



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

Ανάλυση Κυβερνοεπιθέσεων στον Εκτιμητή
Κατάστασης στα Συστήματα Ηλεκτρικής
Ενέργειας με Συμβατικές Μετρήσεις

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Ι. Σταματάκης

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018



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

Ανάλυση Κυβερνοεπιθέσεων στον Εκτιμητή
Κατάστασης στα Συστήματα Ηλεκτρικής
Ενέργειας με Συμβατικές Μετρήσεις
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Χρήστος Ι. Σταματάκης

Επιβλέπων : Γεώργιος Κορρές, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 26^η Οκτωβρίου 2018

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Πάυλος Γεωργιλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

.....

ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΣΤΑΜΑΤΑΚΗΣ, 2018

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών και η συνεχής ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, εισάγει νέες απειλές για την ασφάλεια του δικτύου. Ένα δίκτυο που έχει ως βάση του τις επικοινωνίες και τις ψηφιακές συσκευές σε όλες τις πτυχές του, με τόσο αυξημένη πολυπλοκότητα, διατρέχει μεγάλο κίνδυνο να συναντήσει προβλήματα από κακόβουλο λογισμικό ή κυβερνοεπιθέσεις. Αυτές οι απειλές μπορεί να είναι ηθελημένες ή αποτέλεσμα σφάλματος, να προέρχονται από οποιονδήποτε κακόβουλο φορέα, όπως τρομοκρατικές ομάδες ή ανταγωνιστικές κυβερνήσεις. Συνεπώς, η ασφάλεια του δικτύου από τέτοιου είδους επιθέσεις αποτελεί βασικό παράγοντα για την ομαλή λειτουργία και την προστασία του.

Η σημαντικότερη μέθοδος που εξασφαλίζει την εποπτεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η εκτίμηση κατάστασης, η οποία παρέχει μια δυναμική απεικόνιση της κατάστασης του δικτύου. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στις μετρήσεις που μεταφέρουν συσκευές που βρίσκονται διασκορπισμένες σε διάφορα σημεία του δικτύου. Η αλλοίωση αυτών των μετρήσεων αποτελεί μια από τις κυριότερες μορφές κυβερνοεπίθεσης και έχει ως στόχο την οδήγηση του εκτιμητή κατάστασης στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα αναλυθούν οι μορφές επίθεσης και οι τρόποι που αυτές επηρεάζουν τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης καθώς και τον αλγόριθμο ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων για διαφορετικά σενάρια επιθέσεων. Οι προσομοιώσεις επιτεύχθηκαν μέσω της ανάπτυξης κώδικα σε περιβάλλον MATLAB ο οποίος εφαρμόστηκε στα δίκτυα 14 και 57 ζυγών της IEEE, με στόχο την αναπαράσταση απόκρισης του συστήματος σε ρεαλιστικά σενάρια επίθεσης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

εκτίμηση κατάστασης, μέθοδος WLS , μονάδες PMU , μετρήσεις SCADA, ανίχνευση και εντοπισμός σφαλμάτων, κυβερνοεπιθέσεις, μη ανιχνεύσιμη επίθεση, διάνυσμα επίθεσης, μέθοδος «Big M»

ABSTRACT

The integration of new technologies and the constant development of power points introduce new threats to network security. A network based on communications and digital devices in all its aspects, with such increased complexity, is at great risk of encountering problems with malware or cyber attacks. These threats can be deliberate or the result of an error coming from any malicious organization, such as terrorist groups or competing governments. Consequently, network security from such attacks is a key factor in its smooth operation and protection.

The most important method that ensures the supervision of the power system is the state estimation, which provides a dynamic display of the state of the network. This method is based on measurements carrying devices that are scattered across the network. The alteration of these measurements is one of the main forms of cyber-attack and is aimed at driving the status estimator into making erroneous decisions.

In this thesis we will analyze the forms of attack and the ways in which they affect the state estimation algorithm as well as the bad data detection algorithm for different attack scenarios. The simulations were achieved through the development of code MATLAB, which was applied to IEEE 14 and 57 bus networks, in order to represent the system's response to realistic attack scenarios.

KEY WORDS

state estimation, WLS method, PMU devices, SCADA measurements, bad data detection, cyber attacks, stealthy attack, attack vector, «Big M» method

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Γιώργο Κορρέ, τόσο για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και για την πολύτιμη επιστημονική του βοήθεια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον Νικόλαο Μανουσάκη, επίκουρο καθηγητή στο τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για τη συνεργασία του, την αμέριστη βοήθειά του και την υποστήριξη του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Επιπλέον, ξεχωριστά θέλω να ευχαριστήσω τους συμμετέχοντες στην εξεταστική επιτροπή κ. Βουρνά Κωνσταντίνο και κ. Γεωργιάκη Παύλο.

Τις θερμές μου ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο συμφοιτητή μου Μπούτλα Βασίλειο για τη συνεργασία που είχαμε τους τελευταίους μήνες.

Ακόμα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου Γιάννη και Μαρίνα αλλά και στον αδερφό μου Νίκο για την πολύτιμη συμπαράσταση, κατανόηση και κάθε είδους βοήθεια τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	9
1.1	Εξέλιξη της Δομής και Λειτουργίας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Έξυπνο Δίκτυο - Smart Grid	9
1.2	Έξυπνοι Μετρητές - PMU	10
1.3	Εκτίμηση Κατάστασης στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	11
1.4	Αναγκαιότητα Προστασίας έναντι Κυβερνοεπιθέσεων στον Εκτιμητή Κατάστασης	12
2	Εκτίμηση Κατάστασης - State Estimation	13
2.1	Μοντέλο Δικτύου και Παραδοχές	13
2.2	Αναπαράσταση Δικτύου	16
2.3	Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας	17
2.4	Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Γκαουσιανής (Κανονικής) Κατανομής	17
2.5	Συνάρτηση Πιθανοφάνειας	18
2.6	Μοντέλο Μετρήσεων και Παραδοχές	20
2.7	Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης	21
2.8	Η Συνάρτηση των Μετρήσεων $h(x)$	24
2.9	Ιακωβιανή Μήτρα $H(x)$	25
2.10	Η Μήτρα Κέρδους $G(x)$	27
2.11	Παραγοντοποίηση της Μήτρας Κέρδους	28
3	Ανίχνευση και Εντοπισμός Σφαλμάτων - Bad Data Detection	29
4	Κυβερνασφάλεια - Cyber Security	33
4.1	Κυβερνασφάλεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	33
4.2	Εισαγωγή Ψευδών Δεδομένων στους Εκτιμητές Κατάστασης	33
4.3	Μη Ανιχνεύσιμη Επίθεση - Stealthy Attack	34
4.4	Υπολογισμός Βέλτιστου Διανύσματος Επίθεσης	35
5	Προτεινόμενες Μέθοδοι Επίλυσης	37
5.1	Εκτίμηση Κατάστασης - State Estimation	37
5.2	Ανίχνευση και Εντοπισμός Εσφαλμένων Δεδομένων - Bad Data Detection	38
5.2.1	Λειτουργία της Υπορουτίνας Bad Data1	38
5.3	Δημιουργία Βέλτιστου Διανύσματος Επίθεσης - Optimal Attack Vector	39
5.3.1	Πολλαπλές επιθέσεις - Multiple Attacks	40

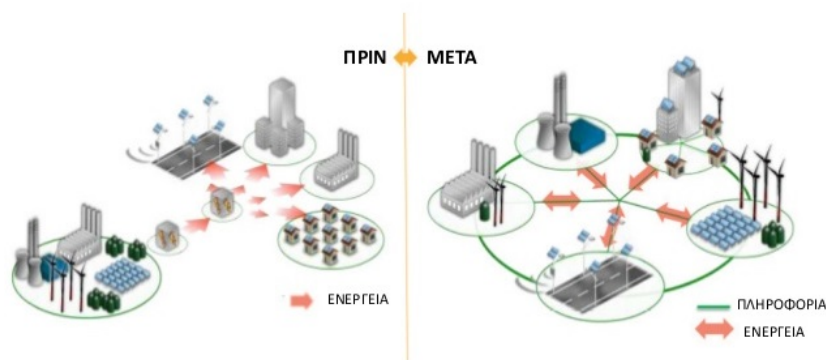
6	Αποτελέσματα	41
6.1	Εκτέλεση του Προγράμματος για Διαφορετικά Σενάρια Επιθέσεων στο Σύστημα 14 Ζυγών IEEE.	41
6.1.1	Σενάριο 1: Χωρίς Επίθεση	42
6.1.2	Σενάριο 2: Εισαγωγή Εσφαλμένης Μέτρησης	49
6.1.3	Σενάριο 3: Εφαρμογή μη Ανιχνεύσιμης Επίθεσης	56
6.1.4	Σενάριο 4: Εφαρμογή βέλτιστης μη ανιχνεύσιμης επίθεσης	61
6.1.5	Σενάριο 5: Εφαρμογή Πολλαπλών Επιθέσεων με Βελτιστοποιημένο Διάνυσμα Επίθεσης	68
6.2	Εκτέλεση του Προγράμματος για Διαφορετικά Σενάρια Επιθέσεων στο Σύστημα 57 Ζυγών IEEE.	74
6.2.1	Σενάριο 1: Χωρίς Επίθεση	74
6.2.2	Σενάριο 2: Εισαγωγή Εσφαλμένης Μέτρησης	79
6.2.3	Σενάριο 3: Εφαρμογή μη Ανιχνεύσιμης Επίθεσης	83
6.2.4	Σενάριο 4: Εφαρμογή Βέλτιστης μη Ανιχνεύσιμης Επίθεσης . . .	90
6.2.5	Σενάριο 5: Εφαρμογή Πολλαπλών Επιθέσεων με Βελτιστοποιημένο Διάνυσμα Επίθεσης	98
6.3	Διερεύνηση Αποτελεσμάτων της «Big M» Μεθόδου για Διαφορετικές Τιμές του M	105
7	Συμπεράσματα	111
7.0.1	Μελλοντική εργασία	113
		113
	Βιβλιογραφία	118

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εξέλιξη της Δομής και Λειτουργίας του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Έξυπνο Δίκτυο - Smart Grid

Ο όρος «Έξυπνο Δίκτυο» αναφέρεται στην προσπάθεια εκσυγχρονισμού του υπάρχοντος ηλεκτρικού δικτύου και τη μετατροπή του σε ένα μοντέρνο, διαλειτουργικό δίκτυο που θα ενσωματώνει τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών στην υποδομή διανομής ενέργειας. Κύριο γνώρισμα της λειτουργίας του αποτελεί η αμφίδρομη ροή τόσο της ενέργειας όσο και των πληροφοριών.



Σχήμα 1.1: Μετάβαση από το συμβατικό στο έξυπνο δίκτυο

Εισάγοντας τις νέες τεχνολογίες επικοινωνιών και πληροφορικής σε καίρια σημεία του δικτύου, επιτυγχάνεται η καλύτερη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και η αυξημένη ενεργητικότητα των καταναλωτών στο σενάριο λειτουργίας του Smart Grid.

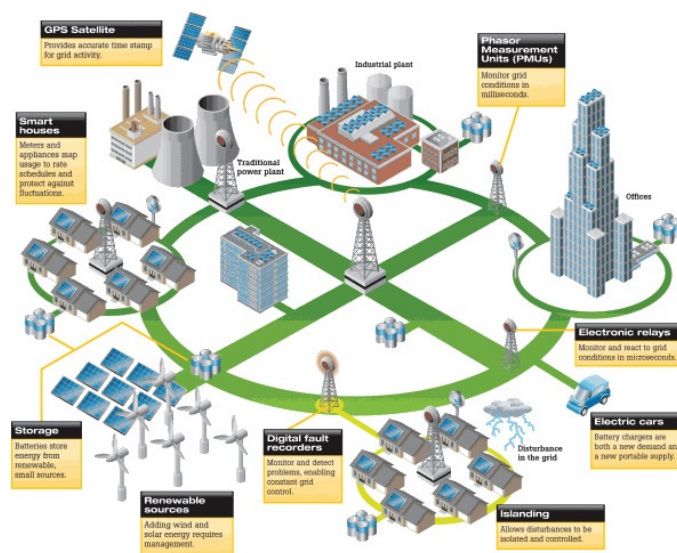
1.2 Έξυπνοι Μετρητές - PMU

Η εγκατάσταση μονάδων PMU αποτελεί μέρος της υλοποίησης του έξυπνου δικτύου, μιας έννοιας που αφορά στον εκσυγχρονισμό του ηλεκτρικού δικτύου σε επίπεδο παραγωγής, μεταφοράς και διανομής. Τα ευρείας κλίμακας δεδομένα του δικτύου λαμβάνονται πλέον από τους έξυπνους μετρητές οι οποίοι μπορούν να ανταποκρίνονται σε πραγματικό χρόνο. Οι διαχειριστές συστημάτων έχουν τη δυνατότητα εκτίμησης της κατάστασης του συστήματος και εκτέλεσης πλήθους λειτουργιών που αποβλέπουν στην προστασία αυτού, καθιστώντας έτσι το σύστημα τροφοδοσίας αυτό-άνοσο σε τυχόν καταστροφικές βλάβες. Τα ευεργετικά χαρακτηριστικά του έξυπνου δικτύου, κύριος εκφραστής των οποίων αποτελεί ο έξυπνος μετρητής, συμβάλλουν στη βέλτιστη αξιοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στην πλευρά της παραγωγής όσο και στην πλευρά της κατανάλωσης.



Σχήμα 1.2: Μονάδα Μέτρησης Φασιδετών (PMU)

Το έξυπνο δίκτυο θα συνδυάζει διεσπαρμένους αισθητήρες, ψηφιακά κανάλια επικοινωνίας, ψηφιακό έλεγχο και τεχνολογία υπολογιστών για να βελτιστοποιήσει την απόδοση, την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Σε επίπεδο παραγωγής και μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες PMU συνιστούν την πιο αποτελεσματική τεχνολογία για την πραγματοποίηση του έξυπνου δικτύου, αφού μπορούν να συλλέγουν, να διανέμουν και να αναλύουν κρίσιμα δεδομένα, τα οποία μετατρέπονται σε χρήσιμη πληροφορία για τη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου.



Σχήμα 1.3: Ένταξη μονάδων PMU στο Έξυπνο Δίκτυο

Η χρήση των δεδομένων που συλλέγονται από τις μονάδες PMU αναμένεται να

βελτιώσει την απόδοση του συστήματος μεταφοράς με την αύξηση της φόρτισης των γραμμών και τη μείωση των απωλειών τους.

1.3 Εκτίμηση Κατάστασης στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Είναι ευνόητο ότι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βρίσκεται συνεχώς στην ασφαλή κανονική κατάσταση. Γι' αυτό απαιτείται συνεχής παρακολούθηση των συνθηκών λειτουργίας από τους χειριστές του, αναγνώριση της κατάστασης στην οποία βρίσκεται και εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών σε περίπτωση που η κατάσταση είναι μη ασφαλής. Οι συμβατικές μετρήσεις που λαμβάνονται από ένα τυπικό Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Δεδομένων (SCADA) είναι ροές ισχύος γραμμών, εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς, μέτρα τάσης ζυγών, ισχείς γεννητριών, φορτία, πληροφορίες κατάστασης διακοπών και θέσεων λήψης μετασχηματιστών. Επιπλέον υπάρχουν και οι λεγόμενες ψευδομετρήσεις που περιλαμβάνουν ονομαστικούς συντελεστές ισχύος σε ζυγούς φορτίου, ονομαστικές τάσεις ζυγών παραγωγής και φορτία υπολογισμένα από μεθοδολογίες πρόβλεψης.

Η απευθείας χρήση των δεδομένων αυτών για την εξαγωγή της κατάστασης του συστήματος δεν είναι εφικτή για διάφορους λόγους. Τα δεδομένα δεν είναι πάντα αξιόπιστα, γιατί συνοδεύονται από σφάλματα στις μετρήσεις και τηλεπικοινωνιακό θόρυβο. Δεν είναι δυνατή η μέτρηση σημαντικών μεγεθών όπως οι φασικές γωνίες τάσης των ζυγών. Επιπλέον, δεν είναι πάντα συμφέρουσα από οικονομικής πλευράς η μετάδοση όλων των μετρήσεων που παράγονται στους υποσταθμούς.

Οι δυσκολίες αυτές αίρονται με την εκτέλεση μιας υπολογιστικής διαδικασίας που λέγεται εκτίμηση κατάστασης. Η εισαγωγή της στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ενίσχυσε δραματικά τις δυνατότητες των συστημάτων SCADA και οδήγησε στην εδραίωση των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS), που διέθεταν πλέον ένα ισχυρό εργαλείο, τον εκτιμητή κατάστασης.

Η λειτουργία του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης γίνεται όλο και πιο σημαντική επειδή είναι το κύριο εργαλείο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του συστήματος, με βάση τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνει από τις μονάδες μέτρησης. Για παράδειγμα, μια από τις αιτίες της κατάρρευσης του ΣΗΕ στη βορειοανατολική Αμερική του 2003 ήταν ο ελλιπής έλεγχος των δεδομένων και η αποτυχία της οργάνωσης του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος που δεν κατάφερε να την περιορίσει. Διαδικασίες όπως η ανάλυση ασφάλειας ΣΗΕ, ή οικονομική κατανομή φορτίου, εξαρτώνται ιδιαίτερα από την ακρίβεια που παρέχονται από την εκτίμηση κατάστασης.

1.4 Αναγκαιότητα Προστασίας έναντι Κυβερνο-επιθέσεων στον Εκτιμητή Κατάστασης

Η ενσωμάτωση των νέων τεχνολογιών, εισάγει νέες απειλές για την ασφάλεια του έξυπνου δικτύου. Ένα δίκτυο που έχει ως βάση του τις επικοινωνίες και τις ψηφιακές συσκευές σε όλες τις πτυχές του, με τόσο αυξημένη πολυπλοκότητα, διατρέχει μεγάλο κίνδυνο να συναντήσει προβλήματα από κακόβουλο λογισμικό ή κυβερνοεπιθέσεις. Αυτές οι απειλές μπορεί να είναι ηθελημένες ή αποτέλεσμα σφάλματος, να προέρχονται από οποιονδήποτε κακόβουλο φορέα, όπως τρομοκρατικές ομάδες ή ανταγωνιστικές κυβερνήσεις. Συνεπώς, η ασφάλεια του δικτύου από τέτοιου είδους επιθέσεις αποτελεί βασικό παράγοντα για την ομαλή λειτουργία και την προστασία του.

Η εκτίμηση κατάστασης είναι μια από τις απαραίτητες εφαρμογές στα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας, επιτρέποντας την ασφαλή λειτουργία των δικτύων μεταφοράς. Οι μετρήσεις που εισάγονται και επεξεργάζονται στον εκτιμητή κατάστασης, περιλαμβάνουν ροές ισχύος, εγχύσεις ισχύος και μέτρα τάσης και ρεύματος. Κύριος στόχος των κυβερνοεπιθέσεων αποτελεί η αλλοίωση αυτών των δεδομένων, ώστε να οδηγήσουν τον εκτιμητή κατάστασης στην εξαγωγή λανθασμένων αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν ως συνέπεια τη λήψη λανθασμένων αποφάσεων από το κέντρο ελέγχου, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες, ακόμα και κατάρρευση ολόκληρου του δικτύου.

Κεφάλαιο 2

Εκτίμηση Κατάστασης - State Estimation

Η εκτίμηση κατάστασης αναφέρεται στην διαδικασία εύρεσης του μέτρου και της γωνίας της τάσεως όλων των ζυγών του δικτύου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί άμεσα με τη χρήση μέσων που περιλαμβάνουν πολύ ακριβείς και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών όλων των ζυγών. Ωστόσο, μια τέτοια προσέγγιση θα ήταν πολύ ευάλωτη σε εσφαλμένες μετρήσεις ή σε σφάλματα τηλεμετρίας. Για να το αντιμετωπίσει αυτό, η εκτίμηση κατάστασης χρησιμοποιεί παραπάνω μετρήσεις από αυτές που χρειάζονται ώστε να φιλτράρει και να αφαιρέσει τις εσφαλμένες, και να υπολογίσει στη συνέχεια τη βέλτιστη εκτίμηση. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν όχι μόνο συμβατικές μετρήσεις ισχύος και τάσης, αλλά επίσης και άλλες όπως μετρήσεις μέτρου ρεύματος και συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης. Ταυτόχρονες μετρήσεις σε διαφορετικά σημεία του δικτύου είναι σχεδόν αδύνατο να γίνουν, επομένως μικρές διαφορές χρόνου μεταξύ των μετρήσεων είναι φυσιολογικές και ανεχτές. Αυτό δικαιολογείται και από το γεγονός ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας η κατάσταση του δικτύου αλλάζει πολύ αργά.

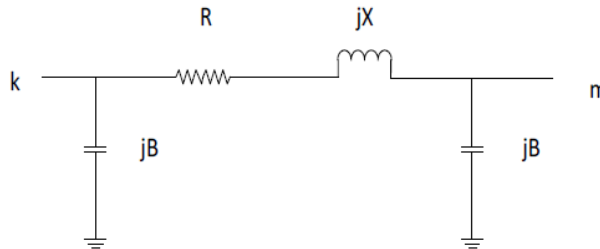
2.1 Μοντέλο Δικτύου και Παραδοχές

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρείται ότι λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση και υπό φυσιολογικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα φορτία και οι ροές ισχύος θεωρούνται τριφασικά, οι γραμμές μεταφοράς είναι γραμμές με αντιμετατεθειμένους αγωγούς και γενικά όλα τα στοιχεία (εγκάρσια ή σε σειρά) είναι συμμετρικά και τριφασικά. Οι παραπάνω παραδοχές επιτρέπουν τη χρήση ενός μονοφασικού ισοδύναμου κυκλώματος θετικής ακολουθίας για την αναπαράσταση του δικτύου. Η λύση που θα προκύψει από αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα, θα είναι επίσης μια συνιστώσα θετικής ακολουθίας της κατάστασης του δικτύου όταν αυτό λειτουργεί στη μόνιμη κατάσταση. Επίσης, όλες οι πληροφορίες και οι παράμετροι του δικτύου εκφράζονται σε ανά μονάδα σύστημα. Ακολουθούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν διάφορα στοιχεία του δικτύου:

- Γραμμές Μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς αναπαρίστανται με το ισοδύναμο μοντέλο «Π» του οπο-

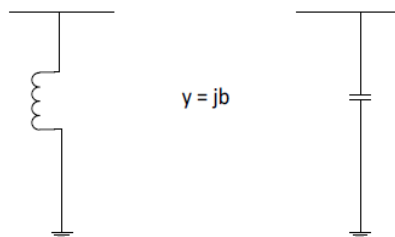
ίου οι παράμετροι αντιστοιχούν στο ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας των γραμμών μεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα, μια γραμμή μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας $R + jX$ και συνολική εγκάρσια αγωγιμότητα ίση με $j2B$ μοντελοποιείται στο εξής κύκλωμα:



Σχήμα 2.1: Μοντέλο Γραμμής Μεταφοράς

• Εγκάρσια Στοιχεία

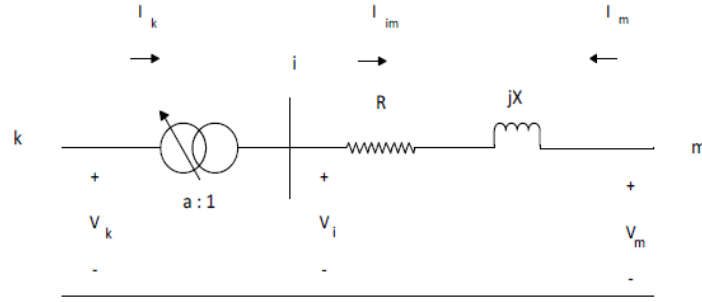
Τα εγκάρσια στοιχεία είναι πυκνωτές ή πηνία που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της τάσης ή της αέργου ισχύος και αναπαρίστανται από την ανά φάση ισοδύναμη φανταστική αγωγιμότητα $Y = jb$ στον αντίστοιχο ζυγό. Το πρόσημο της αγωγιμότητας δηλώνει το τύπο του στοιχείου. Δηλαδή, αν είναι θετική, είναι εγκάρσιος πυκνωτής, ενώ αν είναι αρνητική είναι εγκάρσιο πηνίο.



Σχήμα 2.2: Μοντέλο Εγκάρσιου Στοιχείου (Πηνίο - Πυκνωτής)

• Γραμμές Μεταφοράς

Οι μετασχηματιστές αναπαρίστανται σαν ιδανικοί μετασχηματιστές σε σειρά με την σύνθετη αντίστασή τους, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι δυο ζυγοί στους οποίους συνδέεται ένας μετασχηματιστής m και k , είναι γνωστοί ως πλευρά αντίστασης και πλευρά ρύθμισης της τάσης αντίστοιχα.



Σχήμα 2.3: Μοντέλο Μετασχηματιστή

Οι εξισώσεις του κυκλώματος τους μετασχηματιστή εκφράζονται μέσω των ρευμάτων που διαρρέουν τον κλάδο $i - m$, στον οποίο υπάρχει η σύνθετη αντίσταση. Ισχύει ότι $Z = R + jX$, και η αγωγιμότητα του κλάδου αντίστασης είναι ίση με $Y = 1/Z$, επομένως έχουμε:

$$\begin{bmatrix} I_{im} \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -Y \\ -Y & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

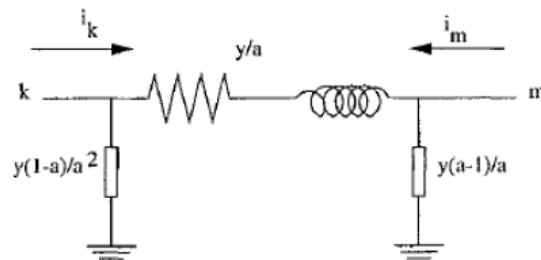
Αντικαθιστώντας τα I_{im} και V_i με τις εξισώσεις:

$$\begin{aligned} I_{im} &= aI_k \\ V_i &= V_k/a \end{aligned}$$

Παίρνουμε τη τελική μορφή της σχέσης (2.1):

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y/a^2 & -Y/a \\ -Y/a & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

όπου a είναι η ρύθμιση τάσης του μετασχηματιστή. Στη συνέχεια φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα για το παραπάνω σύνολο εξισώσεων:



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο Κύκλωμα Μετασχηματιστή

- **Γεννήτριες**

Οι γεννήτριες αναπαρίστανται με ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος στους αντίστοιχους ζυγούς. Οι ισχύεις αυτές έχουν τις παρακάτω εξισώσεις:

$$S = P + jQ \quad (2.3)$$

όπου P η ενεργός ισχύς και Q η άεργος ισχύς της γεννήτριας.

- **Φορτία**

Τα φορτία διακρίνονται σε σταθερής ισχύος και σταθερής αγωγιμότητας. Τα φορτία σταθερής ισχύος αναπαρίστανται ως ισοδύναμες μιγαδικές εγχύσεις ισχύος στους αντίστοιχους ζυγούς και δεν έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου σε αντίθεση με τα φορτία σταθερής αγωγιμότητας που έχουν επίδραση στο μοντέλο του δικτύου και αναπαρίστανται ως εγκάρσιες σύνθετες αγωγιμότητες.

2.2 Αναπαράσταση Δικτύου

Τα παραπάνω μοντέλα που εξετάστηκαν, χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση ολόκληρου του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σύνολο εξισώσεων που προέρχονται από την εφαρμογή του νόμου του Kirchhoff για το ρεύμα, σε κάθε ζυγό. Έστω λοιπόν ότι το σύνολο των εγχεόμενων ρευμάτων κάθε ζυγού συμβολίζεται με I , και το σύνολο των τάσεων όλων των ζυγών με V , οι εξισώσεις παίρνουν την εξής μορφή:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = YV \quad (2.4)$$

όπου

I_k η έγχυση ρεύματος στον ζυγό k

V_k η τάση του ζυγού k

Y_{km} το (k, m) στοιχείο της μήτρας αγωγιμοτήτων Y

Για τα παραπάνω, ισχύει η σύμβαση ότι τα εγχεόμενα ρεύματα που εισέρχονται στον ζυγό, έχουν θετικό πρόσημο. Η μήτρα Y είναι η μήτρα αγωγιμοτήτων, η οποία έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι μιγαδική μήτρα, και μπορεί να γραφτεί στη μορφή $G + jB$.
- Είναι δομικά συμμετρική, και μερικές φορές και αριθμητικά συμμετρική ανάλογα με την απουσία κάποιων στοιχείων του δικτύου όπως συσκευές μετατόπισης φάσης.
- Είναι αραιή μήτρα.

- Η ορίζουσά της είναι διάφορη του μηδενός, με την προϋπόθεση ότι κάθε νησίδα του δικτύου έχει τουλάχιστον ένα εγκάρσιο στοιχείο προς τη γη.

Η αναπαράσταση του δικτύου με τη σχέση (2.4), διευκολύνει την τροποποίηση των εξισώσεων σε περίπτωση τοπολογικής αλλαγής. Η πρόσθεση ή η αφαίρεση ενός μέρους του δικτύου μπορεί εύκολα να γίνει αφαιρώντας ή προσθέτοντας τα αντίστοιχα στοιχεία του μήτρας αγωγιμοτήτων.

2.3 Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας

Ο σκοπός της εκτίμησης κατάστασης είναι να προσδιορίσει την πιθανότερη κατάσταση του συστήματος με βάση τα δεδομένα από τις μετρήσεις που έχει. Ένας τρόπος να το πετύχει αυτό, είναι χρησιμοποιώντας την Εκτίμηση Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Estimation ή MLE), μια μέθοδο που εφαρμόζεται ευρύτατα στη στατιστική. Τα σφάλματα των μετρήσεων, θεωρείται ότι ακολουθούν μια γνωστή κατανομή πιθανότητας με άγνωστες παραμέτρους. Η κοινή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας όλων των μετρήσεων μπορεί να γραφεί σαν συνάρτηση παραμέτρων. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας και μεγιστοποιείται όταν οι άγνωστοι παράμετροι βρίσκονται όσο πιο κοντά γίνεται στις πραγματικές τους τιμές. Ως εκ τούτου, μπορεί να οριστεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ώστε να μεγιστοποιηθεί η συνάρτηση πιθανοφάνειας. Η λύση θα δώσει την εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας για τις ζητούμενες παραμέτρους. Τα σφάλματα των μετρήσεων συνήθως θεωρείται ότι ακολουθούν την Γκαουσσσιανή (κανονική) κατανομή, και οι παράμετροι αυτής τη κατανομής είναι η μέση τιμή της μ , και η διασπορά της σ^2 . Το πρόβλημα της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας επιλύεται ως προς αυτές τις παραμέτρους.

2.4 Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας Γκαουσσσιανής (Κανονικής) Κατανομής

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κανονικής κατανομής για μια τυχαία μεταβλητή z ορίζεται ως εξής:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.5)$$

όπου

z : η τυχαία μεταβλητή

μ : η μέση τιμή της z

σ : η τυπική απόκλιση της z

Η συνάρτηση $f(z)$ αλλάζει τη μορφή της ανάλογα με τις τιμές των παραμέτρων μ και σ^2 . Παρόλα αυτά, η μορφή της μπορεί να σταθεροποιηθεί χρησιμοποιώντας την παρακάτω αλλαγή μεταβλητών:

$$u = \frac{z - \mu}{\sigma} \quad (2.6)$$

η οποία συνεπάγεται τα εξής:

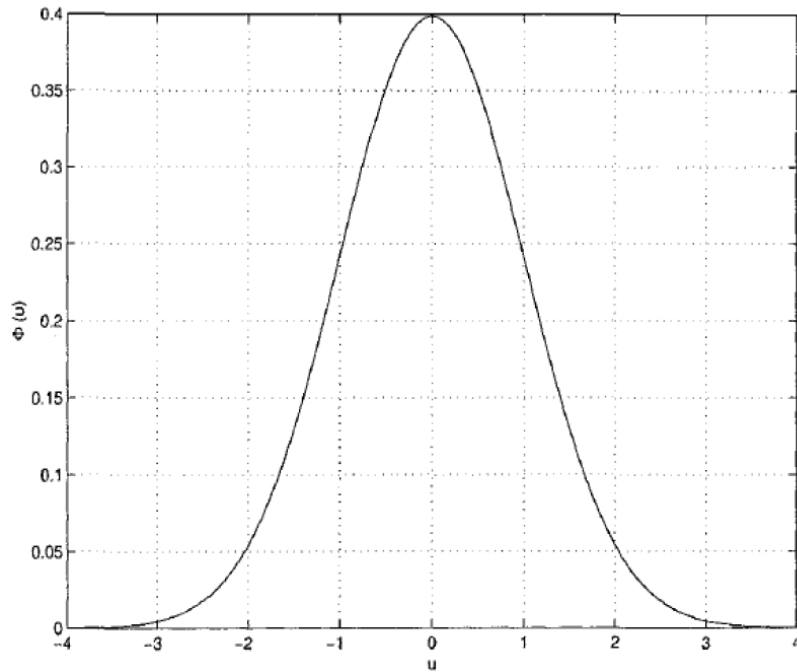
$$E(u) = \frac{1}{\sigma}(E(z) - \mu) = 0 \quad (2.7)$$

$$Var(u) = \frac{1}{\sigma^2}Var(z - \mu) = \frac{\sigma^2}{\sigma^2} = 1 \quad (2.8)$$

Επομένως, η νέα συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι η εξής:

$$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (2.9)$$

Μια γραφική αναπαράσταση της Κανονικής Κατανομής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Κανονικής Κατανομής

2.5 Συνάρτηση Πιθανοφάνειας

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

$$f_m(z) = f(z_1)f(z_2) \dots f(z_m) \quad (2.10)$$

όπου

z_i : η i -ιοστή μέτρηση

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

Η συνάρτηση $f_m(z)$ ονομάζεται συνάρτηση πιθανοφάνειας της τυχαίας μεταβλητής z . Ουσιαστικά, είναι ένα μέτρο πιθανότητας παρατήρησης του συγκεκριμένου συνόλου μετρήσεων στο διάνυσμα z .

Σκοπός της εκτίμησης μέγιστης πιθανοφάνειας είναι η μεγιστοποίηση της συνάρτησης πιθανοφάνειας μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της συνάρτησης πιθανότητας μ και σ^2 . Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων, η συνάρτηση συνήθως αντικαθίσταται από τον λογάριθμό της προκειμένου να απλοποιηθεί η διαδικασία βελτιστοποίησης. Η νέα συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας, συμβολίζεται με L και δίνεται από το τύπο:

$$L = \log f_m(z) = \sum_{i=1}^m \log f(z_i) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 - \frac{m}{2} * \log 2\pi - \sum_{i=1}^m \log \sigma_i \quad (2.11)$$

Η εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας μεγιστοποιεί τη συνάρτηση λογαριθμο-πιθανοφάνειας για ένα δεδομένο διάνυσμα z με τον εξής τρόπο:

$$\log f_m(z) = \max \quad (2.12)$$

ή ισοδύναμα:

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{z_i - \mu_i}{\sigma_i} \right)^2 = \min \quad (2.13)$$

Το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης μπορεί να επαναπροσδιοριστεί με την χρήση των υπολοίπων r_i των μετρήσεων, που ορίζονται ως εξής:

$$r_i = z_i - \mu_i = z_i - E(z_i) \quad i = 1, \dots, m \quad (2.14)$$

όπου η μέση τιμή μ_i της μέτρησης z_i μπορεί να εκφραστεί ως $h_i(x)$, δηλαδή ως μια μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει το διάνυσμα κατάστασης x με την i -ιοστή μέτρηση. Το τετράγωνο κάθε υπολοίπου r_i^2 πολλαπλασιάζεται με το βάρος $W_{ii} = s_i^{-2}$, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο της διασποράς σφάλματος της μέτρησης z_i . Έτσι λοιπόν, το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της εξίσωσης (2.13), ανάγεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σταθμισμένου αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων:

$$\sum_{i=1}^m W_{ii} r_i^2 = \min \quad (2.15)$$

όπου

$$r_i = z_i - h_i(x) \quad i = 1, \dots, m \quad (2.16)$$

Η λύση αυτού του προβλήματος βελτιστοποίησης ονομάζεται Εκτίμηση Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (Weighted Least Squares ή WLS) για το διάνυσμα κατάστασης x .

