



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Προσεγγιστική Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου για Αναγνώριση
Ευστάθειας Τάσης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Σεκλός

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Αύγουστος 2019



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

Προσεγγιστική Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου για Αναγνώριση Ευστάθειας Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Α. Σεκλός

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30^η Αυγούστου 2019.

.....

Κωνσταντίνος Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παύλος Γεωργιλάκης

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Αύγουστος 2019

.....
Κωνσταντίνος Α. Σεκλός

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

Copyright © Κωνσταντίνος Σεκλός, 2019

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.

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι συμβουλές του και η προθυμία του να με βοηθήσει καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, με έκαναν να τον εκτιμήσω απεριόριστα τόσο ως καθηγητή, που ενδιαφέρεται για την πρόοδο των φοιτητών του, όσο και ως άνθρωπο.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Μανδουλίδη για την εξαιρετική συνεργασία, το ενδιαφέρον και τον προσωπικό χρόνο που αφιέρωσε αυτό το διάστημα για να με βοηθήσει.

Οφείλω ακόμα να ευχαριστήσω του φίλους μου και ιδιαίτερα τα παιδιά από την σχολή καθώς και τη Γεωργία για τη στήριξη που μου παρείχαν.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου Αιμιλιανό και τα αδέρφια μου Διονυσία και Σωτήρη που με στήριζαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Κλείνοντας, η εργασία αφιερώνεται στη μνήμη της μητέρας μου Σταυρούλας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την προσεγγιστική εκτίμηση του κατάντη δικτύου μέσω μετρήσεων τάσεως και ρεύματος που λαμβάνονται σε έναν ενδιάμεσο ζυγό ενός ακτινικού δικτύου. Η γνώση του κατάντη δικτύου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βελτίωση μεθόδων αναγνώρισης αστάθειας τάσης, όπως η μέθοδος προσαρμογής αντιστάσεων. Η ανάγκη αυτή ανακύπτει καθώς τα συστήματα μεταφοράς και διανομής, ειδικά τα τελευταία χρόνια, λειτουργούν πιο κοντά από ποτέ στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος τους και η εμφάνιση αστάθειας τάσης είναι πολύ πιθανή.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κατάντη δικτύου χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες. Σε κάθε περίπτωση, οι μετρήσεις που λαμβάνονται από μονάδες μετρήσεις φασιθετών μετατρέπονται σε μετρήσεις σύνθετης αντίστασης. Στην πρώτη προσέγγιση, οι μετρούμενες αντιστάσεις απεικονίζονται στο επίπεδο των σύνθετων αντιστάσεων $R-X$ και μέσω των τόπων που δημιουργούνται είναι δυνατή η άντληση πληροφοριών για το κατάντη δίκτυο. Η παράσταση στο επίπεδο σύνθετων αντιστάσεων είναι παρόμοια με αυτή των ηλεκτρονόμων προστασίας αποστάσεως οι οποίοι εξετάζονται επίσης συνοπτικά στην εργασία.

Στη δεύτερη προσέγγιση οι εκτιμήσεις του κατάντη δικτύου προκύπτουν επιλύοντας ένα πρόβλημα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων για τις παραμέτρους του κατάντη δικτύου.

Επειδή η γνώση της μετρούμενης σύνθετης αντίστασης δεν επιτρέπει τον διαχωρισμό του κατάντη δικτύου σε γραμμή και φορτίο, είναι αναγκαία η αξιοποίηση και κάποιας επιπλέον πληροφορίας. Η ανάγκη αυτή αφορά και τις δύο μεθοδολογίες προσδιορισμού. Η πρόσθετη πληροφορία που απαιτείται μπορεί να προέλθει θεωρώντας ότι η γραμμή του κατάντη δικτύου έχει δεδομένο λόγο αντίστασης προς αντίδραση (R_2/X_2).

Εξετάζονται διάφορες περιπτώσεις που μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν ακτινικό κατάντη δίκτυο με ή χωρίς χωρητική αντιστάθμιση στο ζυγό φορτίου, προσομοίωση ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης και επίδραση του θορύβου των μετρήσεων. Επίσης εξετάζεται αναλυτικά η επιλογή του λόγου R_2/X_2 της κατάντη γραμμής και συγκεκριμένα η επίδραση που έχει στις εκτιμήσεις όταν αυτός δεν είναι ακριβής.

Η προσομοίωση του δικτύου για την εξαγωγή των μετρήσεων καθώς και οι εκτιμήσεις πραγματοποιούνται με κώδικα που αναπτύχθηκε στη MATLAB.

Λέξεις-Κλειδιά: Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου, Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, Ευστάθεια Τάσης, Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών, Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Επίπεδο Σύνθετης Αντίστασης, Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα

Abstract

This diploma thesis investigates the approximate estimation of downstream network using voltage and current measurements taken in an intermediate bus of a radial system. The knowledge of the parameters of downstream network can make a significant contribution to improving voltage instability recognition methods, such as the impedance matching. This need arises as transmission and distribution systems, especially in recent years, operate closer than ever to their capability limits and the occurrence of voltage instability is very likely.

Two approaches are used to determine the downstream network parameters. In each case, the measurements obtained from phasor measurements units are converted to impedance measurements. According to the first approach the measured impedance are then displayed at the R-X plane and through the created locus is possible to get information about the downstream network. The impedance locus in R-X plane is similar to the R-X diagrams of protection relays which are also shortly reviewed.

According to the second approach, the downstream network parameters' estimations derive from the solution of a non-linear least squares problem of these parameters.

The measured impedance of the downstream network does not allow to be distinguished between line and load, so some additional information is required. This is true for both methodologies of estimation. The additional information required may come from assuming that the downstream network has a given ratio of resistance to reactance (R_2/X_2).

A plethora of cases are examined which include, inter alia, a radial downstream network with or without capacitive compensation, simulation of switches of compensation capacitors and measurements with noise. Furthermore, the choice of downstream line ratio of resistance to reactance is examined in detail and particularly its effect on estimations when it is not accurate.

The simulation of the network for the extraction of the measurements as well as the estimates are made with a code developed in MATLAB.

Keywords: Downstream Network Estimation, Maximum Power Transfer, Voltage Stability, Phasor Measurement Units, Power Systems Protection, R-X plane, Non-linear Least Squares

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	19
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	21
1.1 Γενικά για τα Σ.Η.Ε.	21
1.1.1 Σύστημα Παραγωγής	21
1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς	22
1.1.3 Δίκτυο Διανομής	23
1.2 Ευστάθεια Τάσεως.....	24
1.2.1 Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσεως	25
1.2.2 Διαχωρισμός Χρονικών Κλιμάκων.....	26
1.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Ευστάθεια Τάσεως	27
1.3.1 Φορτίο αγωγιμότητας χωρίς περιορισμούς.....	27
1.3.2 Σύστημα Δύο Ζυγών με Φορτίο Σταθερού Σ.Ι.	29
1.3.3 Καμπύλες PV	32
1.3.4 Εκτίμηση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με Προσαρμογή Αντιστάσεων	35
1.4 Εκτίμηση Παραμέτρων	37
1.4.1 Μέθοδος Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων.....	37
1.4.2 Μέθοδος Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων	40
1.4.3 Trust-Region Algorithm – Αλγόριθμος Περιοχής Εμπιστοσύνης	43
1.4.4 Αλγόριθμος Levenberg–Marquardt	45
1.4.5 Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα στη MATLAB.....	46
1.5 Δείκτες Ευστάθειας Τάσεως με βάση μετρήσεις.....	47
1.5.1 Γενικά.....	47
1.5.2 Μέθοδος Ελαχίστων τετραγώνων	49
1.5.3 Φίλτρο Kalman και Υβριδική μέθοδος.....	50
1.5.4 Αλγόριθμος βασισμένος σε τοπικά μεγέθη.....	51
1.5.5 Ισοδύναμο με διαχωρισμό ανάντη και κατάντη δίκτυο	53
1.6 Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (PMU).....	56
1.7 Δείκτες Ευστάθειας Βασισμένοι στην Ωμική Αγωγιμότητα	61
1.7.1 NLI.....	61
1.7.2 RLI.....	63

1.8 Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας	64
Κεφάλαιο 2 Προστασία Σ.Η.Ε. και Διαγράμματα Συνθέτου Αντιστάσεως.....	67
2.1 Κύρια και Δευτερεύουσα Προστασία.....	67
2.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά.....	68
2.3 Ηλεκτρονόμοι Αποστάσεως.....	69
2.3.1 H/N Αποστάσεως τύπου Σύνθετης Αντιστάσεως (Impedance).....	69
2.3.2 Τροποποιημένος H/N Αποστάσεως Σύνθετης Αντίστασης.....	73
2.3.3 H/N τύπου mho	73
2.3.4 H/N Αποστάσεως Επαγωγικής Αντιδράσεως.....	74
2.4 Παραβίαση Τρίτης Ζώνης.....	75
2.5 Μετρούμενη Σύνθετη Αντίσταση και Ευστάθεια Τάσης	77
Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση Συντελεστή Ισχύος και Πυκνωτή Αντιστάθμισης.....	83
3.1 Ενδεικτικό Δίκτυο.....	83
3.2 Εκτίμηση Συντελεστή Ισχύος φορτίου	84
3.3 Μεθοδολογία Προσδιορισμού και Αποτελέσματα	86
3.3.1 Φορτίο Επαγωγικού Συντελεστή Ισχύος	88
3.3.2 Στατιστικά Μεταβαλλόμενος Επαγωγικός Συντελεστής Ισχύος.....	91
3.3.3 Φορτίο Μοναδιαίου Συντελεστή Ισχύος.....	95
3.3.4 Φορτίο Χωρητικού Συντελεστή Ισχύος.....	98
3.3.5 Μετρήσεις με Θόρυβο	101
3.4 Δίκτυο με αντιστάθμιση.....	105
Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου με τη Μέθοδο Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων.....	113
4.1 Ενδεικτικό Δίκτυο.....	113
4.2 Μετρήσεις Τάσης και Ρεύματος	114
4.3 Παραγωγή Μετρήσεων (Προσομοίωση)	115
4.4 Αναγνώριση Κατάντη Δικτύου.....	115
4.5 Επιλογή Ανεξάρτητων Μετρήσεων	116
4.6 Περιγραφή Αλγορίθμου Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων	117
4.7 Δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση	118
4.7.1 Φορτίο επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, $\lambda=0,15$ και $N=20$	118
4.7.2 Φορτίο επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, $\lambda=0,17$ και $N=20$	120
4.7.3 Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ , $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $N=20$	121
4.7.4 Επίδραση αρχικής εκτίμησης, $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $\lambda=0,15$, $N=20$	123
4.7.5 Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ , $\Sigma I=0,8$ Χωρητικός, $N=20$	125

4.8 Δίκτυο με αντιστάθμιση.....	126
4.8.1 Σύγκριση λόγων λ με αντιστάθμιση $B_c=0,05$ α.μ. ,επαγωγικό $\Sigma I=0,8$ και $N=20$	126
4.8.2 Επίδραση αρχικής εκτίμησης, με πυκνωτή αντιστάθμισης $B_c=0,05$, $\lambda=0,15$, $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $N=20$	129
4.9 Προσομοίωση ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης.....	131
Κεφάλαιο 5 Επίδραση Θορύβου στην Αναγνώριση Δικτύου.....	135
5.1 Σφάλμα Μετρήσεων και Παραγωγή Τυχαίου Θορύβου.....	135
5.2 Επιλογή Ανεξάρτητων Μετρήσεων	137
5.3 Εξεταζόμενο Δίκτυο	138
5.4 Αφόρτιστη Γραμμή	139
5.4.1 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, χωρίς αντιστάθμιση	139
5.4.2 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, με αντιστάθμιση $B_c=0,05$	140
5.4.3 Θόρυβος και Αφόρτιστη Γραμμή	141
5.5 Φορτισμένη Γραμμή	142
5.5.1 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, χωρίς αντιστάθμιση	142
5.5.2 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, με αντιστάθμιση $B_c=0,05$	144
5.5.3 Σύγκριση Μηκών Παραθύρου	146
5.5.4 Προσομοίωση Ένταξης Πυκνωτή Αντιστάθμισης	148
5.6 Φίλτρο Savitzky-Golay.....	150
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	153
6.1 Συμπεράσματα	153
6.2 Προοπτικές.....	155
Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία	157

Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1.1: Βασική δομή ΣΗΕ.	23
Σχ. 1.2: Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ.	26
Σχ. 1.3: Ακτινικό Δίκτυο δύο ζυγών.	28
Σχ. 1.4: Ενεργός ισχύς, τάση και ρεύμα συναρτήσει της αντίστασης φορτίου R_L , για δίκτυο χωρίς απώλειες και σταθερό ΣΙ ($\tan\phi=0.2$).	31
Σχ. 1.5: Τάση συναρτήσει ενεργού και άεργου ισχύων φορτίου.	33
Σχ. 1.6: Καμπύλες PV.	34
Σχ. 1.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου.	34
Σχ. 1.8: Ακτινικό δίκτυο με μετρήσεις σε ενδιάμεσο ζυγό, χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.	36
Σχ. 1.9: (α) Οι ισοϋψείς καμπύλες της αντικειμενικής συνάρτησης. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο τοπικά ελάχιστα. (β) Η περιοχή εμπιστοσύνης γύρω από το x_0	43
Σχ. 1.10: Αύξηση της περιοχής εμπιστοσύνης μετά από επιτυχημένη επιλογή δοκιμαστικών σημείων.	44
Σχ. 1.11: (α) Μετά από αποτυχία μειώνεται την ακτίνα και γίνεται δοκιμή σε νέο σημείο εντός της νέας περιοχής εμπιστοσύνης. (β) Στη συνέχεια ακόμα και να έχει υπάρξει επιτυχία η ακτίνα διατηρείται σταθερή.	44
Σχ. 1.12: Όσο πιο πολύ προσεγγίζεται το ελάχιστο, τόσο αυξάνει η ακτίνα της περιοχής εμπιστοσύνης, ώσπου τελικά δεν φαίνεται στο σχήμα.	45
Σχ. 1.13: Ζυγός φορτίου και Ισοδύναμο Thévenin.	47
Σχ. 1.14: Κύκλος Thévenin και αύξηση φορτίου προς τον κύκλο.	48
Σχ. 1.15: Απλό ακτινικό δίκτυο όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ενδιάμεσο ζυγό.	48
Σχ. 1.16: Ισοδύναμα κυκλώματα και στις δύο πλευρές από το σημείο μέτρησης.	53
Σχ. 1.17: (α) Τόποι x/t στο επίπεδο των αντιστάσεων. (β) Λύση Z_{th}	54
Σχ. 1.18: Διανυσματικό διάγραμμα στον ζυγό μέτρησης.	54
Σχ. 1.19: Το φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος $X'(f)$ προκύπτει από την συνέλιξη του $X(f)$ και του $\Delta(f)$	58
Σχ. 1.20: (a) Η συνάρτηση εισόδου, (b) τα δείγματά της και (c) ο Μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης που προκύπτει ύστερα από την εφαρμογή του παραθύρου.	58
Σχ. 1.21: (a) Το τετραγωνικό παράθυρο και (b) ο μετασχηματισμός Fourier του. (c) Το παράθυρο Hamming και (d) ο μετασχηματισμός Fourier του.	59
Σχ. 1.22: Τα βασικά μέρη ενός PMU.	60
Σχ. 1.23: Ιεραρχία PMU.	60
Σχ. 1.24: Τροφοδότηση αδύναμης περιοχής μέσω διαδρόμου μεταφοράς.	63
Σχ. 1.25: Όρια φόρτισης στο χώρο φορτίων.	63
Σχ. 2.1: Σχήμα προστασίας για την γραμμή Ε-ΣΤ.	67
Σχ. 2.2: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N αποστάσεως.	70
Σχ. 2.3: Διάγραμμα R-X.	71
Σχ. 2.4: Προστασία γραμμής με H/N αποστάσεως.	71
Σχ. 2.5: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N αποστάσεως σύνθετης αντίστασης με τρεις ζώνες.	72

Σχ. 2.6: Χαρακτηριστική λειτουργίας τροποποιημένου H/N αποστάσεως σύνθετης αντίστασης.	73
Σχ. 2.7: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N αποστάσεως τύπου mho.	74
Σχ. 2.8: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N Επαγωγικής Αντιδράσεως.	74
Σχ. 2.9: Χαρακτηριστική Παραβίασης Φορτίου.	75
Σχ. 2.10: Κύκλοι mho, πολυγωνικές χαρακτηριστικές, περιοχές παραβίασης φορτίου και παρωπίδες.	76
Σχ. 2.11: Φακοειδής χαρακτηριστική ηλεκτρονόμου.	77
Σχ. 2.12: Κύκλος Thévenin και αύξηση του φορτίου προς τον κύκλο.	78
Σχ. 2.13: Απλό ακτινικό δίκτυο.	79
Σχ. 2.14: Εσφαλμένο (1) και πραγματικό (2) όριο ευστάθειας τάσης.	80
Σχ. 3.1: Ακτινικό δίκτυο με απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.	84
Σχ. 3.2: Η διανυσματική σχέση Zapp, Z _L και Z ₂	85
Σχ. 3.3: Οι μετρήσεις του PMU.	88
Σχ. 3.4: Η ευθεία της Zapp.	88
Σχ. 3.5: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ.	89
Σχ. 3.6: Στατιστικά μεταβαλλόμενος ΣΙ.	91
Σχ. 3.7: Οι μετρήσεις του PMU.	92
Σχ. 3.8: Ο τόπος των Zapp.	92
Σχ. 3.9: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ.	93
Σχ. 3.10: Οι μετρήσεις του PMU.	95
Σχ. 3.11: Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση και προσδιορισμός του X ₂	95
Σχ. 3.12: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ.	96
Σχ. 3.13: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος.	98
Σχ. 3.14: Ευθεία φαινόμενης σύνθετης αντίστασης.	98
Σχ. 3.15: Εκτιμήσεις φορτίου για χωρητικό ΣΙ και διαφορετικούς λόγους λ.	99
Σχ. 3.16: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος με θόρυβο.	101
Σχ. 3.17: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.	102
Σχ. 3.18: Η ευθεία της Zapp.	102
Σχ. 3.19: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ.	103
Σχ. 3.20: Δίκτυο με αντιστάθμιση.	105
Σχ. 3.21: Ο τόποι της φαινόμενης αντίστασης παρουσία πυκνωτή αντιστάθμισης.	107
Σχ. 3.22: Υποαντιστάθμιση.	107
Σχ. 3.23: Αντισταθμισμένο φορτίο.	108
Σχ. 3.24: Υπεραντιστάθμιση.	108
Σχ. 3.25: Υπερίσχυση του χωρητικού στοιχείου.	109
Σχ. 3.26: Ο κυκλικός τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης στο επίπεδο R-X.	109
Σχ. 4.1: Ακτινικό δίκτυο προς αναγνώριση.	113
Σχ. 4.2: Αγωγιμότητα φορτίου.	114
Σχ. 4.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου (ακριβής λόγος R ₂ /X ₂).	118
Σχ. 4.4: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος.	119
Σχ. 4.5: Τάση και ρεύμα ύστερα από την εφαρμογή του κριτηρίου ρεύματος.	119
Σχ. 4.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου με εσφαλμένο λόγο λ.	120
Σχ. 4.7: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου με τρεις διαφορετικούς λόγους λ.	122

Σχ. 4.8: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ.....	122
Σχ. 4.9: Εκτιμήσεις με τυχαία αρχική εκτίμηση p_0	124
Σχ. 4.10: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ με φορτίου χωρητικού ΣΙ.....	125
Σχ. 4.11: Μετρήσεις.....	126
Σχ. 4.12: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.....	126
Σχ. 4.13: Μετρήσεις ρεύματος, επίδραση χωρητικότητας σε χαμηλό φορτίο.....	127
Σχ. 4.14: Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση, υπερίσχυση χωρητικότητας σε χαμηλό φορτίο.....	127
Σχ. 4.15: Εκτιμήσεις με πυκνωτή αντιστάθμισης για διαφορετικούς λόγους λ.....	128
Σχ. 4.16: Εκτιμήσεις με περιορισμούς.....	130
Σχ. 4.17: Πρώτες λανθασμένες εκτιμήσεις.....	131
Σχ. 4.18: Ένταξη πυκνωτή όταν $V_L=0,98$ α.μ.....	132
Σχ. 4.19: Μεταβατικές εκτιμήσεις για $N=20$	132
Σχ. 4.20: Ορθές εκτιμήσεις για $N=20$	133
Σχ. 4.21: Μεταβατικές εκτιμήσεις για $N=5$	134
Σχ. 4.22: Ορθές εκτιμήσεις για $N=7$	134
Σχ. 5.1: Το κριτήριο για TVE μικρότερο του 1% στο πέρας του φασιθέτη.....	136
Σχ. 5.2: Το κριτήριο του 1%.....	137
Σχ. 5.3: Ακτινικό δίκτυο προς αναγνώριση.....	138
Σχ. 5.4: Εκτιμήσεις παρουσία θορύβου.....	139
Σχ. 5.5: Ανεξάρτητες μετρήσεις τάσης και ρεύματος.....	139
Σχ. 5.6: Εκτιμήσεις παρουσία θορύβου και πυκνωτή.....	140
Σχ. 5.7: Αντίσταση φορτίου εν παραλλήλω με τον πυκνωτή.....	141
Σχ. 5.8: Σύγκριση σφάλματος με την αντίδραση X_2	142
Σχ. 5.9: Φιλτραρισμένες τιμές.....	143
Σχ. 5.10: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή.....	143
Σχ. 5.11: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.....	144
Σχ. 5.12: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή με πυκνωτή αντιστάθμισης.....	145
Σχ. 5.13: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή με αντιστάθμιση και τυχαίο p_0	146
Σχ. 5.14: Σύγκριση μηκών παραθύρου.....	147
Σχ. 5.15: Ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης.....	148
Σχ. 5.16: Εκτιμήσεις κατά την ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης.....	149
Σχ. 5.17: Ορθές εκτιμήσεις.....	149
Σχ. 5.18: Μετρήσεις.....	151
Σχ. 5.19: Εκτιμήσεις με φίλτρο Savitzky-Golay (ακριβής λ).....	151
Σχ. 5.20: Εκτιμήσεις με φίλτρο Savitzky-Golay (ακριβής λ).....	152
Σχ. 5.21: Μετρήσεις.....	152

Κατάλογος Πινάκων

Πίν. 3.1: Παράμετροι ακτινικού ενδεικτικού δικτύου.	84
Πίν. 3.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.	89
Πίν. 3.3: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ.	90
Πίν. 3.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.	93
Πίν. 3.5: Εκτιμήσεις φορτίου για στατιστικά μεταβαλλόμενο ΣΙ.	94
Πίν. 3.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.	96
Πίν. 3.7: Εκτιμήσεις φορτίου για μοναδιαίο ΣΙ.	97
Πίν. 3.8: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.	100
Πίν. 3.9: Εκτιμήσεις φορτίου για χωρητικό ΣΙ.	100
Πίν. 3.10: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.	103
Πίν. 3.11: Εκτιμήσεις φορτίου για διαφορετικούς λόγους και αντίστοιχα σφάλματα.	104
Πίν. 3.12: Παράμετροι δικτύου με αντιστάθμιση.	105
Πίν. 4.1: Παράμετροι δικτύου.	114
Πίν. 4.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	120
Πίν. 4.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	121
Πίν. 4.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	123
Πίν. 4.5: Τυχαίο αρχικό διάνυσμα.	124
Πίν. 4.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	125
Πίν. 4.7: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	129
Πίν. 4.8: Πραγματικό και τυχαίο ρ_0	129
Πίν. 5.1: Παράμετροι ακτινικού δικτύου.	138
Πίν. 5.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	144
Πίν. 5.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	145
Πίν. 5.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.	147

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά για τα Σ.Η.Ε.

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και του εξοπλισμού τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Η λειτουργία του ΣΗΕ περιλαμβάνει την παραγωγή, τη διανομή και τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας προς τις περιοχές κατανάλωσης. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να εξασφαλίζεται η συνεχής, ασφαλής και αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη, θα πρέπει να είναι διαθέσιμη οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση, δηλαδή η παραγωγή θα πρέπει να προσαρμόζεται στη ζήτηση. Επίσης, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παρέχεται με το ελάχιστο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος, ενώ θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης [BK10].

Εξαιτίας του υψηλού κόστους για επέκταση του συστήματος μεταφοράς ειδικά τα τελευταία χρόνια το σύστημα μεταφοράς αναγκάζεται να λειτουργεί κοντά στο όριο μέγιστης ικανότητας μεταφοράς με αποτέλεσμα να ελλοχεύει ο κίνδυνος αστάθειας. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντική η επιτήρηση σε πραγματικό χρόνο για ταχύτατη αντίχρεση αστάθειας.

Παρά τις διαφορές που έχουν τα διάφορα ΣΗΕ ως προς την έκταση και τα στοιχεία που τα αποτελούν, όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά, κοινό στόχο και παρόμοια δομή. Συγκεκριμένα, σε κάθε ΣΗΕ διακρίνονται τρία υποσυστήματα, το *Σύστημα Παραγωγής*, το *Σύστημα Μεταφοράς* και το *Δίκτυο Διανομής*.

1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας καλείται η διαδικασία μετατροπής μίας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Η μετατροπή της ενέργειας λαμβάνει χώρα στους Σταθμούς Παραγωγής οι οποίοι ανάλογα με την μορφή της πρωτογενούς ενέργειας διακρίνονται σε θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς σταθμούς παραγωγής. Στο σύστημα περιλαμβάνονται και οι υποσταθμοί ανύψωσης σε υψηλή τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [BK10].

Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί χρησιμοποιούν την θερμότητα που προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων ή πυρηνική σχάση η οποία αρχικά μετατρέπεται σε μηχανική μέσω στροβίλων και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Οι σταθμοί που χρησιμοποιούν ως μέσο παραγωγής μηχανικής ενέργειας τον ατμό ονομάζονται ατμοηλεκτρικοί και σε αυτούς ανήκουν οι σταθμοί που πραγματοποιούν εξωτερική καύση και οι πυρηνικοί σταθμοί. Οι σταθμοί που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης είτε εμβολοφόρες ντιζελογεννήτριες είτε αεριοστροβίλους, ονομάζονται ντιζελοηλεκτρικοί και αεριοστροβιλικοί αντίστοιχα.

Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται την κινητική και δυναμική ενέργεια του νερού η οποία μέσω συστήματος υδροστροβίλου-γεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ανάλογα με την ροή του νερού διακρίνονται σε φυσικής ροής και ρυθμιζόμενης ροής, όπου στους τελευταίους είναι αναγκαία η δημιουργία τεχνητής λίμνης. Επίσης υπάρχουν και αντλητικοί σταθμοί όπου οι υδροστροβίλοι λειτουργούν σαν αντλίες (γεννήτριες) ώστε να αποταμιευθεί νερό σε περιπτώσεις περίσσειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εναλλακτικοί σταθμοί παραγωγής αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά πάρκα είναι οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές. Τα φωτοβολταϊκά με τη βοήθεια ηλιακών κυψελών (Solar Cells) μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, ενώ τα αιολικά πάρκα μέσω ανεμογεννητριών μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Το Σύστημα Μεταφοράς όπως δηλώνει και το όνομά του μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, με γραμμές υψηλής (ΥΤ) και υπερυψηλής (ΥΥΤ) τάσης. Οι γραμμές μεταφοράς καταλήγουν σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς διανομής από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής, ενώ επίσης τροφοδοτούν και μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης. Οι τελευταίοι, κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση (ΥΤ/ΜΤ) και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (ΧΤ). Πρόκειται κυρίως για μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 10MW. Στο σύστημα μεταφοράς ανήκουν επίσης οι υποσταθμοί ζεύξης των διαφορετικών δικτύων των γραμμών υψηλής τάσης.

Η μεταφορά σε υψηλή τάση δεν είναι τυχαία καθώς με αυτό τον τρόπο οι ηλεκτρικές απώλειες είναι μικρότερες και επομένως οικονομικότερη λειτουργία. Ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα της ηλεκτρικής ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί επιλέγονται κατά περίπτωση διαφορετικές τάσεις μεταφοράς. Τα επίπεδα τάσεως που εφαρμόζονται διεθνώς έχουν τιμές 66 kV, 110 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV, 275 kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV και 750 kV. Έως τα 220 kV θεωρείται υψηλή τάση, από 275 kV έως 500 kV υπερυψηλή και από 500 kV και πάνω εξαιρετικά υψηλή τάση [Παπ85].

Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής. Η βροχοειδής δομή δίνει τη δυνατότητα ύπαρξης

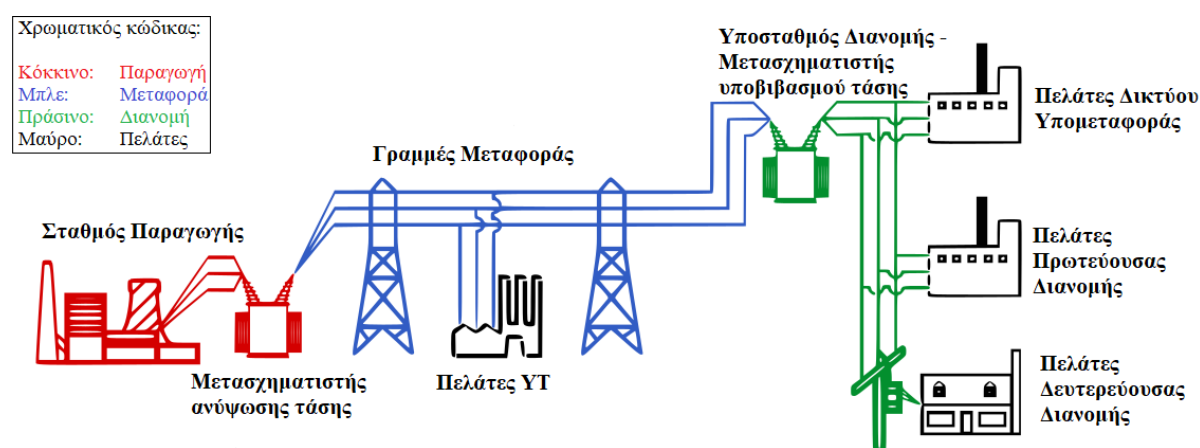
διαφορετικών διαδρομών που να μπορεί να ακολουθήσει η ηλεκτρική ισχύς καθώς μεταφέρεται από την παραγωγή προς τα φορτία. Οι εναλλακτικοί δρόμοι μεταφοράς της ισχύος συμβάλλουν στην αξιοπιστία του συστήματος σε περίπτωση απώλειας τμήματος δικτύου προκειμένου να συνεχίζεται η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system) [Kun94].

1.1.3 Δίκτυο Διανομής

Το Δίκτυο Διανομής είναι επιφορτισμένο με τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των καταναλωτών. Τα δίκτυα διανομής συνδέονται με το σύστημα μεταφοράς μέσω των υποσταθμών (ΥΣ) υποβιβασμού της τάσης από υψηλή σε μέση (ΥΣ ΥΤ/ΜΤ). Από κει και πέρα μέσω γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ. Από τους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ τροφοδοτείται μέχρι και ο τελευταίος καταναλωτής. Η διανομή σε μέση τάση καλείται και πρωτεύουσα διανομή, ενώ η διανομή σε χαμηλή τάση ονομάζεται δευτερεύουσα διανομή.

Τα δίκτυα διανομής ανάλογα με το είδος της περιοχής που τροφοδοτούν (αστικές, βιομηχανικές, υπεραστικές, αγροτικές ή μικτές) μπορεί να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια. Εξαιτίας του μεγάλου πλήθους στοιχεία που τα απαρτίζουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν της απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας [Παπ85].

Τα τελευταία χρόνια, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των υλικών είχαν ως απόρροια τη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων στο σύστημα διανομής, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής [ΒΚ10].



Σχ. 1.1: Βασική δομή ΣΗΕ.

1.2 Ευστάθεια Τάσεως

Η *ευστάθεια ΣΗΕ* ορίζεται ως η ικανότητα του ΣΗΕ να παραμένει σε κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας υπό κανονικές συνθήκες και να μπορεί να επανακτά αποδεκτή κατάσταση ισορροπίας ύστερα από μια διαταραχή [Kun94].

Η *ευστάθεια τάσης* είναι η ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του, τόσο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας όσο και μετά από μια διαταραχή του συστήματος [Kun94].

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από μια διαταραχή, μια αύξηση της ζήτησης ή και μια αλλαγή του συστήματος που οδηγούν σε ανεξέλεγκτη πτώση τάσης. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την παρατήρηση έχει προταθεί ο ακόλουθος ορισμός για την αστάθεια τάσης [VV08]:

Η *αστάθεια τάσης* πηγάζει από την απόπειρα των φορτίων μέσω της δυναμικής τους συμπεριφοράς να απορροφήσουν ενεργό ισχύ πέρα από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συνδυσασμένου συστήματος μεταφοράς και παραγωγής.

Είναι εμφανές από τον παραπάνω ορισμό ότι το μέγιστο όριο μεταφοράς ισχύος καθορίζει εάν το σύστημα κινδυνεύει να βρεθεί σε αστάθεια. Ξεπερνώντας το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου γίνεται ασταθής αφού αντί να αυξάνεται η καταναλισκόμενη ενέργεια, αυτή τελικά μειώνεται. Στο φαινόμενο αυτό εντοπίζεται η ουσία της αστάθειας τάσης.

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων είναι ένας από τους κύριους λόγους πρόκλησης αστάθειας τάσης. Μετά από εμφάνιση διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος, όπως Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), κινητήρες επαγωγής και θερμοστατικά φορτία. Άλλες διατάξεις ελέγχου του συστήματος, όπως η προστασία υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στο φαινόμενο της αστάθειας τάσης [Σου15], [VV08].

Πολλές φορές μαζί με την αστάθεια τάσης συναντάται ο όρος κατάρρευση τάσης και μπορεί να οριστεί ως εξής [VV08]:

Η κατάρρευση τάσης περιγράφει μια ξαφνική καταστροφική μετάβαση του συστήματος, η οποία συνήθως οφείλεται σε αστάθεια που εξελίσσεται σε ταχύτερη χρονική κλίμακα από εκείνη που είχε θεωρηθεί.

Αν και η αστάθεια τάσης αρχίζει να εμφανίζεται τοπικά, οι συνέπειές της μπορεί να επηρεάσουν ευρέως το σύστημα. Η κατάρρευση τάσης είναι πιο σύνθετο φαινόμενο και είναι το επακόλουθο μιας σειράς γεγονότων που συνδέονται με την αστάθεια τάσης που δημιουργούν ένα χαμηλό προφίλ τάσεων σε ένα σημαντικό μέρος του ΣΗΕ [Kun94].

Η κατάρρευση τάσης συνήθως έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Η έναρξη του φαινομένου μπορεί να έχει διάφορες αιτίες, όπως μικρές μεταβολές του φορτίου ή μεγάλες αλλαγές του συστήματος.
2. Η καρδιά του προβλήματος βρίσκεται στην ανικανότητα του συστήματος να ικανοποιήσει την ζήτηση.
3. Η κατάρρευση τάσης εκδηλώνεται ως μια αργή πτώση της τάσης που μπορεί να διαρκέσει μερικά λεπτά.
4. Οι συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του συστήματος επηρεάζουν σημαντικά την ευστάθεια και την κατάρρευση τάσης, με τους πιο σημαντικούς παράγοντες να είναι:
 - Οι μεγάλες αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης
 - Η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ σε συνθήκες χαμηλής τάσης
 - Τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά των φορτίων
 - Ο κακός συντονισμός μεταξύ των διατάξεων ελέγχου και προστασίας.
5. Η κατάρρευση τάσης μπορεί να επιδεινωθεί από την αλόγιστη χρησιμοποίηση εγκάρσιων πυκνωτών αντιστάθμισης.

Παρόλο που η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας αφορά το σύνολό του, εντούτοις είναι δύσκολο να μελετηθεί με ενιαίο τρόπο. Για τον λόγο αυτό είναι αναγκαία η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας ΣΗΕ σε επιμέρους τύπους ώστε να είναι δυνατή η ανάλυση των προβλημάτων και η αναγνώριση των παραγόντων που οδηγούν το σύστημα σε αστάθεια. Η κατηγοριοποίηση γίνεται κυρίως με βάση [Kun94]:

- την φύση της αστάθειας
- το μέγεθος της διαταραχής
- τον εξοπλισμό, τις διαδικασίες και το χρονικό πλαίσιο που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τη μελέτη της αστάθειας
- την καταλληλότερη μέθοδο υπολογισμού και πρόβλεψης της αστάθειας.

1.2.1 Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσεως

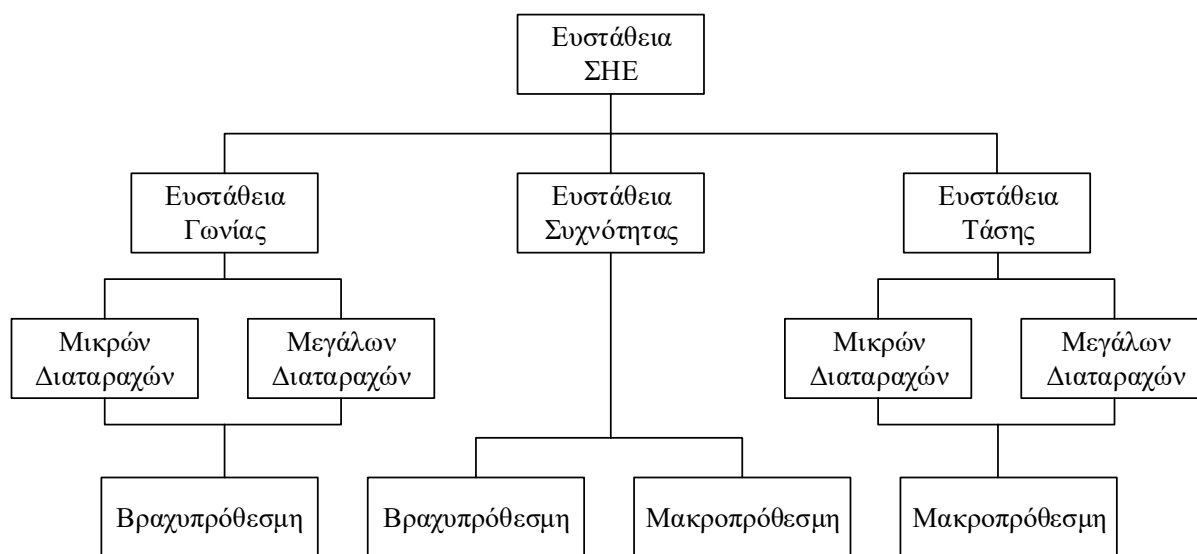
Ως μέρος του ευρύτερου προβλήματος της ευστάθειας ΣΗΕ, η ευστάθεια τάσης μπορεί και αυτή να διακριθεί σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με διάφορα κριτήρια. Σημαντικό κριτήριο για την κατηγοριοποίηση της ευστάθειας τάσης αποτελεί το μέγεθος της διαταραχής που οδηγεί το σύστημα προς την αστάθεια. Η κατάταξη της ευστάθειας τάσης σύμφωνα με αυτό το κριτήριο είναι πολύ σημαντική καθώς συμβάλλει στην επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας ανάλυσης της αστάθειας.

Η ευστάθεια μεγάλων διαταραχών σχετίζεται με την ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί τις τάσεις ύστερα από μεγάλες διαταραχές όπως είναι τα σφάλματα συστήματος, η απώλεια γεννητριών ή η απώλεια γραμμής μεταφοράς. Η ικανότητα αυτή του συστήματος συνδέεται στενά με τα χαρακτηριστικά των φορτίων καθώς επίσης και από την λειτουργία και αλληλεπίδραση διάφορων συνεχών ή διακριτών διατάξεων ελέγχου και προστασίας, π.χ. ΣΑΤΥΦ και περιοριστές ρεύματος διέγερσης. Η αναγνώριση της αστάθειας πραγματοποιείται με μη γραμμική ανάλυση του

συστήματος και για αρκετό χρόνο ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση των ανωτέρω διατάξεων [Kun94].

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών σχετίζεται με την ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί τις τάσεις ύστερα από μικρές διαταραχές όπως είναι οι βαθμιαίες αυξήσεις του φορτίου. Η ικανότητα αυτή του συστήματος συνδέεται στενά με τα χαρακτηριστικά του φορτίου καθώς και με τις διατάξεις ελέγχου που λειτουργούν σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η αναγνώριση της ευστάθειας αυτού του είδους μπορεί να προκύψει με στατική ανάλυση [Kun94].

Στο Σχ. 1.2 παρουσιάζονται οι διάφορες κατηγορίες ευστάθειας.



Σχ. 1.2: Ταξινόμηση ευστάθειας ΣΗΕ.

1.2.2 Διαχωρισμός Χρονικών Κλιμάκων

Ο χρόνος εκδήλωσης των φαινομένων που μπορεί να οδηγήσουν σε αστάθεια τάσης ποικίλει. Για αυτό είναι αναγκαίο να διαχωριστούν σε διαφορετικές κατηγορίες ανάλογα με τη διάρκειά τους. Πράγματι τα φαινόμενα αυτά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες [VV08], [Kan14]:

- **Ακαριαία φαινόμενα:** Πρόκειται κυρίως για ηλεκτρομαγνητικά μεταβατικά φαινόμενα που εξελίσσονται σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα, συνήθως διαρκούν λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο και ως εκ τούτου δεν επηρεάζουν την ευστάθεια τάσεως.
- **Βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα:** Σε αυτή τη χρονική κλίμακα τα φαινόμενα διαρκούν κάποια δευτερόλεπτα, συνήθως από ένα έως δέκα, ενώ αφορούν κυρίως τις γρήγορες προσπάθειες αποκατάστασης φορτίου από κινητήρες επαγωγής και δευτερευόντως τους συνδέσμους υψηλής τάσης συνεχούς ρεύματος (HVDC links) που συμβάλλουν στην ευστάθεια τάσεως. Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι επίσης γνωστή και ως *μεταβατική κατάρρευση τάσης* [Tay94]. Στην ίδια χρονική κλίμακα εντάσσεται και η αστάθεια γωνίας των σύγχρονων μηχανών.

- Μεσοπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα: εδώ ανήκουν τα φαινόμενα που εμφανίζονται αμέσως μετά τα βραχυπρόθεσμα και πριν τα μακροπρόθεσμα. Δηλαδή δείχνουν τη μετάβαση από τη μία κατηγορία στην άλλη.
- Μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα: Είναι τα φαινόμενα που εμφανίζονται μετά από τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που ανήκουν στα βραχυπρόθεσμα και η διάρκειά τους είναι από μερικά λεπτά έως και κάποιες δεκάδες λεπτών.

Συχνά τα μεσοπρόθεσμα με τα μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα θεωρούνται μία κατηγορία, τα φαινόμενα της οποίας εμφανίζονται μετά από τα βραχυπρόθεσμα. Τα ακαριαία φαινόμενα αναφέρονται γενικότερα στο δίκτυο και σε στατικά φορτία. Τα βραχυπρόθεσμα αφορούν τις γεννήτριες, τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης και στροφών, καθώς και οι κινητήρες επαγωγής. Στα μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα έχουμε τα ΣΑΤΥΦ, τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), τη δευτερεύουσα ρύθμιση και έλεγχο της τάσης, το γενικότερο προγραμματισμό της παραγωγής, καθώς και θερμοστατικά φορτία και τους κύκλους των φορτίων γενικά [Καν14].

Όταν χρησιμοποιείται το λεπτομερές μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μελετώνται τα μεταβατικά φαινόμενα των χρονικών κλιμάκων, όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτό των δύο χρονικών κλιμάκων, στο οποίο γίνεται μελέτη των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Στο μοντέλο αυτό, μπορούν να εφαρμοστούν και μερικές απλοποιήσεις έτσι ώστε κάθε φορά να μελετάται αποκλειστικά μία από τις δύο κατηγορίες φαινομένων. Αν είναι επιθυμητό να μελετηθούν αποκλειστικά τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα, αυτό που γίνεται είναι να εισαχθεί ένα προσεγγιστικό μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι τα μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα εξελίσσονται σε μία πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα κι έτσι μπορούν να θεωρηθούν σταθερά στο μικρό διάστημα της τάξης κάποιων δευτερολέπτων που χρησιμοποιείται στη βραχυπρόθεσμη ανάλυση. Από την άλλη, όταν επιδιώκεται να μελετηθεί το σύστημα από τη σκοπιά της μακροπρόθεσμης ανάλυσης, οι υπολογισμοί μπορεί να επιταχυνθούν αμελώντας τη δυναμική δράση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων με τις εξισώσεις ισορροπίας. Θεωρείται δηλαδή ότι τα φαινόμενα αυτά έχουν ήδη εξελιχθεί και έχουν φτάσει σε σημείο ισορροπίας. Αυτό δεν είναι τίποτα άλλο από την Οιονεί Στατική Ανάλυση (Quasi-Steady-State), η οποία χρησιμοποιείται σε μελέτες που αφορούν κυρίως τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης [VV08].

1.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Ευστάθεια Τάσεως

1.3.1 Φορτίο αγωγιμότητας χωρίς περιορισμούς

Σύμφωνα με τον ορισμό της, η αστάθεια τάσης προκύπτει από την προσπάθεια των φορτίων να αυξήσουν την κατανάλωσή τους πέρα από το όριο φόρτισης του συστήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για την αδυναμία του συστήματος να παρέχει μεγαλύτερη ποσότητα ισχύος από αυτό το όριο από μια περιοχή του συστήματος σε

μια άλλη περιοχή ή από έναν ζυγό προς έναν άλλο. Το όριο της ισχύος καλείται Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς. Η μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς όπως θα φανεί και στη συνέχεια εξαρτάται από την τοπολογία και τα στοιχεία του δικτύου.

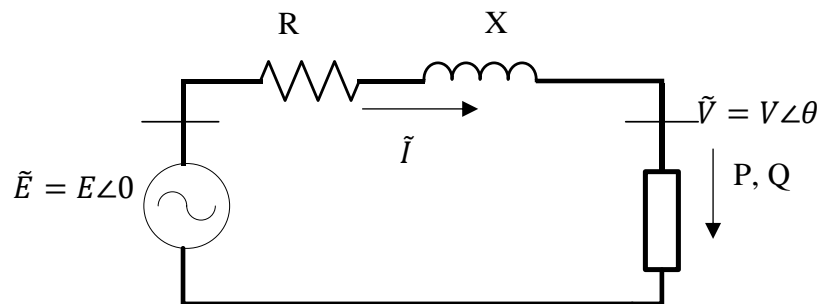
Μια πρώτη εικόνα για την έννοια της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μπορεί να προκύψει από την ανάλυση του απλού δικτύου του Σχ. 1.3. Ο ζυγός του φορτίου τροφοδοτείται από έναν άπειρο ζυγό μέσω μια γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση:

$$\mathbf{Z} = R + jX$$

Αν θεωρηθεί ότι και το φορτίο συμπεριφέρεται σαν σύνθετη αντίσταση τότε ισχύει:

$$\mathbf{Z}_L = R_L + jX_L \quad (1.1)$$

όπου R_L και X_L η αντίσταση και η αντίδραση του φορτίου αντίστοιχα.



Σχ. 1.3: Ακτινικό Δίκτυο δύο ζυγών.

Εάν οι R_L και X_L δεν υπόκεινται σε κάποιο περιορισμό, το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος μπορεί να εφαρμοστεί ώστε να προσδιορίσει τις τιμές τους ώστε να μεγιστοποιείται η κατανάλωση ενεργού ισχύος στο φορτίο.

Από το Σχ. 1.3 το ρεύμα είναι:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{\tilde{\mathbf{E}}}{(R + R_L) + j(X + X_L)} \quad (1.2)$$

ενώ η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο είναι:

$$P = R_L I^2 = \frac{R_L E^2}{(R + R_L)^2 + (X + X_L)^2} \quad (1.3)$$

Για να είναι μέγιστη η ενεργός ισχύς, οι μερικές παράγωγοι της P ως προς R_L και X_L πρέπει να είναι μηδέν:

$$\frac{\partial P}{\partial R_L} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X_L} = 0 \quad (1.5)$$

δηλαδή:

$$(R + R_L)^2 + (X + X_L)^2 - 2R_L(R + R_L) = 0 \quad (1.6)$$

$$-2R_L(X + X_L) = 0 \quad (1.7)$$

και θεωρώντας $R_L > 0$ το σύστημα έχει μοναδική λύση την:

$$R_L = R \quad (1.8)$$

$$X_L = -X$$

Η λύση μπορεί να γραφεί και ως:

$$\mathbf{Z}_L = \mathbf{Z}^* \quad (1.9)$$

Άρα, η κατανάλωση ισχύος στο φορτίο είναι μέγιστη όταν η σύνθετη αντίστασή του είναι συζυγής της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η συνολική αντίσταση είναι $R + R_L + j(X + X_L) = 2R$ και η μέγιστη ισχύς είναι:

$$P_{max} = \frac{E^2}{4R} \quad (1.10)$$

Η περίπτωση αυτή όπου οι τιμές των R_L και X_L είναι εντελώς ελεύθερες, δεν ανταποκρίνεται σε ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Πράγματι, εάν κανείς αναλογιστεί ότι η αντίσταση γραμμής είναι πολύ μικρή, τείνοντας στο μηδέν, τότε θα έπρεπε και η αντίσταση φορτίου για μέγιστη ισχύ να τείνει στο μηδέν, γεγονός όμως που προκαλεί τον απειρισμό της ισχύος σύμφωνα με τη σχέση (1.10). Επίσης, θα χρειαζόταν μία μεγάλη ποσότητα χωρητικής αντιστάθμισης για να αντισταθμίσει την επαγωγική φύση του συστήματος μεταφοράς.

Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο για την περιγραφή του συστήματος περιλαμβάνει ένα φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος και αναλύεται στη συνέχεια.

1.3.2 Σύστημα Δύο Ζυγών με Φορτίο Σταθερού Σ.Ι.

Θεωρώντας ότι το φορτίο έχει σταθερό επαγωγικό συντελεστή ισχύος, η σύνθετη αντίστασή του δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{Z}_L = R_L + jX_L = R_L + jR_L \tan \varphi \quad (1.11)$$

όπου φ η γωνία του συντελεστή ισχύος ($\cos\varphi = \Sigma I$) με φ θετικό για επαγωγικό φορτίο, το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς δίνεται από τον τύπο:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}}{(R + R_L) + j(X + R_L \tan\varphi)} \quad (1.12)$$

Η καταναλισκόμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο είναι:

$$P = R_L I^2 = \frac{R_L E^2}{(R + R_L)^2 + (X + R_L \tan\varphi)^2} \quad (1.13)$$

Η συνθήκη για μέγιστη ισχύ προκύπτει από τον μηδενισμό της παραγώγου της P ως προς την αντίσταση φορτίου R_L , που είναι το μοναδικό μέγεθος που μεταβάλλεται:

$$\frac{\partial P}{\partial R_L} = 0 \quad (1.14)$$

Μετά την παραγωγή προκύπτει:

$$(R^2 + X^2) = R_L^2(1 + \tan^2\varphi) \quad (1.15)$$

Η σχέση (1.15) μπορεί να γραφεί και ως:

$$|Z_L| = |Z| \quad (1.16)$$

Η δεύτερη παράγωγος της P είναι:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_L^2} = -R_L(1 + \tan^2\varphi) \quad (1.17)$$

και είναι πάντα αρνητική άρα το ακρότατο που εντοπίστηκε πρόκειται για μέγιστο.

Συνοψίζοντας, με σταθερό συντελεστή ισχύος, το φορτίο καταναλώνει μέγιστη ισχύ όταν το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου γίνει ίσο με το μέτρο της σύνθετης αντίστασης της γραμμής μεταφοράς. Η έκφραση του θεωρήματος μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος μέσω της ισότητας των μέτρων των σύνθετων αντιστάσεων γραμμής και φορτίου καλείται *συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων*.

Σε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η ωμική αντίσταση και η αντίδραση του φορτίου είναι:

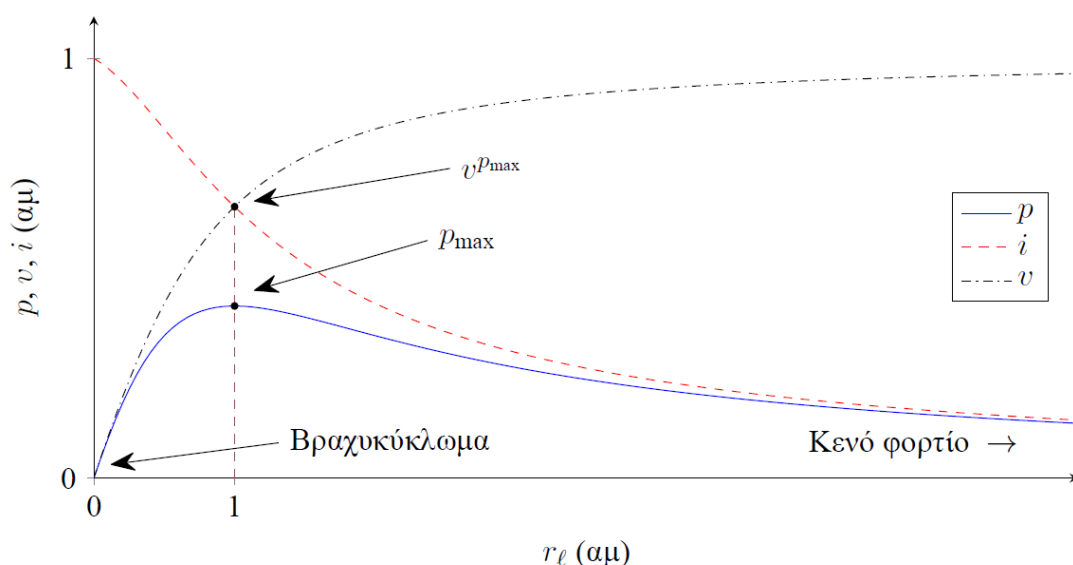
$$R_L^{P_{max}} = |Z| \cos\varphi \quad (1.18)$$

$$X_L^{P_{max}} = |Z| \sin\varphi = R_L^{P_{max}} \tan\varphi \quad (1.19)$$

και ισχύς:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \frac{E^2 \cos\varphi}{\sqrt{R^2 + X^2} + R \cos\varphi + X \sin\varphi} \quad (1.20)$$

Στο Σχ. 1.4 απεικονίζονται οι κανονικοποιημένες τιμές ενεργού ισχύος $p = P/(X/E^2)$ του φορτίου, της τάσης $v = V/E$ και του ρεύματος $i = I/(E/X)$ συναρτήσεως της R_L . Πολύ μεγάλες τιμές της R_L αντιστοιχούν σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος. Όσο μειώνεται η αντίσταση φορτίου πέφτει η τάση V και αυξάνεται η ένταση του ρεύματος I . Όσο η αντίσταση φορτίου είναι μεγαλύτερη από την $R_L^{P_{max}}$, η αύξηση στο I^2 υπερσχύει της μείωσης της R_L και τελικά η ενεργός ισχύς αυξάνει. Όταν η αντίσταση φορτίου γίνει μικρότερη από την $R_L^{P_{max}}$ συμβαίνει το αντίστροφο. Μικρές τιμές της αντίστασης φορτίου κοντά στο μηδέν αντιστοιχούν σε βραχυκύκλωμα.



Σχ. 1.4: Ενεργός ισχύς, τάση και ρεύμα συναρτήσεως της αντίστασης φορτίου R_L , για δίκτυο χωρίς απώλειες και σταθερό ΣI ($\tan\varphi=0.2$).

Για ακτινικό δίκτυο χωρίς απώλειες η συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων είναι:

$$\begin{aligned} |Z_L| &= \left| \frac{1}{G_L(1 - j\alpha)} \right| \\ &= \frac{1}{G_L \sqrt{1 + \alpha^2}} = X \end{aligned} \quad (1.21)$$

όπου $\alpha = \tan\varphi$.

Για κάθε τιμή αντίστασης φορτίου πάνω από το όριο της σχέσης (1.21) το σύστημα παρουσιάζει ευστάθεια τάσης, καθώς με την αύξηση του φορτίου παρατηρείται και αύξηση της μεταφερόμενης ενεργού ισχύος. Όταν ξεπεραστεί αυτό το κατώφλι το σύστημα είναι σε αστάθεια τάσης αφού όσο αυξάνεται το φορτίο μειώνεται η ενεργός ισχύς. Το σύστημα είναι ευσταθές όταν:

$$|Z_L| = \left| \frac{1}{G_L(1-j\alpha)} \right| > X \quad (1.22)$$

1.3.3 Καμπόλες PV

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι ιδιότητα του συστήματος μεταφοράς και δεν εξαρτάται από τον τύπο του φορτίου ή από το εάν το φορτίο είναι σύνθετη αντίσταση. Οι καμπύλες PV αποτελούν χαρακτηριστικές του δικτύου καθώς δείχνουν την εξάρτηση της τάσης σε κάποιον ζυγό, συναρτήσει της καταναλισκόμενης ισχύος στο φορτίο. Η σχέση μεταξύ τάσης και ισχύος μπορεί να εξαχθεί με τη βοήθεια των εξισώσεων ροής φορτίου.

Για την εξαγωγή της σχέσης αυτής εξετάζεται το δίκτυο του Σχ. 1.3 το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης, μια γραμμή μεταφοράς και ένα φορτίο. Χάρην απλότητας θεωρούνται μηδενικές ωμικές απώλειες δικτύου ($R=0$).

Η εξίσωση στον ζυγό φορτίου δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{V} = \tilde{E} + jX\tilde{I} \quad (1.23)$$

ενώ η φαινόμενη ισχύς που απορροφάται από το φορτίο είναι:

$$\tilde{S} = P + jQ = \tilde{V}\tilde{I}^* = \tilde{V} \frac{\tilde{E}^* - \tilde{V}^*}{-jX} = \frac{j}{X} (EV\cos\theta + jEV\sin\theta - V^2) \quad (1.24)$$

Συνεπώς, η ενεργός και άεργος ισχύεις δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P = -\frac{EV}{X}\sin\theta \quad (1.25)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X}\cos\theta \quad (1.26)$$

Για δεδομένο φορτίο (P, Q), οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται ως προς V και θ , με χρήση των οποίων είναι δυνατό στη συνέχεια να προσδιοριστούν και τα υπόλοιπα μεγέθη. Απαλείφοντας την γωνία θ , προκύπτει η διτετράγωνη εξίσωση:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.27)$$

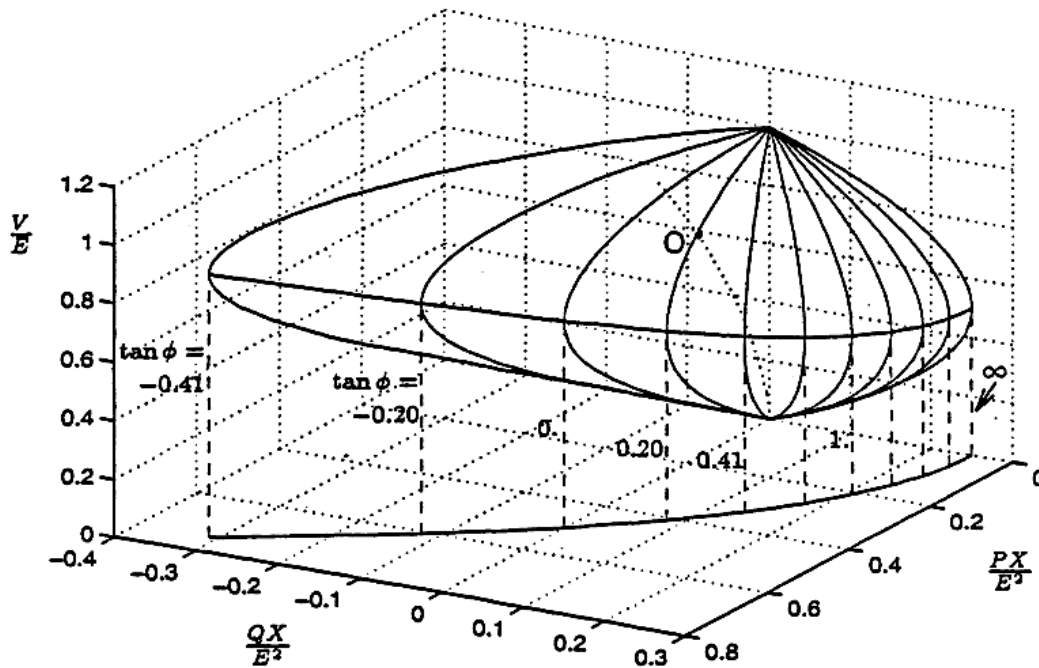
Η απαραίτητη συνθήκη ύπαρξης πραγματικών ριζών αντιστοιχεί σε μη αρνητική διακρίνουσα του τριωνύμου ως προς V^2 και είναι:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.28)$$

Υποθέτοντας ότι η ανίσωση ικανοποιείται, οι δυο πραγματικές λύσεις της διτετράγωνης εξίσωσης (1.27) είναι:

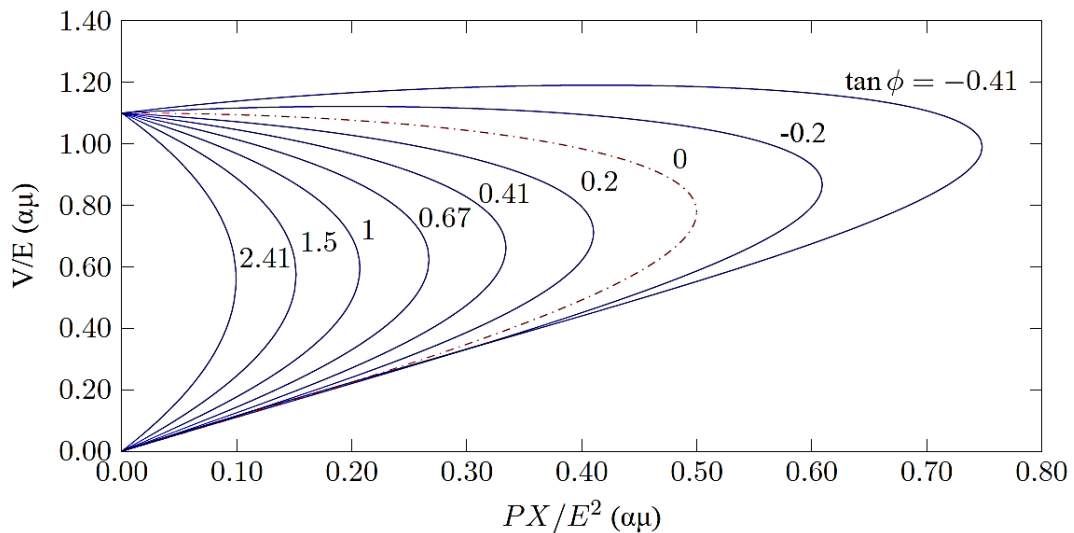
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^2}{4} - X^2P^2 - XE^2Q} \quad (1.29)$$

Στον τρισδιάστατο χώρο (P, Q, V) η εξίσωση (1.29) ορίζει μια δισδιάστατη επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.5. Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη θετική λύση της εξίσωσης (1.29) ή λύση υψηλής τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στην αρνητική λύση ή λύση χαμηλής τάσης. Ο Ισημερινός της επιφάνειας κατά μήκος του οποίου οι δύο λύσεις είναι ίσες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.



