρων ζυγών της IEEE

Αυτό το δίκτυο εμφανίζεται συχνά στη βιβλιογραφία. Για τις ανάγκες της αναφοράς λήφθηκε υπόψη η εσωτερική τοπολογία του κάθε υποσταθμού.

From	To	R	X	B
1	2	0.0194	0.0592	0.0528
1	5	0.0540	0.2230	0.0492
2	3	0.0470	0.1980	0.0438
2	4	0.0581	0.1763	0.0340
2	5	0.0570	0.1739	0.0346
3	4	0.0670	0.1710	0.0128
4	5	0.0134	0.0421	0.0000
4	7	0.0000	0.2091	0.0000
4	9	0.0000	0.5562	0.0000
5	6	0.0000	0.2520	0.0000
6	11	0.0950	0.1989	0.0000
6	12	0.1229	0.2558	0.0000
6	13	0.0662	0.1303	0.0000
7	8	0.0000	0.1762	0.0000
7	9	0.0000	0.1100	0.0000
9	10	0.0318	0.0845	0.0000
9	14	0.1271	0.2704	0.0000
10	11	0.0821	0.1921	0.0000
12	13	0.2209	0.1999	0.0000
13	14	0.1709	0.3480	0.0000

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά του δικτύου 14 ζυγών της IEEE [NKM09] [Chr00].

Power measurement data.					
From	To	Active power flow		Reactive power flow	
		Value, pu	$\sqrt{R_p}$, pu	Value, pu	$\sqrt{R_p}$, pu
1	2	1.5591	0.008	-0.2018	0.008
1	5	0.7648	0.008	-0.0372	0.008
2	4	0.5602	0.008	-0.0912	0.008
3	2	-0.7020	0.008	0.0133	0.008
4	7	0.2842	0.008	-0.1195	0.008
4	9	0.1610	0.008	-0.0296	0.008
5	6	0.4374	0.008	-0.1192	0.008
6	11	0.0710	0.008	0.0498	0.008
6	12	0.0779	0.008	0.0269	0.008
6	13	0.1764	0.008	0.0795	0.008
8	7	0.0000	0.008	0.2084	0.008
9	10	0.0549	0.008	0.0282	0.008
9	14	0.0953	0.008	0.0271	0.008
14	13	-0.0548	0.008	-0.0253	0.008
11	10	<i>0.0354</i>	<i>0.008</i>	<i>0.0305</i>	<i>0.008</i>
2	5	<i>0.4147</i>	<i>0.008</i>	<i>-0.0832</i>	<i>0.008</i>
3	4	<i>-0.2400</i>	<i>0.008</i>	<i>-0.0404</i>	<i>0.008</i>
5	4	<i>0.6288</i>	<i>0.008</i>	<i>-0.0705</i>	<i>0.008</i>
7	9	<i>0.2842</i>	<i>0.008</i>	<i>0.0638</i>	<i>0.008</i>
12	13	<i>0.0162</i>	<i>0.008</i>	<i>0.0094</i>	<i>0.008</i>

Voltage measurement data.			
Measurement i	Type	Value, pu	$\sqrt{R_p}$, pu
1	V1	1.06	0.004
2	V8	1.09	0.004
3	V9	1.051	0.004
4	V10	1.0462	0.004

Πίνακας 8.2: Οι μετρήσεις του δικτύου [NKM09].

Τα χαρακτηριστικά και οι μετρήσεις του δικτύου αναφέρονται στους ζυγούς, δηλαδή κατόπιν της επεξεργασίας τοπολογίας. Επειδή, αυτή η επεξεργασία υπολογίζεται από το λογισμικό που έχει αναπτυχθεί, τα χαρακτηριστικά και οι μετρήσεις του δικτύου ανάγονται στη μορφή που ήταν πριν την επεξεργασία τοπολογίας. Αυτό γίνεται με βάση την πηγή [EJ01], ενώ η αναγωγή φαίνεται στον πίνακα 8.3.

Αυτό το δίκτυο απαρτίζεται από 13 υποσταθμούς. Για την υλοποίησή του απαιτούνται 14 PLC, 13 για τους υποσταθμούς και ένα για το κέντρο ελέγχου. Τα 14 PLC θα επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω του δικτύου PN/IE.

Line No.	From Bus	To Bus	From Node	To Node
1	1	2	19	20
2	1	5	18	36
3	2	3	23	25
4	2	4	22	31
5	2	5	21	38
6	3	4	26	33
7	4	5	29	39
8	4	7	30	66
9	4	9	28	48
10	5	6	37	44
11	6	11	40	60
12	6	12	43	62
13	6	13	45	65
14	7	8	68	8
15	7	9	67	50
16	9	10	47	54
17	9	14	49	56
18	10	11	53	58
19	12	13	61	64
20	13	14	63	55

Πίνακας 8.3: Αναγωγή των άκρων των γραμμών μεταφοράς στους αντίστοιχους κόμβους [NKM09].

νες ροές ισχύος και οι εγχύσεις ισχύος. Αν δύο διασυνδεδετικοί κόμβοι συνδέονται ηλεκτρικά, τότε ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα. Οι εγχύσεις ισχύος αναφέρονται στις συνεκτικές συνιστώσες, ενώ η κάθε ροή ισχύος αφορά συγκεκριμένο διασυνδεδετικό κόμβο. Σε έναν διασυνδεδετικό κόμβο συνδέεται το πολύ ένας ακροδέκτης είτε γραμμής μεταφοράς είτε μετασχηματιστή.

Σε κάθε υποσταθμό, τα χαρακτηριστικά των διασυνδεδετικών κόμβων τίθενται συμπιεσμένα στην τοπική δομή δεδομένων με δείκτη DB1. Το κέντρο ελέγχου παραλαμβάνει τα δεδομένα όλων των υποσταθμών, του ενός μετά του άλλου. Το κέντρο ελέγχου αποφασίζει πότε θα παραλάβει τα δεδομένα, ενώ η παραλαβή δεν αλληλεπιδρά με το πρόγραμμα των υποσταθμών. Αυτό είναι εφικτό χάρις τη σύμβαση, ότι τα δεδομένα τοποθετούνται στη προσυμφωνημένη θέση μνήμης DB1. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ασύγχρονη επικοινωνία, άρα η αυτονομία [Mor13, σελ. 9] και η πλήρως ανεξάρτητη λειτουργία των 14 PLC.

Ο κάθε υποσταθμός ακολουθεί την τοπική αρίθμηση των κόμβων του. Αυτή η αρίθμηση είναι ανεξάρτητη από την ολική αρίθμηση που ακολουθεί το κέντρο ελέγχου (για παράδειγμα σχήμα 8.2 σε σύγκριση με σχήμα 8.3). Ωστόσο, η διάταξη των διασυνδεδετικών κόμβων πρέπει να είναι η ίδια και στις δύο αριθμήσεις. Στο παράδειγμα οι κόμβοι 53 και 55 της ολικής αρίθμησης αντιστοιχούν στους κόμβους 3 και 4 της τοπικής αρίθμησης, και αφού $53 < 54$ πρέπει $3 < 4$ που ισχύει.

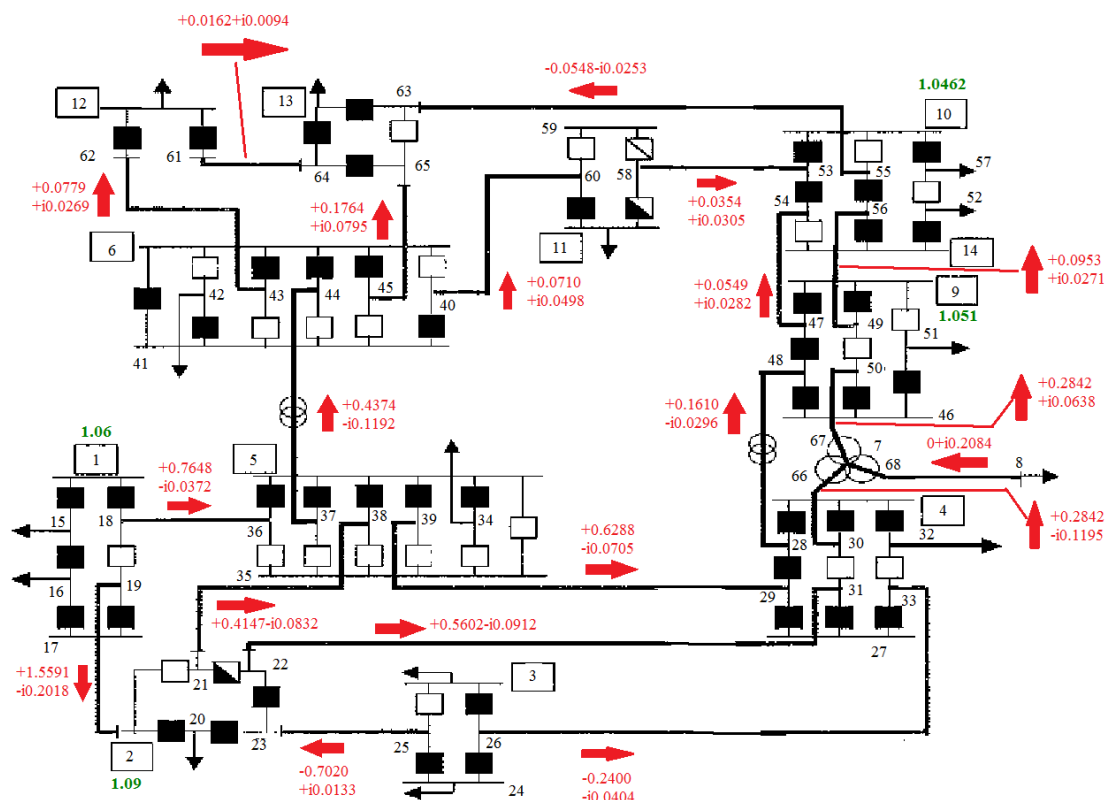
Μετά την παραλαβή των δεδομένων ενός υποσταθμού, το κέντρο ελέγχου τα αποσυμπίεζει και τα αποκωδικοποιεί, για να τα ενσωματώσει σε μια ενιαία βάση δεδομένων. Κατά την ενσωμάτωση των δεδομένων μεταφράζεται η αρίθμηση των κόμβων του υποσταθμού. Τα δεδομένα αναφέρονταν στην τοπική αρίθμηση, ενώ μετά τη μετάφραση αναφέρονται στην ολική.

