



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

**Προηγμένοι Αλγόριθμοι Εντοπισμού Σφαλμάτων σε  
Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση  
Συγχρονισμένων ή μη Μετρήσεων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χρήστος Α. Αποστολόπουλος

Αθήνα, Απρίλιος 2011





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Προηγμένοι Αλγόριθμοι Εντοπισμού Σφαλμάτων σε Γραμμές Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με Χρήση Συγχρονισμένων ή μη Μετρήσεων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Χρήστος Α. Αποστολόπουλος

Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Κορρές

Νικόλαος Χατζηαργυρίου

Κωνσταντίνος Βουρνάς

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την ..... Απριλίου 2011.

.....  
Γ. Κορρές  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ν. Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Σ. Παπαθανασίου  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Π. Μαραγκός  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Π. Γεωργιάκης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π

.....  
Γ. Παπαγιάννης  
Αν. Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Απρίλιος 2011

.....

Χρήστος Α. Αποστολόπουλος

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

Copyright © Χρήστος Α. Αποστολόπουλος, 2011.

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.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή άρχισε να εκπονείται το Νοέμβριο του 2004 και ολοκληρώθηκε το Μάρτιο του 2011, στο Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή κ. Γεωργίου Ν. Κορρέ.

Έχοντας ολοκληρώσει την εκπόνηση της διατριβής, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που με την συμπαράστασή τους με βοήθησαν.

Θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου προς τον επιβλέποντα της εργασίας, Αν. Καθηγητή κ. Γ. Κορρέ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και τη βοήθεια που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής. Η συνεχής ενθάρρυνση και συμπαράστασή του συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της ερευνητικής προσπάθειας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Ν. Χατζηαργυρίου και κ. Κ. Βουρνά, για το ενδιαφέρον τους και τις χρήσιμες συμβουλές τους. Ευχαριστώ ακόμη, τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Επ. Καθηγητή κ. Σ. Παπαθανασίου, Καθηγητή κ. Π. Μαραγκό, Αν. Καθηγητή κ. Γ. Παπαγιάννη και Λέκτορα κ. Π. Γεωργιλάκη για το ενδιαφέρον τους και τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή κ. Κ. Βουρνά για τη βοήθειά του και τις χρήσιμες επιστημονικές του υποδείξεις σε επιμέρους θέματα της παρούσας διατριβής.

Ευχαριστώ ακόμη τα μέλη του Εργαστηρίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για τη φιλική συνεργασία, όποτε αυτή χρειάστηκε.

Ευχαριστίες οφείλω και σε όλους τους συναδέλφους μου στην εταιρεία PROT.A.S.I.S ΑΕ, όπου έκανα τα πρώτα μου επαγγελματικά βήματα και είχα την τύχη να έρθω σε επαφή με σημαντικές τεχνολογίες που άπτονται της Προστασίας των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα το Διευθύνοντα Σύμβουλο της εταιρείας κ. Β. Γεωργίου για την καθολική στήριξη που μου παρείχε καθόλη τη διάρκεια της διατριβής, και τους Προϊσταμένους μου κ. Η. Μήλη και κ. Δ. Τσακίρη, Διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς (ΕΜΠ), για την ειλικρινή τους κατανόηση, καθώς και για την αγάπη και την εμπειρία τους που μου μετέδωσαν για το συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δικούς μου ανθρώπους: τους φίλους μου, που μοιράστηκαν μαζί μου χαρές και αγωνίες όλο αυτό το διάστημα, και την οικογένειά μου, που πίστεψε στην αξία της προσπάθειας αυτής και με στήριξε όσο κανείς άλλος στα δύσκολα χρόνια. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον καλό μου φίλο Μιχάλη Δημάκο, Διπλωματούχο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό και Μηχανικό Υπολογιστών, για το ειλικρινές ενδιαφέρον του και την πρόθυμη πάντοτε προσφορά βοήθειας.