2.6 Μοντέλο Μετρήσεων και Παραδοχές

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε το παρακάτω διάνυσμα z με όλες τις μετρήσεις:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (2.17)$$

όπου

- $h^T = [h_1(x), h_2(x), \dots, h_m(x)]$ η μη γραμμική συνάρτηση που συσχετίζει την i -ιοστή μέτρηση με το διάνυσμα κατάστασης x .
- $x^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ το διάνυσμα κατάστασης.
- $e^T = [e_1, e_2, \dots, e_m]$ το διάνυσμα σφαλμάτων των μετρήσεων.

Επίσης, όσον αφορά τις στατιστικές ιδιότητες των σφαλμάτων των μετρήσεων, γίνονται οι εξής παραδοχές:

- $E(e_i) = 0$, $i = 1, 2, \dots, m$
- Τα σφάλματα των μετρήσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους ($E[e_i e_j] = 0$).

$$Cov(e) = E[ee^T] = R = diag\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (2.18)$$

Η μήτρα R είναι διαγώνια και ονομάζεται μήτρα συνδιασποράς. Η τυπική απόκλιση σ_i κάθε μέτρησης z_i εκφράζει την αναμενόμενη ακρίβεια της τιμής της μέτρησης που χρησιμοποιείται. Ο εκτιμητής WLS ελαχιστοποιεί την ακόλουθη συνάρτηση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)^T] R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.19)$$

Για να πάρει η $J(x)$ την ελάχιστη τιμή της, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες πρώτης τάξεως, δηλαδή:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (2.20)$$

Η μήτρα $H(x)$ ονομάζεται Ιακωβιανή μήτρα, περιλαμβάνει τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης μέτρησης $h_i(x)$ ως προς το διάνυσμα κατάστασης x , και η αναλυτική της μορφή είναι η εξής:

$$H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_m(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Αναπτύσσοντας τη μη γραμμική συνάρτηση $g(x)$ σε σειρά Taylor ως προς το διάνυσμα κατάστασης, έχουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (2.22)$$

Απαλείφοντας τους όρους υψηλότερης τάξης της σειράς, οδηγούμαστε σε μια επαναληπτική διαδικασία γνωστή ως μέθοδος Gauss-Newton, με την οποία υπολογίζεται η λύση ως εξής:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1}g(x^k) \quad (2.23)$$

όπου k είναι η δείκτης επανάληψης και x^k το διάνυσμα κατάστασης στην επανάληψη k . Ακόμα, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \quad (2.24)$$

$$g(x^k) = -H^T(x^k)R^{-1}(z - h(x^k)) \quad (2.25)$$

Η μήτρα $G(x)$ ονομάζεται μήτρα κέρδους. Η μήτρα αυτή είναι αραιή, θετικά ορισμένη και συμμετρική, με την προϋπόθεση ότι το σύστημα είναι παρατηρήσιμο. Η μήτρα κέρδους δεν μπορεί να αντιστραφεί, μπορεί όμως να παραγοντοποιηθεί σε άνω και κάτω τριγωνική μήτρα (τριγωνοποίηση LU), και με τη μέθοδο της ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης σε κάθε επανάληψη, προκύπτει η λύση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων. Τελικώς, η λύση της εκτίμησης κατάστασης με τη μέθοδο των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει από την εξής επαναληπτική διαδικασία:

$$[G(x^k)]\Delta x^{k+1} = H^T(x^k)R^{-1}(z - h(x^k)) \quad (2.26)$$

2.7 Αλγόριθμος Εκτίμησης Κατάστασης

Η εκτίμηση κατάστασης με τη μέθοδο WLS μας δίνει την λύση των εξισώσεων (2.26) μέσω της επαναληπτικής μεθόδου Gauss – Newton. Το διάνυσμα κατάστασης αρχικοποιείται συνήθως στο επίπεδο διάνυσμα (flat start), στο οποίο όλα τα μέτρα των τάσεων έχουν τιμή 1 ανά μονάδα, και όλες οι γωνίες έχουν τιμή 0 μοίρες.

Τα βήματα για τη λύση της επαναληπτικής μεθόδου, φαίνονται αναλυτικά παρακάτω:

- Αρχικά, ο δείκτης επαναλήψεων k τίθεται ίσος με 0, και αρχίζουν οι επαναλήψεις.

- Αρχικοποιείται το διάνυσμα κατάστασης x_0 συνήθως όπως ειπώθηκε παραπάνω (flat start).
- Υπολογίζεται η μήτρα κέρδους $G(x^k)$.
- Υπολογίζεται το δεξί μέρος της εξίσωσης:

$$t^k = H^T(x^k)R^{-1}(z - h(x^k)) \quad (2.27)$$

- Παραγοντοποιείται και επιλύεται η $G(x)$ (με την τριγωνοποίηση LU όπως περιγράφηκε παραπάνω), και υπολογίζεται η λύση για Δx^k .
- Γίνεται έλεγχος για σύγκλιση, μέσω της σχέσης:

$$|\Delta x^k| \leq \epsilon \quad (2.28)$$

όπου ϵ είναι το όριο ανοχής και συνήθως τίθεται ίσο με 10^{-3} .

- Αν δεν έχουμε σύγκλιση, το διάνυσμα κατάστασης και ο δείκτης επαναλήψεων παίρνουν τις παρακάτω τιμές:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (2.29)$$

$$k = k + 1 \quad (2.30)$$

και στη συνέχεια, η μέθοδος επαναλαμβάνεται από το βήμα 3. Διαφορετικά, αν έχουμε σύγκλιση η μέθοδος τερματίζει.

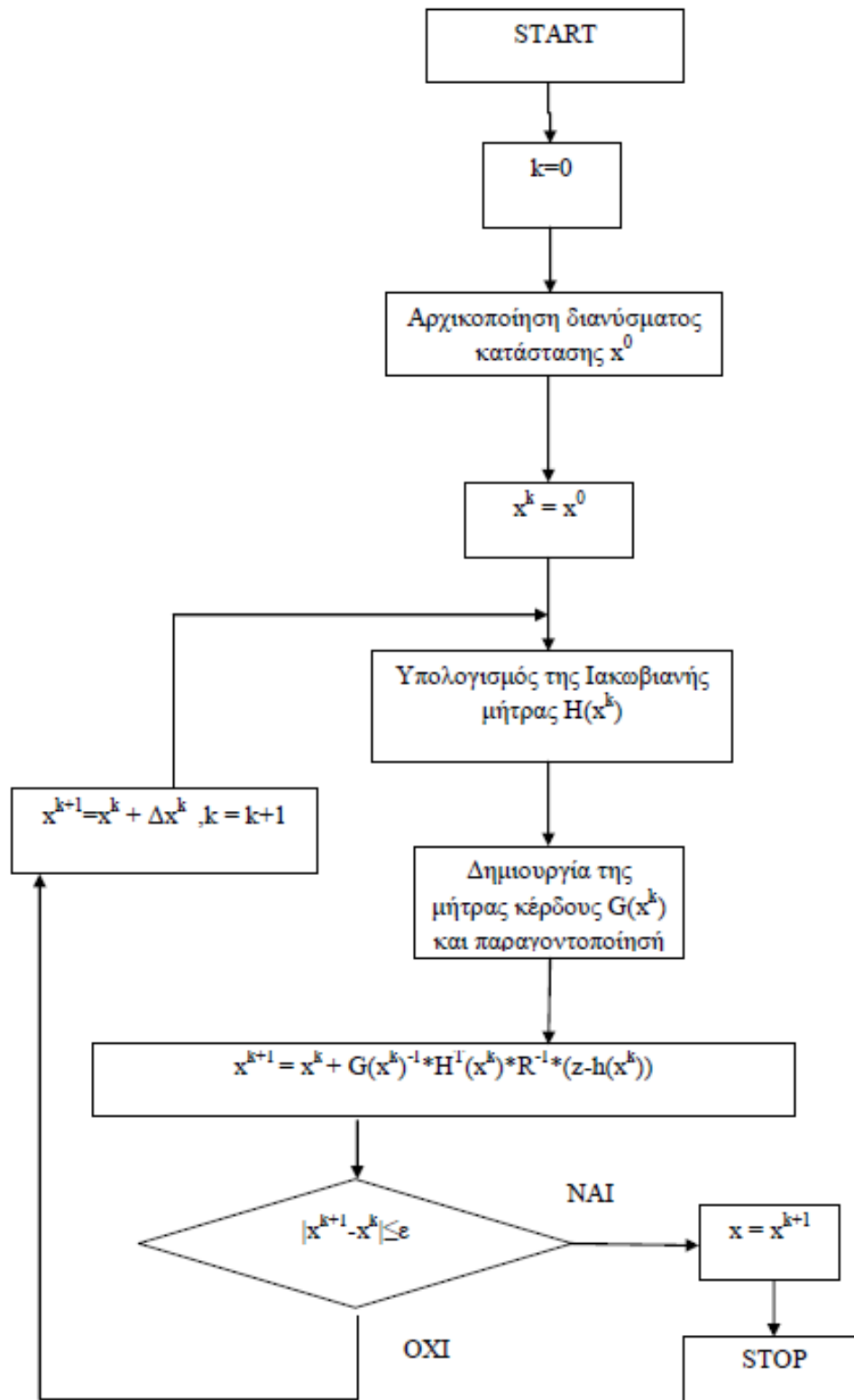
Ο παραπάνω αλγόριθμος περιλαμβάνει τους εξής υπολογισμούς σε κάθε επανάληψη:

1. Υπολογισμός τους δεξιού μέρους της εξίσωσης (2.27)

- Υπολογισμός του διανύσματος των συναρτήσεων μέτρησης $h(x^k)$.
- Υπολογισμός της Ιακωβιανής μήτρας $H(x^k)$.

2. Υπολογισμός της $G(x^k)$ και επίλυση της εξίσωσης (2.26)

- Υπολογισμός της μήτρας κέρδους $G(x^k)$.
- Παραγοντοποίηση της $G(x^k)$.
- Εφαρμογή ευθείας και αντίστροφης αντικατάστασης για τον υπολογισμό του Δx^{k+1} .



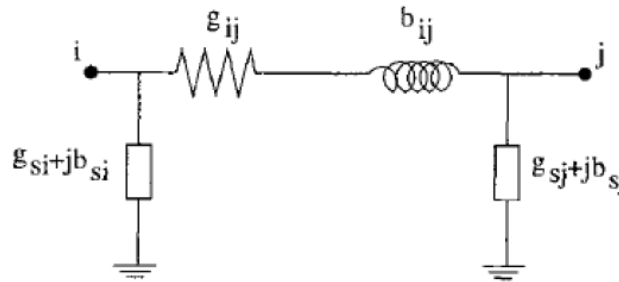
Σχήμα 2.6: Αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης

2.8 Η Συνάρτηση των Μετρήσεων $h(x)$

Οι μετρήσεις μπορεί να είναι πολλών διαφορετικών τύπων. Πιο συχνά ως μετρήσεις χρησιμοποιούνται οι ροές ισχύος, οι εγχύσεις ισχύος, τα μέτρα των τάσεων των ζυγών, και τα μέτρα των ρευμάτων των κλάδων. Αυτές οι μετρήσεις εκφράζονται συναρτήσει των στοιχείων του διανύσματος κατάστασης, σε πολικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες. Όταν χρησιμοποιούνται οι πολικές συντεταγμένες για ένα σύστημα με N ζυγούς, το διάνυσμα κατάστασης έχει $2N - 1$ στοιχεία, N μέτρα τάσεως και $N - 1$ γωνίες τάσεως ζυγών, καθώς η γωνία του ζυγού αναφοράς τίθεται ίση με μια αυθαίρετη τιμή, συνήθως 0. Το διάνυσμα κατάστασης λοιπόν, παίρνει την εξής μορφή, θεωρώντας ότι ζυγός αναφοράς είναι ο ζυγός 1:

$$x^T = [\delta_2, \delta_3, \delta_4, \dots, \delta_N, V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_N] \quad (2.31)$$

Οι τύποι για όλους τους τύπους μετρήσεων φαίνονται παρακάτω. Για την αναπαράσταση των κλάδων του δικτύου, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο μοντέλο «Π» που φαίνεται στο σχήμα 2.8:



Σχήμα 2.7: Μοντέλο «Π» για την αναπαράσταση κλάδου του δικτύου

- Έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος στον ζυγό i :

$$P_i = V_i^2 \sum_{m \in a(i)} (g_{ij} + g_{sj}) + V_i^2 g_i - V_i \sum_{m \in a(i)} V_j a_{ij} \quad (2.32)$$

$$Q_i = -V_i^2 \sum_{m \in a(i)} (b_{ij} + b_{sj}) - V_i^2 b_i - V_i \sum_{m \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (2.33)$$

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

$$P_{ij} = V_i^2 (g_{ij} + g_{sj}) - V_i V_j a_{ij} \quad (2.34)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{sj}) - V_i V_j \beta_{ij} \quad (2.35)$$

όπου: $\alpha(i)$ το σύνολο των ζυγών που συνδέονται με το ζυγό i . Οι σταθερές α_{ij} και β_{ij} δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\alpha_{ij} = g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.36)$$

$$\beta_{ij} = g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (2.37)$$

2.9 Ιακωβιανή Μήτρα $H(x)$

Η Ιακωβιανή μήτρα ορίζεται ως εξής:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \delta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_i}{\partial \delta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Ουσιαστικά, τα στοιχεία της Ιακωβιανής μήτρας είναι οι μερικές παράγωγοι των μετρήσεων ως προς το διάνυσμα κατάστασης. Οι αναλυτικές εκφράσεις για κάθε ένα μέρος της μήτρας δίνονται παρακάτω:

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

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_i} = V_i V_j \beta_{ij} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij} \quad (2.40)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = 2V_i(g_{ij} + g_{sj}) - V_j a_{ij} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = -V_i a_{ij} \quad (2.42)$$

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

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_i} = -V_i V_j \alpha_{ij} \quad (2.43)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij} \quad (2.44)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = -2V_i(b_{ij} + b_{sj}) - V_j \beta_{ij} \quad (2.45)$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij} \quad (2.46)$$

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

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{m \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -V_i V_j \beta_{ij} \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2V_i \sum_{m \in a(i)} (g_{ij} + g_{sj}) + 2V_i g_i - \sum_{m \in a(i)} V_j a_{ij} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_j} = -V_i a_{ij} \quad (2.50)$$

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

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -V_i \sum_{m \in a(i)} V_j \alpha_{ij} \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = V_i V_j \alpha_{ij} \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2V_i \sum_{m \in a(i)} (b_{ij} + b_{sj}) - 2V_i b_i - \sum_{m \in a(i)} V_j \beta_{ij} \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -V_i \beta_{ij} \quad (2.54)$$

- Μερική παράγωγος μέτρου τάσεως ως προς το διάνυσμα κατάστασης:

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_i} = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \delta_j} = 0 \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_i} = 1 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V_j} = 0 \quad (2.58)$$

2.10 Η Μήτρα Κέρδους $G(x)$

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

$$G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \quad (2.59)$$

και έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι συμμετρικός.
- Είναι αραιός, όχι τόσο όσο η $H(x)$.
- Είναι θετικά ορισμένος για πλήρως παρατηρήσιμα συστήματα.

Η μήτρα κέρδους υπολογίζεται και αποθηκεύεται σαν αραιή μήτρα για λόγους υπολογιστικής απόδοσης και εξοικονόμησης μνήμης. Επίσης, σχηματίζεται με υπολογισμό ενός στοιχείου κάθε φορά. Αυτό γίνεται με τον παρακάτω τρόπο:

Θεωρούμε ότι η Ιακωβιανή μήτρα και η μήτρα διασποράς για ένα σύνολο m μετρήσεων, κάθε μια εκ των οποίων αντιστοιχεί σε μια στήλη, έχουν την παρακάτω μορφή:

$$H = \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ \vdots \\ H_m \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_{mm} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Έτσι, η μήτρα κέρδους σχηματίζεται ως εξής:

$$G = \sum_{i=1}^m H_i^T R_{ii}^{-1} H_i \quad (2.61)$$

2.11 Παραγοντοποίηση της Μήτρας Κέρδους

Η μήτρα κέρδους μπορεί να γραφεί ως γινόμενο δυο πινάκων, ενός άνω τριγωνικού U κι ενός κάτω τριγωνικού L . Επομένως ισχύει:

$$\mathbf{G} = \mathbf{L} * \mathbf{U} \quad (2.62)$$

Στη συνέχεια, γίνεται η επίλυση της παρακάτω επαναληπτικής εξίσωσης, με χρήση της μεθόδου εμπρός και πίσω αντικατάστασης ως εξής:

$$\mathbf{LU}\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{t}^k \quad (2.63)$$

Εμπρός Αντικατάσταση:

$$\mathbf{U}\Delta\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{z} \quad (2.64)$$

Πίσω Αντικατάσταση:

$$\mathbf{L}\mathbf{z} = \mathbf{t}^k \quad (2.65)$$

Επίσης, ένα άλλος τρόπος παραγοντοποίησης της $\mathbf{G}$ είναι η μέθοδος Cholesky. Η μήτρα κέρδους μπορεί να γραφεί ως το γινόμενο μιας κάτω τριγωνικής μήτρας $\mathbf{L}$ με την αντίστροφή της:

$$\mathbf{G} = \mathbf{LL}^T \quad (2.66)$$

Αυτή η παραγοντοποίηση όμως, μπορεί να γίνει μόνο για πλήρως παρατηρήσιμα δίκτυα.

Κεφάλαιο 3

Ανίχνευση και Εντοπισμός Σφαλμάτων - Bad Data Detection

Στο σύνολο των μετρήσεων, υπάρχουν σχεδόν πάντα εσφαλμένα δεδομένα για διάφορους λόγους, όπως τυχαία σφάλματα ή σφάλματα κατά τη μετάδοσή τους. Αυτά τα σφάλματα επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα της εκτίμησης κατάστασης, επομένως η ανίχνευση και ταυτοποίηση των εσφαλμένων μετρήσεων αποτελεί βασική λειτουργία του εκτιμητή. Όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος εκτίμησης WLS , η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των υπολοίπων των μετρήσεων. Η απόδοση αυτής της λειτουργίας εξαρτάται σημαντικά από την περίσσεια των μετρήσεων (περίσσεια είναι ο λόγος του αριθμού των μετρήσεων προς τον αριθμό των αγνώστων), καθώς και από τον αριθμό των εσφαλμένων μετρήσεων. Από την άλλη, αν οι μετρήσεις δεν είναι αρκετές, μπορεί να υπάρξουν κρίσιμες μετρήσεις. Επίσης, εσφαλμένα δεδομένα εισέρχονται στις μετρήσεις με διάφορους τρόπους ανάλογα τον τύπο, την θέση και τον αριθμό τους. Μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής: (1) μια εσφαλμένη μέτρηση, που σημαίνει ότι μόνο μία από τις μετρήσεις έχει μεγάλη σφάλμα, (2) πολλές εσφαλμένες μετρήσεις, δηλαδή παραπάνω από μία μέτρηση έχει σφάλμα. Η συνηθέστερη μέθοδος για την ανίχνευση των σφαλμάτων είναι το τεστ τετραγώνων (chi-square test ή x^2 test), και η μέθοδος για τον εντοπισμό τους είναι η χρήση των κανονικοποιημένων υπολοίπων (Largest Normalized Residual ή LNR).

Γενικά, θεωρώντας ένα σύνολο από N τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές $X_1, X_2, \dots, X_N$ κάθε μια εκ των οποίων ακολουθεί την Κανονική κατανομή $X_i \sim N(0, 1)$, τότε η τυχαία μεταβλητή $Y = \sum_{i=1}^N X_i^2$ ακολουθεί την x^2 κατανομή, με N βαθμούς ελευθερίας. Για τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης, σχηματίζουμε την εξής σχέση:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{e_i^2}{R_{ii}} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{e_i}{\sqrt{R_{ii}}} \right)^2 = \sum_{i=1}^m (e_i^N)^2 \quad (3.1)$$

όπου $e_i^N \sim N(0, 1)$.

Η συνάρτηση $J(x)$ έχει μια κατανομή x^2 , με $m - n$ βαθμούς ελευθερίας. $m - n$ είναι ο αριθμός των πλεονάζων μετρήσεων του συστήματος, m, n είναι ο αριθμός των μετρήσεων και των αγνώστων αντίστοιχα.

Έτσι, μαζί με την εκτίμηση κατάστασης με τη μέθοδο WLS , μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η παραπάνω λειτουργία για τις εσφαλμένες μετρήσεις. Τα βήματα που ακολουθούνται

είναι τα εξής:

1. Επίλυση της μεθόδου WLS , και υπολογισμός της παρακάτω συνάρτησης:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\bar{x}))^2}{\sigma_i^2} \quad (3.2)$$

όπου $\bar{x}$ είναι το διάνυσμα κατάστασης, με n στοιχεία.

2. Αναζήτηση μιας τιμής από το πίνακα κατανομής x^2 που αντιστοιχεί σε βαθμό εμπιστοσύνης με πιθανότητα p (π.χ. 0.95), και $m - n$ βαθμούς ελευθερίας, έστω η $x_{m-n,p}^2$.

3. Αν $J(x) \geq x_{m-n,p}^2$ τότε υπάρχει εσφαλμένη μέτρηση, διαφορετικά δεν υπάρχουν σφάλματα στο σύνολο των μετρήσεων.

Από τη στιγμή που θα ανιχνευτεί εσφαλμένη μέτρηση, θα πρέπει να προσδιοριστεί και να αφαιρεθεί από το σύνολο των μετρήσεων. Η μέθοδος των κανονικοποιημένων υπόλοιπων χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα για τον προσδιορισμό των εσφαλμένων μετρήσεων. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε την εξής μορφή εξίσωσης μετρήσεων, όπως είδαμε και παραπάνω:

$$z = h(x) + e \quad (3.3)$$

Το αποτέλεσμα της μεθόδου WLS δίνεται από το τύπο:

$$\Delta x = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \Delta z \quad (3.4)$$

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

Η εκτιμώμενη τιμή των μετρήσεων δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta \bar{z} = H \Delta x = K \Delta z \quad (3.5)$$

όπου $K = H G^{-1} H^T R^{-1}$. Επίσης ισχύει η ιδιότητα $K H = H G^{-1} H^T R^{-1} H = H$.

Τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα ορίζονται ως εξής:

$$r = \Delta z - \Delta \bar{z} = (I - K) \Delta z = (I - K)(H \Delta x + e) = (I - K)e = S e \quad (3.6)$$

Η μήτρα S ονομάζεται μήτρα ευαισθησίας υπολοίπων. Επίσης, η μήτρα συσχετισμού του διανύσματος των υπολοίπων δίνεται από την:

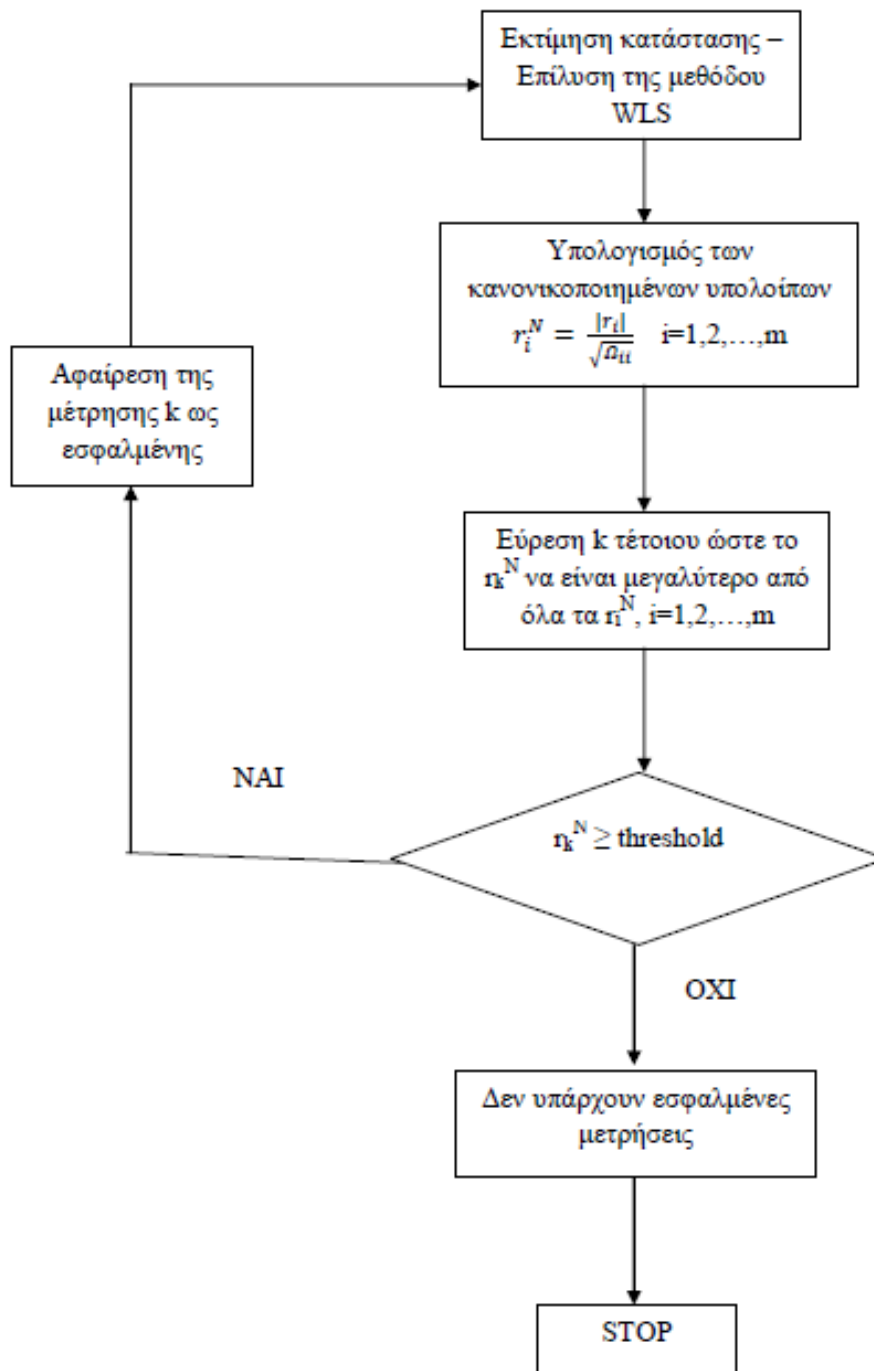
$$\Omega = Cov(r) = E[r r^T] = S E[e e^T] S^T = S R S^T = S R \quad (3.7)$$

Επομένως, τα υπόλοιπα ακολουθούν την κατανομή $r \sim N(0, \Omega)$, και το κανονικοποιημένο υπόλοιπο της μέτρησης i δίνεται από τον τύπο:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{|r_i|}{\sqrt{R_{ii} S_{ii}}} \quad (3.8)$$

που σημαίνει ότι $r_i^N \sim N(0, 1)$. Έτσι, το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο υπόλοιπο μπορεί να συγκριθεί με ένα στατιστικό όριο (π.χ. 3) ώστε να καθοριστεί αν είναι εσφαλμένη μέτρηση ή όχι.

Τα βήματα της μεθόδου *LNR* φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής μεθόδου *LNR*

Το κύριο μειονέκτημα της μεθόδου *LNR* είναι ότι βασίζεται στα υπόλοιπα τα οποία είναι πλήρως συσχετισμένα μεταξύ τους. Ως εκ τούτου, σε περίπτωση πολλών εσφαλμένων μετρήσεων, τα κανονικοποιημένα υπόλοιπα των σωστών μετρήσεων είναι σε συγκρίσιμα μεγέθη με αυτά των εσφαλμένων. Επομένως, υπάρχουν κι άλλοι τρόποι προσδιορισμού των σφαλμάτων στις μετρήσεις, όπως η εκτίμηση των εσφαλμένων μετρήσεων άμεσα με την μέθοδο Ελέγχου Υποθέσεων.

Κεφάλαιο 4

Κυβερνασφάλεια - Cyber Security

4.1 Κυβερνασφάλεια Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, εισάγει νέες απειλές για την ασφάλεια του δικτύου. Δημιουργείται έτσι αυξανόμενη ανάγκη για προστασία, καθώς το δίκτυο γίνεται όλο και πιο ευάλωτο έναντι επιθέσεων.

Ο στόχος αυτών των επιθέσεων στον κυβερνοχώρο μπορεί να είναι να βλάψουν, να κλέψουν, να αλλάξουν ή να καταστρέψουν συγκεκριμένες πληροφορίες, μέσω της πρόσβασης σε ένα ευαίσθητο σύστημα επικοινωνίας. Εκτός από τις φυσικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλούν αυτές οι κακόβουλες επιθέσεις, μπορούν επίσης να προκαλέσουν και σημαντικές οικονομικές απώλειες. Ένας από τους πιθανούς τρόπους κυβερνοεπίθεσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αλλοίωση δεδομένων του αλγόριθμου εκτίμησης κατάστασης. Αυτό θα μπορούσε να παραπλανήσει το κέντρο ελέγχου με αποτέλεσμα τη λήψη λανθασμένων αποφάσεων. Αυτά τα κίνητρα έθεσαν την ανάγκη για ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, με στόχο μετριασμό όλων αυτών των κινδύνων.

4.2 Εισαγωγή Ψευδών Δεδομένων στους Εκτιμητές Κατάστασης

Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς τύπους επίθεσης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι έγχυση ψευδών δεδομένων στον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τροποποίησης των πληροφοριών από τον επιτιθέμενο, αφού αποκτήσει πρόσβαση στις μετρήσεις. Από την πλευρά του εισβολέα, η δυνατότητα πρόσβασης απαιτεί τη μερική ή πλήρη γνώση της διαμόρφωσης του συστήματος και των μεθόδων εκτίμησης κατάστασης και ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων. Παράλληλα απαιτείται η δυνατότητα παραβίασης του συστήματος ασφαλείας, του συστήματος ελέγχου ταυτότητας και όλων των υπάρχοντων λογισμικών που στοχεύουν στην προστασία του δικτύου από κυβερνοεπιθέσεις.

Η γενικότερη κατηγοριοποίηση επιθέσεων είναι η εξής:

- **Ισχυρή επίθεση:** ο εισβολέας έχει πλήρη πρόσβαση σε όλες τις μετρήσεις που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Μπορεί να καταστρέψει ή να αλλοιώσει όλες ή κάποιες από αυτές. Αυτό σημαίνει ότι έχει πλήρη γνώση της τοπολογίας του δικτύου.
- **Ασθενής επίθεση:** ο εισβολέας έχει πρόσβαση σε περιορισμένο αριθμό μετρήσεων. Αυτό σημαίνει ότι έχει ελλιπή γνώση της τοπολογίας του δικτύου.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται η υπόθεση ότι ο επιτιθέμενος αποκτά πρόσβαση σε όλες τις μετρήσεις και έχει τη δυνατότητα τις να αλλάξει, μεταβάλλοντας το διάνυσμα z σε $z_a = z + a$, όπου a το διάνυσμα επίθεσης που προστέθηκε στις πραγματικές μετρήσεις. Αυτό επιτρέπει στον επιτιθέμενο να αλλάξει μια επιλεγμένη μέτρηση z_k σε $z_{k,a} = z_k + a_k$, για κάποιο k και συγκεκριμένο a_k , το οποίο αποτελεί την ποσότητα που θα προστεθεί στην αρχική μέτρηση.

4.3 Μη Ανιχνεύσιμη Επίθεση - Stealthy Attack

Μια «αόρατη» δηλαδή μια μη ανιχνεύσιμη επίθεση δεν μπορεί να εντοπιστεί από το σύστημα ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων, το οποίο ενεργοποιεί το συναγερμό μόνο όταν κάποια μέτρηση αποκλίνει σε μεγάλο βαθμό από την εκτιμώμενη. Αντίθετα, στην περίπτωση μιας αόρατης επίθεσης υπάρχει δυνατότητα σημαντικής αυξομείωσης μιας συγκεκριμένης μέτρησης χωρίς αυτή να θεωρηθεί μη ασφαλής από το σύστημα.

Υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο του δικτύου είναι το εξής:

$$z = Hx + e \quad (4.1)$$

όπου $z \in \mathbb{R}^m$ το διάνυσμα μετρήσεων ροής ισχύος, $x \in \mathbb{R}^n$ το διάνυσμα κατάστασης, H η Ιακωβιανή μήτρα και $e \in \mathbb{R}^m$ το διάνυσμα θορύβου το οποίο έχει μηδενική μέση τιμή και διακύμανση R . Έτσι, υπάρχουν $n + 1$ ζυγοί, m πραγματικές μετρήσεις ισχύος και n φάσεις γωνιών για εκτίμηση. Ένας από τους ζυγούς έχει οριστεί ως ζυγός αναφοράς με γωνία φάσης ίση με το μηδέν.

- **Ορισμός 1.** Μια επίθεση $A = (S, \alpha)$ είναι ένα σύνολο $|S|$ αλλοιωμένων μετρήσεων. Τα μη μηδενικά στοιχεία του διανύσματος επίθεσης α αντιστοιχούν στις αλλοιωμένες μετρήσεις S . Ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων του A είναι ο αριθμός των αλλοιωμένων μετρήσεων S . Κατά την επίθεση A , οι αρχικές μετρήσεις z αλλοιώνονται από τον επιτιθέμενο, ώστε μετά την επίθεση να έχουν τιμή $z + \alpha$.
- **Ορισμός 2.** Μια επίθεση $A = (S, \alpha)$ ονομάζεται μη ανιχνεύσιμη αν υπάρχει κάποια ρεαλιστική κατάσταση συστήματος συμβατή με τις αλλοιωμένες μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι η επίθεση $A = (S, \alpha)$ είναι μη ανιχνεύσιμη αν και μόνο αν η εξίσωση $\alpha = Hc$ είναι επιλύσιμη (δηλαδή α γραμμικός συνδιασμός της H), όπου c είναι το διάνυσμα που περιέχει τις απαραίτητες τιμές ώστε όταν πολλαπλασιαστεί με την H να προκύψει το επιθυμητό διάνυσμα επίθεσης.

Μια μη ανιχνεύσιμη επίθεση A , αντιστοιχεί σε διατάραξη της ροή ισχύος του συστήματος.