Σχ. 1.5: Τάση συναρτήσει ενεργού και άεργου ισχύων φορτίου.

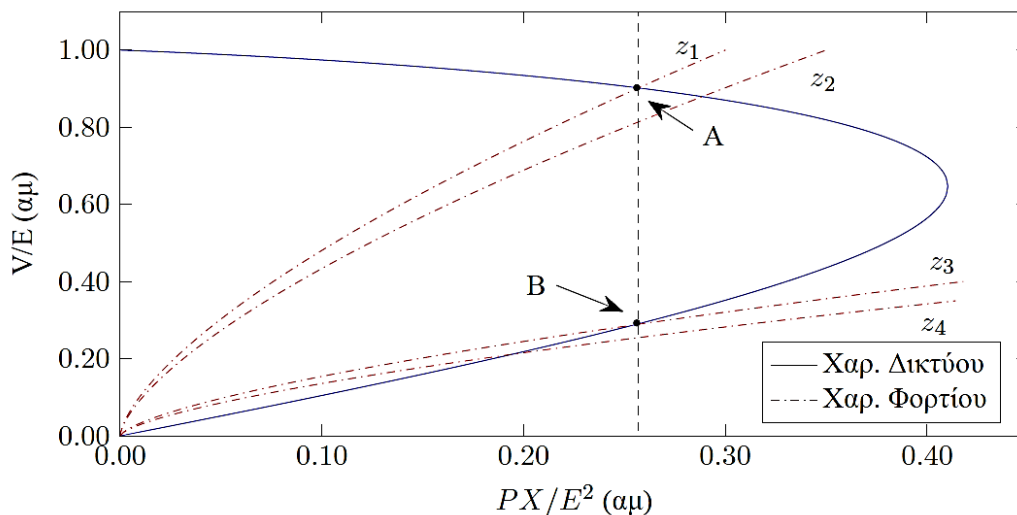
Οι μεσημβρινοί αντιστοιχούν σε τομές της επιφάνειας με το κατακόρυφο επίπεδο $Q = P \tan \phi$, όπου το ϕ μεταβάλλεται από $-\pi/8$ έως $\pi/2$ με βήμα $\pi/16$. Η προβολή των μεσημβρινών στο επίπεδο (P, V) δίνει τις καμπύλες τάσης φορτίου V συναρτήσει της ενεργού ισχύος P. Οι καμπύλες αυτές καλούνται καμπύλες PV και φαίνονται στο Σχ. 1.6.



Σχ. 1.6: Καμπύλες PV.

Από το Σχ. 1.6 εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα [VV08], [Λαμ17]:

- ❖ Το φορτίο μπορεί να αυξηθεί μέχρι να φτάσει τη μέγιστη τιμή, που αντιστοιχεί στη μύτη των καμπυλών PV.
- ❖ Για δεδομένη ενεργό ισχύ φορτίου, μικρότερη από τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλότερη τιμή τάσης και χαμηλότερο ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλότερο ρεύμα. Η πρώτη αντιστοιχεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με τις τάσεις πιο κοντά στις ονομαστικές τιμές. Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, μιας και αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται κατανοητό παρατηρώντας το Σχ. 1.7.



Σχ. 1.7: Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου.

Στο Σχ. 1.7, η διακεκομμένη ευθεία είναι η καμπύλη ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου συναρτήσει της τάσης θεωρούμενης σταθερής. Τα σημεία A και B αποτελούν δύο σημεία λειτουργίας τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ P_0 , αλλά με διαφορετική αγωγιμότητα (εστιγμένες καμπύλες). Θεωρείται μια μικρή

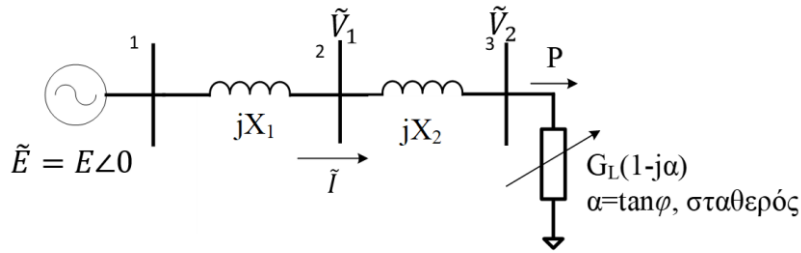
αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου. Στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται στο σημείο A, η αυξημένη αγωγιμότητα, μετακίνηση από την καμπύλη z_1 προς την καμπύλη z_2 , προκαλεί μια πτώση τάσης και οδηγεί σε υψηλότερη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Δηλαδή το σύστημα ανταποκρίνεται στην αύξηση της ζήτησης. Συνεπώς το σημείο A είναι ευσταθές. Στο σημείο B, αντίθετα, η μεγαλύτερη αγωγιμότητα, μετακίνηση από την καμπύλη z_3 προς την καμπύλη z_4 , συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου. Εάν το φορτίο είναι στατικό το σημείο B θα μπορούσε να είναι σημείο λειτουργίας αλλά πιθανόν μη βιώσιμο λόγω του υψηλού ρεύματος και της χαμηλής τάσης. Αν θεωρηθεί ότι υπάρχει δυναμικός μηχανισμός που αυξάνει τη ζήτηση με στόχο την αποκατάσταση της καταναλισκόμενης ισχύος, τότε το σημείο B είναι ασταθές.

- ❖ Καθώς αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρές τιμές $\tan\phi$), αυξάνεται και η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Επίσης, αυξάνει και η τάση στην οποία εμφανίζεται αυτή η μέγιστη ισχύς. Αυτή η κατάσταση είναι επικίνδυνη καθώς η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς επιτυγχάνεται σε υψηλές τιμές τάσης και μάλιστα κοντά στην ονομαστική. Η εγγύτητα των τιμών των τάσεων δυσχεραίνει την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.
- ❖ Για υπερ-αντισταθμισμένα φορτία ($\tan\phi < 0$), σε ένα τμήμα του πάνω μέρους της καμπύλης PV η τάση αυξάνεται με την ισχύ του φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι υπό αρνητικό $\tan\phi$, όσο αυξάνεται η κατανάλωση ενεργού ισχύος, τόσο αυξάνεται η παραγωγή άεργου ισχύος από το φορτίο. Άρα, σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, η πτώση τάσης που οφείλεται στην κατανάλωση ενεργού ισχύος, αντισταθμίζεται από την παραγωγή άεργου ισχύος. Όσο πιο αρνητικό είναι το $\tan\phi$ του φορτίου τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της καμπύλης PV που λαμβάνει χώρα αυτό το φαινόμενο.

1.3.4 Εκτίμηση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος με Προσαρμογή Αντιστάσεων

Η συνθήκη (1.16) προσαρμογής των αντιστάσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί από μετρήσεις η συνθήκη Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Θεωρείται δηλαδή ότι η αντίσταση φορτίου μπορεί να προσδιοριστεί απευθείας από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος και να εκτιμηθεί το ισοδύναμο Thévenin με κάποια μεθοδολογία π.χ. ελάχιστα τετράγωνα. Για να ισχύει βέβαια η σχέση (1.22) απαιτούνται δύο προϋποθέσεις, οι παράμετροι του ισοδυνάμου Thévenin να είναι σταθερές και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου να είναι επίσης σταθερός [VLM17], [Λαμ17].

Η δεύτερη προϋπόθεση όμως δεν ισχύει όταν οι μετρήσεις λαμβάνονται σε έναν ενδιάμεσο ζυγό του ακτινικού δικτύου και όχι στον ζυγό του φορτίου, όπως στο Σχ. 1.8.



Σχ. 1.8: Ακτινικό δίκτυο με μετρήσεις σε ενδιάμεσο ζυγό, χωρίς ωμικές απώλειες και μεταβλητό φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.

Στην προκειμένη περίπτωση η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση από τον ζυγό είναι:

$$\mathbf{Z}_{app} = jX_2 + \frac{1}{G_L(1 - j\alpha)} \quad (1.30)$$

και τότε θα πρέπει η σύνθετη αντίσταση Thévenin να είναι ίση με X_1 , συνεπώς η συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων είναι:

$$|\mathbf{Z}_{app}| = X_1 \quad (1.31)$$

και η συνθήκη ευστάθειας είναι:

$$|\mathbf{Z}_{app}| > X_1 \quad (1.32)$$

Η σχέση (1.32) οδηγεί σε εσφαλμένη ένδειξη ευστάθειας καθώς το πραγματικό κριτήριο ευστάθειας δίνεται από την σχέση (1.22), όπου βέβαια το X είναι πλέον:

$$X = X_1 + X_2 \quad (1.33)$$

Από τις σχέσεις (1.30) και (1.33) προκύπτει ότι:

$$|\mathbf{Z}_{app}| > \frac{1}{G_L \sqrt{1 + \alpha^2}} \quad (1.34)$$

και
$$X > X_1 \quad (1.35)$$

και αν ληφθεί υπόψη το πραγματικό κριτήριο ευστάθειας σύμφωνα με την σχέση (1.22) τότε μπορεί να γραφεί η ακόλουθη ανισότητα:

$$|\mathbf{Z}_{app}| > \frac{1}{G_L \sqrt{1 + \alpha^2}} \geq X_1 + X_2 > X_1 \quad (1.36)$$

Από την τελευταία σχέση εξάγεται το συμπέρασμα πως όταν το πραγματικό όριο ευστάθειας τάσης παραβιαστεί, η σχέση (1.36) θα ισχύει ακόμα γεγονός που δίνει λάθος προσδιορισμό για την αστάθεια τάσης. Με την σχέση (1.36) το όριο ευστάθειας αλλοιώνεται καθώς από την μία πλευρά το φαινόμενο φορτίο φαίνεται μεγαλύτερο από το πραγματικό, ενώ από την άλλη πλευρά η αντίσταση Thévenin είναι πιο μικρή από την πραγματική και συνεπώς η αναγνώριση της ευστάθειας τάσης καθυστερεί και γίνεται μάλιστα όταν το σύστημα έχει περιέλθει σε κατάσταση αστάθειας.

1.4 Εκτίμηση Παραμέτρων

Η συμπεριφορά των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, όπως βέβαια και κάθε άλλο πραγματικού συστήματος, είναι δύσκολο να περιγραφεί επακριβώς μέσω κάποιου μοντέλου. Τα μοντέλα συχνά χρειάζεται να απλοποιούνται και οι παράμετροί τους πρέπει να εκτιμώνται. Γενικά οι παράμετροι δεν μπορούν να καθοριστούν με ακρίβεια καθώς μπορεί να μεταβάλλονται απρόβλεπτα με το χρόνο. Ωστόσο τα μοντέλα είναι αναγκαία για την μελέτη της συμπεριφοράς, τον έλεγχο και την ευστάθεια του συστήματος. Η δυσκολία στην εκτίμηση των παραμέτρων του ΣΗΕ οφείλεται κυρίως στη μη γραμμική φύση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος. Η εκτίμηση παραμέτρων ανήκει στην κατηγορία των αντίστροφων προβλημάτων, καθώς η γνώση του μοντέλου προκύπτει μέσω της σχέσης εισόδου – εξόδου του πραγματικού συστήματος. Σκοπός της εκτίμησης παραμέτρων είναι η εύρεση του συνόλου εκείνου των παραμέτρων οι οποίες δίνουν την καλύτερη δυνατή προσαρμογή μεταξύ μετρήσεων και μοντέλου [HK98]. Η διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων βασίζεται σε ένα κριτήριο ελαχιστοποίησης, ωστόσο μια καλή προσαρμογή των αποκρίσεων αποτελεί αναγκαία, αλλά όχι και ικανή συνθήκη για μια επιτυχημένη εκτίμηση [RGS04], [Αρτ13].

Επειδή η εργασία αυτή αναφέρεται στην εκτίμηση δικτύου από μετρήσεις, στην παρούσα ενότητα παρατίθενται διάφορες μέθοδοι εκτίμησης παραμέτρων.

1.4.1 Μέθοδος Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για την εκτίμηση άγνωστων παραμέτρων μέσω μετρήσεων και εξισώσεων. Όπως δηλώνει και το όνομά της, η εκτίμηση προκύπτει μέσω της ελαχιστοποίησης ενός τετραγωνικού σφάλματος.

Η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων βρίσκει εφαρμογή σε διάφορες εφαρμογές στις οποίες τίθεται το εξής ζήτημα: Δίνονται m σημεία $t_i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, m$ και m πραγματικοί αριθμοί $f_i, i = 1, \dots, m$, που αντιστοιχούν σε μετρήσεις ή δεδομένα στα σημεία t_i . Θεωρούνται n πραγματικές συναρτήσεις $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, οι οποίες ορίζονται τουλάχιστον στα σημεία t_1, \dots, t_m . Συνήθως το m είναι μεγαλύτερο του n , δηλαδή το πλήθος των μετρήσεων είναι μεγαλύτερο από το πλήθος των πραγματικών συναρτήσεων. Στόχος της μεθόδου είναι να προσδιοριστούν οι πραγματικές σταθερές c_1, \dots, c_n , ώστε τα υπόλοιπα ή σφάλματα [ΑΔ13]:

$$\rho_i = f_i - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(t_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (1.37)$$

να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα. Με άλλα λόγια πρέπει να ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων:

$$\sum_{i=1}^m \rho_i^2 \quad (1.38)$$

όπου το άθροισμα αυτό είναι η Ευκλείδεια νόρμα $\|\rho\|_2^2$ του διανύσματος:

$$\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T \in \mathbb{R}^m \quad (1.39)$$

Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\min_{c \in \mathbb{R}^n} \sum_{i=1}^m \left[f_i - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(t_i) \right]^2 \quad (1.40)$$

Προϋπόθεση βέβαια της διαδικασίας εύρεσης των συντελεστών c , αποτελεί η προσμονή ότι η συνάρτηση $\sum_{j=1}^n c_j \varphi_j$ προσεγγίζει καλά την f σε σημεία $t \neq t_i$.

Αν οριστεί η συνάρτηση $E : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$ για το πρόβλημα (1.40) ως:

$$E(c) = \sum_{i=1}^m \left[f_i - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(t_i) \right]^2 \quad (1.41)$$

λαμβάνονται ως αναγκαίες συνθήκες για ελαχιστοποίηση οι σχέσεις:

$$0 = \frac{\partial E}{\partial c_k} = 2 \sum_{i=1}^m \left[f_i - \sum_{j=1}^n c_j \varphi_j(t_i) \right] \varphi_k(t_i), \quad 1 \leq k \leq n \quad (1.42)$$

οι οποίες οδηγούν στο γραμμικό σύστημα:

$$\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \varphi_k(t_i) \varphi_j(t_i) \right) c_j = \sum_{i=1}^m f_i \varphi_k(t_i), \quad 1 \leq k \leq n \quad (1.43)$$

Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης (1.40) αποτελεί παράδειγμα ενός σημαντικού προβλήματος της Γραμμικής Άλγεβρας, του Γραμμικού Προβλήματος Ελαχίστων Τετραγώνων. Η γενική διατύπωση του προβλήματος έχει ως εξής: Έστω m και n φυσικοί αριθμοί, A ένας $m \times n$ πίνακας πραγματικών αριθμών και b ένα διάνυσμα

στον \mathbb{R}^m . Αναζητούνται τα διανύσματα $y \in \mathbb{R}^n$, τα οποία ελαχιστοποιούν στον \mathbb{R}^n τη συνάρτηση $e : \mathbb{R}^n \rightarrow [0, \infty)$,

$$e(y) := \|b - Ay\| \quad (1.44)$$

Το πρόβλημα (1.44) αποτελεί πράγματι πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων αφού τα y πρέπει να ελαχιστοποιούν την σχέση:

$$(e(y))^2 = \sum_{i=1}^m [b_i - (Ay)_i]^2 \quad (1.45)$$

που είναι ισοδύναμη της (1.44).

Άρα το πρόβλημα (1.40) είναι Γραμμικό Πρόβλημα Ελαχίστων Τετραγώνων με $A = (a_{ij}) \in \mathbb{R}^{m,n}$, $a_{ij} = \varphi_j(t_i)$, $b \in \mathbb{R}^m$, $b_i = f_i$ και $y \in \mathbb{R}^n$, $y_i = c_i$. Μπορεί να θεωρηθεί εν γένει ό,τι το Πρόβλημα Γραμμικών ελαχίστων Τετραγώνων διατυπώνει επίσης και το πρόβλημα προσεγγιστικής “επίλυσης” του γραμμικού συστήματος:

$$Ay = b \quad (1.46)$$

m εξισώσεων και n αγνώστων.

Σε μορφή πινάκων το πρόβλημα περιγράφεται με την συνάρτηση:

$$S(y) = \sum_{i=1}^m e_i^2 = e^T e = (b - Ay)^T (b - Ay) \quad (1.47)$$

Επειδή η $S(y)$ είναι διαφορίσιμη και κυρτή συνάρτηση και με πεδίο τιμών που είναι υποσύνολο του \mathbb{R} , θα έχει ένα μοναδικό ελάχιστο. Κάνοντας τις πράξεις καταλήγουμε στη σχέση:

$$\begin{aligned} S(y) &= (b - Ay)^T (b - Ay) \\ &= b^T b - y^T A^T b + y^T A^T Ay - b^T Ay \end{aligned} \quad (1.48)$$

Επειδή οι πίνακες $y^T A^T b$ και $b^T Ay$ είναι βαθμωτά μεγέθη και ο ένας είναι ανάστροφος του άλλου, προκύπτει ότι είναι ίσοι. Επομένως, από τη σχέση (1.48) προκύπτει:

$$S(y) = b^T b + y^T A^T Ay - 2y^T A^T b \quad (1.49)$$

Η κλίση της συνάρτησης $S(y)$ είναι:

$$\begin{aligned} \nabla S(y) &= \nabla(y^T A^T Ay) - \nabla(2y^T A^T b) \\ &= 2A^T Ay - 2A^T b \end{aligned} \quad (1.50)$$

Παραγωγίζοντας την (1.50) προκύπτει:

$$\nabla^2 S(y) = 2A^T A \quad (1.51)$$

Από τη σχέση (1.51) η μήτρα δευτέρων παραγώγων της συνάρτησης $S(y)$ είναι ένας πίνακας μη αρνητικά ορισμένος, επομένως τα σημεία για τα οποία μηδενίζεται η κλίση της $S(y)$ είναι ελάχιστα της συνάρτησης (1.47). Από τη σχέση (1.50) εξισώνοντας με το μηδέν, προκύπτει:

$$A^T A y = A^T b \quad (1.52)$$

Η σχέση (1.52) καλείται σύστημα κανονικών εξισώσεων [ΑΔ13], [Φελ10]. Εάν ο πίνακας A είναι πλήρους τάξης, τότε η ορίζουσα του $A^T A$ είναι μη μηδενική και η μοναδική λύση της εξίσωσης (1.52) είναι:

$$y = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (1.53)$$

Η εξίσωση (1.53) δίνει το ολικό ελάχιστο της συνάρτησης $S(y)$ [Αρτ13], [RT99].

1.4.2 Μέθοδος Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων

Τα Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα στηρίζονται όπως και τα Γραμμικά στον προσδιορισμό των τιμών των παραμέτρων οι οποίες ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων. Σε αντίθεση όμως με τη γραμμική περίπτωση, στα μη γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα η εύρεση των τιμών προκύπτει από επαναληπτικές μεθόδους.

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων για την εκτίμηση μη γραμμικών παραμέτρων έχουν επικεντρωθεί σε δύο προσεγγίσεις. Σύμφωνα με την πρώτη, το μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί σαν σειρά Taylor και οι διορθώσεις σε μερικές παραμέτρους υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη με την προϋπόθεση της τοπικής γραμμικότητας. Η δεύτερη προσέγγιση στηρίζεται στη χρησιμοποίηση διαφόρων μεθόδων που αποτελούν τροποποιήσεις της Μεθόδου της Απότομης Καθόδου (Steepest Descent Method). Οι δύο προσεγγίσεις συχνά αποτυγχάνουν γιατί από τη μία μεριά η μέθοδος που βασίζεται στο ανάπτυγμα Taylor αποκλίνει ύστερα από διαδοχικές επαναλήψεις, ενώ η μέθοδος της απότομης μείωσης παρουσιάζει αργή σύγκλιση ύστερα από τις πρώτες επαναλήψεις [Mar63].

Ένας αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολοίπων μεταξύ δεδομένων και μη γραμμικών εξισώσεων είναι η μέθοδος Gauss-Newton. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην πρώτη από τις δύο προαναφερθείσες προσεγγίσεις και συγκεκριμένα στην τεχνική του ανάπτυγματος Taylor. Σε αυτή την περίπτωση η αρχική μη γραμμική εξίσωση εκφράζεται μέσω του ανάπτυγματος Taylor σε γραμμική μορφή. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να εφαρμοστεί η θεωρία των ελαχίστων τετραγώνων της παραπάνω ενότητας ώστε να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων οι οποίες ελαχιστοποιούν τα υπόλοιπα.

Το πρόβλημα μπορεί να καταστρωθεί ως [CC14]:

$$y_i = f(a_o, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (1.54)$$

όπου y_i η μετρούμενη τιμή, $f(a_o, a_1, \dots, a_m)$ η εξίσωση που είναι μη γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων a_o, a_1, \dots, a_m και e_i τυχαίο σφάλμα. Συνοπτικά το μοντέλο μπορεί να εκφραστεί και ως:

$$y_i = f(\mathbf{a}) + e_i \quad (1.55)$$

Το μη γραμμικό μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί κατά Taylor γύρω από τις τιμές των παραμέτρων και στη συνέχεια να αποκοπούν οι όροι δευτέρας τάξεως και άνω. Για το μοντέλο m παραμέτρων τότε το ανάπτυγμα Taylor είναι της μορφής:

$$f(\mathbf{a})_{j+1} = f(\mathbf{a})_j + \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_o} \Delta a_o + \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_m} \Delta a_m \quad (1.56)$$

όπου j η αρχική εκτίμηση, $j + 1$ η πρόβλεψη, $\Delta a_o = a_{o,j+1} - a_{o,j}$ και $\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$. Το αρχικό μοντέλο έχει γραμμικοποιηθεί ως προς τις παραμέτρους.

Αντικαθιστώντας την (1.56) στην (1.55) τότε προκύπτει:

$$y_i - f(\mathbf{a})_j = \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_o} \Delta a_o + \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + \dots + \frac{\partial f(\mathbf{a})_j}{\partial a_m} \Delta a_m + e_i \quad (1.57)$$

ή σε μορφή πινάκων:

$$d = Z_j \Delta \alpha + e \quad (1.58)$$

όπου Z_j είναι ο πίνακας των τιμών των μερικών παραγώγων της f στις αρχικές εκτιμήσεις j

$$Z_j = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_o} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial a_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_o} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial a_m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_o} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial a_m} \end{bmatrix}, \quad (1.59)$$

n το πλήθος των δεδομένων και $\partial f_i / \partial a_k$ η μερική παράγωγος της συνάρτησης ως προς την k -οστή παράμετρο υπολογισμένη στο i -οστό δεδομένο.

Το διάνυσμα d περιέχει τις διαφορές μεταξύ των μετρήσεων και των τιμών της συνάρτησης:

$$d = \begin{bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

ενώ το διάνυσμα $\Delta\alpha$ περιέχει τις μεταβολές των παραμέτρων:

$$\Delta\alpha = \begin{bmatrix} \Delta a_o \\ \Delta a_1 \\ \vdots \\ \Delta a_m \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

Από τη θεωρία Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων της προηγούμενης ενότητας (1.4.1) προκύπτουν οι παρακάτω κανονικές εξισώσεις:

$$z_j^T z_j \Delta\alpha = z_j^T d \quad (1.62)$$

Αρκεί να λυθεί η εξίσωση (1.62) ως προς $\Delta\alpha$ ώστε να υπολογιστούν οι βελτιωμένες τιμές των παραμέτρων ως εξής:

$$a_{o,j+1} = a_{o,j} + \Delta a_o \quad (1.63)$$

$$a_{1,j+1} = a_{1o,j} + \Delta a_1$$

$$\vdots$$

$$a_{m,j+1} = a_{mo,j} + \Delta a_m \quad (1.64)$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η λύση να συγκλίνει, δηλαδή έως ότου η ποσότητα:

$$|\varepsilon_a|_k = 100\% \cdot \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| \quad (1.65)$$

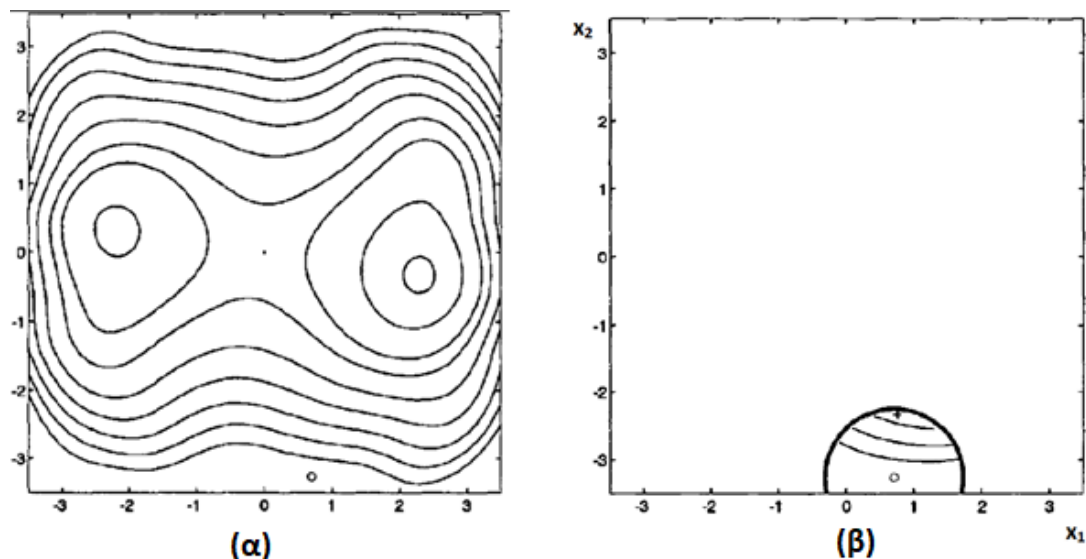
γίνει μικρότερη από ένα αποδεκτό όριο τερματισμού [CC14].

Δύο πολύ διαδεδομένοι αλγόριθμοι που υλοποιούν τη Μέθοδο Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων είναι ο Αλγόριθμος Περιοχής Εμπιστοσύνης (Trust Region Algorithm) και ο Αλγόριθμος Levenberg-Marquardt. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η συνοπτική περιγραφή των δύο αλγορίθμων.

1.4.3 Trust-Region Algorithm - Αλγόριθμος Περιοχής Εμπιστοσύνης

Έστω ότι θέλουμε να βρούμε ένα διάνυσμα \mathbf{x} , το οποίο ελαχιστοποιεί κάποια αντικειμενική συνάρτηση $f(\mathbf{x})$. Ας δούμε λοιπόν το ακόλουθο παράδειγμα όπου το προς προσδιορισμό διάνυσμα είναι $\mathbf{x} = [x_1, x_2]$ και η συνάρτηση είναι:

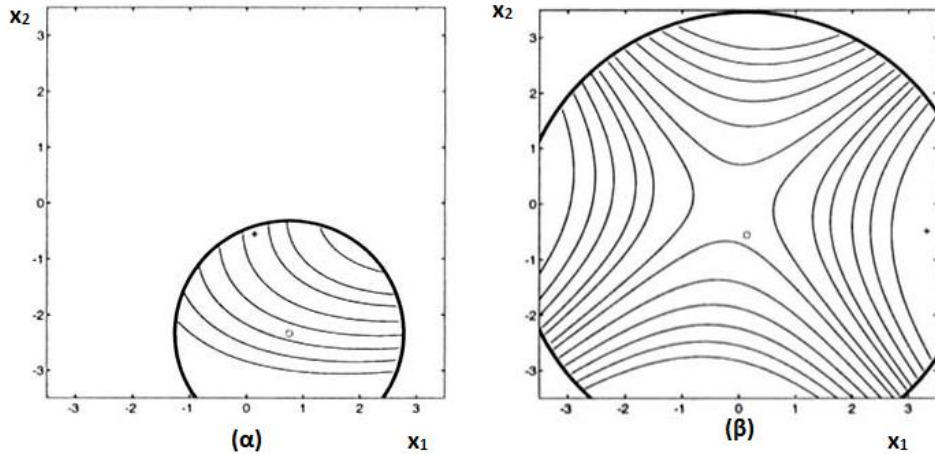
$$f(\mathbf{x}) = f(x_1, x_2) = -10x_1^2 + 10x_2^2 + 4\sin(x_1 \cdot x_2) - 2x_1 + 10x_1^4.$$



Σχ. 1.9: (α) Οι ισοϋψείς καμπύλες της αντικειμενικής συνάρτησης. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν δυο τοπικά ελάχιστα. (β) Η περιοχή εμπιστοσύνης γύρω από το \mathbf{x}_0 .

Επειδή οι τιμές της συνάρτησης δεν είναι γνωστές παντού, όπως στο Σχ. 1.9 (α), εκείνο που έχει ενδιαφέρον είναι πως είναι δυνατόν από μια αρχική εκτίμηση (αρχικό σημείο) \mathbf{x}_0 να προσδιοριστεί το \mathbf{x}_* που ελαχιστοποιεί την αντικειμενική συνάρτηση. Σε πρώτη φάση πρέπει να υποτεθεί το σχήμα της αντικειμενικής συνάρτησης σε μια γειτονιά-περιοχή του \mathbf{x}_0 , πρέπει δηλαδή να αναπτυχθεί ένα μοντέλο γύρω από το \mathbf{x}_0 τέτοιο ώστε να αναπαριστά την αντικειμενική συνάρτηση. Η περιοχή αυτή ονομάζεται Περιοχή Εμπιστοσύνης (Trust Region), καθώς μέσα σε αυτήν θεωρείται πως το μοντέλο αντιπροσωπεύει πιστά την αντικειμενική συνάρτηση.

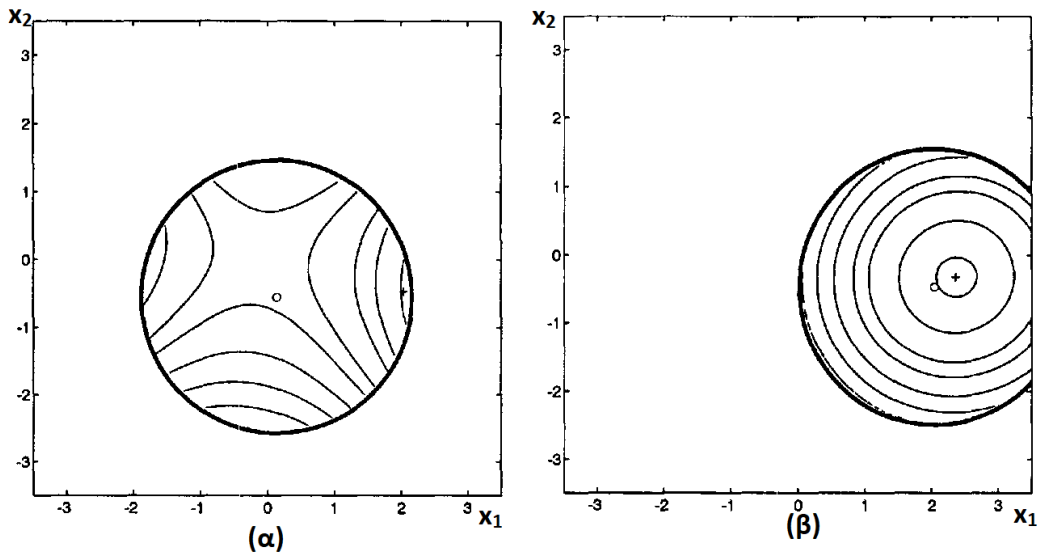
Εξετάζοντας το μοντέλο στην περιοχή εμπιστοσύνης, παρατηρείται πως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης μειώνεται αν αυξηθεί το x_2 . Έστω λοιπόν ότι με την αύξηση του x_2 βρισκόμαστε στο δοκιμαστικό σημείο $+$. Επειδή πράγματι η τιμή της $f(x_1, x_2)$ στο σημείο $+$ είναι μικρότερη από την τιμή της στο \mathbf{x}_0 , ονομάζουμε αυτό το σημείο \mathbf{x}_{01} και η νέα προσέγγιση θα γίνει από την περιοχή εμπιστοσύνης του \mathbf{x}_{01} . Επίσης αφού υπήρξε επιτυχία με την επιλογή του δοκιμαστικού σημείου, δηλαδή μειώθηκε η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η ακτίνα της περιοχής θα αυξηθεί.



Σχ. 1.10: Αύξηση της περιοχής εμπιστοσύνης μετά από επιτυχημένη επιλογή δοκιμαστικών σημείων.

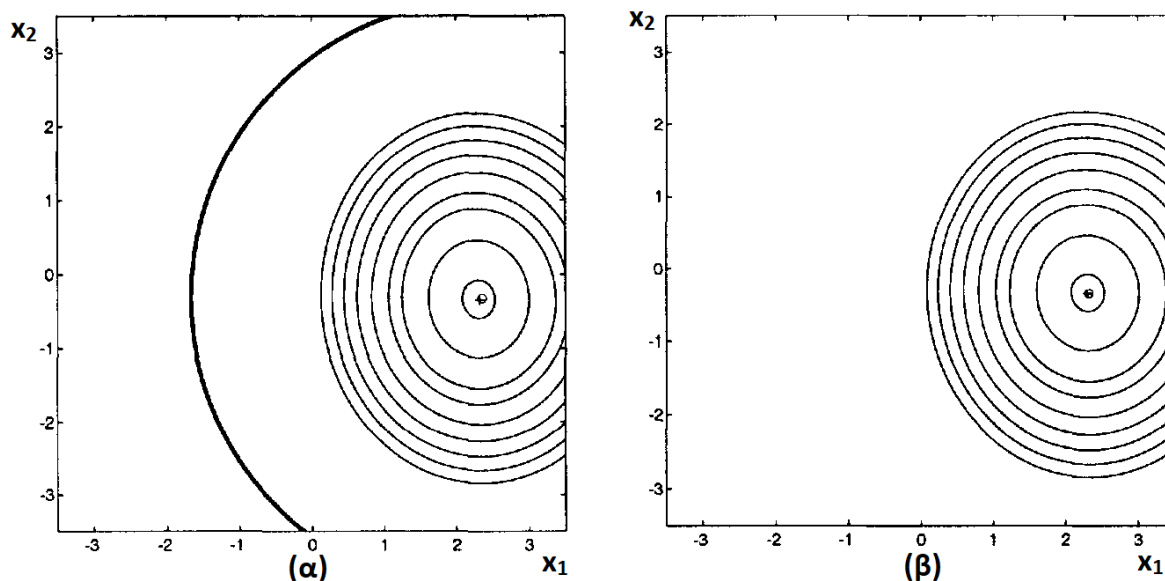
Κάθε φορά δηλαδή που εντοπίζεται ένα σημείο με μικρότερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η νέα εκτίμηση ξεκινά από αυτό, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει η ακτίνα της περιοχής εμπιστοσύνης.

Αν η επιλογή του δοκιμαστικού σημείου δεν είναι επιτυχημένη, π.χ. το δοκιμαστικό σημείο είναι πολύ μακριά από το σημείο εκκίνησης, τότε σημείο εκκίνησης παραμένει το ίδιο και επιπλέον γίνεται ο συμβιβασμός για ένα μικρότερο βήμα. Αυτό συνεπάγεται μείωση της ακτίνας της περιοχής εμπιστοσύνης. Στη συνέχεια γίνεται νέα προσπάθεια με νέο δοκιμαστικό σημείο στην ανανεωμένη πλέον περιοχή εμπιστοσύνης. Αν το νέο δοκιμαστικό σημείο είναι επιτυχημένο, τότε αυτό θα είναι η νέα αρχική τιμή για την επόμενη προσέγγιση. Κατασκευάζεται ένα νέο μοντέλο γύρω από το επιτυχημένο δοκιμαστικό σημείο (που θα είναι η εκκίνηση για την συνέχεια) ωστόσο διατηρείται η τρέχουσα τιμή της ακτίνας της περιοχής εμπιστοσύνης.



Σχ. 1.11: (α) Μετά από αποτυχία μειώνεται η ακτίνα και γίνεται δοκιμή σε νέο σημείο εντός της νέας περιοχής εμπιστοσύνης. (β) Στη συνέχεια ακόμα και να έχει υπάρξει επιτυχία η ακτίνα διατηρείται σταθερή.

Τέλος, όσο προσεγγίζεται το ελάχιστο η ακτίνα γίνεται πολύ μεγάλη και όπως φαίνεται από το Σχ. 1.12 (β), έχει αυξηθεί τόσο πολύ που εξαφανίζεται από την εικόνα.



Σχ. 1.12: Όσο πιο πολύ προσεγγίζεται το ελάχιστο, τόσο αυξάνει η ακτίνα της περιοχής εμπιστοσύνης, ώσπου τελικά δεν φαίνεται στο σχήμα.

Συνοψίζοντας, το σημείο x_* όπου η συνάρτηση παρουσιάζει ελάχιστο προκύπτει με επαναληπτικό τρόπο σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν παραπάνω. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως η λύση που προκύπτει είναι τοπική. Πράγματι, στο παράδειγμα, ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν οι μεταβάσεις στα σημεία δοκιμής έδωσε λύση μόνο για το ένα τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης. Αν είχαν επιλεγεί διαφορετικά σημεία τότε θα μπορούσε η ανωτέρω μέθοδος να δώσει το άλλο τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης [CGT00].

1.4.4 Αλγόριθμος Levenberg–Marquardt

Αυτή η μέθοδος συνδυάζει ουσιαστικά δυο άλλες μεθόδους, την Μέθοδο της Απότομης Καθόδου (Steepest Descent Method) και την Μέθοδο Newton οι οποίες στηρίζονται στον υπολογισμό της κλίσης (gradient) της συνάρτησης. Η πρώτη μειώνει γρήγορα την τιμή της συνάρτησης προς ελαχιστοποίηση ακόμα και αν υπάρχει μεγάλη απόσταση από το βέλτιστο σημείο x_* , έξω δηλαδή από την περιοχή σύγκλισης, ενώ η δεύτερη βρίσκει εφαρμογή μόνο όταν η λύση είναι κοντά στο βέλτιστο σημείο. Η μέθοδος Levenberg–Marquardt συνδυάζει ή μάλλον αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά αυτών των δύο διαφορετικών οπτικών, ώστε να προσεγγίζεται το βέλτιστο σημείο όταν η λύση είναι μακριά από την βέλτιστη χρησιμοποιώντας την Μέθοδο Απότομης Μείωσης, ενώ εντός της περιοχής σύγκλισης χρησιμοποιώντας τη Μέθοδο Newton [CC14], [Mar63].

Η λογική της Μέθοδο Απότομης Καθόδου είναι να βρεθεί η πιο απότομη κλίση που οδηγεί στην βέλτιστη λύση (ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της συνάρτησης)

και να ακολουθηθεί αυτή η κατεύθυνση. Το πρόβλημα όμως που ενυπάρχει είναι πως ενώ κινούμαστε προς το βέλτιστο σημείο, είναι πολύ πιθανό από το νέο σημείο στο οποίο βρισκόμαστε μπορεί να υπάρχει τελικά μια άλλη καλύτερη κατεύθυνση προς την βελτιστοποίηση. Οπότε, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τόσο η κατεύθυνση (κλίση), όσο και το πότε θα γίνεται επανέλεγχος για αλλαγή κατεύθυνσης. Το πότε θα γίνετε τελικά αυτός ο έλεγχος μπορεί να προκύψει από κάποια συνάρτηση που μεγιστοποιείται. Όταν βρεθεί ένα τέτοιο σημείο μεγίστου, θα πρέπει να επανυπολογιστεί και η κλίση της αρχικής συνάρτησης. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως συγκλίνει αργά κοντά στην περιοχή της βέλτιστης λύσης [CC14].

Σύμφωνα με την Μέθοδο Newton, η συνάρτηση αναπτύσσεται κατά Taylor γύρω από κάποιο σημείο \mathbf{x}_i και χάριν της τοπικής γραμμικότητας μπορούν να γίνουν διορθώσεις των παραμέτρων. Επειδή η μέθοδος απαιτεί υπολογισμούς μερικών παραγώγων δευτέρας τάξης καθώς και αντιστροφή πίνακα δεν βρίσκει πρακτικά εφαρμογή σε συναρτήσεις με μεγάλο πλήθος μεταβλητών. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πιθανή μη σύγκλιση μακριά από την γειτονιά της βέλτιστης λύσης [CC14], [Mar63].

1.4.5 Μη Γραμμικά Ελάχιστα Τετράγωνα στη MATLAB

Η συνάρτηση `lsqnonlin` της MATLAB λύνει προβλήματα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας είτε τον αλγόριθμο Trust-Region-Reflective, είτε τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt, ωστόσο πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες παρατηρήσεις για να γίνει σωστή επιλογή αλγορίθμου.

- a) Ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt δεν μπορεί να χειριστεί όρια. Τα όρια αναφέρονται στο εύρος της περιοχής στην οποία μπορεί να βρίσκεται η λύση που προκύπτει από τη συνάρτηση `lsqnonlin`. Δηλαδή, μπορούν να ορισθούν από τον χρήστη η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή μεταξύ των οποίων θα βρίσκεται η λύση της `lsqnonlin`. Οι προεπιλεγμένες τιμές είναι $-\infty$ για το κάτω όριο και $+\infty$ για το πάνω όριο και παραμένουν ως έχουν αν δεν ορισθεί κάτι διαφορετικό από τον χρήστη.
- b) Ο αλγόριθμος Trust-Region-Reflective δεν δύναται να λύσει υποκαθορισμένα (underdetermined) συστήματα εξισώσεων. Στην περίπτωση αυτή η `lsqnonlin` χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt.
- c) Η `lsqnonlin` μπορεί να λύσει προβλήματα με μιγαδικές τιμές με τον αλγόριθμο `levenberg-marquardt`. Ωστόσο, επειδή αυτός ο αλγόριθμος δεν δέχεται περιορισμούς (όρια), για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος πρέπει να γίνει διαχωρισμός σε πραγματικά και φανταστικά μέρη και να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος `trust-region-reflective`.

1.5 Δείκτες Ευστάθειας Τάσεως με βάση μετρήσεις

1.5.1 Γενικά

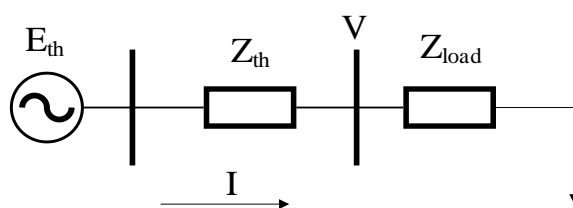
Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ισχύος από τα φορτία έχουν οδηγήσει τους διαχειριστές των δικτύων μεταφοράς να λειτουργούν τα συστήματα κοντά στα όρια φόρτισής τους. Επειδή όμως η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι στενά συνδεδεμένη με την αστάθεια τάσης, το ερευνητικό ενδιαφέρον στράφηκε προς την εξεύρεση μεθόδων ανίχνευσης της αστάθειας τάσης βασισμένων σε μετρήσεις φασιθετών σε πραγματικό χρόνο.

Οι μέθοδοι αυτές συνήθως έχουν να αντιμετωπίσουν μεταξύ άλλων:

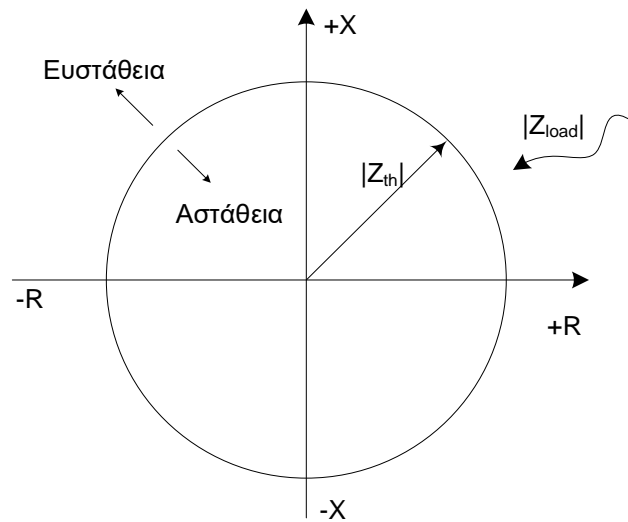
- την υπολογιστική αβεβαιότητα των παραμέτρων ενός ισοδύναμου κυκλώματος που θα αντιπροσωπεύει μέρος του δικτύου καθώς και την εξάρτησή τους από τις μικρές αλλαγές των μετρήσεων που οφείλονται στους μεγάλους ρυθμούς δειγματοληψίας
- τις διαφορές που παρουσιάζει το πραγματικό σύστημα καθώς κινείται προς την αστάθεια τάσης σε σχέση με το ισοδύναμο Thévenin

Ένας διαδεδομένος τρόπος αξιολόγησης της κατάστασης του δικτύου και αν επίκειται αστάθεια τάσης βασίζεται στην εφαρμογή του θεωρήματος μέγιστης μεταφερομένης ισχύος και συγκεκριμένα την συνθήκη προσαρμογής των αντιστάσεων που εξετάστηκε στην ενότητα 1.3.2. Στις μεθόδους αυτές επιχειρείται να παρουσιαστεί όλο το δίκτυο ανάντη από τον ζυγό φορτίου σαν ένα ισοδύναμο Thévenin, το οποίο περιγράφεται από την σταθερή τάση E_{th} και την σύνθετη αντίσταση Z_{th} . Στην προκειμένη περίπτωση, το όριο ευστάθειας τάσης και η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς προκύπτουν από την ισότητα των μέτρων των σύνθετων αντιστάσεων Thévenin και φορτίου. Στις εργασίες [VBN99], [NOS15], [SVG06] και [CT08] προτείνονται μέθοδοι προσδιορισμού του ισοδύναμου Thévenin.

Η εγγύτητα στην αστάθεια τάσης μπορεί να εκφραστεί από την απόσταση που υπάρχει μεταξύ της σύνθετης αντίστασης του φορτίου Z_{load} και της σύνθετης αντίστασης Thévenin. Η αντίσταση Thévenin μπορεί να αποτυπωθεί στο επίπεδο R-X σαν κύκλος με ακτίνα $|Z_{th}|$, ο οποίος καλείται κύκλος Thévenin. Έτσι όταν η αντίσταση φορτίου κινείται προς τον κύκλο τόσο πιο κοντά είναι η αστάθεια τάσης. Συνήθως η αστάθεια τάσης οφείλεται σε δύο γεγονότα, από την μία η ακτίνα του κύκλου αυξάνεται π.χ. επειδή το δίκτυο μεταφοράς γίνεται πιο αδύναμο και από την άλλη το φορτίο αυξάνεται, δηλαδή η σύνθετη αντίσταση του φορτίου μειώνεται και κινείται προς τον κύκλο Thévenin.

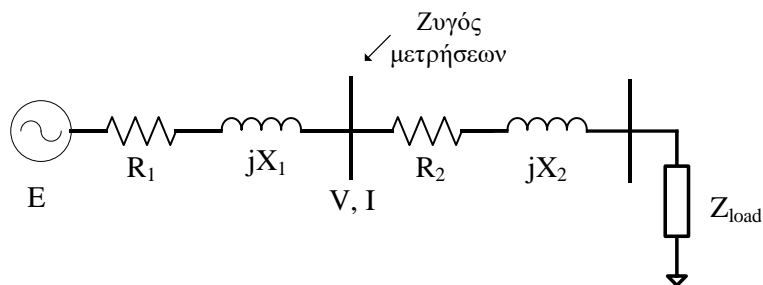


Σχ. 1.13: Ζυγός φορτίου και Ισοδύναμο Thévenin.



Σχ. 1.14: Κύκλος Thévenin και αύξηση φορτίου προς τον κύκλο.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω η γνώση της σύνθετης αντίστασης Thévenin είναι πολύ σημαντική για την αναγνώριση της αστάθειας τάσης. Το πρόβλημα όμως πολλές φορές είναι πως οι μετρήσεις δεν συνδέονται άμεσα με το φορτίο γιατί μπορεί να παρεμβάλλεται μεταξύ του σημείου μέτρησης και του φορτίου μία ή περισσότερες γραμμές μεταφοράς (Σχ. 1.15). Στην προκειμένη περίπτωση όπως είναι προφανές η ισότητα της αντίστασης Thévenin και φορτίου δεν ισχύει για την εύρεση του ορίου της ευστάθειας τάσης. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια της εργασίας θα γίνει προσπάθεια εκτίμησης του “κατάντη” ισοδύναμου δικτύου και του συντελεστή ισχύος του φορτίου.



Σχ. 1.15: Απλό ακτινικό δίκτυο όπου οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ενδιάμεσο ζυγό.

Βέβαια, το ισοδύναμο Thévenin εκτός από την αστάθεια τάσης χρησιμοποιείται και σε άλλες εφαρμογές, όπως στην ανάλυση βραχυκυκλωμάτων τόσο στο δίκτυο διανομής όσο και μεταφοράς, τον προσδιορισμό της θέσης σφαλμάτων, την αναγνώριση παραμέτρων για ανίχνευση αστάθειας, τη μελέτη ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών, την ανίχνευση αρμονικών σε δίκτυα διανομής [AM15].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό του ισοδύναμου Thévenin.

1.5.2 Μέθοδος Ελαχίστων τετραγώνων

Στην αναφορά [VBN99] εξετάζεται η σημασία των τοπικών μετρήσεων για την αναγνώριση της αστάθειας τάσης. Από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος γίνεται εκτίμηση για το πόσο ισχυρό ή αδύναμο είναι το σύστημα μεταφοράς που συνδέεται στον ζυγό από τον οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις και στη συνέχεια συγκρίνεται με το φορτίο. Όσο πιο κοντά είναι η ζήτηση φορτίου στην εκτιμώμενη ισχύ που μπορεί να μεταφέρει το δίκτυο τόσο πιο κοντά είναι η αστάθεια τάσης.

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του ισοδύναμου Thévenin, εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων. Από τον NTK στο δίκτυο του Σχ. 1.13, ισχύει η σχέση:

$$E_{th} = V + Z_{th}I \quad (1.66)$$

Εάν $E_{th} = E_r + jE_i$, $V = u + jw$ και $I = g + jh$, τότε η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -g & h \\ 0 & 1 & -h & -g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} \quad (1.67)$$

$$\text{ή } Hx = z \quad (1.68)$$

Από τις μετρήσεις είναι γνωστά τα g, h, u και w οπότε πρέπει να προσδιοριστούν οι άγνωστοι R_{th}, X_{th}, E_r και E_i . Για μετρήσεις που αφορούν μία χρονική στιγμή παράγονται δύο εξισώσεις με τέσσερις αγνώστους, συνεπώς για να επιλυθεί το σύστημα απαιτούνται δύο ή περισσότερες χρονικές στιγμές. Επειδή οι μετρήσεις εμπεριέχουν σφάλματα και οι παράμετροι του δικτύου μπορεί να μεταβάλλονται χρησιμοποιούνται δεδομένα που αντιστοιχούν σε πολλές χρονικές στιγμές και η εκτίμηση πραγματοποιείται ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

Όπως αποδεικνύεται από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία [VBN99], το μέτρο της αντίστασης Thévenin πλησιάζει την αντίσταση φορτίου όταν το σύστημα τείνει προς την αστάθεια τάσης.

1.5.3 Φίλτρο Kalman και Υβριδική μέθοδος

Στην εργασία [NOS15] εκτός από τα ελάχιστα τετράγωνα που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη μέθοδο, χρησιμοποιείται για την εύρεση του ισοδυνάμου Thévenin και το φίλτρο Kalman, ενώ αναπτύσσεται και μια υβριδική μέθοδος.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση για την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται η εξίσωση (1.66). Ο αριθμός των μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν καθορίζεται από τη δημιουργία ενός κυλιόμενου παραθύρου, δηλαδή ενός αριθμού προηγούμενων μετρήσεων οι οποίες θα αποθηκευτούν για να χρησιμοποιηθούν καθώς το παράθυρο προχωρά στο χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο νέες μετρήσεις λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς

Η λύση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην ενότητα 1.4.1 προκύπτει από την εξίσωση:

$$x = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (1.69)$$

Χρησιμοποιώντας το φίλτρο Kalman λαμβάνονται υπόψη οι προηγούμενες μετρήσεις και η εκτίμηση πραγματοποιείται σε δύο στάδια με την ενημέρωση του χρόνου και την ενημέρωση της μέτρησης.

Το στάδιο της ενημέρωσης χρόνου περιγράφεται με την εξίσωση:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bv_k \quad (1.70)$$

όπου ο A είναι ο πίνακας κατάστασης και είναι μοναδιαίος όταν δεν υπάρχει αλλαγή του ισοδυνάμου Thévenin μεταξύ διαφορετικών χρονικών στιγμών και B είναι ο πίνακας εισόδου ο οποίος τίθεται μηδέν. Σε αυτό το στάδιο ενημερώνεται ο πίνακας σφάλματος συνδιακύμανσης εκτίμησης κατάστασης:

$$P_k = AP_{k-1}A^T + Q \quad (1.71)$$

όπου Q είναι ο πίνακας της συνδιακύμανσης του θορύβου της διαδικασίας.

Στο στάδιο της ενημέρωσης των μετρήσεων, λαμβάνονται υπόψη οι μετρήσεις του πίνακα H και υπολογίζεται ένα κέρδος του φίλτρου Kalman, ώστε να καθοριστεί η διόρθωση που πρέπει να εφαρμοστεί.

$$K_k = P_k H^T (H P_k H^T + R)^{-1} \quad (1.72)$$

όπου R είναι ο πίνακας της συνδιακύμανσης του θορύβου της μέτρησης.

Το υπόλοιπο των μετρήσεων (measurement residual) πολλαπλασιάζεται με το κέρδος του φίλτρου Kalman ώστε να υπολογιστεί η ενημέρωση των παραμέτρων:

$$x_{k+1} = x_k + K_k (z_k - Hx_k) \quad (1.73)$$

Τέλος, ενημερώνεται και ο πίνακας σφάλματος συνδιακύμανσης εκτίμησης κατάστασης:

$$P_{k+1} = (1 - K_k H) P_k \quad (1.74)$$

Η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος περιλαμβάνει στοιχεία από τις δύο άλλες μεθόδους καθώς χρησιμοποιεί το κυλιόμενο παράθυρο των ελαχίστων τετραγώνων για τον προσδιορισμό του P_k και του K_k ώστε να δημιουργηθεί κυλιόμενο παράθυρο για τις εξισώσεις ενημέρωσης των μετρήσεων.

Σε προσομοίωση όπου μεταβάλλονται βηματικά οι παράμετροι του ισοδυνάμου Thévenin, η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά λόγω της απουσίας θορύβου, η μέθοδος με το φίλτρο Kalman δεν μπορεί να προσδιορίσει σωστά την απότομη μεταβολή, ενώ η υβριδική μέθοδος παρόλο που είναι πιο αργή από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τελικά συγκλίνει στη σωστή τιμή.

Για βαθμιαία μεταβαλλόμενο φορτίο η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων σημαίνει άμεσα συναγερμό αστάθειας. Αντίθετα, η μέθοδος στηριζόμενη στο φίλτρο Kalman καθυστερεί αρκετά και μάλιστα δίνει σήμα συναγερμού όταν το σύστημα βρίσκεται πολύ κοντά στην αστάθεια. Η υβριδική μέθοδος να μεν σημαίνει συναγερμό πιο αργά από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, προειδοποιεί όμως αρκετά νωρίτερα από ότι η μέθοδος που χρησιμοποιεί το φίλτρο Kalman.

Για βηματική αλλαγή φορτίου η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων έχει μία σποραδική συμπεριφορά που δύναται να οδηγήσει σε εσφαλμένους συναγερμούς, ενώ το φίλτρο Kalman καθυστερεί υπερβολικά να σημάνει συναγερμό. Η προτεινόμενη υβριδική μέθοδος σημαίνει σωστό συναγερμό και ο χρόνος για περαιτέρω ενέργειες είναι πολύ περισσότερος από ότι στην περίπτωση του φίλτρου Kalman. Συμπεραίνεται λοιπόν πως η υβριδική μέθοδος είναι μία μέση λύση όπου παρέχει χρόνο για διορθωτικές δράσεις, ενώ επιπλέον δεν επηρεάζεται από την βηματικές αλλαγές φορτίου.

1.5.4 Αλγόριθμος βασισμένος σε τοπικά μεγέθη

Η μέθοδος που προτείνεται στο [CT08] παρουσιάζει έναν αλγόριθμο γρήγορου προσδιορισμού του ισοδυνάμου Thévenin βασισμένο σε τοπικές μετρήσεις τάσεως και ρεύματος από PMU. Σε αντίθεση με μεθόδους που χρησιμοποιούν τα ελάχιστα τετράγωνα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν απαιτεί μεγάλο παράθυρο δεδομένων, δηλαδή αρκετό χρόνο και έτσι δεν καθυστερεί η διαδικασία εύρεσης του ισοδυνάμου Thévenin. Ωστόσο δεν είναι κατάλληλος για βραχυχρόνιες αστάθειες τάσης που λαμβάνουν χώρα ακριβώς μετά από μεγάλες διαταραχές.

Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται αποτελείται από πέντε βήματα και στηρίζεται στην κατάλληλη επιλογή και διόρθωση/ενημέρωση της E_{th} που αποτελεί ελεύθερη μεταβλητή του προβλήματος. Συγκεκριμένα, η τιμή της E_{th} θα πρέπει να μειώνεται όταν

οι μεταβολές της σύνθετης αντίστασης φορτίου Z_L και της εκτιμώμενης X_{th} (έχει γίνει η παραδοχή πως $R_{th} \approx 0$) έχουν την ίδια κατεύθυνση.

Αναλυτικά τα βήματα του αλγορίθμου είναι:

1. Εκτίμηση αρχικής τιμής E_{th}^0 σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{th}^0 = \frac{E_{th}^{max} - E_{th}^{min}}{2} \quad (1.75)$$

όπου $E_{th}^{min} = V_L$ και $E_{th}^{max} = V_L \cos\theta / \cos\beta$,

ενώ το β προκύπτει από την σχέση:

$$\tan\beta = (Z_L I_L + V_L \sin\theta) / V_L \cos\theta \quad (1.76)$$

και της αρχικής τιμής β^0 από τη σχέση:

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{V_L \cos\theta}{E_{th}} \right) \quad (1.77)$$

2. Υπολογισμός X_{th}^0 από τη σχέση:

$$E_{th} \sin\beta = X_{th} I_L + V_L \sin\theta \quad (1.78)$$

3. Υπολογισμός της E_{th}^i σύμφωνα με τις συνθήκες

Εάν η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης φορτίου είναι αρνητική τότε

$$\text{Εάν } (X_{th}^{i*} - X_{th}^{i-1}) < 0 \text{ τότε } E_{th}^i = E_{th}^{i-1} - \varepsilon_E$$

$$\text{Εάν } (X_{th}^{i*} - X_{th}^{i-1}) > 0 \text{ τότε } E_{th}^i = E_{th}^{i-1} + \varepsilon_E$$

Εάν η μεταβολή της σύνθετης αντίστασης φορτίου είναι θετική τότε

$$\text{Εάν } (X_{th}^{i*} - X_{th}^{i-1}) < 0 \text{ τότε } E_{th}^i = E_{th}^{i-1} + \varepsilon_E$$

$$\text{Εάν } (X_{th}^{i*} - X_{th}^{i-1}) > 0 \text{ τότε } E_{th}^i = E_{th}^{i-1} - \varepsilon_E$$

Εάν η σύνθετη αντίσταση φορτίου είναι σταθερή τότε

$$E_{th}^i = E_{th}^{i-1}$$

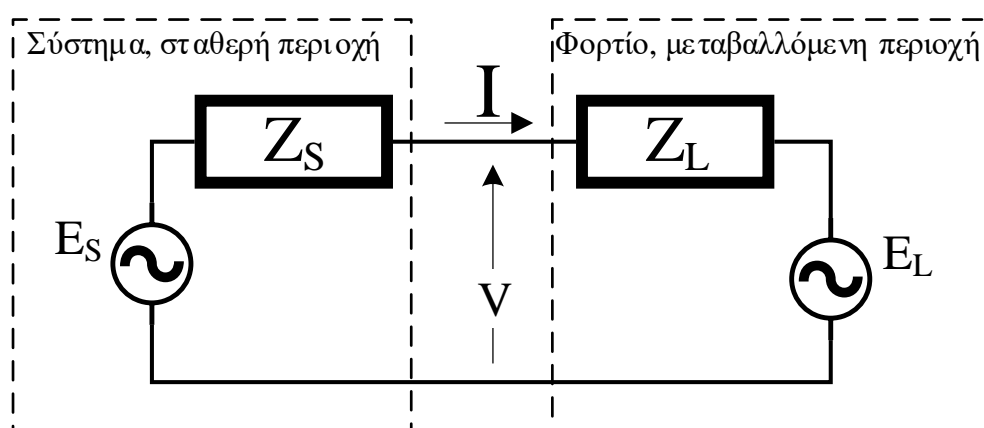
4. Υπολογισμός του β^i και X_{th}^i από τις σχέσεις (1.77) και (1.78) αντίστοιχα.
5. Αύξηση του i και πήγαινε στο βήμα 3.