Τη διατριβή αυτή αφιερώνω στους γονείς μου, Αθανάσιο και Βασιλική, και την αδερφή μου, Γλυκερία, ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης για όσα έχουν κάνει και συνεχίζουν να κάνουν για μένα.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ολοένα αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) καθιστά αναγκαία όσο ποτέ άλλοτε τη βελτίωση των υπάρχουσών τεχνικών προστασίας, ελέγχου και μετρήσεων, και την ταυτόχρονη ανάπτυξη νέων καινοτόμων μεθόδων για την αποδοτικότερη λειτουργία τους. Μέχρι πριν από λίγα χρόνια, ο συμπληρωματικός εξοπλισμός προστασίας των ΣΗΕ, όπως οι εντοπιστές σφαλμάτων στις εναέριες γραμμές μεταφοράς και στα υπόγεια καλώδια, δε χρησιμοποιείτο συστηματικά. Τα τελευταία, όμως, χρόνια έχει γίνει ευρέως αποδεκτό ότι η γρήγορη και ακριβής εύρεση της θέσης του σφάλματος επιταχύνει σημαντικά το χρόνο αποκατάστασης των βλαβών στα ΣΗΕ, μειώνει τη διάρκεια των διακοπών της παρεχόμενης ισχύος προς τους καταναλωτές, και γενικά βελτιώνει την αξιοπιστία τους. Αναγνωρίζοντας τη σπουδαιότητα των παραγόντων αυτών για τις εταιρείες ηλεκτρισμού, παρατηρείται μία ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για αποτελεσματικές μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων, γεγονός που έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας που ασχολείται με την προστασία των ΣΗΕ σ' αυτή την περιοχή έρευνας.

Ο σκοπός αυτής της διατριβής είναι η ανάπτυξη προηγμένων αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση συγχρονισμένων ή μη μετρήσεων στα άκρα τους. Ως κριτήρια απόδοσης των αλγορίθμων, τα οποία τους διαφοροποιούν από τις υπάρχουσες μεθόδους, ορίζονται: α) η ακρίβεια των μετρήσεων, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου, β) η εξάλειψη των παραμέτρων που ορίζονται από το χρήστη ή λαμβάνονται από εξωτερικές πηγές (π.χ. Η/Ν προστασίας, SCADA), και οι οποίες μπορούν να εισαγάγουν σημαντικό σφάλμα στην ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων (π.χ. ηλεκτρικές παράμετροι των γραμμών, μοντέλο της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς, τύπος του σφάλματος, ισοδύναμα δίκτυα στα άκρα των γραμμών κτλ.), γ) η ακρίβεια του μοντέλου αναπαράστασης των γραμμών μεταφοράς, π.χ. αν πρόκειται για γραμμές μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μήκους, δ) ο περιορισμός των αξιοποιούμενων δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών, ώστε να αποφεύγονται προβλήματα συμφόρησης στα κανάλια επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά τους.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, στην παρούσα διατριβή αναπτύσσονται επιτυχώς και παρουσιάζονται λεπτομερώς, καινοτόμοι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων) και διπλού κυκλώματος (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, με ή χωρίς χωρητική αντιστάθμιση σειράς, με χρήση μοντέλου μικρού, μεσαίου και μεγάλου μήκους). Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι επαληθεύονται μέσω λεπτομερών προσομοιώσεων σφαλμάτων από το πρόγραμμα υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP. Επιπλέον, αναπτύσσεται και παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος υπολογισμού των φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων, που θεωρούνται ως δεδομένα εισόδου στους παραπάνω αλγορίθμους, όταν η συχνότητα του συστήματος μεταβάλλεται.

**Λέξεις-Κλειδιά:** Εντοπισμός σφαλμάτων, εναέριες γραμμές μεταφοράς, συγχρονισμένες και μη μετρήσεις, μονάδες μέτρησης φασιθετών, χωρητική αντιστάθμιση σειράς, Η/Ν προστασίας, στιγμιαία συχνότητα, υπολογισμός φασιθετών ηλεκτρικών σημάτων, ATP/EMTP.