- Μια επίθεση $A = (S, \alpha)$ είναι αδύνατον να είναι μη ανιχνεύσιμη όταν δεν υπάρχει επίθεση $A' = (S', \alpha')$ με $S' \subsetneq S$

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα αναλυθούν επιθέσεις της μορφής $a = Hc$ οι οποίες επεξηγούνται πλήρως από τον ορισμό 2. Επομένως γίνεται η υπόθεση ότι ο επιτιθέμενος γνωρίζει τη μήτρα H και στοχεύει στην εισαγωγή ψευδών μη ανιχνεύσιμων δεδομένων στο σύστημα. Επιπλέον, ο επιτιθέμενος θέλει να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των αλλοιωμένων μετρήσεων, ώστε να επηρεάσει όσο το δυνατόν λιγότερα δεδομένα του συστήματος κατά την εφαρμογή της επίθεσης. Μια επίθεση που στοχεύει σε μια δεδομένη μέτρηση k μπορεί να κατασκευαστεί μαθηματικά με τους εξής τρόπους:

- Ο πρώτος τρόπος προκύπτει από τη νόρμα-2 του διανύσματος επίθεσης. Το διάνυσμα μη ανιχνεύσιμης επίθεσης, όπου $\|\alpha\|_2 = \sqrt{a'a}$ και $z_{k,a} = z_k + a_k$ δίνεται από τον τύπο:

$$\alpha = \frac{\alpha_k}{K_{k,k}} K_{\cdot,k} \quad (4.2)$$

Όπου $K_{\cdot,k}$ είναι η k -η στήλη της H , χρησιμοποιώντας $R = I$.

Ωστόσο, το διάνυσμα που προκύπτει δε διαθέτει το μέγιστο δυνατό αριθμό μηδενικών ώστε να επηρεαστούν όσο το δυνατόν λιγότερες μετρήσεις, επομένως δεν είναι το βέλτιστο από την πλευρά του επιτιθέμενου.

- Η δεύτερη λύση λαμβάνεται μέσω του υπολοίπου που προκύπτει από την αφαίρεση των διανυσμάτων z και $\hat{z}$ και υπολογίζεται κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων:

$$\hat{r} = z - \hat{z} = z - Kz = (I - K)z \quad (4.3)$$

4.4 Υπολογισμός Βέλτιστου Διανύσματος Επίθεσης

Ο επιτιθέμενος μπορεί να πραγματοποιήσει μία μη ανιχνεύσιμη επίθεση προσθέτοντας στο διάνυσμα πραγματικών μετρήσεων z το επιθυμητό διάνυσμα επίθεσης α , ώστε να προκύψει το νέο διάνυσμα αλλοιωμένων μετρήσεων $z_a = z + a$. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επίθεση αυτή δεν αποτελεί τη βέλτιστη μη-ανιχνεύσιμη επίθεση καθώς το διάνυσμα a δεν περιέχει το μέγιστο δυνατό αριθμό μηδενικών, ώστε όταν συμβεί να επηρεάσει όσο το δυνατόν λιγότερες μετρήσεις. Έτσι, το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου διανύσματος επίθεσης έχει την εξής μαθηματική διατύπωση:

$$\begin{aligned} \min & \|Hc\|_0 \\ \text{s.t.} & \sum_i H_{ki} c_i = \alpha_i \end{aligned} \quad (4.4)$$

όπου η νόρμα $\|Hc\|_0$ εκφράζει τον αριθμό των μη μηδενικών στοιχείων του διανύσματος επίθεσης $\alpha = Hc$ και H_{ki} στοιχείο (k, i) της H .

Ο περιορισμός $\sum_i H_{ki}c_i = \alpha_i$ δίνει την τιμή του k στοιχείου του διανύσματος επίθεσης, του οποίου η τιμή πρέπει να μεταβληθεί σε α_i .

Λύνοντας το παραπάνω πρόβλημα επιτυγχάνεται αριθμός αλλοιωμένων μετρήσεων $|S| = \|\alpha\|_0$, δηλαδή ο ελάχιστος δυνατός αριθμός αλλοιωμένων μετρήσεων που απαιτείται ώστε να συμβεί η επιθυμητή επίθεση. Η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Ένας από τους πιο αποτελεσματικούς είναι η μέθοδος "Big M" η οποία θα παρουσιαστεί αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

Πρέπει να τονιστεί πως σε κάποιες περιπτώσεις η δημιουργία βέλτιστου διανύσματος επίθεσης μέσω της λύσης του παραπάνω προβλήματος μπορεί να μη περάσει απαρατήρητη από τον αλγόριθμο ανίχνευσης και εντοπισμού σφαλμάτων. Το διάνυσμα επίθεσης α που θα προκύψει ενδέχεται να περιέχει τιμές μεγάλου εύρους οι οποίες να οδηγήσουν τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης σε μη γραμμική περιοχή ή ακόμα και σε αδυναμία σύγκλισης της μεθόδου Gauss-Newton. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σήμανση συναγερμού από τον αλγόριθμο ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων.

Κεφάλαιο 5

Προτεινόμενες Μέθοδοι Επίλυσης

Πραγματοποιήθηκε υλοποίηση κώδικα σε περιβάλλον MATLAB το οποίο δέχεται ως είσοδο ένα οποιοδήποτε δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και ένα πακέτο μετρήσεων SCADA και εκτελεί dc εκτίμηση κατάστασης, ανίχνευση και εντοπισμό εσφαλμένων δεδομένων.

Παράλληλα υλοποιήθηκε κώδικας προσομοίωσης μη ανιχνεύσιμης επίθεσης στο επιλεγμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος δίνει τη δυνατότητα για μεμονωμένες αλλά και πολλαπλές επιθέσεις. Χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αλγορίθμους βελτιστοποίησης επιτεύχθηκε η δημιουργία βέλτιστου διανύσματος επίθεσης σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή όλων των διαδικασιών και των αλγορίθμων που εκτελέστηκαν για τη δημιουργία του κώδικα.

5.1 Εκτίμηση Κατάστασης - State Estimation

Το πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο ένα αρχείο .txt το οποίο περιέχει τον αριθμό των ζυγών, τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων (συνολικός αριθμός ροών και εγχύσεων ενεργούς ισχύος), δείκτες i, j και τιμές των παραμέτρων των γραμμών, τους δείκτες i, j των ροών και των εγχύσεων πραγματικής ισχύος ($j = 0$ για τις εγχύσεις) και τις ανά μονάδα τιμές αυτών των μετρήσεων.

Αρχικά το πρόγραμμα διαβάζει τα δεδομένα του .txt αρχείου και τα αποθηκεύει στους αντίστοιχους πίνακες και μεταβλητές: μεταβλητή n για τον αριθμό των ζυγών, μεταβλητή m για τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων, πίνακες bi, bj, pi, pj για τους δείκτες των παραμέτρων του δικτύου και των μετρήσεων ενεργής ισχύος αντίστοιχα και πίνακες b_value και p_value για τις τιμές των παραμέτρων και των μετρήσεων. Οι μετρήσεις αποτελούν το διάνυσμα z της μεθόδου εκτίμησης κατάστασης και αποθηκεύονται παράλληλα σε ένα διάνυσμα z_raw .

Στη συνέχεια ακολουθεί η κατασκευή της Ιακωβιανής μήτρας H και η προσθήκη σφάλματος στο διάνυσμα z_raw . Η τιμή του σφάλματος υπολογίστηκε βρίσκοντας την τυπική απόκλιση s για την κάθε μέτρηση ως εξής:

Υπολογισμός τυπικής απόκλισης:

$$s = k * z_raw + 0.0001 \quad (5.1)$$

με

$$k = \frac{0,02}{fullscale} \quad (5.2)$$

όπου *fullscale* η τιμή που αντιστοιχεί στην ακρίβεια των μετρήσεων και προσαρμόζεται ανάλογα.

Υπολογισμός σφάλματος:

$$e = srand \quad (5.3)$$

όπου $rand \in \mathbb{R}^m$ διάνυσμα που περιέχει τυχαίους αριθμούς από 0 έως 1, ώστε το σφάλμα να βρίσκεται εντός της τυπικής απόκλισης.

Το σφάλμα που υπολογίστηκε παραπάνω προστίθεται στις αρχικές μετρήσεις και έτσι δημιουργείται το διάνυσμα μετρήσεων συμπεριλαμβανομένου του σφάλματος $z = z_{raw} + e$.

Έπειτα κατασκευάζεται ο διαγώνιος πίνακας R που έχει ως στοιχεία τις διασπορές των μετρήσεων καθώς και ο αντίστροφός του $R1$. Ακολουθεί ο υπολογισμός της μήτρας κέρδους G μέσω της πράξης $G = H^T R1 H$ και της αντίστροφης μήτρας κέρδους $G1$, ο υπολογισμός του διανύσματος $d = G1(H^T R1)z$ και τέλος ο υπολογισμός των εκτιμώμενων μετρήσεων $Zest = Hd$ και της διαφορά τους από τις αρχικές $r = z - Zest$.

5.2 Ανίχνευση και Εντοπισμός Εσφαλμένων Δεδομένων - Bad Data Detection

Μετά την εκτέλεση του κώδικα που αφορά την εκτίμηση κατάστασης ακολουθεί η ανίχνευση εσφαλμένων δεδομένων.

Αρχικά υπολογίζεται η απόλυτη τιμή της συνάρτησης $J = r^T R1 r$ και συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή της x^2 κατανομής (chi-square) για βαθμό ελευθερίας $m - n$. Οι τιμές της κατανομής εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω ενός αρχείου *chisq.txt* που περιέχει τις τιμές της x^2 κατανομής για βαθμούς ελευθερίας από 1 έως 50.

Αν η απόλυτη τιμή της J είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της x^2 κατανομής το πρόγραμμα εμφανίζει την ένδειξη «NO BAD DATA DETECTED» και τερματίζεται. Σε διαφορετική περίπτωση καλείται η υπορουτίνα *bad_data1* η οποία πραγματοποιεί την ανίχνευση των εσφαλμένων δεδομένων.

5.2.1 Λειτουργία της Υπορουτίνας Bad Data1

Αρχικό στάδιο της υπορουτίνας αποτελεί ο υπολογισμός της μεταβλητής $Sr = R - HG1H^T$. Στη συνέχεια υπολογίζεται το διάνυσμα των m κανονικοποιημένων υπολοίπων $rn = \frac{r}{\sqrt{|Sr|}}$. Ακολουθεί ο εντοπισμός του μέγιστου κανονικοποιημένου υπολοίπου και η εμφάνιση της ένδειξης «BAD DATA DETECTED IN P_{ij} » όπου i, j οι δείκτες της εσφαλμένης μέτρησης.

Στη συνέχεια η `Bad Data1` αφαιρεί από τα διανύσματα p_i, p_j και z_{raw} τα στοιχεία που αφορούν την εσφαλμένη μέτρηση, μειώνει το πλήθος m των μετρήσεων κατά 1 και διαγράφει τη γραμμή της Ιακωβιανής μήτρας H που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη μέτρηση.

Μεταβαίνοντας από την υπορουτίνα στο κύριο πρόγραμμα, η εκτίμηση κατάστασης εκτελείται ξανά χρησιμοποιώντας τις υπόλοιπες μετρήσεις εκτός της εσφαλμένης. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, αν εντοπιστεί εσφαλμένο δεδομένο η `bad_data1` καλείται ξανά, μέχρι να ανιχνευθούν όλες οι εσφαλμένες μετρήσεις.

5.3 Δημιουργία Βέλτιστου Διανύσματος Επίθεσης - Optimal Attack Vector

Ο κώδικας υπολογισμού του βέλτιστου διανύσματος επίθεσης βρίσκεται ανάμεσα στην εκτίμηση κατάστασης και στον εντοπισμό εσφαλμένων δεδομένων. Στο σημείο αυτό το πρόγραμμα διαβάζει το αρχείο `av1.txt` και ελέγχει τον αριθμό που βρίσκεται στην πρώτη στήλη και πρώτη σειρά (`numatt`). Αν ο αριθμός αυτός είναι 0 σημαίνει ότι δεν υπάρχει επίθεση και ο κώδικας παρακάμπτεται, πηγαίνοντας απευθείας στον εντοπισμό εσφαλμένων δεδομένων. Αν όμως ο αριθμός αυτός είναι 1 (ή μεγαλύτερος για πολλαπλές επιθέσεις που θα αναλυθούν αργότερα) σημαίνει ότι υπάρχει επίθεση και η διαδικασία προχωρά στη δημιουργία του διανύσματος επίθεσης. Το αρχείο περιέχει επίσης το δείκτη της μέτρησης του διανύσματος μετρήσεων z που θα επηρεαστεί καθώς και την τιμή που θα προστεθεί στην υπάρχουσα μέτρηση.

Προκειμένου να βρεθεί λύση στη μαθηματική σχέση (4.4) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος "*Big M*", επομένως το πρόβλημα αποκτά την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} && \sum_i x(i) \\
 & \text{s.t.} && Hc \leq Mx \\
 & && -Hc \leq Mx \\
 & && \sum_i H_{ki} c_i = \alpha_i \\
 & && x(i) \in [0, 1] \forall i
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Για την επίλυση της (5.4) χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του MATLAB `intlinprog` η οποία είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή για βελτιστοποίηση προβλήματος με πραγματικούς και ακέραιους αριθμούς με γραμμικούς περιορισμούς.

Ως μεταβλητές στο πρόβλημα τέθηκαν οι δυαδικοί αριθμοί x και στοιχεία του διανύσματος c που δηλώθηκαν ως πραγματικοί αριθμοί. Στη συνάρτηση `intlinprog` δεν υπάρχει δυνατότητα δήλωσης μεταβλητής ως δυαδική επομένως οι μεταβλητές x δηλώθηκαν ως ακέραιοι με κάτω όριο (`lb`) το 0 και άνω όριο (`ub`) το 1. Οι πραγματικοί αριθμοί c μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή αφού τα όριά τους ορίστηκαν από $-\infty$ έως $+\infty$.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται καταχώρηση των δεδομένων του προβλήματος (συντελεστές μεταβλητών, ισότητες, ανισότητες) σε κατάλληλους πίνακες ώστε να είναι εφικτό να καλεστεί η συνάρτηση `intlinprog`, η οποία τελικά επιστρέφει διάνυσμα που περιέχει

τις τιμές του κατάλληλα διαμορφωμένου c που πολλαπλασιαζόμενο με τη μήτρα H δίνει το βέλτιστο διάνυσμα επίθεσης.

5.3.1 Πολλαπλές επιθέσεις - Multiple Attacks

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αν η τιμή του αριθμού (`numatt`) είναι 0 ο κώδικας δημιουργίας βέλτιστου διανύσματος επίθεσης παρακάμπτεται, ενώ αν είναι 1 εκτελείται ώστε να βρεθεί το βέλτιστο διάνυσμα επίθεσης. Ο συγκεκριμένος κώδικας δέχτηκε τις κατάλληλες τροποποιήσεις ώστε να μπορεί να λειτουργεί και για περισσότερες από μία επιθέσεις ταυτόχρονα.

Με την κατάλληλη τροποποίηση των διαστάσεων των πινάκων που δέχεται ως ορίσματα η συνάρτηση `intlinprog` επιτεύχθηκε η εισαγωγή περισσότερων περιορισμών της μορφής $\sum_i H_{ki}c_i = a_i$ στο πρόβλημα (5.4). Επομένως ο επιτιθέμενος μπορεί να καθορίσει την τιμή περισσότερων μετρήσεων χωρίς να γίνει αντηλιπτός από τον αλγόριθμο ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων, ενώ παράλληλα να επιτύχει τη δημιουργία βέλτιστου διανύσματος επίθεσης ώστε να επηρεαστούν όσο το δυνατόν λιγότερες μετρήσεις.

Έτσι, το πρόγραμμα διαβάζει από το αρχείο `av1.txt` τον αριθμό των μετρήσεων που θα επηρεαστούν, τους δείκτες τους στο διάνυσμα z και τις τιμές που θα προστεθούν σε αυτές μέσω του διανύσματος επίθεσης.

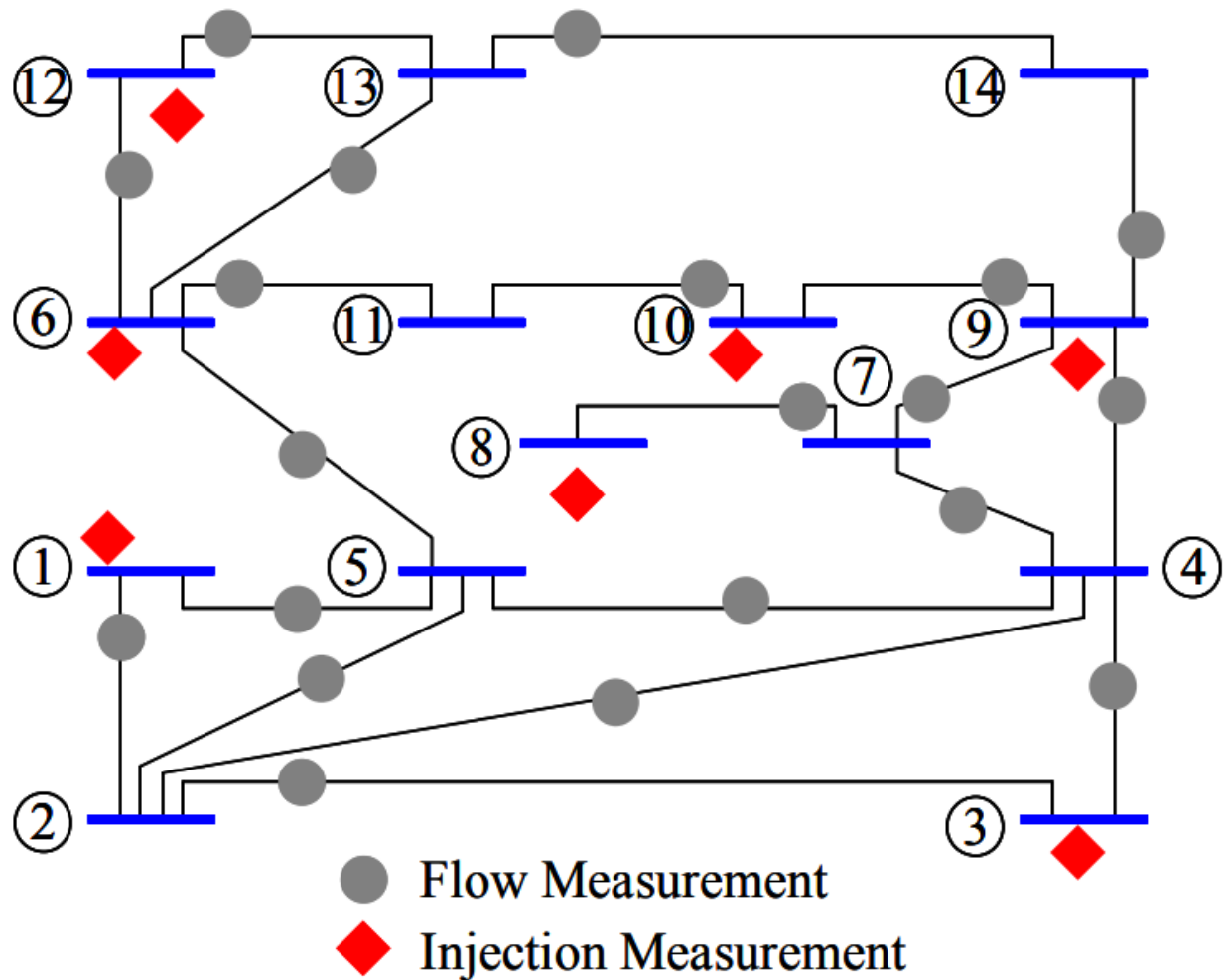
Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα

6.1 Εκτέλεση του Προγράμματος για Διαφορετικά Σενάρια Επιθέσεων στο Σύστημα 14 Ζυγών IEEE.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για διαφορετικά σενάρια επίθεσης, ώστε να εξεταστεί η κατάσταση του συστήματος σε όλες τις περιπτώσεις και να εξαχθούν τα αντίστοιχα συμπεράσματα. Αρχικά το πρόγραμμα λειτουργεί χωρίς την εφαρμογή επίθεσης για να φανούν τα αποτελέσματα που εξάγονται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στα επόμενα σενάρια παρουσιάζεται η λειτουργία και η απόκριση του συστήματος σε περίπτωση εισαγωγής εσφαλμένης μέτρησης, εφαρμογής μη ανιχνεύσιμης επίθεσης, πραγματοποίησης βέλτιστης επίθεσης και εφαρμογής πολλαπλών ταυτόχρονων επιθέσεων με βελτιστοποιημένο διάνυσμα επίθεσης. Οι τιμές όλων των μεταβλητών που σχετίζονται με την εκτίμηση κατάστασης και τον εντοπισμό εσφαλμένων δεδομένων σε κάθε σενάριο παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια.

6.1.1 Σενάριο 1: Χωρίς Επίθεση



Σχήμα 6.1: Τοπολογία δικτύου 14 ζυγών IEEE και θέσεις μετρητών

Στο πρώτο σενάριο πραγματοποιείται εκτίμηση κατάστασης και ανίχνευση εσφαλμένων δεδομένων στο δίκτυο 14 ζυγών της IEEE. Οι μετρήσεις προέκυψαν από τη ροή ισχύος και υπολογίστηκαν μέσω του matpower6.0. Τα δεδομένα εισάγονται στο πρόγραμμα μέσω των αρχείων dcddata14.txt και av1.txt. Το πρώτο περιέχει τις τιμές των παραμέτρων του δικτύου και τις μετρήσεις και το δεύτερο τα δεδομένα της επίθεσης. Τα αρχεία διαμορφώθηκαν ως εξής:

dcddata.txt:

14	27	0.01	NaN	NaN	NaN
1	2	-9.408597385	1	2	1.5688
1	5	-4.275460366	1	5	0.7551
2	3	-4.815550935	2	3	0.7324
2	4	-5.468178279	2	4	0.5613

2	5	-5.532045036	2	5	0.4152
3	4	-5.814360474	3	4	-0.2329
4	5	-23.74732843	4	5	-0.6116
4	7	-4.781943382	4	7	0.2807
4	9	-1.797979072	4	9	0.1608
5	6	-3.967939052	5	6	0.4409
6	11	-5.027652086	6	11	0.0735
6	12	-3.909151323	6	12	0.0779
6	13	-7.676364474	6	13	0.1775
7	8	-5.676979847	7	8	0
7	9	-9.09008272	7	9	0.2807
9	10	-11.83431953	9	10	0.0523
9	14	-3.69849841	9	14	0.0943
10	11	-5.206435154	10	11	-0.0379
12	13	-5.003001801	12	13	0.0161
13	14	-2.873398081	13	14	0.0564
NaN	NaN	NaN	1	0	2.3239
NaN	NaN	NaN	3	0	-0.942
NaN	NaN	NaN	6	0	-0.112
NaN	NaN	NaN	8	0	0
NaN	NaN	NaN	9	0	-0.295
NaN	NaN	NaN	10	0	-0.09
NaN	NaN	NaN	12	0	-0.061

Στην πρώτη σειρά βρίσκεται ο αριθμός των ζυγών (14) και ο αριθμός των μετρήσεων (27). Οι 3 πρώτες στήλες περιέχουν τους δείκτες και τις τιμές των παραμέτρων B του δικτύου και οι 3 επόμενες τους δείκτες και τις τιμές των μετρήσεων. Τα στοιχεία NaN (*Not a Number*) δηλώνουν ότι στα συγκεκριμένα σημεία δεν υπάρχει τιμή.

av1.txt:

0 NaN

Ο αριθμός 0 δηλώνει ότι δεν υπάρχει επίθεση στο συγκεκριμένο σενάριο.

Εκτελώντας το πρόγραμμα προκύπτουν τα παρακάτω:

Πίνακες μετρήσεων z_{raw} και z (μετρήσεις πριν και μετά την προσθήκη σφάλματος):

α/α	Μετρήσεις SCADA	z_{raw}	z
1	P_{1-2}	1,5688	1,7751
2	P_{1-5}	0,7551	1,00211
3	P_{2-3}	0,7324	0,98486
4	P_{2-4}	0,5613	0,77134
5	P_{2-5}	0,4152	0,50878
6	P_{3-4}	-0,2329	-0,24265
7	P_{4-5}	-0,6116	-0,6816
8	P_{4-7}	0,2807	0,40898
9	P_{4-9}	0,1608	0,17307
10	P_{5-6}	0,4409	0,62303
11	P_{6-11}	0,0735	0,09334
12	P_{6-12}	0,0779	0,1168
13	P_{6-13}	0,1775	0,18445
14	P_{7-8}	0	
15	P_{7-9}	0,2807	0,29568
16	P_{9-10}	0,0523	0,07755
17	P_{9-14}	0,0943	0,09452
18	P_{10-11}	-0,0379	-0,05251
19	P_{12-13}	0,0161	0,02276
20	P_{13-14}	0,0564	0,08098
21	P_1	2,3239	2,42202
22	P_3	-0,942	-1,13026
23	P_6	-0,112	-0,12653
24	P_8	0	
25	P_9	-0,295	-0,35859
26	P_{10}	-0,09	-0,13089
27	P_{12}	-0,061	-0,06653

Ιαωβιανή Μήτρα H:

$$H = \begin{bmatrix} -9,4086 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4,27546 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4,81555 & -4,81555 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5,46818 & 0 & -5,46818 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5,53205 & 0 & 0 & -5,53205 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5,81436 & -5,81436 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 23,74733 & -23,7473 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4,78194 & 0 & 0 & -4,78194 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,79798 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1,79798 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,96794 & -3,96794 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5,02765 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5,02765 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,90915 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3,90915 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7,67636 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,67636 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,67698 & -5,67698 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,09008 & 0 & -9,09008 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11,83432 & -11,8343 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,6985 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3,6985 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,20644 & -5,20644 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,003 & -5,003 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,8734 & -2,8734 \\ -9,4086 & 0 & 0 & -4,27546 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10,62991 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20,58111 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5,67698 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 26,42088 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17,04075 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8,91215 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Πίνακας R:

[illegible]

Πίνακας R1 (R^{-1}):

[illegible]

Μήτρα Κέρδους G:

G =	417,6642	-47,0825	-77,5095	-87,0407	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-47,0825	-431,772	278,8734	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-77,5095	278,8734	-1707,51	1655,231	0	-111,77	0	-37,3151	0	0	0	0	0
	-87,0407	0	1655,231	-1432,88	-50,5253	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	-50,5253	-5215,65	0	0	0	0	-540,471	-261,224	-638,266	0
	0	0	-111,77	0	0	264545,4	-263875	-558,536	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	-263875	494070,2	0	0	0	0	0	0
	0	0	-37,3151	0	0	-558,536	0	591,7466	-3602,61	0	0	0	-288,831
	0	0	0	0	0	0	0	-3602,61	-1877,82	1036,455	0	0	0
	0	0	0	0	-540,471	0	0	0	1036,455	-495,984	0	0	0
	0	0	0	0	-261,224	0	0	0	0	0	46,48748	-2180,22	0
	0	0	0	0	-638,266	0	0	0	0	0	-2180,22	3021,885	-203,4
	0	0	0	0	0	0	0	-288,831	0	0	0	-203,4	492,231

Μήτρα G1 (G^{-1}):

G1=	0,00317	0,00076	0,00172	0,00179	-2,00e-05	0	0	0	-2,00e-05	-2,00e-05	1,00e-05	0	0
	0,00076	-0,00105	0,00209	0,00237	-2,00e-05	0	0	1,00e-05	-2,00e-05	-2,00e-05	1,00e-05	0	0
	0,00172	0,00209	0,00353	0,00397	-4,00e-05	0	0	1,00e-05	-4,00e-05	-4,00e-05	2,00e-05	0	1,00e-05
	0,00179	0,00237	0,00397	0,00378	-3,00e-05	0	0	1,00e-05	-4,00e-05	-5,00e-05	1,00e-05	0	1,00e-05
	-2,00e-05	-2,00e-05	-4,00e-05	-3,00e-05	-0,00023	0	0	7,00e-05	1,00e-05	0,00026	0,0001	3,00e-05	5,00e-05
	0	0	0	0	0	1,00e-05	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1,00e-05	1,00e-05	1,00e-05	7,00e-05	0	0	-5,00e-05	-0,00028	-0,00067	-3,00e-05	-1,00e-05	-3,00e-05
	-2,00e-05	-2,00e-05	-4,00e-05	-4,00e-05	1,00e-05	0	0	-0,00028	-3,00e-05	-8,00e-05	1,00e-05	0	-0,00017
	-2,00e-05	-2,00e-05	-4,00e-05	-5,00e-05	0,00026	0	0	-0,00067	-8,00e-05	-0,00246	-9,00e-05	-3,00e-05	-0,00041
	1,00e-05	1,00e-05	2,00e-05	1,00e-05	0,0001	0	0	-3,00e-05	1,00e-05	-9,00e-05	-0,00068	-0,00049	-0,00022
	0	0	0	0	3,00e-05	0	0	-1,00e-05	0	-3,00e-05	-0,00049	-1,00e-05	-1,00e-05
	0	0	1,00e-05	1,00e-05	5,00e-05	0	0	-3,00e-05	-0,00017	-0,00041	-0,00022	-1,00e-05	0,00201

Διάνυσμα d :

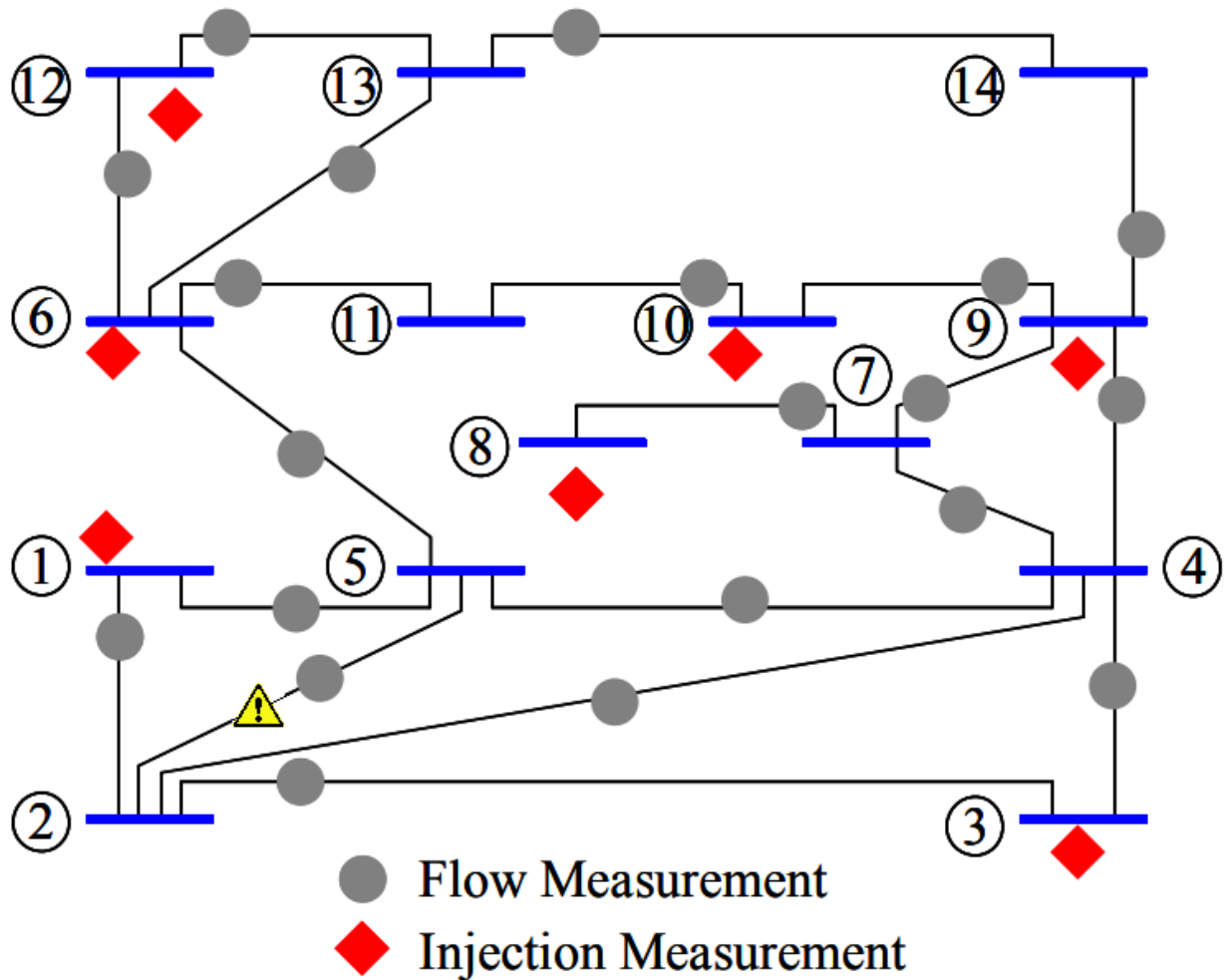
$$d = \begin{bmatrix} -0,05798 \\ -0,11088 \\ -0,09801 \\ -0,06191 \\ -0,01471 \\ 5,00e-05 \\ 3,00e-05 \\ 0,00965 \\ -0,01272 \\ 0,03075 \\ 0,00539 \\ -0,00729 \\ -0,02399 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Πίνακας εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές μετρήσεις z :

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	0,54548	1,22962
2	P_{1-5}	0,2647	0,73741
3	P_{2-3}	0,25478	0,73008
4	P_{2-4}	0,21893	0,55241
5	P_{2-5}	0,02177	0,48701
6	P_{3-4}	-0,07483	-0,16782
7	P_{4-5}	-0,85734	0,17574
8	P_{4-7}	-0,46892	0,8779
9	P_{4-9}	-0,19358	0,36665
10	P_{5-6}	-0,1873	0,81033
11	P_{6-11}	-0,22855	0,32189
12	P_{6-12}	-0,07857	0,19537
13	P_{6-13}	-0,05693	0,24137
14	P_{7-8}	0,00011	-6,00e-05
15	P_{7-9}	-0,08733	0,38301
16	P_{9-10}	0,26479	-0,18724
17	P_{9-14}	0,12443	-0,02992
18	P_{10-11}	-0,22633	0,17382
19	P_{12-13}	0,06345	-0,04069
20	P_{13-14}	0,04798	0,033
21	P_1	0,81018	1,61184
22	P_3	-1,17869	0,04843
23	P_6	-0,30272	0,17619
24	P_8	0,00015	-7,00e-05
25	P_9	0,25507	-0,61366
26	P_{10}	-0,21677	0,08588
27	P_{12}	0,04804	-0,11457

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η $J = 16,1632$ και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή της chi-square κατανομής για $m-n=13$ βαθμούς ελευθερίας. Η τιμή αυτή είναι 22,36 και μεγαλύτερη από την τιμή της J , επομένως το πρόγραμμα εμφανίζει την ένδειξη: NO BAD DATA DETECTED

6.1.2 Σενάριο 2: Εισαγωγή Εσφαλμένης Μέτρησης



Σχήμα 6.2: Τοπολογία δικτύου 14 ζυγών IEEE και θέσεις μετρητών

Στο σενάριο αυτό δίνονται ως είσοδος τα ίδια αρχεία όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, με τη διαφορά ότι μεταβάλλεται στόχος η τιμή μίας μέτρησης.