Το X_{th}^{i*} είναι μια ενδιάμεση εκτίμηση του X_{th}^i που λαμβάνει υπόψη τις παρούσες τιμές ρεύματος και τάσης και τις προηγούμενες τιμές του E_{th} και β .

1.5.5 Ισοδύναμο με διαχωρισμό ανάντη και κατάντη δίκτυο

Στο [AM15] παρουσιάζεται μια μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων του ισοδύναμου Thévenin η οποία λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην πλευρά του συστήματος και μπορεί να διαχειριστεί τα σφάλματα που εισάγουν οι μετρήσεις.

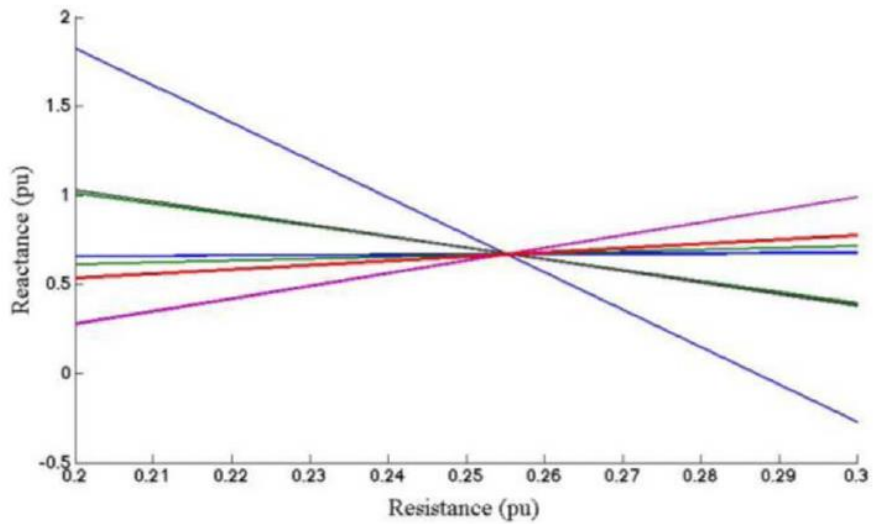
Μιλώντας για την επίδραση των μεταβολών σε κάθε πλευρά μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Εάν η πλευρά του συστήματος παραμείνει σταθερή τότε προκύπτει $Z_{th}=Z_S$ και $E_{th}=E_S$, ενώ αν μεταβληθεί η πλευρά του συστήματος και παραμείνει σταθερό το φορτίο τότε προκύπτει $Z_{th}=-Z_L$ και $E_{th}=E_L$. Αυτό σημαίνει πως υπολογίζεται πάντα ισοδύναμο δίκτυο Thévenin είτε μεταβάλλεται το φορτίο είτε το σύστημα. Το πρόσημο του Z_{th} είναι ο δείχνει σε ποια πλευρά το υπολογισμένο ισοδύναμο ανήκει.



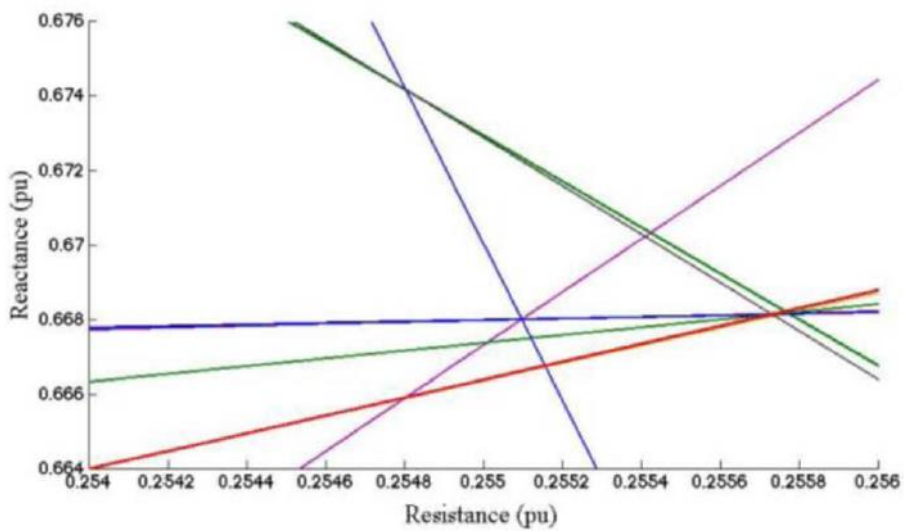
Σχ. 1.16: Ισοδύναμο κυκλώματα και στις δύο πλευρές από το σημείο μέτρησης.

Συνοπτικά η προτεινόμενη μέθοδος λειτουργεί ως εξής: με ένα σύνολο μετρήσεων προσδιορίζονται ευθείες γραμμές οι οποίες δείχνουν τη σχέση μεταξύ της αντίστασης r και της αντίδρασης x της Z_{th} στο επίπεδο των σύνθετων αντιστάσεων ($R-X$). Τα σημεία τομής των ευθειών αποτελούν πιθανές τιμές της Z_{th} . Στη συνέχεια αν ληφθεί υπόψη η κατανομή πιθανότητας των εκτιμώμενων Z_{th} , η τιμή με την μεγαλύτερη πιθανότητα λαμβάνεται ως Z_{th} (Σχ. 1.17).

Στο Σχ. 1.17 (α) φαίνονται οι ευθείες γραμμές που συνδέουν τα r και x του ισοδύναμου Thévenin. Τα σημεία τομής είναι οι πιθανές τιμές της Z_{th} . Στο Σχ. 1.17 (β) παρουσιάζονται σε μεγέθυνση η περιοχή όπου τέμνονται οι ευθείες. Παρατηρούμε πως η περιοχή μέσα στην οποία κινούνται οι εκτιμήσεις για τα r και x είναι πολύ μικρές.



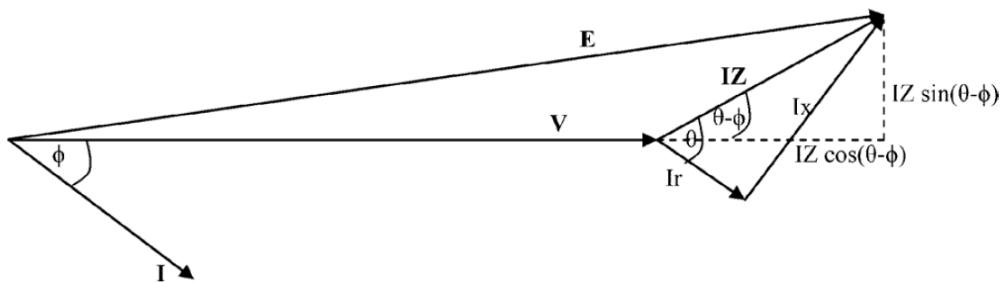
(α)



(β)

Σχ. 1.17: (α) Τόποι x/r στο επίπεδο των αντιστάσεων. (β) Λύση Z_{th}

Η μαθηματική περιγραφή της μεθόδου δίνεται ακολούθως. Έστω το διανυσματικό διάγραμμα του Σχ. 1.18 όπου τα μεγέθη E , Z , r και x αναφέρονται στο ισοδύναμο Thévenin.



Σχ. 1.18: Διανυσματικό διάγραμμα στον ζυγό μέτρησης.

Από τη γεωμετρία του Σχ. 1.18 προκύπτει:

$$E^2 = (V + IZ\cos(\theta - \varphi))^2 + (IZ\sin(\theta - \varphi))^2 \Rightarrow \quad (1.79)$$

$$E^2 = V^2 + I^2Z^2 + 2Pr + 2Qx \quad (1.80)$$

όπου P και Q η ενεργός και η άεργος ισχύς αντίστοιχα.

Για τρεις διαφορετικές μετρήσεις είναι:

$$E^2 = V_1^2 + I_1^2Z^2 + 2P_1r + 2Q_1x \quad (1.81)$$

$$E^2 = V_2^2 + I_2^2Z^2 + 2P_2r + 2Q_2x \quad (1.82)$$

$$E^2 = V_3^2 + I_3^2Z^2 + 2P_3r + 2Q_3x \quad (1.83)$$

Αφαιρώντας την (1.82) από την (1.81) και την (1.83) από την (1.82) τότε:

$$V_1^2 - V_2^2 + (I_1^2 - I_2^2)Z^2 + 2(P_1 - P_2)r + 2(Q_1 - Q_2)x = 0 \quad (1.84)$$

$$V_2^2 - V_3^2 + (I_2^2 - I_3^2)Z^2 + 2(P_2 - P_3)r + 2(Q_2 - Q_3)x = 0 \quad (1.85)$$

Απαλείφοντας την Z^2 από τις (1.84) και (1.85) τότε:

$$\begin{aligned} & (V_1^2 - V_2^2)(I_2^2 - I_3^2) - (V_2^2 - V_3^2)(I_1^2 - I_2^2) \\ & + 2((P_1 - P_2)(I_2^2 - I_3^2) - (P_2 - P_3)(I_1^2 - I_2^2))r \\ & + 2((Q_1 - Q_2)(I_2^2 - I_3^2) - (Q_2 - Q_3)(I_1^2 - I_2^2))x = 0 \end{aligned} \quad (1.86)$$

Η σχέση (1.86) μπορεί να γραφεί ως:

$$2\Delta Pr + 2\Delta Qx + \Delta V^2 = 0 \quad (1.87)$$

όπου

$$\Delta P = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ P_1 & P_2 & P_3 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix}, \quad (1.88)$$

$$\Delta Q = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ Q_1 & Q_2 & Q_3 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix}, \quad (1.89)$$

$$\text{και } \Delta V^2 = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ V_1^2 & V_2^2 & V_3^2 \\ I_1^2 & I_2^2 & I_3^2 \end{bmatrix} \quad (1.90)$$

Η εξίσωση (1.87) λύνεται μαζί είτε με την (1.84) είτε την (1.85) και λαμβάνονται τα x και r .

Η διαδικασία υπολογισμού περιγράφεται με τα επόμενα βήματα και συνήθως προτιμώνται 5 μετρήσεις ($N=5$).

Βήμα 1^ο: Για κάθε μια από τις τελευταίες πέντε μετρήσεις τάσης και ρεύματος υπολογίζονται τα P και Q

Βήμα 2^ο: Κατασκευή των δέκα δυνατών τριάδων ΔP , ΔQ και ΔV^2 .

Βήμα 3^ο: Για κάθε ζεύγος $\{(\Delta P, \Delta Q, \Delta V^2)_i, (\Delta P, \Delta Q, \Delta V^2)_j, i \neq j\}$ από τις δέκα τριάδες του Βήματος 2, προσδιορίζονται οι παράμετροι του ισοδύναμου Thévenin και τα σημεία τομής των δύο γραμμών δίνονται από τις σχέσεις:

$$r = \frac{\Delta Q_i \Delta V_j^2 - \Delta Q_j \Delta V_i^2}{2(\Delta P_i \Delta Q_j - \Delta P_j \Delta Q_i)}$$

$$x = \frac{\Delta P_i \Delta V_j^2 - \Delta P_j \Delta V_i^2}{2(\Delta P_i \Delta Q_j - \Delta P_j \Delta Q_i)}$$

Βήμα 4^ο: Προσδιορίζεται η συχνότητα των τιμών r και x και αυτές με την μεγαλύτερη συχνότητα λαμβάνονται ως οι παράμετροι του Thévenin. Είναι δυνατό να προσδιοριστεί η κατανομή πιθανότητας των τιμών r και x και να προσδιοριστεί το εύρος των τιμών τους σε οποιοδήποτε διάστημα εμπιστοσύνης.

Βήμα 5^ο: Έχοντας τα r και x προσδιορίζεται το E_{th} από την σχέση (1.80).-

1.6 Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (PMU)

Μια ημιτονοειδής κυματομορφή $x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi)$ μπορεί να γραφεί και με τη μορφή φασιθέτη ως εξής:

$$\mathbf{X} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\varphi + j\sin\varphi) = X_r + jX_i \quad (1.91)$$

όπου το πλάτος του είναι η ενεργός τιμή της κυματομορφής $x(t)$ και X_r, X_i είναι αντίστοιχα το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της μιγαδικής τιμής σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Επειδή ο φασιθέτης ορίζεται με βάση τη γωνιακή συχνότητα ω και η γωνία φ εξαρτάται από τον χρόνο για να γίνει συσχετισμός με οποιονδήποτε άλλο φασιθέτη θα πρέπει να έχουν οριστεί με την ίδια χρονική κλίμακα και με την ίδια συχνότητα.

Οι φασιθέτες χρησιμοποιούνται κατά κόρον για την ανάλυση του δικτύου. Εάν βέβαια διάφορες μετρήσεις φασιθετών συγχρονιστούν τότε δίνεται η δυνατότητα εποπτείας της κατάστασης μιας ευρύτερης περιοχής του δικτύου.

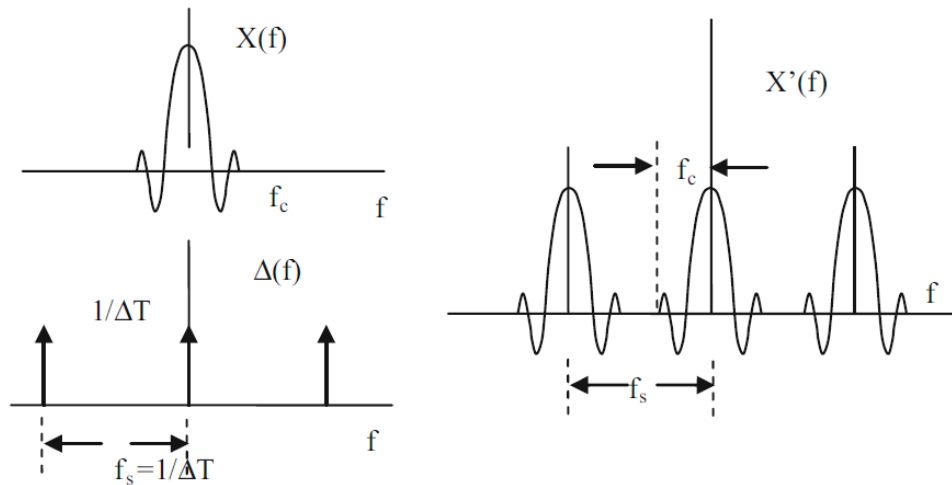
Οι *συγχρονισμένοι φασιθέτες (synchrophasors)* είναι φασιθέτες ρεύματος ή τάσης που έχουν αντιστοιχισθεί επακριβώς σε ένα κοινό χρονικό πλαίσιο αναφοράς. Χάρη στο συγχρονισμό που προσφέρουν διευκολύνεται η εποπτεία, η προστασία, η λειτουργία και ο έλεγχος του ΣΗΕ [IEE11].

Οι Μονάδες Μέτρησης Φασιθετών (Phasor Measurements Units ή PMU) είναι συσκευές που παράγουν συγχρονισμένους φασιθέτες τάσεως και ρεύματος και εκτιμήσεις συχνότητας και ρυθμού αλλαγής της συχνότητας (ROCOF) από σήματα τάσης και ρεύματος σε συνδυασμό με ένα χρονικό σήμα συγχρονισμού. Τα σήματα εισόδου είναι καταλλήλως υποβιβασμένα με μετασχηματιστές εντάσεως και τάσεως ώστε τα μεγέθη να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις των μετατροπών από αναλογικό σε ψηφιακό [PT08]. Έχοντας διαθέσιμες μετρήσεις που αναφέρονται στην ίδια χρονική στιγμή μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για την φόρτιση του δικτύου.

Σύμφωνα με τον ορισμό του φασιθέτη, είναι δυνατή η αναπαράσταση μόνο ημιτονοειδών κυματομορφών. Όμως πρακτικά δεν υφίστανται απολύτως καθαρά ημιτονοειδείς κυματομορφές κατά τη λειτουργία του ΣΗΕ, καθώς οι κυματομορφές εμπριέχουν αρμονικές, θόρυβο και μεταβολές που οφείλονται σε αλλαγές των στοιχείων του δικτύου που προκαλούνται από τα φορτία, τα συστήματα ελέγχου και τις προστατευτικές διατάξεις. Για παράδειγμα, αρμονικές εισάγονται εξαιτίας μη γραμμικών φορτίων, ενώ βηματικές μεταβολές μπορεί να οφείλονται σε ενεργοποίηση μηχανισμών αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Είναι λοιπόν επιβεβλημένη η χρησιμοποίηση κάποιας μεθόδου φιλτραρίσματος ώστε να εξαχθεί ένα σήμα με μοναδική συχνότητα ώστε να είναι δυνατή η χρήση φασιθετών. Συνήθως το απαραίτητο φιλτράρισμα πραγματοποιείται με Μετασχηματισμό Fourier [IEE11].

Χρησιμοποιείται συνήθως Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT) ο οποίος προϋποθέτει δειγματοληψία του αρχικού σήματος και ένα παράθυρο (window) μήκους N .

Ένα σήμα συνεχούς χρόνου $x(t)$ έχει φάσμα το οποίο είναι περιορισμένο μέχρι κάποια συχνότητα (band limited), δηλαδή πέρα από αυτή δεν υπάρχει φασματικό περιεχόμενο. Αντίθετα, ένα δειγματοληπτημένο σήμα $x'(t)$ που προκύπτει από το συνεχές $x(t)$ έχει μετασχηματισμό Fourier που αποτελείται από μια άπειρη σειρά του μετασχηματισμού Fourier του $x(t)$ ο οποίος είναι κεντραρισμένος σε όλες τις συχνότητες $k/\Delta T$, για κάθε $k \in \mathbb{Z}$, όπου ΔT είναι το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας (Σχ. 1.19).

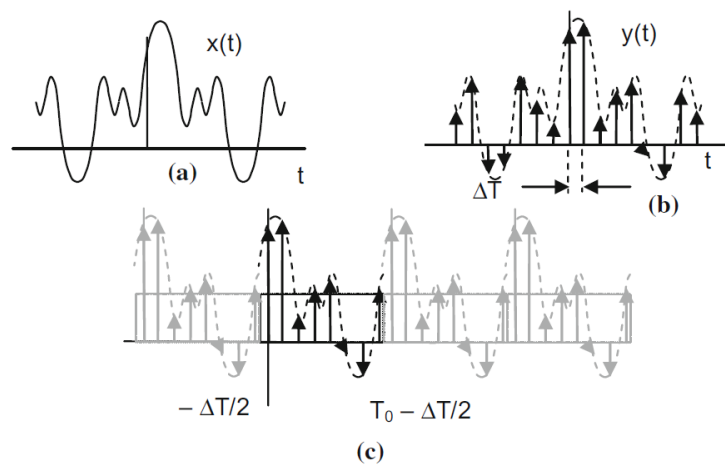


Σχ. 1.19: Το φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος $X'(f)$ προκύπτει από την συνέλιξη του $X(f)$ και του $\Delta(f)$.

Αν η συχνότητα αποκοπής f_c είναι μεγαλύτερη από το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας τότε υπάρχει επικάλυψη φάσματος και άρα η συχνότητα του σήματος που θα υπολογιστεί θα είναι λανθασμένη. Για να αποφευχθεί αυτές οι επικαλύψεις θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν φίλτρα αντι-επικάλυψης (anti-aliasing).

Ο ρυθμός δειγματοληψίας αρχικά ήταν 12 δείγματα ανά κύκλο ενώ στις πιο σύγχρονες συσκευές ο ρυθμός μπορεί να φτάσει τα 128 ή και περισσότερα δείγματα ανά κύκλο [PT08]. Η αύξηση οφείλεται στην χρησιμοποίηση όλο και πιο γρήγορων μετατροπέων και μικροεπεξεργαστών. Επίσης η δειγματοληψία θα πρέπει να είναι σε συμφωνία φάσης με το ρολόι του GPS, το οποίο όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια είναι το μέσο για την επίτευξη του συγχρονισμού.

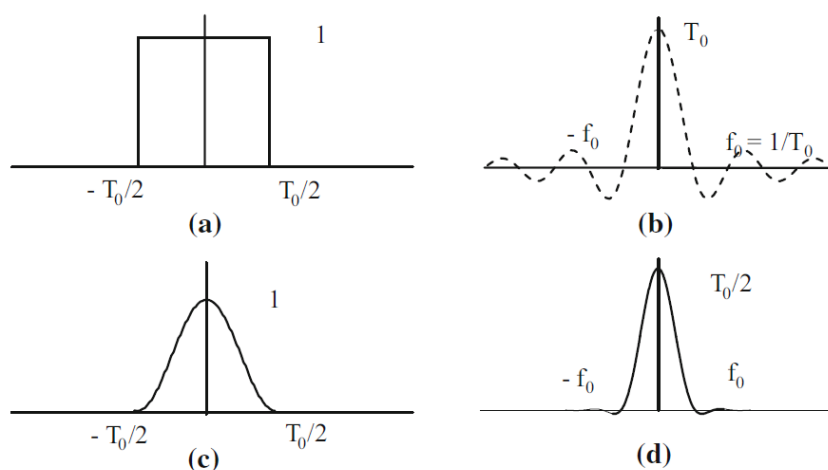
Το παράθυρο ή συνάρτηση παραθύρου (window function) είναι ένας τετραγωνικός παλμός μοναδιαίου πλάτους και μήκους N . Το μήκος λοιπόν του παραθύρου περιορίζει τα δεδομένα σε N δείγματα και η δειγματοληψία στο πεδίο της συχνότητας μετατρέπει τα αρχικά N δείγματα στο πεδίο του χρόνου σε μια άπειρη σειρά N δειγμάτων με περίοδο T_0 .



Σχ. 1.20: (a) Η συνάρτηση εισόδου, (b) τα δείγματά της και (c) ο Μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης που προκύπτει ύστερα από την εφαρμογή του παραθύρου.

Εν ολίγης η συνάρτηση παραθύρου δημιουργεί μια περιοδική συνάρτηση βασισμένη στην είσοδο η οποία είναι η επανάληψη των δειγμάτων του αρχικού σήματος.

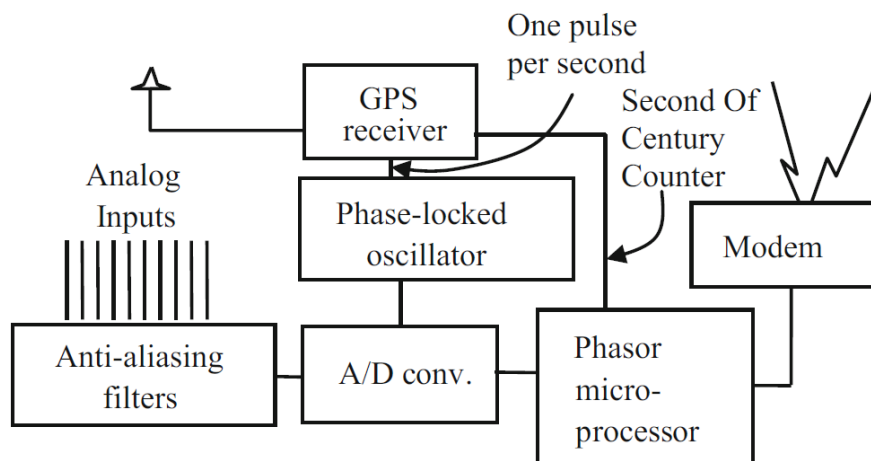
Γενικά στα άκρα του παραθύρου δημιουργούνται ασυνέχειες γεγονός που οδηγούν σε εσφαλμένο φάσμα. Το φαινόμενο αυτό καλείται Φασματική Διαρροή (Leakage Effect). Το φαινόμενο είναι εντονότερο όταν χρησιμοποιείται τετραγωνικό παράθυρο ενώ καλύτερη απόδοση του φάσματος προκύπτει από ένα παράθυρο Hamming. Η διαφορά τους βρίσκεται στους πλευρικούς λοβούς όπου για το παράθυρο Hamming έχουν μικρότερο πλάτος. Στα ΣΗΕ η φασματική διαρροή οφείλεται κυρίως στην μη ονομαστική συχνότητα των σημάτων εισόδου καθώς η συχνότητα δειγματοληψίας προκύπτει από την ονομαστική συχνότητα λειτουργίας. Πάντως επειδή η συχνότητα δεν διαφέρει συνήθως περισσότερο από μερικά mHz, η φασματική διαρροή που δημιουργείται από το τετραγωνικό παράθυρο είναι αρκετά μικρό και χάριν της απλότητας του χρησιμοποιείται ευρέως στα ΣΗΕ [PT08].



Σχ. 1.21: (a) Το τετραγωνικό παράθυρο και (b) ο μετασχηματισμός Fourier του. (c) Το παράθυρο Hamming και (d) ο μετασχηματισμός Fourier του.

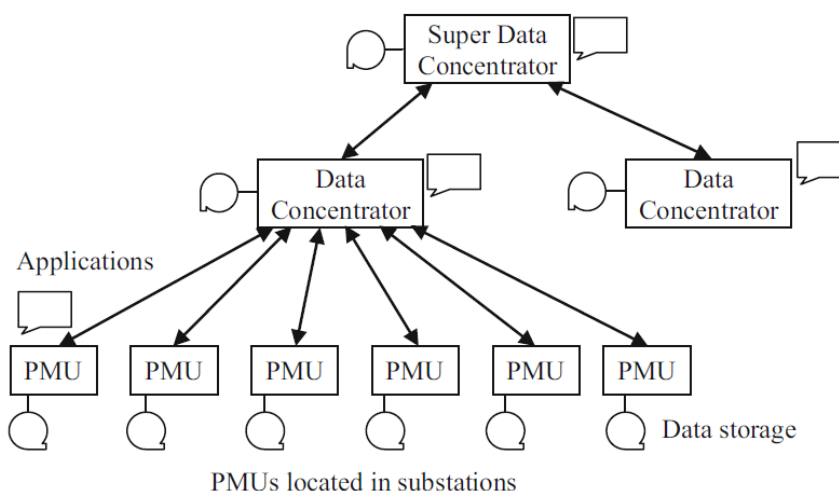
Ο ακριβής συγχρονισμός των δεδομένων δεν μπορούσε να επιτευχθεί δίχως την ανάπτυξη του Συστήματος Γεωγραφικού Προσδιορισμού (GPS). Παρόλο που η κύρια χρήση του GPS είναι να παρέχει πληροφορίες συντεταγμένων η ιδιότητα που αξιοποιούν τα PMU είναι ο παλμός ρολογιού που εκπέμπει το GPS κάθε δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι κάθε παλμός φτάνει σε έναν δέκτη συμπίπτει με τους παλμούς που φτάνουν σε όλους τους άλλους δέκτες με χρονική διαφορά λιγότερο από 1μs, η παρεχόμενη ακρίβεια επιτρέπει ακριβείς μετρήσεις τάσεων, ρευμάτων και συχνότητας [Pha02].

Επειδή το ρολόι του GPS δεν λαμβάνει υπόψη την περιστροφή της γης, γίνονται διορθώσεις στους δέκτες ώστε να παρέχουν χρόνο UTC (Coordinated Universal Time), ενώ αναγνωριστικό κάθε παλμού είναι ο αριθμός των δευτερολέπτων που έχουν περάσει από την λειτουργία του ρολογιού. Μάλιστα, επειδή το πρότυπο χρησιμοποιεί βάση χρόνου UNIX ο παλμός αντιστοιχίζεται με το «Δευτερόλεπτο του Αιώνα» (Second Of Century-SOC).



Σχ. 1.22: Τα βασικά μέρη ενός PMU.

Ως προς τη συλλογή των δεδομένων θα μπορούσε κανείς να ορίσει δύο ιεραρχικές βαθμίδες. Η πρώτη αναφέρεται τοπικά αφού συγκεντρώνει πληροφορίες από PMU που ανήκουν σε μια περιοχή, ενώ η δεύτερη βαθμίδα συγκεντρώνει πληροφορίες από πολλές διαφορετικές περιοχές.



Σχ. 1.23: Ιεραρχία PMU.

Όπως είναι φυσικό δεδομένα διακινούνται από κάτω προς τα πάνω, ωστόσο όταν απαιτείται στέλνεται πληροφορία από πάνω προς τα κάτω. Η επικοινωνία μπορεί να επιτευχθεί με μισθωμένα τηλεφωνικά κυκλώματα (leased telephone circuit), με μεταγωγή κυκλώματος, μικροκυματική ζεύξη και κομιστή γραμμής ρεύματος (power line carrier). Σήμερα λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν οι οπτικές ίνες αποτελούν τον κύριο τρόπο επικοινωνίας. Τα μηνύματα μπορεί να προωθούνται με πρωτόκολλο μεταφοράς TCP ή UDP πάνω σε IP, το οποίο είναι συνήθως πάνω σε Ethernet ή οποιοδήποτε άλλο επίπεδο ζεύξης δεδομένων [PT08].

1.7 Δείκτες Ευστάθειας Βασισμένοι στην Ωμική Αγωγιμότητα

Όπως παρουσιάστηκε στην Ενότητα 1.5.1 το ερευνητικό ενδιαφέρον είχε στραφεί στον προσδιορισμό ενός ισοδυνάμου Thévenin, με μετρήσεις πραγματικού χρόνου, ώστε να εφαρμοστεί το κριτήριο της προσαρμογής αντιστάσεων. Ο κύριος περιορισμός σε αυτές τις προσεγγίσεις είναι η απώλεια εγκυρότητας όταν τα φορτία αλλάζουν ταυτόχρονα ή όταν οι μετρήσεις λαμβάνονται σε ενδιάμεσο ζυγό του δικτύου μεταφοράς και όχι στο ζυγό φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος [VM18].

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται δύο δείκτες βασισμένοι στην ωμική αγωγιμότητα, ο NLI (New LIVES Index, όπου LIVES: Local Identification of Voltage Stability Emergency) και ο RLI (Relay-based Local Index of voltage emergency), ώστε να προσδιοριστεί κατά πόσο από μετρήσεις ρεύματος και τάσης σε έναν μόνο ζυγό του δικτύου μεταφοράς ή σε ζεύγος ηλεκτρονόμων αποστάσεων είναι δυνατόν να προσδιοριστεί ευστάθεια ή αστάθεια τάσης [VLM17].

Οι δείκτες που παρουσιάζονται στηρίζονται στη φαινόμενη αγωγιμότητα που υπολογίζεται απευθείας από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος. Η λειτουργία των δεικτών είναι παρόμοια και απορρέει από τις ακόλουθες δύο παρατηρήσεις. Όταν η αύξηση της αγωγιμότητας συνοδεύεται από αύξηση της ενεργού ισχύος τότε το σύστημα θεωρείται ευσταθές. Αντίθετα, όταν παρατηρείται συνεχής αποτυχία για αύξηση της ροής ενεργού ισχύος όταν αυξάνεται η αγωγιμότητα, τότε αυτή η ανακολουθία ισχύος και αγωγιμότητας αποτελεί ένδειξη αστάθειας με επακόλουθο τη σήμανση συναγερμού [VLM17].

1.7.1 NLI

Η εφαρμογή του NLI βασίζεται στις μετρήσεις που λαμβάνονται από PMU που είναι εγκατεστημένα σε ζυγούς άφιξης ενός διαδρόμου μεταφοράς. Ο όρος διάδρομος μεταφοράς είναι ένα σύνολο γραμμών μεταφοράς που ενώνει δύο διακριτές περιοχές. Συνεπώς το ρεύμα που λαμβάνει υπόψη ο NLI είναι το άθροισμα του ρεύματος που ρέει προς τον ζυγό i :

$$\tilde{I}_i = - \sum_{k \in K_i} \tilde{I}_{ik} \quad (1.92)$$

όπου K_i είναι το σύνολο των διαδρόμων μεταφοράς που συνδέονται με τον ζυγό i . Χάριν απλότητας στη συνέχεια έχει παραληφθεί ο δείκτης i , αφού κάθε φορά ο δείκτης αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο ζυγό.

Ο δείκτης NLI ορίζεται ως εξής:

$$NLI = \frac{\Delta P}{\Delta G} \quad (1.93)$$

όπου G είναι το πραγματικό (ωμικό) μέρος της φαινόμενης σύνθετης αγωγιμότητας και P η φαινόμενη ενεργός ισχύς από το PMU που είναι εγκατεστημένο σε έναν ενδιάμεσο ζυγό. Συγκεκριμένα ισχύει:

$$G = \text{Re}\{\tilde{I}/\tilde{V}\} \quad (1.94)$$

και
$$P = \text{Re}\{\tilde{V}\tilde{I}^*\} \quad (1.95)$$

ενώ τα ΔP και ΔG αναφέρονται στις διαφορές μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων της P και της G . Για $\Delta G < 0$ δεν γίνεται ανανέωση της τιμής του NLI αλλά διατηρείται η προηγούμενη τιμή τους.

Στην περίπτωση που το δίκτυο είναι ακτινικό χωρίς απώλειες τότε η μετρούμενη ενεργός ισχύς είναι και η ενεργός ισχύς φορτίου. Οπότε το κριτήριο ευστάθειας είναι:

$$NLI = \frac{\Delta P}{\Delta G} > 0 \quad (1.96)$$

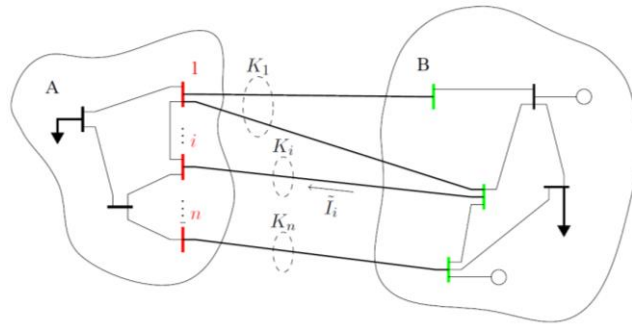
Ο δείκτης NLI αλλάζει πρόσημο ακριβώς στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και συνεπώς το πρόσημό του είναι ακριβής ένδειξη της ευστάθειας τάσης.

Η παρουσία ωμικών απωλειών των γραμμών μεταφοράς, επηρεάζει τη μετρούμενη ισχύ σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο, η οποία πλέον παύει να είναι ίση με την καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο NLI να γίνεται αρνητικός όταν θα έχει ξεπεραστεί το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Επειδή όμως οι αντιστάσεις των γραμμών μεταφοράς είναι πολύ μικρές και το σημείο που εκδίδει συναγερμό ο NLI είναι πολύ κοντά στο πραγματικό όριο φόρτισης η συνθήκη ευστάθειας (1.96) ισχύει.

Η καθυστέρηση του συναγερμού λόγω της ύπαρξης των απωλειών είναι μειονέκτημα του NLI, ωστόσο μπορεί να αντισταθμιστεί από μια ιδιότητα των βροχοειδών συστημάτων που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

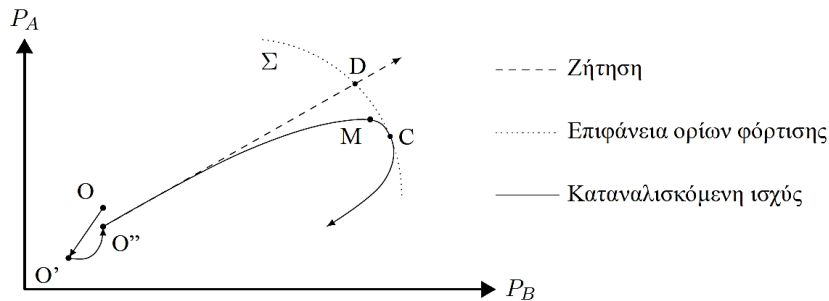
Είναι συνήθης πρακτική μια αδύναμη περιοχή του ΣΗΕ, που γενικά είναι επιρρεπής σε αστάθεια τάσης, να τροφοδοτείται από ένα μεγαλύτερο σύστημα μέσω ενός διαδρόμου μεταφοράς. Σε αυτή την περίπτωση έχει δειχθεί στα [VV08] και [VV10] ότι σε ένα ασταθές σενάριο που περιλαμβάνει αύξηση της ζήτησης του φορτίου, η συνολική κατανάλωση σε μία ευάλωτη περιοχή θα φτάσει σε μέγιστο και στη συνέχεια θα αρχίσει να μειώνεται πριν να έχει φτάσει στο πραγματικό όριο ευστάθειας. Αυτή η ιδιότητα είναι παρόμοια με το αποτέλεσμα του [Gri12] όπου χρησιμοποιώντας εξισώσεις ροής φορτίο αποδεικνύεται ότι πριν από το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος τουλάχιστον μια γραμμή που τροφοδοτεί την αδύναμη περιοχή θα αρχίσει να μειώνει την ενεργό ισχύ που μεταφέρει.

Μια ευάλωτη περιοχή A που τροφοδοτείται από ένα μεγαλύτερο σύστημα B φαίνεται στο Σχ. 1.24.



Σχ. 1.24: Τροφοδότηση αδύναμης περιοχής μέσω διαδρόμου μεταφοράς.

Ο χώρος κατάστασης των φορτίων του παραπάνω συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 1.25, όπου μεταβάλλονται τόσο η κατανάλωση ενεργού ισχύος (γραμμή OMC) όσο και η ζήτηση του φορτίου (διακεκομμένη γραμμή OD). Το σύστημα βρίσκεται σε μακροπρόθεσμη ισορροπία όταν η κατανάλωση είναι ίση με τη ζήτηση.



Σχ. 1.25: Όρια φόρτισης στο χώρο φορτίων.

Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει το άθροισμα της ενεργού ισχύος στην εύαλπη περιοχή, ενώ ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει το άθροισμα της ενεργού ισχύος των φορτίων στην υπόλοιπη περιοχή. Η καμπύλη Σ είναι η επιφάνεια φόρτισης του συστήματος και οριοθετεί την περιοχή στον χώρο κατάστασης στην οποία υπάρχουν λύσεις των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος. Στο Σχ. 1.25 αποτυπώνεται ένα ασταθές σενάριο καθώς η ζήτηση ξεπερνά το όριο φόρτισης. Η καμπύλη της ζήτησης τέμνει την επιφάνεια ορίων φόρτισης στο σημείο D, η καταναλισκόμενη ισχύς στην περιοχή A θα φτάσει σε μέγιστο στο σημείο M και θα αρχίσει να μειώνεται πριν φτάσει στο πραγματικό όριο ευστάθειας C.

Ο δείκτης NLI αναγνωρίζει το σημείο M αφού παρακολουθεί την κατάσταση από τον διάδρομο μεταφοράς. Έτσι, ο NLI μπορεί να αναγνωρίσει την αστάθεια πριν από το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και άρα να προειδοποιήσει νωρίς.

1.7.2 RLI

Ο δείκτης RLI έχει την ίδια αρχή λειτουργίας με τον δείκτη NLI με τη διαφορά ότι βρίσκει εφαρμογή σε ηλεκτρονόμους αποστάσεως που είναι εγκατεστημένοι και στα δύο άκρα ενός διαδρόμου μεταφοράς.

Οι σχέσεις (1.93) - (1.95) που ορίστηκαν παραπάνω ισχύουν και για τον δείκτη RLI με μόνη διαφορά στο ρεύμα όπου τώρα είναι μόνο ρεύμα γραμμής και όχι άθροισμα ρευμάτων. Συγκεκριμένα στο άκρο άφιξης της γραμμής το ρεύμα είναι $-\tilde{I}_{ik}$ αντί για \tilde{I}_i ενώ στον ηλεκτρονόμο στο άκρο αναχώρησης είναι \tilde{I}_{ik} . Έτσι ο RLI υπολογίζεται πάντα για την πραγματική φορά της ενεργού ισχύος [VM17].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η λειτουργία των δυο δεικτών στηρίζεται στον υπολογισμό του λόγου $\Delta P/\Delta G$, όπου ΔP είναι διαδοχικές αυξήσεις της ενεργού ισχύος και ΔG διαδοχικές αυξήσεις της αγωγιμότητας. Για $\Delta G < 0$ δεν γίνεται ανανέωση της τιμής του NLI ή του RLI αλλά διατηρείται η προηγούμενη τιμή τους.

Ο λόγος αλλάζει πρόσημο ακριβώς στο σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και άρα το πρόσημο του λόγου δείχνει την ευστάθεια τάσης. Συγκεκριμένα, θετικό πρόσημο σημαίνει ευστάθεια, ενώ αρνητικό αστάθεια.

Οι δύο δείκτες όπως αναμενόταν παρουσιάζουν παρόμοιες συμπεριφορές για την αναγνώριση της ευστάθειας τάσης όπως προκύπτει από δοκιμές που έγιναν. Το πλεονέκτημα των δεικτών είναι ότι δεν απαιτείται η γνώση ούτε του ισοδύναμο Thévenin ούτε του φορτίου για να γίνει σύγκριση αντιστάσεων σύμφωνα με το θεώρημα Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Αντιθέτως, εξετάζεται απευθείας το δίκτυο για την αναγνώρισή του ορίου ευστάθειας τάσης.

1.8 Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι η εκτίμηση του κατάντη δικτύου ώστε να βελτιωθούν οι μέθοδοι αναγνώρισης αστάθειας τάσης που βασίζονται στις μετρήσεις σύνθετων αντιστάσεων. Η ανάγκη προσδιορισμού του κατάντη δικτύου πηγάζει από την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ισχύος που έχει οδηγήσει τα συστήματα μεταφοράς να λειτουργούν κοντά στα όρια φόρτισής τους και ως εκ τούτου η εκδήλωση αστάθειας τάσης να είναι πολύ πιθανή. Επίσης, στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μεθόδων για την εύρεση του ανάντη δικτύου με την μορφή ενός ισοδυνάμου Thévenin, ωστόσο δεν υπάρχουν αντίστοιχες μελέτες για το κατάντη δίκτυο γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη ενασχόλησης με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Όπως θα εξηγηθεί περισσότερο στο Κεφάλαιο 2, η μη αναγνώριση του κατάντη δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλα σφάλματα ως προς την εκτίμηση της αστάθειας τάσεως.

Η ανάλυση στηρίζεται σε μετρήσεις που λαμβάνονται από μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU) σε έναν ενδιάμεσο ζυγό ενός ακτινικού δικτύου με απώλειες. Οι παράμετροι του ανάντη δικτύου και της κατάντη γραμμής θεωρούνται σταθερές και μεταβάλλοντας μόνο την αγωγιμότητα του φορτίου, που θεωρείται σταθερού συντελεστή ισχύος, παράγονται οι αναγκαίες μετρήσεις μέσω της προσομοίωσης.

Επειδή οι μετρήσεις που λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό του κατάντη δικτύου πρέπει να είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους ή με άλλα λόγια να αντιστοιχούν στις διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις του δικτύου, γίνεται επιλογή

των μετρήσεων λαμβάνοντας υπόψη ένα κριτήριο σύνθετης αντίστασης (Κεφάλαιο 3) ή ρεύματος (Κεφάλαια 4 & 5).

Οι ανεξάρτητες μετρήσεις απεικονίζονται ως σύνθετη αντίσταση στο επίπεδο σύνθετων αντιστάσεων R-X. Η μεθοδολογία βασίζεται είτε σε προσαρμογή καμπυλών είτε στη μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 έγινε η εισαγωγή στο θεωρητικό υπόβαθρο και δόθηκε το πλαίσιο μέσα στο οποίο κινείται το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας. Περιγράφηκε η δομή και η λειτουργία ενός ΣΗΕ και η έννοια της ευστάθειας τάσης και αναλύθηκαν τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Έγινε η διάκριση των χρονικών κλιμάκων στις οποίες εξελίσσεται το φαινόμενο και αναφορά στις μεθόδους εκτίμησης παραμέτρων και συγκεκριμένα στην μέθοδο Γραμμικών και Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων. Στη συνέχεια έγινε εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση των μεθόδων προσδιορισμού του ισοδυνάμου Thévenin. Επίσης, παρουσιάστηκε συντόμως η λειτουργία των Μονάδων Μέτρησης Φασιθετών (PMU) και δύο δείκτες αναγνώρισης αστάθειας τάσης που βασίζονται στην ωμική αγωγιμότητα και δεν απαιτούν γνώση του ισοδυνάμου Thévenin.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια επισκόπηση της προστασίας των ΣΗΕ. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι έννοιες της κύριας και δευτερεύουσας προστασίας καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος προστασίας. Στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στους ηλεκτρονόμους αποστάσεων και ειδικά στις χαρακτηριστικές τους στο επίπεδο R-X που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Ακόμη, γίνεται αναφορά στην παραβίαση Τρίτης Ζώνης και συνδέεται η λειτουργία των συστημάτων προστασίας με την έννοια της ευστάθειας τάσης. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται επίσης η ανάλυση της προσαρμογής σύνθετων αντιστάσεων στην περίπτωση που η μέτρηση γίνεται σε ενδιάμεσο ζυγό διαφορετικό από αυτόν του φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 3 οι μετρήσεις για την εκτίμηση του κατάντη δικτύου απεικονίζονται στο επίπεδο R-X και εξετάζονται οι τόποι της μετρούμενης (φαινόμενης) σύνθετης αντίστασης (Z_{app}). Συγκεκριμένα σε δίκτυο χωρίς χωρητική αντιστάθμιση ο τόπος των Z_{app} είναι ευθεία από την οποία προσδιορίζεται αμέσως ο συντελεστής ισχύος του φορτίου. Με επιλογή κατάλληλου λόγου αντίστασης προς αντίσταση γραμμής R_2/X_2 είναι εφικτός ο προσδιορισμός τόσο της σύνθετης αντίστασης της γραμμής όσο και του φορτίου. Στη συνέχεια εξετάζεται κατάντη δίκτυο με χωρητική αντιστάθμιση. Ο τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης είναι κύκλος σε αυτήν την περίπτωση. Μάλιστα με κατάλληλη μέθοδο μπορεί να ευρεθεί ο κύκλος που προσαρμόζεται καλύτερα στα σημεία των μετρήσεων. Η επιπλέον πληροφορία του λόγου R_2/X_2 δίνει τη δυνατότητα αναγνώρισης όλων των παραμέτρων του κατάντη δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το μη γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων όταν οι μετρήσεις θεωρούνται χωρίς θόρυβο. Συγκεκριμένα

παρουσιάζεται το εξεταζόμενο δίκτυο, αναλύεται η προσομοίωση του δικτύου, η εξαγωγή και επιλογή των μετρήσεων. Επίσης, επεξηγείται ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων. Έπειτα, γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων του κατάντη δικτύου για διαφορετικούς λόγους R_2/X_2 και σύγκριση των αποτελεσμάτων τόσο σε δίκτυο χωρίς όσο και με χωρητική αντιστάθμιση. Τέλος, προσομοιώνεται η ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το μη γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων από το οποίο υπολογίζεται το κατάντη δίκτυο όταν οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο. Αρχικά, παρουσιάζεται ο τρόπος προσθήκης θορύβου στις μετρήσεις σύμφωνα με το πρότυπο των PMU. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο εξεταζόμενο δίκτυο και στον τρόπο επιλογής ανεξάρτητων μετρήσεων. Εντοπίζεται και αναλύεται η δυσκολία παραγωγής ορθών εκτιμήσεων σε αφόρτιστο δίκτυο και προτείνεται η εκτίμηση των παραμέτρων να γίνεται σε περισσότερο φορτισμένη γραμμή. Χρησιμοποιείται ο ίδιος αλγόριθμος, όπως στο Κεφάλαιο 4, για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος ελαχίστων τετραγώνων. Έπειτα, γίνεται εκτίμηση των παραμέτρων του κατάντη δικτύου με ή χωρίς αντιστάθμιση, ενώ επιπλέον εξετάζονται διαφορετικά μήκη παραθύρου N και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έπειτα, προσομοιώνεται η ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης και περιγράφονται τα αποτελέσματα της μεταβατικής εκτίμησης. Τέλος, παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση του φίλτρου Savitzky-Golay που μπορεί να εξομαλύνει περαιτέρω τον θόρυβο και πραγματοποιούνται εκτιμήσεις με και χωρίς αντιστάθμιση.

Κλείνοντας, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν και από τις εκτιμήσεις των παραμέτρων του κατάντη δικτύου. Επιπλέον, δίνονται οι προοπτικές για περαιτέρω διερεύνηση των ζητημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

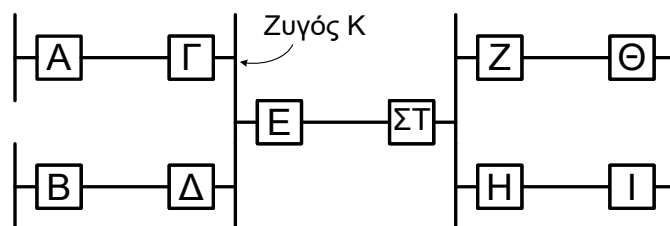
Κεφάλαιο 2 Προστασία Σ.Η.Ε. και Διαγράμματα Συνθέτου Αντιστάσεως

Ο ρόλος της προστασίας των ΣΗΕ είναι να εντοπίζει και να απομονώνει γρήγορα τα στοιχεία στα οποία εμφανίζονται σφάλματα, ώστε να μην εμποδίζεται η ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος. Ένα σύστημα προστασίας πρέπει ιδανικά να ανιχνεύει και να λειτουργεί σε κάθε περίπτωση σφάλματος [Masxx]. Με τον όρο σφάλμα αναφερόμαστε συνήθως στα βραχυκυκλώματα ωστόσο στα σφάλματα περιλαμβάνονται και άλλες καταστάσεις μη ομαλής λειτουργίας (π.χ. διακοπή της συνέχειας μια φάσης, κλπ.) [Παπ97].

2.1 Κύρια και Δευτερεύουσα Προστασία

Ένας πρώτος διαχωρισμός των συστημάτων προστασίας γίνεται με βάση την περιοχή ή τη ζώνη ευθύνης τους. Έτσι λοιπόν διακρίνουμε δυο κατηγορίες, την κύρια προστασία ή προστασία πρώτης βαθμίδας (primary) και την δευτερεύουσα προστασία ή προστασία δεύτερης βαθμίδας (back-up).

Η κύρια προστασία έχει την πρώτη ευθύνη για την περιοχή που καλύπτει. Αυτό σημαίνει πως αν συμβεί ένα σφάλμα τότε θα πρέπει να λειτουργήσει πρώτα το σύστημα προστασίας που είναι ορισμένο για την περιοχή, δηλαδή η κύρια προστασία. Αντίθετα, η προστασία δεύτερης βαθμίδας λειτουργεί επικουρικά ως προς την κύρια καθώς καλείται να αναλάβει δράση όταν η κύρια αποτύχει να απομονώσει το σφάλμα. Συνοψίζοντας, η κύρια προστασία είναι η πρώτη γραμμή άμυνας απέναντι στα σφάλματα, ενώ η προστασία δεύτερης βαθμίδας ενεργοποιείται όταν αποτύχει η κύρια προστασία σε μια γειτονική περιοχή [Masxx].



Σχ. 2.1: Σχήμα προστασίας για την γραμμή Ε-ΣΤ.

Η προστασία δεύτερης βαθμίδας της γραμμής Ε-ΣΤ θα πρέπει να προκαλέσει το άνοιγμα των διακοπών Α, Β, Θ και Ι. Συγκεκριμένα, μη λειτουργία του Διακόπτη Ε θα προκαλέσει το άνοιγμα των διακοπών Α και Β. Οι Διακόπτες Α, Β και ΣΤ παρέχουν δευτερεύουσα προστασία στον Ζυγό Κ, ενώ οι διακόπτες Α και ΣΤ στην γραμμή Β-Δ.

2.2 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Λόγω της μεγάλης σημασίας για το ΣΗΕ κάθε σύστημα προστασίας πρέπει να διαθέτει τα ακόλουθα λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Αξιοπιστία (Reliability)

Η αξιοπιστία έχει δύο συνιστώσες την φερεγγυότητα (dependability) και την ασφάλεια (security). Η φερεγγυότητα ορίζεται ως ο βαθμός βεβαιότητας ότι ένας ηλεκτρονόμος ή ένα σύστημα ηλεκτρονόμων θα λειτουργήσει σωστά. Η ασφάλεια σχετίζεται με τον βαθμό της βεβαιότητας ότι ένας ηλεκτρονόμος ή ένα σύστημα ηλεκτρονόμων δεν θα λειτουργήσει εάν δεν απαιτείται. Η φερεγγυότητα λοιπόν δείχνει την ικανότητα του συστήματος προστασίας να λειτουργεί σωστά όταν απαιτείται, ενώ η ασφάλεια είναι η ικανότητά του να αποφεύγει αχρείαστη λειτουργία σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας καθώς και σφάλματα ή προβλήματα πέρα από την επιθυμητή περιοχή λειτουργίας [BD14].

Αν αναλογιστεί κανείς το κόστος του εξοπλισμού του ΣΗΕ αλλά και τα προβλήματα που θα προκληθούν σε περίπτωση μη σωστής λειτουργίας της προστασίας, τότε εύκολα συμπεραίνεται ότι η αξιοπιστία των συστημάτων προστασίας είναι μείζονος σημασίας για το ΣΗΕ. Η αξιοπιστία ενός τέτοιου συστήματος ξεκινά από τον σχεδιασμό του, ωστόσο θα πρέπει να γίνονται με ιδιαίτερη προσοχή τόσο η εφαρμογή και εγκατάστασή του όσο και η συντήρησή του [Masxx].

Επιπλέον, επειδή η προστασία γενικά λειτουργεί λίγες φορές (π.χ η προστασία γραμμών μεταφοράς που ενεργοποιείται συνήθως πιο συχνά από τα υπόλοιπα συστήματα προστασίας λειτουργεί μόνο λίγες φορές κατά τη διάρκεια ενός έτους), δηλαδή παραμένει ανενεργή για μεγάλα χρονικά διαστήματα θα πρέπει να ελέγχεται η λειτουργικότητά της με δοκιμές. Συνήθης πρακτική είναι η εκτέλεση δοκιμών πεδίου κατά την εγκατάσταση και επιπλέον κρατούνται αρχεία για την λειτουργία του συστήματος [Masxx].

Ευαισθησία (Sensitivity)

Κάθε σύστημα προστασίας πρέπει να έχει κάποια ευαισθησία ώστε να λειτουργήσει αξιόπιστα όταν θα είναι αναγκαίο εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο [Masxx].

Επιλογικότητα (Selectivity)

Ο όρος επιλογικότητα αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος προστασίας να επιλέγει τις περιπτώσεις εκείνες για τις οποίες πρέπει να λειτουργήσει, εξαιτίας των

συνθηκών που επικρατούν, από εκείνες που δεν πρέπει να λειτουργήσει. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η λειτουργία της κύριας προστασίας η οποία πρέπει να ενεργοποιηθεί για σφάλμα στην περιοχή ευθύνης της και να μην ενεργοποιηθεί για σφάλμα σε κάποια άλλη περιοχή, εκτός αν πρόκειται για λειτουργία προστασίας δεύτερης βαθμίδας [Masxx].

Η ευαισθησία και η επιλογικότητα δίνουν στο σύστημα προστασίας την δυνατότητα να απομονώνει το ελάχιστο δυνατό τμήμα συστήματος για κάθε σφάλμα.

Ταχύτητα

Η λειτουργία της προστασίας πρέπει να είναι γρήγορη για να ελαχιστοποιούνται τα προβλήματα που δημιουργούνται από το σφάλμα στο δίκτυο. Βέβαια, η σωστή ρύθμιση της ταχύτητας λειτουργίας είναι και σημαντικός παράγοντας για να αποφευχθούν αναίτιες και άσκοπες απομονώσεις του εξοπλισμού [Masxx].

Ικανότητα Διάκρισης (Discrimination)

Πρόκειται για την ικανότητα του συστήματος προστασίας να διακρίνει το σφάλμα από μια μεταβατική κατάσταση λειτουργίας όπου συνήθως παρατηρούνται μεγάλα ρεύματα [Παπ97].-

Πέρα όμως από τα ανωτέρω λειτουργικά χαρακτηριστικά πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η απλότητα αλλά και το κόστος ενός συστήματος προστασίας.

Αναφορικά με την Απλότητα (Simplicity), ένα σύστημα προστασίας πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο απλό εξυπηρετώντας βέβαια τον ρόλο που του έχει ανατεθεί. Για τον λόγο αυτό οποιαδήποτε προσθήκη εξοπλισμού θα πρέπει να εξεταστεί διεξοδικά, καθώς με κάθε προσθήκη η προστασία γίνεται πιο πολύπλοκη, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα [BD14].

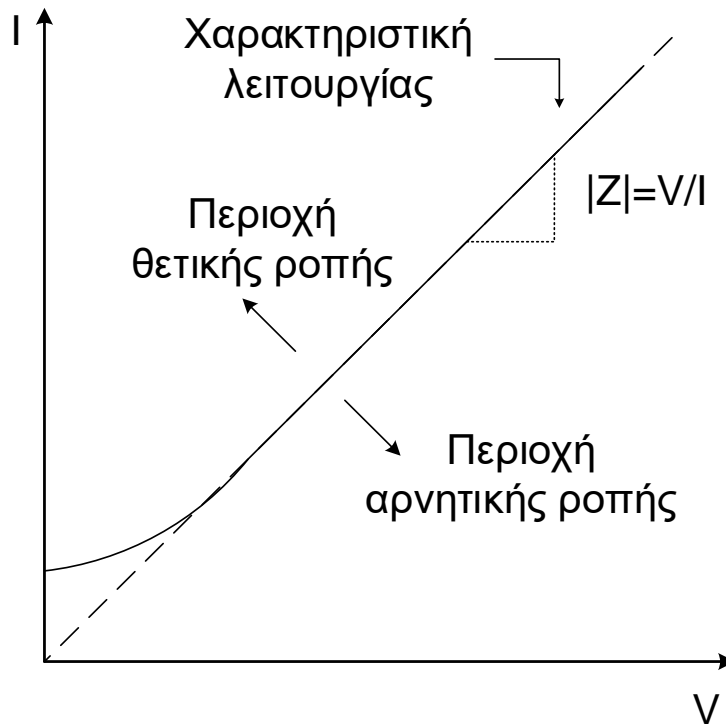
Αναμφίβολα το κόστος είναι καθοριστικός παράγοντας για ένα ΣΗΕ. Είναι επιθυμητό να λαμβάνεται η μέγιστη προστασία στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Βέβαια, ένα σύστημα προστασίας με πολύ χαμηλό κόστος ίσως να μην είναι το πλέον αξιόπιστο για την εφαρμογή που εξετάζεται. Γενικά το κόστος της προστασίας είναι μεγάλο. Αν ληφθεί υπόψη το πολύ μεγαλύτερο κόστος του εξοπλισμού που προστατεύεται και τα χρήματα που θα καταβάλλονταν για την αποκατάσταση κατεστραμμένου εξοπλισμού ύστερα από σφάλμα σε περίπτωση μη επαρκούς προστασίας το κόστος της προστασίας είναι λογικό [BD14].

2.3 Ηλεκτρονόμοι Αποστάσεως

2.3.1 Η/Ν Αποστάσεως τύπου Σύνθετης Αντιστάσεως (Impedance)

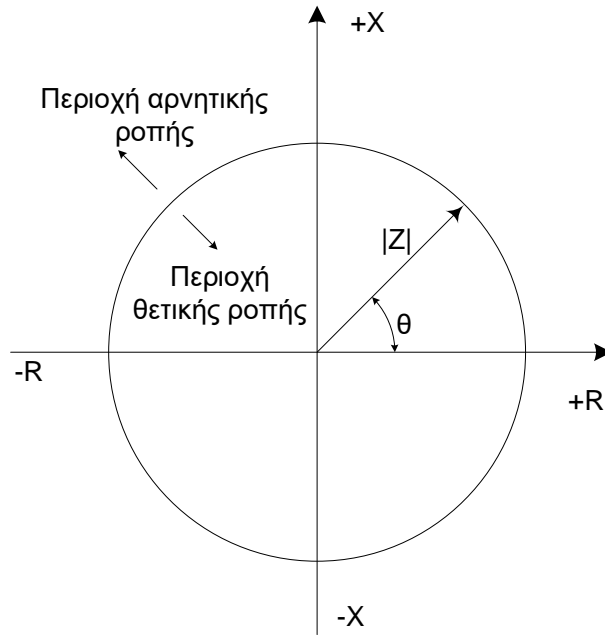
Η χαρακτηριστική λειτουργίας ενός Η/Ν αποστάσεως φαίνεται στο Σχ. 2.2. Παρατηρούμε πως για χαμηλά ρεύματα και τάσεις η χαρακτηριστική παρουσιάζει μια καμπή, ωστόσο για πρακτικούς λόγους υποθέτουμε πως είναι ευθεία. Η καμπή αυτή οφείλεται στην δράση του ελατηρίου ελέγχου.