# ABSTRACT

Due to the increasing complexities of modern power systems, improving the existing techniques of protection, control and measurement and developing new innovative ones have got much attention recently. The goal is to enhance the overall power system performance. A few years ago, the supplementary protection equipment such as fault locators has got little consideration compared with the main protection one. Nowadays, it has been widely recognized that prompt and accurate location of faults in power systems can accelerate system restoration, reduce outage time and improve the system reliability. This has led to remarkable investments in research for fault location methodologies, which has attracted the attention of power system protection community. The essential factors behind these new strategies are due to the competitive markets and new deregulation policies, in which the terms such as continuity, dependability and reliability play an important role for electric utilities.

This thesis focuses on the development of advanced fault location algorithms for overhead transmission lines with use of two-end synchronized or unsynchronized measurements. The following criteria are established for the purpose of evaluating the proposed algorithms, which differentiate them from the existing ones: a) the accuracy of measurements used as input data, b) the exclusion of user-defined parameters or parameters that can be supplied from external sources (e.g. protective relays, SCADA), which can highly affect the fault location accuracy (e.g. electrical parameters of transmission lines, the compensation device model in series-compensated transmission lines, the fault type, the source impedance at line terminals etc.), c) the accuracy of transmission line models adopted (e.g. short, medium and long lines for phasor domain algorithms), d) the utilization of limited measurement data from both line ends, in order to reduce the burden of communication channels employed to transfer the required data.

Based on the above criteria, this thesis presents new accurate fault location algorithms for single-circuit transmission lines (with or without transposition) and double-circuit transmission lines (with or without transposition, with or without series compensation, short/medium/long length line model). The thesis provides extensive evaluation studies of the proposed algorithms with use of reliable ATP/EMTP simulation data of faults applied under various system/fault conditions, at different locations on single/double-circuit transmission lines. Moreover, a practical and precise method is developed for calculating voltage and current phasors in electric power networks, which are used as input data to the proposed fault location algorithms, under frequency variations.

**Index Terms:** Fault location, overhead transmission lines, synchronized/unsynchronized measurements, phasor measurement units, series compensation, protective relays, instantaneous frequency, phasor computation, ATP/EMTP.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	21
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	21
1.1 Συμβολή – Δομή της διατριβής.....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	25
<b>ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	25
2.1 Εισαγωγή.....	25
2.2 Τύποι εναέριων γραμμών μεταφοράς.....	25
2.2.1 Γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος.....	25
2.2.2 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος.....	26
2.2.3 Γραμμές μεταφοράς με πολλά τερματικά σημεία και γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις 28	
2.2.4 Σύνθετες γραμμές μεταφοράς.....	29
2.3 Μαθηματικά μοντέλα αναπαράστασης γραμμών μεταφοράς.....	29
2.3.1 Μοντέλα γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους.....	30
2.3.2 Μοντέλα γραμμών μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους.....	39
2.3.3 Μετασχηματισμοί ρυθμών.....	41
2.3.4 Γραμμές με αντιστάθμιση σειράς.....	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b> .....	49
<b>ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ</b> .....	49
3.1 Εισαγωγή.....	49
3.2 Χωρητικοί μετασχηματιστές τάσης.....	49
3.3 Μετασχηματιστές έντασης.....	54
3.4 Αναλογικά αντιαναδιπλωτικά φίλτρα (Analog anti-aliasing filters).....	57
3.5 Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	59
3.5.1 Χαρακτηριστικά των μετατροπέων A/D.....	60
3.5.2 Μοντέλο αναπαράστασης των μετατροπέων A/D στους εντοπιστές σφαλμάτων ([100], [141], [142]).....	61
3.6 Αλγόριθμοι ψηφιακής επεξεργασίας.....	61
3.6.1 Υπολογισμός των φασιθετών.....	62
3.6.1.1 Ψηφιακό φιλτράρισμα.....	63
3.6.1.2 Μεταβατική απόκριση διακριτού μετασχηματισμού Fourier.....	64
3.6.1.3 Απόκριση συχνότητας διακριτού μετασχηματισμού Fourier.....	66
3.6.1.4 Επίδραση της συνιστώσας συνεχούς ρεύματος (DC) στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier.....	67
3.6.1.5 Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών.....	69
3.6.2 Αλγόριθμοι στο πεδίο του χρόνου.....	70
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b> .....	73
<b>ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ</b> .....	73
4.1 Αλγόριθμοι με χρήση οδεδόντων κυμάτων.....	73
4.2 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης.....	74
4.2.1 Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο.....	74
4.2.2 Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος.....	76
4.2.2.1 Μέθοδος επαγωγικής αντίδρασης (Simple reactance method).....	77