Επιλέγεται τυχαία το 5ο στοιχείο του διανύσματος z_{raw} , η τιμή του οποίου αντιστοιχεί στη ροή ενεργής ισχύος P_{2-5} . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα τίθεται $z_{\text{raw}}(5)=3$ (τιμή η οποία βρίσκεται εκτός του διαστήματος $[-3\sigma, 3\sigma]$).

Πίνακας μετρήσεων z_{raw} και z (μετρήσεις πριν και μετά την προσθήκη σφάλματος):

α/α	Μετρήσεις SCADA	z_{raw}	z
1	P_{1-2}	1,5688	1,675926
2	P_{1-5}	0,7551	1,027472
3	P_{2-3}	0,7324	0,771507
4	P_{2-4}	0,5613	0,744842
5	P_{2-5}	3	3,74131
6	P_{3-4}	-0,2329	-0,32354
7	P_{4-5}	-0,6116	-0,83019
8	P_{4-7}	0,2807	0,407628
9	P_{4-9}	0,1608	0,232519
10	P_{5-6}	0,4409	0,5146
11	P_{6-11}	0,0735	0,099249
12	P_{6-12}	0,0779	0,085624
13	P_{6-13}	0,1775	0,180214
14	P_{7-8}	0	$7,44e-05$
15	P_{7-9}	0,2807	0,350928
16	P_{9-10}	0,0523	0,064898
17	P_{9-14}	0,0943	0,137048
18	P_{10-11}	-0,0379	-0,0494
19	P_{12-13}	0,0161	0,021134
20	P_{13-14}	0,0564	0,080722
21	P_1	2,3239	3,259919
22	P_3	-0,942	-1,21358
23	P_6	-0,112	-0,12223
24	P_8	0	$2,40e-05$
25	P_9	-0,295	-0,42567
26	P_{10}	-0,09	-0,09129
27	P_{12}	-0,061	-0,07589

Η Ιακωβιανή μήτρα είναι ίδια με το προηγούμενο σενάριο αφού δε μεταβλήθηκαν τα χαρακτηριστικά του δικτύου και ο αριθμός των μετρήσεων.

Πίνακας R:

R=	0,83806	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0,51384	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0,38585	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0,37252	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	1,87076	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	-0,16167	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	-0,41499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0,20391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0,11636	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2574	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04972	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09021	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,17556	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06862	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0246	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01067	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04046	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,63006	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,60669	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,06101	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00011	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,21274	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,04554	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,03785	0	0

Πίνακας R1 (R^{-1}):

R1 =	1,19323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	1,94615	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	2,59166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	2,68441	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0,53454	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	-6,18539	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	-2,40968	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	4,90403	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	8,59405	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,88501	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20,11085	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,30338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,08564	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7288,432	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,69593	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30,72293	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14,57215	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40,6537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93,74715	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,71509	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,61347	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1,64829	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16,39	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8928,842	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4,70066	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-21,9569	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-26,4225	0

Μήτρα Κέρδους G:

$$G = \begin{bmatrix} 316,6571 & -60,0993 & -80,2665 & 8,31877 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -60,0993 & -335,257 & 209,1081 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -80,2665 & 209,1081 & -1347,82 & 1358,903 & 0 & -112,14 & 0 & -27,7822 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 8,31877 & 0 & 1358,903 & -1234,59 & -61,1676 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -61,1676 & -5363,66 & 0 & 0 & 0 & 0 & -508,348 & -356,11 & -653,239 & 0 \\ 0 & 0 & -112,14 & 0 & 0 & 235475,1 & -234892 & -470,652 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -234892 & 522652 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -27,7822 & 0 & 0 & -470,652 & 0 & 1719,187 & -4302,78 & 0 & 0 & 0 & -199,331 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4302,78 & -3175,23 & 1101,999 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -508,348 & 0 & 0 & 0 & 1101,999 & -593,651 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -356,11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 603,9558 & -2346,49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -653,239 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2346,49 & 3203,791 & -204,058 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -199,331 & 0 & 0 & 0 & -204,058 & 403,3889 \end{bmatrix}$$

Μήτρα G1 (G^{-1}):

$$G1 = \begin{bmatrix} 0,00344 & 0,00025 & 0,00124 & 0,00141 & -2,00e-05 & 0 & 0 & 0 & -1,00e-05 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 0 \\ 0,00025 & -0,00131 & 0,00229 & 0,00252 & -3,00e-05 & 0 & 0 & 0 & -2,00e-05 & 0 & 2,00e-05 & 1,00e-05 & 0 \\ 0,00124 & 0,00229 & 0,00369 & 0,00408 & -5,00e-05 & 0 & 0 & 1,00e-05 & -3,00e-05 & 1,00e-05 & 3,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 \\ 0,00141 & 0,00252 & 0,00408 & 0,00371 & -4,00e-05 & 0 & 0 & 0 & -3,00e-05 & -1,00e-05 & 2,00e-05 & 1,00e-05 & 0 \\ -2,00e-05 & -3,00e-05 & -5,00e-05 & -4,00e-05 & -0,00026 & 0 & 0 & 0,0001 & 3,00e-05 & 0,00041 & 0,00013 & 4,00e-05 & 7,00e-05 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 0,0001 & 0 & 0 & -0,00013 & -0,00025 & -0,00069 & -4,00e-05 & -2,00e-05 & -8,00e-05 \\ -1,00e-05 & -2,00e-05 & -3,00e-05 & -3,00e-05 & 3,00e-05 & 0 & 0 & -0,00025 & -9,00e-05 & -0,00025 & 0 & 0 & -0,00014 \\ 0 & 0 & 1,00e-05 & -1,00e-05 & 0,00041 & 0 & 0 & -0,00069 & -0,00025 & -0,00289 & -0,00017 & -7,00e-05 & -0,0004 \\ 1,00e-05 & 2,00e-05 & 3,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00013 & 0 & 0 & -4,00e-05 & 0 & -0,00017 & -0,0008 & -0,00057 & -0,00029 \\ 0 & 1,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 & 4,00e-05 & 0 & 0 & -2,00e-05 & 0 & -7,00e-05 & -0,00057 & -6,00e-05 & -3,00e-05 \\ 0 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 7,00e-05 & 0 & 0 & -8,00e-05 & -0,00014 & -0,0004 & -0,00029 & -3,00e-05 & 0,00225 \end{bmatrix}$$

Διάνυσμα d:

$$d = \begin{bmatrix} -0,06441 \\ -0,1176 \\ -0,09296 \\ -0,0486 \\ -0,01784 \\ 2,00e-05 \\ 1,00e-05 \\ 0,00757 \\ -0,00775 \\ 0,04211 \\ 0,00822 \\ -0,00664 \\ -0,02934 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Διάνυσμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές μετρήσεις z:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	0,606	1,61502
2	P_{1-5}	0,2078	0,85069
3	P_{2-3}	0,25615	0,4984
4	P_{2-4}	0,15609	0,5173
5	P_{2-5}	-0,08744	3,87781
6	P_{3-4}	-0,1433	-0,13809
7	P_{4-5}	-1,05324	0,24084
8	P_{4-7}	-0,44458	0,81348
9	P_{4-9}	-0,18074	0,36504
10	P_{5-6}	-0,12206	0,65816
11	P_{6-11}	-0,30139	0,37547
12	P_{6-12}	-0,10187	0,2182
13	P_{6-13}	-0,08599	0,27834
14	P_{7-8}	3,00e-05	-2,00e-05
15	P_{7-9}	-0,06864	0,40164
16	P_{9-10}	0,18127	-0,12377
17	P_{9-14}	0,13649	-0,01905
18	P_{10-11}	-0,25958	0,21528
19	P_{12-13}	0,07433	-0,05047
20	P_{13-14}	0,06522	0,01723
21	P_1	0,8138	1,57131
22	P_3	-1,25009	-0,03937
23	P_6	-0,36718	0,24013
24	P_8	6,00e-05	-2,00e-05
25	P_9	0,19991	-0,57566
26	P_{10}	-0,13209	-0,00024
27	P_{12}	0,07324	-0,14694

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η $J = 23,3165$ και συγκρίθηκε με την αντίστοιχη τιμή της chi-square κατανομής για $m-n=13$ βαθμούς ελευθερίας. Σε αυτό το σενάριο η τιμή της J είναι μεγαλύτερη από την τιμή της κατανομής (22,36) επομένως το πρόγραμμα καλεί την υπορουτίνα bad_data1, οι μεταβλητές της οποίας λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

Μήτρα Sr:

Sr =	0,13616	-0,05707	-0,03271	0,05834	0,02193	0,05449	-0,00053	-0,0008	-0,00126	5,00e-05	-5,00e-05	0,0013	-1,00e-05	-0,0003	0,00021	1,00e-05	-0,41758	0,02551	-0,00285	4,00e-05	0,00053	-0,00154	0,0006
	-0,04976	-0,04269	0,04199	0,08091	0,03043	0,06077	-0,00016	-0,00084	-0,00131	6,00e-05	6,00e-05	0,00169	-3,00e-05	-9,00e-05	0,00022	2,00e-05	-0,12298	0,10202	-0,00297	5,00e-05	0,00035	-0,00221	0,00062
	-0,1227	-0,07386	-0,00518	0,01736	0,00653	0,01544	-0,00013	-0,00022	-0,00035	1,00e-05	-1,00e-05	0,00038	0	-7,00e-05	6,00e-05	0	0,15595	-0,0964	-0,0008	1,00e-05	0,00014	-0,00046	0,00017
	-0,15971	-0,01661	-0,02558	0,0606	0,02278	0,05517	-0,0005	-0,00081	-0,00127	5,00e-05	-4,00e-05	0,00134	-1,00e-05	-0,00028	0,00021	1,00e-05	0,08327	0,10451	-0,00287	4,00e-05	0,00051	-0,0016	0,0006
	1,76003	-0,02168	0,07357	0,07038	0,02648	0,04659	0,0001	-0,00061	-0,00095	6,00e-05	0,00011	0,00142	-3,00e-05	6,00e-05	0,00016	2,00e-05	0,0864	0,11701	-0,00217	4,00e-05	0,00014	-0,00195	0,00046
	-0,02168	-0,08544	-0,02094	0,04347	0,01634	0,04002	-0,00037	-0,00059	-0,00092	3,00e-05	-3,00e-05	0,00097	-1,00e-05	-0,00021	0,00015	1,00e-05	-0,09975	0,22752	-0,00209	3,00e-05	0,00038	-0,00115	0,00044
	0,07357	-0,02094	0,01932	0,03895	0,01477	-0,03959	0,0026	0,00088	0,0014	3,00e-05	0,00064	0,00026	-6,00e-05	0,00145	-0,00022	5,00e-05	0,00928	0,0484	0,00317	2,00e-05	-0,00162	-0,00142	-0,00064
	0,07038	0,04347	0,03895	0,07023	-0,03102	-0,07586	0,00076	0,00112	0,00176	6,00e-05	0,00041	-0,0018	1,00e-05	0,00043	-0,00029	-1,00e-05	0,13925	-0,10424	0,00398	4,00e-05	-0,00075	0,00212	-0,00083
	0,02648	0,01634	0,01477	-0,03102	0,07422	-0,02912	0,00639	0,00126	0,00201	-3,00e-05	0,00119	0,00264	-0,00019	0,00357	-0,0003	0,00014	0,05236	-0,03918	0,00455	-2,00e-05	-0,00368	-0,00617	-0,00089
	0,04659	0,04002	-0,03959	-0,07586	-0,02912	0,27811	-0,01286	-0,00548	-0,00865	-6,00e-05	-0,00303	0,00111	0,00028	-0,0072	0,00137	-0,00019	0,11526	-0,09565	-0,01961	-4,00e-05	0,00836	0,00379	0,004
	0,0001	-0,00037	0,0026	0,00076	0,00639	-0,01286	0,13487	0,0183	0,02978	-4,00e-05	0,03084	-0,02742	-0,00545	0,07551	-0,00401	0,00382	-0,00069	0,00088	0,0675	-3,00e-05	-0,08993	-0,01852	-0,01248
	-0,00061	-0,00059	0,00088	0,00112	0,00126	-0,00548	0,0183	0,05839	0,0287	0	0,00422	-0,00438	0,0033	0,01024	-0,00523	-0,00231	-0,00164	0,0014	0,03244	0	-0,0123	-0,00163	-0,02859
	-0,00095	-0,00092	0,0014	0,00176	0,00201	-0,00865	0,02978	0,0287	0,13609	-1,00e-05	0,00682	-0,00612	-0,00065	0,01667	-0,02219	0,00045	-0,00257	0,0022	0,05117	-1,00e-05	-0,01987	-0,00401	-0,04328
	6,00e-05	3,00e-05	3,00e-05	6,00e-05	-3,00e-05	-6,00e-05	-4,00e-05	0	-1,00e-05	0	-0,00024	-2,00e-05	0	-2,00e-05	0	0	0,00011	-8,00e-05	-2,00e-05	0	2,00e-05	5,00e-05	0
	0,00011	-3,00e-05	0,00064	0,00041	0,00119	-0,00303	0,03084	0,00422	0,00682	-0,00024	0,1927	0,01675	-0,001	0,01726	-0,00096	0,0007	1,00e-05	8,00e-05	0,01545	-0,00018	-0,01721	-0,03522	-0,00293
	0,00142	0,00097	0,00026	-0,0018	0,00264	0,00111	-0,02742	-0,00438	-0,00612	-2,00e-05	0,01675	-0,0148	-0,00383	-0,01535	0,00162	0,00269	0,00299	-0,00232	-0,01389	-2,00e-05	-0,04887	0,0312	0,00397
	-3,00e-05	-1,00e-05	-6,00e-05	1,00e-05	-0,00019	0,00028	-0,00545	0,0033	-0,00065	0	-0,001	-0,00383	0,02958	-0,00305	-0,00464	-0,02076	-4,00e-05	2,00e-05	-0,00131	0	0,00291	0,0074	-0,00809
	6,00e-05	-0,00021	0,00145	0,00043	0,00357	-0,0072	0,07551	0,01024	0,01667	-2,00e-05	0,01726	-0,01535	-0,00305	0,04227	-0,00224	0,00214	-0,00039	0,00049	0,03779	-2,00e-05	-0,05035	-0,01037	-0,00699
	0,00016	0,00015	-0,00022	-0,00029	-0,0003	0,00137	-0,00401	-0,00523	-0,02219	0	-0,00096	0,00162	-0,00464	-0,00224	0,00438	0,00326	0,00043	-0,00036	-0,00817	0	0,00279	-0,00053	0,00839
	2,00e-05	1,00e-05	5,00e-05	-1,00e-05	0,00014	-0,00019	0,00382	-0,00231	0,00045	0	0,0007	0,00269	-0,02076	0,00214	0,00326	0,01457	3,00e-05	-1,00e-05	0,00092	0	-0,00204	-0,00519	0,00568
	0,0864	-0,09975	0,00928	0,13925	0,05236	0,11526	-0,00069	-0,00164	-0,00257	0,00011	1,00e-05	0,00299	-4,00e-05	-0,00039	0,00043	3,00e-05	1,11858	0,12754	-0,00583	8,00e-05	0,00088	-0,00374	0,00122
	0,11701	0,22752	0,0484	-0,10424	-0,03918	-0,09565	0,00088	0,0014	0,0022	-8,00e-05	8,00e-05	-0,00232	2,00e-05	0,00049	-0,00036	-1,00e-05	0,12754	-0,43875	0,00499	-6,00e-05	-0,0009	0,00275	-0,00104
	-0,00217	-0,00209	0,00317	0,00398	0,00455	-0,01961	0,0675	0,03244	0,05117	-2,00e-05	0,01545	-0,01389	-0,00131	0,03779	-0,00817	0,00092	-0,00583	0,00499	0,04959	-1,00e-05	-0,04503	-0,00905	-0,02373
	4,00e-05	3,00e-05	2,00e-05	4,00e-05	-2,00e-05	-4,00e-05	-3,00e-05	0	-1,00e-05	0	-0,00018	-2,00e-05	0	-2,00e-05	0	0	8,00e-05	-6,00e-05	-1,00e-05	0	2,00e-05	3,00e-05	0
	0,00014	0,00038	-0,00162	-0,00075	-0,00368	0,00836	-0,08993	-0,0123	-0,01987	2,00e-05	-0,01721	-0,04887	0,00291	-0,05035	0,00279	-0,00204	0,00088	-0,0009	-0,04503	2,00e-05	-0,12878	0,10274	0,00853
	-0,00195	-0,00115	-0,00142	0,00212	-0,00617	0,00379	-0,01852	-0,00163	-0,00401	5,00e-05	-0,03522	0,0312	0,0074	-0,01037	-0,00053	-0,00519	-0,00374	0,00275	-0,00905	3,00e-05	0,10274	-0,03438	-0,00021
	0,00046	0,00044	-0,00064	-0,00083	-0,00089	0,004	-0,01248	-0,02859	-0,04328	0	-0,00293	0,00397	-0,00809	-0,00699	0,00839	0,00568	0,00122	-0,00104	-0,02373	0	0,00853	-0,00021	0,02268

Διάλυμα κανονικοποιημένων υπολοίπων rn :

$$rn = \begin{bmatrix} 1,89085 \\ 1,09266 \\ 1,13777 \\ 1,29427 \\ \mathbf{2,95398} \\ -0,64415 \\ 1,85255 \\ 2,83235 \\ 1,29878 \\ 1,46939 \\ 1,07978 \\ 0,78343 \\ 0,88688 \\ 0,06591 \\ 1,03166 \\ -1,12444 \\ -0,0652 \\ 1,07978 \\ -0,78267 \\ 0,0652 \\ 2,34102 \\ -0,04032 \\ 1,17763 \\ 0,06591 \\ -1,63173 \\ 0,11423 \\ -0,96014 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Όπως ήταν αναμενόμενο το μεγαλύτερο κανονικοποιημένο υπόλοιπο αντιστοιχεί στην 5η μέτρηση δηλαδή στη ροή πραγματικής ισχύος P_{2-5} , αφού αυτή είναι η αλλοιωμένη μέτρηση.

Το πρόγραμμα εμφανίζει την παρακάτω ένδειξη: BAD DATA DETECTED IN P2-5

Στη συνέχεια μετά την αφαίρεση της εσφαλμένης μέτρησης το πρόγραμμα εκτελείται από την αρχή έως τον νέο υπολογισμό της $J = 20,3245$. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της chi-square για $m-n=12$ βαθμούς ελευθερίας (21,03), επομένως το πρόγραμμα τερματίζεται εμφανίζοντας την παρακάτω ένδειξη: NO BAD DATA DETECTED

6.1.3 Σενάριο 3: Εφαρμογή μη Ανιχνεύσιμης Επίθεσης

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.3, μια επίθεση είναι μη ανιχνεύσιμη αν το διάνυσμα επίθεσης a προκύπτει ως γραμμικός συνδιασμός της Ιακοβιανής μήτρας H , δηλαδή αν η εξίσωση $a = Hc$ είναι επιλύσιμη. Οποιοδήποτε και να είναι το διάνυσμα c (εκτός από 0 για το οποίο δεν υπάρχει επίθεση στο σύστημα) η επίθεση είναι μη ανιχνεύσιμη.

Το πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο τα ίδια δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στις 2 προηγούμενες περιπτώσεις.

Για το συγκεκριμένο σενάριο επιλέγουμε ένα τυχαίο διάνυσμα c και αφού η H είναι διαστάσεων 27×13 τότε το c έχει διαστάσεις 13×1 . Το διάνυσμα που επιλέγεται είναι το εξής:

$$c = \begin{bmatrix} 2 \\ 0.5 \\ 1.7 \\ 2.9 \\ 0.2 \\ 1.75 \\ 0 \\ 3.2 \\ 1.1 \\ 3.7 \\ 2.2 \\ 0.9 \\ 1.2 \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Το διάνυσμα αυτό στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τη μήτρα H (ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις) και δίνει το παρακάτω διάνυσμα επίθεσης a . Στη συνέχεια προστίθεται στο διάνυσμα μετρήσεων z και έτσι προκύπτει το νέο διάνυσμα αλλοιωμένων μετρήσεων.

Οι πίνακες με τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω:

α/α	Μετρήσεις SCADA	a	Zatt
1	P_{1-2}	-18,8172	-16,7077
2	P_{1-5}	-12,3988	-11,3612
3	P_{2-3}	7,22333	8,12076
4	P_{2-4}	1,64045	2,22529
5	P_{2-5}	-4,97884	-4,51608
6	P_{3-4}	-6,97723	-7,3164
7	P_{4-5}	-28,4968	-29,155
8	P_{4-7}	-0,2391	0,15759
9	P_{4-9}	-2,69697	-2,49283
10	P_{5-6}	10,71344	11,37403
11	P_{6-11}	-17,5968	-17,5204
12	P_{6-12}	-7,8183	-7,72312
13	P_{6-13}	-5,37346	-5,18648
14	P_{7-8}	9,93471	9,93481

α/α	Μετρήσεις SCADA	a	Zatt
15	P_{7-9}	-13,1806	-12,8993
16	P_{9-10}	24,85207	24,92471
17	P_{9-14}	7,397	7,52991
18	P_{10-11}	-13,5367	-13,591
19	P_{12-13}	6,5039	6,52069
20	P_{13-14}	-0,86202	-0,79431
21	P_1	-31,216	-28,5902
22	P_3	5,31496	3,9962
23	P_6	4,11622	3,98011
24	P_8	0	0,00009
25	P_9	84,54682	84,22501
26	P_{10}	18,74483	18,64299
27	P_{12}	19,60674	19,54131

Αποτελέσματα

Κεφάλαιο 6

Πίνακας R1 (R^{-1}):

R1 =	-0.12042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	0	-0.17697	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	0	0	0.24992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0.81354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	-0.45125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	-0.27696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	-0.06851	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	16.86165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.81338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17594	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.11417	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.25966	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.39133	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20131	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.1564	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.26626	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.14715	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30644	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.56982	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.0711	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4591	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50544	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6816.648	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02377	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.10741	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.10244	0

Μήτρα Κέρδους G:

$$G = \begin{bmatrix} -0,64185 & -5,79561 & -24,3257 & 10,94992 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5,79561 & 48,30865 & 9,3631 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -24,3257 & 9,3631 & 359,2738 & 38,63455 & 0 & -385,575 & 0 & 2,62942 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10,94992 & 0 & 38,63455 & -54,2089 & -2,77014 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2,77014 & 186,951 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,88598 & 3,96803 & 23,06003 & 0 \\ 0 & 0 & -385,575 & 0 & 0 & 379,1392 & -6,48781 & 12,92368 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6,48781 & 219694,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,62942 & 0 & 0 & 12,92368 & 0 & 15,92493 & -11,2453 & 0 & 0 & 0 & -3,64216 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -11,2453 & 38,4458 & 3,98876 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,88598 & 0 & 0 & 0 & 3,98876 & -6,87474 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3,96803 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11,83863 & -7,67009 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 23,06003 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7,67009 & -36,6074 & 21,21747 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3,64216 & 0 & 0 & 0 & 21,21747 & -17,5753 \end{bmatrix}$$

58

Μήτρα G1 (G^{-1}):

$$G1 = \begin{bmatrix} 0,09524 & 0,02298 & -0,05959 & -0,02332 & 0,00163 & -0,06286 & 0 & 0,06626 & 0,01821 & 0,01125 & -0,01067 & -0,01563 & -0,0326 \\ 0,02298 & 0,02472 & -0,00649 & 0 & 0,00021 & -0,00685 & 0 & 0,00723 & 0,00199 & 0,00124 & -0,00114 & -0,00166 & -0,0035 \\ -0,05959 & -0,00649 & -0,00338 & -0,01444 & -7,00e-05 & -0,00357 & 0 & 0,00369 & 0,00102 & 0,00056 & -0,00071 & -0,00113 & -0,00212 \\ -0,02332 & 0 & -0,01444 & -0,03345 & 5,00e-05 & -0,01523 & 0 & 0,0159 & 0,00439 & 0,00257 & -0,0028 & -0,00429 & -0,00848 \\ 0,00163 & 0,00021 & -7,00e-05 & 5,00e-05 & 0,00445 & -0,00014 & 0 & 0,00212 & 0,0004 & 0,0021 & 0,00276 & 0,00656 & 0,00748 \\ -0,06286 & -0,00685 & -0,00357 & -0,01523 & -0,00014 & -0,00104 & 0 & 0,00148 & 0,00041 & 0,00018 & -0,00036 & -0,00064 & -0,00107 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,06626 & 0,00723 & 0,00369 & 0,0159 & 0,00212 & 0,00148 & 0 & 0,06662 & 0,01829 & 0,0115 & -0,01039 & -0,01494 & -0,03185 \\ 0,01821 & 0,00199 & 0,00102 & 0,00439 & 0,0004 & 0,00041 & 0 & 0,01829 & 0,02956 & 0,01732 & -0,00298 & -0,00439 & -0,00909 \\ 0,01125 & 0,00124 & 0,00056 & 0,00257 & 0,0021 & 0,00018 & 0 & 0,0115 & 0,01732 & -0,13453 & -0,00057 & 0,00021 & -0,00214 \\ -0,01067 & -0,00114 & -0,00071 & -0,0028 & 0,00276 & -0,00036 & 0 & -0,01039 & -0,00298 & -0,00057 & 0,06197 & -0,0333 & -0,03804 \\ -0,01563 & -0,00166 & -0,00113 & -0,00429 & 0,00656 & -0,00064 & 0 & -0,01494 & -0,00439 & 0,00021 & -0,0333 & -0,048 & -0,05485 \\ -0,0326 & -0,0035 & -0,00212 & -0,00848 & 0,00748 & -0,00107 & 0 & -0,03185 & -0,00909 & -0,00214 & -0,03804 & -0,05485 & -0,11651 \end{bmatrix}$$

Διάνυσμα d :

$$d = \begin{bmatrix} 2,91209 \\ 0,58755 \\ 1,25501 \\ 2,72144 \\ 0,20707 \\ 1,19975 \\ 0 \\ 3,7926 \\ 1,25741 \\ 3,79382 \\ 2,07335 \\ 0,69829 \\ 0,80498 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το εκτιμώμενο διάνυσμα μετρήσεων Zest και παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα σε σχέση με τις αρχικές μετρήσεις z .

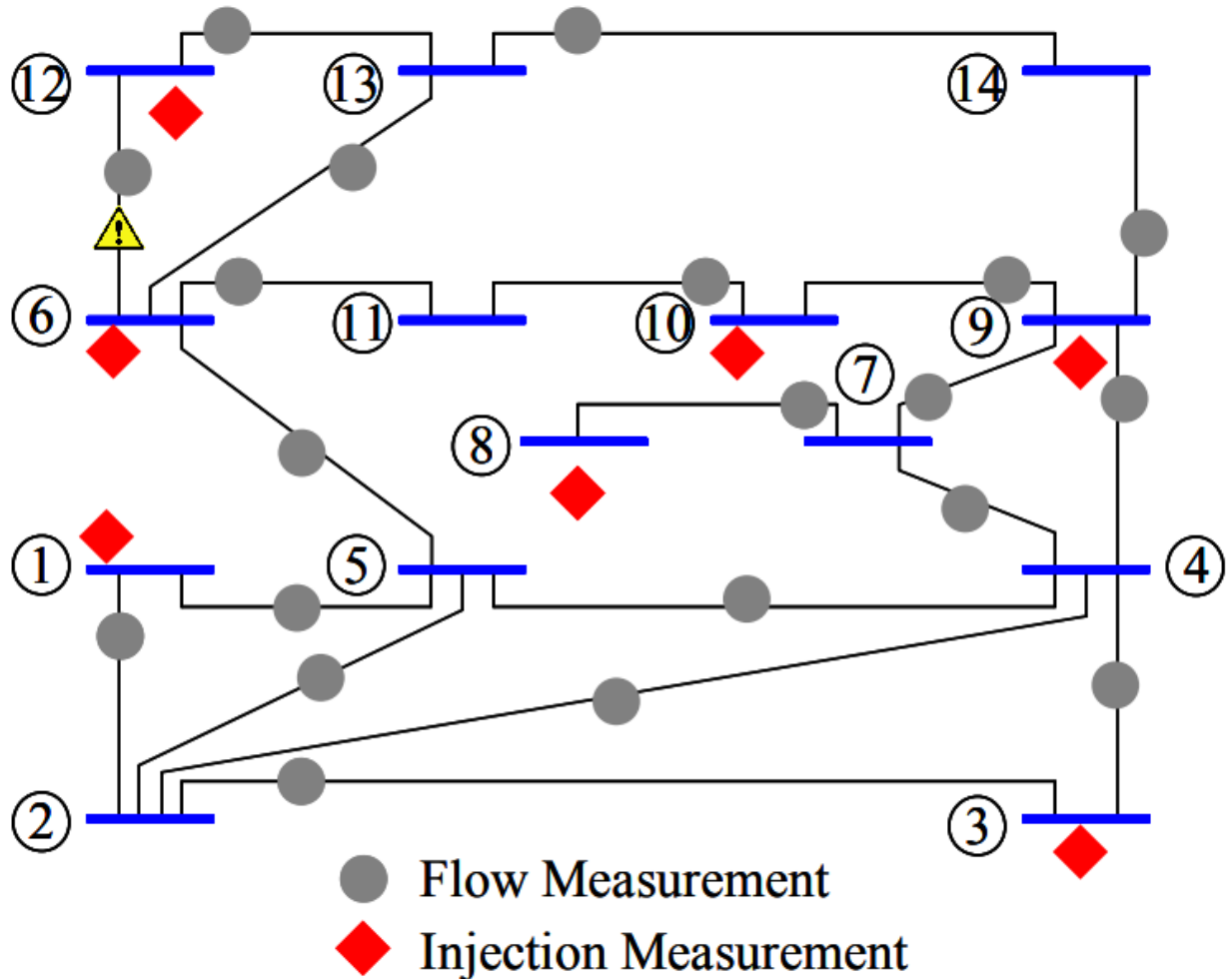
α/α	Μετρήσεις SCADA	z	Zest
1	P_{1-2}	1,8765	-27,3987
2	P_{1-5}	1,00264	-11,6354
3	P_{2-3}	0,79511	11,19395
4	P_{2-4}	0,75952	9,06119
5	P_{2-5}	0,42181	1,05468
6	P_{3-4}	-0,26512	-3,88089
7	P_{4-5}	-0,62571	-34,8237
8	P_{4-7}	0,29434	0,26425
9	P_{4-9}	0,22709	-4,56253
10	P_{5-6}	0,59414	9,97687
11	P_{6-11}	0,08519	-18,033
12	P_{6-12}	0,11501	-7,29558
13	P_{6-13}	0,18056	-3,77082
14	P_{7-8}	4,00ε-05	6,81098
15	P_{7-9}	0,33429	-23,5692
16	P_{9-10}	0,07239	30,00224
17	P_{9-14}	0,13187	11,0497
18	P_{10-11}	-0,04142	-13,2057
19	P_{12-13}	0,02009	6,87942
20	P_{13-14}	0,06901	-0,30656
21	P_1	3,07495	-39,0341
22	P_3	-1,27604	6,24556
23	P_6	-0,15419	4,26171
24	P_8	3,00ε-05	0
25	P_9	-0,39519	100,2038
26	P_{10}	-0,11941	21,42723
27	P_{12}	-0,06594	18,47802

Παρατηρώντας τις παραπάνω τιμές είναι προφανές ότι μια επίθεση μπορεί να αλλοιώσει δραματικά τις τιμές των μετρήσεων του συστήματος και να το οδηγήσει στη λήψη λανθασμένων αποφάσεων.

Η απόλυτη τιμή της J υπολογίστηκε ίση με 9,4833 άρα δεν καλείται η υπορουτίνα `bad_data1` και έτσι εμφανίζεται η ένδειξη: NO BAD DATA DETECTED

Επομένως, η μεγάλη αυτή αλλαγή των τιμών των μετρήσεων παρέμεινε «αόρατη» από το σύστημα, αφού το διάνυσμα επίθεσης υπολογίστηκε ως γραμμικός συνδιασμός της Ιακοβιανής μήτρας H .

6.1.4 Σενάριο 4: Εφαρμογή βέλτιστης μη ανιχνεύσιμης επίθεσης



Σχήμα 6.3: Τοπολογία δικτύου 14 ζυγών IEEE και θέσεις μετρητών

Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται να μεταβληθεί η τιμή μιας μέτρησης από το διάνυσμα μετρήσεων z αφήνοντας αναλλοίωτες όλες περισσότερες μετρήσεις είναι εφικτό. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο που μεταβλήθηκαν όλες οι μετρήσεις, το συγκεκριμένο παράδειγμα στοχεύει στη δημιουργία βέλτιστου διανύσματος επίθεσης. Το πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο τα ίδια δεδομένα δικτύου και μετρήσεων με τις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά το αρχείο `an1.txt` περιέχει τα παρακάτω δεδομένα:

```
1   NaN
12  2
```

Αυτό σημαίνει ότι πραγματοποιείται μία επίθεση, στη 12η μέτρηση του διανύσματος μετρήσεων και ότι στην τιμή της θα προστεθούν 2 μονάδες μετά το τέλος της επίθεσης. Η 12η μέτρηση του διανύσματος μετρήσεων αντιστοιχεί στην πραγματική ροή P_{6-12} . Σε αυτό το σενάριο ο αριθμός της πρώτης στήλης και πρώτης σειράς του av1.txt δεν είναι 0 επομένως θα πραγματοποιηθεί η δημιουργία του βέλτιστου διανύσματος επίθεσης, στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί εκτίμηση κατάστασης και μετά από αυτό ο έλεγχος για εσφαλμένα δεδομένα. Εκτελώντας το πρόγραμμα λαμβάνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Η Ιακωβιανή μήτρα H είναι ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις αφού δε μεταβλήθηκαν τα χαρακτηριστικά του δικτύου και ο αριθμός των μετρήσεων.

Έτσι φτάνουμε στο παρακάτω διάνυσμα μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,67555
2	P_{1-5}	1,08339
3	P_{2-3}	0,94475
4	P_{2-4}	0,71567
5	P_{2-5}	0,44531
6	P_{3-4}	-0,33215
7	P_{4-5}	-0,80176
8	P_{4-7}	0,32999
9	P_{4-9}	0,20212
10	P_{5-6}	0,52952
11	P_{6-11}	0,0763
12	P_{6-12}	0,08727
13	P_{6-13}	0,18846
14	P_{7-8}	0,00002
15	P_{7-9}	0,3144
16	P_{9-10}	0,06325
17	P_{9-14}	0,09665
18	P_{10-11}	-0,05492
19	P_{12-13}	0,0238
20	P_{13-14}	0,07029
21	P_1	2,89244
22	P_3	-1,10103
23	P_6	-0,16231
24	P_8	0,00004
25	P_9	-0,31139
26	P_{10}	-0,12503
27	P_{12}	-0,07285

(Οι τιμές μπορεί να διαφέρουν ελάχιστα από σενάριο σε σενάριο γιατί κάθε φορά που τρέχει το πρόγραμμα το σφάλμα που προστίθεται στις αρχικές μετρήσεις είναι τυχαίο.)

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.3 χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `intlinprog` η οποία εφαρμόζει την μέθοδο «Big M» για τον προσδιορισμό του βέλτιστου διανύσματος επίθεσης. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει το διάνυσμα δυαδικών αριθμών x και το διάνυσμα c που πολλαπλασιάζεται με την H δίνει το διάνυσμα επίθεσης a . Τα μηδενικά του διανύσματος x δηλώνουν την ύπαρξη μηδενικών στις αντίστοιχες θέσεις του διανύσματος

επίθεσης και οι μονάδες δηλώνουν την ύπαρξη τιμής.