Το ρεύμα παράγει θετική ροπή ή ροπή διεγέρσεως ενώ η τάση παράγει αρνητική ροπή ή ροπή αποδιεγέρσεως. Σύμφωνα με την παρακάτω χαρακτηριστική, ο H/N αποστάσεως λειτουργεί για κάθε σημείο που βρίσκεται πάνω από την ευθεία. Αυτά τα σημεία όμως αντιστοιχούν σε καταστάσεις λειτουργίας όπου η σύνθετη αντίσταση $|Z|$ είναι μικρότερη από εκείνη που παριστάνει η χαρακτηριστική. Έκτος όμως από την παρακάτω απεικόνιση της χαρακτηριστικής λειτουργίας του H/N αποστάσεως σε διάγραμμα V-I, χρησιμοποιείται πιο συχνά η απεικόνιση στους άξονες R-X. Το διάγραμμα αυτό καλείται είτε “Διάγραμμα Σύνθετης Αντίστασης” είτε “Διάγραμμα R-X”.

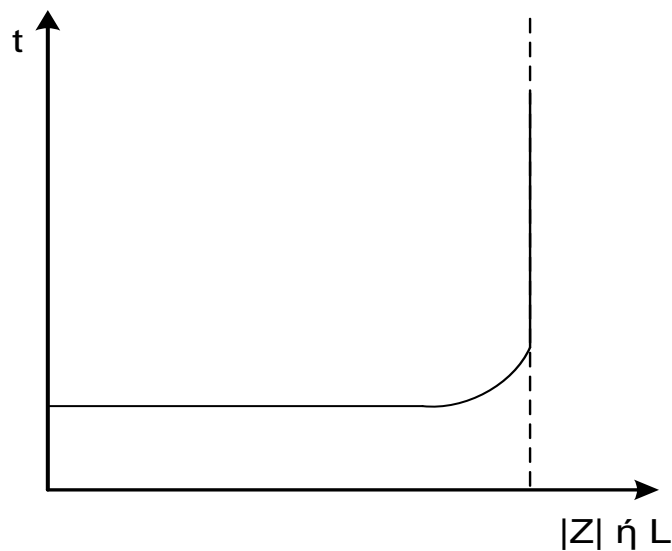


Σχ. 2.2: Χαρακτηριστική λειτουργίας H/N αποστάσεως.

Σε κάθε περίπτωση ο λόγος του μέτρου της τάσης προς το ρεύμα είναι η ακτίνα του κύκλου. Σύμφωνα με όσο έχουν λεχθεί παραπάνω, ο κύκλος του διαγράμματος R-X δείχνει αν ο H/N αποστάσεως λειτουργεί ανάλογα με την σύνθετη αντίσταση $|Z|$ που “βλέπει”. Έτσι, αν μετράται μικρότερο $|Z|$ από την ακτίνα του κύκλου ασκείται θετική ροπή και ο H/N λειτουργεί, ενώ αν το $|Z|$ που μετράται είναι μεγαλύτερο από την ακτίνα τότε ασκείται αρνητική ροπή και δεν λειτουργεί ο H/N.



Σχ. 2.3: Διάγραμμα R-X.



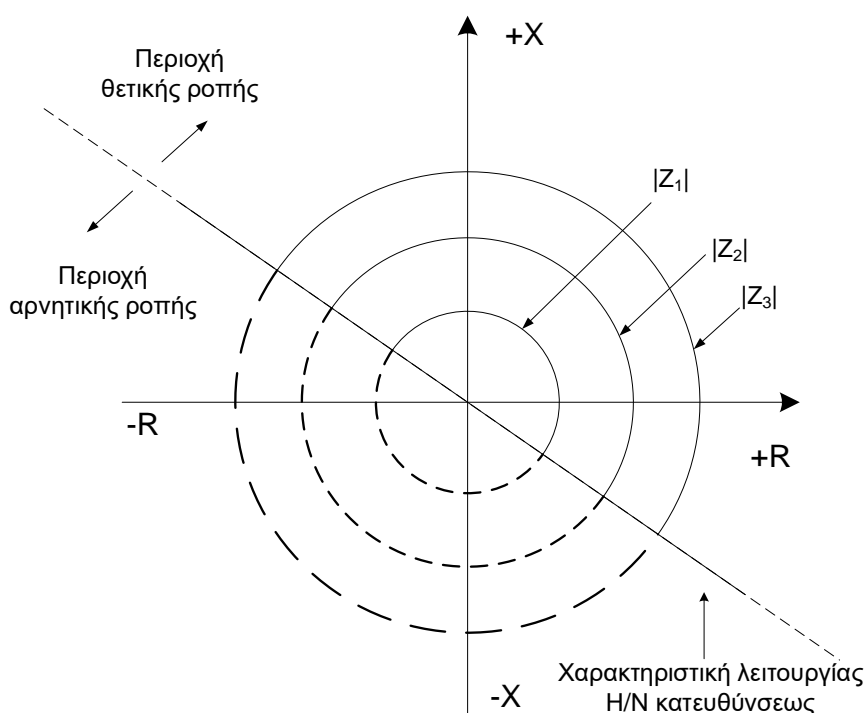
Σχ. 2.4: Προστασία γραμμής με H/N αποστάσεως.

Ένα διάγραμμα χρόνου-σύνθετης αντίστασης για έναν ηλεκτρονόμο αποστάσεως είναι σαν αυτό του Σχ. 2.4. Επειδή η σύνθετη αντίσταση Z είναι δυνατόν να εκφραστεί και από την απόσταση L από το σφάλμα, τότε το διάγραμμα μπορεί να είναι $t-L$, οπότε συμβαδίζει και με την ονομασία H/N αποστάσεως. Το διάγραμμα έχει αυτή την μορφή καθώς ο ηλεκτρονόμος πρέπει να λειτουργεί όταν η $|Z|$ γίνει μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή.

Ένας τυπικός H/N αποστάσεως αποτελείται από ένα στοιχείο κατεύθυνσης, ένα στοιχείο χρόνου και ένα ή περισσότερα στοιχεία σύνθετης αντίστασης [War68]. Στην περίπτωση που προστατεύονται γραμμές μεταφοράς (ΓΜ) θεωρούμε πως ο H/N

αποστάσεως αποτελείται από τρία στοιχεία σύνθετης αντίστασης, ένα στοιχείο κατεύθυνσης και ένα στοιχείο χρόνου. Τα τρία στοιχεία αποστάσεως αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές σύνθετες αντιστάσεις για τις οποίες θα ενεργοποιηθεί ο Η/Ν οι οποίες βέβαια αντιστοιχούν και σε τρεις διαφορετικούς χρόνους λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται τρεις ανεξάρτητες μεταξύ τους ζώνες για τις οποίες ο Η/Ν βλέπει διαφορετική Z και αντιδρά σε διαφορετικούς χρόνους. Συγκεκριμένα, η Πρώτη Ζώνη που αντιστοιχεί σε σύνθετη αντίσταση Z_1 ενεργοποιεί τον Διακόπτη άμεσα και χωρίς καμία καθυστέρηση, ενώ η Δεύτερη και η Τρίτη προκαλούν την καθυστερημένη λειτουργία του Διακόπτη [Masxx].

Η πρώτη ζώνη λειτουργεί συνήθως σε απόσταση περίπου έως το 80%-90% του προστατευόμενου τμήματος γραμμής. Η δεύτερη ζώνη χρησιμοποιείται για σφάλματα που συμβαίνουν κοντά στο απομακρυσμένο άκρο του προστατευόμενου τμήματος και σε απόσταση έως 75% του επόμενου τμήματος ή έως το 120% του προστατευόμενου τμήματος, ενώ η τρίτη ζώνη προσφέρει προστασία δεύτερης βαθμίδας για το επόμενο τμήμα, πέρα από την περιοχή στην οποία αναφέρεται η πρώτη ζώνη, σε απόσταση έως 250% του αρχικού προστατευόμενου τμήματος. Άρα, η πρώτη και η δεύτερη ζώνη συμβάλλουν στην διατήρηση της συνέχειας της λειτουργίας του ΣΗΕ, η τρίτη ζώνη προστατεύει τον εξοπλισμό και τους ανθρώπους [Παπ97], [War68]. Λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις ζώνες ένα Διάγραμμα R-X θα αποτελείται από τρεις κύκλους, έναν για κάθε ζώνη.

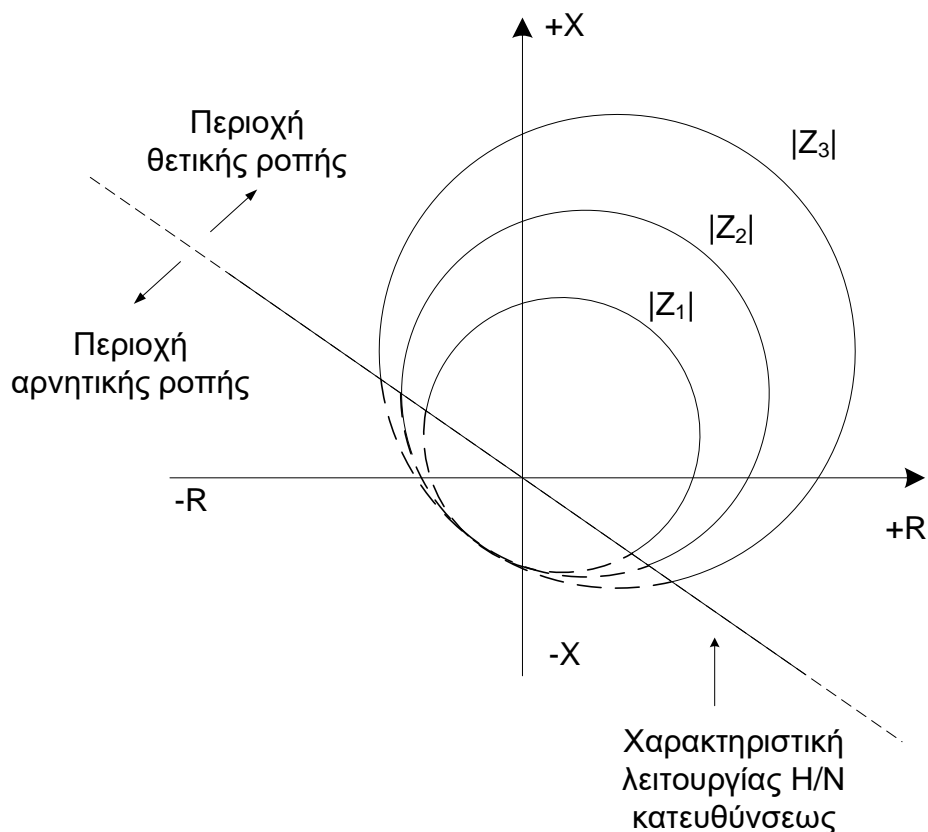


Σχ. 2.5: Χαρακτηριστική λειτουργίας Η/Ν αποστάσεως σύνθετης αντίστασης με τρεις ζώνες.

Στο Σχ. 2.5 τα κέντρα των κύκλων συμπίπτουν με την αρχή των αξόνων και οι Η/Ν αποστάσεως καλούνται «Σύνθετης Αντίστασης».

2.3.2 Τροποποιημένος Η/Ν Αποστάσεως Σύνθετης Αντίστασης

Στην περίπτωση που το κέντρο των κύκλων δεν ταυτίζονται με την αρχή των αξόνων και η χαρακτηριστική λειτουργίας είναι όπως στο Σχ. 2.6, τότε οι Η/Ν ονομάζονται «Τροποποιημένοι Η/Ν Αποστάσεως Σύνθετης Αντίστασης» [Παπ97].

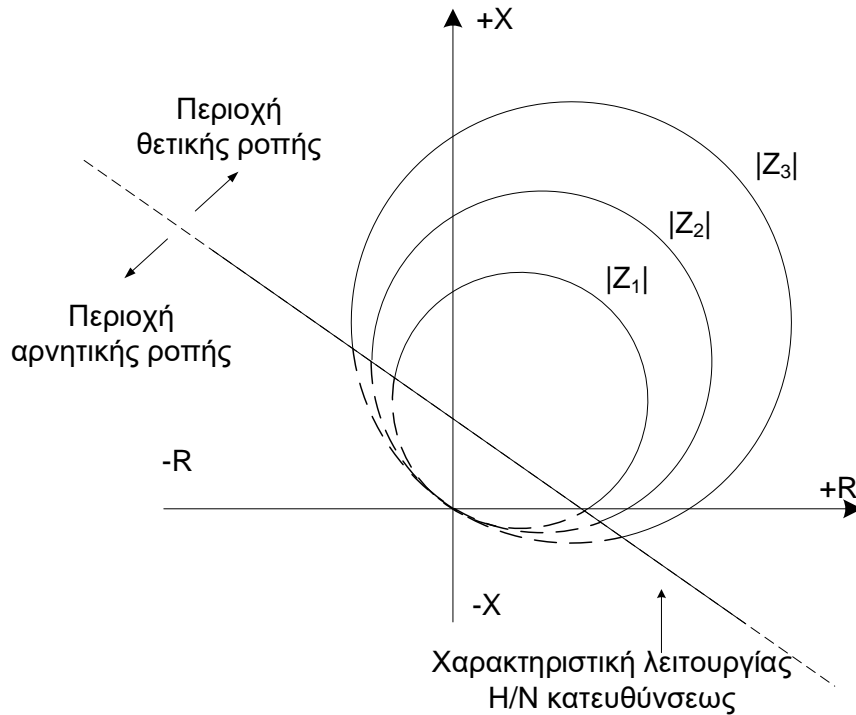


Σχ. 2.6: Χαρακτηριστική λειτουργίας τροποποιημένου Η/Ν αποστάσεως σύνθετης αντίστασης.

Οι τροποποιημένοι Η/Ν αποστάσεως σύνθετης αντίστασης είναι παρόμοιοι με τους Η/Ν Σύνθετης Αντίστασης απλώς έχουν μετακινηθεί οι κύκλοι. Η μετακίνηση αυτή επιτυγχάνεται προσθέτοντας πόλωση. Ουσιαστικά προστίθεται στην τάση μια ποσότητα ανάλογη με το ρεύμα. Έτσι είναι δυνατή η μετακίνηση του κύκλου προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.

2.3.3 Η/Ν τύπου mho

Εάν οι κύκλοι διέρχονται από την αρχή των αξόνων τότε ο ηλεκτρονόμος ονομάζεται «Η/Ν αποστάσεως σύνθετης αντίστασης με κατεύθυνση» ή «Η/Ν Αγωγιμότητας» ή «τύπου mho» [Παπ97]. Η λειτουργία του ηλεκτρονόμου mho είναι αντίστοιχη με την λειτουργία του Η/Ν Σύνθετης Αντίστασης.

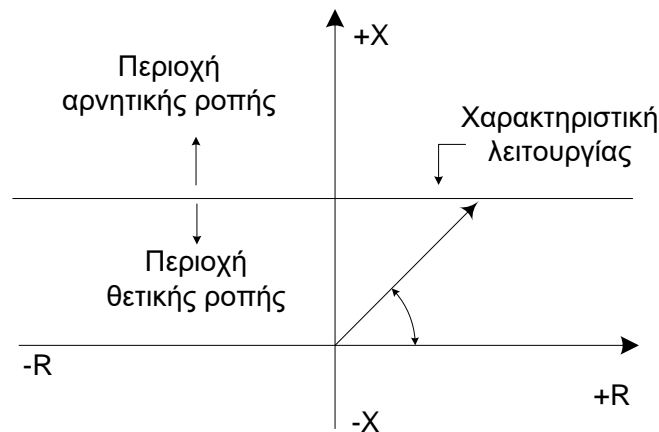


Σχ. 2.7: Χαρακτηριστική λειτουργίας Η/Ν αποστάσεως τύπου mho.

Πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τους Η/Ν αποστάσεως με κυκλική χαρακτηριστική λειτουργίας που εξετάστηκαν, υπάρχουν και τύποι ηλεκτρονόμων με άλλες μορφές, όπως ελλειπτική ή ορθογωνική, πολυγωνική κλπ.

2.3.4 Η/Ν Αποστάσεως Επαγωγικής Αντιδράσεως

Ένας ακόμα τύπος Η/Ν αποστάσεως είναι ο Η/Ν Επαγωγικής Αντιδράσεως, ο οποίος διαθέτει ένα στοιχείο υπερεντάσεως και ένα στοιχείο κατεύθυνσης. Η χαρακτηριστική λειτουργίας είναι αυτή του Σχ. 2.8. Ο ηλεκτρονόμος λειτουργεί όταν η επαγωγική αντίδραση που βλέπει είναι μικρότερη από εκείνη που υποδεικνύει η χαρακτηριστική λειτουργίας του, αδιαφορώντας εντελώς για την τιμή της ωμικής αντίστασης.



Σχ. 2.8: Χαρακτηριστική λειτουργίας Η/Ν Επαγωγικής Αντιδράσεως.

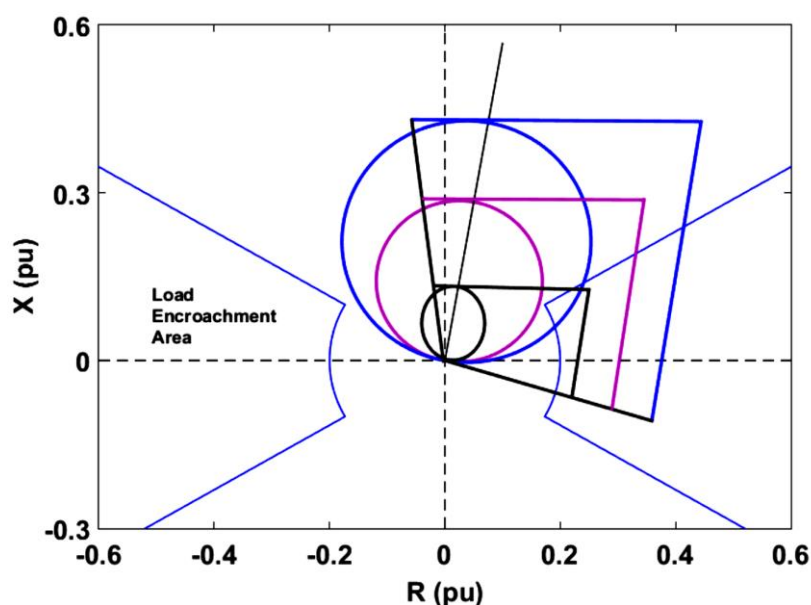
2.4 Παραβίαση Τρίτης Ζώνης

Χαμηλό προφίλ τάσεων και μεγάλες ροές ισχύος είναι τυπικά χαρακτηριστικά εμφάνισης αστάθειας τάσης. Πολλές φορές τέτοιες καταστάσεις μπορεί να αναγνωρισθούν από τους ηλεκτρονόμους αποστάσεως ως απομακρυσμένα βραχυκυκλώματα οδηγώντας τους σε λανθασμένη λειτουργία.

Ανεπιθύμητη λειτουργία των ηλεκτρονόμων αποστάσεως εξαιτίας αστάθειας τάσης οφείλεται στη ζώνη προστασίας με το μεγαλύτερο εύρος. Στην προκειμένη περίπτωση η Τρίτη Ζώνη είναι εκείνη που καλύπτει μεγαλύτερο μέρος δικτύου, καθώς είναι επιφορτισμένη με την παροχή δευτερεύουσας προστασίας σε γειτονικά τμήματα του δικτύου [NSS14].

Μη ελεγχόμενες αποσυνδέσεις γραμμών εξαιτίας λανθασμένης λειτουργίας των ηλεκτρονόμων αποστάσεως πρέπει να αποφεύγονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης του συστήματος καθώς μπορεί να οδηγήσουν σε πολλαπλές διακοπές τροφοδότησης όταν έχουν εξαντληθεί όλα τα περιθώρια παραγωγής. Η λειτουργία αυτή των ηλεκτρονόμων αποστάσεως είναι ανεπιθύμητη και μάλιστα επιδεινώνει την κατάσταση του δικτύου το οποίο ήδη λειτουργεί κοντά στα όριά του και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για blackout [JD00], [NMV18].

Οι πιο σύγχρονοι ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι παρέχουν συνάρτηση παραβίασης φορτίου (load encroachment function) ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αποσυνδέσεις γραμμών εξαιτίας αυξημένων ροών σε αυτές. Στο Σχ. 2.9 παρουσιάζονται η περιοχή παραβίασης φορτίου, οι κύκλοι mho και οι πολυγωνικές χαρακτηριστικές ενός ηλεκτρονόμου αποστάσεως.



Σχ. 2.9: Χαρακτηριστική Παραβίασης Φορτίου.

Όσο η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση από τον ηλεκτρονόμο αποστάσεως είναι εντός της περιοχής παραβίασης φορτίου, τότε απενεργοποιείται η εντολή λειτουργίας του ηλεκτρονόμου, δηλαδή δεν αποσυνδέεται κάποια γραμμή. Ωστόσο, για μία ζώνη προστασίας που καλύπτει μεγάλο εύρος περιοχής, όπως για παράδειγμα η Τρίτη Ζώνη,

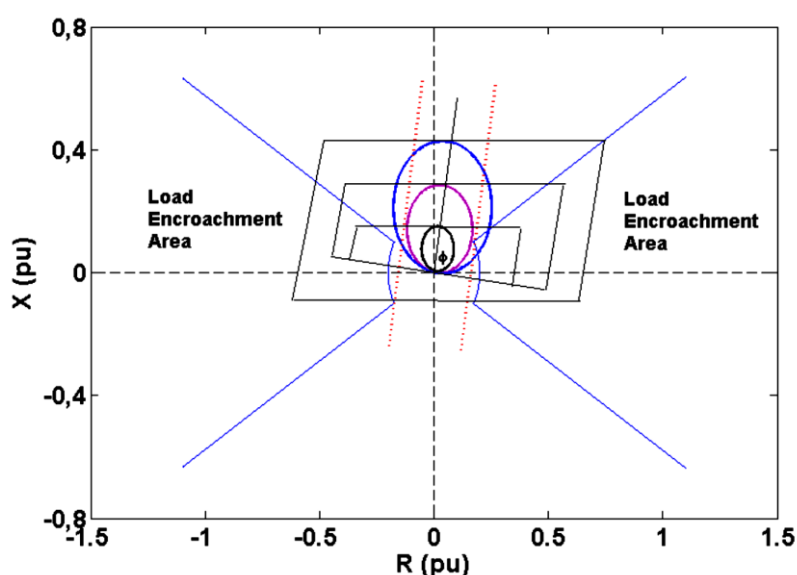
μπορεί να προκληθεί ανεπιθύμητη μη λειτουργία του ηλεκτρονόμου σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος όταν αυτό συμβεί εντός της περιοχής όπου είναι απενεργοποιημένη η αποσύνδεση των γραμμών.

Επειδή η λειτουργία της Τρίτης Ζώνης σε συνθήκες μεγάλης φόρτισης έχει οδηγήσει σε πολλά blackout τα τελευταία χρόνια, προτείνονται κάποιες προσθήκες ή/και τροποποιήσεις ώστε να βελτιωθεί η αντίδραση του συστήματος και να αποφευχθούν τα φαινόμενα κατάρρευσης τάσης. Στις προτάσεις αυτές συγκαταλέγονται οι Παρωπίδες (*Blinders*), η Τροποποίηση του Σχήματος των Χαρακτηριστικών (*Characteristic Shape Modification*), η Στροφή του Σχήματος των Χαρακτηριστικών (*Characteristic Shape Rotation*) και η Προσαρμογή Εύρους Τρίτης Ζώνης (*Third Zone Reach Adjustment*) [NSS14].

❖ Παρωπίδες (*Blinders*)

Οι παρωπίδες είναι ευθείες γραμμές (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές Σχ. 2.10) που έχουν προκύψει από την στροφή της χαρακτηριστικής ενός ηλεκτρονόμου Αποστάσεως Επαγωγικής Αντιστάσεως (βλ. ενότητα 2.3.4). Οι παρωπίδες περιορίζουν την λειτουργία του ηλεκτρονόμου αποστάσεως σε μία ζώνη. Αφού τεθούν οι παρωπίδες, το τμήμα της 3^{ης} ζώνης που θα προκαλέσει τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου ορίζεται από την τομή των παρωπίδων και της 3^{ης} ζώνης. Ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται μόνο όταν η μετρούμενη/φαινόμενη σύνθετη αντίσταση βρίσκεται εντός της απαγορευμένης περιοχής.

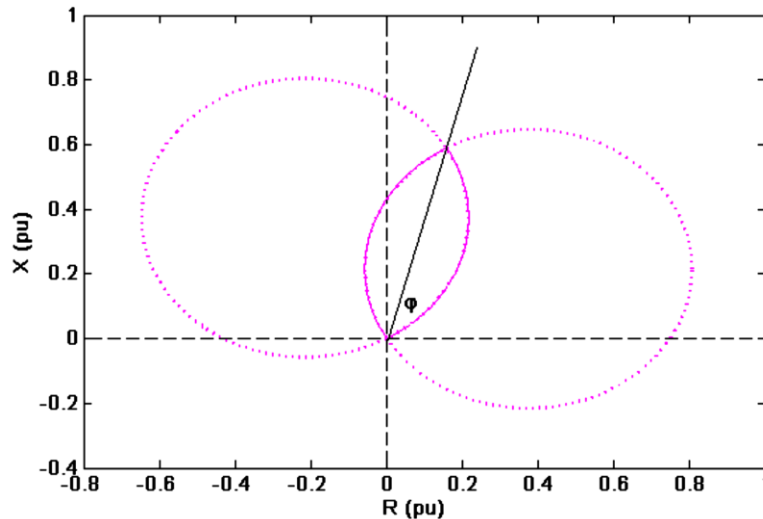
Αν αντί των κύκλων mho οι ηλεκτρονόμοι έχουν πολυγωνικές χαρακτηριστικές, η παραπάνω ρύθμιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μειώνοντας το ωμικό και επαγωγικό εύρος κάθε ζώνης ώστε να συμπίπτουν με τις επιθυμητές παρωπίδες.



Σχ. 2.10: Κύκλοι mho, πολυγωνικές χαρακτηριστικές, περιοχές παραβίασης φορτίου και παρωπίδες.

❖ Τροποποίηση Σχήματος Χαρακτηριστικών

Στην περίπτωση αυτή τροποποιείται η τυπική χαρακτηριστική 3^{ης} Ζώνης και λαμβάνει φακοειδή μορφή ώστε να περιορίσει το εύρος κάλυψης του ηλεκτρονόμου σε πιθανά φορτία. Η φακοειδής μορφή προκύπτει από την τομή δύο παρόμοιων κύκλων mho (Σχ. 2.11).



Σχ. 2.11: Φακοειδής χαρακτηριστική ηλεκτρονόμου.

❖ Στροφή Σχήματος Χαρακτηριστικών

Οι κύκλοι mho στρέφονται σε κατάλληλη γωνία, στην αντίθετη κατεύθυνση κατά την οποία η 3^η Ζώνη προσεγγίζεται από την πορεία της μετρούμενης σύνθετης αντίστασης.

❖ Προσαρμογή Εύρους Τρίτης Ζώνης

Το μέτρο αυτό αποσκοπεί στη μείωση του εύρους της χαρακτηριστικής 3^{ης} Ζώνης δίχως να τροποποιηθεί η γωνία ροπής του ηλεκτρονόμου. Ειδική περίπτωση αποτελεί η απενεργοποίηση της τρίτης ζώνης η οποία περιορίζεται τόσο ώστε να συμπίπτει με την δεύτερη ζώνη. Σε αυτή την περίπτωση μόνο η πρώτη και η δεύτερη ζώνη είναι ενεργές.

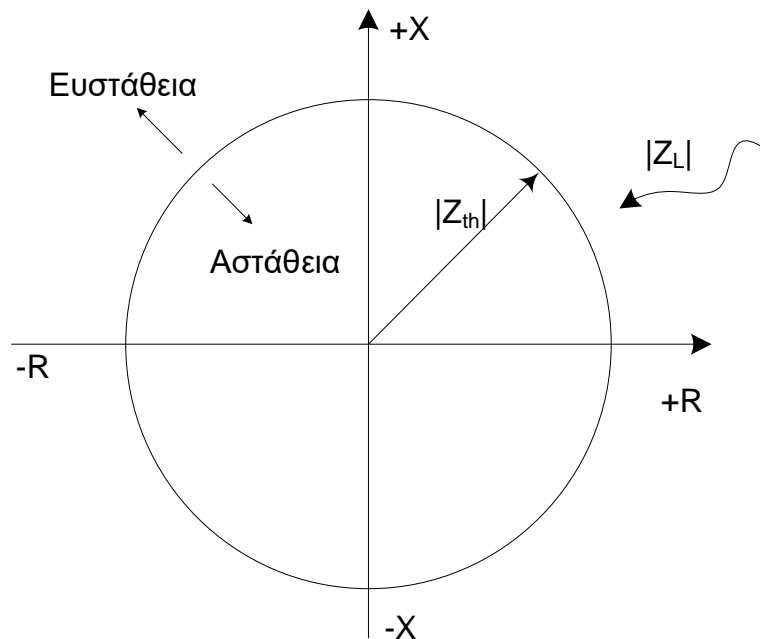
2.5 Μετρούμενη Σύνθετη Αντίσταση και Ευστάθεια Τάσης

Όπως αναλύθηκε στην ενότητα 1.3.2 αν θεωρήσουμε ένα φορτίο με σταθερό συντελεστή ισχύος, τότε εύκολα αποδεικνύεται ότι για Μέγιστη Μεταφορά Ισχύος πρέπει το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του φορτίου να ισούται με μέτρο της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thévenin, που αντιστοιχεί στο ανάντη δίκτυο ως προς το φορτίο. Το σημείο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος είναι επίσης και το όριο της ευστάθειας τάσης, καθώς πέρα από αυτό το σημείο οποιαδήποτε αύξηση φορτίου (αύξηση της ζήτησης) δεν θα συνοδεύεται από αυξημένη απορρόφηση ισχύος.

Διάφορες μέθοδοι υπολογισμού του ανάντη ισοδύναμου κυκλώματος Thévenin δόθηκαν στην ενότητα 1.5.

Το ζητούμενο είναι όταν η μέτρηση γίνεται μακριά από το φορτίο (όπως στην ενότητα 1.3.4) να προσδιοριστούν τόσο το φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, όσο και η σύνθετη αντίσταση της κατάντη γραμμής ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των μέτρων των αντιστάσεων γραμμής και φορτίου σύμφωνα με το Θεώρημα Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Για αρχή θεωρούμε ότι γνωρίζουμε το πραγματικό ισοδύναμο Thévenin μέχρι το φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.

Ακολουθώντας τη λογική του Διαγράμματος R-X και των κύκλων των ηλεκτρονόμων αποστάσεως, το ισοδύναμο Thévenin μπορεί να απεικονιστεί σαν ένας κύκλος με ακτίνα $|Z_{th}|$ και κέντρο την αρχή των αξόνων. Ο κύκλος αυτός ονομάζεται κύκλος Thévenin και οι ιδιότητές του είναι αντίστοιχες με τη λειτουργία του ηλεκτρονόμου αποστάσεως συνθέτης αντίστασης [VBN99].



Σχ. 2.12: Κύκλος Thévenin και αύξηση του φορτίου προς τον κύκλο.

Συγκεκριμένα, ο κύκλος αναφέρεται σε τρεις διαφορετικές περιοχές. Αν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου είναι εκτός του κύκλου τότε παρατηρείται ευστάθεια τάσης. Αυτό συμβαίνει καθώς έξω από τον κύκλο η σύνθετη αντίσταση του φορτίου (Z_L) είναι μεγάλη. Προς αποφυγή σύγχυσης πρέπει να σημειωθεί πως επειδή θεωρούμε ότι τα φορτία συνδέονται παράλληλα, μεγάλο Z_L αντιστοιχεί σε μικρό φορτίο, ενώ μικρό Z_L αντιστοιχεί σε μεγάλο φορτίο. Για την αγωγιμότητα προφανώς ισχύει το αντίστροφο, δηλαδή μεγάλη αγωγιμότητα αντιστοιχεί σε μεγάλο φορτίο. Αυξανόμενου του φορτίου η Z_L κινείται προς τον κύκλο Thévenin. Η δεύτερη περιοχή είναι πάνω στην περιφέρεια του κύκλου, όπου $|Z_{th}| = |Z_L|$ και άρα βρισκόμαστε ακριβώς στο όριο ευστάθειας τάσης. Αν το φορτίο αυξηθεί περαιτέρω, τότε το $|Z_L|$ βρίσκεται εντός του κύκλου και έχει επέλθει αστάθεια τάσης. Επίσης, είναι δυνατόν να αλλάξει η ακτίνα

του κύκλου Thévenin λόγω κάποιας αλλαγής στο σύστημα μεταφοράς και παραγωγής, όπως π.χ. εξαιτίας της απώλειας μιας γραμμής μεταφοράς ή μιας υπερδιέγερσης γεννήτριας. Συνήθως λοιπόν, η αστάθεια τάσης μπορεί να οφείλεται τόσο σε αύξηση του φορτίου όσο και σε αδύναμο δίκτυο μεταφοράς.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το ανάντη ισοδύναμο Thévenin δεν είναι το ολικό Thévenin που συνδέεται στο φορτίο όταν οι μετρήσεις γίνονται σε ενδιαμέσο ζυγό. Από εδώ και στο εξής θα καλούμε Z_1 το ανάντη Thévenin και τη φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z_{app} , όπου

$$Z_{app} = Z_2 + Z_L \quad (2.1)$$

και άρα

$$Z_L = Z_{app} - Z_2 \quad (2.2)$$

όπου Z_2 είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς που παρεμβάλλεται μεταξύ του Z_1 και του φορτίου.

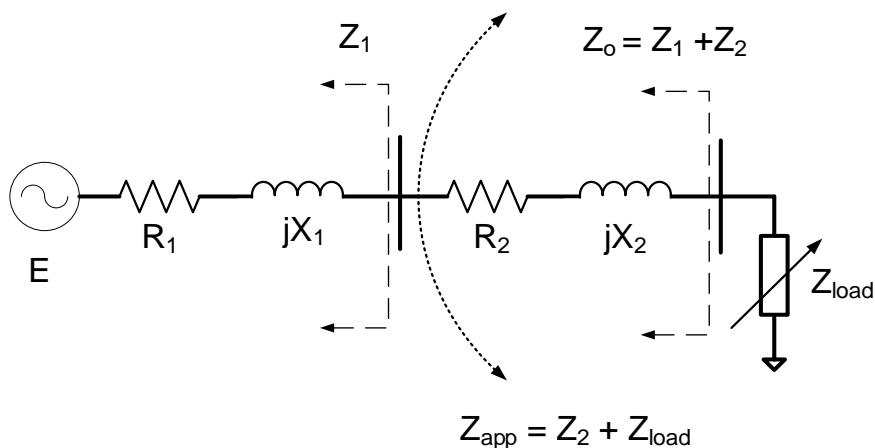
Αν ονομάσουμε το συνολικό πραγματικό Thévenin που συνδέεται με το φορτίο Z_o , τότε:

$$Z_o = Z_1 + Z_2 \quad (2.3)$$

ενώ το ανάντη υπολογισμένο Thévenin είναι:

$$Z_1 \quad (2.4)$$

Στο απλό ακτινικό δίκτυο του Σχ. 2.13 φαίνονται οι εν λόγω αντιστάσεις.



Σχ. 2.13: Απλό ακτινικό δίκτυο.

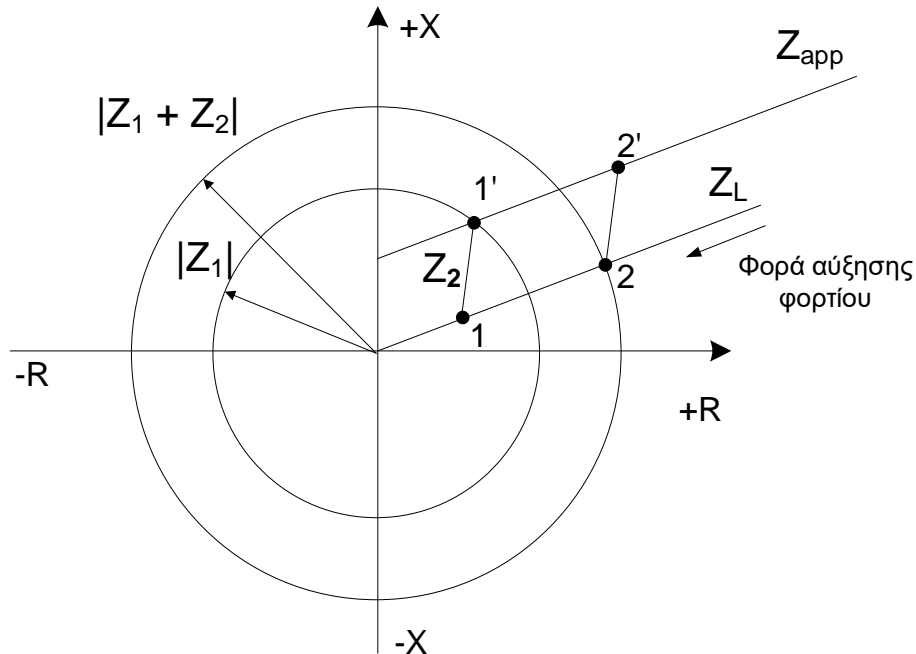
Η ορθή ένδειξη αστάθειας είναι:

$$|Z_L| = |Z_1 + Z_2| \quad (2.5)$$

ενώ η εσφαλμένη:

$$|Z_{app}| = |Z_1| \quad (2.6)$$

Οι δυο αυτές τιμές διαφέρουν. Δηλαδή μέχρι τώρα είχαμε αναγνώριση αστάθειας που είναι όμως μετατοπισμένη εγγύτερα προς την αρχή των αξόνων από ότι είναι το πραγματικό σημείο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος. Για να γίνει κατανοητό αυτό ας χρησιμοποιήσουμε για παράδειγμα ένα φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.



Σχ. 2.14: Εσφαλμένο (1) και πραγματικό (2) όριο ευστάθειας τάσης.

Το όριο ευστάθειας τάσης αν δεν γίνει η διόρθωση του Thévenin είναι στο σημείο 1 της ευθείας της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης και αντιστοιχεί στο σημείο 1 του φορτίου, ενώ με τη διόρθωση το όριο είναι στο σημείο 2 της ευθείας του φορτίου. Η απόσταση μεταξύ των σημείων είναι αρκετά μεγάλη για να αρκεστούμε στην εκτίμηση αστάθειας μέσω της Z_1 και της Z_{app} . Εκτός των άλλων με το μη διορθωμένο Thévenin ήδη βρισκόμαστε σε ασταθή κατάσταση και είναι πιθανό οι δράσεις για αποφυγή μιας πιθανής κατάρρευσης τάσης να είναι αδύνατες ελλείψει επαρκούς χρόνου αντίδρασης. Πράγματι, το φορτίο σε αυτή την περίπτωση έχει ήδη αυξηθεί κατά πολύ από την τιμή του στο πραγματικό όριο ευστάθειας τάσης. Αντίθετα, με το πραγματικό Thévenin το οποίο είναι $Z_1 + Z_2$ μπορεί να προσδιορισθεί με καλύτερη ακρίβεια το όριο ευστάθειας τάσης γεγονός που δίνει τη δυνατότητα για σωστότερους χειρισμούς όταν οι συνθήκες που επικρατούν οδηγούν προς την αστάθεια.

Για να είναι ευσταθές το σύστημα θα πρέπει να ισχύει:

$$|Z_L| \geq |Z_1 + Z_2| \quad (2.7)$$

όπου

$$|Z_L| = |Z_{app} - Z_2|$$

οπότε η συνθήκη ευστάθειας εκφράζεται ως εξής:

$$|Z_{app} - Z_2| \geq |Z_1 + Z_2| \quad (2.8)$$

Εφόσον λοιπόν είναι γνωστό το πραγματικό \mathbf{Z}_2 θα μπορούσε αυτή η τιμή να χρησιμοποιηθεί για να γίνει η διόρθωση τόσο του \mathbf{Z}_{app} όσο και του \mathbf{Z}_1 ώστε όταν παραβιάζεται η (2.8) να δίνεται συναγερμός και όχι όταν $|\mathbf{Z}_{app}| = |\mathbf{Z}_1|$. Με αυτήν την τεχνική καλό θα ήταν όταν η διαφορά

$$\delta = |\mathbf{Z}_{app} - \mathbf{Z}_2| - |\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2|$$

γίνει μικρότερη από μια τιμή να παράγεται σήμα προειδοποίησης ότι προσεγγίζεται το όριο ευστάθειας, δηλαδή να μην περιμένουμε μέχρι η διαφορά να γίνει μηδέν που σημαίνει πως βρισκόμαστε στο όριο. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται πολύτιμος χρόνος για διορθωτικές ενέργειες.

Κεφάλαιο 3 Εκτίμηση Συντελεστή Ισχύος και Πυκνωτή Αντιστάθμισης

Στην αναγνώριση της αστάθειας τάσης όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.3 χρησιμοποιείται κατά κόρον η προσαρμογή αντιστάσεων που απορρέει από το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Για να βρεθεί το πραγματικό όριο αστάθειας πρέπει να συγκρίνεται η σύνθετη αντίσταση φορτίου με την συνολική αντίσταση του δικτύου από την πηγή έως το φορτίο. Επειδή είναι πρακτικά αδύνατο οι μετρήσεις να γίνονται σε κάθε μεμονωμένο ζυγό φορτίου, οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος λαμβάνονται συνήθως σε κάποιον ενδιάμεσο ζυγό. Στην προκειμένη περίπτωση θα πρέπει να γίνει διαχωρισμός της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης από τον ενδιάμεσο ζυγό σε σύνθετη αντίσταση φορτίου και σύνθετη αντίσταση δικτύου. Στην παρούσα εργασία το κατάντη δίκτυο θεωρείται ακτινικό.

Σε αυτό το κεφάλαιο προσδιορίζεται ο συντελεστής ισχύος του φορτίου με βάση μετρήσεις που λαμβάνονται σε ενδιάμεσο ζυγό και με βάση τη γνώση αυτή εκτιμάται και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Στις περιπτώσεις που ακολουθούν γίνονται εκτιμήσεις τόσο απουσία όσο και παρουσία θορύβου στις μετρήσεις των PMU, ενώ επίσης εξετάζεται και η περίπτωση στατιστικά μεταβαλλόμενου συντελεστή ισχύος φορτίου.

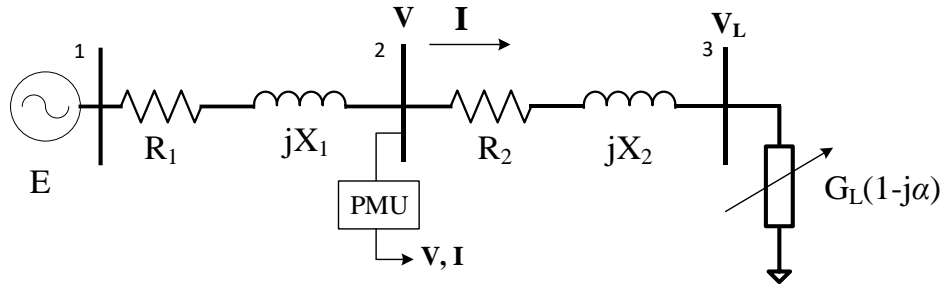
3.1 Ενδεικτικό Δίκτυο

Η ανάλυση που ακολουθεί στηρίζεται στο ακτινικό δίκτυο του Σχ. 3.1. Πρόκειται για ένα απλό ακτινικό δίκτυο με απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος.

Οι ωμικές απώλειες δεν μπορεί να θεωρούνται αμελητέες σε ένα δίκτυο μεταφοράς το οποίο αντιπροσωπεύει μια μεγάλη περιοχή. Επιπλέον, στα δίκτυα διανομής οι ωμικές αντιδράσεις είναι σημαντικές και δεν μπορούν να αμεληθούν. Για αυτό επιχειρείται αναγνώριση του κατάντη δικτύου με απώλειες.

Στον ζυγό 2 θεωρείται ότι είναι εγκατεστημένο ένα PMU (Μονάδα Μέτρησης Φασισθετών) που παρέχει τις απαιτούμενες μετρήσεις τάσης και ρεύματος.

Η ισοδύναμη πηγή τάσης όπως και οι αντιδράσεις και αντιστάσεις των γραμμών θεωρείται ότι παραμένουν αμετάβλητες σε αντίθεση με το φορτίο το οποίο είναι μεταβλητής αγωγιμότητας με σταθερό συντελεστή ισχύος (Σ.Ι.).



Σχ. 3.1: Ακτινικό δίκτυο με απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος

Οι παράμετροι του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίν. 3.1.

Πίν. 3.1: Παράμετροι ακτινικού ενδεικτικού δικτύου.

E	R ₁	X ₁	R ₂	X ₂
1,05 α.μ.	0,05 α.μ.	0,15 α.μ.	0,03 α.μ.	0,20 α.μ.

3.2 Εκτίμηση Συντελεστή Ισχύος φορτίου

Στην ενότητα αυτή και στις ακόλουθες υποενότητες εξετάζεται ποιες πληροφορίες μπορούν να αντληθούν απευθείας από τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε έναν οποιονδήποτε ζυγό διαφορετικό από τον ζυγό του φορτίου.

Είναι προφανές πως από τον ζυγό 2 προσδιορίζεται μια φαινόμενη αντίσταση, Z_{app} :

$$Z_{app} = Z_2 + Z_L \quad (3.1)$$

η οποία είναι το άθροισμα της σύνθετης αντίστασης της γραμμής:

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (3.2)$$

και του φορτίου:

$$Z_L = R_L(1 + j\alpha) \quad (3.3)$$

όπου

$$\alpha = \tan\varphi \quad (3.4)$$

και

$$\varphi = \cos^{-1} \Sigma. I. \quad (3.5)$$

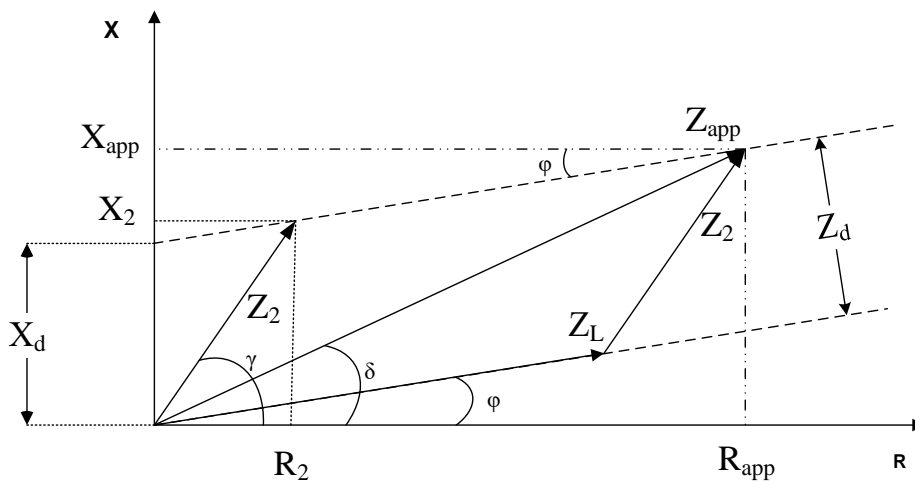
Θεωρώντας γενικά πως η γραμμή δεν παρουσιάζει μεταβολές, για οποιαδήποτε τιμή φορτίου η αντίστοιχη φαινόμενη αντίσταση από τον ζυγό θα είναι τελικά μετατοπισμένη από το φορτίο κατά ένα διάνυσμα:

$$\mathbf{Z}_2 = R_2 + jX_2 \quad (3.6)$$

Αφού το φορτίο είναι σταθερού συντελεστή ισχύος, δηλαδή ισχύει

$$X_L = \alpha R_L \quad (3.7)$$

η αντίστασή του κείται πάνω σε ευθεία γραμμή, τότε και η φαινόμενη αντίσταση θα βρίσκεται πάνω σε μία ευθεία παράλληλη με εκείνη του φορτίου. Έτσι, ακόμα και χωρίς καμία γνώση για το κατάντη τμήμα της γραμμής είναι δυνατόν να προσδιορισθεί ο σταθερός συντελεστής ισχύος του φορτίου. Οι διανυσματικές σχέσεις των αντιστάσεων και οι παράλληλες ευθείες φορτίου και μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχ. 3.2.



Σχ. 3.2: Η διανυσματική σχέση Z_{app} , Z_L και Z_2 .

Συνεπώς όπως φαίνεται από το Σχ. 3.2 οι μετρήσεις σε οποιονδήποτε ενδιάμεσο ζυγό επιτρέπουν τον προσδιορισμό της κλίσης της ευθείας και άρα του Σ.Ι. του φορτίου υπό την υπόθεση ότι αυτός είναι σταθερός.

Εάν υποτεθεί επιπλέον η σχέση μεταξύ του πραγματικού και φανταστικού μέρους της σύνθετης αντίστασης του κατάντη δικτύου

$$\lambda = \frac{R_2}{X_2} = \frac{1}{\tan \gamma} \quad (3.8)$$

είναι δυνατός τόσο ο προσδιορισμός της Z_2 όσο και της αντίστασης φορτίου Z_L .

3.3 Μεθοδολογία Προσδιορισμού και Αποτελέσματα

Δεδομένου ότι στο επίπεδο R-X οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης σχηματίζουν ευθεία γραμμή, όταν έχει γίνει η υπόθεση σταθερού Σ.Ι., είναι εύλογο να αναζητηθεί η κατάλληλη μέθοδος με την οποία μπορούν να συσχετισθούν τα σημεία των μετρήσεων με μια ευθεία γραμμή.

Το πρόβλημα της εύρεσης μιας καμπύλης και εν προκειμένω της ευθείας που να «ταιριάζει καλύτερα» στα δεδομένα ή στις μετρήσεις καλείται προσαρμογή καμπύλης. Οι απλές καμπύλες, όπως η ευθεία, είναι πολυώνυμα διαφόρων βαθμών. Συνεπώς η προσαρμογή καμπυλών περιλαμβάνει την εύρεση των πολυωνύμων που προσαρμόζονται καλύτερα στα δεδομένα. Αν πρόκειται για πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού της μορφής $ax^2 + bx + c$, τότε πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των a, b και c . Στην περίπτωση της εύρεσης της βέλτιστης ευθείας που περνάει από τα σημεία πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των τιμών a και b του πολυωνύμου $ax + b$ [Att17].

Το MATLAB διαθέτει μια συνάρτηση που προσδιορίζει τους ανωτέρω πολυωνυμικούς συντελεστές και καλείται `polyfit`. Η συνάρτηση αυτή βρίσκει τους συντελεστές του πολυωνύμου ενός συγκεκριμένου βαθμού το οποίο προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ελαχίστων τετραγώνων. Στη συνάρτηση δίνονται τρία ορίσματα: τα δύο διανύσματα που περιέχουν τα δεδομένα και ο βαθμός του επιθυμητού πολυωνύμου.

Αφού παραχθούν οι τάσεις και τα ρεύματα στη συνέχεια γίνεται δειγματοληψία με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνονται υπόψη μόνο μετρήσεις, οι οποίες να διαφέρουν επαρκώς μεταξύ τους. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με την σύγκριση της τρέχουσας φαινόμενης σύνθετης αντίστασης με την τελευταία αποδεκτή, όπου το μέτρο της διαφοράς τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,1 α.μ.:

$$|Z_k - Z_{k+1}| > 0,1 \text{ α.μ.} \quad (3.9)$$

Όπως φάνηκε στην προηγούμενη ενότητα οι μετρήσεις σύνθετης αντίστασης Z_{app} δεν επαρκούν για τον διαχωρισμό της σε σύνθετη αντίσταση φορτίου και γραμμής. Απαιτείται επιπλέον η γνώση ή η εκτίμηση του λόγου $\lambda = R_2/X_2$ της ωμικής αντίστασης προς την επαγωγική αντίδραση της γραμμής.

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου, τον λόγο λ και ότι η ευθεία του φορτίου διέρχεται από την αρχή των αξόνων τότε το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της σύνθετης αντίστασης του φορτίου μπορούν να προσδιοριστούν.

Συγκεκριμένα για ένα ζευγάρι φαινόμενης αντίστασης και αντίστασης φορτίου η κλίση της ευθείας που ενώνει τα αντίστοιχα σημεία είναι:

$$\tan\gamma = \frac{1}{\lambda} = \frac{X_{app} - X_L}{R_{app} - R_L} \quad (3.10)$$

και άρα

$$R_{app} - R_L = \lambda(X_{app} - X_L) \quad (3.11)$$

και αφού για το φορτίο ισχύει:

$$X_L = aR_L \quad (3.12)$$

τότε η σχέση (3.10) γράφεται ως εξής:

$$R_L = \frac{R_{app} - \lambda X_{app}}{1 - \lambda\alpha} \quad (3.13)$$

Η κατάντη γραμμή μπορεί να προσδιορισθεί σύμφωνα με τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Οι ευθείες στο επίπεδο R-X των μετρήσεων (φαινόμενη αντίσταση) και του φορτίου δεν εξαρτώνται από την επιλογή του λόγου λ και ως εκ τούτου η απόσταση $|Z_d|$ μεταξύ των ευθειών είναι σταθερή και ανεξάρτητη του λόγου, άρα και η απόσταση X_d που είναι η προβολή της στον άξονα x. Για την $|Z_d|$ ισχύει:

$$|Z_d| = |Z_{app}| \sin(\delta - \varphi) \quad (3.14)$$

ενώ επίσης

$$X_d = X_{app} - \alpha R_{app} \quad (3.15)$$

- Η απόσταση X_o προσδιορίζεται από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων αφού αποτελεί τον σταθερό όρο του διώνυμου.
- Από την γεωμετρία του Σχ. 3.2 είναι:

$$X_2 = \alpha R_2 + X_d \quad (3.16)$$

Επίσης αφού για την κατάντη γραμμή ισχύει:

$$R_2 = \lambda X_2$$

τότε:

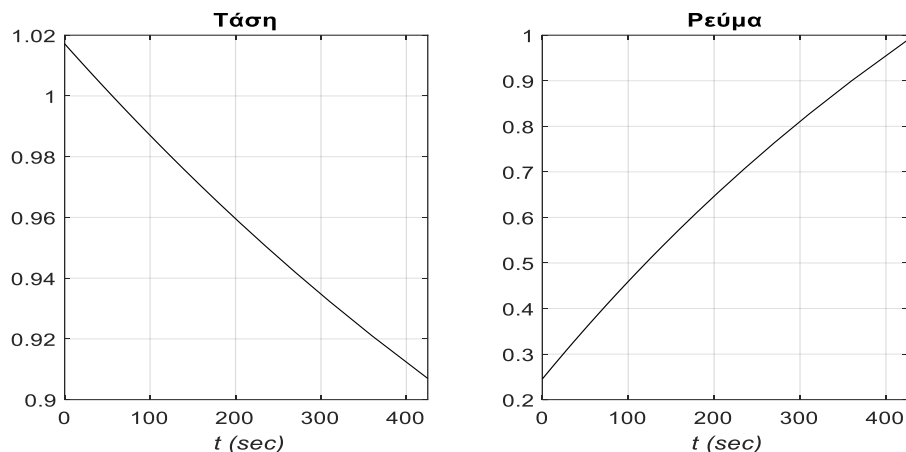
$$X_2 = \alpha \lambda X_2 + X_d$$
$$X_2 = \frac{X_d}{1 - \lambda\alpha} = \frac{X_{app} - \alpha R_{app}}{1 - \lambda\alpha} \quad (3.17)$$

Από την τελευταία σχέση είναι φανερό πώς όταν ο ΣΙ του φορτίου είναι μοναδιαίος ($\alpha = 0$) η αντίδραση X_2 ισούται με τον σταθερό όρο της εξίσωσης της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων.

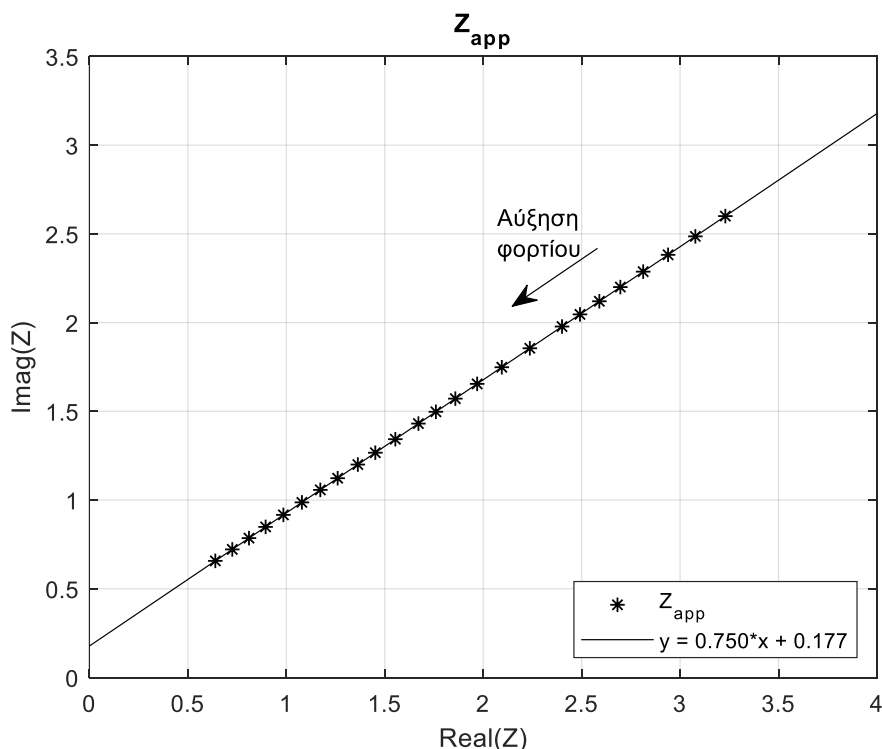
3.3.1 Φορτίο Επαγωγικού Συντελεστή Ισχύος

Εξετάζεται το δίκτυο του Σχ. 3.1 με τις δοθείσες παραμέτρους (Πίν. 3.1) οι οποίες θεωρούνται σταθερές. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνει μόνο η ωμική αγωγιμότητα G_L του φορτίου, βαθμιαία από 0,2 α.μ. έως 1,2 α.μ. με βήμα 0,01 α.μ. κάθε 5 sec, ενώ ο ΣΙ είναι σταθερός 0,8 επαγωγικός ($a=\tan\varphi=0,75$).

Οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος, που αποτελούν την βάση της ανάλυσης, δίνονται στο Σχ. 3.3 και δεν περιέχουν θόρυβο.



Σχ. 3.3: Οι μετρήσεις του PMU.



Σχ. 3.4: Η ευθεία της Z_{app} .

Στο Σχ. 3.4 απεικονίζεται η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z_{app} από τον ζυγό, ενώ επιπλέον έχει χαραχθεί και η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που αντιστοιχεί σε αυτά τα σημεία.

Συγκεκριμένα, η εξίσωση της ευθείας των μετρήσεων είναι:

$$y = 0,750x + 0,177$$

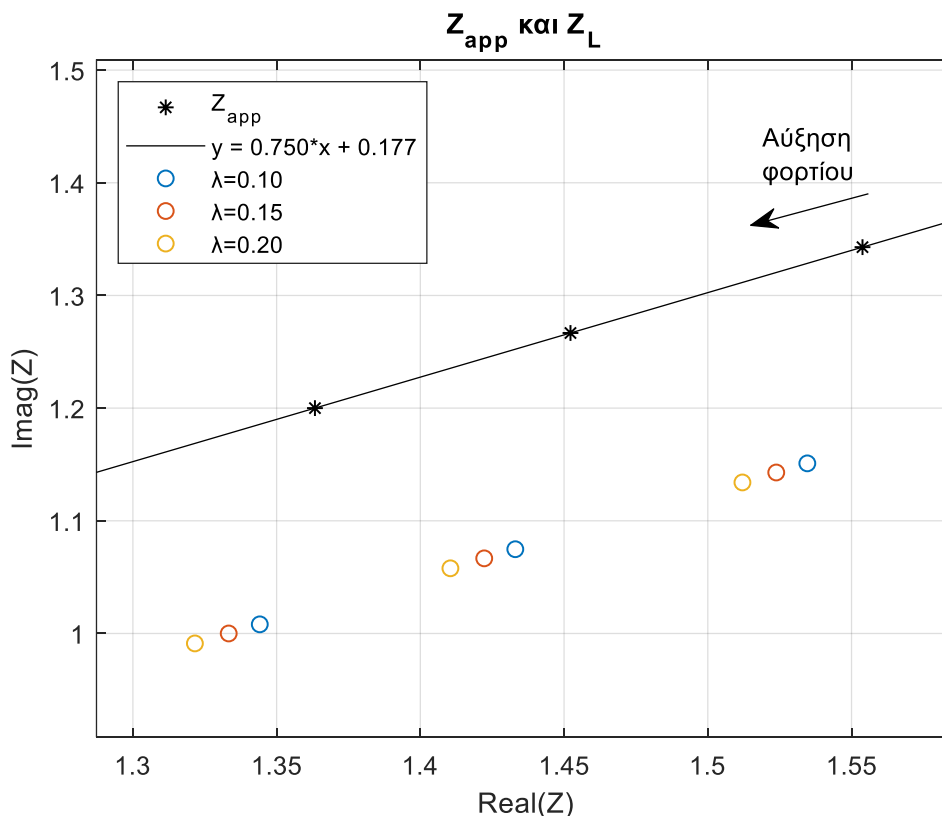
όπου ο συντελεστής 0,750 αντιστοιχεί στο $\alpha = \tan\varphi$ ενώ ο σταθερός όρος είναι $X_0 = 0,177$. Τόσο από το σχήμα όσο και από την εξίσωση της ευθείας συμπεραίνεται ότι είναι δυνατό από τις μετρήσεις να προσδιορισθεί ακριβώς ο ΣΙ του φορτίου.