4.2.2.2	Μέθοδος Takagi – Μέθοδοι υπολογισμού της θέσης του σφάλματος χωρίς τη χρήση των σύνθετων αντιστάσεων των ισοδυνάμων πηγών της γραμμής .....	79
4.2.2.3	Μέθοδοι υπολογισμού της θέσης του σφάλματος με χρήση των σύνθετων αντιστάσεων των ισοδυνάμων πηγών στα άκρα της γραμμής .....	80
4.2.3	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος.....	82
4.2.4	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς.....	84
4.2.4.1	Προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμές με σειριακή αντιστάθμιση.....	86
4.2.5	Βελτίωση ακριβείας των αλγορίθμων με χρήση μετρήσεων από ένα μόνο άκρο με αξιοποίηση του μοντέλου γραμμής με κατανομημένες παραμέτρους.....	89
4.2.6	Αξιολόγηση αλγορίθμων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα άκρο .....	90
4.3	Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης και από τα δύο άκρα .....	91
4.3.1	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με πλήρη αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων από κάθε άκρο της γραμμής μεταφοράς .....	94
4.3.2	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση περιορισμένου αριθμού συγχρονισμένων μετρήσεων .....	95
4.3.3	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος.....	96
4.3.4	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων κατά τη διάρκεια του σφάλματος.....	97
4.3.5	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων στο πεδίο του χρόνου.....	98
4.3.6	Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση συγχρονισμένων ή μη μετρήσεων σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς .....	100
4.3.7	Αξιολόγηση αλγορίθμων με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς.....	101
4.4	Μη ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.....	101
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>		<b>103</b>
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....</b>		<b>103</b>
5.1	Εισαγωγή.....	103
5.2	Θεωρητική ανάλυση .....	104
5.2.1	Μέθοδος αντιστάθμισης φασιθετών .....	104
5.2.2	Υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας $\hat{f}$ .....	107
5.3	Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου.....	108
5.3.1	Υπολογιστική εφαρμογή .....	108
5.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	110
5.4	Αντιμετώπιση των αρμονικών .....	112
5.4.1	Θεώρηση μίας μόνο αρμονικής .....	113
5.4.2	Θεώρηση περισσότερων αρμονικών.....	115
5.4.3	Αξιολόγηση της εκτεταμένης μεθόδου μέσω προσομοιώσεων.....	116
5.5	Σύνοψη-Συμπεράσματα .....	122
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>		<b>123</b>
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΑΝΤΙ-ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥΣ .....</b>		<b>123</b>
6.1	Γενικά.....	123
6.2	Καθορισμός των ισοδυνάμων $\Pi$ ακολουθιακών κυκλωμάτων γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος .....	124