Η συνάρτηση intlinprog υπολόγισε το παρακάτω διάνυσμα c :

$$c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0,511620 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάνυσμα x όπως προέκυψε από την intlinprog καθώς και το διάνυσμα a έτσι όπως υπολογίστηκε από το πρόγραμμα, αποδεικνύοντας όλα τα παραπάνω:

	x	a
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	1	2
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	1	-2,55964
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
25	0	0
26	0	0
27	1	-4,55964

Όπως φαίνεται από τις τιμές, υπάρχει απόλυτη αντιστοιχία μηδενικών στα δύο διανύσματα. Έτσι οι μόνες μετρήσεις του διανύσματος μετρήσεων που θα επηρεαστούν (εκτός από τη 12η) είναι η 19η και η 27η. Επομένως, για να επιτευχθεί η συγκεκριμένη επίθεση είναι αναγκαία και η αλλοίωση τουλάχιστον 2 ακόμα μετρήσεων.

Ο πίνακας επηρεασμένων μετρήσεων $Z_{att}=z+a$ είναι ο εξής:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Z_{att}
1	P_{1-2}	1,67555
2	P_{1-5}	1,08339
3	P_{2-3}	0,94475
4	P_{2-4}	0,71567
5	P_{2-5}	0,44531
6	P_{3-4}	-0,33215
7	P_{4-5}	-0,80176
8	P_{4-7}	0,32999
9	P_{4-9}	0,20212
10	P_{5-6}	0,52952
11	P_{6-11}	0,0763
12	P_{6-12}	2,08727
13	P_{6-13}	0,18846
14	P_{7-8}	0,00002
15	P_{7-9}	0,3144
16	P_{9-10}	0,06325
17	P_{9-14}	0,09665
18	P_{10-11}	-0,05492
19	P_{12-13}	-2,53584
20	P_{13-14}	0,07029
21	P_1	2,89244
22	P_3	-1,10103
23	P_6	-0,16231
24	P_8	0,00004
25	P_9	-0,31139
26	P_{10}	-0,12503
27	P_{12}	-4,63248

Ακολουθεί εκτίμηση κατάστασης:

Μήτρα κέρδους G:

$$G = \begin{bmatrix} 436,861 & -49,0812 & -83,5371 & -109,575 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -49,0812 & -359,895 & 203,6859 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -83,5371 & 203,6859 & -1356,78 & 1407,091 & 0 & -138,508 & 0 & -31,9571 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -109,575 & 0 & 1407,091 & -1163,88 & -59,4449 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -59,4449 & -3531,36 & 0 & 0 & 0 & 0 & -660,849 & -349,416 & -624,696 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -138,508 & 0 & 0 & 295805,4 & -295142 & -525,297 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -295142 & 567195,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -31,9571 & 0 & 0 & -525,297 & 0 & 767,6584 & -4414,31 & 0 & 0 & 0 & -282,487 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4414,31 & -1228,91 & 990,8206 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -660,849 & 0 & 0 & 0 & 990,8206 & -329,971 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -349,416 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 248,6401 & -2085,83 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -624,696 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2085,83 & 2944,783 & -234,253 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -282,487 & 0 & 0 & 0 & -234,253 & 516,7399 & 0 \end{bmatrix}$$

65

Μήτρα G1 (G^{-1}):

$$G1 = \begin{bmatrix} 0,00308 & 0,0005 & 0,00163 & 0,00168 & -4,00e-05 & 0 & 0 & 2,00e-05 & -1,00e-05 & 6,00e-05 & 3,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 \\ 0,0005 & -0,002 & 0,00149 & 0,00176 & -5,00e-05 & 0 & 0 & 2,00e-05 & -1,00e-05 & 7,00e-05 & 3,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 \\ 0,00163 & 0,00149 & 0,00303 & 0,00351 & -9,00e-05 & 0 & 0 & 3,00e-05 & -2,00e-05 & 0,00013 & 6,00e-05 & 2,00e-05 & 3,00e-05 & 3,00e-05 \\ 0,00168 & 0,00176 & 0,00351 & 0,00323 & -8,00e-05 & 0 & 0 & 3,00e-05 & -2,00e-05 & 9,00e-05 & 5,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 \\ -4,00e-05 & -5,00e-05 & -9,00e-05 & -8,00e-05 & -0,00057 & 0 & 0 & 0,00027 & 3,00e-05 & 0,00125 & 0,00034 & 0,00014 & 0,00021 & 0,00021 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2,00e-05 & 2,00e-05 & 3,00e-05 & 3,00e-05 & 0,00027 & 0 & 0 & -0,00022 & -0,00026 & -0,00131 & -0,00015 & -6,00e-05 & -0,00015 & -0,00015 \\ -1,00e-05 & -1,00e-05 & -2,00e-05 & -2,00e-05 & 3,00e-05 & 0 & 0 & -0,00026 & -4,00e-05 & -0,00017 & 0 & -1,00e-05 & -0,00014 & -0,00014 \\ 6,00e-05 & 7,00e-05 & 0,00013 & 9,00e-05 & 0,00125 & 0 & 0 & -0,00131 & -0,00017 & -0,000606 & -0,00069 & -0,00029 & -0,00085 & -0,00085 \\ 3,00e-05 & 3,00e-05 & 6,00e-05 & 5,00e-05 & 0,00034 & 0 & 0 & -0,00015 & 0 & -0,00069 & -0,00098 & -0,00065 & -0,00038 & -0,00038 \\ 1,00e-05 & 1,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00014 & 0 & 0 & -6,00e-05 & -1,00e-05 & -0,00029 & -0,00065 & -0,0001 & -8,00e-05 & -8,00e-05 \\ 1,00e-05 & 1,00e-05 & 3,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00021 & 0 & 0 & -0,00015 & -0,00014 & -0,00085 & -0,00038 & -8,00e-05 & 0,00182 & 0,00182 \end{bmatrix}$$

Διάνυσμα d:

$$d = \begin{bmatrix} -0,06174 \\ -0,11535 \\ -0,10443 \\ -0,06001 \\ -0,04385 \\ 6,00e-05 \\ 3,00e-05 \\ 0,02566 \\ -0,00815 \\ 0,12541 \\ 0,02473 \\ 0,00071 \\ -0,01103 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

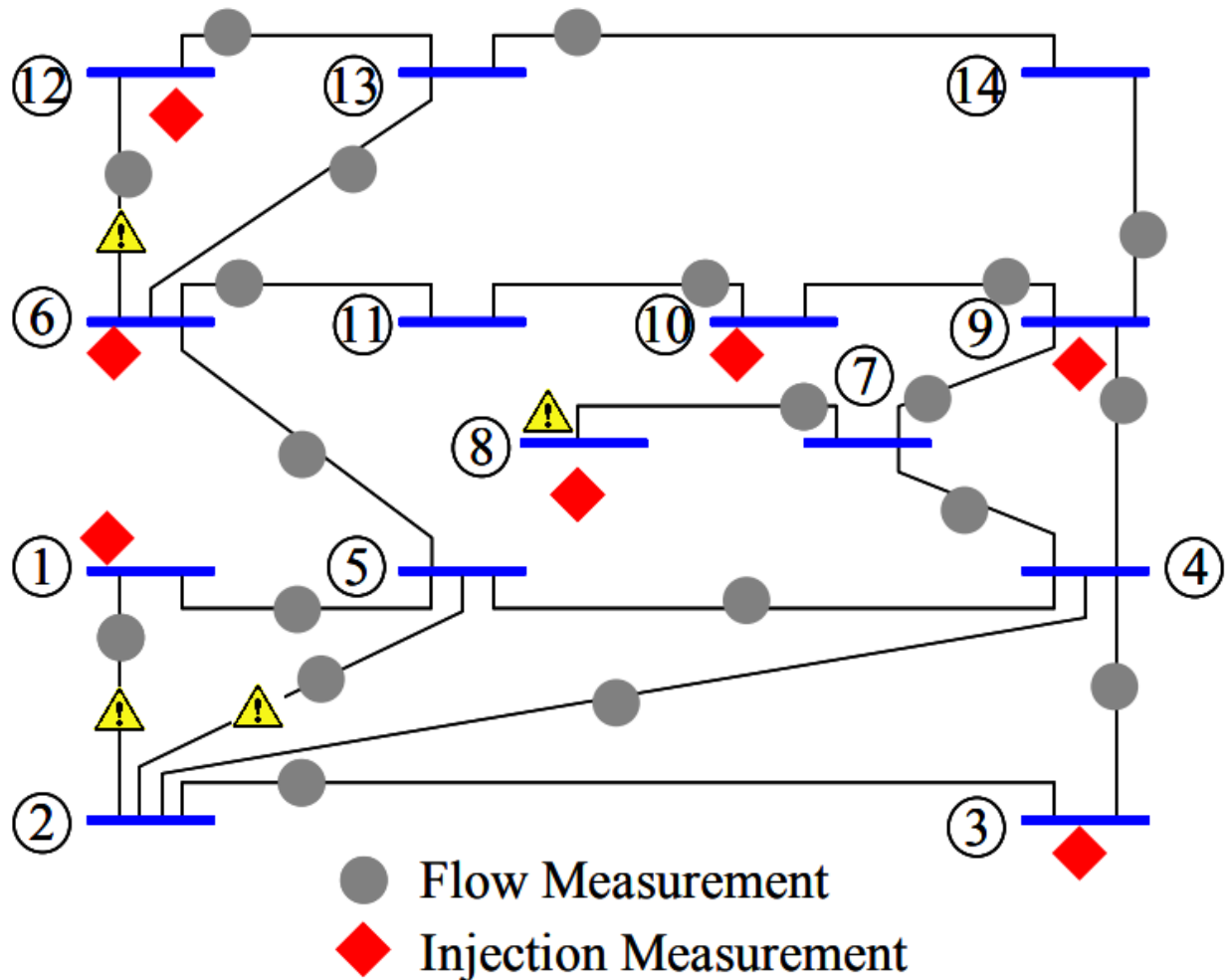
Διάνυσμα εκτιμώμενων μετρήσεων μετά την επίθεση Zattest και η διαφορά τους ratt από το διάνυσμα αλλοιωμένων μετρήσεων Zest:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt
1	P_{1-2}	0,58086	1,09469
2	P_{1-5}	0,25658	0,82681
3	P_{2-3}	0,25815	0,68659
4	P_{2-4}	0,23348	0,48219
5	P_{2-5}	-0,00955	0,45486
6	P_{3-4}	-0,06344	-0,26871
7	P_{4-5}	-1,05495	0,25319
8	P_{4-7}	-0,4997	0,8297
9	P_{4-9}	-0,23391	0,43603
10	P_{5-6}	-0,06414	0,59366
11	P_{6-11}	-0,85097	0,92727
12	P_{6-12}	1,73192	0,35535
13	P_{6-13}	-0,34201	0,53047
14	P_{7-8}	0,00016	-0,00015
15	P_{7-9}	-0,2327	0,5471
16	P_{9-10}	0,40013	-0,33688
17	P_{9-14}	0,13569	-0,03904
18	P_{10-11}	-0,69537	0,64046
19	P_{12-13}	-2,43945	-0,09639
20	P_{13-14}	0,03371	0,03658
21	P_1	0,83743	2,055
22	P_3	-1,22611	0,12508
23	P_6	-0,90242	0,74011
24	P_8	0,0002	-0,00016
25	P_9	0,67802	-0,98941
26	P_{10}	-0,13886	0,01383
27	P_{12}	-4,33923	-0,29325

Το διάνυσμα $ratt$ προκύπτει ίσο με το διάνυσμα $r=Zest-z$ δηλαδή με τη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών μετρήσεων πριν την εφαρμογή της επίθεσης. Αυτό αποδεικνύει ότι η επίθεση δεν επηρεάζει τη διαφορά των μετρήσεων και επομένως δε μπορεί να ανιχνευθεί.

Η συνάρτηση J υπολογίστηκε ίση με 19,2052 δηλαδή μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της χ^2 κατανομής για $m-n=13$ βαθμούς ελευθερίας (22,36) και έτσι δεν καλείται η υπορουτίνα ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων. Επομένως το πρόγραμμα εμφανίζει την ένδειξη: NO BAD DATA DETECTED

6.1.5 Σενάριο 5: Εφαρμογή Πολλαπλών Επιθέσεων με Βελτιστοποιημένο Διάνυσμα Επίθεσης



Στην προηγούμενη περίπτωση εφαρμόστηκε επίθεση σε μία μόνο μέτρηση, για την οποία υπολογίστηκε το βέλτιστο διάνυσμα επίθεσης. Σε αυτό το σενάριο υπολογίζεται βέλτιστο διάνυσμα επίθεσης που στοχεύει στην αλλοίωση περισσότερων μετρήσεων, υπό την προϋπόθεση ότι όσο το δυνατόν περισσότερες από τις υπόλοιπες μετρήσεις θα παραμείνουν ανεπηρέαστες.

Στο συγκεκριμένο σενάριο επιλέγεται η εκτέλεση επίθεσης που έχει ως στόχο να επηρεάσει 4 μετρήσεις ταυτόχρονα. Οι θέσεις των μετρήσεων στο διάνυσμα, οι πραγματικές ροές ισχύος στις οποίες αντιστοιχούν καθώς και η τιμή που επιλέγεται να προστεθεί σε αυτές παρουσιάζονται παρακάτω:

1	P_{1-2}	1
5	P_{2-5}	-2
12	P_{6-12}	5
24	P_8	-3.2

Επομένως τα δεδομένα του αρχείου av1.txt διαμορφώνονται ως εξής:

4	NaN
1	1
5	-2
12	5
24	-2.3

Εκτελώντας το πρόγραμμα διαμορφώνεται το διάνυσμα μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	2,20795
2	P_{1-5}	1,09717
3	P_{2-3}	0,77892
4	P_{2-4}	0,81773
5	P_{2-5}	0,54654
6	P_{3-4}	-0,24425
7	P_{4-5}	-0,69674
8	P_{4-7}	0,35751
9	P_{4-9}	0,23788
10	P_{5-6}	0,65371
11	P_{6-11}	0,07931
12	P_{6-12}	0,1158
13	P_{6-13}	0,26254
14	P_{7-8}	5,00e-05

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
15	P_{7-9}	0,3931
16	P_{9-10}	0,0523
17	P_{9-14}	0,11423
18	P_{10-11}	-0,05516
19	P_{12-13}	0,02256
20	P_{13-14}	0,08355
21	P_1	3,0859
22	P_3	-0,95882
23	P_6	-0,15947
24	P_8	9,00e-05
25	P_9	-0,39505
26	P_{10}	-0,12402
27	P_{12}	-0,08359

Η συνάρτηση `intlinprog` υπολόγισε το παρακάτω διάνυσμα c :

$$c = \begin{bmatrix} -0,10629 \\ 0 \\ 0 \\ 0,25524 \\ 0 \\ 0 \\ -0,40514 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1,27905 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Στη συνέχεια φαίνεται το διάνυσμα διαδυκών αριθμών x όπως υπολογίστηκε από τη συνάρτηση `intlinprog` σε αντιστοιχία με το βέλτιστο διάνυσμα a :

α/α	x	a
1	1	1
2	1	-1,09129
3	1	-0,51182
4	1	-0,58119
5	1	-2
6	0	0
7	1	-6,06137
8	0	0
9	0	0
10	1	1,01279
11	0	0
12	1	5
13	0	0
14	1	2,3

α/α	x	a
15	0	0
16	0	0
17	0	0
18	0	0
19	1	-6,39909
20	0	0
21	1	-0,09129
22	0	0
23	0	0
24	1	-2,3
25	0	0
26	0	0
27	1	-11,3991

Όπως είναι προφανές υπάρχει πλήρης αντιστοιχία μηδενικών στα δύο παραπάνω διανύσματα και επίσης ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί που τέθηκαν κατά τον προγραμματισμό της επίθεσης.

Ακολουθεί εκτίμηση κατάστασης:

Μήτρα κέρδους G:

$$G = \begin{bmatrix} 382,1357 & -59,5279 & -73,1138 & -85,8797 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -59,5279 & -453,268 & 277,0494 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -73,1138 & 277,0494 & -1668,18 & 1619,256 & 0 & -127,852 & 0 & -27,1567 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -85,8797 & 0 & 1619,256 & -1413,99 & -48,1554 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -48,1554 & -3923,15 & 0 & 0 & 0 & 0 & -635,842 & -263,47 & -448,547 & 0 \\ 0 & 0 & -127,852 & 0 & 0 & 259889,9 & -259342 & -420,187 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -259342 & 479029,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -27,1567 & 0 & 0 & -420,187 & 0 & 2132,4 & -4981,85 & 0 & 0 & 0 & -239,082 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4981,85 & -694,923 & 986,3963 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -635,842 & 0 & 0 & 0 & 986,3963 & -350,554 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -263,47 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 558,3722 & -2199,81 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -448,547 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2199,81 & 2845,521 & -197,16 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -239,082 & 0 & 0 & 0 & -197,16 & 436,2421 \end{bmatrix}$$

Αποτελέσματα

71

Μήτρα G1 (G^{-1}):

$$G1 = \begin{bmatrix} 0,00365 & 0,00082 & 0,00213 & 0,00222 & -4,00e-05 & 0 & 0 & 1,00e-05 & -1,00e-05 & 4,00e-05 & 2,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 \\ 0,00082 & -0,00097 & 0,0022 & 0,00247 & -4,00e-05 & 0 & 0 & 1,00e-05 & -1,00e-05 & 5,00e-05 & 2,00e-05 & 1,00e-05 & 1,00e-05 \\ 0,00213 & 0,0022 & 0,00405 & 0,00451 & -8,00e-05 & 0 & 0 & 2,00e-05 & -1,00e-05 & 0,0001 & 4,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 \\ 0,00222 & 0,00247 & 0,00451 & 0,00433 & -7,00e-05 & 0 & 0 & 2,00e-05 & -2,00e-05 & 7,00e-05 & 3,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 \\ -4,00e-05 & -4,00e-05 & -8,00e-05 & -7,00e-05 & -0,00045 & 0 & 0 & 0,00019 & 8,00e-05 & 0,00102 & 0,00022 & 0,00011 & 0,00015 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,00e-05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1,00e-05 & 1,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00019 & 0 & 0 & -0,00018 & -0,00027 & -0,00112 & -9,00e-05 & -4,00e-05 & -0,00012 \\ -1,00e-05 & -1,00e-05 & -1,00e-05 & -2,00e-05 & 8,00e-05 & 0 & 0 & -0,00027 & -0,00011 & -0,00044 & -2,00e-05 & -1,00e-05 & -0,00016 \\ 4,00e-05 & 5,00e-05 & 0,0001 & 7,00e-05 & 0,00102 & 0 & 0 & -0,00112 & -0,00044 & -0,00595 & -0,00045 & -0,00024 & -0,00072 \\ 2,00e-05 & 2,00e-05 & 4,00e-05 & 3,00e-05 & 0,00022 & 0 & 0 & -9,00e-05 & -2,00e-05 & -0,00045 & -0,00094 & -0,00072 & -0,00037 \\ 1,00e-05 & 1,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00011 & 0 & 0 & -4,00e-05 & -1,00e-05 & -0,00024 & -0,00072 & -0,0002 & -0,00011 \\ 1,00e-05 & 1,00e-05 & 2,00e-05 & 2,00e-05 & 0,00015 & 0 & 0 & -0,00012 & -0,00016 & -0,00072 & -0,00037 & -0,00011 & 0,00218 \end{bmatrix}$$

Κεφάλαιο 6

Διάνυσμα d:

$$d = \begin{bmatrix} -0,07478 \\ -0,11417 \\ -0,11885 \\ -0,08244 \\ -0,03584 \\ 4,00e-05 \\ 2,00e-05 \\ 0,0191 \\ -0,00269 \\ 0,11586 \\ 0,01751 \\ -0,00035 \\ -0,01976 \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Διάνυσμα εκτιμώμενων μετρήσεων μετά την επίθεση Zattest και η διαφορά τους ratt από το διάνυσμα αλλοιωμένων μετρήσεων Zest:

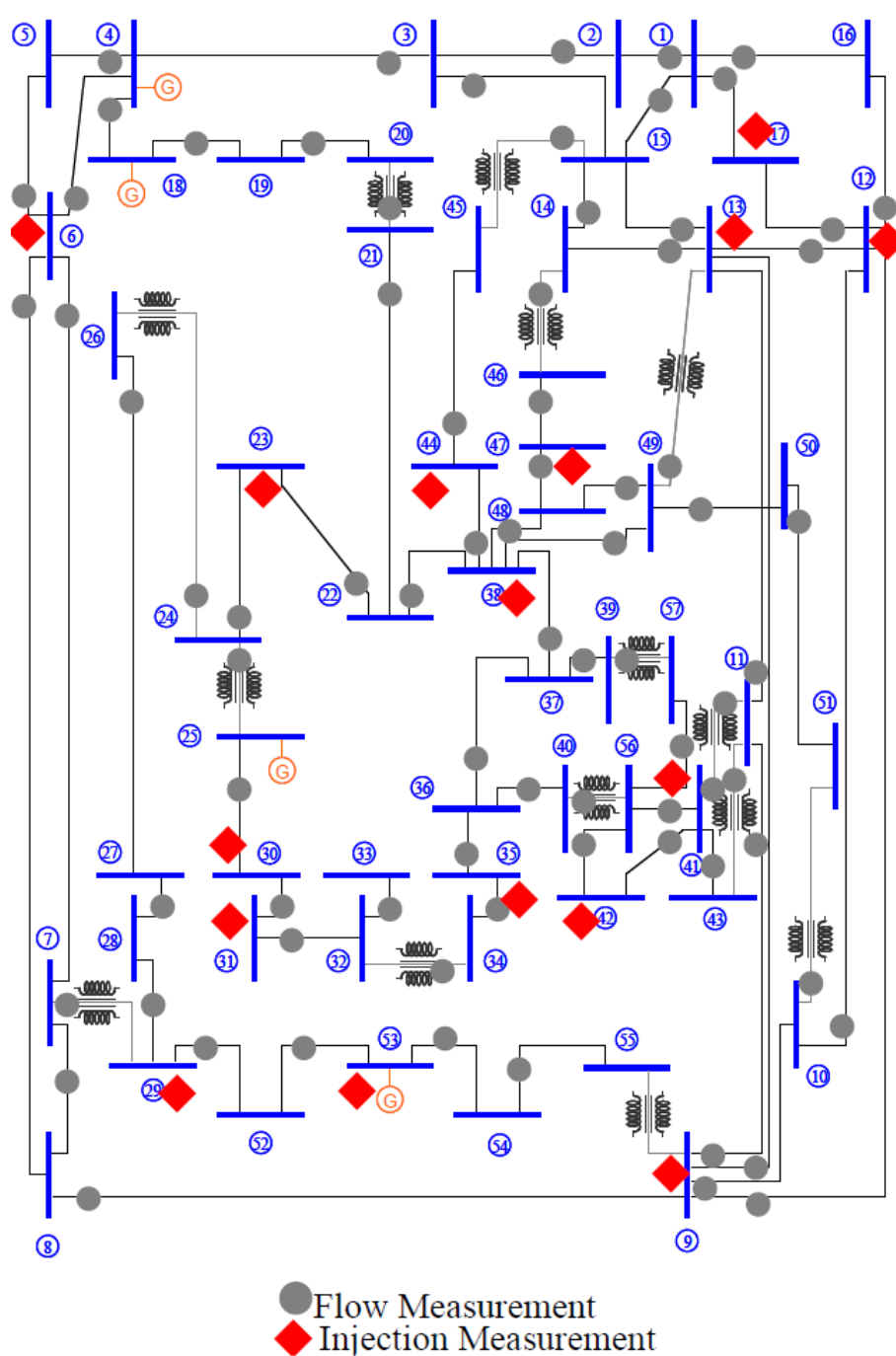
α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt
1	P_{1-2}	1,70355	1,5044
2	P_{1-5}	-0,73881	0,7447
3	P_{2-3}	-0,32212	0,58921
4	P_{2-4}	-0,34018	0,57672
5	P_{2-5}	-1,95761	0,50415
6	P_{3-4}	0,02721	-0,27146
7	P_{4-5}	-6,92605	0,16795
8	P_{4-7}	-0,56852	0,92603
9	P_{4-9}	-0,24804	0,48592
10	P_{5-6}	0,82789	0,83861
11	P_{6-11}	-0,76271	0,84202
12	P_{6-12}	4,79145	0,32435
13	P_{6-13}	-0,27248	0,53502
14	P_{7-8}	2,30008	-3,00e-05
15	P_{7-9}	-0,17328	0,56638
16	P_{9-10}	0,25789	-0,20186
17	P_{9-14}	0,14371	-0,02948
18	P_{10-11}	-0,61724	0,56208
19	P_{12-13}	-6,30977	-0,06677
20	P_{13-14}	0,05578	0,02778
21	P_1	0,96474	2,02988
22	P_3	-1,21364	0,25482
23	P_6	-0,73767	0,5782
24	P_8	-2,29987	-4,00e-05
25	P_9	0,50464	-0,89968
26	P_{10}	-0,04587	-0,07816
27	P_{12}	-11,2431	-0,23962

Το διάνυσμα $ratt$ προκύπτει ίσο με το διάνυσμα $r=Zest-z$ δηλαδή με τη διαφορά μεταξύ εκτιμώμενων και πραγματικών μετρήσεων πριν την εφαρμογή της επίθεσης. Αυτό αποδεικνύει ότι η επίθεση δεν επηρεάζει τη διαφορά των μετρήσεων και επομένως δε μπορεί να ανιχνευθεί.

Η συνάρτηση J υπολογίστηκε ίση με 20,5370 δηλαδή μικρότερη από την αντίστοιχη τιμή της χ^2 κατανομής για $m-n=13$ βαθμούς ελευθερίας (22,36) και έτσι δεν καλείται η υπορουτίνα ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων. Επομένως το πρόγραμμα εμφανίζει την ένδειξη: NO BAD DATA DETECTED

6.2 Εκτέλεση του Προγράμματος για Διαφορετικά Σενάρια Επιθέσεων στο Σύστημα 57 Ζυγών IEEE.

6.2.1 Σενάριο 1: Χωρίς Επίθεση



Αρχεία εισόδου:

dcdata57.txt

57	95	0.1	NaN	NaN	NaN
1	2	-1.606886657	1	2	1.0209
2	3	-6.107971694	1	15	1.4899
3	4	-13.14862981	1	16	0.7925
4	5	-7.296994302	1	17	0.9334
4	6	-6.402757685	2	3	0.9777
6	7	-9.135070071	3	4	0.6021
6	8	-5.383035659	3	15	0.3377
8	9	-9.093708414	4	5	0.138
9	10	-5.573183131	4	18	0.1396
9	11	-11.06142745	6	4	-0.1406
9	12	-3.172560172	6	5	-0.0066
9	13	-5.937090886	6	7	-0.1758
13	14	-21.65063655	6	8	-0.425
13	15	-10.75413861	7	8	-0.7794
1	15	-5.043663717	7	29	0.6009
1	16	-4.535730548	8	9	1.7803
1	17	-8.65248727	9	10	0.1717
3	15	-9.18805345	9	12	0.0255
4	18	-1.801801802	9	13	0.0232
4	18	-2.325581395	9	55	0.1893
5	6	-15.03787621	10	12	-0.176
7	8	-13.07429579	10	51	0.2964
10	12	-7.422533919	11	9	-0.1286
11	13	-12.81584402	11	13	-0.0993
12	13	-8.271345776	11	41	0.0919
12	16	-11.4891362	11	43	0.1359
12	17	-5.217630578	12	13	-0.0049
14	15	-17.03450187	12	16	-0.334
18	19	-1.459854015	12	17	-0.4846
19	20	-2.304147465	13	14	-0.1035
21	20	-1.287498391	13	15	-0.4889
21	22	-8.547008547	14	15	-0.6884
22	23	-65.78947368	14	46	0.4789
23	24	-3.90204882	15	45	0.3733
24	25	-0.000846024	18	19	0.0463
24	25	-0.81300813	19	20	0.0123
24	26	-21.14164905	21	20	0.0108
26	27	-3.937007874	21	22	-0.0108
27	28	-10.48218029	22	23	0.0965
28	29	-17.03577513	22	38	-0.1073
7	29	-15.43209877	24	23	-0.0332
25	30	-4.95049505	24	25	0.0707
30	31	-2.012072435	24	26	-0.1054

31	32	-1.324503311	25	30	0.0756
32	33	-27.77777778	26	27	-0.1054
34	32	-1.049317943	27	28	-0.2004
34	35	-12.79897083	28	29	-0.249
35	36	-18.60545691	29	52	0.1792
36	37	-27.32240437	30	31	0.0385
37	38	-9.906910389	31	32	-0.0203
37	39	-26.38522427	32	33	0.0381
36	40	-21.45922747	34	32	0.0746
22	38	-33.89830508	34	35	-0.0746
11	41	-1.335113485	35	36	-0.135
41	42	-2.840909091	36	37	-0.1707
41	43	-2.427184466	36	40	0.0346
38	44	-17.07406056	37	38	-0.2105
15	45	-9.596928983	37	39	0.0386
14	46	-13.60544218	38	44	-0.2435
46	47	-14.67338765	38	48	-0.1722
47	48	-42.91845494	39	57	0.0385
48	49	-7.741220016	40	56	0.0346
49	50	-7.8125	41	42	0.0888
50	51	-4.545454545	41	43	-0.1159
10	51	-14.04494382	41	11	-0.0919
13	49	-5.235602094	41	56	0.0561
29	52	-5.347593583	44	45	-0.3652
52	53	-10.16260163	46	47	0.4789
53	54	-4.310344828	47	48	0.1759
54	55	-4.415011038	49	13	-0.3243
11	43	-6.535947712	49	38	0.048
44	45	-8.043187123	49	48	-0.0004
40	56	-0.00083682	49	50	0.0966
56	41	-1.821493625	50	51	-0.1142
56	42	-2.824858757	52	53	0.1255
39	57	-0.000738007	53	54	-0.0757
57	56	-3.846153846	54	55	-0.1182
38	49	-5.648094965	56	42	-0.0158
38	48	-20.74688797	57	56	-0.0285
9	55	-8.298755187	6	0	-0.75
NaN	NaN	NaN	9	0	-1.21
NaN	NaN	NaN	12	0	-0.67
NaN	NaN	NaN	13	0	-0.18
NaN	NaN	NaN	17	0	-0.42
NaN	NaN	NaN	23	0	-0.063
NaN	NaN	NaN	29	0	-0.17
NaN	NaN	NaN	30	0	-0.036
NaN	NaN	NaN	31	0	-0.058
NaN	NaN	NaN	35	0	-0.06
NaN	NaN	NaN	38	0	-0.14
NaN	NaN	NaN	41	0	-0.063
NaN	NaN	NaN	42	0	-0.071
NaN	NaN	NaN	44	0	-0.12

NaN	NaN	NaN	47	0	-0.297
NaN	NaN	NaN	53	0	-0.2

av1.txt

0 NaN

Πίνακας μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z	α/α	Μετρήσεις SCADA	z	α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,18069	33	P_{14-46}	0,59239	65	P_{41-11}	-0,09715
2	P_{1-15}	1,50239	34	P_{15-45}	0,413	66	P_{41-56}	0,05655
3	P_{1-16}	0,93035	35	P_{18-19}	0,05522	67	P_{44-45}	-0,41707
4	P_{1-17}	0,97213	36	P_{19-20}	0,0139	68	P_{46-47}	0,57774
5	P_{2-3}	1,11985	37	P_{21-20}	0,01168	69	P_{47-48}	0,19991
6	P_{3-4}	0,69181	38	P_{21-22}	-0,01193	70	P_{49-13}	-0,39101
7	P_{3-15}	0,40162	39	P_{22-23}	0,11349	71	P_{49-38}	0,05042
8	P_{4-5}	0,1399	40	P_{22-38}	-0,13136	72	P_{49-48}	-0,00045
9	P_{4-18}	0,16885	41	P_{24-23}	-0,04042	73	P_{49-50}	0,10072
10	P_{6-4}	-0,15383	42	P_{24-25}	0,07304	74	P_{50-51}	-0,12229
11	P_{6-5}	-0,00724	43	P_{24-26}	-0,10849	75	P_{52-53}	0,12607
12	P_{6-7}	-0,18981	44	P_{25-30}	0,09217	76	P_{53-54}	-0,08869
13	P_{6-8}	-0,48282	45	P_{26-27}	-0,12225	77	P_{54-55}	-0,14575
14	P_{7-8}	-0,8358	46	P_{27-28}	-0,20238	78	P_{56-42}	-0,01868
15	P_{7-29}	0,65481	47	P_{28-29}	-0,27978	79	P_{57-56}	-0,03376
16	P_{8-9}	1,93255	48	P_{29-52}	0,21849	80	P_6	-0,8496
17	P_{9-10}	0,19823	49	P_{30-31}	0,04215	81	P_9	-1,29361
18	P_{9-12}	0,02967	50	P_{31-32}	-0,02175	82	P_{12}	-0,71019
19	P_{9-13}	0,02886	51	P_{32-33}	0,04029	83	P_{13}	-0,19262
20	P_{9-55}	0,23312	52	P_{34-32}	0,07828	84	P_{17}	-0,51908
21	P_{10-12}	-0,1911	53	P_{34-35}	-0,08154	85	P_{23}	-0,06656
22	P_{10-51}	0,31042	54	P_{35-36}	-0,15466	86	P_{29}	-0,19237
23	P_{11-9}	-0,15755	55	P_{36-37}	-0,18192	87	P_{30}	-0,0378
24	P_{11-13}	-0,10632	56	P_{36-40}	0,03989	88	P_{31}	-0,06416
25	P_{11-41}	0,10432	57	P_{37-38}	-0,25197	89	P_{35}	-0,06209
26	P_{11-43}	0,16653	58	P_{37-39}	0,03959	90	P_{38}	-0,15287
27	P_{12-13}	-0,00501	59	P_{38-44}	-0,28699	91	P_{41}	-0,07523
28	P_{12-16}	-0,35508	60	P_{38-48}	-0,19955	92	P_{42}	-0,08512
29	P_{12-17}	-0,53529	61	P_{39-57}	0,04299	93	P_{44}	-0,14655
30	P_{13-14}	-0,11814	62	P_{40-56}	0,04253	94	P_{47}	-0,33631
31	P_{13-15}	-0,59662	63	P_{41-42}	0,0909	95	P_{53}	-0,24005
32	P_{14-15}	-0,7252	64	P_{41-43}	-0,1329			

Πίνακας εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές z :