Μετά την παραλαβή των δεδομένων από όλους τους υποσταθμούς το κέντρο ελέγχου σχηματίζει το διάνυσμα μετρήσεων (σχήμα 8.2). Μετά εκτιμάται η κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου. Από την εκτίμηση κατάστασης προκύπτει το διάνυσμα κατάστασης, δηλαδή οι τάσεις των ζυγών,

Τα 13 PLC των υποσταθμών εκτελούν το πρόγραμμα των υποσταθμών, ενώ το PLC του κέντρου ελέγχου εκτελεί το δικό του πρόγραμμα. Τα προγράμματα των υποσταθμών διαφέρουν μόνο στο τμήμα κώδικα “Configuration”, στο οποίο ορίζεται η διάταξη των στοιχείων του υποσταθμού, καθώς και η προέλευση των αναλογικών και ψηφιακών μετρήσεων. Το κέντρο ελέγχου έχει το δικό του τμήμα “Configuration”. Σε αυτό προσδιορίζονται οι υποσταθμοί που ανήκουν στο δίκτυο, οι διευθύνσεις των PLC που ελέγχουν τους υποσταθμούς, καθώς και οι κόμβοι με τους οποίους συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπλέον, ορίζονται τα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς και των μετασχηματιστών.

Σε κάθε υποσταθμό, το PLC υπολογίζει τα χαρακτηριστικά των διασυνδεδετικών κόμβων του, δηλαδή των κόμβων του υποσταθμού που είναι κοινοί με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν την τάση, την ισχύ και ποιοί διασυνδεδετικοί κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους, δηλαδή ποιοί κόμβοι αποτελούν ηλεκτρικά έναν ενιαίο κόμβο.

Τα χαρακτηριστικά που αφορούν την ισχύ είναι η ενεργός και άεργος ισχύ, οι εξερχόμενες



Σχήμα 8.2: Τοπολογία και μετρήσεις του δοκιμαστικού δικτύου 14 ζυγών [NKM09][EJ01].

οι οποίες περιγράφονται από τα μέτρα και τις γωνίες τους (πίνακας 8.4).

Οι καταστάσεις των υποσταθμών και του ηλεκτρικού δικτύου εμφανίζονται σε οθόνες (σχήματα 8.5 και 8.6). Σε κάθε οθόνη υποσταθμού εμφανίζονται οι κλειστοί και ανοιχτοί διακόπτες και αποζεύκτες, οι μετρήσεις τάσης και ισχύος, καθώς και αριθμοί συνεκτικών συνιστωσών. Αν δύο ζυγοί ανήκουν στην ίδια συνεκτική συνιστώσα, δηλαδή συνδέονται, τότε έχουν τον ίδιο αριθμό.

Η διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω αφορά μια υλοποίηση του δικτύου 14 ζυγών. Δυστυχώς, το εμπορικό λογισμικό επιτρέπει μόνο την προσομοίωση το πολύ δύο PLC. Σε αυτό το δίκτυο, κάθε ζυγός ανήκει σε διαφορετικό υποσταθμό, εκτός από τους ζυγούς 10 και 14, οι οποίοι ανήκουν στον ίδιο υποσταθμό. Έστω το όνομα αυτού του υποσταθμού “υποσταθμός 10-14”. Επομένως, επιλέχθηκαν για προσομοίωση το κέντρο ελέγχου και ο υποσταθμός 10-14.

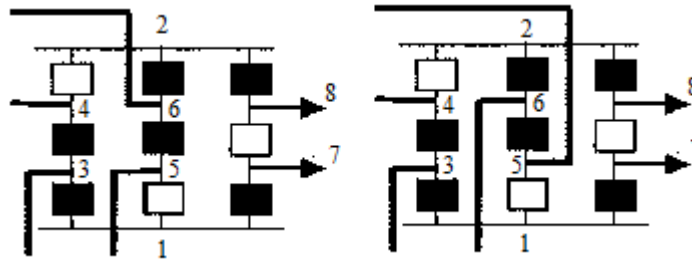
Ο υποσταθμός υπολογίζει την τοπολογία του και επεξεργάζεται τις μετρήσεις του, ενώ το κέντρο ελέγχου εκτιμά την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου. Στο συγκεκριμένο υποσταθμό οι κόμβοι μοιράζονται σε δύο συνεκτικές συνιστώσες, στη μία είναι γνωστή η τάση, στην άλλη είναι γνωστή η εξερχόμενη ροή ισχύος ενός διασυνδεδετικού κόμβου.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ακολουθείται μια συγκεκριμένη σύμβαση για τους μετρητές ισχύος. Κάθε διακόπτης συνοδεύεται από μετρητή ενεργού και άεργου ισχύος. Αυτή η σύμβαση έχει υιοθετηθεί, γιατί συνιστά σε ένα διπλό έλεγχο της κατάστασης του διακόπτη.

Με βάση την πηγή [EJ01] είναι γνωστή η εξερχόμενη ροή ισχύος του διασυνδεδετικού κόμβου 6 (σχήμα 8.3 αριστερά). Σύμφωνα με την παραπάνω σύμβαση, για να είναι γνωστή η εξερχόμενη ροή ισχύος του διασυνδεδετικού κόμβου 6, απαιτείται να είναι γνωστή η ροή ισχύος μεταξύ των κόμβων 5 και 6, καθώς και η ροή ισχύος μεταξύ των κόμβων 6 και 8.

Ωστόσο, σε αυτήν την περίπτωση ο υποσταθμός παράγει αυτόματα δύο επιπλέον ψευδομε-

τρήσεις. Η μία είναι η εξερχόμενη ροή ισχύος του κόμβου 5 (σχήμα 8.3 αριστερά), παράγεται γιατί είναι γνωστό ότι ο διακόπτης 1-5 είναι ανοιχτός. Η άλλη είναι η έγχυση ισχύος του κόμβου 8 (σχήμα 8.3 αριστερά), παράγεται γιατί μεταξύ των κόμβων 6 και 8 δεν παρεμβάλλεται κάθετα καμία άλλη οδός παροχής.



Σχήμα 8.3: Η τοπική αρίθμηση του υποσταθμού 10-14. Αριστερά η αρχική τοπολογία, δεξιά η τροποποιημένη.

Προκειμένου να μην αλλάξει το διάνυσμα μετρήσεων, για να παραμείνει έγκυρη η αναφορά στην πηγή [NKM09], χρειάζεται να τροποποιηθεί η τοπολογία του υποσταθμού. Έτσι, τροποποιήθηκε η συνδεσμολογία του υποσταθμού 10-14, αντιμετατέθηκαν οι διασυνδεδετικοί κόμβοι 5 και 6 (σχήμα 8.3 δεξιά).

Η αντιμετάθεση αυτή συνεπάγεται την αλλαγή της διάταξης των κόμβων στην τοπική άρα και στην ολική αρίθμηση των κόμβων. Επομένως, τροποποιήθηκαν τα τμήματα “Configuration” του υποσταθμού 10-14 και του κέντρου ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα αντιμετατέθηκαν τα άκρα δύο γραμμών μεταφοράς στο κέντρο ελέγχου, και οι διευθύνσεις δύο μετρητών στον υποσταθμό 10-14. Όλα τα υπόλοιπα στάδια υπολογισμού (επεξεργασία μετρήσεων και παραγωγή ψευδομετρήσεων, επεξεργασία τοπολογίας, επικοινωνία, μετάφραση κόμβων, εκτίμηση κατάστασης) έμειναν ανέπαφα, και εξακολουθούν να λειτουργούν κανονικά μετά την τροποποίηση.

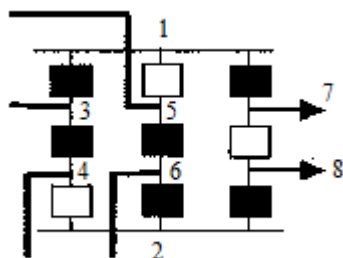
Μετά από αυτήν την τροποποίηση το σύστημα λειτουργεί με τον επιθυμητό τρόπο, ο υποσταθμός 10-14 παράγει τις επιθυμητές ψευδομετρήσεις, ώστε το διάνυσμα μετρήσεων να είναι το επιθυμητό (σχήμα 8.2). Η εκτίμηση κατάστασης (πίνακας 8.4 και σχήμα 8.6) είναι ικανοποιητική.

Στην οθόνη του υποσταθμού 10-14 (σχήμα 8.5) εμφανίζεται η κατάσταση του. Κάποιοι διακόπτες είναι ανοιχτοί και κάποιοι κλειστοί. Οι δύο ζυγοί έχουν διαφορετικό αριθμοί συνεκτικών συνιστωσών, δηλώνοντας ότι δε συνδέονται. Επιπλέον εμφανίζονται πέντε μετρητές σε λειτουργία και 15 ανενεργοί.