Αφού έχει προσδιορισθεί ο ΣΙ και η σταθερή απόσταση X_0 , είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάντη γραμμής ανάλογα με τον λόγο λ που επιλέγεται. Στον Πίν. 3.2 παρουσιάζονται οι παράμετροι της κατάντη γραμμής για διαφορετικούς λόγους λ . Ο πραγματικός λόγος είναι $\lambda = 0,15$ και όπως είναι αναμενόμενο τα σφάλματα είναι μικρότερα σε σχέση με τους λανθασμένους λόγους. Τα σφάλματα είναι μεγάλα για την αντίσταση της γραμμής όταν χρησιμοποιείται εσφαλμένος λόγος γραμμής.

Πίν. 3.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.

λ	ΣI	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	$\frac{\Delta \Sigma I}{\Sigma I} \%$	$\frac{\Delta X_2}{X_2} \%$	$\frac{\Delta R_2}{R_2} \%$
0,1	0,800	0,1914	0,0191	0,0000	-4,3243	-36,2162
0,15		0,1994	0,0299		-0,2817	-0,2817
0,2		0,2082	0,0416		4,1176	38,8235

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αν υποθεθεί ο λόγος λ τότε μπορεί να εκτιμηθεί το φορτίο. Στο Σχ. 3.5 δίνονται εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .



Σχ. 3.5: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .

Στον Πίν. 3.3 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου φορτίου που προκύπτουν για τρεις διαφορετικούς λόγους λ .

Πίν. 3.3: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ .

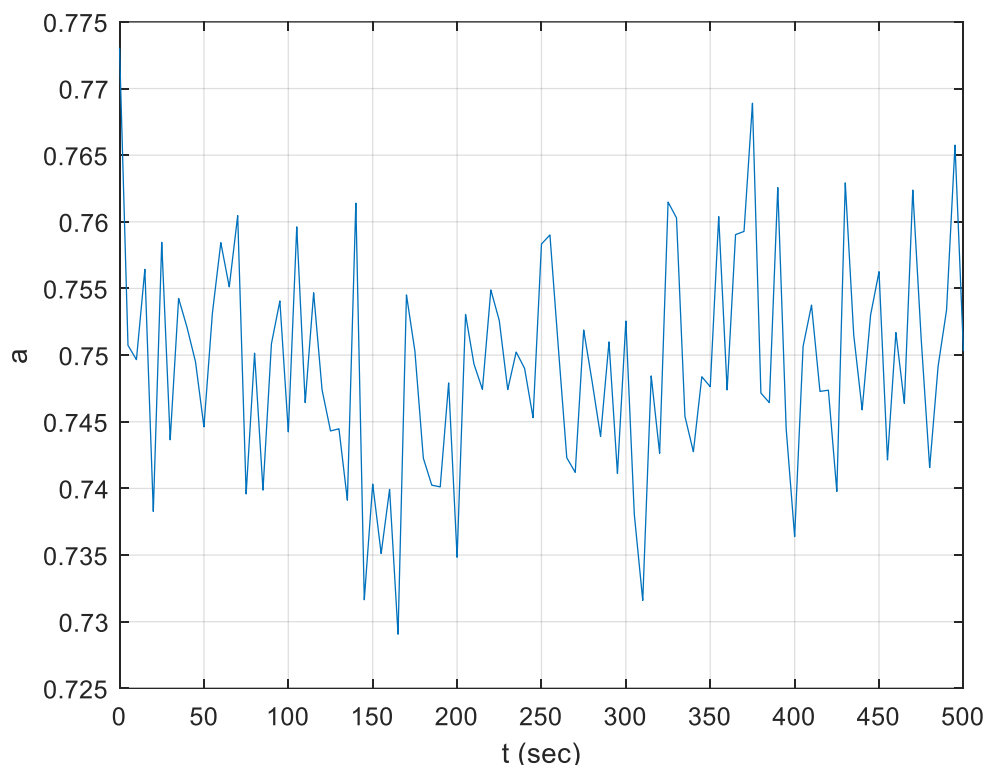
Πραγματικό Z_L	Εκτίμηση Z_L			Σφάλμα Z_L (%)		
	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$
4,0000	4,0135	4,0000	3,9853	0,3378	0	0,3676
3,8095	3,8230	3,8095	3,7948	0,3547	0	0,3860
3,6364	3,6499	3,6364	3,6217	0,3716	0	0,4044
3,4783	3,4918	3,4783	3,4636	0,3885	0	0,4228
3,3333	3,3468	3,3333	3,3186	0,4054	0	0,4412
3,2000	3,2135	3,2000	3,1853	0,4223	0	0,4596
3,0769	3,0904	3,0769	3,0622	0,4392	0	0,4779
2,9630	2,9765	2,9630	2,9483	0,4561	0	0,4963
2,7586	2,7721	2,7586	2,7439	0,4899	0	0,5331
2,5806	2,5942	2,5806	2,5659	0,5236	0	0,5699
2,4242	2,4378	2,4242	2,4095	0,5574	0	0,6066
2,2857	2,2992	2,2857	2,2710	0,5912	0	0,6434
2,1622	2,1757	2,1622	2,1475	0,6250	0	0,6801
2,0513	2,0648	2,0513	2,0366	0,6588	0	0,7169
1,9048	1,9183	1,9048	1,8901	0,7095	5,246E-13	0,7721
1,7778	1,7913	1,7778	1,7631	0,7601	0	0,8272
1,6667	1,6802	1,6667	1,6520	0,8108	0	0,8824
1,5385	1,5520	1,5385	1,5238	0,8784	0	0,9559
1,4286	1,4421	1,4286	1,4139	0,9459	0	1,0294
1,3115	1,3250	1,3115	1,2968	1,0304	0	1,1213
1,1940	1,2075	1,1940	1,1793	1,1318	0	1,2316
1,0811	1,0946	1,0811	1,0664	1,2500	0	1,3603
0,9756	0,9891	0,9756	0,9609	1,3851	0	1,5074
0,8696	0,8831	0,8696	0,8549	1,5541	0	1,6912
0,7619	0,7754	0,7619	0,7472	1,7736	0	1,9301

Όπως είναι αναμενόμενο το σφάλμα στην περίπτωση που επιλεγεί ο πραγματικός λόγος λ είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μηδέν. Πάντως και για εσφαλμένους λόγους λ τα σφάλματα είναι μικρά (μικρότερα του 2%) οπότε μπορεί και σε αυτές τις περιπτώσεις να προκύψει καλή εκτίμηση του φορτίου.

3.3.2 Στατιστικά Μεταβαλλόμενος Επαγωγικός Συντελεστής Ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση αυξάνεται η αγωγιμότητα G_L του φορτίου, βαθμιαία από 0,2 α.μ. έως 1,2 α.μ. με βήμα 0,01 α.μ. κάθε 5 sec, ενώ επίσης εξετάζεται η στατιστική μεταβλητότητα του συντελεστή ισχύος του φορτίου.

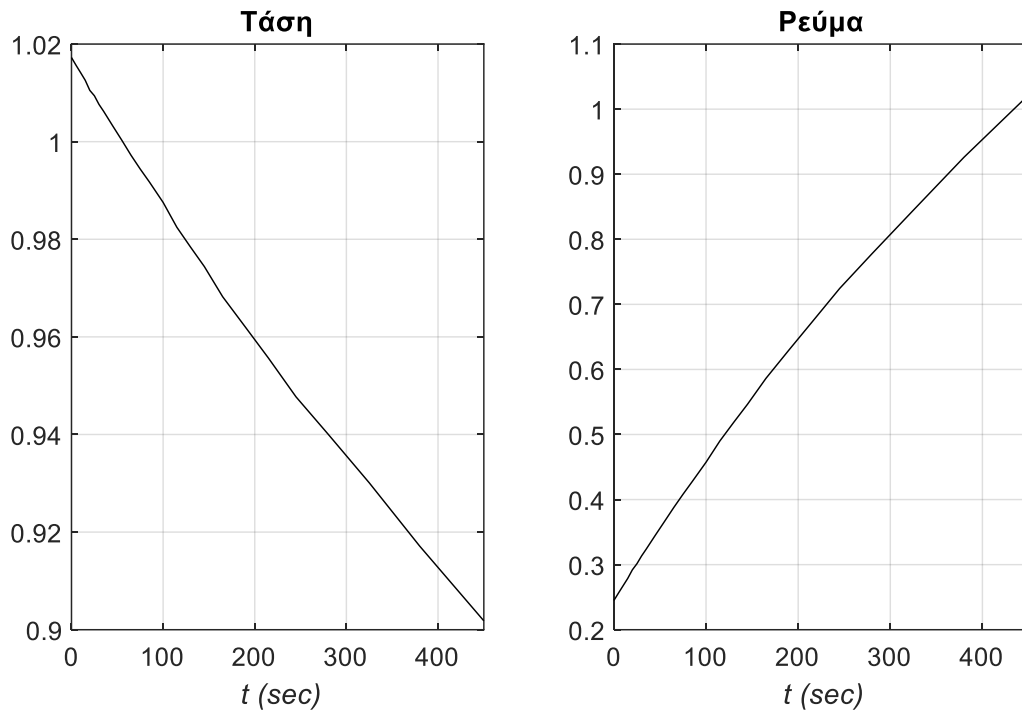
Πιο συγκεκριμένα έχει προστεθεί θόρυβος στο $\alpha = \tan\varphi$ με κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής $M = 0$ και τυπικής απόκλισης $\sigma = 0,01\alpha$, όπου $\alpha = 0,75$, δηλαδή $\Sigma I = 0,8$ επαγωγικό (Σχ. 3.6).



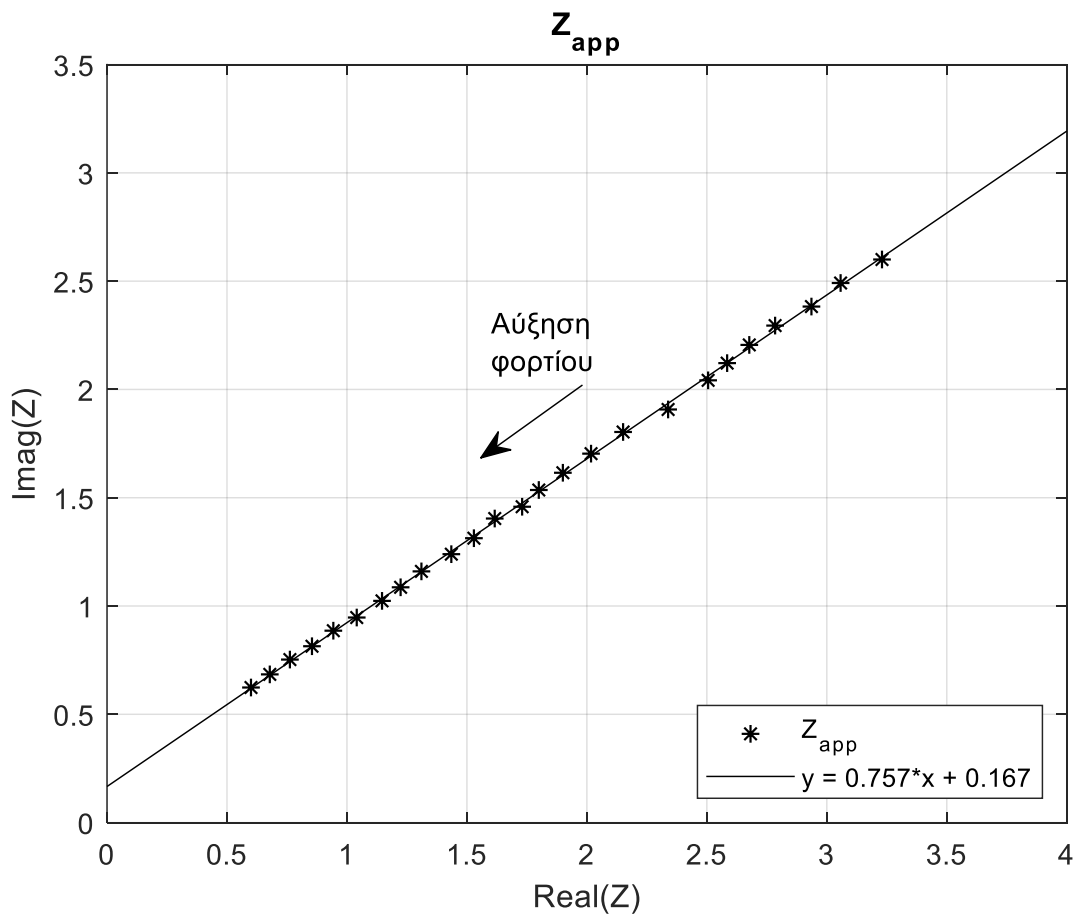
Σχ. 3.6: Στατιστικά μεταβαλλόμενος ΣΙ.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αφού παραχθούν οι τάσεις και τα ρεύματα στη συνέχεια πρέπει να δειγματοληπτηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να λαμβάνονται υπόψη μετρήσεις οι οποίες να διαφέρουν επαρκώς μεταξύ τους. Τα δειγματοληπτημένα σήματα παρουσιάζονται στο Σχ. 3.7 και αποτελούν την βάση της ανάλυσης για την εύρεση του συντελεστή ισχύος του φορτίου και τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης του φορτίου.

Στο Σχ. 3.8 φαίνεται η επίδραση του μεταβλητού ΣΙ στις μετρήσεις του PMU. Παρόλο που ο ΣΙ μεταβάλλεται, πάλι είναι δυνατό από τις μετρήσεις στον ζυγό 2 να προσδιορισθεί ο μέσος όρος του ΣΙ του φορτίου χρησιμοποιώντας την ευθεία, που προκύπτει από την συνάρτηση `polyfit` της Matlab.



Σχ. 3.7: Οι μετρήσεις του PMU.



Σχ. 3.8: Ο τύπος των Z_{app} .

Συγκεκριμένα, η εξίσωση της ευθείας των μετρήσεων είναι:

$$y = 0,752x + 0,173$$

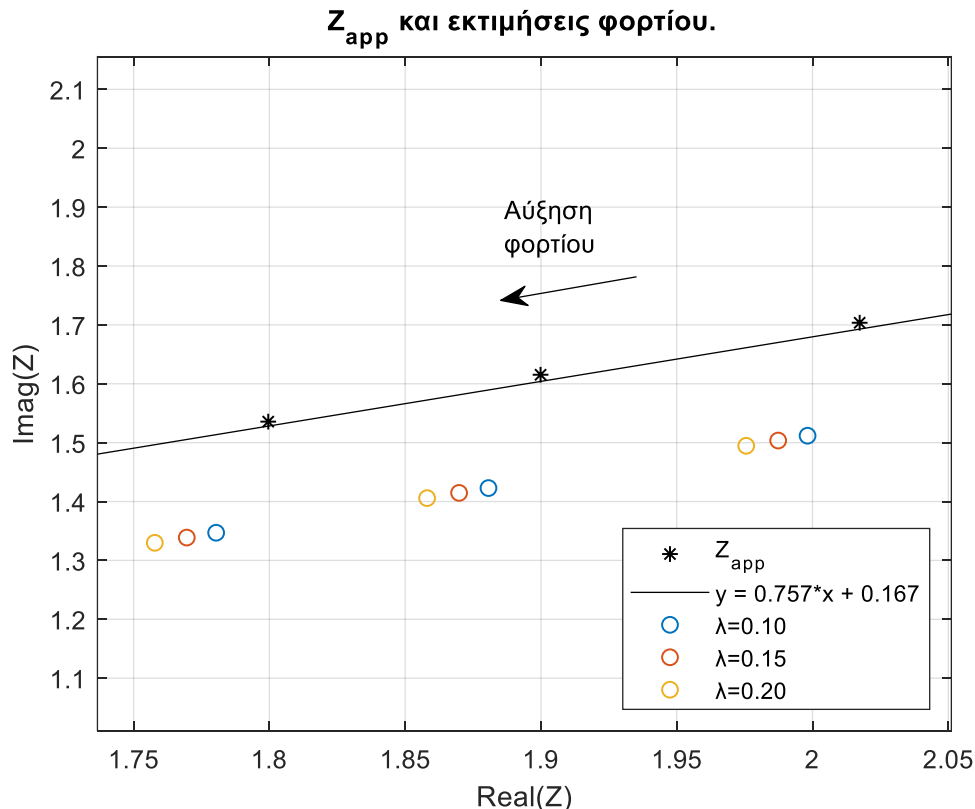
όπου ο συντελεστής 0,750 αντιστοιχεί στο $\alpha = \tan\varphi$ ενώ ο σταθερός όρος είναι $X_0 = 0,173$. Τόσο από το σχήμα όσο και από την εξίσωση της ευθείας συμπεραίνεται ότι είναι δυνατό από τις μετρήσεις να προσδιορισθεί ακριβώς ο ΣΙ του φορτίου.

Αφού έχει προσδιορισθεί ο ΣΙ και η σταθερή απόσταση X_0 , είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάντη γραμμής ανάλογα με τον λόγο λ που επιλέγεται. Στον Πίν. 3.4 παρουσιάζονται οι παράμετροι της κατάντη γραμμής για διαφορετικούς λόγους λ . Ο πραγματικός λόγος είναι $\lambda = 0,15$. Τα σφάλματα είναι μεγάλα για την αντίσταση της γραμμής όταν χρησιμοποιείται εσφαλμένος λόγος γραμμής.

Πίν. 3.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.

λ	ΣI	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	$\frac{\Delta \Sigma I}{\Sigma I} \%$	$\frac{\Delta X_2}{X_2} \%$	$\frac{\Delta R_2}{R_2} \%$
0,1	0,799	0,1871	0,0187	-0,0960	-6,4663	-37,6442
0,15		0,1950	0,0292		-2,5023	-2,5023
0,2		0,2036	0,0407		1,8126	35,7502

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αν υποτεθεί ο λόγος λ τότε μπορεί να εκτιμηθεί το φορτίο. Στο Σχ. 3.9 δίνονται εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .



Σχ. 3.9: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .

Στον Πίν. 3.5 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου φορτίου που προκύπτουν για τρεις διαφορετικούς λόγους λ .

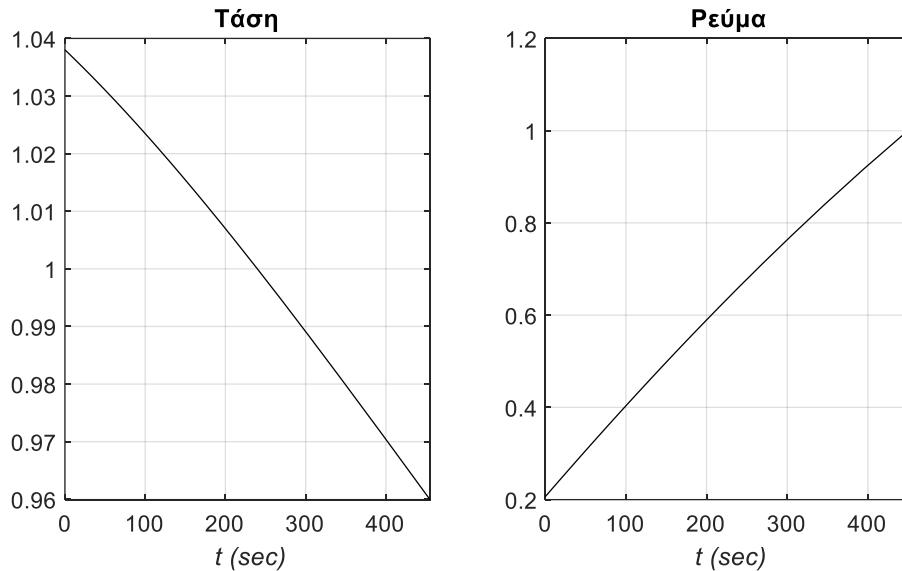
Πίν. 3.5: Εκτιμήσεις φορτίου για στατιστικά μεταβαλλόμενο ΣΙ.

Πραγματικό Z_L	Εκτίμηση Z_L			Σφάλμα Z_L (%)		
	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$
4,0000	4,0263	4,0127	3,9980	0,6564	0,3175	0,0513
3,7969	3,8099	3,7963	3,7815	0,3417	0,0156	0,4047
3,6344	3,6575	3,6439	3,6292	0,6354	0,2624	0,1436
3,4607	3,4677	3,4541	3,4393	0,2016	0,1906	0,6179
3,3209	3,3326	3,3190	3,3043	0,3517	0,0568	0,5018
3,1966	3,2170	3,2034	3,1886	0,6354	0,2112	0,2505
3,0855	3,1175	3,1040	3,0892	1,0365	0,5974	0,1200
2,8714	2,9083	2,8948	2,8801	1,2877	0,8161	0,3035
2,6589	2,6731	2,6596	2,6448	0,5348	0,0246	0,5310
2,4921	2,5056	2,4921	2,4773	0,5433	0,0011	0,5940
2,3451	2,3583	2,3447	2,3299	0,5615	0,0170	0,6471
2,2171	2,2325	2,2190	2,2042	0,6966	0,0848	0,5813
2,1152	2,1455	2,1320	2,1173	1,4317	0,7915	0,0957
1,9912	2,0023	1,9887	1,9739	0,5559	0,1256	0,8681
1,8672	1,8935	1,8799	1,8652	1,4055	0,6801	0,1086
1,7477	1,7753	1,7618	1,7471	1,5833	0,8084	0,0337
1,6002	1,6191	1,6055	1,5907	1,1772	0,3300	0,5918
1,4868	1,5103	1,4968	1,4821	1,5854	0,6743	0,3162
1,3872	1,4132	1,3996	1,3849	1,8685	0,8926	0,1679
1,2567	1,2809	1,2674	1,2527	1,9297	0,8522	0,3186
1,1422	1,1587	1,1451	1,1303	1,4435	0,2564	1,0356
1,0280	1,0472	1,0336	1,0189	1,8643	0,5463	0,8872
0,9174	0,9316	0,9181	0,9033	1,5565	0,0780	1,5321
0,8093	0,8266	0,8130	0,7983	2,1389	0,4643	1,3573

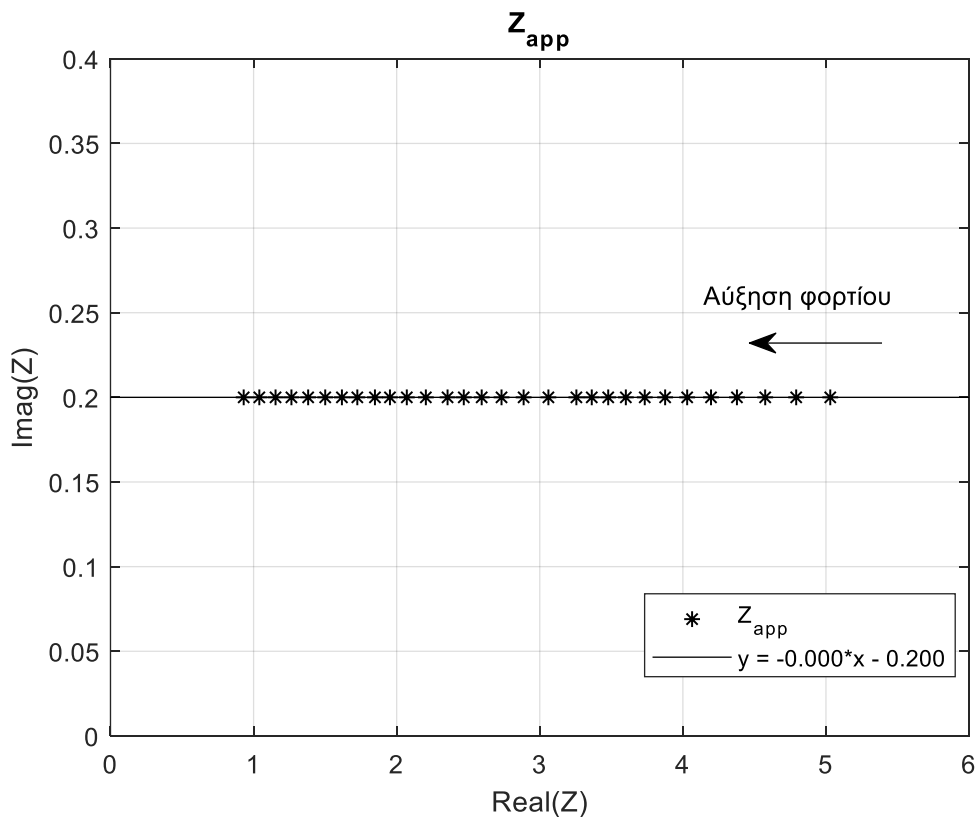
Τα σφάλματα των εκτιμήσεων και για τους τρεις διαφορετικούς λόγους είναι μικρά οπότε μπορεί να εξαχθεί καλή εκτίμηση του φορτίου. Αξίζει να σημειωθεί πως ακόμα και με τον πραγματικό λόγο λ να έχει επιλεγεί τα σφάλματα δεν είναι μηδενικά όπως συνέβη στην περίπτωση όπου ο ΣΙ ήταν σταθερός.

3.3.3 Φορτίο Μοναδιαίου Συντελεστή Ισχύος

Σε αυτή την περίπτωση αυξάνει μόνο η αγωγιμότητα G του φορτίου, βαθμιαία από 0,2 α.μ. έως 1,2 α.μ. με βήμα 0,01 α.μ. κάθε 5 sec, ενώ ο ΣΙ είναι σταθερός μοναδιαίος ($\alpha = \tan\varphi = 0,0$). Οι μετρήσεις του PMU είναι απαλλαγμένες από θόρυβο και τα δειγματοληπτημένα σήματα φαίνονται στο Σχ. 3.10. Στο επίπεδο R-X η φαίνονται στο Σχ. 3.11.



Σχ. 3.10: Οι μετρήσεις του PMU.



Σχ. 3.11: Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση και προσδιορισμός του X_2 .

Η εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y = 0,000x + 0,200$$

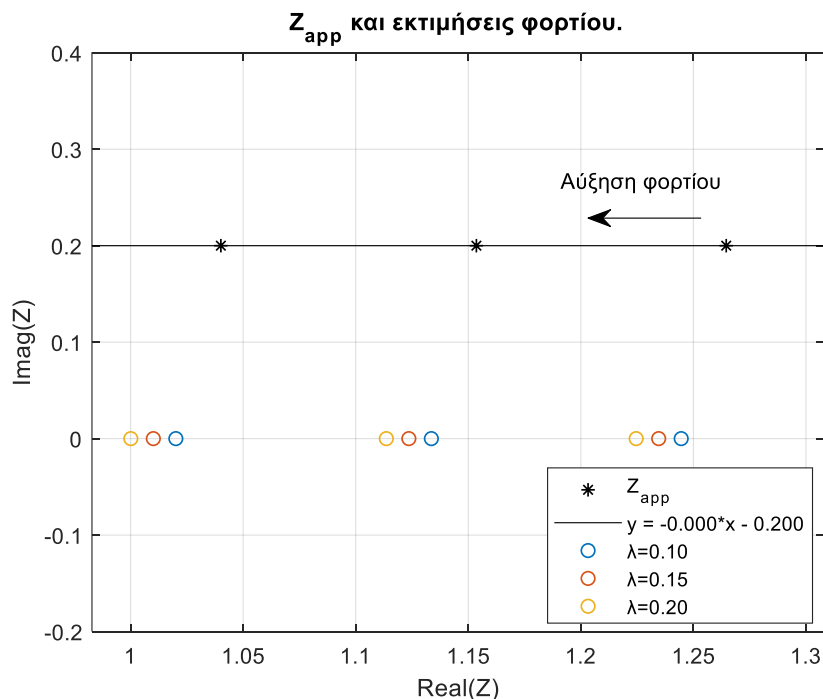
όπου ο συντελεστής 0,000 αντιστοιχεί στο $\alpha = \tan\varphi$ και άρα πρόκειται για μοναδιαίο ΣΙ, ενώ ο σταθερός όρος 0,200 αντιστοιχεί στο X_0 . Είναι εμφανές πως όταν ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι μοναδιαίος, είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του μέτρου του X_2 , αφού η πραγματική τιμή είναι $X_2 = 0,2$ α.μ. και συμπίπτει με τον σταθερό όρο της εξίσωσης της ευθείας.

Αφού έχει προσδιοριστεί ο ΣΙ και η σταθερή απόσταση X_0 , είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάντη γραμμής ανάλογα με τον λόγο λ που επιλέγεται. Στον Πίν. 3.6 παρουσιάζονται οι παράμετροι της κατάντη γραμμής για διαφορετικούς λόγους λ , όπου ο πραγματικός λόγος είναι $\lambda = 0,15$. Δεδομένου ότι το X_2 προσδιορίζεται άμεσα και με ακρίβεια για μοναδιαίο ΣΙ το σφάλμα προκύπτει μηδενικό. Ωστόσο, λόγω των εσφαλμένων λόγων τα σφάλματα της αντίστασης είναι σημαντικά.

Πίν. 3.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.

λ	ΣI	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	$\frac{\Delta \Sigma I}{\Sigma I} \%$	$\frac{\Delta X_2}{X_2} \%$	$\frac{\Delta R_2}{R_2} \%$
0,1	1,000	0,2000	0,0200	0,0000	0,0000	-33,3333
0,15		0,2000	0,0300		0,0000	0,0000
0,2		0,2000	0,0400		0,0000	33,3333

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αν υποτεθεί ο λόγος λ τότε μπορεί να εκτιμηθεί το φορτίο. Στο Σχ. 3.12 δίνονται εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .



Σχ. 3.12: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .

Στον Πίν. 3.7 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου φορτίου που προκύπτουν για τρεις διαφορετικούς λόγους λ και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα κατ' απόλυτη τιμή.

Πίν. 3.7: Εκτιμήσεις φορτίου για μοναδιαίο ΣΙ.

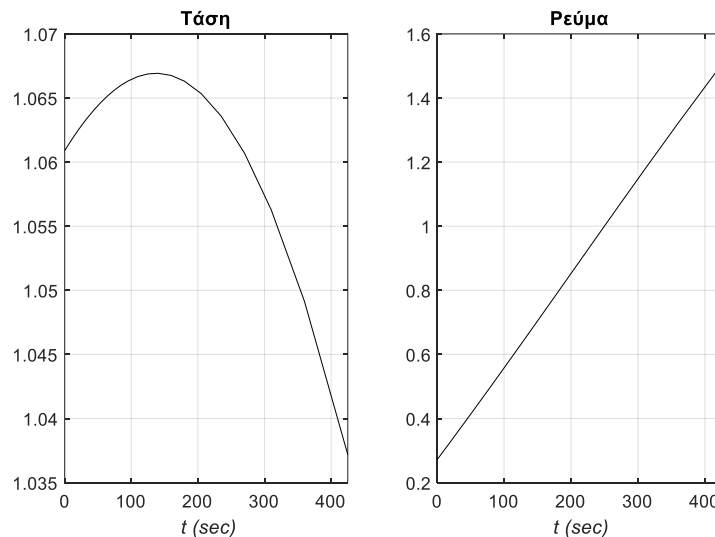
Πραγματικό Z_L	Εκτίμηση Z_L			Σφάλμα Z_L (%)		
	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$
5,0000	5,0100	5,0000	4,9900	0,2000	0,0000	0,2000
4,7619	4,7719	4,7619	4,7519	0,2100	0,0000	0,2100
4,5455	4,5555	4,5455	4,5355	0,2200	0,0000	0,2200
4,3478	4,3578	4,3478	4,3378	0,2300	0,0000	0,2300
4,1667	4,1767	4,1667	4,1567	0,2400	0,0000	0,2400
4,0000	4,0100	4,0000	3,9900	0,2500	0,0000	0,2500
3,8462	3,8562	3,8462	3,8362	0,2600	0,0000	0,2600
3,7037	3,7137	3,7037	3,6937	0,2700	0,0000	0,2700
3,5714	3,5814	3,5714	3,5614	0,2800	0,0000	0,2800
3,4483	3,4583	3,4483	3,4383	0,2900	0,0000	0,2900
3,3333	3,3433	3,3333	3,3233	0,3000	0,0000	0,3000
3,2258	3,2358	3,2258	3,2158	0,3100	0,0000	0,3100
3,0303	3,0403	3,0303	3,0203	0,3300	0,0000	0,3300
2,8571	2,8671	2,8571	2,8471	0,3500	0,0000	0,3500
2,7027	2,7127	2,7027	2,6927	0,3700	0,0000	0,3700
2,5641	2,5741	2,5641	2,5541	0,3900	0,0000	0,3900
2,4390	2,4490	2,4390	2,4290	0,4100	0,0000	0,4100
2,3256	2,3356	2,3256	2,3156	0,4300	0,0000	0,4300
2,1739	2,1839	2,1739	2,1639	0,4600	0,0000	0,4600
2,0408	2,0508	2,0408	2,0308	0,4900	0,0000	0,4900
1,9231	1,9331	1,9231	1,9131	0,5200	0,0000	0,5200
1,8182	1,8282	1,8182	1,8082	0,5500	0,0000	0,5500
1,6949	1,7049	1,6949	1,6849	0,5900	0,0000	0,5900
1,5873	1,5973	1,5873	1,5773	0,6300	0,0000	0,6300
1,4706	1,4806	1,4706	1,4606	0,6800	0,0000	0,6800
1,3514	1,3614	1,3514	1,3414	0,7400	0,0000	0,7400
1,2346	1,2446	1,2346	1,2246	0,8100	0,0000	0,8100
1,1236	1,1336	1,1236	1,1136	0,8900	0,0000	0,8900
1,0101	1,0201	1,0101	1,0001	0,9900	0,0000	0,9900
0,9009	0,9109	0,9009	0,8909	1,1100	0,0000	1,1100

Όπως είναι αναμενόμενο το σφάλμα στην περίπτωση που επιλεγεί ο πραγματικός λόγος λ είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μηδέν. Πάντως και για εσφαλμένους λόγους λ τα σφάλματα είναι μικρά (μικρότερα του 1.2%) οπότε μπορεί και σε αυτές τις περιπτώσεις να προκύψει καλή εκτίμηση του φορτίου.

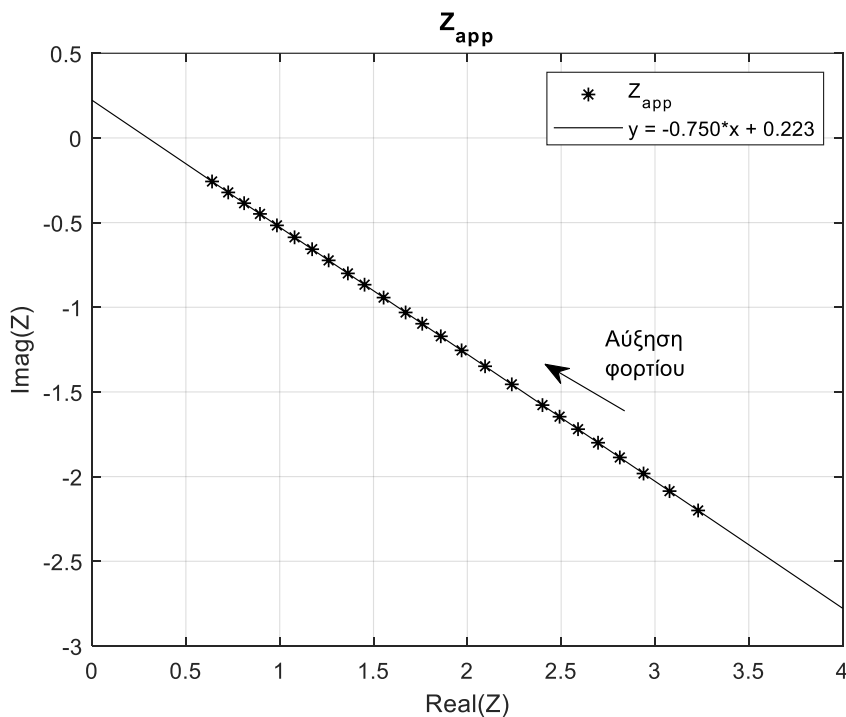
3.3.4 Φορτίο Χωρητικού Συντελεστή Ισχύος

Εξετάζεται το δίκτυο του Σχήματος Σχ. 3.1 με τις δοθείσες παραμέτρους (Πίν. 3.1 οι οποίες θεωρούνται σταθερές. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνει μόνο η ωμική αγωγιμότητα G του φορτίου, βαθμιαία από 0,2 α.μ. έως 1,2 α.μ. με βήμα 0,01 α.μ. κάθε 5 sec, ενώ ο ΣI είναι σταθερός 0,8 χωρητικός ($\alpha = \tan\varphi = -0,75$).

Οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος, που αποτελούν την βάση της ανάλυσης, δίνονται στο Σχ. 3.13.



Σχ. 3.13: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος.



Σχ. 3.14: Ευθεία φαινόμενης σύνθετης αντίστασης.

Στο Σχ. 3.14 παρουσιάζεται η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στο επίπεδο R-X, ενώ επίσης έχει χαραχθεί η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις.

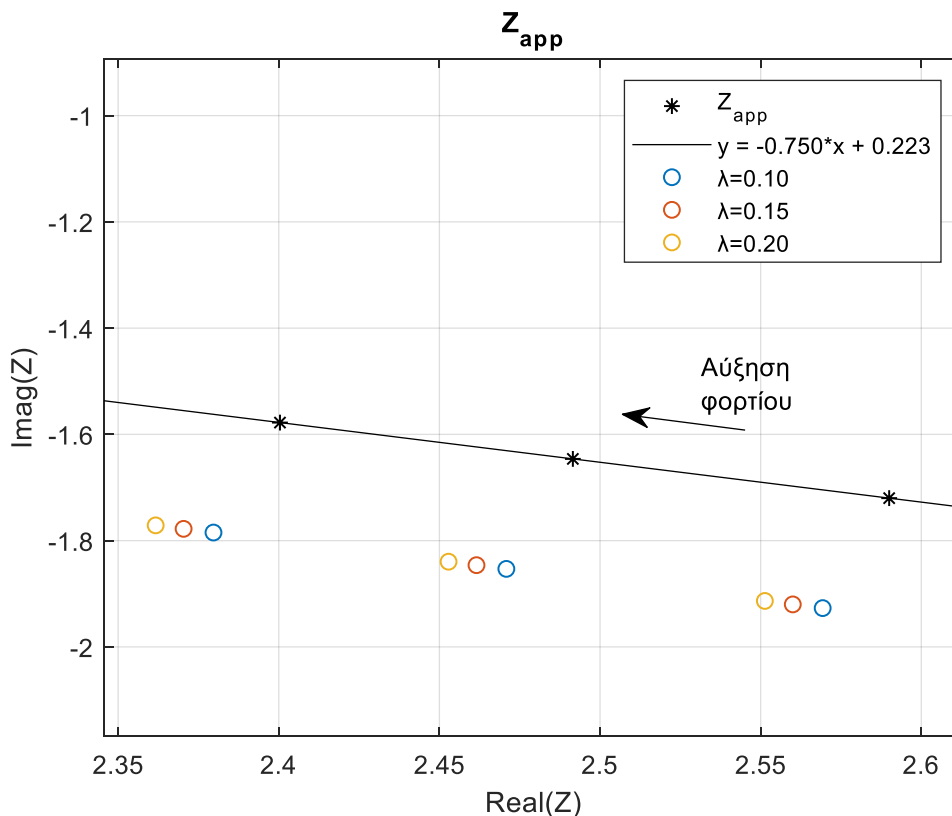
Η εξίσωση της ευθείας είναι:

$$y = -0,750x + 0,223$$

όπου ο συντελεστής $-0,750$ αντιστοιχεί στο $\alpha = \tan\varphi$ και δηλώνει χωρητικό συντελεστή ισχύος, ενώ ο σταθερός όρος είναι $X_0 = 0,223$. Τόσο από το σχήμα όσο και από την εξίσωση της ευθείας συμπεραίνεται ότι είναι δυνατό από τις μετρήσεις να προσδιορισθεί ο ΣΙ του φορτίου.

Αφού έχει προσδιορισθεί ο ΣΙ και η σταθερή απόσταση X_0 , είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάντη γραμμής ανάλογα με τον λόγο λ που επιλέγεται. Στον Πίν. 3.8 παρουσιάζονται οι παράμετροι της κατάντη γραμμής για διαφορετικούς λόγους λ , όπου ο πραγματικός λόγος είναι $\lambda = 0,15$. Τα σφάλματα είναι μεγάλα για την αντίσταση της γραμμής όταν χρησιμοποιείται εσφαλμένος λόγος γραμμής.

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αν υποθεθεί ο λόγος λ τότε μπορεί να εκτιμηθεί το φορτίο. Στο Σχ. 3.15 δίνονται εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .



Σχ. 3.15: Εκτιμήσεις φορτίου για χωρητικό ΣΙ και διαφορετικούς λόγους λ .

Στον Πίνακα Πίν. 3.9 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου φορτίου που προκύπτουν για τρεις διαφορετικούς λόγους λ και τα αντίστοιχα σχετικά σφάλματα κατ' απόλυτη τιμή.

Πίν. 3.8: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.

λ	$\Sigma I(\chi\omega\rho.)$	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	$\frac{\Delta \Sigma I}{\Sigma I}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %
0,1	0,800	0,2074	0,0207	0,0000	3,7209	-30,8527
0,15		0,2004	0,0301		0,2247	0,2247
0,2		0,1939	0,0388		-3,0435	29,2754

Πίν. 3.9: Εκτιμήσεις φορτίου για χωρητικό ΣΙ.

Πραγματικό Z_L	Εκτίμηση Z_L			Σφάλμα Z_L (%)		
	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$
4,0000	4,0116	4,0000	3,9891	0,2907	0,0000	0,2717
3,8095	3,8212	3,8095	3,7987	0,3052	0,0000	0,2853
3,6364	3,6480	3,6364	3,6255	0,3198	0,0000	0,2989
3,4783	3,4899	3,4783	3,4674	0,3343	0,0000	0,3125
3,3333	3,3450	3,3333	3,3225	0,3488	0,0000	0,3261
3,2000	3,2116	3,2000	3,1891	0,3634	0,0000	0,3397
3,0769	3,0886	3,0769	3,0661	0,3779	0,0000	0,3533
2,9630	2,9746	2,9630	2,9521	0,3924	0,0000	0,3668
2,7586	2,7702	2,7586	2,7478	0,4215	0,0000	0,3940
2,5806	2,5923	2,5806	2,5698	0,4506	0,0000	0,4212
2,4242	2,4359	2,4242	2,4134	0,4797	0,0000	0,4484
2,2857	2,2973	2,2857	2,2748	0,5087	0,0000	0,4755
2,1622	2,1738	2,1622	2,1513	0,5378	0,0000	0,5027
2,0513	2,0629	2,0513	2,0404	0,5669	0,0000	0,5299
1,9048	1,9164	1,9048	1,8939	0,6105	0,0000	0,5707
1,7778	1,7894	1,7778	1,7669	0,6541	0,0000	0,6114
1,6667	1,6783	1,6667	1,6558	0,6977	0,0000	0,6522
1,5385	1,5501	1,5385	1,5276	0,7558	0,0000	0,7065
1,4286	1,4402	1,4286	1,4177	0,8140	0,0000	0,7609
1,3115	1,3231	1,3115	1,3006	0,8866	0,0000	0,8288
1,1940	1,2057	1,1940	1,1832	0,9738	0,0000	0,9103
1,0811	1,0927	1,0811	1,0702	1,0756	0,0000	1,0054
0,9756	0,9872	0,9756	0,9647	1,1919	0,0000	1,1141
0,8696	0,8812	0,8696	0,8587	1,3372	0,0000	1,2500
0,7619	0,7735	0,7619	0,7510	1,5262	0,0000	1,4266

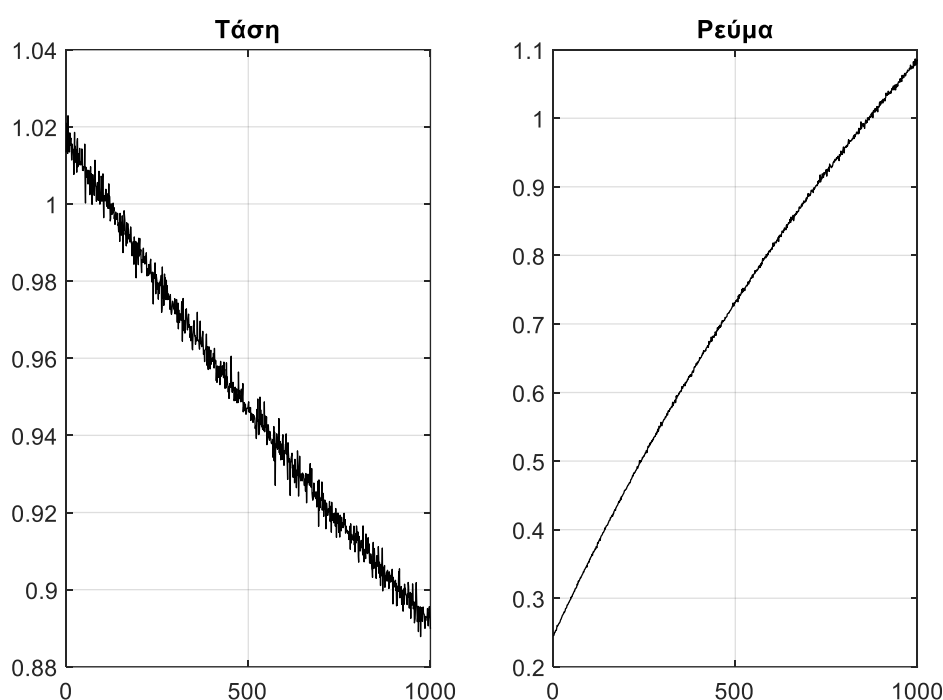
Όπως είναι αναμενόμενο το σφάλμα στην περίπτωση που επιλεγεί ο πραγματικός λόγος λ είναι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις μηδέν. Πάντως και για εσφαλμένους λόγους λ τα σφάλματα είναι μικρά (μικρότερα του 1,6%) οπότε μπορεί και σε αυτές τις περιπτώσεις να προκύψει καλή εκτίμηση του φορτίου.

3.3.5 Μετρήσεις με Θόρυβο

Εξετάζεται το δίκτυο του Σχήματος 3.1 με τις δοθείσες παραμέτρους (Πίνακας 3.1) οι οποίες θεωρούνται σταθερές. Σε αυτήν την περίπτωση αυξάνει μόνο η ωμική αγωγιμότητα G_L του φορτίου, βαθμιαία από 0,2 α.μ. έως 1,2 α.μ. με βήμα 0,01 α.μ. κάθε 1 sec, ενώ ο ΣΙ είναι σταθερός 0,8 επαγωγικός ($\alpha = \tan\varphi = 0,75$).

Ο θόρυβος που εισάγεται στις μετρήσεις της τάσης και του ρεύματος παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα 5.1 και είναι σύμφωνος με το πρότυπο [IEE11] που καθορίζει την λειτουργία των PMU.

Οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος, που αποτελούν την βάση της ανάλυσης, δίνονται στο Σχ. 3.16.

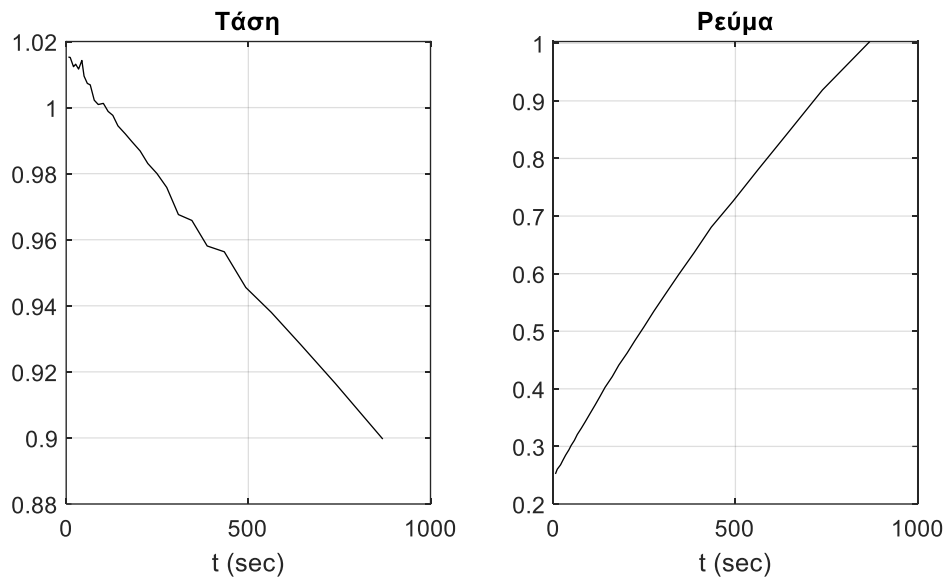


Σχ. 3.16: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος με θόρυβο.

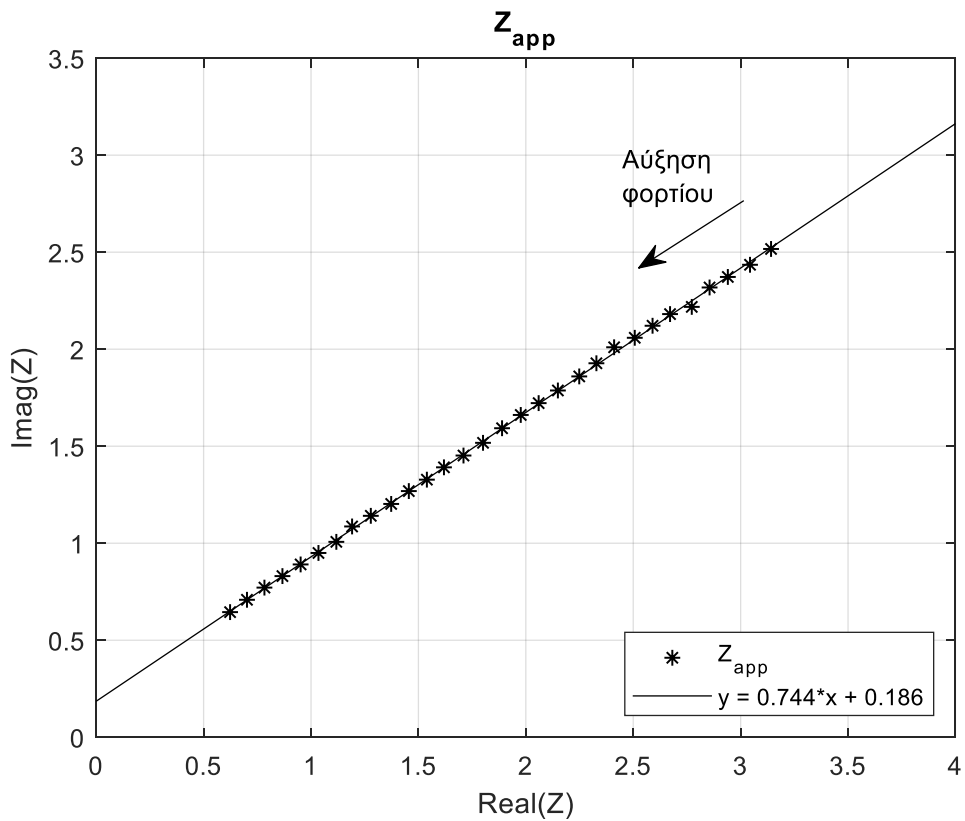
Όπως είναι προφανές τα θορυβώδη σήματα δεν μπορούν να δώσουν τις κατάλληλες πληροφορίες για περαιτέρω επεξεργασία, για αυτό λοιπόν θα χρησιμοποιηθούν τα φιλτραρισμένα μεγέθη σύμφωνα με το κριτήριο που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3. Ο έλεγχος πραγματοποιείται με την σύγκριση της τρέχουσας φαινόμενης σύνθετης αντίστασης με την τελευταία αποδεκτή, όπου το μέτρο της διαφοράς τους πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 0,1 α.μ.:

$$|Z_k - Z_{k+1}| > 0,1 \text{ α.μ.} \quad (3.18)$$

Τα σήματα που προκύπτουν ύστερα από τον παραπάνω έλεγχο δίνονται στο Σχ. 3.17. Αξίζει να σημειωθεί πως ενώ μετρήσεις γίνονται για 1000 sec, τα φιλτραρισμένα σήματα έχουν πολύ μικρότερο πλήθος, ενώ μετρήσεις κοντά στα 1000sec έχουν απορριφθεί από τον έλεγχο.



Σχ. 3.17: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.



Σχ. 3.18: Η ευθεία της Z_{app} .

Στο Σχ. 3.18 απεικονίζεται η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z_{app} από τον ζυγό, ενώ επιπλέον έχει χαραχθεί και η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων που αντιστοιχεί σε αυτά τα σημεία.

Συγκεκριμένα, η εξίσωση της ευθείας των μετρήσεων είναι:

$$y = 0,744x + 0,186$$

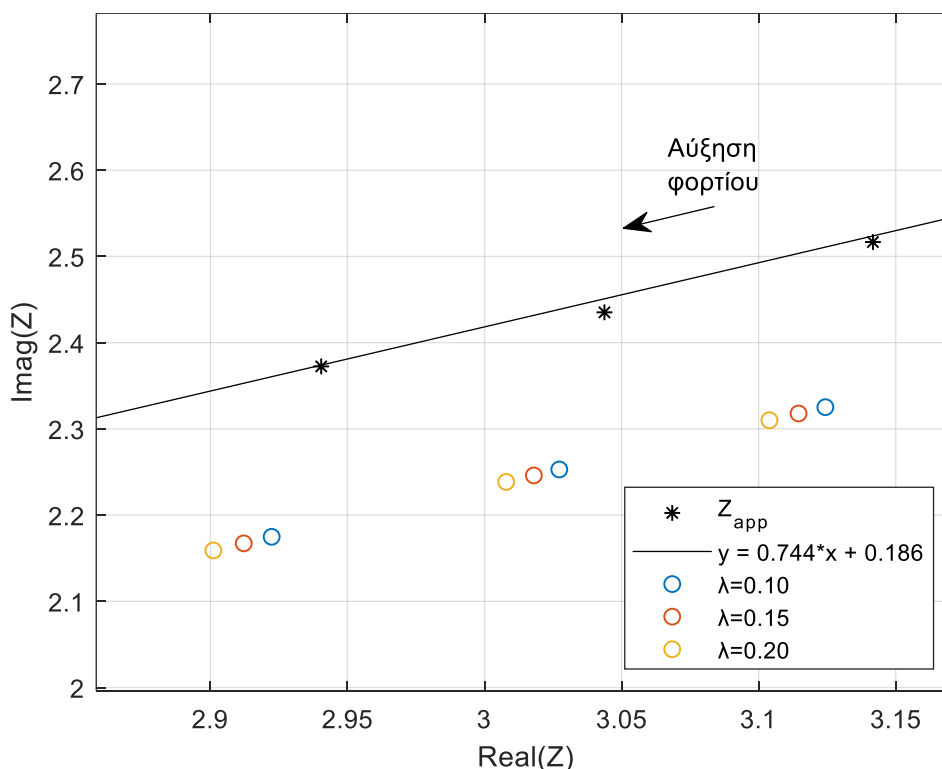
όπου ο συντελεστής 0,744 αντιστοιχεί στο $\alpha = \tan\varphi$ και πρόκειται για επαγωγικό ΣΙ, ενώ ο σταθερός όρος 0,186 αντιστοιχεί στην απόσταση X_0 . Τόσο από το σχήμα όσο και από την εξίσωση της ευθείας συμπεραίνεται ότι είναι δυνατό από τις μετρήσεις να προσδιορισθεί ο ΣΙ του φορτίου.

Αφού έχει προσδιορισθεί ο ΣΙ και η σταθερή απόσταση X_0 , είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάντη γραμμής ανάλογα με τον λόγο λ που επιλέγεται. Στον Πίν. 3.10 παρουσιάζονται οι παράμετροι της κατάντη γραμμής για διαφορετικούς λόγους λ , όπου ο πραγματικός λόγος είναι $\lambda = 0,15$. Τα σφάλματα είναι μεγάλα για την αντίσταση της γραμμής όταν χρησιμοποιείται εσφαλμένος λόγος γραμμής.

Πίν. 3.10: Εκτιμήσεις παραμέτρων γραμμής και σφάλματα.

λ	$\Sigma I(\chi\omega\rho.)$	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	$\frac{\Delta \Sigma I}{\Sigma I} \%$	$\frac{\Delta X_2}{X_2} \%$	$\frac{\Delta R_2}{R_2} \%$
0,1	0,802	0,2010	0,0201	0,2881	0,4754	-33,0164
0,15		0,2094	0,0314		4,6826	4,6826
0,2		0,2185	0,0437		9,2575	45,6767

Γνωρίζοντας τον συντελεστή ισχύος του φορτίου αν υποθεθεί ο λόγος λ τότε μπορεί να εκτιμηθεί το φορτίο. Στο Σχ. 3.5 δίνονται εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .



Σχ. 3.19: Εκτιμήσεις φορτίου με διαφορετικούς λόγους λ .

Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζονται οι τιμές του εκτιμώμενου φορτίου που προκύπτουν για τρεις διαφορετικούς λόγους λ.

Πίν. 3.11: Εκτιμήσεις φορτίου για διαφορετικούς λόγους και αντίστοιχα σφάλματα.

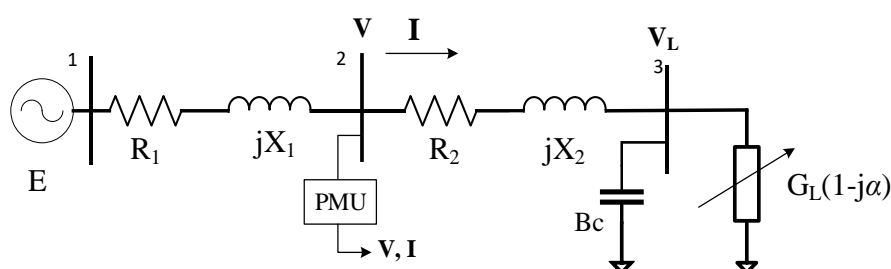
Πραγματικό Z_L	Εκτίμηση Z_L			Σφάλμα Z_L (%)		
	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$	$\lambda=0,10$	$\lambda=0,15$	$\lambda=0,20$
3,8835	3,8946	3,8824	3,8692	0,2856	0,0280	0,3693
3,7915	3,7736	3,7620	3,7494	0,4714	0,7765	1,1084
3,6364	3,6428	3,6301	3,6163	0,1772	0,1718	0,5516
3,5398	3,5356	3,5222	3,5076	0,1198	0,4987	0,9109
3,4188	3,4374	3,4269	3,4154	0,5452	0,2370	0,0982
3,2922	3,3061	3,2926	3,2780	0,4227	0,0135	0,4318
3,2129	3,2045	3,1909	3,1762	0,2606	0,6820	1,1407
3,1008	3,1012	3,0877	3,0729	0,0149	0,4220	0,8976
3,0075	2,9783	2,9630	2,9463	0,9708	1,4801	2,0342
2,8881	2,8783	2,8646	2,8496	0,3382	0,8142	1,3322
2,7778	2,7798	2,7666	2,7523	0,0723	0,4011	0,9163
2,6490	2,6556	2,6423	2,6278	0,2498	0,2526	0,7994
2,5397	2,5436	2,5301	2,5155	0,1538	0,3762	0,9531
2,4390	2,4395	2,4260	2,4112	0,0214	0,5351	1,1408
2,3392	2,3315	2,3182	2,3037	0,3283	0,8983	1,5186
2,2099	2,2224	2,2097	2,1959	0,5614	0,0118	0,6356
2,1053	2,1085	2,0957	2,0817	0,1559	0,4556	1,1211
1,9851	1,9941	1,9807	1,9661	0,4543	0,2229	0,9598
1,8868	1,8956	1,8824	1,8681	0,4664	0,2303	0,9884
1,7817	1,7903	1,7768	1,7622	0,4804	0,2749	1,0968
1,6807	1,6886	1,6755	1,6612	0,4722	0,3073	1,1557
1,5748	1,5690	1,5551	1,5400	0,3703	1,2500	2,2074
1,4679	1,4589	1,4443	1,4283	0,6104	1,6083	2,6943
1,3629	1,3708	1,3580	1,3441	0,5856	0,3537	1,3760
1,2618	1,2664	1,2532	1,2389	0,3645	0,6809	1,8185
1,1544	1,1624	1,1490	1,1344	0,6950	0,4690	1,7357
1,0485	1,0564	1,0427	1,0278	0,7566	0,5494	1,9707
0,9479	0,9515	0,9376	0,9224	0,3867	1,0861	2,6888
0,8520	0,8504	0,8366	0,8215	0,1859	1,8086	3,5744
0,7484	0,7530	0,7395	0,7249	0,6188	1,1820	3,1417

Από τις παραπάνω τιμές των σφαλμάτων μπορεί εύλογα να εξαχθεί αποδεκτή εκτίμηση για την σύνθετη αντίσταση του φορτίου.

3.4 Δίκτυο με αντιστάθμιση

Η μετατόπιση των μετρήσεων εξαιτίας της γραμμής R_2+jX_2 υφίσταται και στην περίπτωση όπου υπάρχει αντιστάθμιση στον ζυγό του φορτίου. Βέβαια τώρα δεν γίνεται μετατόπιση μόνο του φορτίου, όπως στο ακτινικό δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση, αλλά του παράλληλου συνδυασμού πυκνωτή αντιστάθμισης - φορτίου.