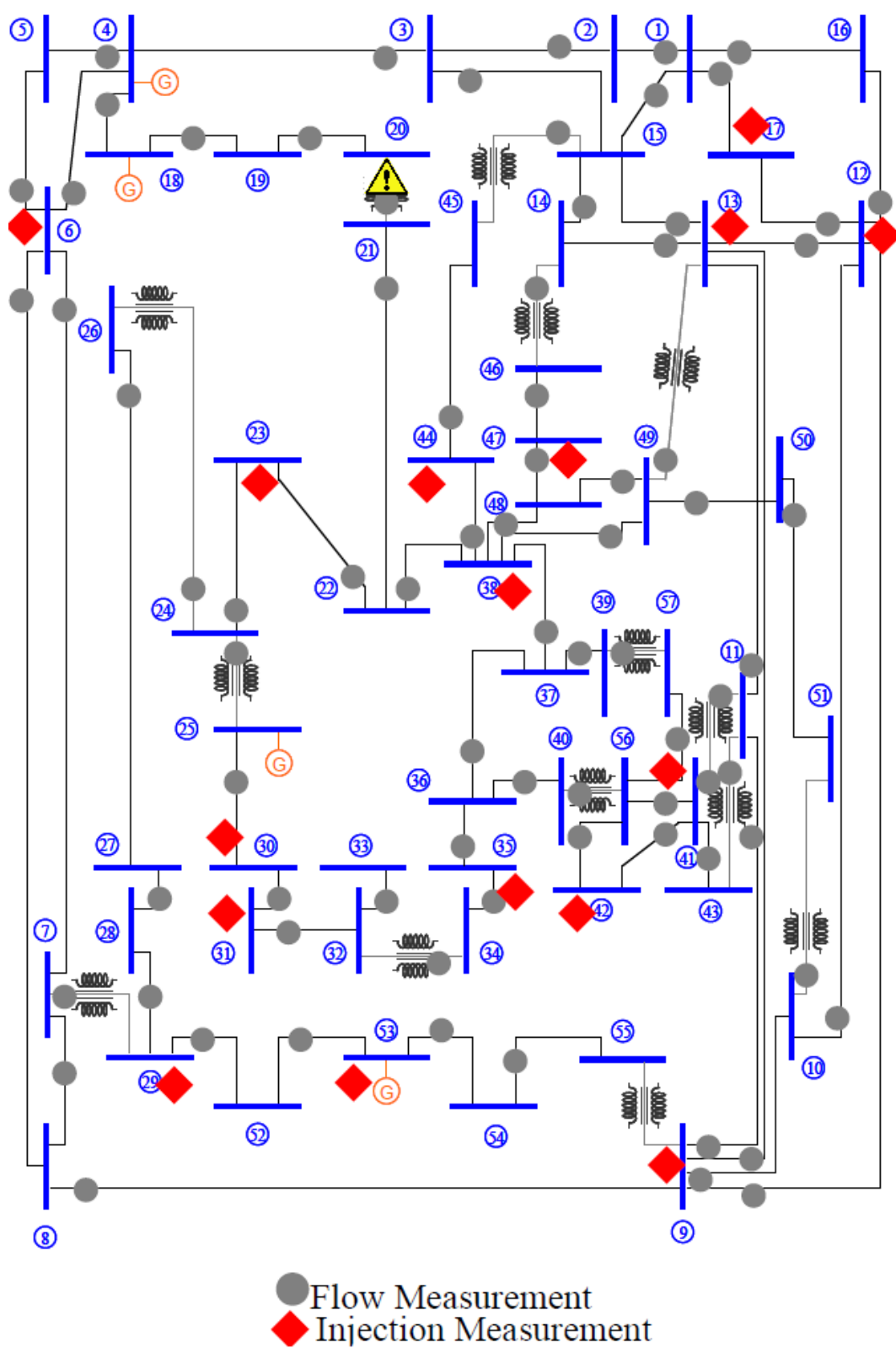
α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	-0,33209	1,51277	33	P_{14-46}	0,02068	0,5717	65	P_{41-11}	-0,00266	-0,09449
2	P_{1-15}	-0,24956	1,75195	34	P_{15-45}	0,24439	0,16862	66	P_{41-56}	0,03189	0,02466
3	P_{1-16}	-0,09785	1,0282	35	P_{18-19}	0,02846	0,02676	67	P_{44-45}	-0,22473	-0,19234
4	P_{1-17}	0,2606	0,71152	36	P_{19-20}	0,01268	0,00121	68	P_{46-47}	0,04764	0,53009
5	P_{2-3}	0,75484	0,36502	37	P_{21-20}	0,01336	-0,00167	69	P_{47-48}	0,04191	0,158
6	P_{3-4}	0,83377	-0,14195	38	P_{21-22}	-0,01217	0,00024	70	P_{49-13}	0,00247	-0,39348
7	P_{3-15}	0,30874	0,09288	39	P_{22-23}	0,04619	0,0673	71	P_{49-38}	-0,00341	0,05382
8	P_{4-5}	0,18841	-0,0485	40	P_{22-38}	0,02334	-0,1547	72	P_{49-48}	-0,00044	0
9	P_{4-18}	0,01659	0,15226	41	P_{24-23}	-0,04938	0,00897	73	P_{49-50}	0,14929	-0,04857
10	P_{6-4}	-0,16842	0,01459	42	P_{24-25}	-0,01906	0,0921	74	P_{50-51}	-0,00608	-0,11622
11	P_{6-5}	-0,00729	5,00e-05	43	P_{24-26}	-0,08391	-0,02458	75	P_{52-53}	0,08978	0,03629
12	P_{6-7}	-0,23899	0,04919	44	P_{25-30}	0,07488	0,01729	76	P_{53-54}	-0,04499	-0,0437
13	P_{6-8}	-0,52398	0,04117	45	P_{26-27}	0,00975	-0,132	77	P_{54-55}	-0,04163	-0,10411
14	P_{7-8}	-0,93059	0,09479	46	P_{27-28}	-0,02298	-0,1794	78	P_{56-42}	-0,01993	0,00124
15	P_{7-29}	0,36189	0,29292	47	P_{28-29}	-0,10933	-0,17045	79	P_{57-56}	-0,03377	0
16	P_{8-9}	0,79339	1,13916	48	P_{29-52}	0,07795	0,14054	80	P_6	-0,23854	-0,61105
17	P_{9-10}	0,10684	0,09138	49	P_{30-31}	0,0386	0,00354	81	P_9	0,14922	-1,44284
18	P_{9-12}	0,02069	0,00897	50	P_{31-32}	-0,01743	-0,00431	82	P_{12}	-0,10898	-0,60121
19	P_{9-13}	0,03495	-0,00609	51	P_{32-33}	0,04029	0	83	P_{13}	-0,157	-0,03562
20	P_{9-55}	0,09065	0,14247	52	P_{34-32}	0,00382	0,07446	84	P_{17}	-0,41775	-0,10133
21	P_{10-12}	-0,09388	-0,09722	53	P_{34-35}	-0,07547	-0,00607	85	P_{23}	-0,0953	0,02875
22	P_{10-51}	0,05643	0,25399	54	P_{35-36}	-0,08338	-0,07128	86	P_{29}	-0,1483	-0,04407
23	P_{11-9}	-0,1296	-0,02795	55	P_{36-37}	-0,10426	-0,07766	87	P_{30}	-0,03968	0,00188
24	P_{11-13}	-0,07471	-0,03161	56	P_{36-40}	0,03989	0	88	P_{31}	-0,08303	0,01888
25	P_{11-41}	0,00266	0,10166	57	P_{37-38}	0,0739	-0,32588	89	P_{35}	-0,06881	0,00673
26	P_{11-43}	0,0848	0,08173	58	P_{37-39}	0,03958	0	90	P_{38}	-0,11816	-0,03472
27	P_{12-13}	-0,00526	0,00025	59	P_{38-44}	0,04392	-0,3309	91	P_{41}	-0,08634	0,01111
28	P_{12-16}	-0,28304	-0,07204	60	P_{38-48}	0,01132	-0,21086	92	P_{42}	-0,11729	0,03218
29	P_{12-17}	0,14117	-0,67646	61	P_{39-57}	3,00e-05	0,04296	93	P_{44}	-0,09861	-0,04794
30	P_{13-14}	-0,1358	0,01767	62	P_{40-56}	2,00e-05	0,04251	94	P_{47}	-0,05314	-0,28317
31	P_{13-15}	-0,55822	-0,03841	63	P_{41-42}	0,0297	0,0612	95	P_{53}	-0,39559	0,15554
32	P_{14-15}	-0,77737	0,05217	64	P_{41-43}	0,02666	-0,15955				

$J=52,5432$

Τιμή της χ^2 κατανομής για $95-57=38$ βαθμούς ελευθερίας = 53,38

Έξοδος: NO BAD DATA DETECTED

6.2.2 Σενάριο 2: Εισαγωγή Εσφαλμένης Μέτρησης



Αρχεία εισόδου: dcdata57.txt, av1.txt (ίδια δεδομένα με το προηγούμενο σενάριο)

Εσφαλμένη μέτρηση: $z(37)=2$ (τιμή εκτός του διαστήματος $[-3\sigma, 3\sigma]$)

Διάγραμμα μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z	α/α	Μετρήσεις SCADA	z	α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,04147	33	P_{14-46}	0,56108	65	P_{41-11}	-0,10656
2	P_{1-15}	1,49162	34	P_{15-45}	0,37907	66	P_{41-56}	0,0634
3	P_{1-16}	0,83392	35	P_{18-19}	0,05325	67	P_{44-45}	-0,37712
4	P_{1-17}	1,10062	36	P_{19-20}	0,01271	68	P_{46-47}	0,50052
5	P_{2-3}	1,10297	37	P_{21-20}	2,27361	69	P_{47-48}	0,19043
6	P_{3-4}	0,64623	38	P_{21-22}	-0,01127	70	P_{49-13}	-0,32584
7	P_{3-15}	0,39271	39	P_{22-23}	0,1003	71	P_{49-38}	0,05046
8	P_{4-5}	0,15571	40	P_{22-38}	-0,1117	72	P_{49-48}	-0,00045
9	P_{4-18}	0,15574	41	P_{24-23}	-0,03934	73	P_{49-50}	0,10235
10	P_{6-4}	-0,15233	42	P_{24-25}	0,07584	74	P_{50-51}	-0,12659
11	P_{6-5}	-0,00778	43	P_{24-26}	-0,11811	75	P_{52-53}	0,1401
12	P_{6-7}	-0,20327	44	P_{25-30}	0,07627	76	P_{53-54}	-0,08864
13	P_{6-8}	-0,42585	45	P_{26-27}	-0,11004	77	P_{54-55}	-0,12708
14	P_{7-8}	-0,80037	46	P_{27-28}	-0,23369	78	P_{56-42}	-0,01786
15	P_{7-29}	0,65603	47	P_{28-29}	-0,27076	79	P_{57-56}	-0,0296
16	P_{8-9}	1,97671	48	P_{29-52}	0,1793	80	P_6	-0,75895
17	P_{9-10}	0,18127	49	P_{30-31}	0,04191	81	P_9	-1,35307
18	P_{9-12}	0,02764	50	P_{31-32}	-0,02346	82	P_{12}	-0,75757
19	P_{9-13}	0,02497	51	P_{32-33}	0,04443	83	P_{13}	-0,19014
20	P_{9-55}	0,19424	52	P_{34-32}	0,07887	84	P_{17}	-0,4656
21	P_{10-12}	-0,20784	53	P_{34-35}	-0,07794	85	P_{23}	-0,06678
22	P_{10-51}	0,31669	54	P_{35-36}	-0,15631	86	P_{29}	-0,19613
23	P_{11-9}	-0,14903	55	P_{36-37}	-0,18489	87	P_{30}	-0,03849
24	P_{11-13}	-0,10008	56	P_{36-40}	0,03795	88	P_{31}	-0,06568
25	P_{11-41}	0,09931	57	P_{37-38}	-0,21791	89	P_{35}	-0,06721
26	P_{11-43}	0,13785	58	P_{37-39}	0,03971	90	P_{38}	-0,16563
27	P_{12-13}	-0,00518	59	P_{38-44}	-0,28543	91	P_{41}	-0,0654
28	P_{12-16}	-0,39401	60	P_{38-48}	-0,20466	92	P_{42}	-0,07905
29	P_{12-17}	-0,56326	61	P_{39-57}	0,04136	93	P_{44}	-0,12191
30	P_{13-14}	-0,10691	62	P_{40-56}	0,04006	94	P_{47}	-0,32771
31	P_{13-15}	-0,53867	63	P_{41-42}	0,10492	95	P_{53}	-0,23213
32	P_{14-15}	-0,72696	64	P_{41-43}	-0,13556			

Διάγραμμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές z :

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	-0,32542	1,3669	33	P_{14-46}	0,03899	0,52208	65	P_{41-11}	-0,00106	-0,10551
2	P_{1-15}	-0,22657	1,71819	34	P_{15-45}	0,22294	0,15614	66	P_{41-56}	0,03406	0,02934
3	P_{1-16}	-0,11498	0,9489	35	P_{18-19}	0,05427	-0,00102	67	P_{44-45}	-0,19907	-0,17805
4	P_{1-17}	0,23689	0,86373	36	P_{19-20}	0,01276	-5,00ε-05	68	P_{46-47}	0,01644	0,48409
5	P_{2-3}	0,77315	0,32982	37	P_{21-20}	0,12507	2,14854	69	P_{47-48}	0,03678	0,15365
6	P_{3-4}	0,82733	-0,1811	38	P_{21-22}	-0,01126	-1,00ε-05	70	P_{49-13}	0,00382	-0,32967
7	P_{3-15}	0,28498	0,10772	39	P_{22-23}	0,04111	0,05919	71	P_{49-38}	-0,0011	0,05155
8	P_{4-5}	0,17054	-0,01483	40	P_{22-38}	0,02983	-0,14153	72	P_{49-48}	-0,00045	0
9	P_{4-18}	0,16155	-0,00581	41	P_{24-23}	-0,04837	0,00903	73	P_{49-50}	0,15248	-0,05013
10	P_{6-4}	-0,15296	0,00063	42	P_{24-25}	-0,01611	0,09195	74	P_{50-51}	-0,00678	-0,11981
11	P_{6-5}	-0,0078	2,00ε-05	43	P_{24-26}	-0,09341	-0,0247	75	P_{52-53}	0,1085	0,0316
12	P_{6-7}	-0,25506	0,0518	44	P_{25-30}	0,05901	0,01726	76	P_{53-54}	-0,05031	-0,03833
13	P_{6-8}	-0,50385	0,078	45	P_{26-27}	0,02259	-0,13263	77	P_{54-55}	-0,03573	-0,09135
14	P_{7-8}	-0,8587	0,05833	46	P_{27-28}	-0,05339	-0,1803	78	P_{56-42}	-0,01934	0,00147
15	P_{7-29}	0,32651	0,32952	47	P_{28-29}	-0,09944	-0,17132	79	P_{57-56}	-0,02961	0
16	P_{8-9}	0,72809	1,24862	48	P_{29-52}	0,05696	0,12235	80	P_6	-0,39096	-0,368
17	P_{9-10}	0,10348	0,07778	49	P_{30-31}	0,03895	0,00296	81	P_9	0,11481	-1,46788
18	P_{9-12}	0,01847	0,00917	50	P_{31-32}	-0,01908	-0,00438	82	P_{12}	-0,11242	-0,64515
19	P_{9-13}	0,03066	-0,0057	51	P_{32-33}	0,04443	0	83	P_{13}	-0,16187	-0,02827
20	P_{9-55}	0,06914	0,1251	52	P_{34-32}	0,00297	0,0759	84	P_{17}	-0,37974	-0,08585
21	P_{10-12}	-0,09461	-0,11323	53	P_{34-35}	-0,07176	-0,00618	85	P_{23}	-0,09226	0,02548
22	P_{10-51}	0,05465	0,26203	54	P_{35-36}	-0,09072	-0,06558	86	P_{29}	-0,15539	-0,04074
23	P_{11-9}	-0,11753	-0,0315	55	P_{36-37}	-0,11342	-0,07146	87	P_{30}	-0,04051	0,00202
24	P_{11-13}	-0,06998	-0,0301	56	P_{36-40}	0,03794	0	88	P_{31}	-0,084	0,01832
25	P_{11-41}	0,00106	0,09825	57	P_{37-38}	0,08197	-0,29989	89	P_{35}	-0,07323	0,00603
26	P_{11-43}	0,05824	0,07961	58	P_{37-39}	0,03971	0	90	P_{38}	-0,13779	-0,02784
27	P_{12-13}	-0,00543	0,00025	59	P_{38-44}	0,02526	-0,31069	91	P_{41}	-0,07377	0,00837
28	P_{12-16}	-0,32754	-0,06646	60	P_{38-48}	0,00283	-0,20749	92	P_{42}	-0,11677	0,03771
29	P_{12-17}	0,12636	-0,68962	61	P_{39-57}	3,00ε-05	0,04133	93	P_{44}	-0,07682	-0,04509
30	P_{13-14}	-0,12192	0,01501	62	P_{40-56}	2,00ε-05	0,04003	94	P_{47}	-0,04943	-0,27828
31	P_{13-15}	-0,51001	-0,02865	63	P_{41-42}	0,03367	0,07125	95	P_{53}	-0,36814	0,13601
32	P_{14-15}	-0,71193	-0,01503	64	P_{41-43}	0,01971	-0,15527				

$$J=80,9161$$

Τιμή της x^2 κατανομής για $95-57=38$ βαθμούς ελευθερίας = 53,38

Υπορουτίνα bad_data1:

Κανονικοποιημένα υπόλοιπα rn:

α/α	Μετρήσεις SCADA	rn	α/α	Μετρήσεις SCADA	rn	α/α	Μετρήσεις SCADA	rn
1	P_{1-2}	1,81902	33	P_{14-46}	1,97565	65	P_{41-11}	-1,52797
2	P_{1-15}	1,52266	34	P_{15-45}	0,93143	66	P_{41-56}	0,75639
3	P_{1-16}	1,59702	35	P_{18-19}	-1,41493	67	P_{44-45}	-0,93143
4	P_{1-17}	1,25998	36	P_{19-20}	-1,41493	68	P_{46-47}	1,97565
5	P_{2-3}	1,81902	37	P_{21-20}	2,54378	69	P_{47-48}	2,49391
6	P_{3-4}	-0,59391	38	P_{21-22}	-1,41493	70	P_{49-13}	-1,34279
7	P_{3-15}	0,78398	39	P_{22-23}	2,15426	71	P_{49-38}	1,6482
8	P_{4-5}	-0,21014	40	P_{22-38}	-2,15784	72	P_{49-48}	-0,86618
9	P_{4-18}	-1,41493	41	P_{24-23}	1,47822	73	P_{49-50}	-2,21005
10	P_{6-4}	0,00766	42	P_{24-25}	1,74471	74	P_{50-51}	-2,21005
11	P_{6-5}	0,21014	43	P_{24-26}	-2,32805	75	P_{52-53}	1,02532
12	P_{6-7}	0,89577	44	P_{25-30}	1,74471	76	P_{53-54}	-1,58262
13	P_{6-8}	0,30225	45	P_{26-27}	-2,32805	77	P_{54-55}	-1,58262
14	P_{7-8}	0,15859	46	P_{27-28}	-2,32805	78	P_{56-42}	0,75855
15	P_{7-29}	0,88423	47	P_{28-29}	-2,32805	79	P_{57-56}	1,40781
16	P_{8-9}	0,95414	48	P_{29-52}	1,02532	80	P_6	-1,28539
17	P_{9-10}	0,7098	49	P_{30-31}	0,13698	81	P_9	-1,61532
18	P_{9-12}	0,519	50	P_{31-32}	-1,39316	82	P_{12}	-1,28112
19	P_{9-13}	-0,62747	51	P_{32-33}	0	83	P_{13}	-0,90276
20	P_{9-55}	1,58262	52	P_{34-32}	1,39316	84	P_{17}	-0,68107
21	P_{10-12}	-1,18929	53	P_{34-35}	-1,39316	85	P_{23}	2,30766
22	P_{10-51}	2,21005	54	P_{35-36}	-2,06656	86	P_{29}	-1,66224
23	P_{11-9}	-0,39699	55	P_{36-37}	-2,06741	87	P_{30}	0,36025
24	P_{11-13}	-0,71549	56	P_{36-40}	1,51662	88	P_{31}	0,62107
25	P_{11-41}	1,41878	57	P_{37-38}	-2,06804	89	P_{35}	1,55285
26	P_{11-43}	1,95957	58	P_{37-39}	1,40781	90	P_{38}	-0,58795
27	P_{12-13}	0,93646	59	P_{38-44}	-1,77909	91	P_{41}	0,51921
28	P_{12-16}	-1,59702	60	P_{38-48}	-1,87479	92	P_{42}	1,4819
29	P_{12-17}	-1,96386	61	P_{39-57}	1,40781	93	P_{44}	-1,53376
30	P_{13-14}	1,41826	62	P_{40-56}	1,51661	94	P_{47}	-2,11951
31	P_{13-15}	-0,09204	63	P_{41-42}	1,1434	95	P_{53}	1,94444
32	P_{14-15}	-0,03649	64	P_{41-43}	-1,95957			

Έξοδος: BAD DATA DETECTED IN P21-20

Νέα τιμή της J μετά την αφαίρεση της 37ης εσφαλμένης μέτρησης μέσω επανάληψης της διαδικασίας: 49,7508

Τιμή της x^2 κατανομής για $94-57=37$ βαθμούς ελευθερίας = 52,19

Τελική έξοδος:NO BAD DATA DETECTED

6.2.3 Σενάριο 3: Εφαρμογή μη Αανιχνεύσιμης Επίθεσης

Αρχεία εισόδου: dcddata57.txt, av1.txt (ίδια δεδομένα με το προηγούμενο σενάριο)

Διάγραμμα μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z	α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,22678	49	P_{30-31}	0,04528
2	P_{1-15}	1,82393	50	P_{31-32}	-0,02407
3	P_{1-16}	0,81741	51	P_{32-33}	0,04071
4	P_{1-17}	1,14443	52	P_{34-32}	0,08717
5	P_{2-3}	1,13073	53	P_{34-35}	-0,08668
6	P_{3-4}	0,61664	54	P_{35-36}	-0,14043
7	P_{3-15}	0,36098	55	P_{36-37}	-0,17572
8	P_{4-5}	0,15669	56	P_{36-40}	0,03888
9	P_{4-18}	0,17271	57	P_{37-38}	-0,26048
10	P_{6-4}	-0,17415	58	P_{37-39}	0,04186
11	P_{6-5}	-0,00685	59	P_{38-44}	-0,27876
12	P_{6-7}	-0,21801	60	P_{38-48}	-0,18173
13	P_{6-8}	-0,52566	61	P_{39-57}	0,04568
14	P_{7-8}	-0,87302	62	P_{40-56}	0,03679
15	P_{7-29}	0,71994	63	P_{41-42}	0,09993
16	P_{8-9}	1,84282	64	P_{41-43}	-0,13594
17	P_{9-10}	0,18963	65	P_{41-11}	-0,11214
18	P_{9-12}	0,0313	66	P_{41-56}	0,06944
19	P_{9-13}	0,02777	67	P_{44-45}	-0,41465
20	P_{9-55}	0,23428	68	P_{46-47}	0,49533
21	P_{10-12}	-0,20455	69	P_{47-48}	0,1824
22	P_{10-51}	0,29902	70	P_{49-13}	-0,34496
23	P_{11-9}	-0,15561	71	P_{49-38}	0,05801
24	P_{11-13}	-0,12223	72	P_{49-48}	-0,00042
25	P_{11-41}	0,10735	73	P_{49-50}	0,11609
26	P_{11-43}	0,16141	74	P_{50-51}	-0,12108
27	P_{12-13}	-0,00578	75	P_{52-53}	0,15439
28	P_{12-16}	-0,36641	76	P_{53-54}	-0,08225
29	P_{12-17}	-0,5632	77	P_{54-55}	-0,12395
30	P_{13-14}	-0,10788	78	P_{56-42}	-0,01678
31	P_{13-15}	-0,57432	79	P_{57-56}	-0,03283
32	P_{14-15}	-0,69382	80	P_6	-0,83784
33	P_{14-46}	0,51173	81	P_9	-1,3153
34	P_{15-45}	0,37757	82	P_{12}	-0,80775
35	P_{18-19}	0,04742	83	P_{13}	-0,20606
36	P_{19-20}	0,01483	84	P_{17}	-0,47713
37	P_{21-20}	0,01267	85	P_{23}	-0,07728
38	P_{21-22}	-0,01164	86	P_{29}	-0,18202
39	P_{22-23}	0,11922	87	P_{30}	-0,04273
40	P_{22-38}	-0,10821	88	P_{31}	-0,0688
41	P_{24-23}	-0,03679	89	P_{35}	-0,06564
42	P_{24-25}	0,07739	90	P_{38}	-0,15966
43	P_{24-26}	-0,12535	91	P_{41}	-0,06418
44	P_{25-30}	0,0905	92	P_{42}	-0,07195
45	P_{26-27}	-0,11027	93	P_{44}	-0,13575
46	P_{27-28}	-0,22468	94	P_{47}	-0,35426
47	P_{28-29}	-0,27645	95	P_{53}	-0,24621
48	P_{29-52}	0,20788			

Τυχαίο διάνυσμα c:

α/α	c
1	0,85
2	1
3	1,21
4	0,83
5	1,17
6	0,47
7	1,62
8	2,48
9	0,76
10	1,27
11	1,17
12	0,96
13	1,31
14	0,99
15	0,47
16	1,64
17	1,15
18	0,61
19	0,8
20	0,73
21	0,83
22	0
23	0,63
24	0,66
25	1,03
26	1,45
27	1,31
28	0,83

α/α	c
29	0,69
30	1,43
31	0,32
32	1,23
33	0,36
34	1,67
35	0,9
36	0,87
37	1,1
38	0,84
39	0,76
40	0,97
41	0,85
42	1,01
43	0,53
44	2,26
45	1,12
46	1,23
47	0,66
48	1,48
49	0
50	1,62
51	1,03
52	1,61
53	0,99
54	0,78
55	1,76
56	0,96

Διάγραμμα επίθεσης α:

α/α	a
1	-1,36585
2	-4,99323
3	-2,13179
4	-14,1901
5	-0,9162
6	-2,76121
7	0,09188
8	2,77286
9	0,13953
10	-0,25611
11	5,11288
12	6,39455
13	-2,42237
14	-15,0354
15	-5,55556
16	-7,82059
17	9,58587
18	4,15605
19	9,02438
20	14,10788
21	-3,04324
22	-12,0787
23	-13,3843
24	3,97291
25	0,40053
26	1,69935
27	1,73698
28	8,0424
29	-2,45229
30	-7,57772
31	-0,32262
32	5,45104

α/α	a
33	2,58503
34	-12,1881
35	0,78832
36	-0,43779
37	-0,09012
38	-0,8547
39	54,60526
40	-9,15254
41	2,45829
42	-0,02439
43	-8,45666
44	-0,14851
45	-1,65354
46	1,46751
47	8,17717
48	-1,06952
49	-1,48893
50	1,4702
51	-25,2778
52	0,04197
53	-16,7667
54	14,3262
55	0,81967
56	3,00429
57	-2,27859
58	0,79156
59	9,73221
60	9,12863
61	-9,00ε-05
62	-0,00084
63	0,34091
64	-0,09709

α/α	a
65	-0,40053
66	-1,43898
67	-13,9147
68	-1,61407
69	24,46352
70	2,72251
71	2,14628
72	6,3478
73	11,5625
74	-7,36364
75	-5,89431
76	2,67241
77	0,92715
78	2,57062
79	-3,07692
80	42,07173
81	106,9791
82	41,62065
83	62,07807
84	22,74699
85	0
86	31,38684
87	4,80417
88	4,7713
89	52,44539
90	96,00168
91	8,17196
92	4,8159
93	13,31214
94	70,83797
95	23,30144

Διάγραμμα μετρήσεων μετά την επίθεση Zatt:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
1	P_{1-2}	-0,13907	49	P_{30-31}	-1,44366
2	P_{1-15}	-3,16929	50	P_{31-32}	1,44613
3	P_{1-16}	-1,31438	51	P_{32-33}	-25,2371
4	P_{1-17}	-13,0457	52	P_{34-32}	0,12914
5	P_{2-3}	0,21454	53	P_{34-35}	-16,8533
6	P_{3-4}	-2,14457	54	P_{35-36}	14,18577
7	P_{3-15}	0,45286	55	P_{36-37}	0,64395
8	P_{4-5}	2,92955	56	P_{36-40}	3,04317
9	P_{4-18}	0,31224	57	P_{37-38}	-2,53907
10	P_{6-4}	-0,43026	58	P_{37-39}	0,83342
11	P_{6-5}	5,10602	59	P_{38-44}	9,45346
12	P_{6-7}	6,17654	60	P_{38-48}	8,9469
13	P_{6-8}	-2,94802	61	P_{39-57}	0,04559
14	P_{7-8}	-15,9085	62	P_{40-56}	0,03595
15	P_{7-29}	-4,83562	63	P_{41-42}	0,44084
16	P_{8-9}	-5,97777	64	P_{41-43}	-0,23302
17	P_{9-10}	9,77551	65	P_{41-11}	-0,51268
18	P_{9-12}	4,18736	66	P_{41-56}	-1,36954
19	P_{9-13}	9,05215	67	P_{44-45}	-14,3294
20	P_{9-55}	14,34216	68	P_{46-47}	-1,11874
21	P_{10-12}	-3,24779	69	P_{47-48}	24,64592
22	P_{10-51}	-11,7796	70	P_{49-13}	2,37755
23	P_{11-9}	-13,5399	71	P_{49-38}	2,20428
24	P_{11-13}	3,85068	72	P_{49-48}	6,34738
25	P_{11-41}	0,50789	73	P_{49-50}	11,67859
26	P_{11-43}	1,86075	74	P_{50-51}	-7,48471
27	P_{12-13}	1,7312	75	P_{52-53}	-5,73992
28	P_{12-16}	7,67598	76	P_{53-54}	2,59017
29	P_{12-17}	-3,01549	77	P_{54-55}	0,80321
30	P_{13-14}	-7,6856	78	P_{56-42}	2,55385
31	P_{13-15}	-0,89694	79	P_{57-56}	-3,10975
32	P_{14-15}	4,75722	80	P_6	41,23388
33	P_{14-46}	3,09676	81	P_9	105,6638
34	P_{15-45}	-11,8105	82	P_{12}	40,8129
35	P_{18-19}	0,83574	83	P_{13}	61,87201
36	P_{19-20}	-0,42296	84	P_{17}	22,26986
37	P_{21-20}	-0,07745	85	P_{23}	-0,07728
38	P_{21-22}	-0,86634	86	P_{29}	31,20482
39	P_{22-23}	54,72448	87	P_{30}	4,76144
40	P_{22-38}	-9,26076	88	P_{31}	4,7025
41	P_{24-23}	2,4215	89	P_{35}	52,37975
42	P_{24-25}	0,053	90	P_{38}	95,84202
43	P_{24-26}	-8,58201	91	P_{41}	8,10778
44	P_{25-30}	-0,05802	92	P_{42}	4,74396
45	P_{26-27}	-1,76381	93	P_{44}	13,17639
46	P_{27-28}	1,24283	94	P_{47}	70,48371
47	P_{28-29}	7,90072	95	P_{53}	23,05523
48	P_{29-52}	-0,86164			

Διάγραμμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zest:

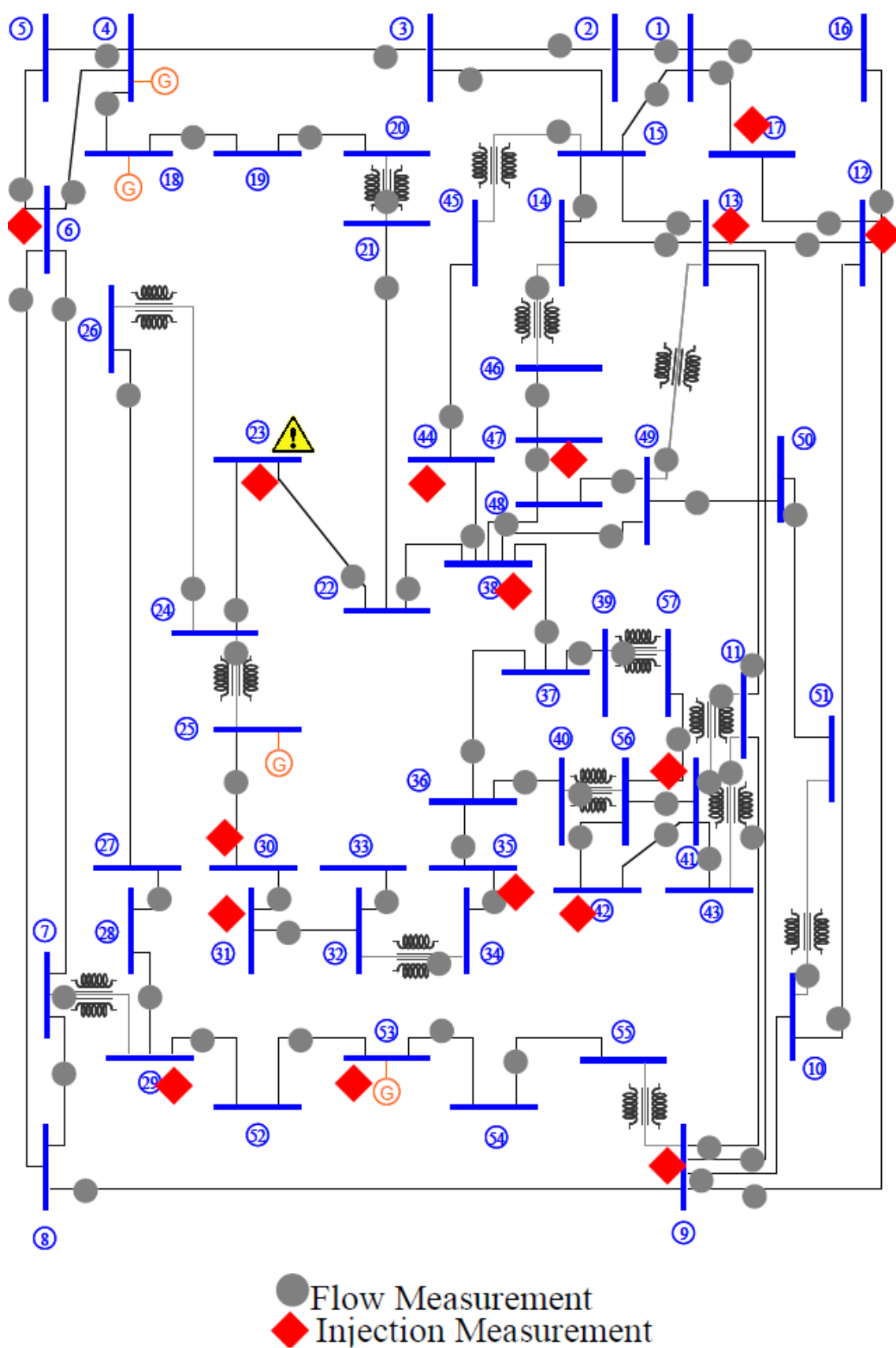
α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest
1	P_{1-2}	-1,689	49	P_{30-31}	-1,44762
2	P_{1-15}	-5,22938	50	P_{31-32}	1,45094
3	P_{1-16}	-2,23525	51	P_{32-33}	-25,2371
4	P_{1-17}	-13,944	52	P_{34-32}	0,04602
5	P_{2-3}	-0,15944	53	P_{34-35}	-16,8466
6	P_{3-4}	-2,02878	54	P_{35-36}	14,25693
7	P_{3-15}	0,37105	55	P_{36-37}	0,72147
8	P_{4-5}	2,97759	56	P_{36-40}	3,04317
9	P_{4-18}	0,17026	57	P_{37-38}	-2,21377
10	P_{6-4}	-0,4387	58	P_{37-39}	0,83342
11	P_{6-5}	5,10597	59	P_{38-44}	9,76766
12	P_{6-7}	6,12441	60	P_{38-48}	9,13254
13	P_{6-8}	-2,97829	61	P_{39-57}	-6,00E-05
14	P_{7-8}	-15,999	62	P_{40-56}	-0,00081
15	P_{7-29}	-5,15107	63	P_{41-42}	0,37273
16	P_{8-9}	-6,9721	64	P_{41-43}	-0,06735
17	P_{9-10}	9,69782	65	P_{41-11}	-0,39981
18	P_{9-12}	4,17643	66	P_{41-56}	-1,40656
19	P_{9-13}	9,05814	67	P_{44-45}	-14,1417
20	P_{9-55}	14,21545	68	P_{46-47}	-1,57512
21	P_{10-12}	-3,14466	69	P_{47-48}	24,48849
22	P_{10-51}	-12,0263	70	P_{49-13}	2,72758
23	P_{11-9}	-13,519	71	P_{49-38}	2,14491
24	P_{11-13}	3,88976	72	P_{49-48}	6,34738
25	P_{11-41}	0,39981	73	P_{49-50}	11,72576
26	P_{11-43}	1,77589	74	P_{50-51}	-7,37184
27	P_{12-13}	1,73091	75	P_{52-53}	-5,77706
28	P_{12-16}	7,7405	76	P_{53-54}	2,62904
29	P_{12-17}	-2,32195	77	P_{54-55}	0,89581
30	P_{13-14}	-7,70096	78	P_{56-42}	2,55198
31	P_{13-15}	-0,85555	79	P_{57-56}	-3,10975
32	P_{14-15}	4,70385	80	P_6	41,8195
33	P_{14-46}	2,60455	81	P_9	107,1065
34	P_{15-45}	-11,975	82	P_{12}	41,49732
35	P_{18-19}	0,81079	83	P_{13}	61,90135
36	P_{19-20}	-0,42409	84	P_{17}	22,35244
37	P_{21-20}	-0,07589	85	P_{23}	-0,10342
38	P_{21-22}	-0,86657	86	P_{29}	31,24872
39	P_{22-23}	54,66366	87	P_{30}	4,75958
40	P_{22-38}	-9,12112	88	P_{31}	4,68143
41	P_{24-23}	2,41261	89	P_{35}	52,37322
42	P_{24-25}	-0,04185	90	P_{38}	95,86874
43	P_{24-26}	-8,55733	91	P_{41}	8,09882
44	P_{25-30}	-0,07583	92	P_{42}	4,70325
45	P_{26-27}	-1,63128	93	P_{44}	13,22174
46	P_{27-28}	1,42295	94	P_{47}	70,7729
47	P_{28-29}	8,07185	95	P_{53}	22,90824
48	P_{29-52}	-1,00547			