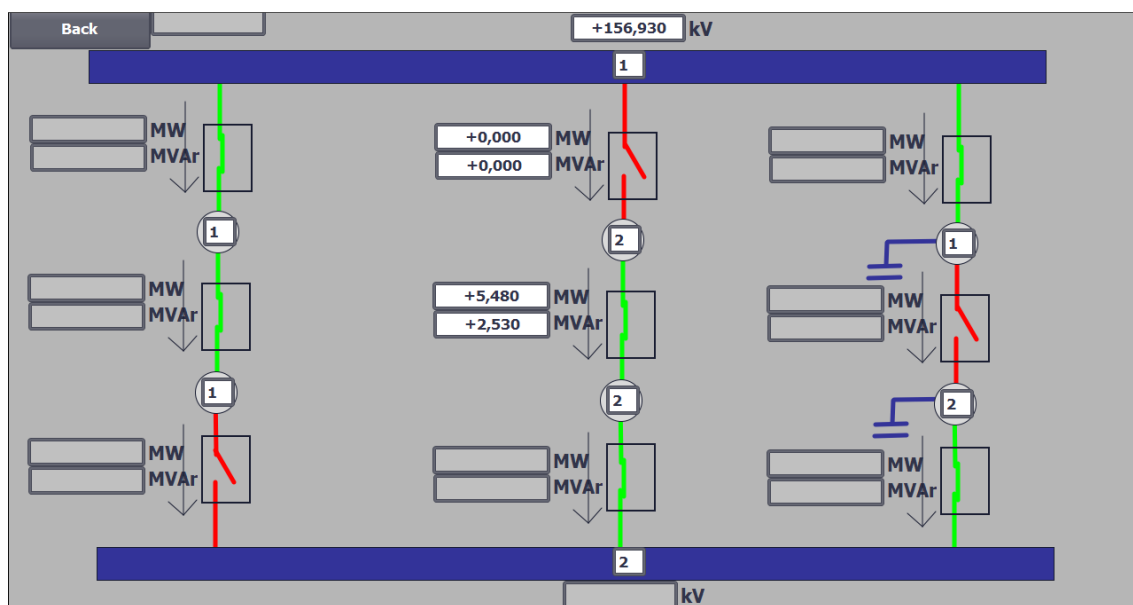
Ζυγός	Πραγματική γωνία (°)	Εκτιμώμενη γωνία (°)
1	0,0000	0,0000
2	-4,9274	-4,9542
3	-12,6051	-12,5966
4	-10,4278	-10,4467
5	-8,9381	-8,9752
6	-14,6677	-14,6820
7	-13,5791	-13,5732
8	-13,5791	-13,5732
9	-15,1834	-15,1870
10	-15,3553	-15,3820
11	-15,1261	-15,1588
12	-15,5272	-15,5255
13	-15,5845	-15,5857
14	-16,3866	-16,3661

Ζυγός	Πραγματική τάση (kV)	Εκτιμώμενη τάση (kV)
1	159,00	158.95
2	156.75	156.76
3	151.50	151.35
4	154.65	154.66
5	155.40	155.39
6	160.50	160.55
7	158.40	158.51
8	163.50	163.56
9	157.50	157.58
10	156.90	156.99
11	158.25	158.23
12	158.25	158.26
13	157.50	157.48
14	154.80	154.83

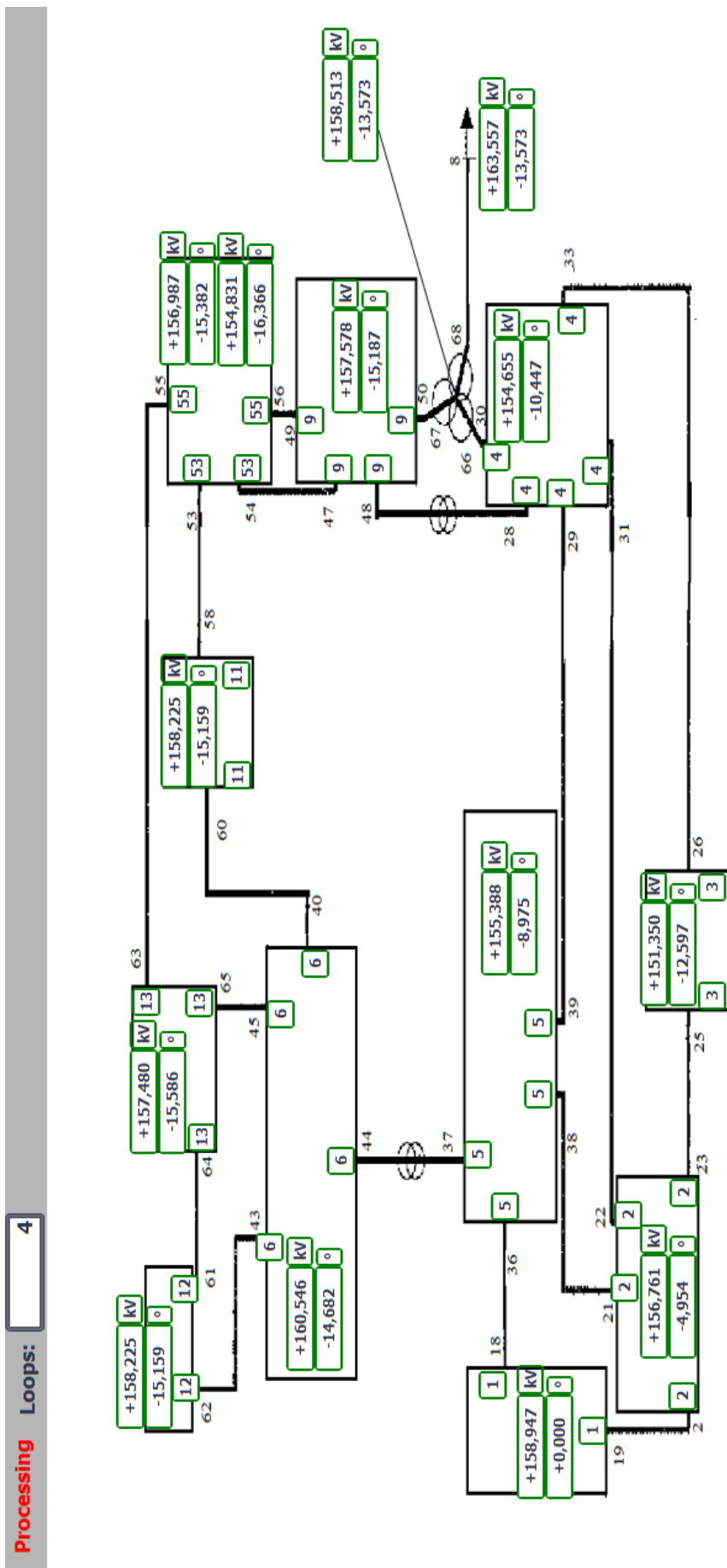
Πίνακας 8.4: Τα αποτελέσματα της εκτίμησης κατάστασης, σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές.



Σχήμα 8.4: Η τοπική αρίθμηση του υποσταθμού 10-14.



Σχήμα 8.5: Η οθόνη του υποσταθμού 10-14, όταν αυτός είναι εν λειτουργία.



Σχήμα 8.6: Η οθόνη του ηλεκτρικού δικτύου εν λειτουργία.

Κεφάλαιο 9

Προτάσεις για μελλοντική διερεύνηση

Ο υποσταθμός μπορεί να συνεισφέρει περισσότερο στο σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, μπορούν να ενσωματωθούν νέες τάσεις της τεχνολογίας υποσταθμών.

9.1 Λογισμικό

- Η μήτρα πρόπτωσης να αντικατασταθεί με λίστα γειτνίασης. Αυτό θα μειώσει την πολυπλοκότητα των αλγορίθμων από τετραγωνική σε γραμμική.
- Να προστεθεί πλήρης εκτίμηση παρατηρησιμότητας.
- Να αναπτυχθεί κατανεμημένη εκτίμηση.
- Να ληφθεί υπόψιν το ενδεχόμενο νησιδοποίησης.
- Ανάπτυξη εργαλείων υψηλών γλωσσών προγραμματισμού ή διασύνδεση με υπάρχοντες υψηλές γλώσσες προγραμματισμού. Οι υψηλές γλώσσες προγραμματισμού, όπως η matlab, διευκολύνουν την ανάπτυξη προγραμμάτων, ενώ επιτρέπουν την αντιγραφή προγραμμάτων που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε αυτές.

9.2 Περιγραφή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Αυτές οι επεκτάσεις αφορούν στοιχεία που υπάρχουν σε έναν τυπικό υποσταθμό και δεν συμπεριλαμβάνονται.

- Επέκταση για να συμπεριλαμβάνει μετρήσεις και επεξεργασία ηλεκτρικού ρεύματος.
- Επέκταση για να συμπεριλαμβάνει μετρήσεις και επεξεργασία γωνιών τάσης και ρεύματος.
- Επέκταση, ώστε οι μετασχηματιστές να δηλώνονται ξεχωριστά με κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων τους.
- Η αρχικοποίηση της μεθόδου AC να γίνεται με τη μέθοδο DC.
- Να λαμβάνονται υπόψη φορτία αγωγιμότητας.