Το δίκτυο του Σχ. 3.20 έχει τις ίδιες παραμέτρους δικτύου, όπως στα προηγούμενα, με μόνες διαφορές την προσθήκη πυκνωτή αντιστάθμισης $B_c=0,10$ α.μ στον ζυγό του φορτίου (ζυγός 3) και ότι η αγωγιμότητα του φορτίου G_L αυξάνει από 0,0001 α.μ έως 2 α.μ. Οι μετρήσεις λαμβάνονται στον ενδιάμεσο ζυγό 2 και δεν περιέχουν θόρυβο. Οι παράμετροι του δικτύου με αντιστάθμιση φαίνονται στον Πίν. 3.12.



Σχ. 3.20: Δίκτυο με αντιστάθμιση.

Πίν. 3.12: Παράμετροι δικτύου με αντιστάθμιση.

E	R_1	X_1	R_2	X_2	B_c	ΣI
1,05 α.μ.	0,05 α.μ.	0,15 α.μ.	0,03 α.μ.	0,20 α.μ.	0,10 α.μ.	0,8 επαγ. ($\alpha=0,75$)

Στο Σχ. 3.21 αποτυπώνεται ο τύπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης

$$Z_{app} = R_{app} + jX_{app}$$

η οποία τώρα περιλαμβάνει και τον πυκνωτή αντιστάθμισης. Η αύξηση του φορτίου υποδεικνύεται από το βέλος στο κάτω μέρος του διαγράμματος.

Από το Σχ. 3.21 φαίνεται ότι όταν το G_L είναι πολύ μικρό, το φορτίο είναι πρακτικά ανοικτοκυκλωμένο και η σύνθετη αντίσταση του παράλληλου συνδυασμού φορτίου-πυκνωτή είναι η σύνθετη αντίσταση του πυκνωτή. Πράγματι για $G_L=0,0001$ α.μ και πυκνωτή αντιστάθμισης $B_c=0,10$ α.μ, η αντίσταση είναι κοντά στο -10 α.μ.

Επίσης διακρίνονται τέσσερις περιοχές λειτουργίας:

1. Για μεγάλες τιμές G_L , η καμπύλη που περιγράφει τη συνάρτηση $X_{app} = f(R_{app})$ είναι σχεδόν ευθεία και παρουσιάζει λειτουργία υπό επαγωγικό ΣI (Σχ. 3.22). Άρα, πρόκειται για υποαντισταθμισμένο φορτίο.

Η εξίσωση της ευθείας της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης είναι:

$$y = 0,409x + 0,364$$

Αν χαραχθεί η αντίστοιχη ευθεία μόνο για τις μεγαλύτερες τιμές G_L , τότε η κλίση της θα είναι κοντά στο $a = \tan\varphi$ του φορτίου.

2. Για τις αμέσως μικρότερες τιμές G_L , η καμπύλη είναι σχεδόν παράλληλη με τον άξονα των πραγματικών. Αυτό σημαίνει πως ο ΣΙ είναι ωμικός (Σχ. 3.23), ωστόσο αν παρατηρήσει κανείς την τιμή του X , αυτή είναι πολύ μεγάλη και είναι περίπου 1.419 α.μ. Συνεπώς να μην μπορούμε να παρακολουθήσουμε το φορτίο αλλά δεν μπορούμε να το διακρίνουμε εξαιτίας της παρουσίας του πυκνωτή, δηλαδή το τεράστιο X που μετράμε οφείλεται στην ύπαρξη του πυκνωτή αντιστάθμισης.

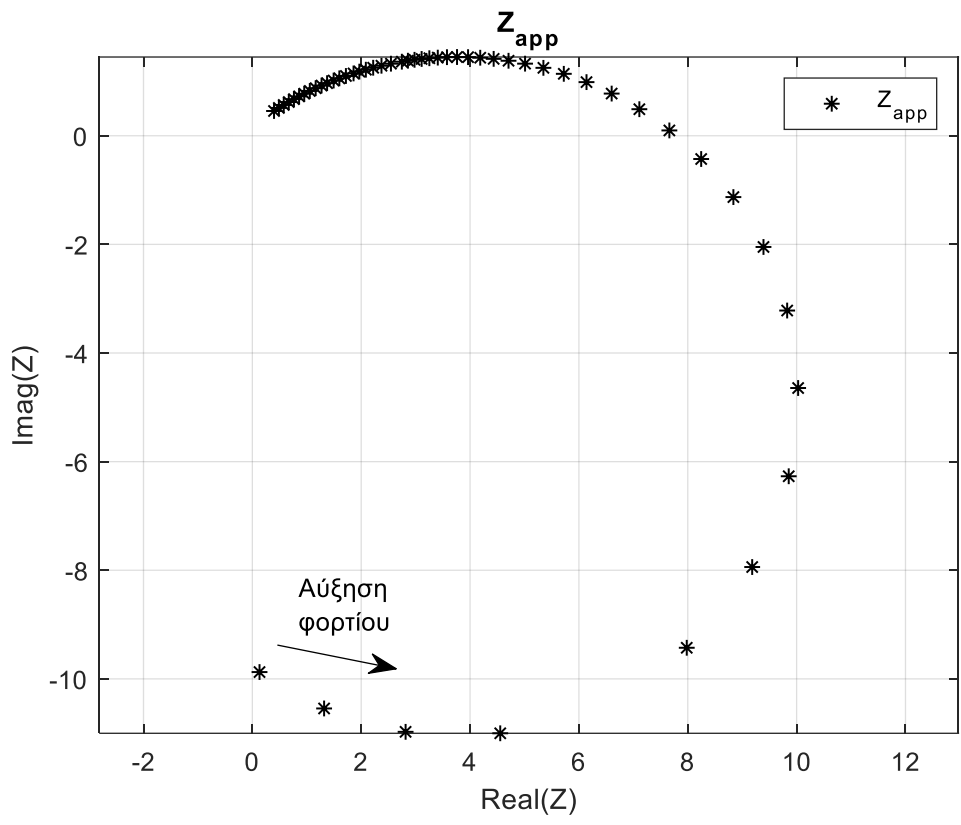
Η εξίσωση της ευθείας της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης είναι:

$$y = 0,001x + 1.419$$

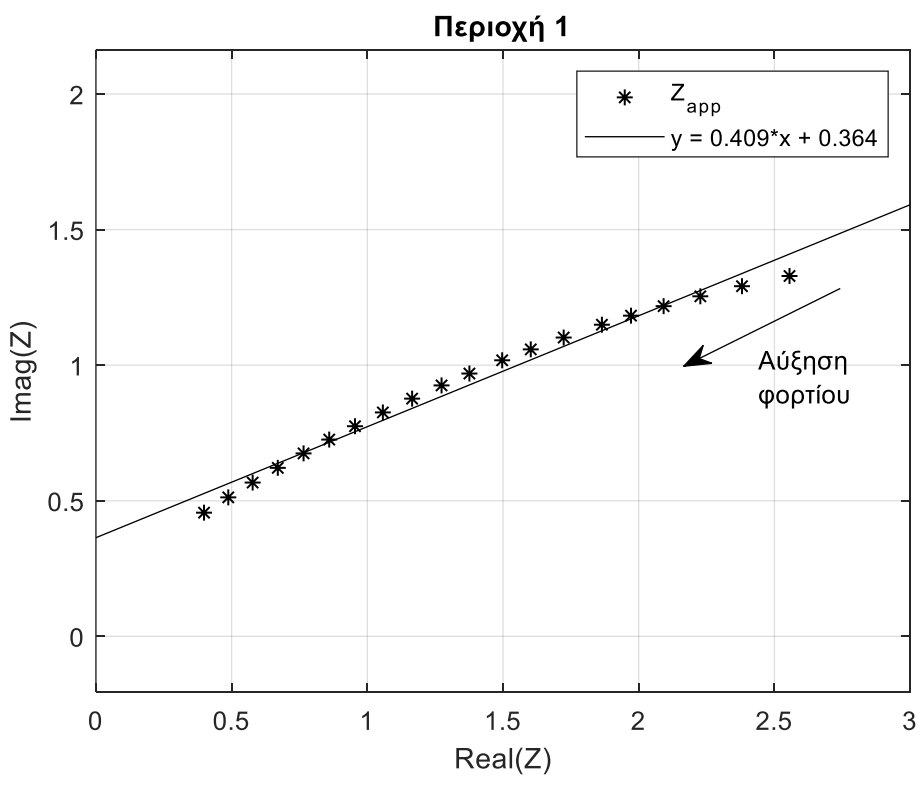
3. Για ακόμα μικρότερα G_L , μεταξύ X_{app}^{max} και $X_{app} = 0$, παρατηρούμε πως αν χαραχθεί μια ευθεία που αντιστοιχεί σε αυτά τα σημεία η κλίση της είναι αρνητική και επομένως προσδιορίζεται χωρητικός ΣΙ φορτίου και άρα πρόκειται για υπεραντιστάθμιση (Σχ. 3.24).
4. Για τα μικρότερα G_L , το X_{app} είναι αρνητικό (Σχ. 3.25) λόγω της ύπαρξης πυκνωτή μεγαλύτερου από το $1/X_L$.

Η παραπάνω συμπεριφορά μπορεί να ερμηνευθεί αν λάβουμε υπόψη ότι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης με παρουσία αντιστάθμισης είναι κύκλος. Ο κύκλος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης Z_{app} φαίνεται στο Σχ. 3.26. Για λόγους πληρότητας του σχήματος περιλαμβάνονται και οι αρνητικές τιμές της G_L . Με κατάλληλη επεξεργασία [CHE09] από τα σημεία των μετρήσεων μπορεί να βρεθεί κύκλος ο οποίος προσαρμόζεται κατάλληλα στα σημεία των μετρήσεων. Πράγματι, ο κόκκινος κύκλος του Σχ. 3.26 αντιστοιχεί στις μετρήσεις και για αυτόν μπορεί να βρεθεί το κέντρο και η ακτίνα του.

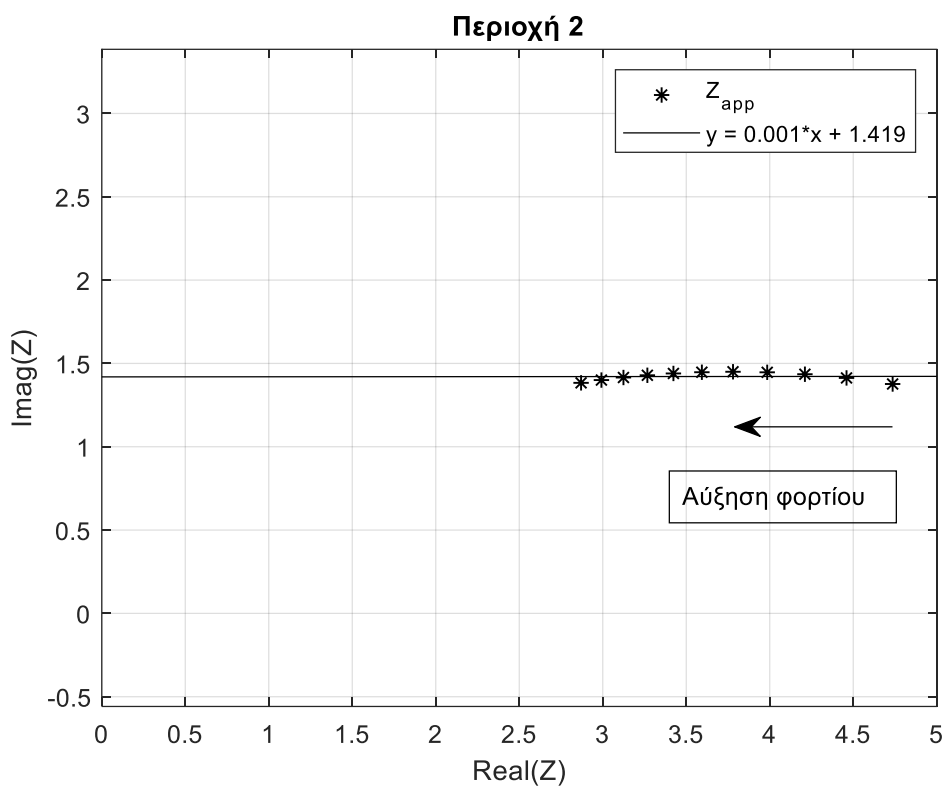
Το σημείο ΑΚ του Σχ. 3.26 αντιστοιχεί σε $G_L = 0$ δηλαδή σε ανοικτοκυκλωμένο φορτίο, ενώ το σημείο ΒΚ αντιστοιχεί σε $G_L \rightarrow \pm\infty$ δηλαδή σε βραχυκυκλωμένο φορτίο.



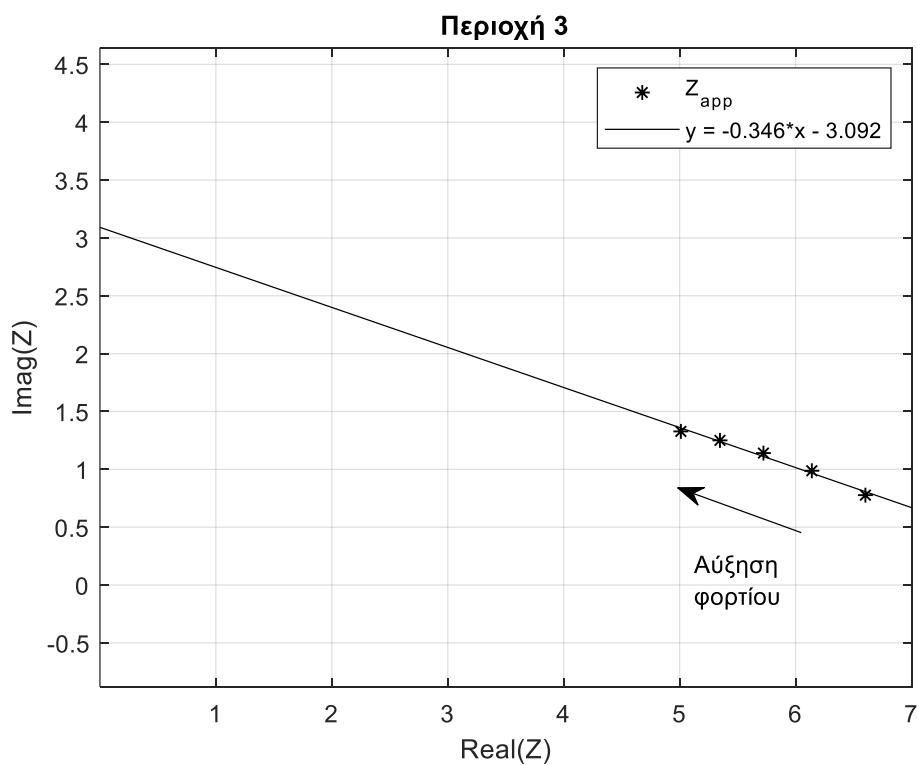
Σχ. 3.21: Ο τόπος της φαινόμενης αντίστασης παρουσία πυκνωτή αντιστάθμισης.



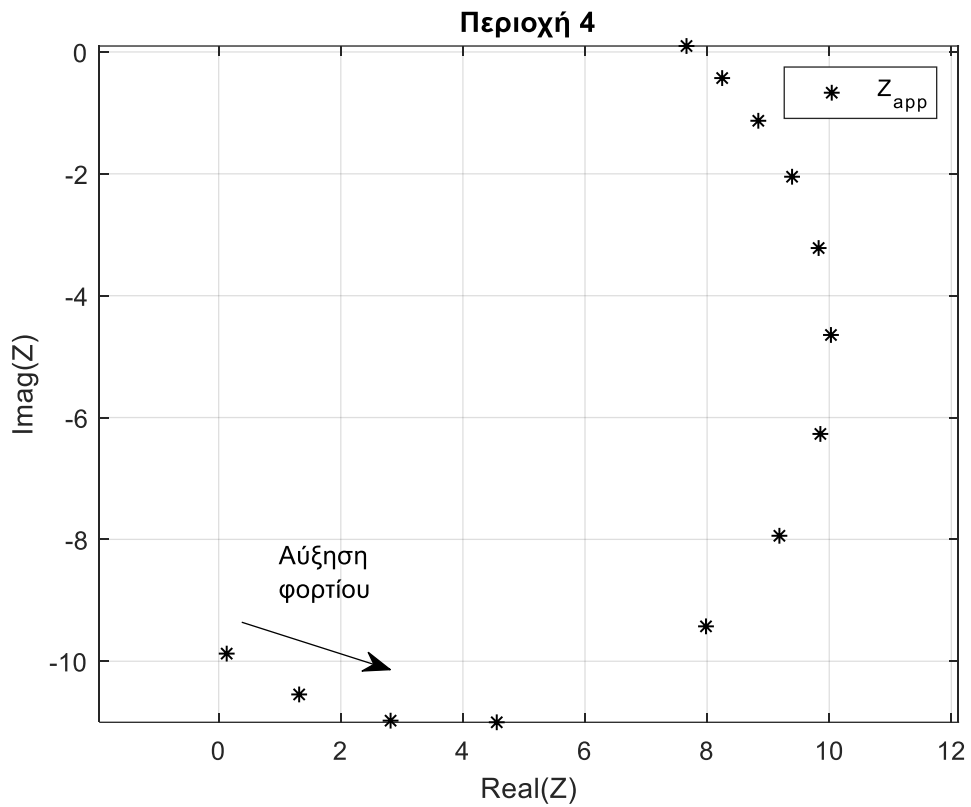
Σχ. 3.22: Υποαντιστάθμιση.



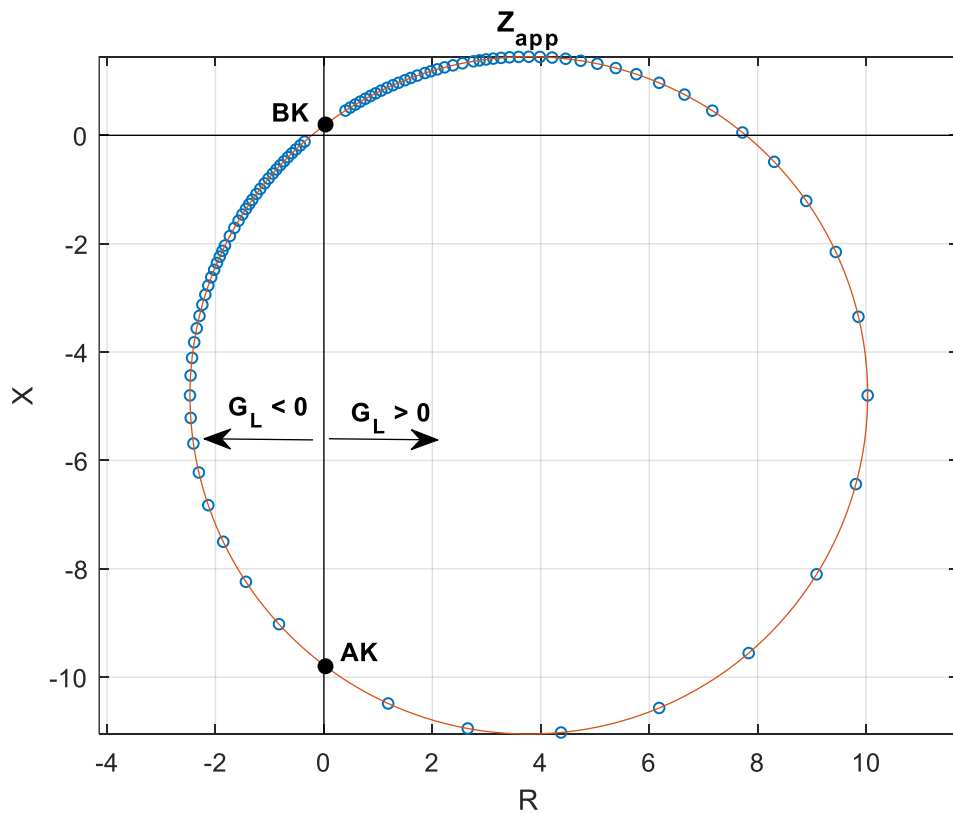
Σχ. 3.23: Αντισταθμισμένο φορτίο.



Σχ. 3.24: Υπεραντιστάθμιση.



Σχ. 3.25: Υπερίσχυση του χωρητικού στοιχείου.



Σχ. 3.26: Ο κυκλικός τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης στο επίπεδο R-X.

Για να διαπιστωθεί ότι πράγματι η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στο επίπεδο R-X παριστάνει κύκλο πρέπει να βρεθεί η σχέση που συνδέει τα R_{app} και X_{app} . Η σύνθετη αγωγιμότητα του παράλληλου συνδυασμού πυκνωτή – φορτίου είναι:

$$Y_3 = G_L(1 - j\alpha) + jB_c \quad (3.19)$$

και άρα η σύνθετη αντίσταση είναι:

$$Z_3 = \frac{1}{Y_{Lc}} = \frac{G_L + j(\alpha G_L - B_c)}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \quad (3.20)$$

Συνεπώς για την φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$Z_{app} = R_2 + \frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} + j \left[X_2 + \frac{\alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \right] \quad (3.21)$$

και άρα:

$$R_{app} = R_2 + \frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \quad (3.22)$$

$$X_{app} = X_2 + \frac{\alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \quad (3.23)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.22) και (3.23) αποδεικνύεται ότι ο τόπος του Z_{app} στο μιγαδικό επίπεδο σχηματίζει έναν κύκλο. Πράγματι αν θεωρήσουμε το σημείο

$$Z_c = R_c + jX_c \quad (3.24)$$

με

$$R_c = R_2 + \frac{\alpha}{2B_c} \quad (3.25)$$

και

$$X_c = X_2 - \frac{1}{2B_c} \quad (3.26)$$

τότε όπως αποδεικνύεται παρακάτω για $B_c \neq 0$ ισχύει

$$|Z_{app} - Z_c| = \frac{1}{2B_c \cos \varphi} = \frac{\sqrt{1 + \alpha^2}}{2B_c} \quad (3.27)$$

Η (3.27) αποδεικνύεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
|\mathbf{Z}_{app} - \mathbf{Z}_c|^2 &= (R_{app} - R_c)^2 + (X_{app} - X_c)^2 \\
&= \left[\frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - aG_L)^2} - \frac{\alpha}{2B_c} \right]^2 + \left[\frac{aG_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - aG_L)^2} + \frac{1}{2B_c} \right]^2
\end{aligned}$$

και μετά τις πράξεις

$$|\mathbf{Z}_{app} - \mathbf{Z}_c|^2 = \frac{1 + \alpha^2}{4B_c^2} \quad (3.28)$$

Η κυκλική μορφή της σύνθετης αντίστασης στο μιγαδικό επίπεδο οφείλεται στην αντιστροφή της σχέσης (3.19)-(3.20). Πράγματι ο τόπος της (3.19) στο μιγαδικό επίπεδο είναι ευθεία και η απεικόνιση ευθείας που δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων με τον μετασχηματισμό αντιστροφής ($\mathbf{Z} = 1/\mathbf{Y}$) δίνει στο μιγαδικό επίπεδο έναν κύκλο. Συγκεκριμένα, η απόδειξη ότι ο τόπος είναι κύκλος μπορεί να προκύψει και από την μιγαδική ανάλυση και συγκεκριμένα από τις Σύμμορφες Απεικονίσεις και τους Διγραμμικούς Μετασχηματισμούς. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία ο μετασχηματισμός αντιστροφής στο μιγαδικό επίπεδο μιας ευθείας είναι είτε ευθεία είτε κύκλος. Η ευθεία που μας απασχολεί είναι η ευθεία της αγωγιμότητας (φορτίο και πυκνωτής). Όταν ευθεία της αγωγιμότητας διέρχεται από την αρχή των αξόνων τότε η αντιστροφή της, δηλαδή η σύνθετη αντίσταση, είναι ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων (δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση), ενώ όταν η ευθεία δεν διέρχεται από την αρχή των αξόνων η αντιστροφή της είναι κύκλος (δίκτυο με αντιστάθμιση) [Κρα13].

Χρησιμοποιώντας μια μέθοδο προσαρμογής σε κύκλο μπορεί να προσδιοριστεί το κέντρο και η ακτίνα του κύκλου. Για την εύρεση των παραμέτρων του κατάντη δικτύου πρέπει να λυθεί το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{1 + \alpha^2}}{2B_c} = r \\ R_2 + \frac{\alpha}{2B_c} = R_c \\ X_2 - \frac{1}{2B_c} = X_c \end{cases} \quad (3.29)$$

όπου τα r , R_c και X_c έχουν βρεθεί από την προσαρμογή του κύκλου.

Δεδομένου ότι η κατάντη γραμμή είναι άγνωστη εάν δεν υπάρχει άλλη πληροφορία το σύστημα (3.29) είναι μη επιλύσιμο. Αν όμως υποθεθεί παραδείγματος χάρη η σχέση μεταξύ R_2 και X_2 , όπως ο λόγος $\lambda = R_2/X_2$, της κατάντη γραμμής τότε το σύστημα μπορεί να λυθεί.

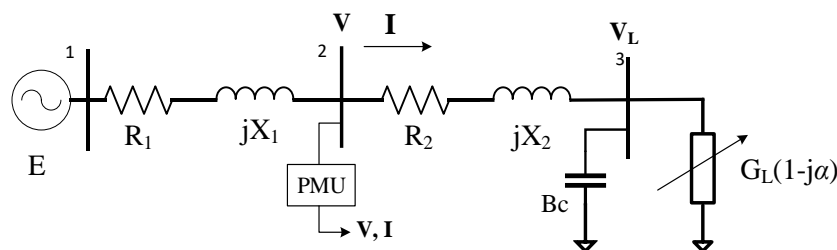
Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση Κατάντη Δικτύου με τη Μέθοδο Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η γνώση του κατάντη δικτύου μπορεί να συμβάλει στην αναγνώριση και κατ' επέκταση στην αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης. Εκτός από την απλή περίπτωση φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος το οποίο δεν παρουσιάζει απότομες μεταβολές, όπου όπως εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να γίνει εκτίμηση του φορτίου, θα πρέπει η μελέτη να επεκταθεί ώστε να λαμβάνεται υπόψη η αντιστάθμιση φορτίου και οι απότομες αλλαγές του κατάντη δικτύου, όπως η ένταξη πυκνωτών αντιστάθμισης.

Η ανάλυση στηρίζεται σε μετρήσεις τάσης και ρεύματος που λαμβάνονται από PMU σε ενδιάμεσο ζυγό του δικτύου. Όλες οι μετρήσεις θεωρούμε σε αυτό το κεφάλαιο πως είναι απαλλαγμένες από θόρυβο και τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια προκύπτουν από την επεξεργασία των μετρήσεων με τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.

4.1 Ενδεικτικό Δίκτυο

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις εξετάζεται ένα απλό ακτινικό δίκτυο με απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος, όπως αυτό του Σχ. 4.1. Η αναγνώριση του κατάντη δικτύου περιλαμβάνει τον προσδιορισμό τόσο των ωμικών αντιστάσεων όσο και των αντιδράσεων του δικτύου καθώς και της τυχούσας χωρητικής αντιστάθμισης.



Σχ. 4.1: Ακτινικό δίκτυο προς αναγνώριση.

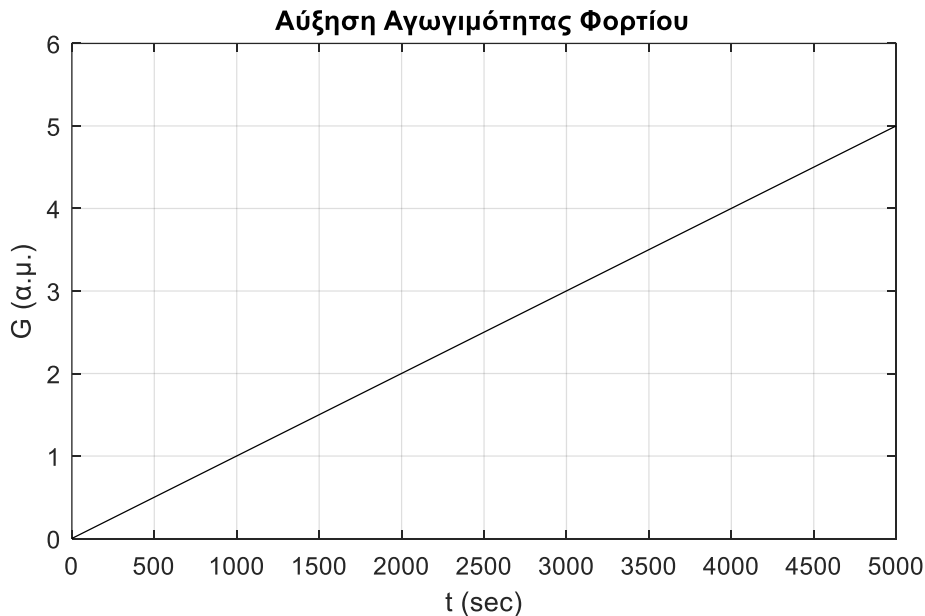
Οι παράμετροι του δικτύου και ο ΣΙ του φορτίου θεωρούνται σταθερές κατά την εξαγωγή των μετρήσεων και έχουν τις τιμές του Πίν. 4.1:

Πίν. 4.1: Παράμετροι δικτύου.

E	R_1	X_1	R_2	X_2
1,05 α.μ.	0,05 α.μ.	0,15 α.μ.	0,03 α.μ.	0,20 α.μ.

Η αντιστάθμιση B_c και ο συντελεστής ισχύος του φορτίου θα ορίζονται ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται.

Το μοναδικό μέγεθος που μεταβάλλεται με τον χρόνο κατά την εξαγωγή των μετρήσεων είναι η αγωγιμότητα G_L του φορτίου. Η αγωγιμότητα την χρονική στιγμή $t=0$ είναι 0,001 α.μ. ενώ στη συνέχεια αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό αύξησης 0,001 α.μ. /s. Θεωρούμε ως χρόνο προσομοίωσης και εξαγωγής μετρήσεων τα 5000 δευτερόλεπτα.



Σχ. 4.2: Αγωγιμότητα φορτίου.

4.2 Μετρήσεις Τάσης και Ρεύματος

Οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε έναν ενδιάμεσο ζυγό μπορούν να δώσουν σημαντικές πληροφορίες για το υπό μελέτη δίκτυο, όπως η φαινόμενη αντίσταση αλλά και η ισχύς που μεταφέρεται. Ωστόσο, για την αναγνώριση του κατάντη δικτύου που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, τελικά μόνο η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z_{app} παρέχει χρήσιμες πληροφορίες.

Συγκεκριμένα η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση ορίζεται ως

$$Z_{app} = \frac{V}{I}$$

όπου V και I οι μετρήσεις στον ενδιάμεσο ζυγό. Επίσης η Z_{app} γράφεται και ως εξής:

$$Z_{app} = R_{app} + jX_{app}$$

4.3 Παραγωγή Μετρήσεων (Προσομοίωση)

Το εξεταζόμενο δίκτυο αποτελείται από μια σταθερή πηγή τάσης E και το συνολικό ρεύμα που ρέει στο δίκτυο είναι

$$I = \frac{E}{Z_o}$$

όπου Z_o είναι η συνολική σύνθετη αντίσταση του δικτύου και ισχύει:

$$Z_o = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

με

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

και

$$Z_3 = Z_c + Z_L$$

όπου

$$Z_c = \frac{1}{jB_c}$$

$$Z_L = G_L(1 - j\alpha)$$

Κάνοντας τις πράξεις

$$Z_o = \frac{(G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2)(R_1 + R_2) + G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} + j \frac{(G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2)(X_1 + X_2) + \alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2}$$

Η τάση του ζυγού 2 μπορεί να βρεθεί από την σχέση

$$V = E - IZ_1$$

4.4 Αναγνώριση Κατάντη Δικτύου

Από την φαινόμενη αντίσταση το δίκτυο πρέπει να χωριστεί σε γραμμή και φορτίο και να εκτιμηθεί και η τυχούσα χωρητική αγωγιμότητα. Με άλλα λόγια η Z_{app} πρέπει να ικανοποιεί την ισότητα

$$Z_{app} = Z_2 + Z_3$$

και χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη καταλήγουμε στο σύστημα

$$\begin{cases} R_{app} = R_2 + \frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \\ X_{app} = X_2 + \frac{\alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \end{cases} \quad (4.1)$$

Η μη γραμμικότητα του προβλήματος οφείλεται στον πολλαπλασιασμό αG_L καθώς τόσο ο ΣΙ του φορτίου όσο και η αγωγιμότητά του είναι άγνωστες παράμετροι προς προσδιορισμό. Αξίζει να σημειωθεί πως η μη γραμμικότητα εμφανίζεται ακόμα και στην περίπτωση δικτύου χωρίς αντιστάθμιση όπου το σύστημα γράφεται ως:

$$\begin{cases} R_{app} = R_2 + \frac{1}{G_L(1 + \alpha^2)} \\ X_{app} = X_2 + \frac{\alpha}{G_L(1 + \alpha^2)} \end{cases} \quad (4.2)$$

4.5 Επιλογή Ανεξάρτητων Μετρήσεων

Σε ένα πραγματικό σύστημα για να είναι οι μετρήσεις ανεξάρτητες πρέπει να αντιστοιχούν σε διαφορετικό φορτίο. Κάτι τέτοιο συμβαίνει όταν το ρεύμα παρουσιάζει αξιόλογη διαφορά ανάμεσα σε δύο μετρήσεις. Οι τιμές δηλαδή που θα ληφθούν υπόψη για τον προσδιορισμό πρέπει να διαφέρουν ικανοποιητικά από άποψη ρεύματος ώστε πράγματι να αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Έτσι, οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος υφίστανται έλεγχο με κριτήριο το ρεύμα. Το κριτήριο των ρευμάτων που επιλέχθηκε ώστε δύο λειτουργικές καταστάσεις να λαμβάνονται υπόψη για τον προσδιορισμό είναι:

$$\left| \frac{I_k - I_l}{I_l} \right| \geq 0,05 \quad (4.3)$$

όπου ο δείκτης k δείχνει την τρέχουσα μέτρηση, ενώ ο δείκτης l αντιστοιχεί στην τελευταία μέτρηση που ικανοποιεί αυτό το κριτήριο.

Στην περίπτωση παρουσίας θορύβου (Κεφάλαιο 5) ο έλεγχος που πραγματοποιείται με βάση την διαφορά ρεύματος συμβάλλει επίσης και στο φιλτράρισμα του θορύβου, οι τιμές δηλαδή που χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία θα έχουν τόση διαφορά ούτως ώστε ο θόρυβος να μην οδηγεί σε αμφιλεγόμενα αποτελέσματα.

4.6 Περιγραφή Αλγορίθμου Μη Γραμμικών Ελαχίστων Τετραγώνων

Η μέθοδος προσδιορισμού που αναπτύχθηκε στηρίζεται στην συνάρτηση `lsqnonlin` της Matlab. Η `lsqnonlin` λύνει προβλήματα μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μη γραμμική προσαρμογή δεδομένων. Η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση ορίζεται από το σύστημα (4.1)

$$\begin{cases} R_{app} = R_2 + \frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \\ X_{app} = X_2 + \frac{\alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \end{cases}$$

Επίσης, η `lsqnonlin` χρειάζεται μια αρχική εκτίμηση \mathbf{p}_0 των παραμέτρων προς προσδιορισμό. Ως προς την εκάστοτε αρχική εκτίμηση που απαιτεί η `lsqnonlin`, δίνεται η λύση που έχει προκύψει στην τελευταία επίλυση. Η πρώτη αρχική εκτίμηση που χρησιμοποιείται ορίζεται κάθε φορά ανάλογα με τη περίπτωση που εξετάζεται.

Θεωρώντας ότι το φορτίο αλλάζει κάθε χρονική στιγμή t_k , εξετάζοντας N χρονικές στιγμές, το προς επίλυση σύστημα περιγράφεται από $2N$ εξισώσεις και εκτιμώνται N τιμές αγωγιμότητας. Αντίθετα, θεωρώντας πως το δίκτυο και ο ΣΙ του φορτίου δεν αλλάζουν συνέχεια αλλά παραμένουν σταθερά για τις N εξεταζόμενες στιγμές, τότε κάθε επίλυση δίνει μια τιμή R_2, X_2 και α . Οι άγνωστοι λοιπόν είναι $N+3$ και αφού το πλήθος των εξισώσεων είναι $2N$, απαιτούνται περισσότερες από τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές, δηλαδή $N > 3$, για να είναι δυνατή η εκτίμησή τους. Στην περίπτωση όπου $N=3$ το σύστημα έχει ντετερμινιστική λύση. Στην περίπτωση που υπάρχει και αντιστάθμιση αέργου ισχύος οι άγνωστοι είναι $N+4$ και άρα θα πρέπει $N > 4$.

Χρησιμοποιείται μια λογική κυλιόμενου παραθύρου ώστε η εκτίμηση από την προηγούμενη στην επόμενη κατάσταση να γίνεται με έναν ομαλό τρόπο. Πιο αναλυτικά, σε κάθε νέα επίλυση που κάνει η `lsqnonlin` το σύστημα των εξισώσεων περιγράφουν δίκτυο και φορτίο που διαφέρουν μόνο κατά μια χρονική στιγμή από την προηγούμενη επίλυση. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε ομαλές εκτιμήσεις και άρα πιο εύκολη σύγκλιση στις πραγματικές τιμές.

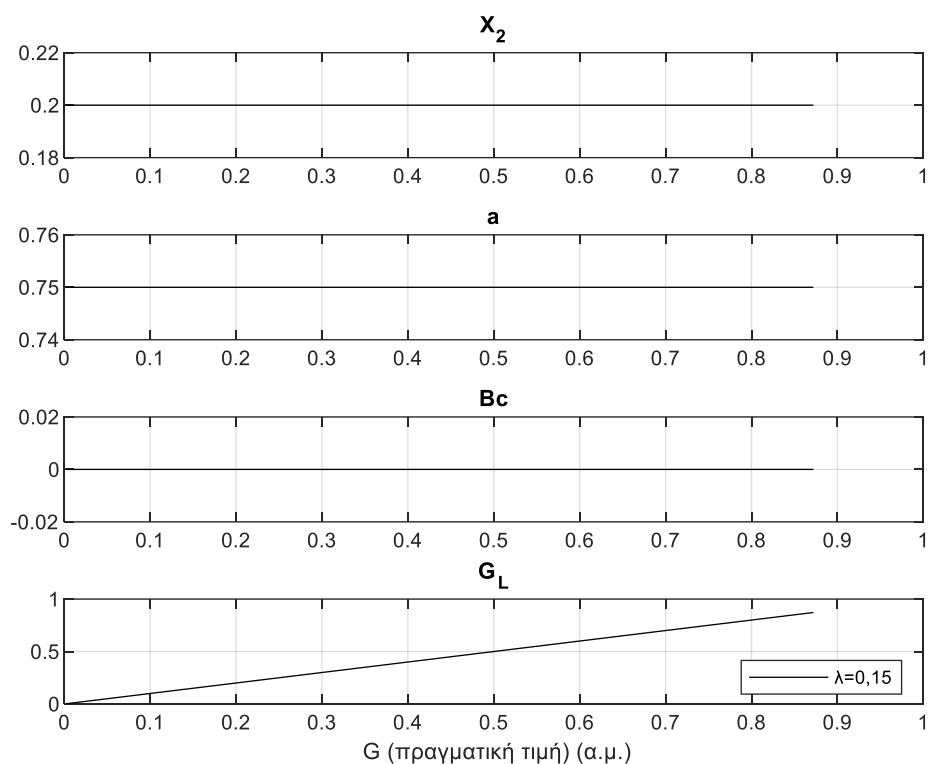
Όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 3 για να είναι δυνατός ο διαχωρισμός της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης σε γραμμή και φορτίο απαιτείται μια επιπλέον πληροφορία και συγκεκριμένα επιλέγεται ένας σταθερός λόγος $\lambda = R_2/X_2$ για την γραμμή. Η επιλογή αυτή δεν είναι εντελώς αυθαίρετη καθώς τόσο στο σύστημα μεταφοράς όσο και διανομής οι τιμές του λόγος R_2/X_2 μπορούν να υποτεθούν χωρίς μεγάλη απόκλιση.

4.7 Δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση

4.7.1 Φορτίο επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, $\lambda=0,15$ και $N=20$.

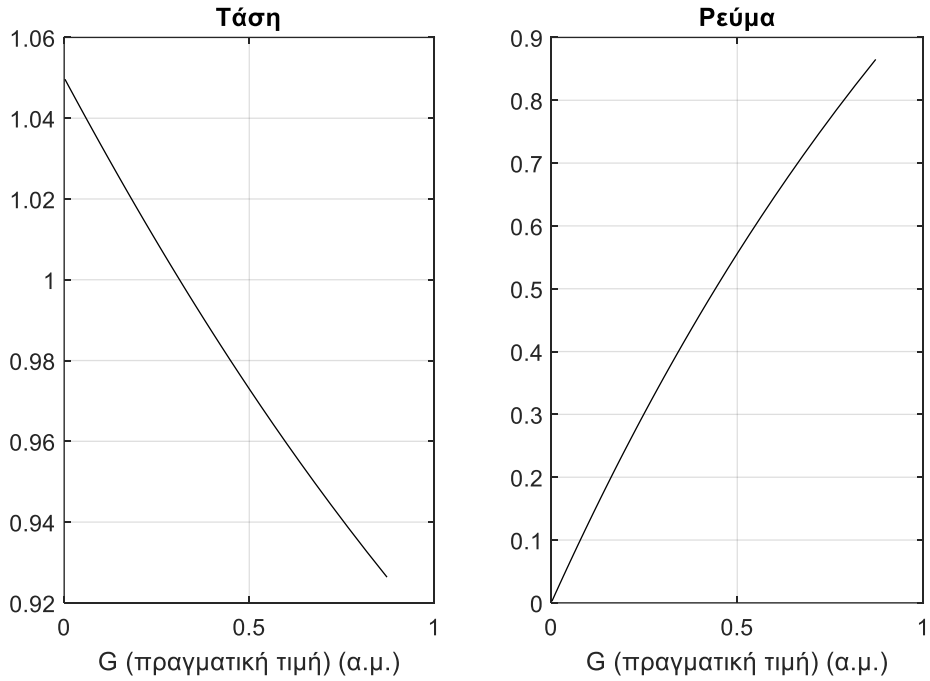
Σαν πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 που απαιτεί η συνάρτηση `lsqnonlin` δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων και λαμβάνονται τα αποτελέσματα του Σχ. 4.3.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 4.3 οι εκτιμήσεις της `lsqnonlin` απουσία θορύβου δίνουν ακριβώς τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων προς προσδιορισμό. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος συγκλίνει αμέσως και για κάθε χρονική στιγμή είτε πρόκειται για αφόρτιστη είτε για φορτισμένη γραμμή.



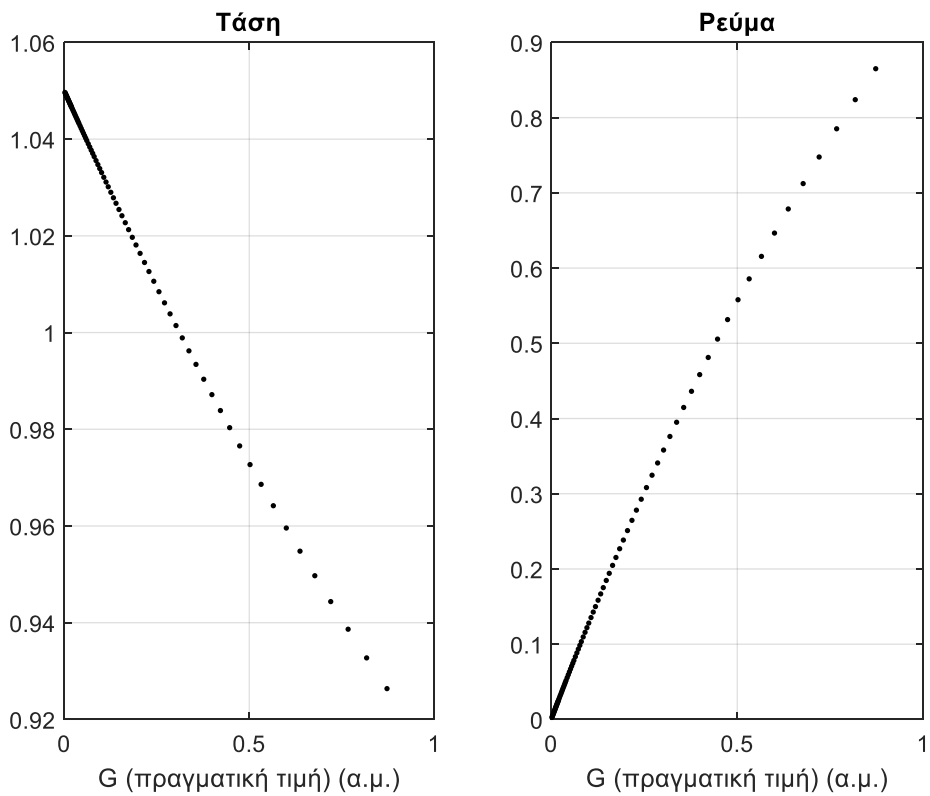
Σχ. 4.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου (ακριβής λόγος R_2/X_2).

Οι τάσεις και τα ρεύματα που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω εκτιμήσεις φαίνονται στο Σχ. 4.5 και έχουν προκύψει από τα πολύ πυκνά σημεία τάσεως και ρεύματος του Σχ. 4.4.



Σχ. 4.4: Μετρήσεις τάσης και ρεύματος.

Τα σημεία που παρουσιάζονται στο Σχ. 4.5 αντιστοιχούν σε εκείνες τις λειτουργικές καταστάσεις – χρονικές στιγμές όπου ισχύει η σχέση (4.3) και συνεπώς θεωρούνται ανεξάρτητες μετρήσεις.



Σχ. 4.5: Τάση και ρεύμα ύστερα από την εφαρμογή του κριτηρίου ρεύματος.

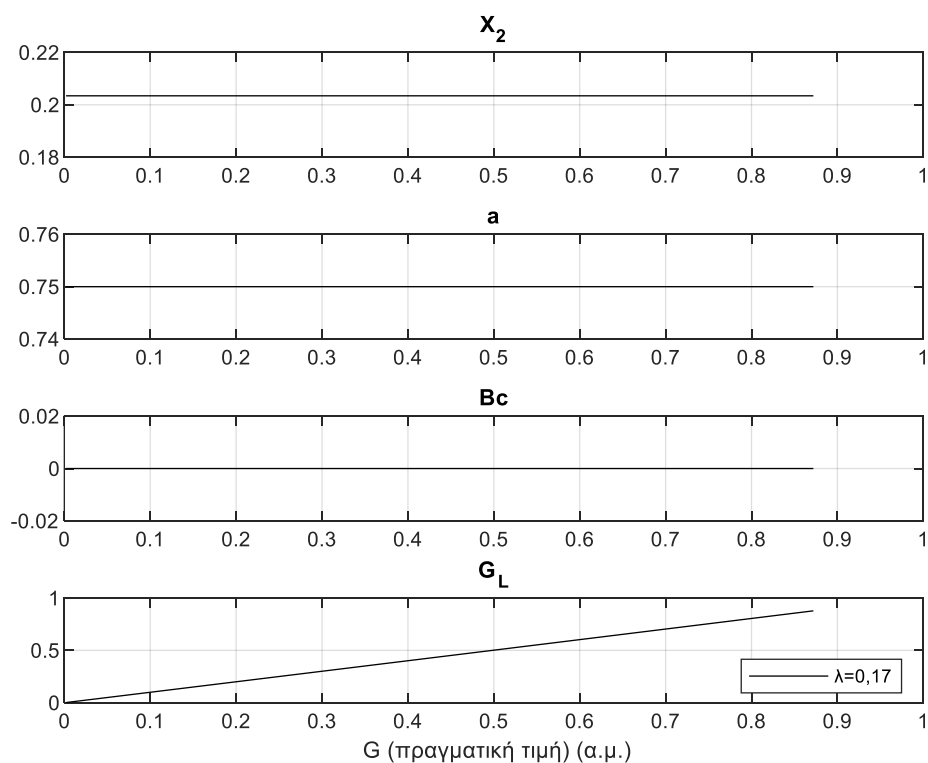
Στον Πίν. 4.2 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές. Τα σφάλματα $\frac{\Delta X_2}{X_2}$ και $\frac{\Delta R_2}{R_2}$ συμπίπτουν μόνο όταν έχει επιλεγθεί ο πραγματικός λόγος γραμμής λ .

Πίν. 4.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	ΔB_c α.μ.
0,15	0,7500	0,2000	0,0300	3,71E-14	8,70E-12	-8,81E-12	-8,81E-12	3,71E-14
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0				

4.7.2 Φορτίο επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, $\lambda=0,17$ και $N=20$.

Σαν αρχική εκτίμηση p_0 που απαιτεί η συνάρτηση lsqnonlin δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων και λαμβάνονται τα αποτελέσματα του Σχ. 4.6.



Σχ. 4.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου με εσφαλμένο λόγο λ .

Η εκτίμηση του X_2 όπως έχει αναφερθεί επηρεάζεται από την επιλογή του λόγου λ . Πράγματι, για λ μεγαλύτερο του πραγματικού η εκτίμηση παρουσιάζει αναμενόμενη απόκλιση από την πραγματική τιμή.

Στον Πίν. 4.3 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, ωστόσο είναι μεγαλύτερα από την περίπτωση που επιλεγεί ο πραγματικός λόγος της γραμμής.

Πίν. 4.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			ΔB_c α.μ.
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	
0,17	0,7500	0,2034	0,0346	6,32E-16	-4,59E-13	1,72	15,3	6,32E-16
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0				

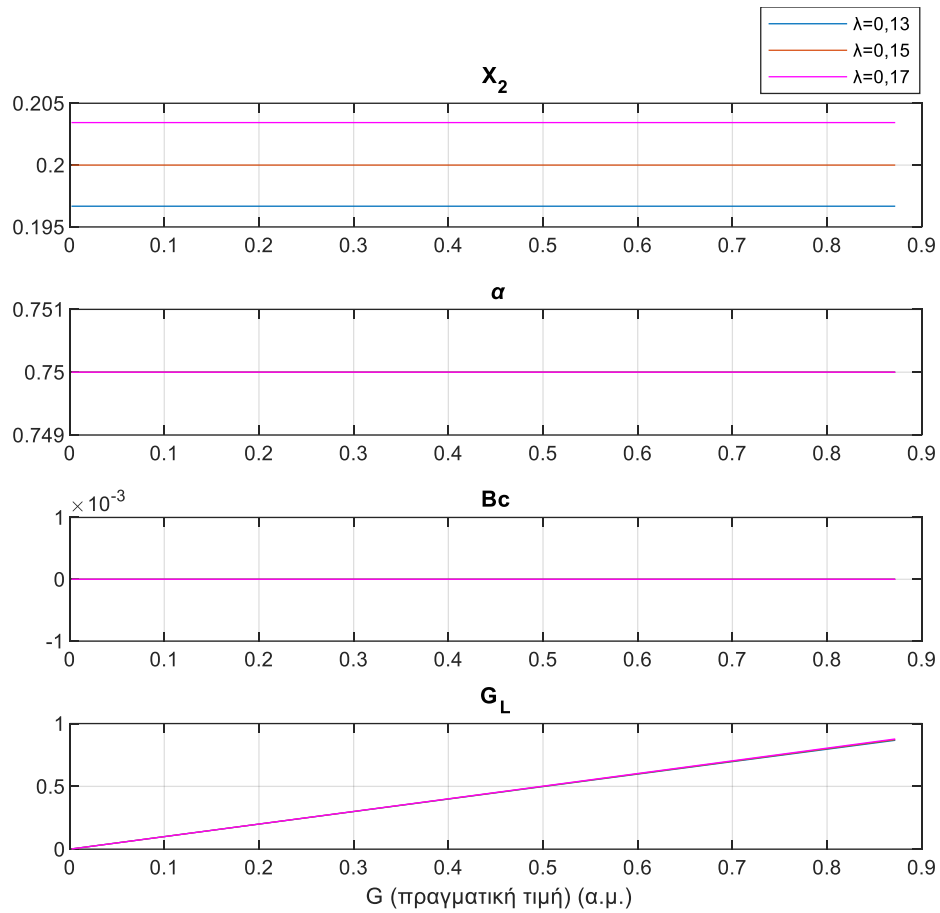
Όπως παρατηρείται οι εκτιμήσεις ΣI και χωρητικής αντιστάθμισης είναι σχεδόν ακριβείς, ενώ σφάλμα παρουσιάζεται μόνο στα R_2 και X_2 .

4.7.3 Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ , $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $N=20$.

Σαν αρχική εκτίμηση p_0 που απαιτεί η συνάρτηση lsqnonlin δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων και λαμβάνονται τα αποτελέσματα του Σχ. 4.7.

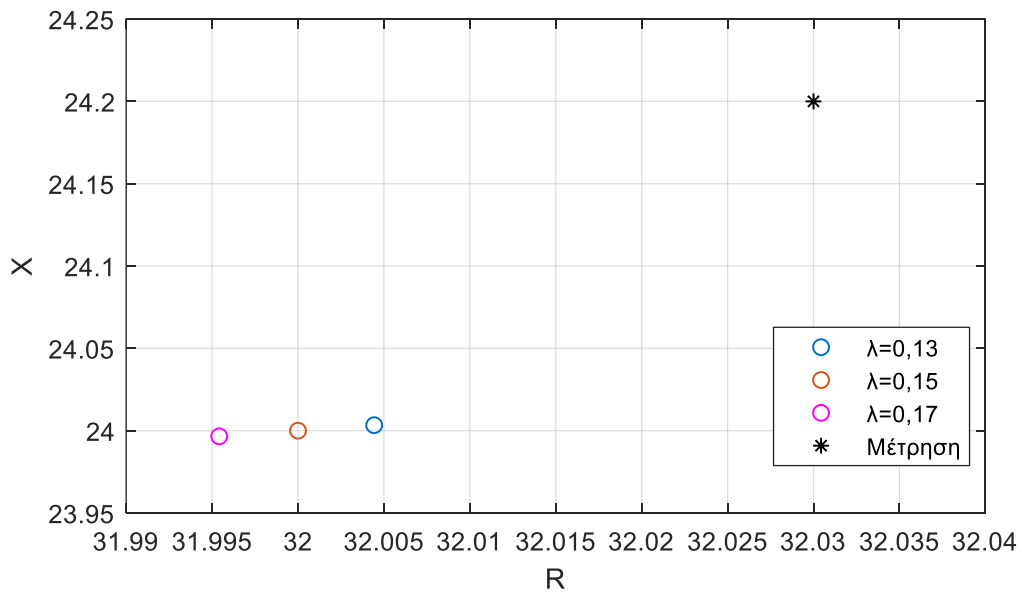
Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε λόγο $\lambda=0,13$, η κόκκινη σε $\lambda=0,15$ (πραγματικός λόγος) και η κίτρινη σε $\lambda=0,17$.

Όπως είναι αναμενόμενο οι εκτιμήσεις της X_2 διαφέρουν από την πραγματική τιμή όταν δεν δίνεται ο πραγματικός-σωστός λόγος λ . Παράγεται δηλαδή μία εκτίμηση η οποία μας δίνει χονδρικά την αναζητούμενη τιμή. Δεδομένου ότι υπάρχει χονδρική γνώση για τον λόγο R_2/X_2 του δικτύου επιλέγοντας κανείς δυο «ακραίες» τιμές του λόγου είναι δυνατόν να προκύψει μια χονδρική εκτίμηση των παραμέτρων καθώς η πραγματική τιμή θα είναι κάπου ενδιάμεσα.



Σχ. 4.7: Εκτιμήσεις παραμέτρων απουσία θορύβου με τρεις διαφορετικούς λόγους λ .

Η επιλογή διαφορετικών λόγων λ μπορεί να φανεί και στην εκτίμηση του φορτίου και συγκεκριμένα αν μελετηθεί η προβολή του φορτίου στο επίπεδο R-X.



Σχ. 4.8: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ .

Όπως έχει αναφερθεί ο λόγος λ δείχνει την κατεύθυνση της αντίστασης γραμμής Z_2 . Όσο μικρότερος ο λόγος λ τόσο πιο μεγάλη κλίση έχει το διάνυσμα Z_2 που ενώνει το φορτίο με την αντίστοιχη μέτρηση, οπότε και για τον λόγο αυτό στο Σχ. 4.8 το φορτίο που υπολογίζεται με μικρότερο λόγο λ είναι εγγύτερα στην μέτρηση. Με αυτό το σκεπτικό εξηγείται και γιατί η πραγματική τιμή φορτίου προκύπτει στο ενδιάμεσο μεταξύ των ακραίων λόγων λ . Στα παραπάνω σχήματα οι εκτιμήσεις φορτίου που αντιστοιχούν στον πραγματικό λόγο λ της γραμμής παρουσιάζονται με κόκκινο χρώμα.

Στον Πίν. 4.4 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, ωστόσο είναι μεγαλύτερα όταν δεν επιλεγεί ο πραγματικός λόγος της γραμμής. Πάντως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιβεβαιώνεται ότι οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων της γραμμής είναι μεταξύ των ακραίων λόγων λ .

Πίν. 4.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			ΔB_c α.μ.
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	
0,13	0,7500	0,1967	0,0256	3,22E-15	9,62E-13	-1,66	-14,8	3,22E-15
0,15	0,7500	0,2000	0,0300	3,71E-14	8,70E-12	-8,81E-12	-8,81E-12	3,71E-14
0,17	0,7500	0,2034	0,0346	6,32E-16	-4,59E-13	1,72	15,3	6,32E-16
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0				

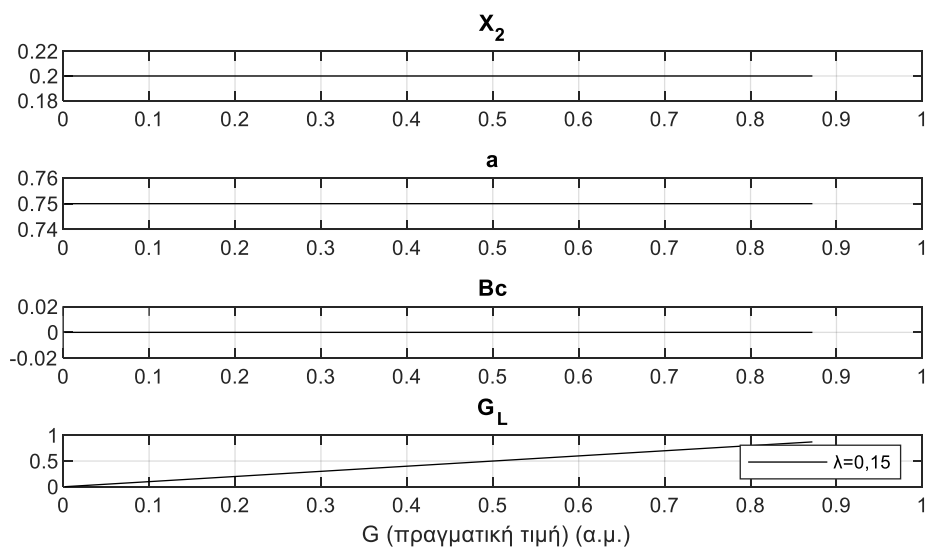
4.7.4 Επίδραση αρχικής εκτίμησης, $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $\lambda=0,15$, $N=20$

Στις παραπάνω περιπτώσεις η αρχική εκτίμηση αποτελούταν από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Για λόγους πληρότητας πρέπει να αναφερθεί πως ακόμα και με τυχαίες αρχικές τιμές οι οποίες βρίσκονται εντός λογικού εύρους τιμών οι εκτιμήσεις που προκύπτουν είναι σωστές. Οι τυχαίες τιμές της τρίτης στήλης του Πίν. 4.5 έχουν παραχθεί με την συνάρτηση `rand` της Matlab. Η `rand` επιστρέφει τυχαίους αριθμούς με ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα (0,1).

Επειδή η επίλυση πραγματοποιείται διαδοχικά για όλες τις χρονικές στιγμές, πραγματοποιείται κυλιόμενη εκτίμηση, δηλαδή δίνονται ως αρχικές τιμές για την νέα εκτίμηση οι λύσεις της προηγούμενης επίλυσης.