$J=51,2908$

Τιμή της x^2 κατανομής για $95-57=38$ βαθμούς ελευθερίας = 53,38

Τελική έξοδος: NO BAD DATA DETECTED

6.2.4 Σενάριο 4: Εφαρμογή Βέλτιστης μη Ανιχνεύσιμης Επίθεσης



Αρχεία εισόδου: dcdata57.txt

av1.txt:

1 NaN
85 3

Επιλεγμένη μέτρηση: έγχυση πραγματικής ισχύος P_{23}

Πίνακας μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,22678
2	P_{1-15}	1,82393
3	P_{1-16}	0,81741
4	P_{1-17}	1,14443
5	P_{2-3}	1,13073
6	P_{3-4}	0,61664
7	P_{3-15}	0,36098
8	P_{4-5}	0,15669
9	P_{4-18}	0,17271
10	P_{6-4}	-0,17415
11	P_{6-5}	-0,00685
12	P_{6-7}	-0,21801
13	P_{6-8}	-0,52566
14	P_{7-8}	-0,87302
15	P_{7-29}	0,71994
16	P_{8-9}	1,84282
17	P_{9-10}	0,18963
18	P_{9-12}	0,0313
19	P_{9-13}	0,02777
20	P_{9-55}	0,23428
21	P_{10-12}	-0,20455
22	P_{10-51}	0,29902
23	P_{11-9}	-0,15561
24	P_{11-13}	-0,12223
25	P_{11-41}	0,10735
26	P_{11-43}	0,16141
27	P_{12-13}	-0,00578
28	P_{12-16}	-0,36641
29	P_{12-17}	-0,5632
30	P_{13-14}	-0,10788
31	P_{13-15}	-0,57432
32	P_{14-15}	-0,69382

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
33	P_{14-46}	0,51173
34	P_{15-45}	0,37757
35	P_{18-19}	0,04742
36	P_{19-20}	0,01483
37	P_{21-20}	0,01267
38	P_{21-22}	-0,01164
39	P_{22-23}	0,11922
40	P_{22-38}	-0,10821
41	P_{24-23}	-0,03679
42	P_{24-25}	0,07739
43	P_{24-26}	-0,12535
44	P_{25-30}	0,0905
45	P_{26-27}	-0,11027
46	P_{27-28}	-0,22468
47	P_{28-29}	-0,27645
48	P_{29-52}	0,20788
49	P_{30-31}	0,04528
50	P_{31-32}	-0,02407
51	P_{32-33}	0,04071
52	P_{34-32}	0,08717
53	P_{34-35}	-0,08668
54	P_{35-36}	-0,14043
55	P_{36-37}	-0,17572
56	P_{36-40}	0,03888
57	P_{37-38}	-0,26048
58	P_{37-39}	0,04186
59	P_{38-44}	-0,27876
60	P_{38-48}	-0,18173
61	P_{39-57}	0,04568
62	P_{40-56}	0,03679
63	P_{41-42}	0,09993
64	P_{41-43}	-0,13594

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
65	P_{41-11}	-0,11214
66	P_{41-56}	0,06944
67	P_{44-45}	-0,41465
68	P_{46-47}	0,49533
69	P_{47-48}	0,1824
70	P_{49-13}	-0,34496
71	P_{49-38}	0,05801
72	P_{49-48}	-0,00042
73	P_{49-50}	0,11609
74	P_{50-51}	-0,12108
75	P_{52-53}	0,15439
76	P_{53-54}	-0,08225
77	P_{54-55}	-0,12395
78	P_{56-42}	-0,01678
79	P_{57-56}	-0,03283
80	P_6	-0,83784
81	P_9	-1,3153
82	P_{12}	-0,80775
83	P_{13}	-0,20606
84	P_{17}	-0,47713
85	P_{23}	-0,07728
86	P_{29}	-0,18202
87	P_{30}	-0,04273
88	P_{31}	-0,0688
89	P_{35}	-0,06564
90	P_{38}	-0,15966
91	P_{41}	-0,06418
92	P_{42}	-0,07195
93	P_{44}	-0,13575
94	P_{47}	-0,35426
95	P_{53}	-0,24621

Πίνακας εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές μετρήσεις Z :

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	-0,32315	1,54993	33	P_{14-46}	0,01952	0,49221	65	P_{41-11}	0,00072	-0,11286
2	P_{1-15}	-0,23616	2,06009	34	P_{15-45}	0,21306	0,16451	66	P_{41-56}	0,03242	0,03702
3	P_{1-16}	-0,10346	0,92087	35	P_{18-19}	0,02246	0,02495	67	P_{44-45}	-0,22699	-0,18766
4	P_{1-17}	0,24613	0,8983	36	P_{19-20}	0,0137	0,00113	68	P_{46-47}	0,03895	0,45639
5	P_{2-3}	0,75675	0,37398	37	P_{21-20}	0,01424	-0,00156	69	P_{47-48}	0,02497	0,15744
6	P_{3-4}	0,73243	-0,11579	38	P_{21-22}	-0,01187	0,00023	70	P_{49-13}	0,00507	-0,35003
7	P_{3-15}	0,27917	0,08181	39	P_{22-23}	0,05839	0,06082	71	P_{49-38}	-0,00137	0,05938
8	P_{4-5}	0,20474	-0,04804	40	P_{22-38}	0,03142	-0,13963	72	P_{49-48}	-0,00042	0
9	P_{4-18}	0,03073	0,14198	41	P_{24-23}	-0,04569	0,00889	73	P_{49-50}	0,16326	-0,04717
10	P_{6-4}	-0,18259	0,00843	42	P_{24-25}	-0,01746	0,09484	74	P_{50-51}	-0,0082	-0,11287
11	P_{6-5}	-0,00691	5,00e-05	43	P_{24-26}	-0,10067	-0,02468	75	P_{52-53}	0,11725	0,03714
12	P_{6-7}	-0,27014	0,05214	44	P_{25-30}	0,07269	0,01781	76	P_{53-54}	-0,04338	-0,03887
13	P_{6-8}	-0,55593	0,03027	45	P_{26-27}	0,02226	-0,13253	77	P_{54-55}	-0,03134	-0,09261
14	P_{7-8}	-0,9636	0,09058	46	P_{27-28}	-0,04456	-0,18012	78	P_{56-42}	-0,01864	0,00187
15	P_{7-29}	0,40448	0,31546	47	P_{28-29}	-0,10532	-0,17113	79	P_{57-56}	-0,03283	0
16	P_{8-9}	0,84849	0,99433	48	P_{29-52}	0,06405	0,14383	80	P_6	-0,25222	-0,58563
17	P_{9-10}	0,11194	0,07769	49	P_{30-31}	0,04132	0,00396	81	P_9	0,12743	-1,44273
18	P_{9-12}	0,02037	0,01093	50	P_{31-32}	-0,01926	-0,00481	82	P_{12}	-0,12333	-0,68442
19	P_{9-13}	0,03376	-0,00599	51	P_{32-33}	0,04071	0	83	P_{13}	-0,17671	-0,02935
20	P_{9-55}	0,10756	0,12672	52	P_{34-32}	0,00405	0,08312	84	P_{17}	-0,39455	-0,08258
21	P_{10-12}	-0,10142	-0,10313	53	P_{34-35}	-0,0799	-0,00678	85	P_{23}	-0,10342	0,02614
22	P_{10-51}	0,05234	0,24668	54	P_{35-36}	-0,06927	-0,07116	86	P_{29}	-0,13812	-0,0439
23	P_{11-9}	-0,13467	-0,02093	55	P_{36-37}	-0,0982	-0,07752	87	P_{30}	-0,04458	0,00186
24	P_{11-13}	-0,08315	-0,03908	56	P_{36-40}	0,03888	0	88	P_{31}	-0,08988	0,02108
25	P_{11-41}	-0,00072	0,10807	57	P_{37-38}	0,06482	-0,3253	89	P_{35}	-0,07217	0,00653
26	P_{11-43}	0,07654	0,08486	58	P_{37-39}	0,04186	0	90	P_{38}	-0,13294	-0,02672
27	P_{12-13}	-0,00607	0,00029	59	P_{38-44}	0,03545	-0,3142	91	P_{41}	-0,07314	0,00896
28	P_{12-16}	-0,3019	-0,06452	60	P_{38-48}	0,0039	-0,18564	92	P_{42}	-0,11265	0,0407
29	P_{12-17}	0,13033	-0,69353	61	P_{39-57}	3,00e-05	0,04565	93	P_{44}	-0,0904	-0,04535
30	P_{13-14}	-0,12324	0,01536	62	P_{40-56}	2,00e-05	0,03677	94	P_{47}	-0,06506	-0,2892
31	P_{13-15}	-0,53292	-0,04139	63	P_{41-42}	0,03182	0,06811	95	P_{53}	-0,3932	0,14699
32	P_{14-15}	-0,74718	0,05336	64	P_{41-43}	0,02973	-0,16567				

Intlinprog:

Διάνυσμα c:

α/α	c
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0,04305
21	0,04305
22	0,04305
23	0
24	0
25	0
26	0
27	0
28	0

α/α	c
29	0
30	0
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0
37	0
38	0
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0
45	0
46	0
47	0
48	0
49	0
50	0
51	0
52	0
53	0
54	0
55	0
56	0

Διάνυσμα x σε αντιστοιχία με το διάνυσμα επίθεσης a :

α/α	x	a	α/α	x	a	α/α	x	a
1	0	0	33	0	0	65	0	0
2	0	0	34	0	0	66	0	0
3	0	0	35	0	0	67	0	0
4	0	0	36	0	0	68	0	0
5	0	0	37	0	0	69	0	0
6	0	0	38	5,54e-06	0,05542	70	0	0
7	0	0	39	0	0	71	0	0
8	0	0	40	0	0	72	0	0
9	0	0	41	5,54e-06	0,05542	73	0	0
10	0	0	42	0	0	74	0	0
11	0	0	43	0	0	75	0	0
12	0	0	44	1	1,45922	76	0	0
13	0	0	45	1	-0,16797	77	0	0
14	0	0	46	0	0	78	0	0
15	0	0	47	0	0	79	0	0
16	0	0	48	0	0	80	0	0
17	0	0	49	0	0	81	0	0
18	0	0	50	0	0	82	0	0
19	0	0	51	0	0	83	0	0
20	0	0	52	0	0	84	0	0
21	0	0	53	0	0	85	1	3
22	0	0	54	0	0	86	0	0
23	0	0	55	0	0	87	0	0
24	0	0	56	0	0	88	0	0
25	0	0	57	0	0	89	0	0
26	0	0	58	0	0	90	0	0
27	0	0	59	0	0	91	0	0
28	0	0	60	0	0	92	0	0
29	0	0	61	0	0	93	0	0
30	0	0	62	0	0	94	0	0
31	0	0	63	0	0	95	0	0
32	0	0	64	0	0			

Διάνυσμα μετρήσεων zatt μετά το διάνυσμα επίθεσης a:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
1	P_{1-2}	1,22678
2	P_{1-15}	1,82393
3	P_{1-16}	0,81741
4	P_{1-17}	1,14443
5	P_{2-3}	1,13073
6	P_{3-4}	0,61664
7	P_{3-15}	0,36098
8	P_{4-5}	0,15669
9	P_{4-18}	0,17271
10	P_{6-4}	-0,17415
11	P_{6-5}	-0,00685
12	P_{6-7}	-0,21801
13	P_{6-8}	-0,52566
14	P_{7-8}	-0,87302
15	P_{7-29}	0,71994
16	P_{8-9}	1,84282
17	P_{9-10}	0,18963
18	P_{9-12}	0,0313
19	P_{9-13}	0,02777
20	P_{9-55}	0,23428
21	P_{10-12}	-0,20455
22	P_{10-51}	0,29902
23	P_{11-9}	-0,15561
24	P_{11-13}	-0,12223
25	P_{11-41}	0,10735
26	P_{11-43}	0,16141
27	P_{12-13}	-0,00578
28	P_{12-16}	-0,36641
29	P_{12-17}	-0,5632
30	P_{13-14}	-0,10788
31	P_{13-15}	-0,57432
32	P_{14-15}	-0,69382

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
33	P_{14-46}	0,51173
34	P_{15-45}	0,37757
35	P_{18-19}	0,04742
36	P_{19-20}	0,01483
37	P_{21-20}	0,0681
38	P_{21-22}	-0,01164
39	P_{22-23}	0,11922
40	P_{22-38}	1,351
41	P_{24-23}	-0,20477
42	P_{24-25}	0,07739
43	P_{24-26}	-0,12535
44	P_{25-30}	0,0905
45	P_{26-27}	-0,11027
46	P_{27-28}	-0,22468
47	P_{28-29}	-0,27645
48	P_{29-52}	0,20788
49	P_{30-31}	0,04528
50	P_{31-32}	-0,02407
51	P_{32-33}	0,04071
52	P_{34-32}	0,08717
53	P_{34-35}	-0,08668
54	P_{35-36}	-0,14043
55	P_{36-37}	-0,17572
56	P_{36-40}	0,03888
57	P_{37-38}	-0,26048
58	P_{37-39}	0,04186
59	P_{38-44}	-0,27876
60	P_{38-48}	-0,18173
61	P_{39-57}	0,04568
62	P_{40-56}	0,03679
63	P_{41-42}	0,09993
64	P_{41-43}	-0,13594

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
65	P_{41-11}	-0,11214
66	P_{41-56}	0,06944
67	P_{44-45}	-0,41465
68	P_{46-47}	0,49533
69	P_{47-48}	0,1824
70	P_{49-13}	-0,34496
71	P_{49-38}	0,05801
72	P_{49-48}	-0,00042
73	P_{49-50}	0,11609
74	P_{50-51}	-0,12108
75	P_{52-53}	0,15439
76	P_{53-54}	-0,08225
77	P_{54-55}	-0,12395
78	P_{56-42}	-0,01678
79	P_{57-56}	-0,03283
80	P_6	-0,83784
81	P_9	-1,3153
82	P_{12}	-0,80775
83	P_{13}	-0,20606
84	P_{17}	-0,47713
85	P_{23}	2,92272
86	P_{29}	-0,18202
87	P_{30}	-0,04273
88	P_{31}	-0,0688
89	P_{35}	-0,06564
90	P_{38}	-0,15966
91	P_{41}	-0,06418
92	P_{42}	-0,07195
93	P_{44}	-0,13575
94	P_{47}	-0,35426
95	P_{53}	-0,24621

Διάγραμμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zattest μετά την επίθεση και η διαφορά ratt των εκτιμώμενων από τις μετρήσεις zatt:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt
1	P_{1-2}	-0,32315	1,54993	33	P_{14-46}	0,01952	0,49221	65	P_{41-11}	0,00072	-0,11286
2	P_{1-15}	-0,23616	2,06009	34	P_{15-45}	0,21306	0,16451	66	P_{41-56}	0,03242	0,03702
3	P_{1-16}	-0,10346	0,92087	35	P_{18-19}	0,02246	0,02495	67	P_{44-45}	-0,22699	-0,18766
4	P_{1-17}	0,24613	0,8983	36	P_{19-20}	0,0137	0,00113	68	P_{46-47}	0,03895	0,45639
5	P_{2-3}	0,75675	0,37398	37	P_{21-20}	0,06966	-0,00156	69	P_{47-48}	0,02497	0,15744
6	P_{3-4}	0,73243	-0,11579	38	P_{21-22}	-0,01187	0,00023	70	P_{49-13}	0,00507	-0,35003
7	P_{3-15}	0,27917	0,08181	39	P_{22-23}	0,05839	0,06082	71	P_{49-38}	-0,00137	0,05938
8	P_{4-5}	0,20474	-0,04804	40	P_{22-38}	1,49063	-0,13963	72	P_{49-48}	-0,00042	0
9	P_{4-18}	0,03073	0,14198	41	P_{24-23}	-0,21366	0,00889	73	P_{49-50}	0,16326	-0,04717
10	P_{6-4}	-0,18259	0,00843	42	P_{24-25}	-0,01746	0,09484	74	P_{50-51}	-0,0082	-0,11287
11	P_{6-5}	-0,00691	5,00E-05	43	P_{24-26}	-0,10067	-0,02468	75	P_{52-53}	0,11725	0,03714
12	P_{6-7}	-0,27014	0,05214	44	P_{25-30}	0,07269	0,01781	76	P_{53-54}	-0,04338	-0,03887
13	P_{6-8}	-0,55593	0,03027	45	P_{26-27}	0,02226	-0,13253	77	P_{54-55}	-0,03134	-0,09261
14	P_{7-8}	-0,9636	0,09058	46	P_{27-28}	-0,04456	-0,18012	78	P_{56-42}	-0,01864	0,00187
15	P_{7-29}	0,40448	0,31546	47	P_{28-29}	-0,10532	-0,17113	79	P_{57-56}	-0,03283	0
16	P_{8-9}	0,84849	0,99433	48	P_{29-52}	0,06405	0,14383	80	P_6	-0,25222	-0,58563
17	P_{9-10}	0,11194	0,07769	49	P_{30-31}	0,04132	0,00396	81	P_9	0,12743	-1,44273
18	P_{9-12}	0,02037	0,01093	50	P_{31-32}	-0,01926	-0,00481	82	P_{12}	-0,12333	-0,68442
19	P_{9-13}	0,03376	-0,00599	51	P_{32-33}	0,04071	0	83	P_{13}	-0,17671	-0,02935
20	P_{9-55}	0,10756	0,12672	52	P_{34-32}	0,00405	0,08312	84	P_{17}	-0,39455	-0,08258
21	P_{10-12}	-0,10142	-0,10313	53	P_{34-35}	-0,0799	-0,00678	85	P_{23}	2,89658	0,02614
22	P_{10-51}	0,05234	0,24668	54	P_{35-36}	-0,06927	-0,07116	86	P_{29}	-0,13812	-0,0439
23	P_{11-9}	-0,13467	-0,02093	55	P_{36-37}	-0,0982	-0,07752	87	P_{30}	-0,04458	0,00186
24	P_{11-13}	-0,08315	-0,03908	56	P_{36-40}	0,03888	0	88	P_{31}	-0,08988	0,02108
25	P_{11-41}	-0,00072	0,10807	57	P_{37-38}	0,06482	-0,3253	89	P_{35}	-0,07217	0,00653
26	P_{11-43}	0,07654	0,08486	58	P_{37-39}	0,04186	0	90	P_{38}	-0,13294	-0,02672
27	P_{12-13}	-0,00607	0,00029	59	P_{38-44}	0,03545	-0,3142	91	P_{41}	-0,07314	0,00896
28	P_{12-16}	-0,3019	-0,06452	60	P_{38-48}	0,0039	-0,18564	92	P_{42}	-0,11265	0,0407
29	P_{12-17}	0,13033	-0,69353	61	P_{39-57}	3,00E-05	0,04565	93	P_{44}	-0,0904	-0,04535
30	P_{13-14}	-0,12324	0,01536	62	P_{40-56}	2,00E-05	0,03677	94	P_{47}	-0,06506	-0,2892
31	P_{13-15}	-0,53292	-0,04139	63	P_{41-42}	0,03182	0,06811	95	P_{53}	-0,3932	0,14699
32	P_{14-15}	-0,74718	0,05336	64	P_{41-43}	0,02973	-0,16567				

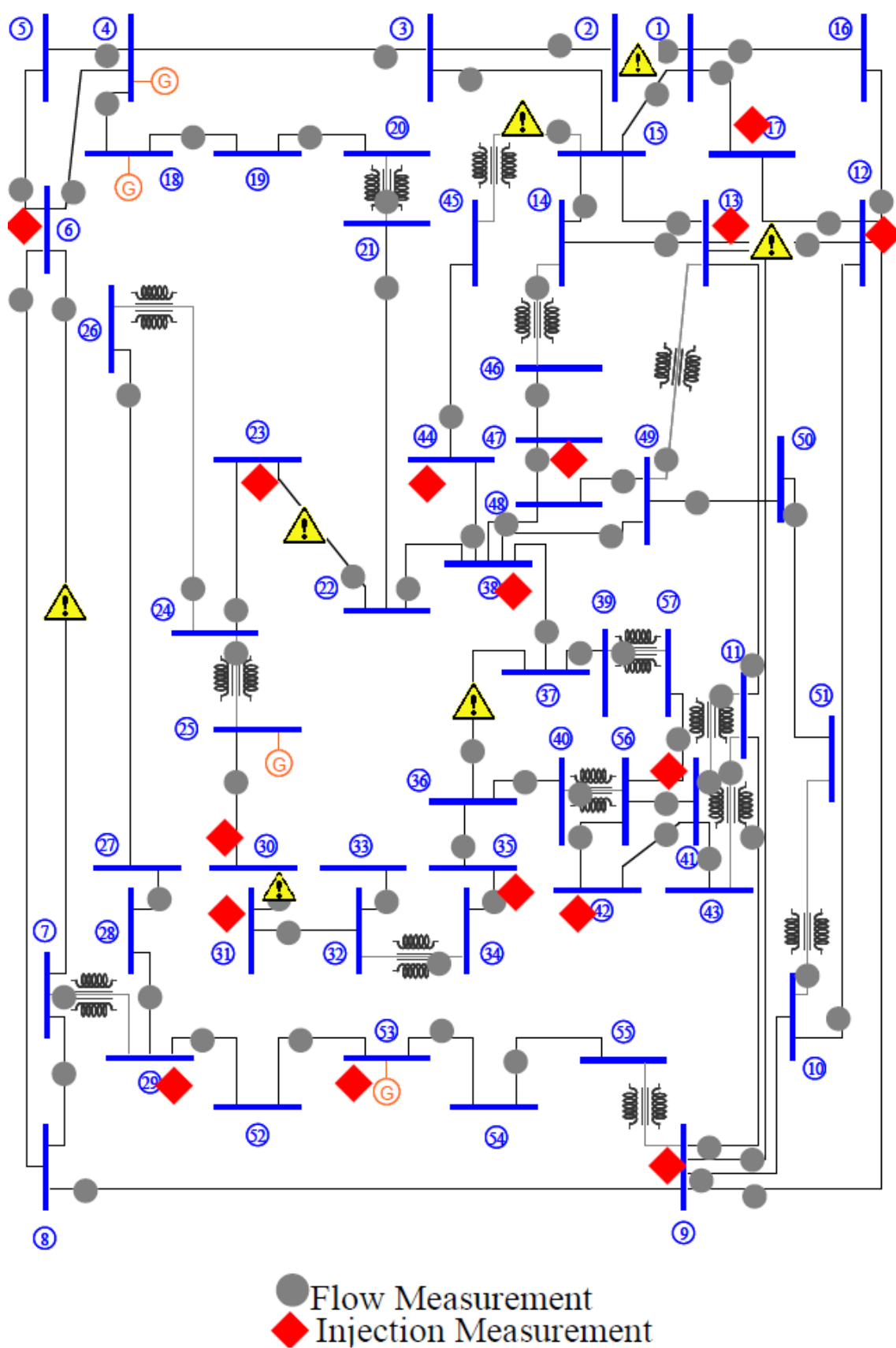
rnew=r-ratt=0

$J=51,2912$

Τιμή της x^2 κατανομής για $95-57=38$ βαθμούς ελευθερίας = 53,38

Έξοδος: NO BAD DATA DETECTED

6.2.5 Σενάριο 5: Εφαρμογή Πολλαπλών Επιθέσεων με Βελτιστοποιημένο Διάνυσμα Επίθεσης



Αρχεία εισόδου: dcdata57.txt

av1.txt:

```

7   NaN
1   1
12  4
27  -2.1
34  -1.7
39  3.2
49  2.9
55  -1.4

```

Επιλεγμένες μετρήσεις:

P_{1-2} , P_{6-7} , P_{12-13} , P_{15-45} , P_{22-23} , P_{30-31} , P_{36-37}

Διάγραμμα μετρήσεων z μετά την προσθήκη σφάλματος:

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
1	P_{1-2}	1,18245
2	P_{1-15}	1,69078
3	P_{1-16}	0,91948
4	P_{1-17}	1,05906
5	P_{2-3}	1,1522
6	P_{3-4}	0,67998
7	P_{3-15}	0,42078
8	P_{4-5}	0,14547
9	P_{4-18}	0,14326
10	P_{6-4}	-0,14441
11	P_{6-5}	-0,0067
12	P_{6-7}	-0,19339
13	P_{6-8}	-0,47215
14	P_{7-8}	-0,84996
15	P_{7-29}	0,71447
16	P_{8-9}	2,05698
17	P_{9-10}	0,20453
18	P_{9-12}	0,03141
19	P_{9-13}	0,02881
20	P_{9-55}	0,1983
21	P_{10-12}	-0,18205
22	P_{10-51}	0,34749
23	P_{11-9}	-0,13158
24	P_{11-13}	-0,1122
25	P_{11-41}	0,10398

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
26	P_{11-43}	0,16489
27	P_{12-13}	-0,00548
28	P_{12-16}	-0,36652
29	P_{12-17}	-0,56511
30	P_{13-14}	-0,12247
31	P_{13-15}	-0,55181
32	P_{14-15}	-0,74763
33	P_{14-46}	0,49668
34	P_{15-45}	0,42746
35	P_{18-19}	0,04931
36	P_{19-20}	0,01244
37	P_{21-20}	0,01284
38	P_{21-22}	-0,01144
39	P_{22-23}	0,10708
40	P_{22-38}	-0,12555
41	P_{24-23}	-0,03614
42	P_{24-25}	0,0836
43	P_{24-26}	-0,11569
44	P_{25-30}	0,0884
45	P_{26-27}	-0,12375
46	P_{27-28}	-0,22233
47	P_{28-29}	-0,25021
48	P_{29-52}	0,19388
49	P_{30-31}	0,04255
50	P_{31-32}	-0,02165

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
51	P_{32-33}	0,03996
52	P_{34-32}	0,08979
53	P_{34-35}	-0,08253
54	P_{35-36}	-0,16464
55	P_{36-37}	-0,18722
56	P_{36-40}	0,04121
57	P_{37-38}	-0,23116
58	P_{37-39}	0,04634
59	P_{38-44}	-0,28899
60	P_{38-48}	-0,18827
61	P_{39-57}	0,04056
62	P_{40-56}	0,04139
63	P_{41-42}	0,10969
64	P_{41-43}	-0,12529
65	P_{41-11}	-0,10715
66	P_{41-56}	0,0622
67	P_{44-45}	-0,44052
68	P_{46-47}	0,57005
69	P_{47-48}	0,18319
70	P_{49-13}	-0,39346
71	P_{49-38}	0,05978
72	P_{49-48}	-0,00044
73	P_{49-50}	0,11776
74	P_{50-51}	-0,13081
75	P_{52-53}	0,13031

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
76	P_{53-54}	0,07944
77	P_{54-55}	-0,1301
78	P_{56-42}	-0,01871
79	P_{57-56}	-0,0343
80	P_6	-0,89662
81	P_9	-1,30538
82	P_{12}	-0,75855

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
83	P_{13}	-0,18401
84	P_{17}	-0,43161
85	P_{23}	-0,06512
86	P_{29}	-0,19854
87	P_{30}	-0,0404
88	P_{31}	-0,06072
89	P_{35}	-0,06734

α/α	Μετρήσεις SCADA	z
90	P_{38}	-0,14511
91	P_{41}	-0,06386
92	P_{42}	-0,08593
93	P_{44}	-0,13663
94	P_{47}	-0,36531
95	P_{53}	-0,23447

Διάγραμμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zest και η διαφορά τους r από τις αρχικές μετρήσεις z:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
1	P_{1-2}	-0,3395	1,52195
2	P_{1-15}	-0,24488	1,93566
3	P_{1-16}	-0,1025	1,02198
4	P_{1-17}	0,2159	0,84316
5	P_{2-3}	0,78497	0,36723
6	P_{3-4}	0,85168	-0,1717
7	P_{3-15}	0,31433	0,10645
8	P_{4-5}	0,18404	-0,03856
9	P_{4-18}	0,0174	0,12586
10	P_{6-4}	-0,16436	0,01994
11	P_{6-5}	-0,00674	4,00ε-05
12	P_{6-7}	-0,24971	0,05632
13	P_{6-8}	-0,53203	0,05987
14	P_{7-8}	-0,93479	0,08483
15	P_{7-29}	0,36712	0,34735
16	P_{8-9}	0,79814	1,25885
17	P_{9-10}	0,10185	0,10267
18	P_{9-12}	0,02049	0,01092
19	P_{9-13}	0,0342	-0,00539
20	P_{9-55}	0,07849	0,11981
21	P_{10-12}	-0,08772	-0,09433
22	P_{10-51}	0,0845	0,26299
23	P_{11-9}	-0,12364	-0,00795
24	P_{11-13}	-0,06943	-0,04277
25	P_{11-41}	0,0012	0,10278
26	P_{11-43}	0,08555	0,07933
27	P_{12-13}	-0,00577	0,00029
28	P_{12-16}	-0,29491	-0,0716
29	P_{12-17}	0,11417	-0,67928
30	P_{13-14}	-0,13771	0,01524
31	P_{13-15}	-0,54767	-0,00415
32	P_{14-15}	-0,75915	0,01152

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
33	P_{14-46}	-0,01693	0,51361
34	P_{15-45}	0,23574	0,19172
35	P_{18-19}	0,02719	0,02212
36	P_{19-20}	0,01144	0,001
37	P_{21-20}	0,01422	-0,00138
38	P_{21-22}	-0,01164	0,0002
39	P_{22-23}	0,04299	0,06409
40	P_{22-38}	0,02254	-0,14809
41	P_{24-23}	-0,04519	0,00905
42	P_{24-25}	-0,01698	0,10058
43	P_{24-26}	-0,09022	-0,02546
44	P_{25-30}	0,06952	0,01888
45	P_{26-27}	0,01298	-0,13673
46	P_{27-28}	-0,03651	-0,18582
47	P_{28-29}	-0,07366	-0,17655
48	P_{29-52}	0,06394	0,12994
49	P_{30-31}	0,03793	0,00462
50	P_{31-32}	-0,0167	-0,00495
51	P_{32-33}	0,03996	0
52	P_{34-32}	0,00427	0,08552
53	P_{34-35}	-0,07555	-0,00697
54	P_{35-36}	-0,09612	-0,06852
55	P_{36-37}	-0,11256	-0,07465
56	P_{36-40}	0,0412	0
57	P_{37-38}	0,08209	-0,31325
58	P_{37-39}	0,04634	0
59	P_{38-44}	0,03842	-0,3274
60	P_{38-48}	0,00626	-0,19453
61	P_{39-57}	3,00ε-05	0,04053
62	P_{40-56}	2,00ε-05	0,04136
63	P_{41-42}	0,0367	0,07299
64	P_{41-43}	0,02959	-0,15488

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zest	r
65	P_{41-11}	-0,0012	-0,10595
66	P_{41-56}	0,03643	0,02577
67	P_{44-45}	-0,22182	-0,2187
68	P_{46-47}	0,09382	0,47623
69	P_{47-48}	0,02054	0,16265
70	P_{49-13}	0,00354	-0,397
71	P_{49-38}	-0,00202	0,06181
72	P_{49-48}	-0,00044	0
73	P_{49-50}	0,16805	-0,05029
74	P_{50-51}	-0,01047	-0,12034
75	P_{52-53}	0,09676	0,03355
76	P_{53-54}	-0,04269	-0,03675
77	P_{54-55}	-0,04254	-0,08756
78	P_{56-42}	-0,02001	0,0013
79	P_{57-56}	-0,03431	0
80	P_6	-0,27616	-0,62045
81	P_9	0,14606	-1,45144
82	P_{12}	-0,10926	-0,64929
83	P_{13}	-0,15353	-0,03048
84	P_{17}	-0,3461	-0,08551
85	P_{23}	-0,0926	0,02748
86	P_{29}	-0,15631	-0,04223
87	P_{30}	-0,04226	0,00186
88	P_{31}	-0,08315	0,02243
89	P_{35}	-0,0735	0,00617
90	P_{38}	-0,11698	-0,02813
91	P_{41}	-0,07322	0,00936
92	P_{42}	-0,12243	0,0365
93	P_{44}	-0,09018	-0,04645
94	P_{47}	-0,067	-0,29831
95	P_{53}	-0,37067	0,1362

Intlinprog:

Διάνυσμα c:

α/α	c
1	-0,62232
2	0
3	0
4	0
5	0
6	-0,43787
7	0
8	0
9	0
10	0
11	-0,25389
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0

α/α	c
20	0
21	0
22	-0,04864
23	1,4413
24	1,4413
25	1,4413
26	1,4413
27	1,4413
28	0
29	1,4413
30	0
31	0
32	0
33	0
34	0
35	0
36	0,05124
37	0
38	0,05124

α/α	c
39	0
40	0
41	0
42	0
43	0
44	0,17714
45	0
46	0
47	0
48	0
49	0
50	0
51	0
52	0
53	0
54	0
55	0
56	0