9.3 Έλεγχοι ορθής λειτουργίας

Αυτές οι επεκτάσεις αφορούν επιπλέον ελέγχους που μπορούν να εφαρμοστούν.

- Έλεγχος αν ανά γραμμή υπάρχει τουλάχιστον ένας διακόπτης. Είναι σημαντικό μεταξύ κάθε δύο γραμμών να περιλαμβάνεται τουλάχιστον ένας διακόπτης.
- Έλεγχος αν στο άνοιγμα αποζεύκτη τα άκρα του έχουν την ίδια κατάσταση. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να αποτρέψει το άνοιγμα αποζεύκτη, ή να προειδοποιήσει για να αποφευχθούν σπινθήρες.
- Έλεγχος αρχής διατήρησης της ενέργειας και αρχής διατήρησης φορτίου. Οι έλεγχοι αυτοί ελέγχουν αν οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν τους φυσικούς νόμους. Αν η επιβεβαίωση είναι ανεπιτυχής, τότε κάτι δε λειτουργεί ορθά στον υποσταθμό.

9.4 Επικοινωνία υποσταθμού με κέντρο ελέγχου

Αυτή η διπλωματική δεν ασχολήθηκε σε βάθος με την υλοποίηση των επικοινωνιών. Προτείνεται η ενσωμάτωση των υφιστάμενων πρωτοκόλλων και η μελέτη των εξής θεμάτων:

- Τί γίνεται αν τα κανάλια επικοινωνίας είναι λιγότερα από τα ζητούμενα.
- Συμπύεση δεδομένων.
- Σενάριο απώλειας επικοινωνιών: Αποθήκευση τοπικών δεδομένων και τοπικός έλεγχος.

9.5 Άλλες προτάσεις

- Στο γραφικό περιβάλλον, το βέλος σε κάθε ροή ισχύος να γίνει δυναμικό, ώστε ο επιβλέπων μηχανικός να μη συγχύζεται από τις συμβάσεις θετικής φοράς.
- Υπολογισμός εξερχόμενης ροής ισχύος με βάση όλους του μετρητές του υποσταθμού.
 Δεδομένης της αρχής διατήρησης της ενέργειας είναι θεωρητικά εφικτή η χρήση όλων των μετρήσεων για τον υπολογισμό μιας ροής ισχύος. Για παράδειγμα έστω ότι δύο ακμές, η Α και η Β, συμβάλλουν στον κόμβο Κ. Ο κόμβος Κ μέσω της ακμής Γ συμβάλλει στον κόμβο Λ. Έστω ότι στον κόμβο Κ δεν συνδέονται άλλες ακμές, και ότι οι Α, Β, Γ έχουν μετρητές.
 Πόση είναι η ροή ισχύος που εξέρχεται από τον κόμβο Λ; Η άμεση απάντηση προέρχεται από τη μέτρηση Γ. Ωστόσο, με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας η απάντηση μπορεί να προέλθει αν προσθέσουμε τις μετρήσεις από Α και Β. Οπότε χρειάζεται να μελετηθεί πώς μπορούν να εφαρμοστούν στατιστικές μέθοδοι, για να αξιοποιηθούν όλες οι μετρήσεις και να αυξηθεί η αξιοπιστία του συστήματος.
- Χρήση της γλώσσας CLIPS στο σύστημα ειδοποιήσεων. Αυτή η γλώσσα προσφέρει προτεραιότητες στις εντολές της, ώστε να είναι κατάλληλη για ανάπτυξη συστήματος ειδοποιήσεων χωρίς τα γνωστά προβλήματα (υπερβολικά πολλά μηνύματα, λάθος σειρά εμφάνισης και τα λοιπά).
- Ανάπτυξη αντικειμενοστραφών προγραμμάτων.

Κεφάλαιο 10

Παράρτημα

Κώδικες “Configuration”: Η ονομασία των μεταβλητών εισόδων υπακούει σε κάποιες συμβάσεις. Αν το όνομα αρχίζει από “CB”, τότε εννοείται διακόπτης, αν αρχίζει από “s” εννοείται αποζεύκτης. Αν το όνομα αρχίζει από “P”, “Q”, “V”, τότε εννοείται ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς ή τάση αντίστοιχα.

- Single Bus, Single Breaker:

```
FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
    others are considered unused.

    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 3, state := "CB 1-3", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 4, state := "CB 1-4", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 5, state := "CB 1-5", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 6, state := "CB 1-6", type := "Protocol".
    Breaker);

    //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
    of the grid.
    //Convention: All other nodes' connections are completely known as
    described here.
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare injection node"(node := 6);

    //Display in MVAs and kVs
    "Define display units"(
        power := 1000000,
        voltage := 1000
    );

    //Declare the measurements:
    //Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
```

```

//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

//Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
1":P, node := 1, deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1, deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1, deviation:=50000);

END_FUNCTION

```

- Main and transfer:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
//The network can be fully defined by calling the network function for
every pair of nodes.
//The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
switch and false open switch).
//If two nodes are short circuited then set switch=true.
//If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
mention this, because it is the preset situation.
//Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
others are considered unused.

//Auxiliary breaker:
"Network"("node 1" := 1, "node 2" := 2, state := "CB 1-2", type := "Protocol".
Breaker);

//Main:
"Network"("node 1" := 1, "node 2" := 3, state := "CB 1-3", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 1, "node 2" := 4, state := "CB 1-4", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 1, "node 2" := 5, state := "CB 1-5", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 1, "node 2" := 6, state := "CB 1-6", type := "Protocol".
Breaker);

```

```

// Transfer :
"Network"("node 1" := 2,"node 2" := 3, state := "s2-3", type := "Protocol".
Switch);
"Network"("node 1" := 2,"node 2" := 4, state := "s2-4", type := "Protocol".
Switch);
"Network"("node 1" := 2,"node 2" := 5, state := "s2-5", type := "Protocol".
Switch);
"Network"("node 1" := 2,"node 2" := 6, state := "s2-6", type := "Protocol".
Switch);

// Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
// Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.
"declare interconnection node"(node := 3);
"declare interconnection node"(node := 4);
"declare interconnection node"(node := 5);
"declare injection node"(node := 6);

// Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

// Declare the measurements:
// Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
// Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
// If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
// Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

// Voltages:
// Convention: The final value is in Volts.
// The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
1":P,node := 1,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
2":P,node := 2,deviation:=1000);

// Flows:
// Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node".
// Convention: the final value in Watts.
// Active flows
"measure active flow"(IN := "P 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1,deviation:=50000);

// Inactive flows
// Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1,deviation:=50000);

```

```

    "measure inactive flow"(IN := "Q 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1, deviation := 50000);

```

```
END_FUNCTION
```

- Double Bus, Single Breaker:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
    others are considered unused.

    // Auxiliary breaker:
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 2, state := "CB 1-2", type := "Protocol".
    Breaker);

    //Main breakers:
    "Network"("node 1" := 7, "node 2" := 3, state := "CB 7-3", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 8, "node 2" := 4, state := "CB 8-4", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 9, "node 2" := 5, state := "CB 9-5", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 10, "node 2" := 6, state := "CB 10-6", type := "Protocol".
    Breaker);
    "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 13, state := "s7-3", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 4, "node 2" := 14, state := "s8-4", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 5, "node 2" := 15, state := "s9-5", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 6, "node 2" := 16, state := "s10-6", type := "Protocol".
    Switch);

    //Coincident nodes:
    "Network"("node 1" := 7, "node 2" := 13, state := true, type := "Protocol". "Short
    circuit");
    "Network"("node 1" := 8, "node 2" := 14, state := true, type := "Protocol". "Short
    circuit");
    "Network"("node 1" := 9, "node 2" := 15, state := true, type := "Protocol". "Short
    circuit");
    "Network"("node 1" := 10, "node 2" := 16, state := true, type := "Protocol". "Short
    circuit");

    //Bus 1 switches:
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 7, state := "s1-7", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 8, state := "s1-8", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 9, state := "s1-9", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 10, state := "s1-10", type := "Protocol".
    Switch);

    //Bus 2 switches:
    "Network"("node 1" := 2, "node 2" := 7, state := "s2-7", type := "Protocol".
    Switch);
    "Network"("node 1" := 2, "node 2" := 8, state := "s2-8", type := "Protocol".
    Switch);

```



```

    "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 9, state := "s2-9", type:="Protocol".
Switch);
    "Network"("node 1":= 2,"node 2":=10, state := "s2-10",type:="Protocol".
Switch);

    //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
    //Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.
    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare injection node"(node := 6);

    //Display in MVAs and kVs
    "Define display units"(
        power := 1000000,
        voltage := 1000
    );

    //Declare the measurements:
    //Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
    //Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
    //If there 's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
    //Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

    //Voltages:
    //Convention: The final value is in Volts.
    //The node indicates in which node the measurement refers.
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
1":P,node := 1,deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
2":P,node := 2,deviation:=1000);

    //Flows:
    //Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
    //Convention: the final value in Watts.
    //Active flows
    "measure active flow"(IN := "P 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P 7-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 7,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P 8-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 8,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P 9-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 9,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P 10-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 6,"from node" := 10,deviation:=50000);

    //Inactive flows
    //Nothing in this configuration example.
    "measure inactive flow"(IN := "Q 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 2,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 7-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 3,"from node" := 7,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 8-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 4,"from node" := 8,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 9-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 5,"from node" := 9,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 10-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node":= 6,"from node" := 10,deviation:=50000);
END_FUNCTION

```

- Double Bus, Double Breaker:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
  //The network can be fully defined by calling the network function for
  every pair of nodes.
  //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
  switch and false open switch).
  //If two nodes are short circuited then set switch=true.
  //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
  mention this, because it is the preset situation.
  //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
  others are considered unused.