Πίν. 4.5: Τυχαίο αρχικό διάνυσμα

	ρ_0 πραγματικές τιμές	ρ_0 τυχαίες τιμές στο διάστημα (0,1)
X2	0,2	0,547
a	0,75	0,895
Bc	0	0,187
G1	0,002	0,832
G2	0,003	0,063
G3	0,004	0,600
G4	0,005	0,060
G5	0,006	0,234
G6	0,007	0,220
G7	0,008	0,259
G8	0,009	0,599
G9	0,01	0,695
G10	0,011	0,922
G11	0,012	0,656
G12	0,013	0,634
G13	0,014	0,402
G14	0,015	0,358
G15	0,016	0,454
G16	0,017	0,839
G17	0,018	0,390
G18	0,019	0,890
G19	0,02	0,811
G20	0,022	0,822

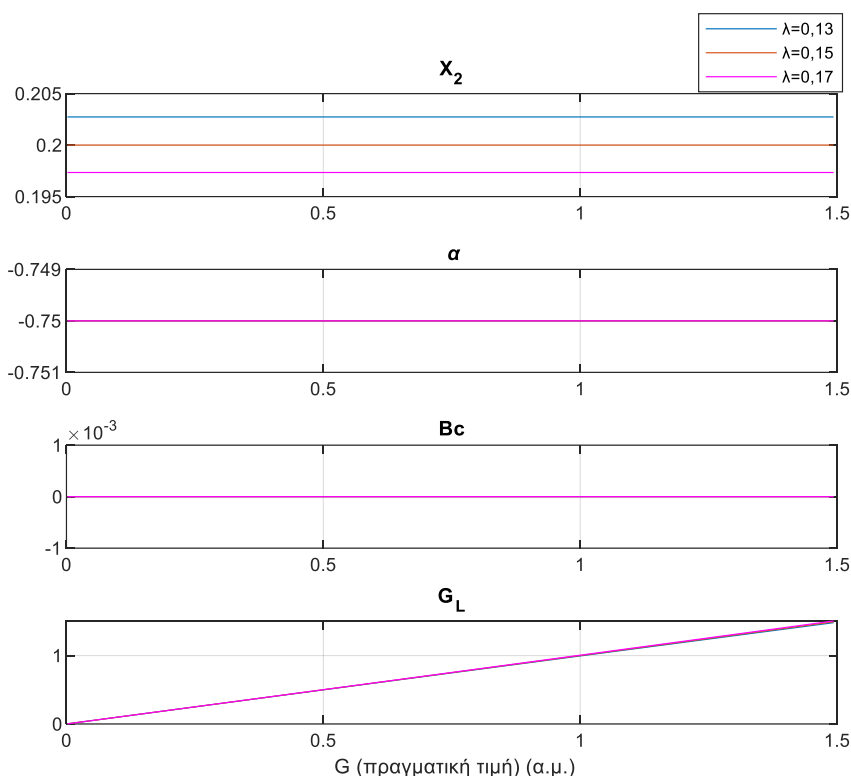


Σχ. 4.9: Εκτιμήσεις με τυχαία αρχική εκτίμηση ρ_0 .

4.7.5 Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ , $\Sigma I=0,8$ Χωρητικός, $N=20$.

Σαν αρχική εκτίμηση p_0 που απαιτεί η συνάρτηση $lsqnonlin$ δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων και λαμβάνονται τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 4.10. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί σε λόγο $\lambda=0,13$, η κόκκινη σε $\lambda=0,15$ (πραγματικός λόγος) και η φούξια σε $\lambda=0,17$.

Οι εκτιμήσεις της X_2 διαφέρουν από την πραγματική τιμή όταν δεν δίνεται ο πραγματικός-σωστός λόγος λ .



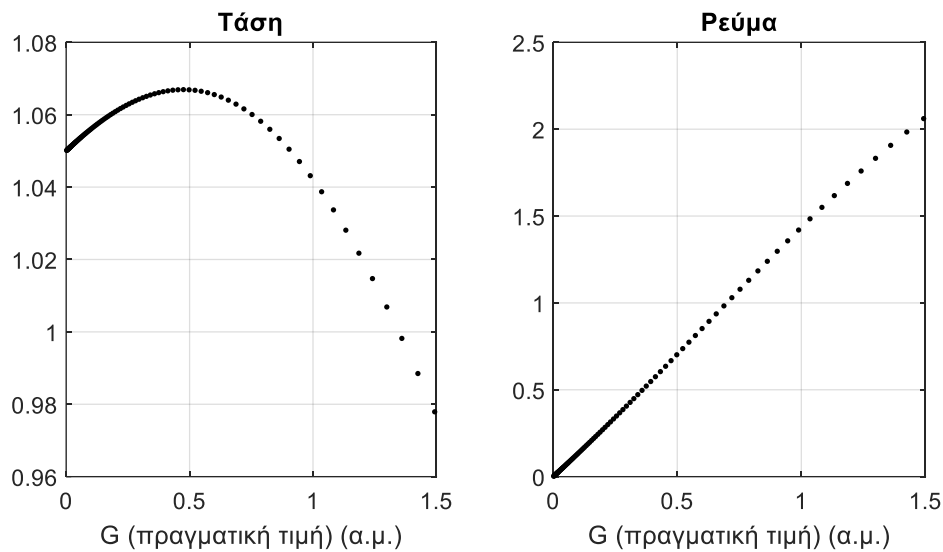
Σχ. 4.10: Σύγκριση διαφορετικών λόγων λ με φορτίου χωρητικού ΣI .

Στον Πίν. 4.6 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, ωστόσο είναι μεγαλύτερα όταν δεν επιλεγεί ο πραγματικός λόγος της γραμμής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιβεβαιώνεται ότι οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων της γραμμής είναι μεταξύ των ακραίων λόγων λ .

Πίν. 4.6: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	ΔB_c α.μ.
0,13	-0,7500	0,2027	0,0264	-3,69E-13	8,56E-11	1,37	-12,1	-3,69E-13
0,15	-0,7500	0,2000	0,0300	-1,68E-12	3,44E-10	2,75E-10	2,75E-10	-1,68E-12
0,17	-0,7500	0,1973	0,0335	1,65E-13	-3,89E-11	-1,33	11,8	1,65E-13
	Πραγματικές τιμές							
	-0,75	0,2	0,03	0				

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο .

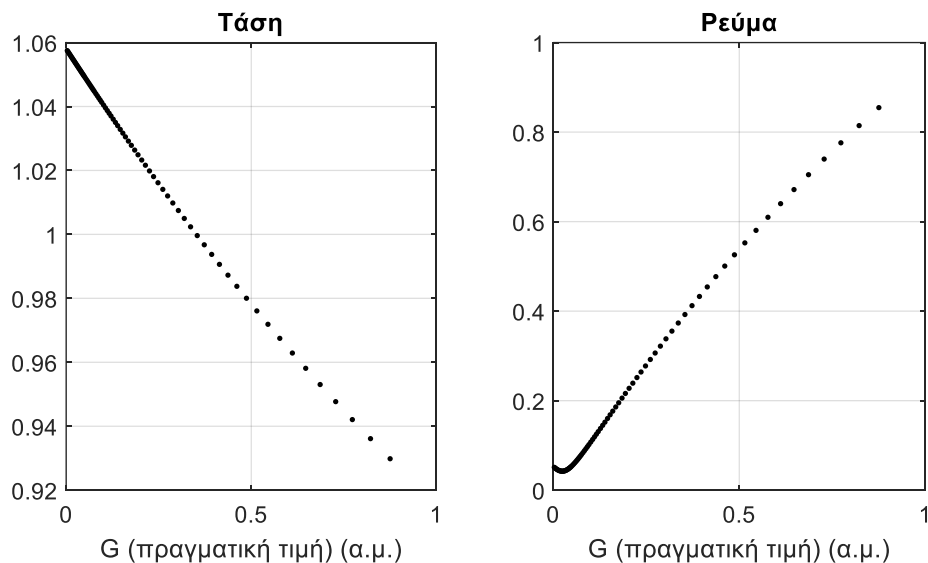


Σχ. 4.11: Μετρήσεις.

4.8 Δίκτυο με αντιστάθμιση

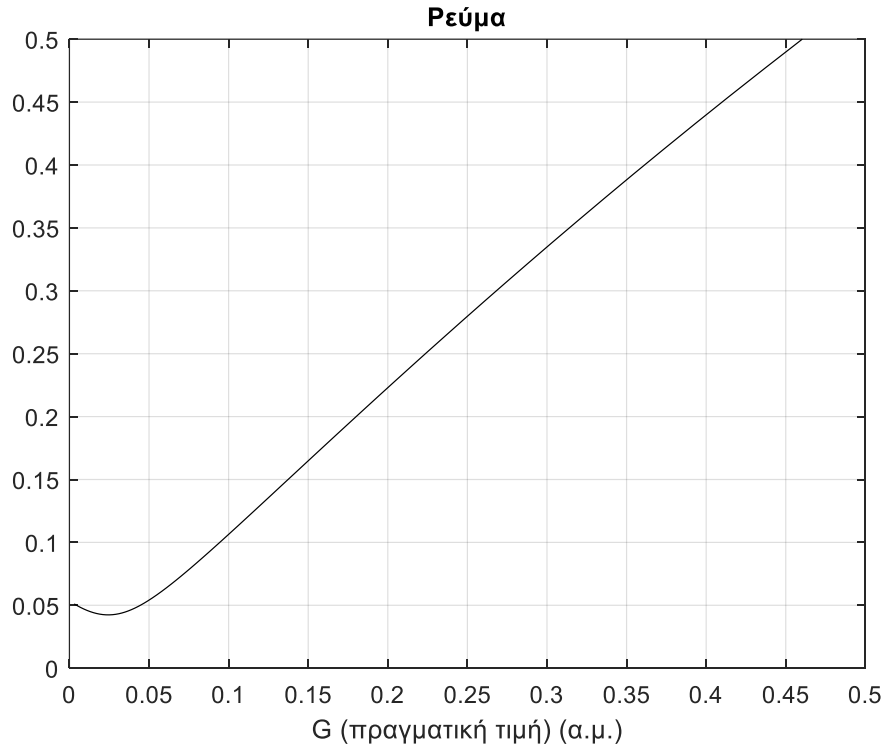
4.8.1 Σύγκριση λόγων λ με αντιστάθμιση $B_c=0,05$ α.μ. , επαγωγικό $\Sigma I=0,8$ και $N=20$.

Οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος που ικανοποιούν την (4.3) φαίνονται στο Σχ. 4.12.

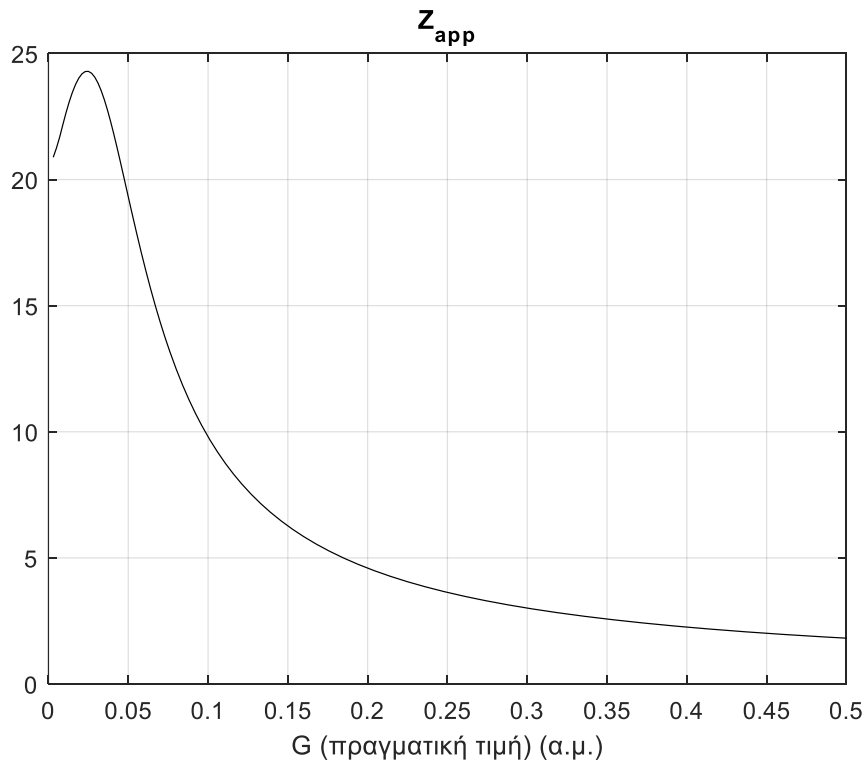


Σχ. 4.12: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.

Με την παρουσία πυκνωτή αντιστάθμισης πρέπει να σημειωθεί η διαφορά που παρουσιάζουν οι καμπύλες του ρεύματος και της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης από τον ζυγό. Συγκεκριμένα, για χαμηλές τιμές αγωγιμότητας φορτίου η χωρητικότητα κυριαρχεί έναντι του φορτίου όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.13 και 4.14.

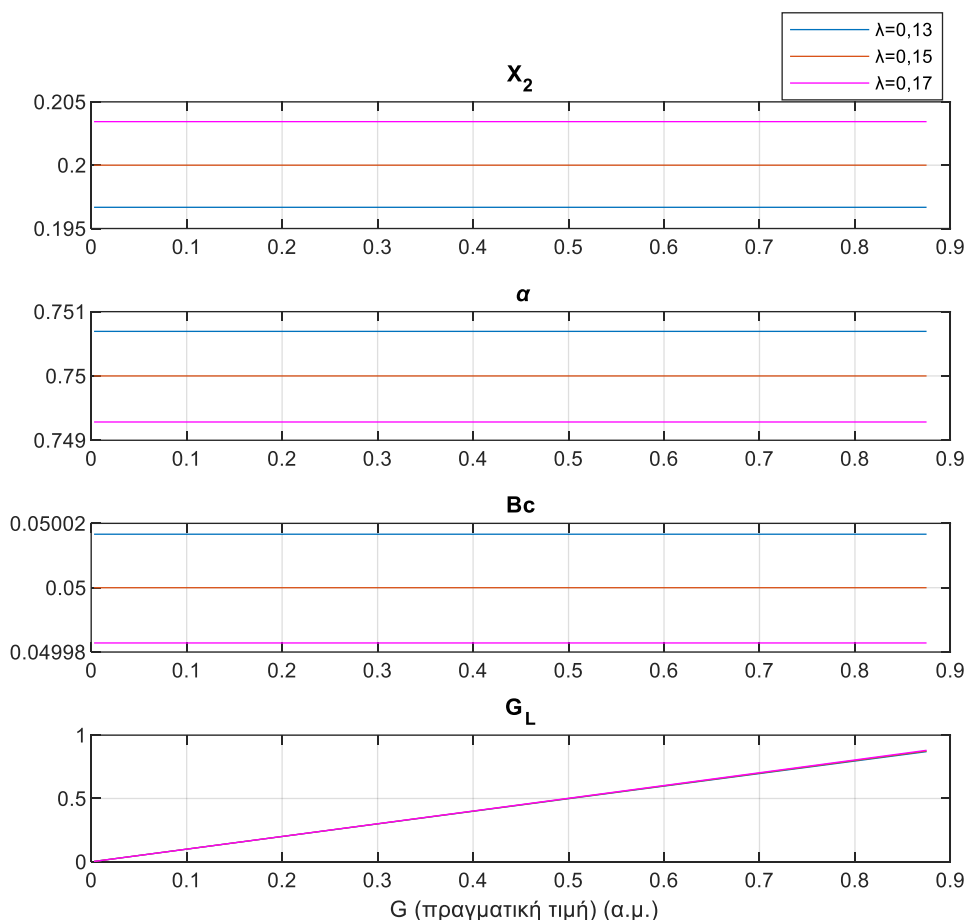


Σχ. 4.13: Μετρήσεις ρεύματος, επίδραση χωρητικότητας σε χαμηλό φορτίο.



Σχ. 4.14: Φαινόμενη σύνθετη αντίσταση, υπερίσχυση χωρητικότητας σε χαμηλό φορτίο.

Σαν πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων και οι εκτιμήσεις για τρεις διαφορετικούς λόγους γραμμής λ είναι οι ακόλουθες.



Σχ. 4.15: Εκτιμήσεις με πυκνωτή αντιστάθμισης για διαφορετικούς λόγους λ .

Σύμφωνα με το Σχ. 4.15, στην περίπτωση ύπαρξης πυκνωτή αντιστάθμισης αποκλίσεις υπάρχουν σε όλες τις εκτιμώμενες παραμέτρους όταν χρησιμοποιούνται λόγοι λ διαφορετικοί από τον πραγματικό, ωστόσο οι διαφορές δεν είναι απαγορευτικές για να ληφθούν ως αποδεκτές οι εκτιμήσεις.

Στον Πίν. 4.7 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές, ωστόσο είναι μεγαλύτερα όταν δεν επιλεγεί ο πραγματικός λόγος της γραμμής. Τα σφάλματα $\frac{\Delta X_2}{X_2}$ και $\frac{\Delta R_2}{R_2}$ συμπίπτουν μόνο όταν έχει επιλεγθεί ο πραγματικός λόγος γραμμής λ . Πράγματι για εσφαλμένο λόγο λ τα ανωτέρω σφάλματα είναι διαφορετικά. Πάντως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιβεβαιώνεται ότι οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων της γραμμής είναι μεταξύ των ακραίων λόγων λ .

Πίν. 4.7: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	$\frac{\Delta B_c}{B_c}$ %
0,13	0,7507	0,1967	0,0256	5,00E-02	9,24E-02	-1,66	-14,80	3,33E-02
0,15	0,7500	0,2000	0,0300	5,00E-02	0,00E+00	1,86E-07	1,86E-07	7,30E-09
0,17	0,7493	0,2034	0,0346	5,00E-02	-9,55E-02	1,72	15,30	-3,44E-02
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0,05				

4.8.2 Επίδραση αρχικής εκτίμησης, με πυκνωτή αντιστάθμισης $B_c=0,05$, $\lambda=0,15$, $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός, $N=20$.

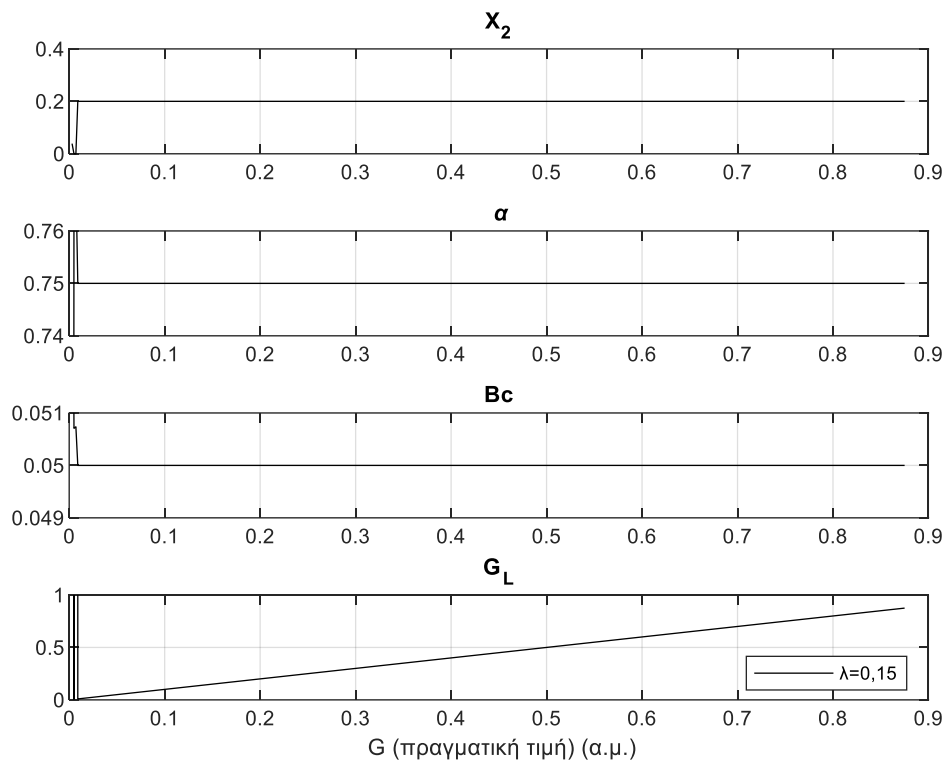
Εξετάζεται η περίπτωση αναγνώρισης του δικτύου με αντιστάθμιση στην περίπτωση που η αρχική εκτίμηση είναι τυχαία. Με τη βοήθεια της συνάρτησης rand της Matlab παράγονται τυχαίες τιμές ομοιόμορφης κατανομής στο διάστημα [0,1]. Αυτές οι τυχαίες τιμές δίνονται στον Πίν. 4.8.

Πίν. 4.8: Πραγματικό και τυχαίο p_0 .

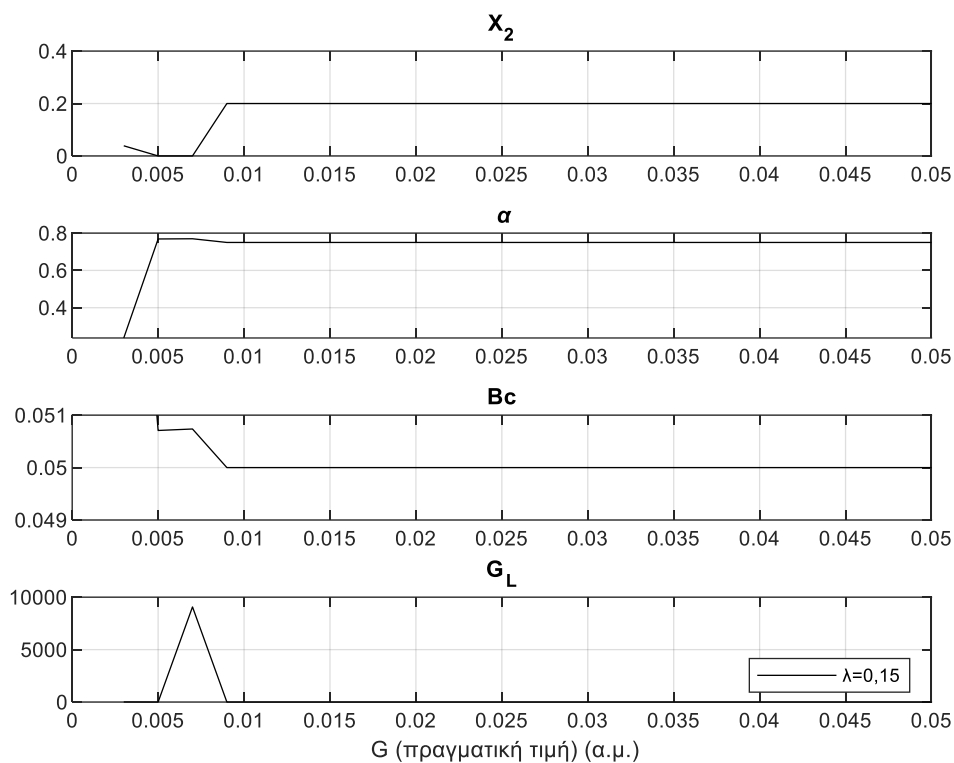
	p_0 πραγματικές τιμές	p_0 τυχαίες τιμές στο διάστημα (0,1)
X2	0,2	0,547
a	0,75	0,895
Bc	0,05	0,187
G1	0,002	0,832
G2	0,003	0,063
G3	0,004	0,600
G4	0,005	0,060
G5	0,006	0,234
G6	0,007	0,220
G7	0,008	0,259
G8	0,009	0,599
G9	0,01	0,695
G10	0,011	0,922
G11	0,012	0,656
G12	0,013	0,634
G13	0,014	0,402
G14	0,015	0,358
G15	0,016	0,454
G16	0,017	0,839
G17	0,018	0,390
G18	0,019	0,890
G19	0,02	0,811
G20	0,022	0,822

Εξαιτίας του τυχαίου αρχικού διανύσματος και για να προκύψουν λογικά αποτελέσματα τέθηκαν κάποια όρια. Τα όρια αναφέρονται στα αποτελέσματα που δίνει κάθε φορά η συνάρτηση `lsqnonlin` μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων της Matlab. Είναι δυνατόν να οριστούν τόσο τα άνω όσο και τα κάτω όρια για κάθε παράμετρο που καλείται να προσδιορίσει η συνάρτηση `lsqnonlin`, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι η αντίδραση της γραμμής του κατάντη δικτύου, ο συντελεστής ισχύος του φορτίου $a = \tan\phi$, η χωρητική αγωγιμότητα Bc και η αγωγιμότητα του φορτίου G_L .

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 4.16 προέκυψαν θέτοντας μόνο κάτω όρια για τις παραμέτρους προς προσδιορισμό. Τα άνω όρια αφέθηκαν ελεύθερα καθώς το πρόβλημα χωρίς περιορισμούς αντιμετώπιζε πρόβλημα κυρίως ως προς τα κάτω όρια. Στα κάτω όρια τέθηκε ο πιο απλός περιορισμός που απαιτεί η αντίσταση, η αγωγιμότητα φορτίου και η χωρητική αγωγιμότητα να είναι μη αρνητικές. Ο συντελεστής ισχύος αφέθηκε ελεύθερος.



Σχ. 4.16: Εκτιμήσεις με περιορισμούς.



Σχ. 4.17: Πρώτες λανθασμένες εκτιμήσεις.

Σε αντίθεση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει πυκνωτής (Σχ. 4.9) το τυχαίο αρχικό διάνυσμα προκαλεί αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Μετά από μερικές νέες εκτιμήσεις, τα αποτελέσματα συγκλίνουν στις πραγματικές τιμές των παραμέτρων του δικτύου.

4.9 Προσομοίωση ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης

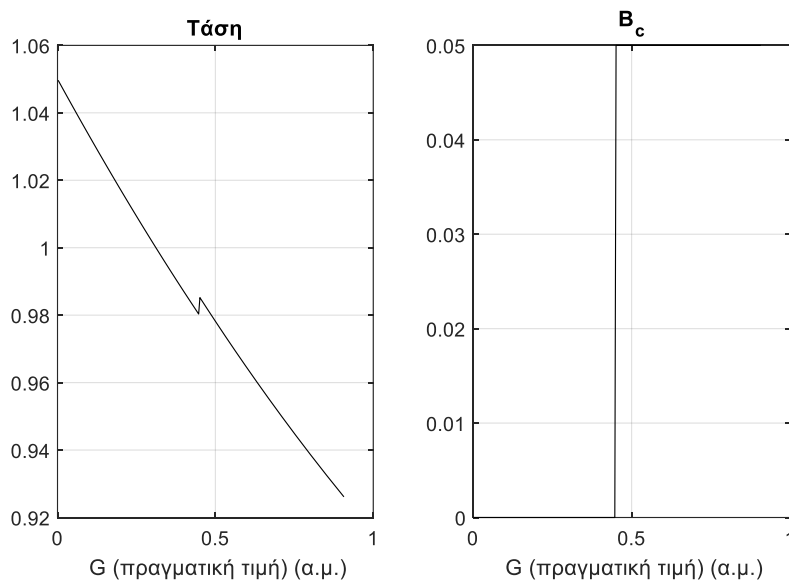
Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης όταν η τάση του φορτίου πέσει κάτω από 0,98 α.μ. (Σχ. 4.18). Αρχικά στο δίκτυο δεν υπάρχει αντιστάθμιση ($B_c=0$), ενώ ο συντελεστής ισχύος του φορτίου είναι 0,8 επαγωγικός και χρησιμοποιείται παράθυρο $N=20$ μετρήσεων. Η πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 που απαιτεί η `lsqnonlin` αποτελείται από τις πραγματικές τιμές παραμέτρων. Στη συνέχεια επειδή χρησιμοποιείται μια λογική κυλιόμενων εκτιμήσεων δίνεται σαν αρχική εκτίμηση η τελευταία εκτίμηση.

Κατά την ένταξη του πυκνωτή εμφανίζεται αδυναμία της μεθόδου να προσδιορίσει αμέσως τις διάφορες παραμέτρους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο παράθυρο N μετρήσεων, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις, περιλαμβάνονται τόσο δεδομένα για δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση όσο και για την νέα κατάσταση λειτουργίας με αντιστάθμιση. Μάλιστα, για να εκκαθαριστεί αυτή μη ομαλή περιοχή εκτιμήσεων πρέπει το κυλιόμενο παράθυρο μήκους N να περιέχει τιμές μόνο για μια λειτουργική κατάσταση, δηλαδή από την στιγμή που θα εισαχθεί στο παράθυρο μέτρηση με αντιστάθμιση θα χρειαστεί να γεμίσει ολόκληρο με μετρήσεις που αφορούν

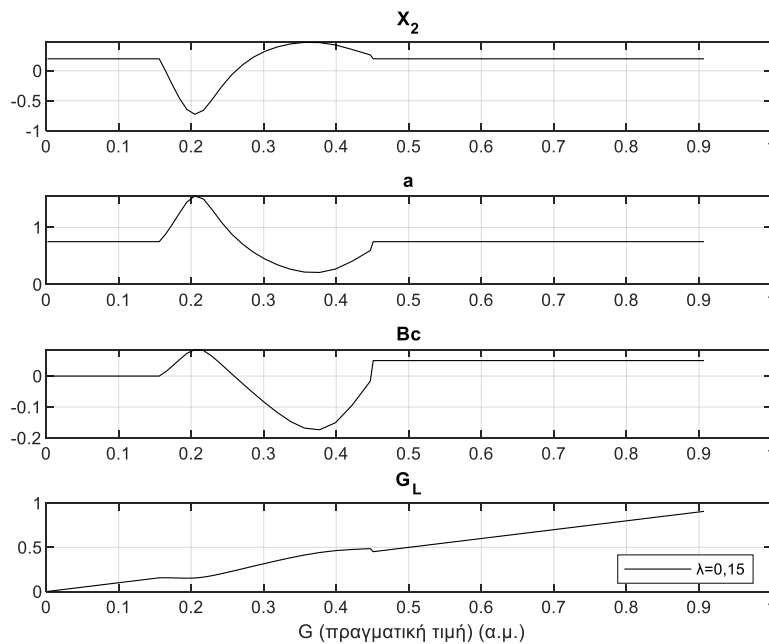
δίκτυο με αντιστάθμιση. Άρα, στο παράδειγμα που απεικονίζεται στο Σχ. 4.19 θα χρειαστεί να παρέλθουν 20 μετρήσεις για να ληφθούν σωστά αποτελέσματα.

Μπορεί βέβαια να χρησιμοποιηθεί και παράθυρο μικρότερου μήκους, έστω $N=5$ και τότε η μεταβατική περιοχή εκτιμήσεων περιορίζεται σε χρόνο που αφορά 5 μετρήσεις (Σχ. 4.21).

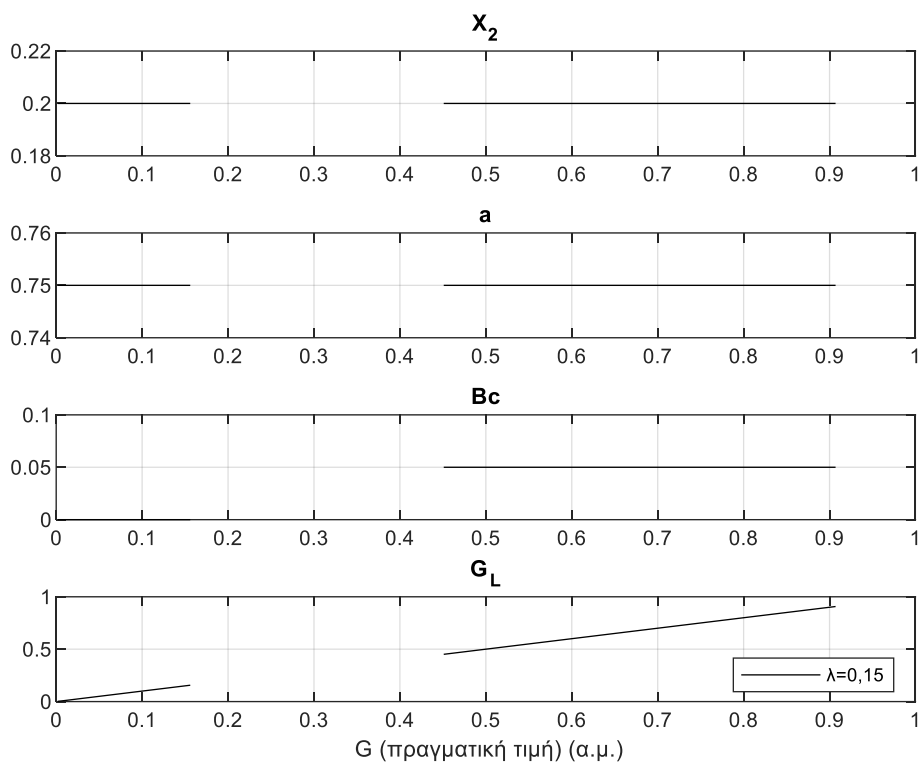
Σε όλες τις περιπτώσεις με μετρήσεις χωρίς θόρυβο το κυλιόμενο παράθυρο μπορεί να επιλέγεται κατά βούληση, τηρώντας βέβαια τον περιορισμό $N>4$. Ωστόσο, παρουσία θορύβου χρειάζονται πολύ περισσότερες μετρήσεις για να περιοριστεί η επίδραση του θορύβου, όπως θα φανεί στο Κεφάλαιο 5.



Σχ. 4.18: Ένταξη πυκνωτή όταν $V_L=0,98$ α.μ.



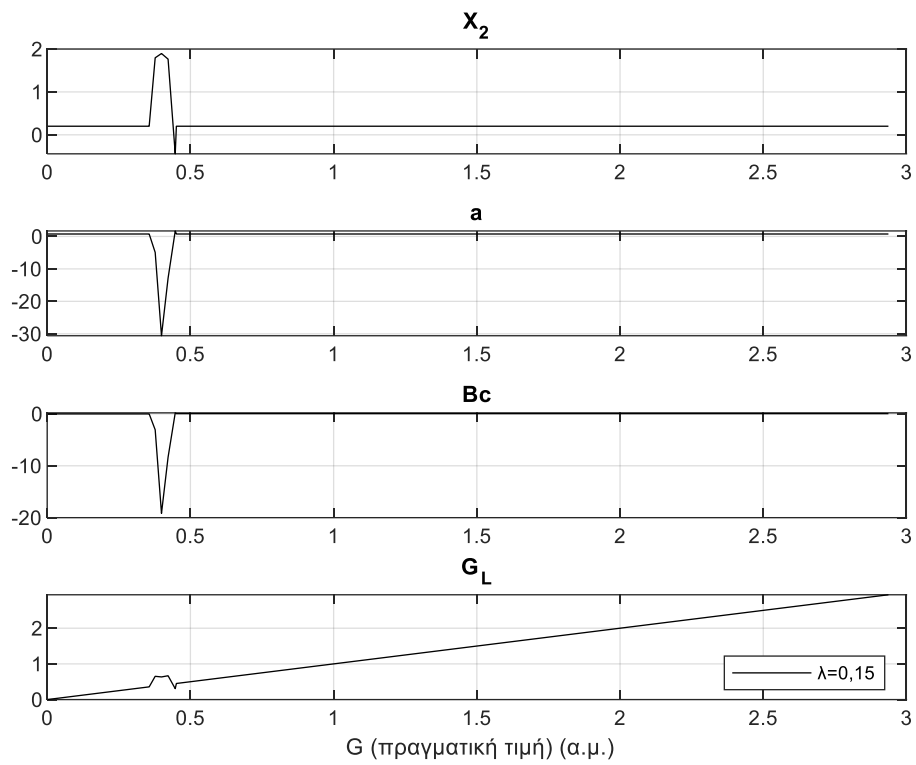
Σχ. 4.19: Μεταβατικές εκτιμήσεις για $N=20$.



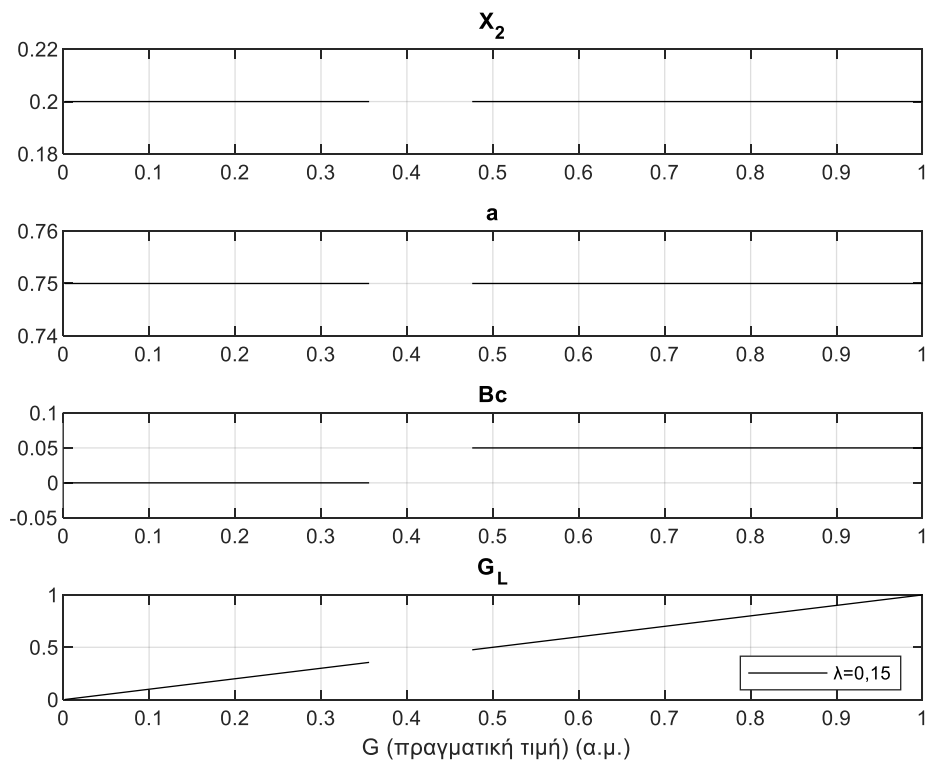
Σχ. 4.20: Παραλείποντας τις μεταβατικές εκτιμήσεις, N=20.

Στο Σχ. 4.20 θεωρείται ότι μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις εσφαλμένες εκτιμήσεις λόγω ένταξης πυκνωτή με κριτήριο την εκτιμώμενη αγωγιμότητα φορτίου. Συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αγωγιμότητα του φορτίου υπολογίζεται πολλές φορές μέχρι η σωστή τιμή να εξέλθει από το παράθυρο μήκους N. Έτσι όταν δύο διαδοχικές εκτιμήσεις δίνουν αγωγιμότητες που αφορούν βέβαια την ίδια χρονική στιγμή και έχουν ακρίβεια τεσσάρων δεκαδικών ψηφίων τότε η τελευταία λύση θεωρείται αποδεκτή. Κατά την εκτίμηση, οι μεταβατικές λύσεις λόγω ένταξης του πυκνωτή αρχίζουν N μετρήσεις πριν την πραγματική στιγμή ένταξης του πυκνωτή. Αυτό έχει να κάνει με την εισαγωγή στο παράθυρο μήκους N μέτρησης με τον πυκνωτή δημιουργεί πρόβλημα γιατί στις N-1 στιγμές το δίκτυο δεν έχει αντιστάθμιση.

Χρησιμοποιώντας παράθυρο μικρότερου μήκους η εκκαθάριση του παραθύρου γίνεται πιο γρήγορα και για αυτό παρατηρούνται λιγότερες μεταβατικές εκτιμήσεις.



Σχ. 4.21: Μεταβατικές εκτιμήσεις για $N=5$.



Σχ. 4.22: Ορθές εκτιμήσεις για $N=7$.

Κεφάλαιο 5 Επίδραση Θορύβου στην Αναγνώριση Δικτύου

Στο Κεφάλαιο 4 εξετάστηκε η ιδανική περίπτωση όπου οι μετρήσεις τάσεως και ρεύματος σε έναν ενδιάμεσο ζυγό του ακτινικού δικτύου δεν περιλαμβάνουν θόρυβο. Σε ένα όμως πραγματικό δίκτυο η κατάσταση είναι διαφορετική αφού η παρουσία θορύβου στις μετρήσεις είναι δεδομένη. Μια ρεαλιστική εικόνα μπορεί να παραχθεί αν στις μετρήσεις προστεθεί κατάλληλος θόρυβος. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εκτίμηση του κατάντη δικτύου από μετρήσεις οι οποίες περιέχουν θόρυβο.

Επειδή οι μετρήσεις σε ένα πραγματικό δίκτυο λαμβάνονται από μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMU) για την ρεαλιστική αναπαράσταση των μετρήσεων κρίνεται αναγκαίο να ληφθεί υπόψη το πρότυπο που ισχύει για τις μονάδες αυτές [IEE11].

5.1 Σφάλμα Μετρήσεων και Παραγωγή Τυχαίου Θορύβου

Οι θεωρητικές τιμές ενός ημιτονοειδούς συγχρονισμένου φασιθέτη (synchrophasor) μπορεί να διαφέρουν τόσο ως προς το πλάτος όσο και ως προς την γωνία από τις τιμές που παράγονται από μία μονάδα μέτρησης φασιθετών. Αν και αυτά τα μεγέθη θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν ξεχωριστά, στο πρότυπο τα πλάτη και οι φάσεις ελέγχονται μαζί με ένα μέγεθος που καλείται Ολικό Σφάλμα Διανύσματος (Total Vector Error - TVE). Το TVE είναι το μέτρο της διαφοράς μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης τιμής του μεγέθους που παράγεται από το PMU για την ίδια χρονική στιγμή κανονικοποιημένο ως προς την πραγματική τιμή και τελικά έχει μέγεθος ανά μονάδα [IEE11].

Το TVE για το ρεύμα ορίζεται ως εξής (αντιστοίχως και για την τάση):

$$TVE = \frac{|I_m - I_i|}{|I_i|} \quad (5.1)$$

όπου, το παραγόμενο διάνυσμα από το PMU είναι:

$$I_m = I_{m,real} + jI_{m,imag} \quad (5.2)$$

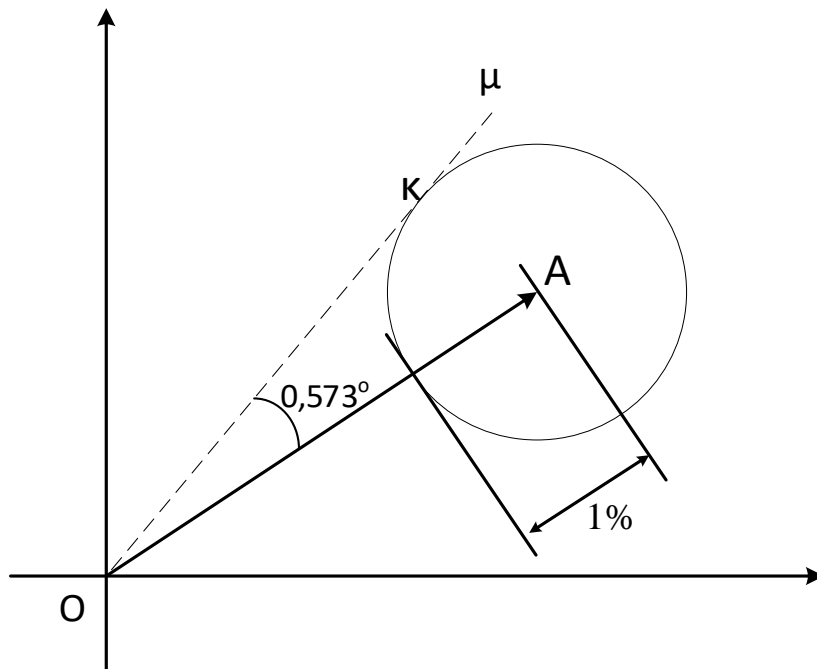
ενώ ο πραγματικός φασιθέτης είναι:

$$I_i = X_{i,real} + jI_{i,imag} \quad (5.3)$$

Το πρότυπο προτείνει το TVE να είναι μικρότερο του 1%. Το κριτήριο του 1% μπορεί να απεικονιστεί με έναν μικρό κύκλο στο πέρας του φασιθέτη όπως φαίνεται στο Σχ. 5.1. Στο κέντρο του κύκλου το σφάλμα τόσο του πλάτους όσο και της γωνίας είναι μηδέν. Το μέγιστο σφάλμα πλάτους είναι 1% όταν η μέτρηση βρίσκεται στην περιφέρεια του κύκλου. Αν το σημείο K είναι η μέτρηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη γωνία $AO\mu$ τότε η ευθεία OK είναι εφαπτόμενη του κύκλου. Το σημείο K ανήκει στον κύκλο και η απόστασή του από το κέντρο του είναι: $AK = 0,01$. Δεδομένου ότι το TVE είναι κανονικοποιημένο τότε $OA = 1$ και $OK = \sqrt{1 - 0,01^2}$. Έτσι η μέγιστη απόκλιση γωνίας είναι:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{AK}{OK} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,01}{\sqrt{1 - 0,01^2}} \right) = 0,573^\circ \quad (5.4)$$

Εάν ο παραγόμενος φασιθέτης από το PMU βρίσκεται μέσα σε αυτόν τον κύκλο τότε η μέτρηση θεωρείται αποδεκτή με βάση το πρότυπο [IEE11].



Σχ. 5.1: Το κριτήριο για TVE μικρότερο του 1% στο πέρας του φασιθέτη.

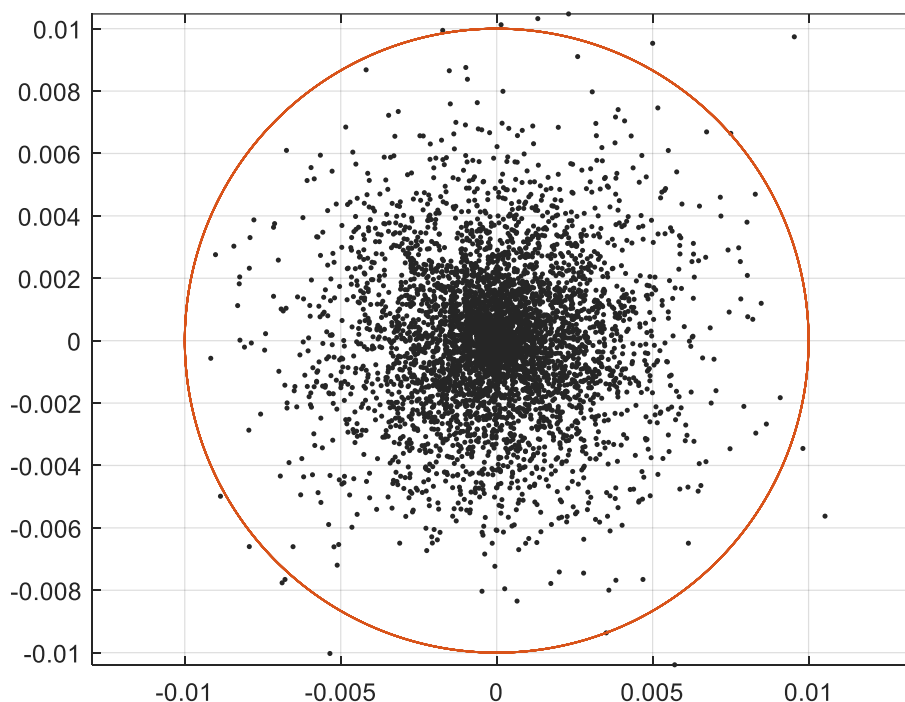
Συνεπώς αν το TVE είναι το μέτρο m ενός μιγαδικού αριθμού $me^{j\theta}$ τότε μπορεί να γραφεί:

$$I_m - I_i = I_i me^{j\theta} \quad (5.5)$$

ή
$$I_m = I_i + I_i me^{j\theta} \quad (5.6)$$

Επειδή πρέπει $TVE \leq 0,01$, τότε θα πρέπει $|m| \leq 0,01$, ενώ η γωνία θ μπορεί να λαμβάνει οποιαδήποτε τιμή στο διάστημα $(-90^\circ, 90^\circ)$. Τόσο το πλάτος m όσο και η γωνία θ είναι τυχαίες τιμές και για αυτό παράγονται πιθανοκρατικά. Συγκεκριμένα, το πλάτος m μπορεί να προκύψει από κανονική κατανομή (Gauss) με

μέση τιμή $\mu=0$ και τυπική απόκλιση $\sigma = 0,01/3$, ενώ η γωνία θ από ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $(-90^\circ, 90^\circ)$. Ανάλογα με το πλήθος των μετρήσεων που διαθέτουμε τόσες τυχαίες m και θ θα πρέπει να παραχθούν. Όπως είναι αναμενόμενο σύμφωνα με την κατανομή Gauss περίπου το 0,3% των 5000 τιμών (15 σημεία) θα είναι εκτός του εύρους $[-0,01, 0,01]$ για την τυχαία μεταβλητή m .



Σχ. 5.2: Το κριτήριο του 1%.

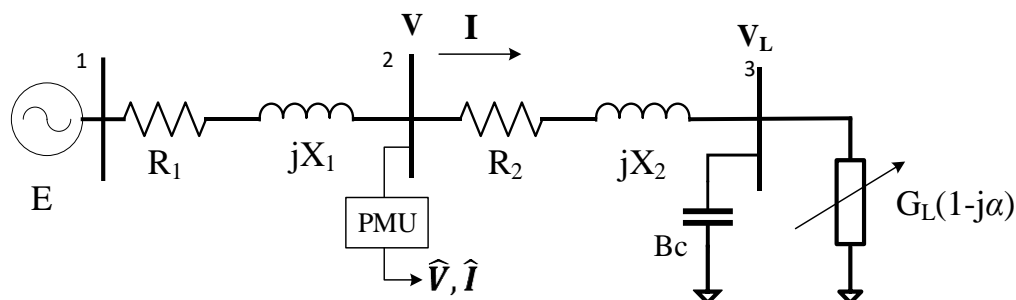
Στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται στο μιγαδικό επίπεδο ο μιγαδικός αριθμός $me^{j\theta}$. Ο κύκλος (κόκκινη γραμμή) αποτελεί το όριο του $TVE = 1\%$. Αυτό σημαίνει πως κάθε τιμή εντός αυτού θεωρείται αποδεκτή. Είναι φανερό πως η συντριπτική πλειοψηφία των 5000 σημείων (μαύρες τελείες) είναι εντός ορίου, ενώ μόλις 15 είναι εκτός του κύκλου εκ των οποίων μάλιστα μόνο 5 είναι αρκετά μακριά.

5.2 Επιλογή Ανεξάρτητων Μετρήσεων

Παρουσία θορύβου είναι επιβεβλημένη η χρησιμοποίηση μιας μεθόδου φιλτραρίσματος των μετρήσεων ώστε να καταστέλλεται η επίδραση του θορύβου. Χρησιμοποιείται η μέθοδος φιλτραρίσματος που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.5 με στόχο τώρα το φιλτράρισμα των μετρήσεων ώστε να αντιστοιχούν τόσο σε διαφορετικές λειτουργικές καταστάσεις όσο και να περιορίζεται ο θόρυβος.

5.3 Εξεταζόμενο Δίκτυο

Εξετάζεται πάλι το απλό ακτινικό δίκτυο με απώλειες και φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος του Σχ. 5.3. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως επιδιώκεται να προσδιοριστούν τόσο οι ωμικές αντιστάσεις όσο και οι αντιδράσεις του δικτύου, ο συντελεστής ισχύος του φορτίου και η τυχούσα χωρητική αντιστάθμιση.



Σχ. 5.3: Ακτινικό δίκτυο προς αναγνώριση.

Οι παράμετροι του δικτύου θεωρούνται σταθερές και έχουν τις τιμές του Πίν. 5.1.

Πίν. 5.1: Παράμετροι ακτινικού δικτύου.

E	R ₁	X ₁	R ₂	X ₂
1,05 α.μ.	0,05 α.μ.	0,15 α.μ.	0,03 α.μ.	0,20 α.μ.

ενώ η αντιστάθμιση B_c και συντελεστής ισχύος του φορτίου θα ορίζονται ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται.

Κατά την προσομοίωση του δικτύου που οδηγεί στην εξαγωγή των αναγκαίων μετρήσεων, το μοναδικό μέγεθος που μεταβάλλεται με τον χρόνο είναι η αγωγιμότητα G_L του φορτίου. Η αγωγιμότητα την χρονική στιγμή t=0 είναι 0,001 α.μ. ενώ στη συνέχεια αυξάνεται βαθμιαία με σταθερό ρυθμό αύξησης 0,001 α.μ. /s. Θεωρούμε ως χρόνο προσομοίωσης τα 5000 δευτερόλεπτα

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου η ανάλυση βασίζεται σε μετρήσεις που περιέχουν θόρυβο όπως ορίστηκε ανωτέρω με στόχο τον προσδιορισμό του κατάντη δικτύου εφαρμόζοντας τη μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (ενότητα 4.6). Η μαθηματική περιγραφή του προβλήματος προσδιορισμού του κατάντη δικτύου έχει παρουσιαστεί στην ενότητα 4.4. Η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση ορίζεται από το σύστημα (4.1)

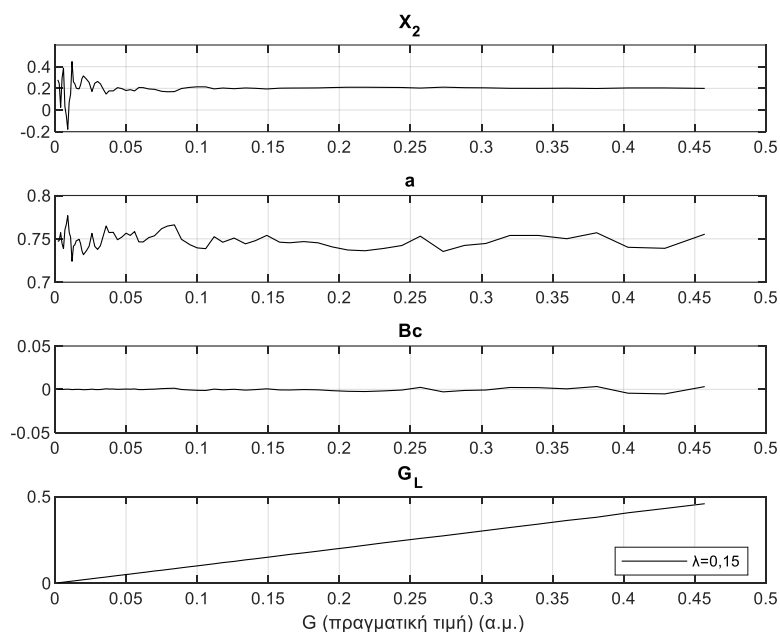
$$\begin{cases} R_{app} = R_2 + \frac{G_L}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \\ X_{app} = X_2 + \frac{\alpha G_L - B_c}{G_L^2 + (B_c - \alpha G_L)^2} \end{cases}$$

5.4 Αφόρτιστη Γραμμή

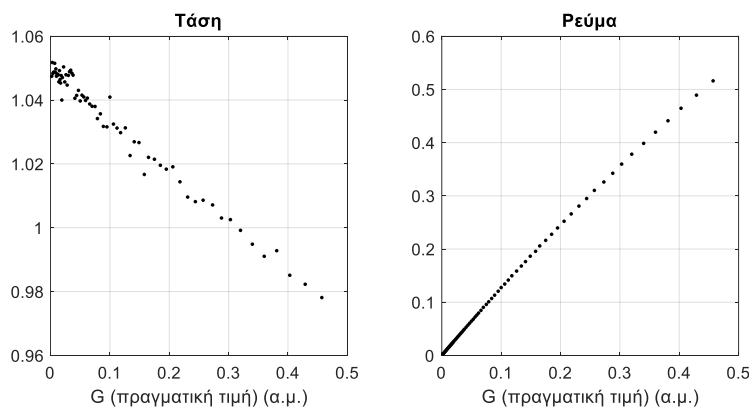
Στην αρχή του χρόνου η αγωγιμότητα του φορτίου είναι μικρή που σημαίνει πως το δίκτυο είναι αφόρτιστο. Ενώ στην περίπτωση μετρήσεων δίχως θόρυβο αυτό δεν προκαλούσε πρόβλημα, παρουσία θορύβου η εκτίμηση δικτύου και φορτίου γίνεται πιο δύσκολη. Στα επόμενα παραδείγματα γίνεται σαφές ότι ο θόρυβος σε καταστάσεις χαμηλής φόρτισης δυσχεραίνει τον προσδιορισμό του κατάντη δικτύου.

5.4.1 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, χωρίς αντιστάθμιση

Χρησιμοποιείται παράθυρο μήκους $N=30$, λόγος γραμμής $\lambda=0,15$ (πραγματική τιμή) και σαν πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Στο Σχ. 5.4 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις δικτύου και φορτίου από τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων, ενώ στο Σχ. 5.5 απεικονίζονται οι ανεξάρτητες μετρήσεις τάσης και ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχ. 5.4: Εκτιμήσεις παρουσία θορύβου.



Σχ. 5.5: Ανεξάρτητες μετρήσεις τάσης και ρεύματος..

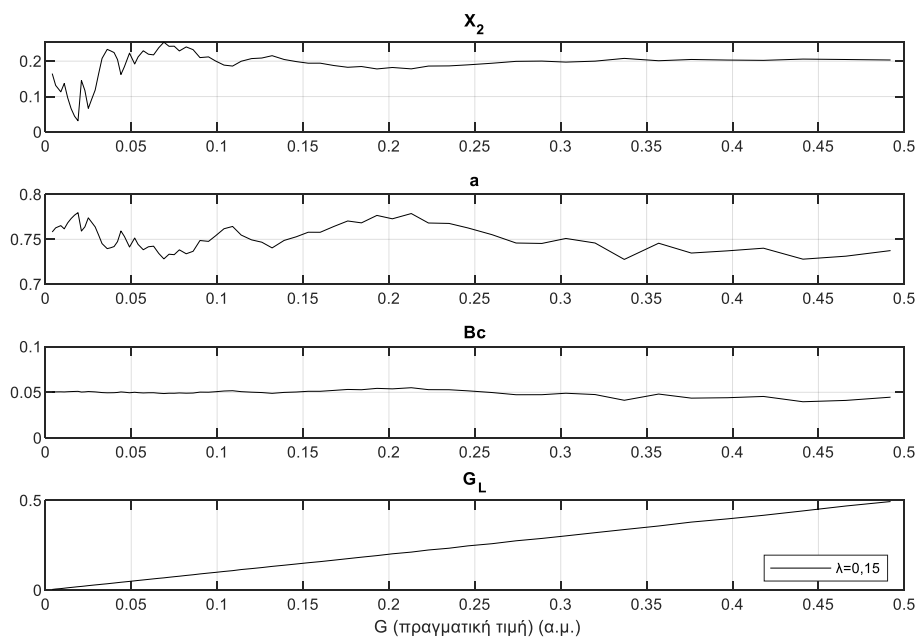
Παρόλο που η επιλογή ανεξάρτητων μετρήσεων σύμφωνα με το κριτήριο του ρεύματος έχει περιορίσει τον θόρυβο αυτό δεν είναι αρκετό ούτως ώστε οι εκτιμήσεις να είναι σωστές. Ειδικά για χαμηλές φορτίσεις τα αποτελέσματα απέχουν από τις πραγματικές τιμές ενώ επίσης εμφανίζεται και μια ταλαντωτική συμπεριφορά.

Ο λόγος είναι ότι στο χαμηλό φορτίο η αντίσταση φορτίου είναι πολύ μεγάλη και το σφάλμα μετρήσεις είναι αντίστοιχο με την εκτιμώμενη $Z_2 = R_2 + jX_2$. Η λύση είναι να μην γίνεται εκτίμηση όταν $|Z_{app}| > |Z_{max}|$, όπου $|Z_{max}|$ το όριο για τους υπολογισμούς.

5.4.2 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, με αντιστάθμιση $B_c=0,05$

Χρησιμοποιείται παράθυρο μήκους $N=30$, λόγος γραμμής $\lambda=0,15$ (πραγματική τιμή) και σαν πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων που εκτιμώνται. Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις δικτύου και φορτίο από τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.

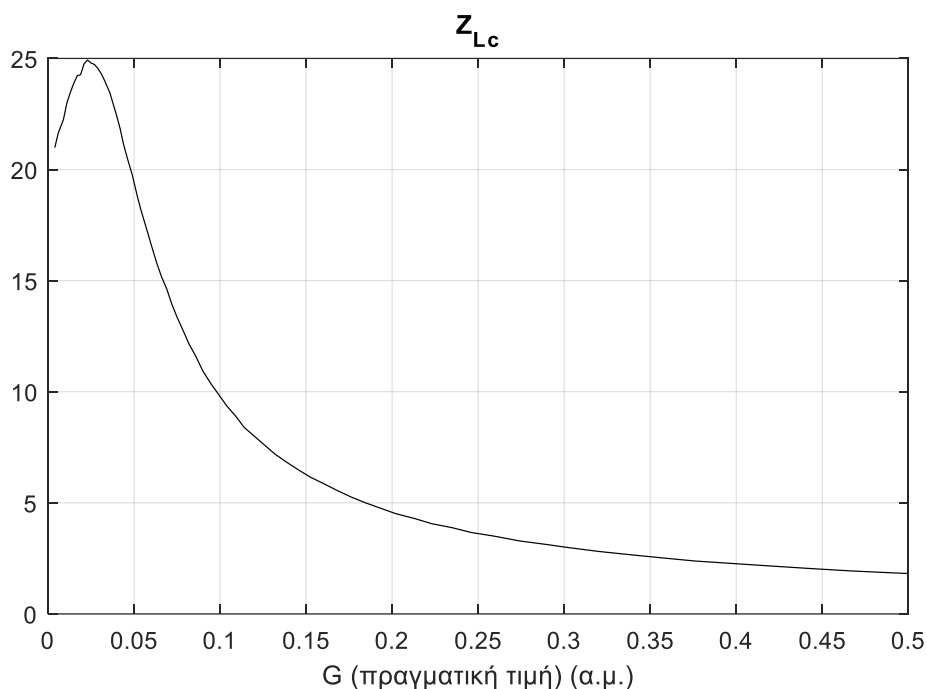
Παρότι δεν εμφανίζονται αρνητικές τιμές για την αντίδραση X_2 και πάλι εμφανίζεται ταλαντωτή συμπεριφορά η οποία αφορά κυρίως καταστάσεις χαμηλής φόρτισης.



Σχ. 5.6: Εκτιμήσεις παρουσία θορύβου και πυκνωτή.