Διάνυσμα x σε αντιστοιχία με το διάνυσμα επίθεσης a :

α/α	x	a	α/α	x	a	α/α	x	a
1	1	1	33	0	0	65	0	0
2	0	0	34	1	-1,7	66	0	0
3	0	0	35	0	0	67	1	-1,42477
4	0	0	36	0	0	68	0	0
5	1	-3,80112	37	0	0	69	0	0
6	0	0	38	0	0	70	0	0
7	0	0	39	1	3,2	71	0	0
8	0	0	40	0	0	72	0	0
9	0	0	41	1	5,81382	73	0	0
10	0	0	42	0	0	74	0	0
11	0	0	43	0	0	75	0	0
12	1	4	44	0	0	76	0	0
13	0	0	45	0	0	77	0	0
14	1	-5,72488	46	0	0	78	0	0
15	1	-6,7573	47	1	24,55366	79	0	0
16	0	0	48	0	0	80	0	0
17	0	0	49	1	2,9	81	0	0
18	1	0,80548	50	0	0	82	1	-9,03163
19	0	0	51	0	0	83	0	0
20	0	0	52	0	0	84	0	0
21	1	1,8845	53	0	0	85	1	-3,3898
22	0	0	54	0	0	86	0	0
23	0	0	55	1	-1,4	87	1	10,03515
24	0	0	56	0	0	88	0	0
25	0	0	57	1	0,50763	89	0	0
26	0	0	58	0	0	90	0	0
27	1	-2,1	59	0	0	91	0	0
28	1	-2,91696	60	0	0	92	0	0
29	1	-1,3247	61	1,00e-05	4,00e-05	93	0	0
30	0	0	62	0	0	94	0	0
31	0	0	63	0	0	95	0	0
32	0	0	64	0	0			

Διάνυσμα μετρήσεων zatt μετά την πρόσθεση του διανύσματος επίθεσης a:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
1	P_{1-2}	2,18245
2	P_{1-15}	1,69078
3	P_{1-16}	0,91948
4	P_{1-17}	1,05906
5	P_{2-3}	-2,64892
6	P_{3-4}	0,67998
7	P_{3-15}	0,42078
8	P_{4-5}	0,14547
9	P_{4-18}	0,14326
10	P_{6-4}	-0,14441
11	P_{6-5}	-0,0067
12	P_{6-7}	3,80661
13	P_{6-8}	-0,47215
14	P_{7-8}	-6,57484
15	P_{7-29}	-6,04283
16	P_{8-9}	2,05698
17	P_{9-10}	0,20453
18	P_{9-12}	0,83689
19	P_{9-13}	0,02881
20	P_{9-55}	0,1983
21	P_{10-12}	1,70245
22	P_{10-51}	0,34749
23	P_{11-9}	-0,13158
24	P_{11-13}	-0,1122
25	P_{11-41}	0,10398
26	P_{11-43}	0,16489
27	P_{12-13}	-2,10548
28	P_{12-16}	-3,28348
29	P_{12-17}	-1,88981
30	P_{13-14}	-0,12247
31	P_{13-15}	-0,55181
32	P_{14-15}	-0,74763

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
33	P_{14-46}	0,49668
34	P_{15-45}	-1,27254
35	P_{18-19}	0,04931
36	P_{19-20}	0,01244
37	P_{21-20}	0,01284
38	P_{21-22}	-0,01144
39	P_{22-23}	3,30708
40	P_{22-38}	-0,12555
41	P_{24-23}	5,77768
42	P_{24-25}	0,0836
43	P_{24-26}	-0,11569
44	P_{25-30}	0,0884
45	P_{26-27}	-0,12375
46	P_{27-28}	-0,22233
47	P_{28-29}	24,30346
48	P_{29-52}	0,19388
49	P_{30-31}	2,94255
50	P_{31-32}	-0,02165
51	P_{32-33}	0,03996
52	P_{34-32}	0,08979
53	P_{34-35}	-0,08253
54	P_{35-36}	-0,16464
55	P_{36-37}	-1,58722
56	P_{36-40}	0,04121
57	P_{37-38}	0,27647
58	P_{37-39}	0,04634
59	P_{38-44}	-0,28899
60	P_{38-48}	-0,18827
61	P_{39-57}	0,0406
62	P_{40-56}	0,04139
63	P_{41-42}	0,10969
64	P_{41-43}	-0,12529

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zatt
65	P_{41-11}	-0,10715
66	P_{41-56}	0,0622
67	P_{44-45}	-1,86529
68	P_{46-47}	0,57005
69	P_{47-48}	0,18319
70	P_{49-13}	-0,39346
71	P_{49-38}	0,05978
72	P_{49-48}	-0,00044
73	P_{49-50}	0,11776
74	P_{50-51}	-0,13081
75	P_{52-53}	0,13031
76	P_{53-54}	-0,07944
77	P_{54-55}	-0,1301
78	P_{56-42}	-0,01871
79	P_{57-56}	-0,0343
80	P_6	-0,89662
81	P_9	-1,30538
82	P_{12}	-9,79018
83	P_{13}	-0,18401
84	P_{17}	-0,43161
85	P_{23}	-3,45492
86	P_{29}	-0,19854
87	P_{30}	9,99475
88	P_{31}	-0,06072
89	P_{35}	-0,06734
90	P_{38}	-0,14511
91	P_{41}	-0,06386
92	P_{42}	-0,08593
93	P_{44}	-0,13663
94	P_{47}	-0,36531
95	P_{53}	-0,23447

Διάγραμμα εκτιμώμενων μετρήσεων Zattest μετά την επίθεση και η διαφορά ratt των εκτιμώμενων από τις μετρήσεις zatt:

α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt	α/α	Μετρήσεις SCADA	Zattest	ratt
1	P_{1-2}	0,6605	1,52195	33	P_{14-46}	-0,01693	0,51361	65	P_{41-11}	-0,0012	-0,10595
2	P_{1-15}	-0,24488	1,93566	34	P_{15-45}	-1,46426	0,19172	66	P_{41-56}	0,03643	0,02577
3	P_{1-16}	-0,1025	1,02198	35	P_{18-19}	0,02719	0,02212	67	P_{44-45}	-1,64659	-0,2187
4	P_{1-17}	0,2159	0,84316	36	P_{19-20}	0,01144	0,001	68	P_{46-47}	0,09382	0,47623
5	P_{2-3}	-3,01615	0,36723	37	P_{21-20}	0,01422	-0,00138	69	P_{47-48}	0,02054	0,16265
6	P_{3-4}	0,85168	-0,1717	38	P_{21-22}	-0,01164	0,0002	70	P_{49-13}	0,00354	-0,397
7	P_{3-15}	0,31433	0,10645	39	P_{22-23}	3,24299	0,06409	71	P_{49-38}	-0,00203	0,06181
8	P_{4-5}	0,18403	-0,03856	40	P_{22-38}	0,02254	-0,14809	72	P_{49-48}	-0,00044	0
9	P_{4-18}	0,0174	0,12586	41	P_{24-23}	5,76863	0,00905	73	P_{49-50}	0,16805	-0,05029
10	P_{6-4}	-0,16435	0,01994	42	P_{24-25}	-0,01698	0,10058	74	P_{50-51}	-0,01047	-0,12034
11	P_{6-5}	-0,00674	4,00e-05	43	P_{24-26}	-0,09023	-0,02546	75	P_{52-53}	0,09676	0,03355
12	P_{6-7}	3,75029	0,05632	44	P_{25-30}	0,06952	0,01888	76	P_{53-54}	-0,04269	-0,03675
13	P_{6-8}	-0,53202	0,05987	45	P_{26-27}	0,01298	-0,13673	77	P_{54-55}	-0,04254	-0,08756
14	P_{7-8}	-6,65967	0,08483	46	P_{27-28}	-0,03651	-0,18582	78	P_{56-42}	-0,02001	0,0013
15	P_{7-29}	-6,39018	0,34735	47	P_{28-29}	24,48001	-0,17655	79	P_{57-56}	-0,0343	0
16	P_{8-9}	0,79813	1,25885	48	P_{29-52}	0,06394	0,12994	80	P_6	-0,27617	-0,62045
17	P_{9-10}	0,10186	0,10267	49	P_{30-31}	2,93793	0,00462	81	P_9	0,14606	-1,45144
18	P_{9-12}	0,82597	0,01092	50	P_{31-32}	-0,0167	-0,00495	82	P_{12}	-9,14089	-0,64929
19	P_{9-13}	0,0342	-0,00539	51	P_{32-33}	0,03996	0	83	P_{13}	-0,15353	-0,03048
20	P_{9-55}	0,07849	0,11981	52	P_{34-32}	0,00427	0,08552	84	P_{17}	-0,3461	-0,08551
21	P_{10-12}	1,79678	-0,09433	53	P_{34-35}	-0,07556	-0,00697	85	P_{23}	-3,4824	0,02748
22	P_{10-51}	0,0845	0,26299	54	P_{35-36}	-0,09612	-0,06852	86	P_{29}	-0,15631	-0,04223
23	P_{11-9}	-0,12363	-0,00795	55	P_{36-37}	-1,51257	-0,07465	87	P_{30}	9,99289	0,00186
24	P_{11-13}	-0,06943	-0,04277	56	P_{36-40}	0,04121	0	88	P_{31}	-0,08315	0,02243
25	P_{11-41}	0,0012	0,10278	57	P_{37-38}	0,58972	-0,31325	89	P_{35}	-0,07351	0,00617
26	P_{11-43}	0,08556	0,07933	58	P_{37-39}	0,04634	0	90	P_{38}	-0,11698	-0,02813
27	P_{12-13}	-2,10577	0,00029	59	P_{38-44}	0,03841	-0,3274	91	P_{41}	-0,07322	0,00936
28	P_{12-16}	-3,21188	-0,0716	60	P_{38-48}	0,00626	-0,19453	92	P_{42}	-0,12243	0,0365
29	P_{12-17}	-1,21053	-0,67928	61	P_{39-57}	$7e-05$	0,04053	93	P_{44}	-0,09018	-0,04645
30	P_{13-14}	-0,13771	0,01524	62	P_{40-56}	$3e-05$	0,04136	94	P_{47}	-0,067	-0,29831
31	P_{13-15}	-0,54766	-0,00415	63	P_{41-42}	0,0367	0,07299	95	P_{53}	-0,37067	0,1362
32	P_{14-15}	-0,75915	0,01152	64	P_{41-43}	0,02959	-0,15488				

rnew=r-ratt=0

$J=52,0832$

Τιμή της x^2 κατανομής για $95-57=38$ βαθμούς ελευθερίας = 53,38

Έξοδος: NO BAD DATA DETECTED

6.3 Διερεύνηση Αποτελεσμάτων της «Big M» Μεθόδου για Διαφορετικές Τιμές του M

Όπως παρατηρήθηκε μέσω των προσομοιώσεων, η επιλογή του αριθμού M παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση της μεθόδου και επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα.

Και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις στα δίκτυα των 14 και των 57 ζυγών, η τιμή του M ήταν 10^4 . Στην περίπτωση των 14 ζυγών, το διάλυμα δυαδικών αριθμών x περιέχει μόνο 0 και 1, ενώ στην περίπτωση των 57, για το ίδιο M παρουσιάζονται και αριθμοί όπως το 10^{-5} αντί για ακέραια μηδενικά.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εκτελέσεις του κώδικα πολλαπλών επιθέσεων με βελτιστοποιημένο διάλυμα επίθεσης για διαφορετικές τιμές του M.

Δίκτυο 14 ζυγών IEEE.

Αρχείο av1.txt:

```
3  NAN
2  3
7  -1.5
19 0.7
```

Πίνακας αποτελεσμάτων:

M	10^2		10^4		10^6		10^8	
α/α	x	a	x	a	x	a	x	a
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	3	1	3	1	3	1	3
3	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	4,18230	1	4,18230	4,18230e-06	4,18230	4,18230e-08	4,1823
5	1	3,88172	1	3,88172	3,88171e-06	3,88172	3,88172e-08	3,88172
6	1	4,44708	1	4,44708	4,44708e-06	4,44708	4,44708e-08	4,44708
7	1	-1,5	1	-1,5	1	-1,5	1	-1,5
8	1	-3,65744	1	-3,65744	3,65744e-06	-3,65744	3,65744e-08	-3,65744
9	0,99999	-1,37517	1	-1,37517	1,37517e-06	-1,37517	1,37517e-08	-1,37517
10	1	-2,78422	1	-2,78422	2,78422e-06	-2,78422	2,78422e-08	-2,78422
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	1,07405	1	1,07405	1,07405e-06	1,07405	-1,07405e-08	1,07405
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	0,7	1	0,7	1	0,7	0	0,7
20	1	-0,40203	1	-0,40203	4,02034e-07	-0,40203	4,02034e-09	-0,40203
21	1	3	1	3	3,00000e-06	3	3,00000e-08	3
22	0	0	0	0	0	0	0	0

M	10 ²		10 ⁴		10 ⁶		10 ⁸	
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, στις θέσεις που ο πίνακας x περιέχει 1, το διάνυσμα επίθεσης περιέχει μη μηδενική τιμή αντίστοιχα, ενώ στις θέσεις που το διάνυσμα x περιέχει 0, το ίδιο συμβαίνει και με το διάνυσμα επίθεσης.

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα, οι αριθμοί του διανύσματος x είναι όλοι ακέραιοι μόνο στην περίπτωση $M=10^4$. Για $M=10^2$, στη θέση 24 παρουσιάζεται ο αριθμός 0,99999 ο οποίος είναι κοντά στο 1, ενώ αντίστοιχα στο διάνυσμα επίθεσης υπάρχει τιμή. Για $M=10^6$, οι θέσεις που το διάνυσμα a περιέχει τιμές δεν αντιστοιχούν με μονάδες στον πίνακα x αλλά με πολύ μικρές τιμές της τάξης του 10^{-6} . Για $M=10^8$, συμβαίνει το ίδιο αλλά για τιμές της τάξης του 10^{-8} , ωστόσο δεν υπάρχει ούτε απόλυτη αντιστοιχία μηδενικών στοιχείων στα 2 διανύσματα. Για παράδειγμα, στη θέση 19 ο πίνακας x περιέχει 0, ενώ ο πίνακας επίθεσης περιέχει την τιμή 0,7.

Επομένως, η μέθοδος «Big M» στην περίπτωση 14 ζυγών λειτουργεί σωστά μόνο στην περίπτωση $M=10^4$.

Δίκτυο 57 ζυγών IEEE.

Αρχείο av1.txt:

```

7   NaN
3   1
13  4
28  -2.1
36  -1.7
39  3.2
45  2.9
56  -1.4

```

Πίνακας αποτελεσμάτων:

M	10 ²		10 ⁴		10 ⁶		10 ⁸	
α/α	x	a	x	a	x	a	x	a
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	1	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

M	10 ²		10 ⁴		10 ⁶		10 ⁸	
9	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0
13	1	4	1	4	1	4	1	4
14	1	9,71518	1	9,71518	9,71518e-06	9,71518	9,71518e-08	9,71518
15	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	-6,75731	1	-6,75731	6,75731e-06	-6,75731	6,75731e-08	-6,75731
17	0	0	0	0	0	0	0	2,2474
18	1	1,27934	1	1,27934	1,27934e-06	1,27934	1,27934e-08	1,27934
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1	2,99316	1	2,99316	2,99316e-06	2,99316	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0
27	1	-3,33545	1	-3,33545	3,33545e-06	-3,33545	3,3354e-08	-3,33545
28	1	-2,1	1	-2,1	1	-2,1	1	-2,1
29	1	-2,10403	1	-2,10403	2,10403e-06	-2,10403	2,10403e-08	-2,10403
30	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	1	1,00607	0	0	0	0
36	1	-1,7	1	-1,7	1	-1,7	1	-1,7
37	1	-0,88729	0	0	8,87292e-07	-0,88729	8,87292e-09	-0,88729
38	0	0	0	0	0	0	0	0
39	1	3,2	1	3,2	1	3,2	1	3,2
40	1	1,64881	1	1,64881	1,64881e-06	1,64881	1,64881e-08	1,64881
41	0	0	0	0	2,87425e-06	2,87425	0	2,87425
42	0	0	0	0	5,98862e-07	0,59886	0	0,59886
43	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0
45	1	2,9	1	2,9	1	2,9	1	2,9
46	1	-7,72117	1	-7,72117	0	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0

M	10 ²		10 ⁴		10 ⁶		10 ⁸	
54	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0
56	1	-1,4	1	-1,4	1	-1,4	1	-1,4
57	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0
62	1	5,00e-05	1	5,00e-05	5,45941e-11	5,00e-05	5,45941e-13	5,00e-05
63	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	0	0	0	0	0
67	0	0	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	0	0	0	0	0
72	0	0	0	0	0	0	0	0
73	0	0	0	0	0	0	0	0
74	0	0	0	0	0	0	1,83297e-08	1,83297
75	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	0	0
77	0	0	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	0	0	0	0	0
79	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0	0	0
82	1	-14,345	1	-14,345	1	-14,345	1	-14,345
83	0	0	0	0	0	0	0	0
84	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0
86	0	0	0	0	0	0	0	0
87	0	0	0	0	0	0	0	0
88	0	0	0	0	0	0	0	0
89	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	0	0	0	0	0	0	0
91	0	0	0	0	0	0	0	0
92	0	0	0	0	0	0	0	0
93	0	0	0	0	0	0	0	0
94	0	0	0	0	0	0	0	0
95	0	0	0	0	0	0	0	0

Όπως φαίνεται από τον πίνακα αποτελεσμάτων, οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο για $M=10^2$ και για $M=10^4$ είναι ίδιες, με εξαίρεση την 35η και την 37η τιμή των πινάκων.

Για $M=10^2$, έχουμε τιμή 1 στο διάνυσμα x και την τιμή -0,88729 στο διάνυσμα επίθεσης για την 37η θέση, ενώ για $M=10^4$, υπάρχουν μηδενικά στις αντίστοιχες θέσεις. Αντίθετα, στην 35η θέση έχουμε τιμές στην περίπτωση για $M=10^4$ ($x=1$, $a=1,00607$) και μηδενικά για $M=10^2$. Για $M=10^6$, ο πίνακας x περιέχει τιμές 0 και 1 μόνο στις θέσεις που έχει προγραμματιστεί η επίθεση. Στις υπόλοιπες θέσεις που το διάνυσμα επίθεσης περιέχει μη μηδενικές τιμές, το διάνυσμα x περιέχει μικρές τιμές της τάξης του 10^{-6} . Τέλος, στην περίπτωση $M=10^8$ έχει χαθεί πλέον η αντιστοιχία τιμών στα διανύσματα x και a αφού το διάνυσμα επίθεσης περιέχει τιμές σε θέσεις που το διάνυσμα x περιέχει μηδενικά.

Επομένως, η μέθοδος «Big M» παρέχει σωστά αποτελέσματα για $M=10^2$ και για $M=10^4$.

Όπως προέκυψε μέσω των προσομοιώσεων για 14 ζυγούς ο αριθμός M πρέπει να είναι της τάξης του 10^4 , ενώ για 57 ζυγούς η μέθοδος παρέχει σωστά αποτελέσματα και για $M=10^2$. Έτσι, αύξηση στους ζυγούς, στο πλήθος των μετρήσεων και στον αριθμό επιθέσεων δίνει το περιθώριο για εκτέλεση της μεθόδου με μικρότερο αριθμό M .

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εφαρμόστηκε πλήθος σεναρίων κυβερνοεπιθέσεων σε δίκτυα 14 και 57 ζυγών της IEEE. Τα σενάρια αυτά αφορούσαν την εισαγωγή εσφαλμένων δεδομένων στο διάνυσμα μετρήσεων, την πραγματοποίηση μη ανιχνεύσιμης επίθεσης, την επίτευξη βέλτιστης μη ανιχνεύσιμης επίθεσης καθώς και την πρόκληση πολλαπλών ταυτόχρονων μη ανιχνεύσιμων επιθέσεων με βελτιστοποιημένο διάνυσμα επίθεσης. Μέσα από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, εξήχθηκε πλήθος συμπερασμάτων.

Παρατηρήθηκε ότι αν ο επιτιθέμενος επιθυμεί να αλλοιώσει την τιμή μιας συγκεκριμένης μέτρησης, η τιμή που μπορεί να προσθέσει σε αυτή πρέπει να βρίσκεται εντός του διαστήματος $[-3\sigma, 3\sigma]$ όπου σ η τυπική απόκλιση της συγκεκριμένης μέτρησης. Το διάστημα αυτό ενδέχεται να αλλάζει ανάλογα με την ευαισθισία που έχει ορίσει το κέντρο ελέγχου ενέργειας στον αλγόριθμο ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων. Οποιαδήποτε πρόσθεση τιμής εκτός αυτών των ορίων θα προκαλέσει συναγερμό.

Σε περίπτωση που ο επιτιθέμενος επιθυμεί να αλλοιώσει μια τιμή του διανύσματος μετρήσεων παραβαίνοντας τα όρια ευαισθισίας του αλγορίθμου ανίχνευσης δεδομένων, πρέπει αναγκαστικά να επιχειρήσει μια μη ανιχνεύσιμη επίθεση. Για να είναι μια επίθεση μη ανιχνεύσιμη πρέπει το διάνυσμα επίθεσης που θα προστεθεί στο διάνυσμα μετρήσεων να προκύπτει ως γραμμικός συνδιασμός της Ιακωβιανής μήτρας H . Οποιοδήποτε διάνυσμα πολλαπλασιαστεί με τη μήτρα H δίνει κατάλληλο διάνυσμα επίθεσης. Ωστόσο, αν η αλλοίωση είναι αρκετά μεγάλη, η επίθεση μπορεί να εντοπιστεί από άλλους μηχανισμούς, καθώς υπάρχει κίνδυνος να οδηγήσει τον εκτιμητή κατάστασης σε μη γραμμική περιοχή και να μην υπάρξει σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου. Επομένως υπολογίζοντας το κατάλληλο διάνυσμα επίθεσης που προκαλεί την επιθυμητή αύξηση ή μείωση της επιλεγμένης μέτρησης, ο επιτιθέμενος είναι σε θέση να αλλοιώσει την αντίστοιχη τιμή χωρίς να εντοπιστεί από τον αλγόριθμο ανίχνευσης εσφαλμένων δεδομένων.

Βέλτιστο τρόπο επίθεσης αποτελεί ο υπολογισμός βελτιστοποιημένου διανύσματος. Με αυτό τον τρόπο ο επιτιθέμενος προκαλεί την επιθυμητή αλλοίωση της επιλεγμένης μέτρησης, επηρεάζοντας όσο το δυνατόν λιγότερες από τις υπόλοιπες μετρήσεις, μειώνοντας στο ελάχιστο τις πιθανότητες να γίνει αντιληπτός από οποιοδήποτε μηχανισμό. Σε αντίθεση με την απλή εφαρμογή μη ανιχνεύσιμης επίθεσης, αυτή η μέθοδος προκαλεί την ελάχιστη δυνατή διαταραχή στο δίκτυο, καθώς αλλοιώνονται μόνο οι απαιτούμενες τιμές ώστε να ικανοποιείται ο περιορισμός της προγραμματισμένης επίθεσης. Παρατηρήθηκε πως αν η μέτρηση που πρόκειται να αλλοιωθεί αποτελεί έγχυση ή ροή ενεργού ισχύος κρίσιμου ζυγού (συνδεδεμένος μόνο με ένα ζυγό) τότε το βελτιστοποιημένο διάνυσμα

περιέχει ένα μόνο αριθμό ο οποίος πρόκειται να προστεθεί στην επιθυμητή μέτρηση. Επομένως η μη ανιχνεύσιμη επίθεση σε κρίσιμο ζυγό συμπίπτει με την απλή εισαγωγή εσφαλμένου δεδομένου, το οποίο όμως δε μπορεί να ανιχνευθεί από τον αλγόριθμο εκτίμησης κατάστασης ακόμα και αν βρίσκεται εκτός των ορίων ευαισθησίας.

Αρκετά αποτελεσματική μέθοδο υπολογισμού του βελτιστοποιημένου διανύσματος επίθεσης αποτελεί η μέθοδος «Big M», η οποία υπολογίζει με ακρίβεια το ζητούμενο αποτέλεσμα. Ωστόσο, όπως παρατηρήθηκε μέσω των προσομοιώσεων, απαιτείται ο κατάλληλος προσδιορισμός του αριθμού M , ο οποίος εξαρτάται από το μέγεθος του δικτύου (πλήθος ζυγών) καθώς και από τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων. Λανθασμένη επιλογή του M μπορεί να προκαλέσει υπολογισμό μη ακριβούς διανύσματος επίθεσης, ακόμα και αδυναμία υπολογισμού του διανύσματος.

Αν ο επιτιθέμενος επιθυμεί να αλλοιώσει τις τιμές περισσότερων μετρήσεων, ο αποδοτικότερος τρόπος επίτευξης του στόχου είναι ο υπολογισμός βέλτιστου διανύσματος επίθεσης που να ικανοποιεί όλες τις συνθήκες που απαιτούνται. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται και σε αυτή την περίπτωση μέσω της μεθόδου «Big M». Ο αριθμός των ταυτόχρονων επιθέσεων αποτελεί και αυτός παράγοντα που πρέπει να ληφθεί υπόψη για την επιλογή του αριθμού M (όπως επίσης και το πλήθος των ζυγών αλλά και ο αριθμός των διαθέσιμων μετρήσεων), καθώς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακρίβεια και την αξιοπιστία του διανύσματος επίθεσης που υπολογίζεται.

Μέσω των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε πως αν το σύστημα έχει υποστεί μη ανιχνεύσιμη επίθεση, το κέντρο ελέγχου μπορεί να αντιληφθεί αυτό το γεγονός, πραγματοποιώντας εσκεμμένη εισαγωγή εσφαλμένου δεδομένου στο διάνυσμα των μετρήσεων. Αν και ο αλγόριθμος εσφαλμένων δεδομένων δεν μπορεί να ανιχνεύσει μια τέτοια επίθεση, τα στοιχεία του διανύσματος μετρήσεων έχουν υποστεί σημαντική αλλοίωση ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί της επίθεσης. Αυτό σημαίνει ότι μια μέτρηση μπορεί να έχει υποστεί σημαντική αυξομείωση σε σχέση με την αρχική της τιμή. Αν πραγματοποιηθεί εισαγωγή εσφαλμένου δεδομένου η τιμή του οποίου βρίσκεται εκτός του ορίου ευαισθησίας αλλά αρκετά κοντά σε αυτό, ο αλγόριθμος εσφαλμένων δεδομένων ενδέχεται να αναδείξει κάποια από τις υπόλοιπες αλλοιωμένες μετρήσεις ως εσφαλμένη, αφού το κανονικοποιημένο υπόλοιπο που αντιστοιχεί σε αυτήν είναι μεγαλύτερο. Έτσι, μέσω της εσκεμμένης εισαγωγής εσφαλμένου δεδομένου, αν η εσφαλμένη μέτρηση που θα εντοπιστεί είναι διαφορετική της επιλεγμένης, το κέντρο ελέγχου αντιλαμβάνεται ότι το σύστημα έχει υποστεί μη ανιχνεύσιμη επίθεση.

7.0.1 Μελλοντική εργασία

Σε μελλοντική εργασία υπάρχει δυνατότητα διερεύνησης μη γραμμικών μεθόδων υπολογισμού βέλτιστου διανύσματος επίθεσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της «Big M». Τα αποτελέσματα αυτά ενδέχεται να είναι σχεδόν όμοια μεταξύ τους, ωστόσο αποτελεί ενδιαφέρον ζήτημα η επιβεβαίωση αυτής της υπόθεσης στην πράξη και η ανάδειξη της ακριβέστερης μεθόδου για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ένα άλλο ζήτημα που θα μπορούσε να διερευνηθεί σε μελλοντική εργασία είναι η μέθοδος ανίχνευσης «αόρατης» επίθεσης μέσω εσχευμένης εισαγωγής εσφαλμένης μέτρησης. Μπορούν να διερευνηθούν οι τρόποι υπολογισμού της εσφαλμένης μέτρησης που θα εισαχθεί ώστε να ενεργοποιήσει τον αλγόριθμο εσφαλμένων δεδομένων αλλά ταυτόχρονα να έχει το μικρότερο δυνατό κανονικοποιημένο υπόλοιπο. Επίσης, μπορούν να εξεταστούν οι περιπτώσεις αποτυχίας της μεθόδου και οι προϋποθέσεις εφαρμογής της ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Τέλος, σημαντικό βήμα θα ήταν εκτός από την αναγνώριση ύπαρξης μη ανιχνεύσιμης επίθεσης και ο ακριβής προσδιορισμός των αλλοιωμένων από τον επιτιθέμενο μετρήσεων.

Βιβλιογραφία

- [1] P. Kundur. *Power system stability and control*. New York: EPRI Power system Engineering series, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] M. Begovic, *The electric power engineering handbook*. Florida: CRC Press, 2000.
- [3] C. W. Taylor, *Power system voltage stability*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] J. Allemong, “*State Estimation fundamentals for successful deployment*,” in Proc. Power Eng. Soc. General Meeting, 2005.
- [5] I. Hiskins, “*Nonlinear dynamic model evaluation from disturbance measurements*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 16, no. 4, pp. 702-710, Nov. 2001.
- [6] F. L. Alvarado, “*Detection of external system topology errors*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 100, no. 11, pp. 4553-4561, Nov. 1981.
- [7] S. Massoud Amin, “*Toward a smart grid: power delivery for the 21st century*,” IEEE Power and Energy Magazine, vol. 3, no. 5, pp. 34-41, Sep.-Oct. 2005.
- [8] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis, “*Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 99, no. 4, pp. 1534-1542, Jul. 1980.
- [9] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, “*Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Algorithm that Determines the Maximal Observable Subnetwork*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 101, no. 9, pp. 3044-3052, Sep. 1982.
- [10] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, and P. W. Davis, “*Power System State Estimation with Measurement Deficiency: An Observability / Measurement Placement Algorithm*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 102, no. 7, pp. 2012-2020, Jul. 1983.
- [11] T. Van Cutsem, “*Power system observability and related functions. Derivation of appropriate strategies and algorithms*,” Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 7, no.3, pp. 175-187, Jul. 1985.
- [12] V. H. Quintana, A. Simoes-Costa, and A. Mandel, “*Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 101, no.3 pp. 617-626, Mar. 1982.

-
- [13] F. F. Wu and A. Monticelli, “*Network Observability: Theory*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 104, no. 5, pp. 1042–1048, May 1985.
 - [14] A. Monticelli and F. F. Wu, “*Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 104, no. 5, pp. 1035–1041, May 1985.
 - [15] A. Monticelli and F. F. Wu, “*Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 1, no. 1, pp. 201–206, Feb. 1986.
 - [16] F. F. Wu, W-H. E. Liu, and S-M. Lun, “*Observability analysis and bad data processing for state estimation with equality constraints*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 541–548, May 1988.
 - [17] G. N. Korres, “*A robust method for equality constrained state estimation*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 2, pp. 305–314, May 2002.
 - [18] D. M. Falcao and M. A. Arias, “*State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 2, pp. 979–987, May 1994.
 - [19] N. G. Bretas, “*Network observability: Theory and algorithms based on triangular factorization and path graph concepts*,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 143, no. 1, pp. 123–128, Jan. 1996.
 - [20] J. B. A. London Jr., L. F. C. Alberto, and N. G. Bretas, “*Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes*,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 1, no. 1 pp. 39–45, Jan. 2007.
 - [21] G. W. Stewart, *Introduction to Matrix Computations*. New York: Academic Press, 1973.
 - [22] L. Pursell and S. Y. Trimble, “*Gram-Schmidt orthogonalization by Gauss elimination*,” Amer. Math. Monthly, vol. 98, no. 6, pp. 544–549, Jun.-Jul. 1991.
 - [23] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. García, and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*. New York: Wiley, 2001.
 - [24] T. E. Dy Liacco, “*Real-Time Computer Control of Power Systems*,” Proceedings of the IEEE, vol. 62, no.7, pp. 884–891, Jul. 1974.
 - [25] F. C. Schweppe and J. Wildes, “*Power system static-state estimation, Part I: Exact model*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 89, no.1, pp. 120–125, Jan. 1970.
 - [26] F. C. Schweppe and D. B. Rom, “*Power system static-state estimation, Part II: Approximation model*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 89, no. 1, pp. 125–130, Jan. 1970.

-
- [27] H. M. Merrill and F. C. Schweppe, “*Bad data suppression in power system static state estimation*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 90, no.6, pp. 2718-2725, Nov.-Dec. 1971.
 - [28] E. Handschin, F. C. Schweppe, J. Kohlas, and A. Fiechter, “*Bad data analysis for power system state estimation*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 94, no. 2, pp. 329-337, Mar.-Apr. 1975.
 - [29] A. Monticelli and A. Garcia, “*Reliable bad data processing for real-time state estimation*,” IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 102, no. 3, pp. 1126-1139, May 1983.
 - [30] P. A. Machado, G. P. Azevedo, and A. J. Monticelli, “*A mixed pivoting approach to the factorization of indefinite matrices in power system state estimation*,” vol.6, no. 2, pp. 676–682, May 1991.
 - [31] I. S. Duff, N. I. M. Gould, J. K. Reid, J. A. Scott, and K. Turner, “*The factorization of sparse symmetric indefinite matrices*,” IMA J. Numer. Anal., vol. 11, no.2, pp. 181–204, 1991.
 - [32] A. Abur and A.G. Exposito, *Power System State Estimation. Theory and implementation*, New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.
 - [33] R. Singh, B. C. Pal, and R. A. Jabr, “*Choice of estimator for distribution system state estimation*,” IET Gener. Transm. Distrib., vol. 3, no. 7, pp. 666-678, Jul. 2009.
 - [34] M. G. Cox, M. P. Dainton, P. M. Harris, and N. M. Ridler, “*The evaluation of uncertainties in the analysis of calibration data*,” in Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., 1999.
 - [35] G. N. Korres, “*A robust algorithm for power system state estimation with equality constraints*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 25, no. 3, pp. 1531–1541, Aug. 2010.
 - [36] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, “*Transition to a two-level linear state estimator—Part I: Architecture*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 46–53, Feb. 2011.
 - [37] T. Yang, H. Sun, and A. Bose, “*Transition to a two-level linear state estimator—Part II: Algorithm*,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 54–62, Feb. 2011.
 - [38] Power system test archive. [Online]. <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/> [Online]. Available: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>. N. M. Manousakis and G. N. Korres, “*Observability Analysis for Power Systems including Conventional and Phasor Measurements*,” in Proc. Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, 2010.
 - [39] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “*State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements*,” Elect. Power Syst. Res., vol. 81, no. 7, pp. 1514-1524, Jul. 2011.

-
- [40] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “*A state estimator including conventional and synchronized phasor measurements*,” J. Comp. Electrical Engin., vol. 38, no. 2, pp. 294-305, Mar. 2012.
- [41] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “*Observability analysis and restoration for systems with conventional and phasor measurements*,” Euro. Trans. Elect. Power, vol.3, no. 8, pp. 1548-1566, Nov. 2013.
- [42] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “*Observability Analysis and Restoration for State Estimation Using SCADA and PMU Data*,” Proc. 2012 IEEE PES General Meeting.
- [43] G. N. Korres and N. M. Manousakis, “*A hybrid power system state estimator using synchronized and unsynchronized sensors*,” Int. Trans. Elect. Energy Syst., vol.28, no. 8, <https://doi.org/10.1002/etep.2580>