  //Bus 1 breakers:
  "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 3, state :="CB 1-3", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 4, state :="CB 1-4", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 5, state :="CB 1-5", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 6, state :="CB 1-6",type:="Protocol".
  Breaker);

  //Bus 2 breakers:
  "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 3, state :="CB 2-3", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 4, state :="CB 2-4", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 5, state :="CB 2-5", type:="Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 6, state :="CB 2-6",type:="Protocol".
  Breaker);

  //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
  of the grid.
  //Convention: All other nodes' connections are completely known as
  described here.
  "declare interconnection node"(node := 3);
  "declare interconnection node"(node := 4);
  "declare interconnection node"(node := 5);
  "declare injection node"(node := 6);

  //Display in MVAs and kVs
  "Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
  );

  //Declare the measurements:
  //Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
  //Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
  //If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
  invalid.
  //Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
  something else went wrong, 4 incoherent with switch

  //Voltages:
  //Convention: The final value is in Volts.
  //The node indicates in which node the measurement refers.
  "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
  1":P,node := 1,deviation:=1000);
  "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
  2":P,node := 2,deviation:=1000);

```

```

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 2,deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 2,deviation:=50000);

END_FUNCTION

```

- Ring Bus:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
//The network can be fully defined by calling the network function for
every pair of nodes.
//The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
switch and false open switch).
//If two nodes are short circuited then set switch=true.
//If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
mention this, because it is the preset situation.
//Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
others are considered unused.

//Breakers:
"Network"("node 1" := 3, "node 2" := 4, state := "CB 3-4", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 4, "node 2" := 5, state := "CB 4-5", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 5, "node 2" := 6, state := "CB 5-6", type := "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1" := 6, "node 2" := 3, state := "CB 6-3", type := "Protocol".
Breaker);

```

```

//Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
//Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.
"declare interconnection node"(node := 3);
"declare interconnection node"(node := 4);
"declare interconnection node"(node := 5);
"declare injection node"(node := 6);

//Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

//Declare the measurements:
//Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

//Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V3":
P,node := 3,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V4":
P,node := 4,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V5":
P,node := 5,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V6":
P,node := 6,deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 3-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 3,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 6-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 6,deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 3-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 3,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 6-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 6,deviation:=50000);

END_FUNCTION

```

- Breaker and a Half:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

```

```

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
    others are considered unused.

    //Branch 1 breakers:
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 3, state :="CB 1-3", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 3,"node 2":= 4, state :="CB 3-4", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 4,"node 2":= 2, state :="CB 4-2", type:="Protocol".
Breaker);

    //Branch 2 breakers:
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 5, state :="CB 1-5", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 5,"node 2":= 6, state :="CB 5-6", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 6,"node 2":= 2, state :="CB 6-2", type:="Protocol".
Breaker);

    //Branch 3 breakers:
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 7, state :="CB 1-7", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 7,"node 2":= 8, state :="CB 7-8", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 8,"node 2":= 2, state :="CB 8-2", type:="Protocol".
Breaker);

    //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
    of the grid.
    //Convention: All other nodes' connections are completely known as
    described here.
    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare interconnection node"(node := 6);
    "declare injection node"(node := 7);
    "declare injection node"(node := 8);

    //Display in MVAs and kVs
    "Define display units"(
        voltage := 1000,
        power := 1000000
    );

    //Declare the measurements:
    //Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
    //Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
    //If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
    invalid.
    //Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
    something else went wrong, 4 incoherent with switch

    // Voltages:
    //Convention: The final value is in Volts.
    //The node indicates in which node the measurement refers.
    "measure voltage"(BIPOLAR := false,HI_LIM := 500000,LO_LIM := 0,IN := "V1":
P,node := 1,deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false,HI_LIM := 500000,LO_LIM := 0,IN := "V2":
P,node := 2,deviation:=1000);

```

```

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN :="P13":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 3,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P34":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 4,"from node" := 3,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P42":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 4,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P15":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 5,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P56":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 6,"from node" := 5,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P62":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 6,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P17":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 7,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P78":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 8,"from node" := 7,deviation:=50000);
"measure active flow"(IN :="P82":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 8,deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN :="Q13":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 3,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q34":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 4,"from node" := 3,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q42":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 4,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q15":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 5,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q56":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 6,"from node" := 5,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q62":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 6,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q17":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 7,"from node" := 1,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q78":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 8,"from node" := 7,deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN :="Q82":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 8,deviation:=50000);

```

END_FUNCTION

- Breaker and a Third:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

```

BEGIN

```

//The network can be fully defined by calling the network function for
every pair of nodes.
//The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
switch and false open switch).
//If two nodes are short circuited then set switch=true.
//If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
mention this, because it is the preset situation.
//Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
others are considered unused.

//Branch 1 breakers:
"Network"("node 1":= 1,"node 2":= 3, state :="CB 1-3", type:="Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 3,"node 2":= 4, state :="CB 3-4", type:="Protocol".
Breaker);

```

```

    "Network"("node 1":= 4,"node 2":= 5, state := "CB 4-5", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 5,"node 2":= 2, state := "CB 5-2", type:= "Protocol".
Breaker);

    // Branch 2 breakers :
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 6, state := "CB 1-6", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 6,"node 2":= 7, state := "CB 6-7", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 7,"node 2":= 8, state := "CB 7-8", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 8,"node 2":= 2, state := "CB 8-2", type:= "Protocol".
Breaker);

    // Branch 3 breakers :
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 9, state := "CB 1-9", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 9,"node 2":=10, state := "CB 9-10", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 10,"node 2":= 11, state := "CB 10-11", type:= "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 11,"node 2":= 2, state := "CB 11-2", type:= "Protocol".
Breaker);

    // Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
    // Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.
    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare interconnection node"(node := 6);
    "declare interconnection node"(node := 7);
    "declare interconnection node"(node := 8);
    "declare injection node"(node := 9);
    "declare injection node"(node := 10);
    "declare injection node"(node := 11);

    // Display in MVAs and kVs
    "Define display units"(
        voltage := 1000,
        power := 1000000
    );

    // Declare the measurements:
    // Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
    // Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
    // If there 's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
    // Convention: 0 no measurement, 1 fine mesuerement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

    // Voltages :
    // Convention: The final value is in Volts.
    // The node indicates in which node the measurement refers.
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V1":
P, node := 1, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V2":
P, node := 2, deviation:=1000);

    // Flows:
    // Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node".
    // Convention: the final value in Watts.
    // Activew flows
    "measure active flow"(IN := "P1 3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node":= 3, "from node" := 1, deviation:=50000);

```

```

    "measure active flow"(IN := "P3 4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 4,"from node" := 3,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P4 5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 5,"from node" := 4,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P5 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 5,deviation:=50000);

    "measure active flow"(IN := "P1 6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 6,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P6 7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 7,"from node" := 6,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P7 8":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 8,"from node" := 7,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P8 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 8,deviation:=50000);

    "measure active flow"(IN := "P1 9":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 9,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P9 10":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000,BIPOLAR := true,"to node":=10,"from node" := 9,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P10 11":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM
    :=-1000000,BIPOLAR := true,"to node":=11,"from node" :=10,deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P11 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=-1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" :=11,deviation:=50000);

    // Inactive flows
    // Nothing in this configuration example.
    "measure inactive flow"(IN := "Q1 3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 3,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q3 4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 4,"from node" := 3,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q4 5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 5,"from node" := 4,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q5 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 5,deviation:=50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q1 6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 6,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q6 7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 7,"from node" := 6,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q7 8":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 8,"from node" := 7,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q8 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" := 8,deviation:=50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q1 9":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 9,"from node" := 1,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q9 10":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000,BIPOLAR := true,"to node":=10,"from node" := 9,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q10 11":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000,BIPOLAR:= true,"to node":=11,"from node" :=10,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q11 2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
    -1000000,BIPOLAR := true,"to node":= 2,"from node" :=11,deviation:=50000);

```

END_FUNCTION

- Ring Tripod:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.

```



```

//Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
others are considered unused.

//Breakers:
"Network"("node 1":= 3,"node 2":= 4, state := "CB 3-4", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 4,"node 2":= 5, state := "CB 4-5", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 5,"node 2":= 6, state := "CB 5-6", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 6,"node 2":= 3, state := "CB 6-3", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 3,"node 2":= 7, state := "CB 3-7", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 7,"node 2":= 5, state := "CB 7-5", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 4,"node 2":= 8, state := "CB 4-8", type:= "Protocol".
Breaker);
"Network"("node 1":= 8,"node 2":= 6, state := "CB 8-6", type:= "Protocol".
Breaker);

//Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
//Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.
"declare interconnection node"(node := 3);
"declare interconnection node"(node := 4);
"declare interconnection node"(node := 7);
"declare interconnection node"(node := 8);
"declare injection node"(node := 5);
"declare injection node"(node := 6);

//Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

//Declare the measurements:
//Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there 's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measuerement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

//Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V3":
P,node := 3,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V4":
P,node := 4,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V5":
P,node := 5,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V6":
P,node := 6,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V7":
P,node := 7,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V8":
P,node := 8,deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 3-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=

```

```

-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 3, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 6-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 6, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 3-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 3, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 7-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 7, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 4-8":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 8, "from node" := 4, deviation:=50000);
  "measure active flow"(IN := "P 8-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 8, deviation:=50000);