5.4.3 Θόρυβος και Αφόρτιστη Γραμμή

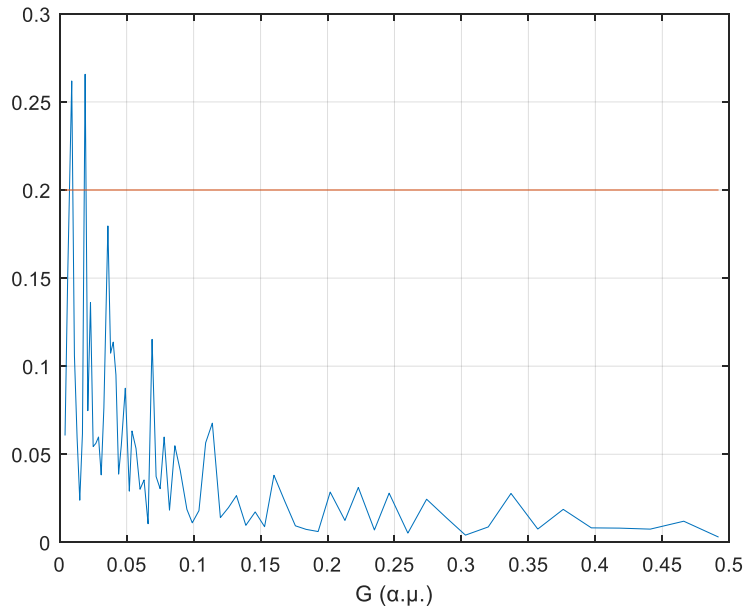
Στις παραπάνω εκτιμήσεις οι τιμές του X_2 ταλαντώνονται στους μικρούς χρόνους. Αυτό συμβαίνει διότι στις χρονικές στιγμές κοντά στο μηδέν η αγωγιμότητα είναι πολύ μικρή και άρα η αντίσταση του φορτίου είναι πολύ μεγάλη και μάλιστα πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση X_2 , αφού φτάνει έως και 25α.μ., όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 5.7.



Σχ. 5.7: Αντίσταση φορτίου εν παραλλήλω με τον πυκνωτή.

Επιπλέον, σ' αυτή την περιοχή αγωγιμοτήτων το σφάλμα της αντίστασης που μετριέται από τον ζυγό μπορεί να είναι σημαντικό ως προς την αντίδραση X_2 . Με τον όρο σφάλμα (e) περιγράφεται το μέτρο της διαφοράς της μετρούμενης από την πραγματική φαινόμενη σύνθετη αντίσταση από τον ζυγό 2,

Πράγματι, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.8, το σφάλμα (μπλε γραμμή) είναι συγκρίσιμο ή και μεγαλύτερο από την προς προσδιορισμό αντίσταση X_2 (κόκκινη γραμμή $X_2 = 0,2$ α.μ.).



Σχ. 5.8: Σύγκριση σφάλματος με την αντίδραση X_2 .

Η συνθήκη για εκτίμηση $|Z_{app}| < |Z_{max}|$ σύμφωνα με το Σχ. 5.8 λαμβάνει τη μορφή:

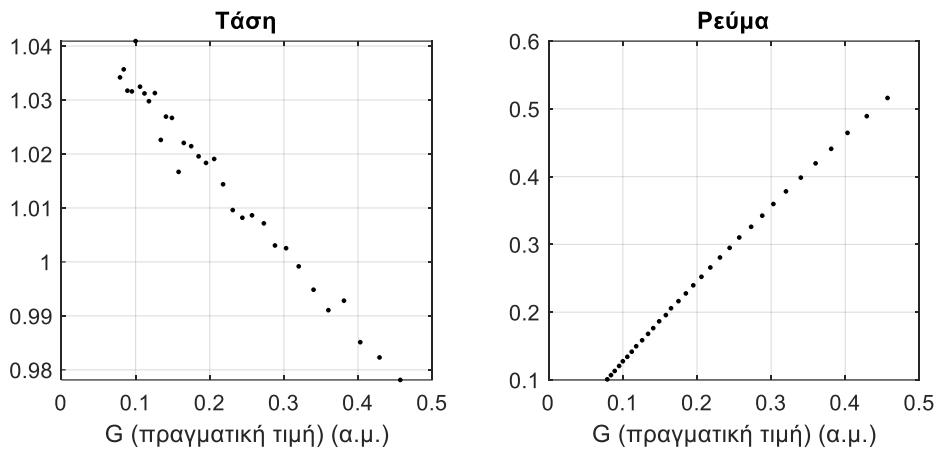
$$|G_{app}| > |G_{min}|$$

Αφού δεν είναι εξαρχής δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του δικτύου, επιχειρείται εκτίμηση παραμέτρων σε χρονικές στιγμές όπου και το σφάλμα είναι μικρότερο από την αντίδραση X_2 , αλλά και το δίκτυο είναι φορτισμένο.

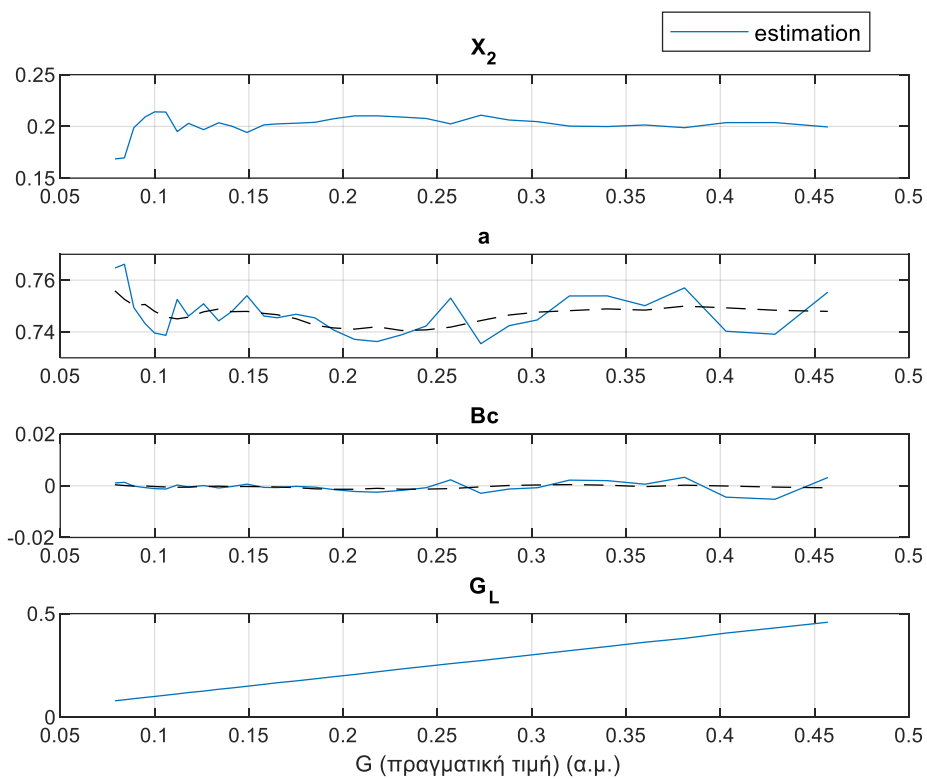
5.5 Φορτισμένη Γραμμή

5.5.1 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, χωρίς αντιστάθμιση

Χρησιμοποιείται παράθυρο μήκους $N=30$, λόγος γραμμής $\lambda=0,15$ (πραγματική τιμή) και σαν πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων που εκτιμώνται. Στο Σχ. 5.9 απεικονίζονται οι ανεξάρτητες μετρήσεις τάσης και ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο Σχ. 5.10 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις δικτύου και φορτίο από τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.



Σχ. 5.9: Φιλτραρισμένες τιμές.



Σχ. 5.10: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή.

Για την αντίδραση X_2 υπάρχει μόνο στην αρχή απόκλιση από την πραγματική τιμή, ενώ όλες οι υπόλοιπες εκτιμήσεις είναι κοντά στην πραγματική. Επιπλέον αν χρησιμοποιηθεί ο κινητός μέσος όρος των εκτιμήσεων, η προσέγγιση της αντίστασης της γραμμής είναι καλύτερη. Αντίθετα οι τιμές του a απομακρύνονται σημαντικά από την πραγματική τιμή. Βέβαια ο κινητός μέσος όρος δίνει καλύτερη προσέγγιση. Η εκτίμηση του πυκνωτή αντιστάθμισης είναι κοντά στην πραγματική του τιμή. Οι εκτιμήσεις της αγωγιμότητας είναι ομαλές και χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από το πραγματικό φορτίο.

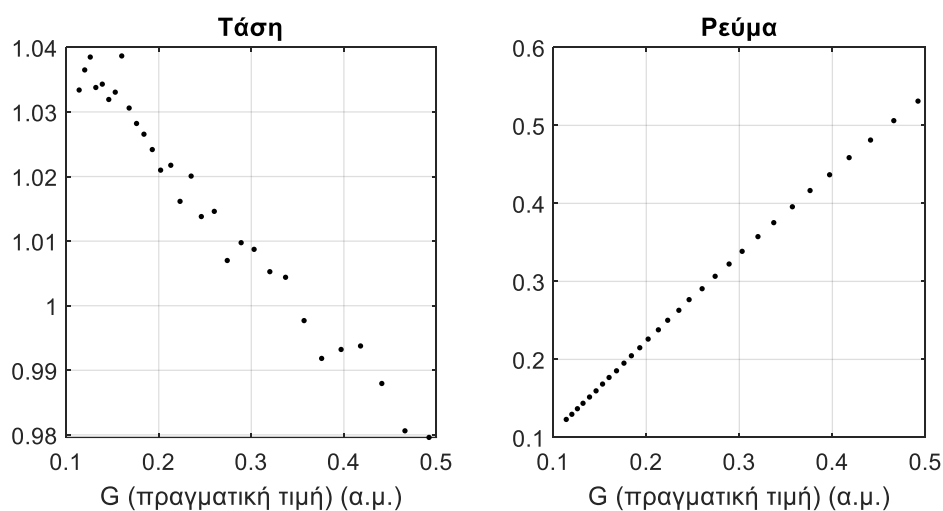
Στον Πίν. 5.2 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα. Τα σφάλματα των μέσων όρων είναι μικρά οπότε οι εκτιμήσεις μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές.

Πίν. 5.2: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

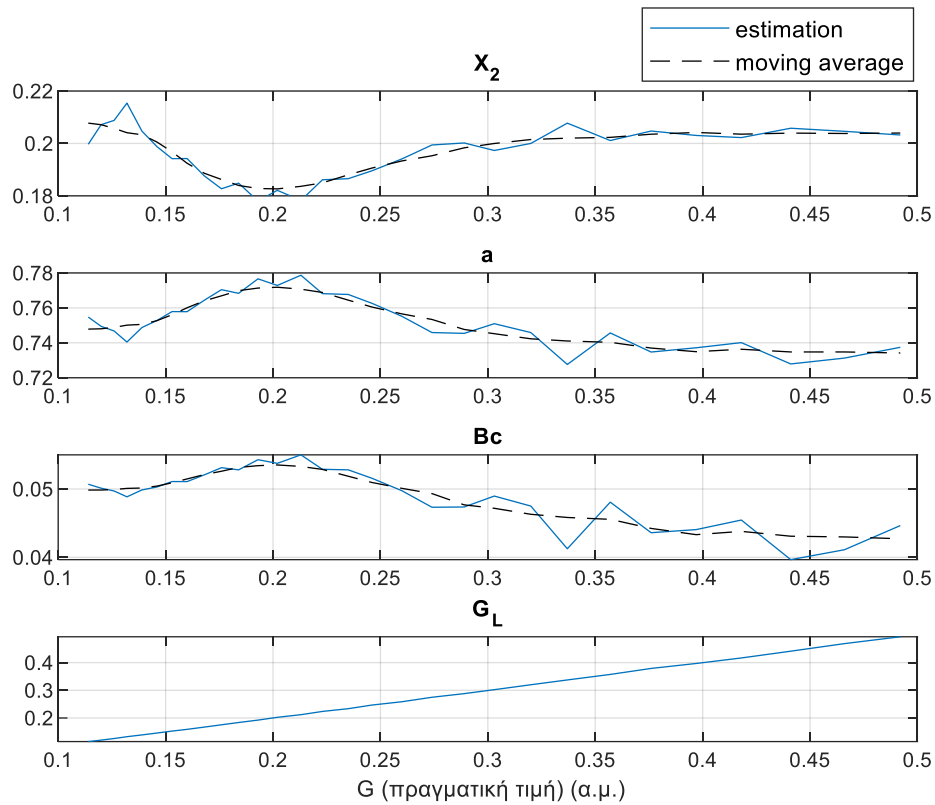
λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	ΔB_c α.μ.
0,15	0,7469	0,2017	0,0302	-0,0004	-0,408	0,826	0,826	-4,31E-04
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0				

5.5.2 Φορτίο Επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, με αντιστάθμιση $B_c=0,05$

Χρησιμοποιείται παράθυρο μήκους $N=30$, λόγος γραμμής $\lambda=0,15$ (πραγματική τιμή) και σαν αρχική εκτίμηση p_0 δόθηκαν οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων που εκτιμώνται. Στο Σχ. 5.11 απεικονίζονται οι φιλτραρισμένες μετρήσεις τάσης και ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στο Σχ. 5.12 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις δικτύου και φορτίο από τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων.



Σχ. 5.11: Φιλτραρισμένες μετρήσεις.



Σχ. 5.12: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή με πυκνωτή αντιστάθμισης.

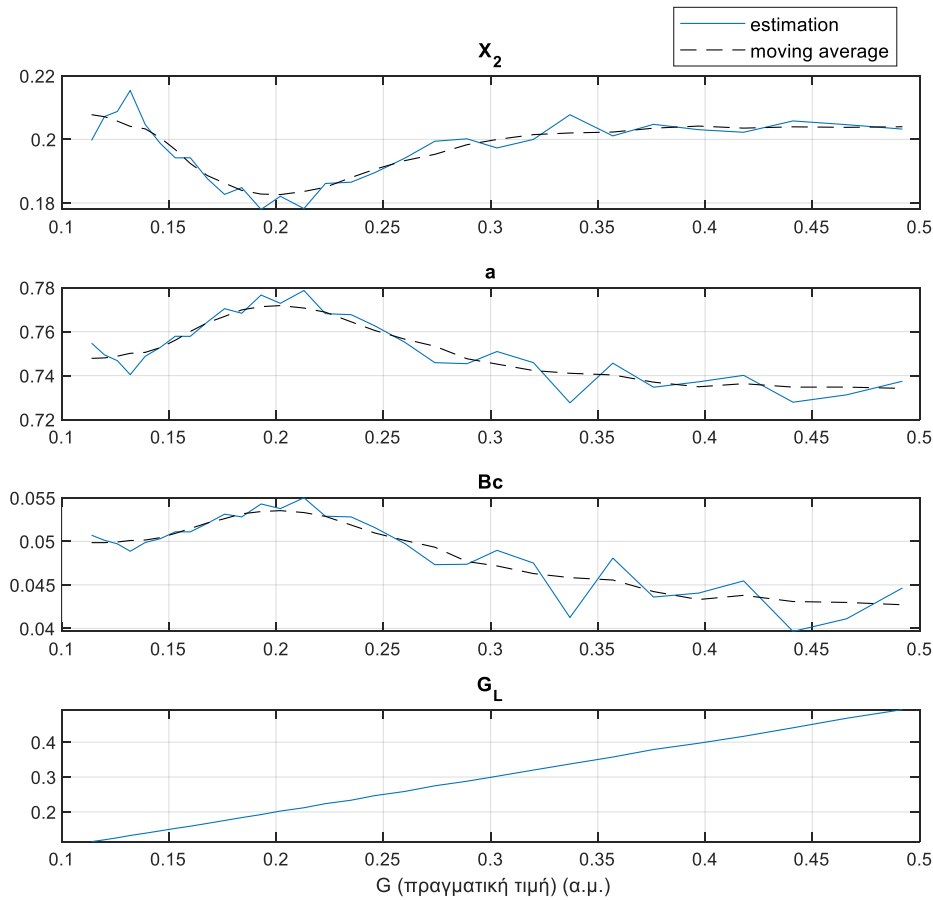
Οι εκτιμήσεις για την αντίδραση X_2 είναι γύρω από την πραγματική τιμή παρουσιάζοντας ωστόσο κάποιες στιγμές μεγαλύτερη απόκλιση. Σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς πυκνωτή, οι εκτιμήσεις του α και του B_c εμφανίζουν μικρότερες αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές. Οι εκτιμήσεις της αγωγιμότητας είναι ομαλές και χωρίς σημαντικές αποκλίσεις από το πραγματικό φορτίο.

Στον Πίν. 5.3 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2 , R_2 , α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα των μέσω όρων.

Πίν. 5.3: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
	α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	$\frac{\Delta B_c}{B_c}$ %
0,15	0,7521	0,1967	0,0295	0,0490	0,2824	-1,6304	-1,6304	-2,0755
	Πραγματικές τιμές							
	0,75	0,2	0,03	0,05				

Παρόμοια αποτελέσματα λαμβάνονται όταν σαν αρχικές τιμές στην `lsqnonlin` δοθούν τυχαίες τιμές στο διάστημα (0,1).



Σχ. 5.13: Εκτιμήσεις με θόρυβο σε φορτισμένη γραμμή με αντιστάθμιση και τυχαίο p_0 .

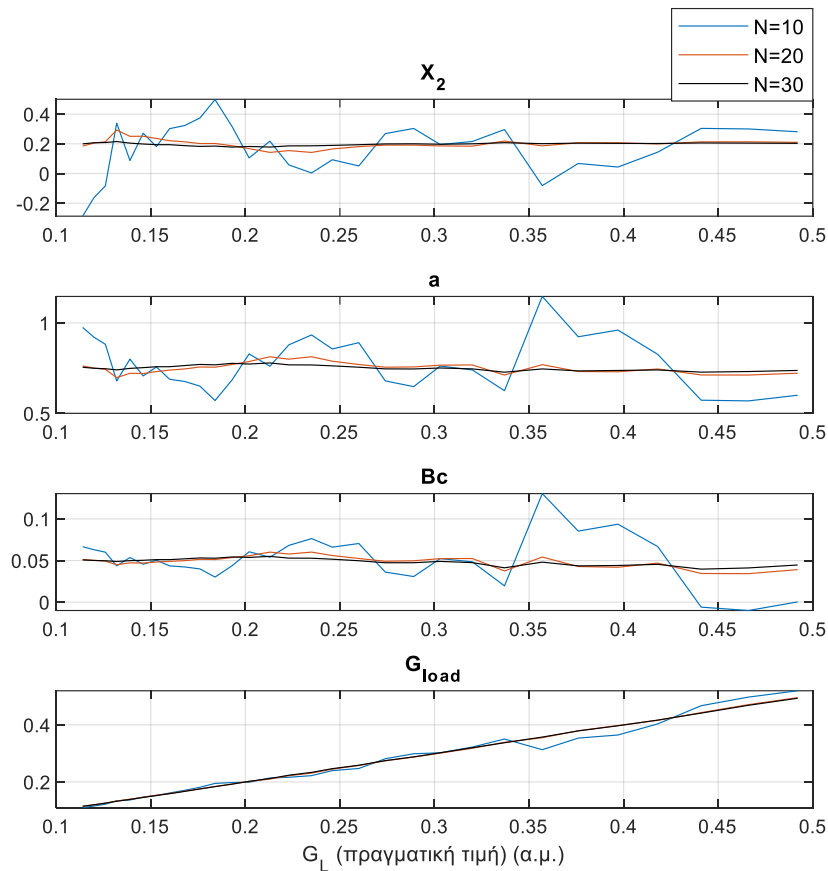
5.5.3 Σύγκριση Μηκών Παραθύρου

Από την μαθηματική περιγραφή του προβλήματος της εκτίμησης του κατάντη δικτύου προκύπτει ότι απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις μετρήσεις ώστε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων να δίνει αποτελέσματα. Στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν έγινε κάποια αναφορά στο πλήθος των μετρήσεων που απαιτούνται για να προκύψουν αποδεκτές εκτιμήσεις καθώς εκεί οι μετρήσεις δεν περιείχαν θόρυβο και ως εκ τούτου δεν δημιουργούταν πρόβλημα στον προσδιορισμό των παραμέτρων.

Αντίθετα, στις περιπτώσεις του Κεφαλαίου 5 όπου όλες οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος εμπεριέχουν θόρυβο, οι εκτιμήσεις όπως ήδη έχει γίνει αντιληπτό επηρεάζονται σημαντικά ακόμα και με παράθυρο μήκους $N=30$ που έχει μέχρι τώρα χρησιμοποιηθεί και είναι επτάμισι φορές μεγαλύτερο από το ελάχιστο.

Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται οι εκτιμήσεις κατάντη δικτύου που προκύπτουν από την μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων για τρία διαφορετικά μήκη παραθύρου $N=10,20$ και 30 και παρουσιάζονται στο Σχ. 5.14. Το

φορτίο είναι επαγωγικού $\Sigma I=0,8$, ο λόγος της γραμμής είναι $\lambda=0,15$ και η πρώτη αρχική εκτίμηση p_0 είναι οι πραγματικές τιμές των μεγεθών.



Σχ. 5.14: Σύγκριση μηκών παραθύρου.

Για $N=10$ οι εκτιμήσεις μπορεί να απέχουν σημαντικά από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων. Αντίθετα για μεγαλύτερα μήκη παραθύρου οι εκτιμήσεις τείνουν να βρίσκονται αρκετά κοντά στις πραγματικές τιμές.

Στον Πίν. 5.4 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων των X_2, R_2, α και B_c και τα αντίστοιχα σφάλματα για τα τρία διαφορετικά μήκη παραθύρου. Με μεγάλα μήκη παραθύρου οι μέσοι όροι των εκτιμήσεων παρουσιάζουν μικρότερα σφάλματα. Πάντως ακόμα και με $N=10$ οι μέσοι όροι δεν αποκλίνουν σημαντικά.

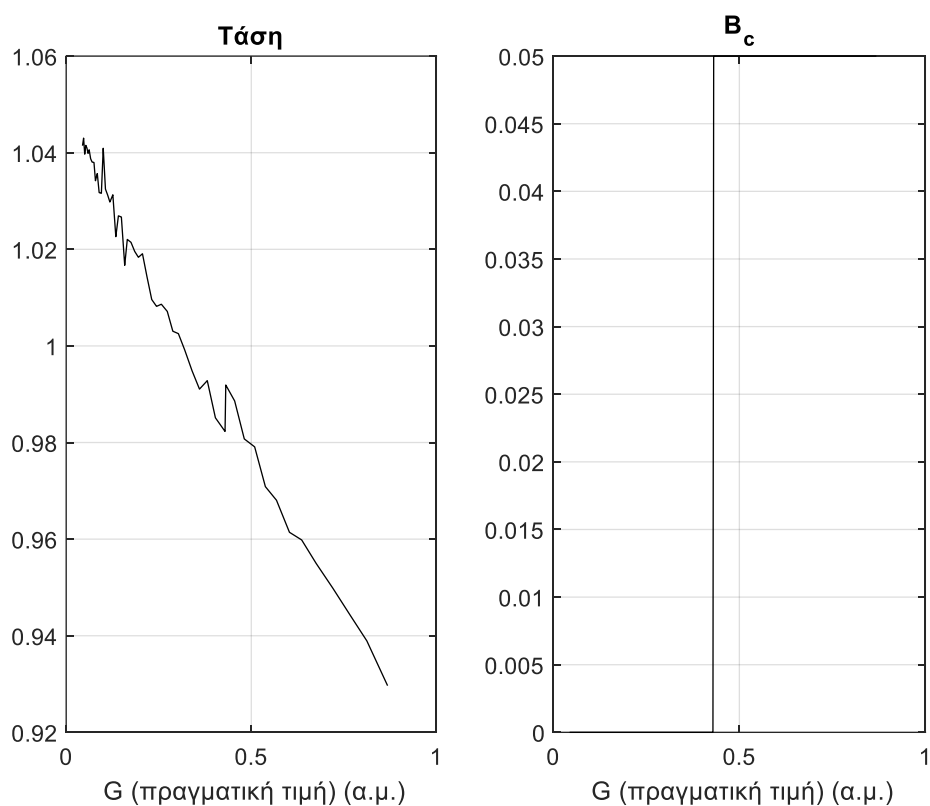
Πίν. 5.4: Εκτιμήσεις παραμέτρων και σφάλματα.

λ	N	Εκτιμήσεις				Σφάλματα			
		α	X_2 α.μ.	R_2 α.μ.	B_c α.μ.	$\frac{\Delta\alpha}{\alpha}$ %	$\frac{\Delta X_2}{X_2}$ %	$\frac{\Delta R_2}{R_2}$ %	$\frac{\Delta B_c}{B_c}$ %
0,15	10	0,7731	0,1676	0,0251	0,0509	3,0826	-16,2040	-16,2040	1,7010
	20	0,7515	0,2007	0,0301	0,0490	0,1957	0,3543	0,3543	-1,9900
	30	0,7521	0,1967	0,0295	0,0490	0,2824	-1,6304	-1,6304	-2,0755
		Πραγματικές τιμές							
		0,75	0,2	0,03	0,05				

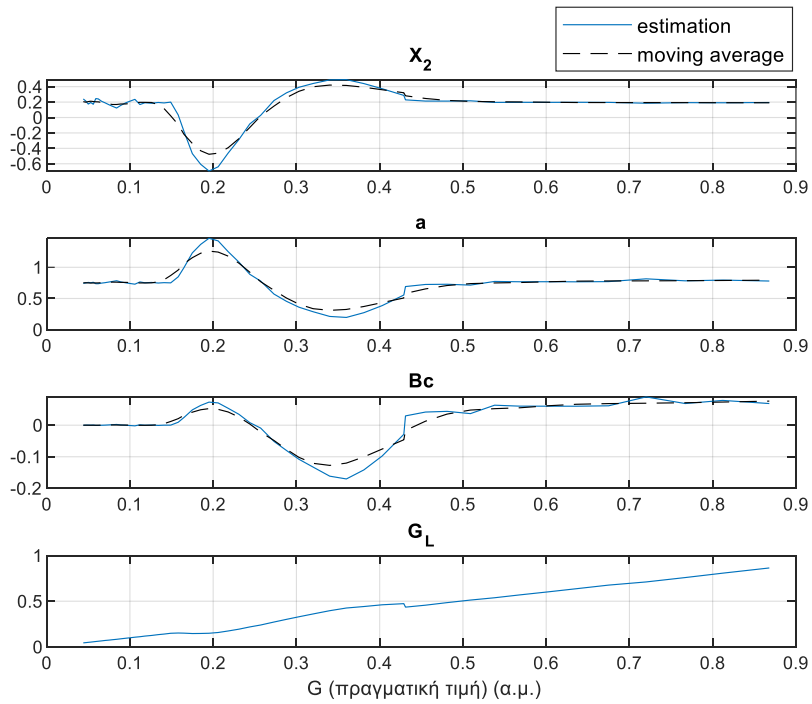
5.5.4 Προσομοίωση Ένταξης Πυκνωτή Αντιστάθμισης

Όταν η τάση του φορτίου γίνει ίση με 0,98 α.μ. τότε συνδέεται στον ζυγό φορτίου πυκνωτής αντιστάθμισης με $B_c = 0,05$ α.μ. (Σχ. 5.15). Το φορτίο θεωρείται επαγωγικό με $\Sigma I = 0,8$, ο λόγος της γραμμής είναι $\lambda=0,15$, το μήκος του παραθύρου των μετρήσεων είναι $N=20$ και αρχική εκτίμηση p_0 οι πραγματικές τιμές των παραμέτρων.

Όπως και προηγουμένως κατά την ένταξη του πυκνωτή εμφανίζεται αδυναμία της μεθόδου να προσδιορίσει αμέσως τις διάφορες παραμέτρους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο παράθυρο N μετρήσεων, που χρησιμοποιείται για τις εκτιμήσεις, περιλαμβάνονται τόσο δεδομένα για δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση όσο και για την νέα κατάσταση λειτουργίας με αντιστάθμιση.

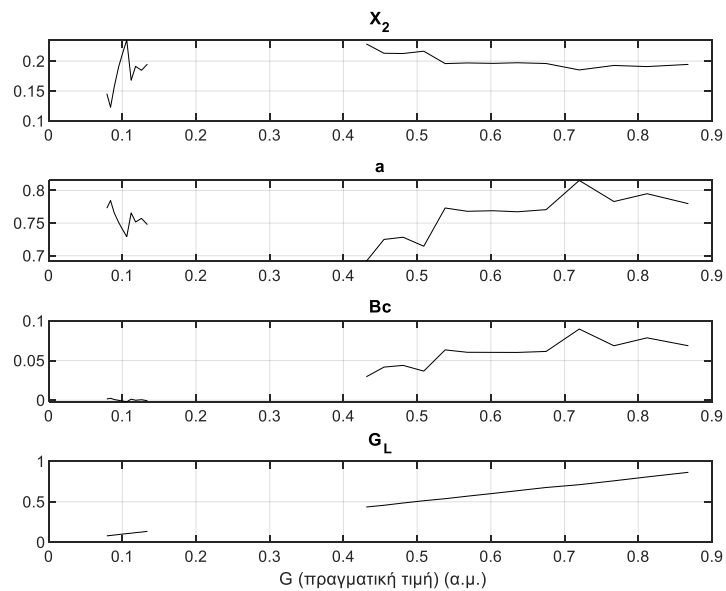


Σχ. 5.15: Ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης.



Σχ. 5.16: Εκτιμήσεις κατά την ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης.

Αν απορριφθούν οι μεταβατικές εκτιμήσεις σύμφωνα με τη σύγκριση δύο διαδοχικών εκτιμήσεων αγωγιμότητας φορτίου, τότε οι εκτιμήσεις φαίνονται στο Σχ. 5.17.



Σχ. 5.17: Παραλείποντας τις μεταβατικές εκτιμήσεις (N=20).

Η επιλογή μικρότερο μήκους παραθύρου N θα οδηγούσε σε ταχύτερη αποκοπή των μεταβατικών-λανθασμένων εκτιμήσεων, ωστόσο όπως διαπιστώθηκε στην προηγούμενη ενότητα αυτό θα σημαίνει μικρότερη ακρίβεια ίσως και λανθασμένες εκτιμήσεις.

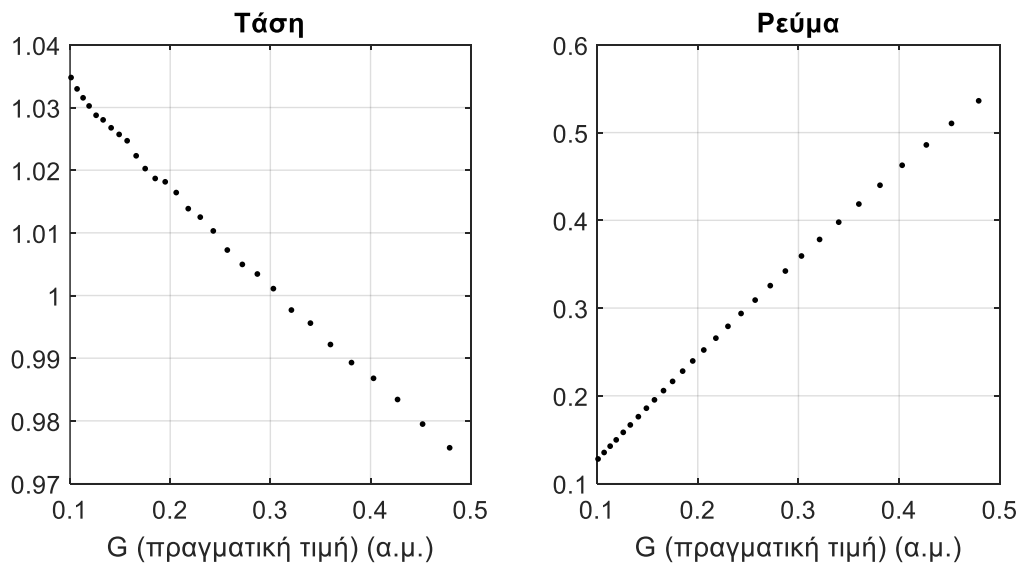
5.6 Φίλτρο Savitzky-Golay

Το φίλτρο Savitzky-Golay είναι ένα ψηφιακό φίλτρο που εφαρμόζεται ευρέως σε τεχνικές επεξεργασίας σήματος. Το φίλτρο μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα σύνολο σημείων ενός σήματος, το οποίο περιγράφει μια ακολουθία τιμών ή μετρήσεων, με σκοπό την εξομάλυνση των δεδομένων, με στόχο την αύξηση του λόγου του σήματος προς τον θόρυβο χωρίς να υπάρξει αλλοίωση του σήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με μια διαδικασία γνωστή ως συνέλιξη, δηλαδή την προσαρμογή διαδοχικών συνόλων γειτονικών σημείων με ένα πολυώνυμο χαμηλού βαθμού χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων [Orf96].

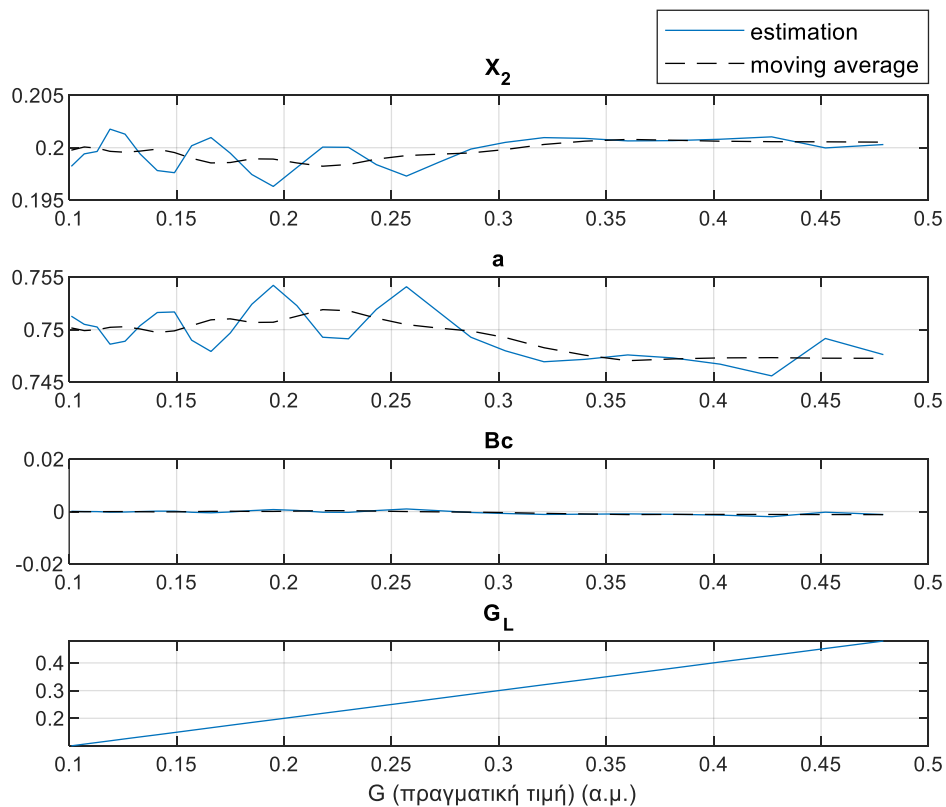
Η μέθοδος έγινε γνωστή από τους Abraham Savitzky και Marcel J.E Golay, οι οποίοι δημοσίευσαν πίνακες των συντελεστών συνέλιξης για διάφορα πολυώνυμα και μεγέθη υποσυνόλων [SG64]. Έδειξαν πως η πολυωνυμική προσαρμογή μπορεί να εφαρμοστεί όπως ένα φίλτρο κυλιόμενων μέσων όρων με βάρη, καθώς οι συντελεστές της διαδικασίας εξομάλυνσης είναι ίδιοι για όλες τις τιμές της εξομαλυμένης σειράς. Έτσι, η εξομάλυνση με τη χρήση φίλτρων Savitzky-Golay είναι απλή σχετικά διαδικασία. Επίσης ο ίδιος αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί για την εξομάλυνση της πρώτης και της δεύτερης παραγώγου της σειράς του σήματος. Τα φίλτρα Savitzky-Golay πλεονεκτούν έναντι άλλων φίλτρων εξομάλυνσης, όπως κυλιόμενων μέσων όρων, καθώς διατηρούν καλύτερα το υψηλής συχνότητας περιεχόμενο, αν και απομακρύνουν λιγότερο θόρυβο. Η μέθοδος έχει επεκταθεί και για εφαρμογή σε δεδομένα δύο και τριών διαστάσεων [Sch11], [Pis16].

Στη Matlab ένα φίλτρο Savitzky-Golay μπορεί να εφαρμοστεί με τη συνάρτηση `sgolayfilt`. Η συνάρτηση αυτή εφαρμόζει ένα φίλτρο εξομάλυνσης Savitzky-Golay πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης πολυωνυμικού βαθμού k και με μήκος πλαισίου N στα δεδομένα [Mat19a]. Στο εγχειρίδιό της η Matlab προτείνει την χρησιμοποίηση της συνάρτησης `sgolayfilt` για την εξομάλυνση μετρήσεων τάσης [Mat19b]. Με αφετηρία αυτή την πρόταση στη συνέχεια οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος εξομαλύνονται με το φίλτρο Savitzky-Golay. Το φίλτρο εφαρμόζεται στις μετρήσεις προτού αυτές δειγματοληπτηθούν με βάση το κριτήριο του ρεύματος που έχει αναλυθεί προηγουμένως.

Στο Σχ. 5.18 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έχουν ομαλοποιηθεί με το φίλτρο Savitzky-Golay. Είναι εμφανές ότι ο θόρυβος έχει περιοριστεί σημαντικά καθώς οι μετρήσεις δεν διαφέρουν σημαντικά από τις περιπτώσεις χωρίς θόρυβο. Για παράθυρο μήκους $N=30$, φορτίου σταθερού επαγωγικού $\Sigma I=0,8$ και για δίκτυο χωρίς αντιστάθμιση λαμβάνονται οι εκτιμήσεις που φαίνονται στο Σχ. 5.19.



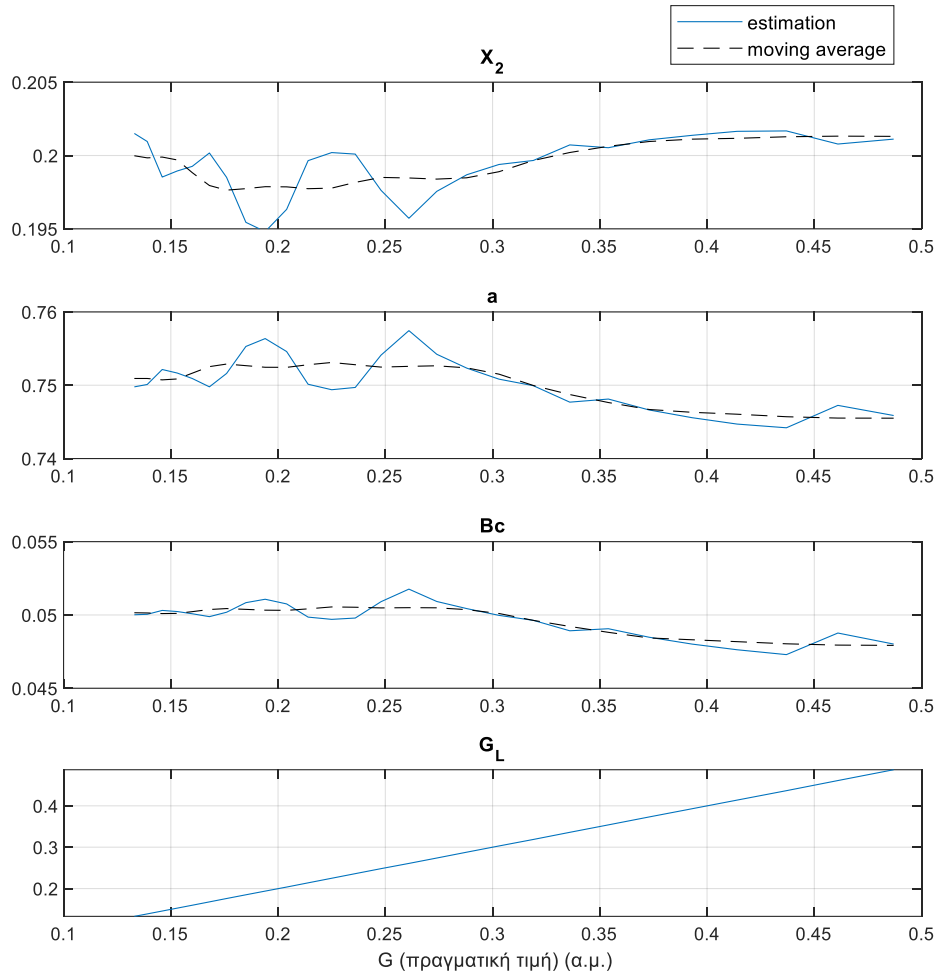
Σχ. 5.18: Μετρήσεις.



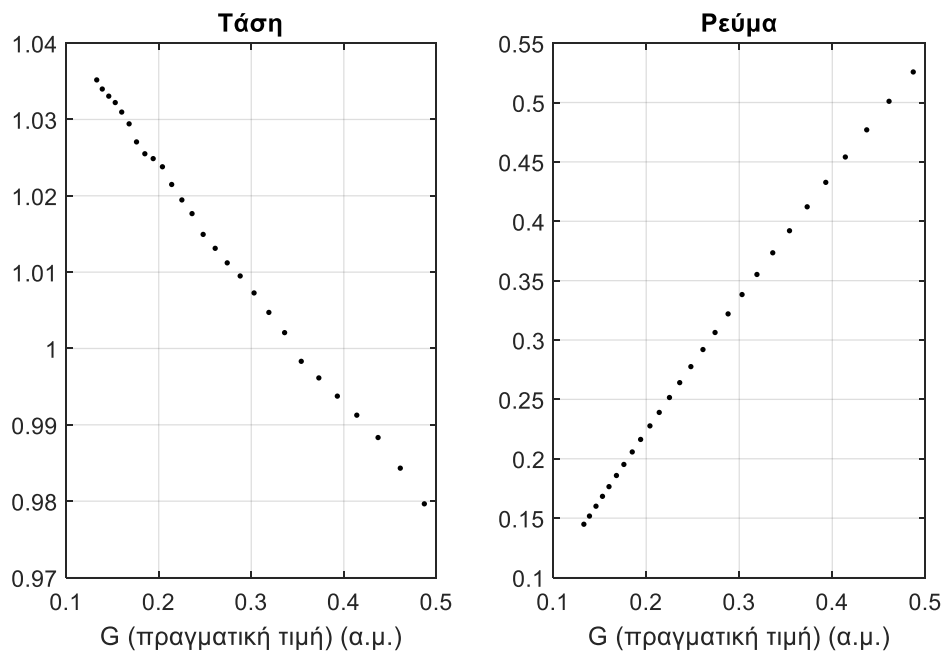
Σχ. 5.19: Εκτιμήσεις με φίλτρο Savitzky-Golay (ακριβής λ).

Σε κάθε περίπτωση οι εκτιμήσεις των παραμέτρων είναι πολύ πιο κοντά στις πραγματικές τους τιμές σε σχέση με την περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί φίλτρο Savitzky-Golay. Κάποιες ταλαντώσεις υπάρχουν, ωστόσο αν ληφθεί ο κινητός μέσος όρων των τιμών τότε οι εκτιμήσεις εμφανίζονται αρκετά σταθερές.

Αντίστοιχα συμπεράσματα εξάγονται και παρουσία αντιστάθμισης ($B_c = 0,05$ α.μ.), για $N=30$ και $\Sigma I=0,8$ επαγωγικός (Σχ. 5.20).



Σχ. 5.20: Εκτιμήσεις με φίλτρο Savitzky-Golay (ακριβής λ).



Σχ. 5.21: Μετρήσεις.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα και Προοπτικές

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα προσδιορισμού του συντελεστή ισχύος ενός φορτίου καθώς και οι παράμετροι του κατάντη δικτύου με μοναδική πληροφορία τις μετρήσεις τάσης και ρεύματος σε έναν ενδιάμεσο ζυγό ενός ακτινικού δικτύου.

Για την εκτίμηση φορτίου και κατάντη δικτύου ακολουθήθηκαν δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη στηρίχθηκε στις πληροφορίες που μπορούν να αντληθούν όταν οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος εκφραστούν ως σύνθετη αντίσταση και προβληθούν στο επίπεδο R-X. Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη μέθοδο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων ώστε να εκτιμηθούν οι άγνωστες παράμετροι του συστήματος.

Θεωρώντας ένα ακτινικό δίκτυο με φορτίο σταθερού συντελεστή ισχύος τότε προκύπτει ότι η κλίση της ευθείας που σχηματίζουν οι μετρούμενες σύνθετες αντιστάσεις στο επίπεδο R-X αντιστοιχεί στον συντελεστή ισχύος του φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ευθεία των μετρήσεων στο μιγαδικό επίπεδο είναι το αποτέλεσμα της μετατόπισης της ευθείας της σύνθετης αντίστασης του φορτίου κατά το διάνυσμα $\mathbf{Z}_2 = R_2 + jX_2$ της κατάντη γραμμής. Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου μπορεί να προσδιοριστεί λοιπόν σχετικά εύκολα βρίσκοντας την ευθεία που αντιστοιχεί στις μετρήσεις. Ακόμα και στην περίπτωση που οι μετρήσεις περιέχουν θόρυβο ή όταν ο συντελεστής ισχύος παρουσιάζει στατιστική μεταβλητότητα είναι δυνατή η εκτίμηση του συντελεστή ισχύος του φορτίου όπως φάνηκε στο Κεφάλαιο 3.

Δίχως κάποια επιπλέον πληροφορία ωστόσο δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της αντίστασης R_2 και της αντίδρασης X_2 της κατάντη γραμμής. Αν θεωρηθεί ότι ο λόγος $\lambda = R_2/X_2$ είναι γνωστός, τότε μπορούν να ευρεθούν τόσο τα R_2 και X_2 όσο και η σύνθετη αντίσταση του φορτίου. Η επιλογή λανθασμένου λόγου λ συνεπάγεται προσδιορισμό σύνθετης αντίστασης της κατάντη γραμμής και του φορτίου που διαφέρουν από τις πραγματικές τιμές. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθούν δύο ακραίοι λόγοι λ της γραμμής, η πραγματική τιμή θα είναι στο ενδιάμεσο των εκτιμημένων τιμών. Συγκεκριμένα, ο λόγος $\lambda = R_2/X_2$ δείχνει πόσο απότομο είναι το διάνυσμα \mathbf{Z}_2 . Μεγαλύτερος λόγος σημαίνει λιγότερο απότομο διάνυσμα, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει για μικρό λόγο λ .

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση όπου στο ακτινικό δίκτυο προστεθεί και αντιστάθμιση αέργου ισχύος στον ζυγό του φορτίου. Τώρα πια ο τόπος που σχηματίζουν οι μετρούμενες σύνθετες αντιστάσεις στο επίπεδο R-X αποδείχθηκε ότι είναι κύκλος. Η ακτίνα του κύκλου εξαρτάται μόνο από τον συντελεστή ισχύος του φορτίου και από την χωρητική αντιστάθμιση ενώ το κέντρο εξαρτάται και από τις παραμέτρους της κατάντη γραμμής. Ο κύκλος αυτός μπορεί να βρεθεί με προσαρμογή

καμπύλης στα σημεία των μετρήσεων. Αν η ακτίνα και το κέντρο του κύκλου που προκύπτουν από την καμπύλη εξισωθούν με την ακτίνα και το κέντρο της εξίσωσης του κύκλου σχηματίζεται ένα σύστημα τριών εξισώσεων με τέσσερις αγνώστους. Χωρίς άλλη πληροφορία το σύστημα δεν μπορεί να λυθεί δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της αντίστασης και της αντίδρασης της κατάντη γραμμής ούτε και της χωρητικής αντιστάθμισης.

Αν υποθεθεί όμως και πάλι γνωστός λόγος $\lambda = R_2/X_2$ τότε το σύστημα είναι τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους και είναι επιλύσιμο και τελικά μπορούν να προσδιοριστούν η χωρητική αγωγιμότητα BC , ο συντελεστής ισχύος του φορτίου και η αντίσταση και η αντίδραση της κατάντη γραμμής.

Στη μεθοδολογία που χρησιμοποιούνται τα μη γραμμικά ελάχιστα τετράγωνα εξετάζεται το ίδιο ακτινικό δίκτυο, ενώ επίσης υπάρχει πάλι η ανάγκη θεώρησης του λόγου R_2/X_2 για τις παραμέτρους της κατάντη γραμμής. Η ανάγκη αυτή προκύπτει διότι δεν υπάρχει κάποια άλλη πληροφορία που να υποδεικνύει τον τρόπο με τον οποίο να μπορεί να διαχωριστεί η μετρούμενη σύνθετη αντίσταση σε σύνθετη αντίσταση φορτίου και σύνθετη αντίσταση γραμμής.

Όταν οι μετρήσεις δεν περιέχουν θόρυβο, τότε η μέθοδος συγκλίνει στις πραγματικές τιμές ανεξάρτητα από το αν πρόκειται για αφόρτιστο ή για φορτισμένο δίκτυο. Οι εκτιμήσεις όλων των παραμέτρων είναι πολύ κοντά στις πραγματικές τιμές και τα αντίστοιχα σφάλματα είναι πολύ μικρά. Επιπλέον, η ανάλυση με τη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να αναγνωρίσει και να δώσει σωστές εκτιμήσεις ακόμα και όταν συμβαίνει μια μεταβατική αλλαγή στο δίκτυο, όπως για παράδειγμα η ένταξη πυκνωτή αντιστάθμισης που εξετάστηκε. Βέβαια, μέχρι οι εκτιμήσεις να ισορροπήσουν στις σωστές τιμές απαιτείται να εκκαθαριστεί το κυλιόμενο παράθυρο μήκους N , ώστε να περιέχονται μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μία μόνο λειτουργική κατάσταση του δικτύου· καθώς κατά τη μεταβατική φάση υπάρχουν μετρήσεις τόσο χωρίς πυκνωτή όσο και με πυκνωτή αντιστάθμισης. Ο όρος παράθυρο μήκους N χρησιμοποιείται για να περιγραφούν οι N μετρήσεις που αξιοποιεί η μέθοδος μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων προκειμένου να παραχθούν οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του κατάντη δικτύου.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η παρουσία θορύβου στις μετρήσεις και πως μπορεί να τις διαχειριστεί το μοντέλο μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Εδώ η κατάσταση είναι διαφορετική από την περίπτωση χωρίς θόρυβο.

Σε καταστάσεις χαμηλής φόρτισης δεν προκύπτουν αποδεκτές εκτιμήσεις, καθώς αυτές ταλαντώνονται γύρω από τις πραγματικές τιμές αλλά και απέχουν σημαντικά από αυτές. Η εξήγηση αυτής της συμπεριφοράς μπορεί να βρεθεί παρατηρώντας την X_2 . Το σφάλμα μεταξύ ιδανικής μετρούμενης τιμής (χωρίς θόρυβο) και της μέτρησης με θόρυβο, για χαμηλή φόρτιση του δικτύου, είναι μεγαλύτερο ή και συγκρίσιμο με την X_2 . Έτσι επιβάλλεται η προσπάθεια προσδιορισμού να ξεκινάει όταν το δίκτυο είναι περισσότερο φορτισμένο.

Όταν το δίκτυο είναι φορτισμένο μπορούν να προκύψουν αποδεκτές τιμές ωστόσο αυτές σε κάθε περίπτωση μπορεί να διαφέρουν από τις πραγματικές τιμές. Πράγματι, σε καμία περίπτωση οι εκτιμήσεις που προκύπτουν δεν είναι τόσο κοντά με

τις πραγματικές τιμές, σε αντίθεση με τις εκτιμήσεις όταν δεν υπάρχει θόρυβο. Επίσης, γίνεται εμφανής η ανάγκη για χρησιμοποίηση μεγάλου μήκους παραθύρου N (20 ή 30) και μάλιστα αρκετά μεγαλύτερου από την ελάχιστη τιμή ($N=4$) με την οποία θα μπορούσε να επιλυθεί το σύστημα των εξισώσεων του προβλήματος. Η επιλογή μεγαλύτερου πλήθους μετρήσεων έχει ως στόχο τον περιορισμό του θορύβου που περιέχουν οι μετρήσεις.

Παρά τις δυσκολίες που υπάρχουν για την εκτίμηση των παραμέτρων παρουσία θορύβου, μπορεί να ανιχνευτεί και σε αυτή την περίπτωση μια μεταβατική αλλαγή όπως είναι η ένταξη πυκνωτών αντιστάθμισης. Βέβαια, μέχρι οι εκτιμήσεις να ισορροπήσουν στις σωστές τιμές απαιτείται να εκκαθαριστεί το παράθυρο μήκους N , ώστε να περιέχονται μετρήσεις που αντιστοιχούν σε μία μόνο λειτουργική κατάσταση του δικτύου.

6.2 Προοπτικές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε ένα ακτινικό κατάντη δίκτυο και εξήχθησαν κάποια σημαντικά συμπεράσματα. Η βασική χρήση των προτεινόμενων μεθόδων αποσκοπούν στο να διορθωθεί το σφάλμα που παρατηρείται στην εκτίμηση ευστάθειας τάσεως όταν η μέτρηση γίνεται μακριά από τον ζυγό του φορτίου σταθερού συντελεστή ισχύος. Συνεπώς, σε επόμενη εργασία θα πρέπει οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν να χρησιμοποιηθούν μαζί με την εκτίμηση του ισοδυνάμου Thévenin για την ορθή εκτίμηση της ευστάθειας τάσης. Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο η εύρεση ενός ισοδυνάμου Thévenin είναι επίπονη και δύσκολη εργασία, καθώς στην πραγματικότητα τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι βροχοειδή και εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα.

Οι εκτιμήσεις όμως του κατάντη δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση των μεθόδων αναγνώρισης αστάθειας τάσης που βασίζονται στην ωμική αγωγιμότητα NLI και RLI. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να γίνει διόρθωση της αγωγιμότητας που αυτοί χρησιμοποιούν ώστε τα αποτελέσματά τους να αφορούν συγκεκριμένα το φορτίο, καθώς μέχρι τώρα χρησιμοποιείτο η φαινόμενη αγωγιμότητα που περιλάμβανε τόσο το φορτίο όσο και το δίκτυο και συνεπώς η ανίχνευση της αστάθειας τάσης γινόταν σε διαφορετικό σημείο από ότι στην πραγματικότητα.

Επίσης, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την επέκταση των προτεινόμενων μεθόδων για ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο. Η περίπτωση αυτή είναι σαφώς πολύ πιο περίπλοκη καθώς παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με το ακτινικό δίκτυο. Μια πρώτη εικόνα για την δυσκολία του εγχειρήματος μπορεί να λάβει κανείς παρατηρώντας την μεταβατική συμπεριφορά των εκτιμήσεων όταν συμβαίνει μία απότομη αλλαγή με την ένταξη πυκνωτών αντιστάθμισης.

Τέλος, σε μελλοντική εργασία θα μπορούσε να εξεταστεί η αναλογία των μετρούμενων σύνθετων αντιστάσεων στο μιγαδικό επίπεδο για ευστάθεια τάσης με τις αντίστοιχες για προστασία αποστάσεως. Η γνώση των παραμέτρων του κατάντη δικτύου θα μπορούσε να βελτιώσει την συμπεριφορά των ηλεκτρονόμων αποστάσεως

που επιτηρούν απομακρυσμένα βραχυκυκλώματα και συγκεκριμένα την λειτουργία τους για την παραβίαση της 3^{ης} Ζώνης.

Κεφάλαιο 7 Βιβλιογραφία

- [AM15] S. M. Abdelkader and D. J. Morrow, "Online Thévenin Equivalent Determination Considering System Side Changes and Measurement Errors," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2716-2725, Sept. 2015.
- [Att17] S. Attaway. *MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving*. 2017.
- [BD14] J. L. Blackburn, T. J. Domin, "Protective Relaying: Principles and Applications", Fourth Edition, CRC Press, 2014.
- [CC14] S. C. Chapra, R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2014.
- [CGT00] A. R. Conn, N. I. M. Gould and P. L. Toint. *Trust-region methods*. Philadelphia, Pa, Society for Industrial and Applied Mathematics.2000
- [CHE09] N. Chernov, "Circle Fit (Pratt method) - File Exchange - MATLAB Central", *Mathworks.com*, 2009. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22643-circle-fit-pratt-method>. [Accessed: 12- Aug- 2019].
- [CT08] S. Corsi and G. N. Taranto, "A Real-Time Voltage Instability Identification Algorithm Based on Local Phasor Measurements," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 1271-1279, Aug. 2008.
- [Gri12] S. Grijalva, "Individual Branch and Path Necessary Conditions for Saddle-Node Bifurcation Voltage Collapse," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 12-19, Feb. 2012.
- [HK98] I. A. Hiskens and A. Koeman, "Parameter estimation from power system disturbance measurements," *Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery (Cat. No.98EX137)*, Singapore, 1998, pp. 667-672 vol.2.
- [IEE11] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, C37.118.1-2011, IEEE Power & Energy Society, 2011.
- [JD00] M. Jonsson and J. Daalder, "Distance protection and voltage stability," *PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409)*, Perth, WA, Australia, 2000, pp. 971-976 vol.2.

- [Kun94] P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994
- [Mar63] D. W. Marquardt. "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters." *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, no. 2, 1963, pp. 431–441.
- [Masxx] R. Mason, "The Art and Science of Protective Relaying", General Electric
- [Mat19a] Mathworks, "Savitzky-Golay filtering - MATLAB sgolayfilt", *Mathworks.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/sgolayfilt.html>. [Accessed: 12- Aug- 2019].
- [Mat19b] Mathworks, "Signal Smoothing - MATLAB & Simulink Example", *Mathworks.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/signal/examples/signal-smoothing.html>. [Accessed: 12- Aug- 2019].
- [NMV18] V. Nikolaidis, P. Mandoulidis and C. Vournas, "Combining Transmission Line Protection with Voltage Stability Monitoring". Power Systems Computation Conference 2018 (PSCC 2018), Dublin, Ireland 2018.
- [NOS15] M. Nakmali, D. Osipov and K. Sun, "A new hybrid approach to thevenin equivalent estimation for voltage stability monitoring," *2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, CO, 2015, pp. 1-5.
- [NSS14] V. C. Nikolaidis, N. Savvopoulos, A. S. Safigianni and C. D. Vournas, "Adjusting third zone distance protection to avoid voltage collapse," *2014 Power Systems Computation Conference*, Wroclaw, 2014, pp. 1-7.
- [Orf96] S. J. Orfanidis, *Introduction to Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [Pha02] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements - a historical overview," *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Yokohama, Japan, 2002, pp. 476-479 vol.1.
- [PT08] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, Springer US, 2008.
- [RGS04] J. R. Raol, G. Girija, J. Singh, "Modeling and Parameter Estimation of Dynamic Systems", The Institution of Electrical Engineers, London UK 2004.
- [RT99] C. R. Rao, H. Toutenburg, "Linear Models: Least Squares and Alternatives", Second Edition, Springer, 1999.

- [Sch11] R. W. Schafer, "What Is a Savitzky-Golay Filter? [Lecture Notes]," in *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 4, pp. 111-117, July 2011.
- [SG64] A. Savitzky and M.J.E Golay. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36, 1627-1639. 1964
- [SVG06] I. Smon, G. Verbic and F. Gubina, "Local voltage-stability index using tellegen's Theorem," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 1267-1275, Aug. 2006.
- [Tay94] C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [VBN99] K. Vu, M. M. Begovic, D. Novosel and M. M. Saha, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1029-1035, Aug. 1999.
- [VLM17] C. D. Vournas, C. Lambrou and P. Mandoulidis, "Voltage Stability Monitoring From a Transmission Bus PMU," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 3266-3274, July 2017.
- [VM18] C. Vournas and P. Mandoulidis, "On-Line Voltage Stability Monitoring," *2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Florence, 2018, pp. 1-5.
- [VV08] T. Van Cutsem and C. Vournas. *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Springer, 2008.
- [VV10] T. Van Cutsem and C. Vournas. "On-Line Voltage Security Assessment". In: *Real-Time Stability in Power Systems*. Ed. By S. Savulescu. Springer, 2010. Chap. 10.
- [War68] A.R. Van C. Warrington, "Protective Relays, their Theory and Practice", Volume One, Chapman and Hall, Second Edition, 1968.
- [AΔ13] Γ. Δ. Ακρίβη, Β. Α. Δουγαλή. "Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση". Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 4^η Έκδοση, Ηράκλειο 2013.
- [Αρτ13] Α. Θ. Αρταβάνης – Τσαπατσάρης. "Προσέγγιση Ροής Φορτίου ΣΡ και εκτίμηση Αντιδράσεων Γραμμών Μεταφοράς". Μεταπτυχιακή Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.
- [BK10] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα 2010.

- [Καν14] Μ. Χ. Κανατάς, “Αξιολόγηση Αποκεντρωμένου Συστήματος Προστασίας από Κατάρρευση Τάσεως”, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος 2014.
- [Κρα13] Δ. Χ. Κραββαρίτης, “Θέματα Εφαρμοσμένων Μαθηματικών”, Εκδόσεις Τσότρας, Αθήνα 2013.
- [Λαμ17] Χ. Α. Λάμπρου, “Σχεδίαση Συστημάτων Ανίχνευσης Αστάθειας Τάσεως και Προστασίας από Κατάρρευση”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2017.
- [Παπ85] Β. Κ. Παπαδιά, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Τόμος Ι Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1985.
- [Παπ97] Μ. Π. Παπαδόπουλος, “Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1997.
- [Ρίς16] Κ. Ρίσβα, “Ανάπτυξη Μοντέλου Χαμηλών Ροών σε Λεκάνες Απορροής της Περιοχής της Μεσογείου”, Διπλωματική Εργασία, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2016.
- [Σου15] Θ. Σουξές, “Άεργος Υποστήριξη Συστήματος Μεταφοράς από Διεσπαρμένες Πηγές”, Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2015.
- [Φελ10] Α. Φελλούρης, “Γραμμική Άλγεβρα και Αναλυτική Γεωμετρία”, Έκδοση 3^η, Αθήνα 2010.