  // Inactive flows
  // Nothing in this configuration example.
  "measure inactive flow"(IN := "Q 3-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 3, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 6-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 6, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 3-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 3, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 7-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 7, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 4-8":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 8, "from node" := 4, deviation:=50000);
  "measure inactive flow"(IN := "Q 8-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 8, deviation:=50000);

END_FUNCTION

```

- Ring Bridge:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
  //The network can be fully defined by calling the network function for
  every pair of nodes.
  //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
  switch and false open switch).
  //If two nodes are short circuited then set switch=true.
  //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
  mention this, because it is the preset situation.
  //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
  others are considered unused.

  "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 4, state := "CB34", type := "Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1" := 4, "node 2" := 5, state := "CB45", type := "Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1" := 5, "node 2" := 6, state := "CB56", type := "Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1" := 6, "node 2" := 7, state := "CB67", type := "Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1" := 7, "node 2" := 8, state := "CB78", type := "Protocol".
  Breaker);
  "Network"("node 1" := 8, "node 2" := 3, state := "CB83", type := "Protocol".
  Breaker);

  "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 9, state := "s39", type := "Protocol". Switch
);

```

```

    "Network"("node 1" := 5, "node 2" := 9, state := "s59", type := "Protocol".Switch
);
    "Network"("node 1" := 6, "node 2" := 10, state := "s610", type := "Protocol".Switch
);
    "Network"("node 1" := 8, "node 2" := 10, state := "s810", type := "Protocol".Switch
);
    "Network"("node 1" := 9, "node 2" := 10, state := "CB910", type := "Protocol".
Breaker);

    // Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
    // Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.

    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare interconnection node"(node := 6);
    "declare injection node"(node := 7);
    "declare injection node"(node := 8);

    // Display in MVAs and kVs
    "Define display units"(
        power := 1000000,
        voltage := 1000
    );

    // Declare the measurements:
    // Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
    // Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
    // If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
    // Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

    // Voltages:
    // Convention: The final value is in Volts.
    // The node indicates in which node the measurement refers.
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V6":
P, node := 6, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V7":
P, node := 7, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V3":
P, node := 3, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V4":
P, node := 4, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V5":
P, node := 5, deviation:=1000);
    "measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V8":
P, node := 8, deviation:=1000);

    // Flows:
    // Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
    // Convention: the final value in Watts.
    // Active flows
    "measure active flow"(IN := "P34":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 3, deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P45":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4, deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P56":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5, deviation:=50000);

    "measure active flow"(IN := "P67":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 6, deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P78":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 8, "from node" := 7, deviation:=50000);
    "measure active flow"(IN := "P83":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,

```

```

BIPOLAR := true,"to node":= 3,"from node" := 8,deviation:=50000);

    "measure active flow"(IN := "P910":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
    BIPOLAR := true,"to node":=10,"from node" := 9,deviation:=50000);

    // Inactive flows
    // Nothing in this configuration example.
    "measure inactive flow"(IN := "Q34":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 4,"from node" := 3,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q45":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 5,"from node" := 4,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q56":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 6,"from node" := 5,deviation:=50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q67":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 7,"from node" := 6,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q78":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 8,"from node" := 7,deviation:=50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q83":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":= 3,"from node" := 8,deviation:=50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q910":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true,"to node":=10,"from node":= 9,deviation:=50000);

END_FUNCTION

```

- Crossed Ring:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
    others are considered unused.

    //Row breakers:
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 2, state := "CB 1-2", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 2, "node 2" := 3, state := "CB 2-3", type:="Protocol
".Breaker);
    "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 1, state := "CB 3-1", type:="Protocol
".Breaker);

    "Network"("node 1" := 4, "node 2" := 5, state := "CB 4-5", type:="Protocol
".Breaker);
    "Network"("node 1" := 5, "node 2" := 6, state := "CB 5-6", type:="Protocol
".Breaker);
    "Network"("node 1" := 6, "node 2" := 4, state := "CB 6-4", type:="Protocol
".Breaker);

    //Column breakers:
    "Network"("node 1":= 1,"node 2":= 4, state := "CB 1-4", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 2,"node 2":= 5, state := "CB 2-5", type:="Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1":= 3,"node 2":= 6, state := "CB 3-6", type:="Protocol".
Breaker);

    //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
    of the grid.
    //Convention: All other nodes' connections are completely known as
    described here.

```

```

"declare interconnection node"(node := 1);
"declare interconnection node"(node := 2);
"declare interconnection node"(node := 3);
"declare interconnection node"(node := 4);
"declare injection node"(node := 5);
"declare injection node"(node := 6);

//Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

//Declare the measurements:
//Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

// Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
1":P, node := 1, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
2":P, node := 2, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
3":P, node := 3, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
4":P, node := 4, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
5":P, node := 5, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
6":P, node := 6, deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 3-1":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 1, "from node" := 3, deviation:=50000);

"measure active flow"(IN := "P 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 6-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 6, deviation:=50000);

"measure active flow"(IN := "P 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 3-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 3, deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=

```

```

-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 3-1":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 1, "from node" := 3, deviation := 50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q 4-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 4, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 5-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 5, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 6-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 6, deviation := 50000);

    "measure inactive flow"(IN := "Q 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 3-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 3, deviation := 50000);

```

END_FUNCTION

- 4x6 Network:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
    every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
    switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
    mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
    others are considered unused.

    // External triangle breakers:
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 2, state := "CB 1-2", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 2, "node 2" := 3, state := "CB 2-3", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 1, state := "CB 3-1", type := "Protocol".
Breaker);

    // Internal breakers:
    "Network"("node 1" := 1, "node 2" := 4, state := "CB 1-4", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 2, "node 2" := 5, state := "CB 2-5", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 3, "node 2" := 6, state := "CB 3-6", type := "Protocol".
Breaker);

    // Central breakers:
    "Network"("node 1" := 4, "node 2" := 7, state := "CB 4-7", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 5, "node 2" := 7, state := "CB 5-7", type := "Protocol".
Breaker);
    "Network"("node 1" := 6, "node 2" := 7, state := "CB 6-7", type := "Protocol".
Breaker);

    // Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
    of the grid.
    // Convention: All other nodes' connections are completely known as
    described here.
    "declare interconnection node"(node := 2);
    "declare interconnection node"(node := 3);
    "declare interconnection node"(node := 4);
    "declare interconnection node"(node := 5);
    "declare interconnection node"(node := 6);

```

```

"declare injection node"(node := 1);
"declare injection node"(node := 7);

//Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

//Declare the measurements:
//Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

// Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
1":P,node := 1,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
2":P,node := 2,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
3":P,node := 3,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
4":P,node := 4,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
5":P,node := 5,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
6":P,node := 6,deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V
7":P,node := 7,deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 3-1":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 1, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 3-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 4-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 4, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 5-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 5, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P 6-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 6, deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-2":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 2-3":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 2, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 3-1":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 1, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q 1-4":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);

```

```

    "measure inactive flow"(IN := "Q 2-5":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 2, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 3-6":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 6, "from node" := 3, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 4-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 4, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 5-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 5, deviation := 50000);
    "measure inactive flow"(IN := "Q 6-7":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 6, deviation := 50000);

```

END_FUNCTION

• Pyramid Station:

```

FUNCTION "Configuration" : Void
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }
VERSION : 0.1

BEGIN
    //The network can be fully defined by calling the network function for
every pair of nodes.
    //The switch parameter is given the switch input variable (true is closed
switch and false open switch).
    //If two nodes are short circuited then set switch=true.
    //If two active nodes are isolated then switch=false. There is no need to
mention this, because it is the preset situation.
    //Convention: All nodes that are referenced are considered used nodes. All
others are considered unused.

    "Network"("node 1":=1, "node 2":=2, state := "CB12", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=1, "node 2":=3, state := "CB13", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=1, "node 2":=4, state := "CB14", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=3, "node 2":=4, state := "S34", type := "Protocol". Switch);

    "Network"("node 1":=3, "node 2":=5, state := "CB35", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=5, "node 2":=6, state := true, type := "Protocol". Short
circuit");
    "Network"("node 1":=6, "node 2":=3, state := "s63", type := "Protocol". Switch);
    "Network"("node 1":=6, "node 2":=2, state := "s62", type := "Protocol". Switch);

    "Network"("node 1":=3, "node 2":=7, state := "CB37", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=7, "node 2":=8, state := true, type := "Protocol". Short
circuit");
    "Network"("node 1":=8, "node 2":=3, state := "s83", type := "Protocol". Switch);
    "Network"("node 1":=8, "node 2":=2, state := "s82", type := "Protocol". Switch);

    "Network"("node 1":=4, "node 2":=9, state := "CB49", type := "Protocol". Breaker);
    "Network"("node 1":=9, "node 2":=10, state := TRUE, type := "Protocol". Short
circuit");
    "Network"("node 1":=10, "node 2":=4, state := "s104", type := "Protocol". Switch);
    "Network"("node 1":=10, "node 2":=2, state := "s102", type := "Protocol". Switch);

    "Network"("node 1":=4, "node 2":=11, state := "CB411", type := "Protocol". Breaker)
;
    "Network"("node 1":=11, "node 2":=12, state := TRUE, type := "Protocol". Short
circuit");
    "Network"("node 1":=12, "node 2":=4, state := "s124", type := "Protocol". Switch);
    "Network"("node 1":=12, "node 2":=2, state := "s122", type := "Protocol". Switch);

    //Interconnection nodes, the nodes that connect the substation to the rest
of the grid.
    //Convention: All other nodes' connections are completely known as
described here.

    "declare interconnection node"(node:=5);
    "declare interconnection node"(node:=7);
    "declare interconnection node"(node:=9);
    "declare injection node"(node := 11);

```



```

//Display in MVAs and kVs
"Define display units"(
    power := 1000000,
    voltage := 1000
);

//Declare the measurements:
//Convention: The measurements' input parameters work like SCALE's.
//Thus in is bounded by SCALE conventions [0,27648] or [-27648,27648].
//If there's something wrong in SCALE, then the measurement is considered
invalid.
//Convention: 0 no measurement, 1 fine measurement, 2 out of bounds, 3
something else went wrong, 4 incoherent with switch

//Voltages:
//Convention: The final value is in Volts.
//The node indicates in which node the measurement refers.
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V1":
P,node := 1, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V2":
P,node := 2, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V3":
P,node := 3, deviation:=1000);
"measure voltage"(BIPOLAR := false, HI_LIM := 500000, LO_LIM := 0, IN := "V4":
P,node := 4, deviation:=1000);

//Flows:
//Convention: Positive flow means flow from the "from node" to the "to node
".
//Convention: the final value in Watts.
//Active flows
"measure active flow"(IN := "P12":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P13":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P14":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P35":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P37":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P49":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 9, "from node" := 4, deviation:=50000);
"measure active flow"(IN := "P411":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM := -1000000,
BIPOLAR := true, "to node" := 11, "from node" := 4, deviation:=50000);

//Inactive flows
//Nothing in this configuration example.
"measure inactive flow"(IN := "Q12":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 2, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q13":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 3, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q14":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 4, "from node" := 1, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q35":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 5, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q37":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 7, "from node" := 3, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q49":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 9, "from node" := 4, deviation:=50000);
"measure inactive flow"(IN := "Q411":P, HI_LIM := 1000000, LO_LIM :=
-1000000, BIPOLAR := true, "to node" := 11, "from node" := 4, deviation:=50000);

END_FUNCTION

```


Βιβλιογραφία

- [AE04] A. Abur and A. G. Exposito, *Power system state estimation: Theory and implementation*. CRC Press, 2004.
- [AGR05] E. N. Asada, A. V. Garcia, and R. Romero, “Identifying multiple interacting bad data in power system state estimation,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, IEEE, 2005, pp. 571–577.
- [AVLG14] M. S. Almas, L. Vanfretti, S. Lovlund, and J. Gjerde, “Open source scada implementation and pmu integration for power system monitoring and control applications,” in *PES General Meeting| Conference & Exposition, 2014 IEEE*, IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [AVSM98] O. Alsac, N. Vempati, B. Stott, and A. Monticelli, “Generalized state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 3, pp. 1069–1075, 1998.
- [BB97] L. A. Bryan and E. A. Bryan, “Programmable controllers,” *Industrial Text and Videocompany*, 1997.
- [Ber09] H. Berger, *Σχεδίαση Εφαρμογών Αυτοματισμού με τη γλώσσα STEP 7 σε LAD και FBD*, trans. by X. Μήλιος. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα, 2009, isbn: 960-8050-66-9.
- [Ber12] ———, *Automating with SIMATIC: Controllers, Software, Programming, Data*. John Wiley & Sons, 2012.
- [Ber14a] ———, *Automating with SIMATIC S7-300 inside TIA Portal: Configuring, Programming and Testing with STEP 7 Professional*. Publicis Publishing, Erlangen, 2014.
- [Ber14b] ———, *Automating with STEP 7 in STL and SCL: SIMATIC S7-300/400 Programmable Controllers*. John Wiley & Sons, 2014.
- [BLW03] K.-P. Brand, V. Lohmann, and W. Wimmer, *Substation automation handbook*. Utility Automation Consulting Lohmann Bremgarten, 2003.
- [BNA+03] W. Baass, J. Newbury, R. Al-Umair, H. Lauw, I. Ojanguren, I. Viziteu, D. Rebattu, D. Holstein, L. Karsenti, H. Schubert, *et al.*, “The automation of new and existing substations: Why and how,” *CIGRE–Paris, WG B5–07*, 2003.
- [Bol15] W. Bolton, *Programmable logic controllers*. Newnes, 2015.
- [Bru08] C. Brunner, “IEC 61850 for power system communication,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T& D. IEEE/PES*, IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [BV+03] W. Baass, I. Viziteu, *et al.*, “Why do existing substations need to be automated,” *CIGRE Colloquium Sydney*, 2003.
- [BW03] D. Bailey and E. Wright, *Practical SCADA for industry*. Newnes, 2003.

- [CCM+11] 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.
- [CCM09] E. Caro, A. J. Conejo, and R. Mínguez, “Power system state estimation considering measurement dependencies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, no. 24, pp. 1875–1885, 2009.
- [Chr00] R. Christie, “Power systems test case archive,” *Electrical Engineering dept., University of Washington*, 2000, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [CLRS10] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein, *Εισαγωγή στους αλγορίθμους, ΤΟΜΟΣ Ι*, trans. by Ι. Παπαδόγγονας. ΗΡΑΚΛΕΙΟ: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2010, isbn: 978-960-524-225-1.
- [CRM84] T. V. Cutsem, M. Ribbens-Pavell, and L. Mili, “Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, no. 11, pp. 3239–3252, 1984.
- [CRW04] G. R. Clarke, D. Reynders, and E. Wright, *Practical modern SCADA protocols: DNP3, 60870.5 and related systems*. Newnes, 2004.
- [CSG+10] J. Chen, N. Sarma, F. Garcia, A. Sills, P. Shrestha, T. D. Mohanadhas, J. Weatherly, T. Mortensen, and J. Dumas, “Ercot’s experience in identifying parameter and topology errors using state estimator,” in *Power and Energy Society General Meeting, IEEE*, 2010, pp. 1–6.
- [Dag05] J. Dagle, “Supervisory control and data acquisition (scada) introduction,” Pacific Northwest National Laboratory, Tech. Rep., 2005, Grainger Lecture Series for the University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [DSF06] E. Demeter, T. S. Sidhu, and S. O. Faried, “An open-system approach to power system protection and control integration,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 1, pp. 30–37, 2006.
- [EJ01] A. G. Expósito and A. d. I. V. Jaén, “Reduced substation models for generalized state estimation,” *Power Engineering Review, IEEE*, vol. 21, no. 10, pp. 61–61, 2001.
- [Far12] M. Farrokhhabadi, “Automated topology processing for conventional, phasor-assisted and phasor-only state estimators,” Master’s thesis, Royal Institute of Technology (KTH), 2012.
- [Gir10] J. Giri, “Evolution of energy control centers, energy management systems - ems,” ALSTOM Grid, Tech. Rep., 2010.
- [Gri07] S. Grijalva, “Topology processing and real-time applications,” in *2007 PowerWorld Client Conference, New Orleans, Louisiana, USA • October 25-26*, PowerWorld Corporation, 2007.
- [Hos07] L. Hossenlopp, “Engineering perspectives on IEC 61850,” *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 3, no. 5, pp. 45–50, 2007.
- [IEC] IEC International Electrotechnical Commission, *Communication networks and systems in substations*, work in progress, IEC Std. 61850, Available: www.iec.ch.
- [IEC+03a] IEC International Electrotechnical Commission *et al.*, *Communication networks and systems in substations—part 5: Communication requirements for functions and device models*, IEC 61850–5, 2003.

- [IEC+03b] —, *Communication networks and systems in substations—part 7-1: Basic communication structure for substation and feeder equipment—principles and models*, IEC 61850–7-1, 2003.
- [IEC+03c] —, *Communication networks and systems in substations—part 7-2: Basic communication structure for substation and feeder equipment—abstract communication service interface (acsi)*, IEC 61850–7-2, 2003.
- [IEC02] IEC International Electrotechnical Commission, *Common interface model*, IEC Std. 61970-301, 2002.
- [IEC03a] —, *IEC standard for communication network and systems in substations*, IEC 61850, 2003.
- [IEC03b] —, *System interfaces for distribution management*, IEC Std. 61968 (Draft), Available: www.iec.ch, 2003.
- [IEC90] —, *IEC standard for telecontrol equipment and systems*, IEC 60870-4, 1990.
- [Ili14] M. Ilić, “The role of sensing, estimation and communications in the emerging electric energy systems,” *EEESmartGridComm2014*, 2014.
- [JK02] S. Jakovljevic and M. Kezunovic, “Advanced substation data collecting and processing for state estimation enhancement,” in *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*, IEEE, vol. 1, 2002, pp. 201–206.
- [JK03] —, “Software for enhanced monitoring in integrated substations,” in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, IEEE, vol. 4, 2003, 6–pp.
- [JRE+05] A. Jaen, P. C. Romero, A. G. Expósito, *et al.*, “Substation data validation by a local three-phase generalized state estimator,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 1, pp. 264–271, 2005.
- [Kez13] M. Kezunovic, “The next generation energy management system design,” Texas A&M University, Tech. Rep., 2013.
- [KK02] G. N. Korres and P. J. Katsikas, “Identification of circuit breaker statuses in WLS state estimator,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 3, pp. 818–825, 2002.
- [KK03] G. N. Korres and P. J. Katsikas, “Unified observability analysis and measurement placement in generalized state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 1, pp. 324–333, 2003.
- [KKC+03] G. N. Korres, P. J. Katsikas, K. Clements, P. W. Davis, *et al.*, “Numerical observability analysis based on network graph theory,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 1035–1045, 2003.
- [KKC06] G. N. Korres, P. Katsikas, and G. Chatzarakis, “Substation topology identification in generalized state estimation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 195–206, 2006.
- [KM11] 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, 2011.
- [KM14] J. Krstulovic and V. Miranda, “Selection of measurements in topology estimation with mutual information,” in *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*, IEEE, 2014, pp. 589–596.

- [KMH+08] B. Kasztenny, D. Mcginn, S. Hodder, D. Ma, J. Mazereeuw, and M. Goraj, “Practical IEC61850–9-2 process bus architecture driven by topology of the primary equipment,” in *Proc. Int. Council Large Electric Syst. (CIGRE) Conf*, 2008, B5–105.
- [Kor] G. N. Korres, *Σημειώσεις: Ροή φορτίου, εκτίμηση κατάστασης*, mycourses.ntua.gr/document/goto/?url=%2FState_Estimation_Theory%2BExamples.pdf&cidReq=ECE1220, Σημειώσεις από το μάθημα “Κέντρα Ελέγχου Ενέργειας”.
- [Kor02] —, “A robust method for equality constrained state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 17, no. 2, pp. 305–314, 2002.
- [Kor08] —, *Εποπτεία και Διαχείριση Ενεργειακών Συστημάτων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008.
- [Kor10] —, “A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 3, pp. 1531–1541, 2010.
- [Kor11a] —, “A distributed multiarea state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 1, pp. 73–84, 2011.
- [Kor11b] —, “An integer-arithmetic algorithm for observability analysis of systems with SCADA and PMU measurements,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1388–1402, 2011.
- [KVA+13] V. Kekatos, E. Vlahos, D. Ampeliotis, G. Giannakis, and K. Berberidis, “A decentralized approach to generalized power system state estimation,” in *Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), 2013 IEEE 5th International Workshop on*, IEEE, 2013, pp. 77–80.
- [KWU+05] B. Kasztenny, J. Whatley, E. Udren, J. Burger, D. Finney, and M. Adamiak, “Unanswered questions about IEC 61850—what needs to happen to realize the vision?” In *32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA*, 2005.
- [LCC+04] E. M. Lourenço, A. S. Costa, K. Clements, *et al.*, “Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, pp. 1206–1215, 2004.
- [LCC+06] E. M. Lourenço, A. J. Costa, K. Clements, R. Cernev, *et al.*, “A topology error identification method directly based on collinearity tests,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 4, pp. 1920–1929, 2006.
- [Leã+93] J. Leão *et al.*, “Identification of topology errors in power system state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 1531–1538, 1993.
- [LP06] S. Lefebvre and J. Prévost, “Topology error detection and identification in network analysis,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, no. 5, pp. 293–305, 2006.
- [MBD+14] V. Madani, J. Barich, D. Day, J. Gotesky, A. K. Jampala, J. Giri, M. Parashar, F. Rahmnatian, V. Gharpure, R. King, *et al.*, “Advanced ems applications using synchrophasor systems for grid operation,” in *T&D Conference and Exposition, 2014 IEEE PES*, IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [McC] J. D. McCalley, *Introduction to system operation, optimization, and control*.
- [McD12] J. D. McDonald, *Electric power substations engineering*. CRC press, 2012.
- [Mel06] S. A. P. Meliopoulos, “Power system modeling, analysis and control,” DRAFT and INCOMPLETE, 1990-2006.

- [Mel10] —, “The substation of the future: A feasibility study,” Georgia Institute of Technology and Washington State University, Tech. Rep., 2010, To be completed.
- [Mel12] —, “Power system relaying,” To be completed., 1996-2012.
- [MG91] A. Monticelli and A. Garcia, “Modeling zero impedance branches in power system state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 4, pp. 1561–1570, 1991.
- [Mon93] A. Monticelli, “Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1143–1149, 1993.
- [Mon99] —, *State estimation in electric power systems: A generalized approach*. Springer Science & Business Media, 1999, vol. 507.
- [Mor13] B. Morais, “Emerging technologies and future trends in substation automation systems for the protection, monitoring and control of electrical substations,” Master’s thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [MS71] H. M. Merrill and F. C. Schweppe, “Bad data suppression in power system static state estimation,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, no. 6, pp. 2718–2725, 1971.
- [MWY86] A. Monticelli, F. F. Wu, and M. Yen, “Multiple bad data identification for state estimation by combinatorial optimization,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 3, pp. 361–369, 1986.
- [NKM09] P. Nguyen, W. Kling, and J. Myrzik, “Completely decentralized state estimation for active distribution network,” in *Proceedings of the Ninth IASTED European Conference*, vol. 681, 2009, p. 245.
- [Oep12] T. S. Oepomo, “Graph theory and topology for 3 phase power system under faulted studies,” *Int. J. Res. Rev. Appl. Sci*, vol. 10, no. 2, pp. 219–246, 2012.
- [PDL+07] S. Piereti, A. Delbem, J. London, N. Bretas, *et al.*, “Tracking network topology processor using node-depth representation,” in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, IEEE, 2007, pp. 143–148.
- [Poz03] M. P. Pozzuoli, “Ethernet in substation automation applications—issues and requirements,” in *Proc. Western Power Delivery Automation Conf*, 2003.
- [RSW11] W. Rebizant, J. Szafran, and A. Wiszniewski, *Digital signal processing in power system protection and control*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [Sch70] F. C. Schweppe, “Power system static-state estimation, Part III: Implementation,” *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, no. 1, pp. 130–135, 1970.
- [SG05] T. Sidhu and P. K. Gangadharan, “Control and automation of power system substation using IEC61850 communication,” in *Control Applications, 2005. CCA 2005. Proceedings of 2005 IEEE Conference on*, IEEE, 2005, pp. 1331–1336.
- [SG91] N. Singh and H. Glavitsch, “Detection and identification of topological errors in online power system analysis,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 1, pp. 324–331, 1991.
- [SIEa] SIEMENS, *SIMATIC S7-SCL V5.3 for S7-300/400*, SIEMENS AG.
- [SIEb] —, *Structured control language (SCL) for S7-300/S7-400 programming*, SIEMENS AG.
- [SIE99] —, *Training center for automation and drives: Επεξεργασία αναλογικών*, SIEMENS, 1999.

- [SR70] F. C. Schweppe and D. B. Rom, "Power system static-state estimation, Part II: Approximate model," *Power apparatus and systems, iee transactions on*, no. 1, pp. 125–130, 1970.
- [Ste03] F. Steinhauser, "New challenges with substations utilizing communication networks," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, IEEE, vol. 2, 2003, 4–pp.
- [Str03] C. Strauss, *Practical electrical network automation and communication systems*. Newnes, 2003.
- [SW70] F. C. Schweppe and J. Wildes, "Power system static-state estimation, Part I: Exact model," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–125, Jan. 1970, issn: 0018-9510. doi: 10.1109/TPAS.1970.292678.
- [SY07] T. S. Sidhu and Y. Yin, "Modelling and simulation for performance evaluation of IEC61850-based substation communication systems," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3, pp. 1482–1489, 2007.
- [Tay11] G. Taylor, "High performance computing technologies for smart distribution network operation," Brunel University, Electricite de France, Fraunhofer IWES, INDRA, Korona Inzeniting, Tech. Rep., 2011.
- [TJ10] M. Tiegelkamp and K.-H. John, *IEC 61131-3: Programming Industrial Automation Systems*. Springer, 2010.
- [Uki07] A. Ukil, *Intelligent systems and signal processing in power engineering*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [Web] J. Weber, *Powerworld's experience using real time power system models*.
- [WKK06] Y. Wu, M. Kezunovic, and T. Kostic, "The dynamic utilization of substation measurements to maintain power system observability," in *Power Systems Conference and Exposition, 2006 IEEE PES*, IEEE, 2006, pp. 1699–1704.
- [AAB+99] Ε. Αναστασάκης, Λ. Απέκης, Ρ. Βλαστού, Η. Κατσούφης, Α. Κώνστα, Δ. Νταουκάκη, Κ. Παπαδόπουλος, Β. Πέογλος, Π. Πίσσης, Δ. Πίτλιγγερ, Κ. Στεφανής, and Κ. Χριστοδουλίδης, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1999, isbn: 978-960-266-173-4.
- [Θεο07] Ν. Ι. Θεοδώρου, *Ηλεκτρικές Μετρήσεις, Τεύχος Ι: Κλασσικές Μετρήσεις*. Εκδόσεις Συμμετρία, 2007, isbn: 978-960-266-044-7.
- [ΚΔ01] Γ. Κρανάς and Ε. Δασκαλοπούλου, *Βιομηχανικοί αυτοματισμοί και προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές PLC*. Ίων, 2001.
- [Μαρ00] Ν. Μαραντίδης, *Αυτοματισμός με SIMATIC S7*. Αθήνα: Σήμενος ΑΕ, 2000.
- [Μητ10] Δ. Μητροπούλου, "Συγκριτική μελέτη διατάξεων υποσταθμών μεταφοράς υ.τ/μ.τ. και κυτ," Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2010.
- [Παν97] Ν. Πανταζής, *PLC Προγραμματιζόμενοι Λογικοί Ελεγκτές*. Αθήνα: Ίων, 1997, 2η έκδοση.
- [Παπ85] Β. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος Ι μόνιμη κατάσταση λειτουργίας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1985.
- [Σια06] Θ. Σιαμπαλιώτης, "Εργαστηριακό σύστημα προσομοίωσης προγραμματιζόμενου λογικού ελεγκτή," Master's thesis, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [Τζο01] Γ. Τζουνίδης, *ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ PLC'S*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2001.

[Φελ09] Α. Φελλούρης, *Γραμμική Άλγεβρα και Αναλυτική Γεωμετρία*. Αθήνα, 2009.