6.3	Ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος.....	127
6.3.1	Εκτίμηση φασιθετών μετρούμενων σημάτων, ανίχνευση του τύπου σφάλματος, κατάτμηση των καταγραφών σφάλματος σε περιοχές πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος, χρονική ευθυγράμμιση των καταγραφών σφάλματος.....	128
6.3.2	Προσδιορισμός του σφάλματος συγχρονισμού .....	129
6.3.3	Επιλογή του εσφαλμένου κυκλώματος της γραμμής.....	130
6.3.4	Εκτίμηση της θέσης του σφάλματος.....	131
6.3.4.1	Ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος.....	133
6.3.4.2	Θεωρία εκτίμησης της θέσης του σφάλματος.....	135
6.3.4.3	Χαρακτηριστικές εξισώσεις για διαφόρους τύπους σφαλμάτων .....	137
6.4	Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.....	138
6.5	Σύνοψη-Συμπεράσματα .....	141
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>		<b>143</b>
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ</b>		
<b>ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ</b>		
.....		<b>143</b>
7.1	Γενικά.....	143
7.2	Μαθηματική θεμελίωση της προτεινόμενης μεθόδου.....	144
7.2.1	Στάδιο I – Χωρίς θεώρηση της εγκάρσιας χωρητικότητας της γραμμής .....	147
7.2.2	Στάδιο II – Θεώρηση της εγκάρσιας χωρητικότητας της γραμμής .....	149
7.3	Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.....	151
7.3.1	Αναπαραγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων μέτρησης .....	151
7.3.2	Έλεγχος ακριβείας της προτεινόμενης μεθόδου .....	152
7.3.3	Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου.....	157
7.3.4	Επίδραση των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια της μεθόδου.....	159
7.3.5	Επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια της μεθόδου .....	160
7.4	Σύνοψη - Συμπεράσματα .....	164
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8.....</b>		<b>165</b>
<b>ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ</b>		
<b>ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ</b>		
<b>ΓΡΑΜΜΩΝ.....</b>		<b>165</b>
8.1	Εισαγωγή.....	165
8.2	Μαθηματική θεμελίωση της προτεινόμενης μεθόδου.....	165
8.2.1	Γραμμές διπλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων.....	166
8.2.2	Γραμμές διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων.....	170
8.3	Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.....	172
8.3.1	Αναπαραγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων μέτρησης .....	172
8.3.2	Έλεγχος ακριβείας της προτεινόμενης μεθόδου .....	174
8.3.3	Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου.....	175
8.3.4	Επίδραση των κατανεμημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους στην ακρίβεια της μεθόδου .....	175
8.3.5	Επίδραση των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια της μεθόδου.....	177
8.3.6	Επίδραση των σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής στην ακρίβεια της μεθόδου.....	179
8.3.7	Επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια της μεθόδου .....	180
8.4	Σύνοψη - Συμπεράσματα .....	183
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9.....</b>		<b>185</b>

<b>ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ .....</b>	<b>185</b>
9.1 Εισαγωγή.....	185
9.2 Εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς....	185
9.2.1 Ανίχνευση του τύπου σφάλματος (Fault Type Identification – FTI Logic).....	187
9.2.2 Εκτίμηση της θέσης του σφάλματος.....	187
9.2.2.1 Ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F.....	191
9.2.2.2 Αλγόριθμος εκτίμησης της θέσης του σφάλματος .....	192
9.2.2.3 Χαρακτηριστικές εξισώσεις για διαφόρους τύπους σφαλμάτων .....	193
9.2.2.4 Επιλογή του εσφαλμένου τμήματος της διπλής γραμμής με αντιστάθμιση σειράς .....	196
9.3 Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου .....	196
9.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα .....	201
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10.....</b>	<b>203</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....</b>	<b>203</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11.....</b>	<b>207</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>207</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταφοράς με μία γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος: (α) γενική περίπτωση, (β) γενικευμένο ισοδύναμο κύκλωμα, (γ) απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα με τη γραμμή μεταφοράς ως τη μοναδική σύνδεση μεταξύ των ζυγών A και B .....	26
Σχήμα 2.2 Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταφοράς με μία γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος .....	27
Σχήμα 2.3 Τρόποι λειτουργίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αμοιβαία σύζευξη των παράλληλων κυκλωμάτων .....	28
Σχήμα 2.4 Παράδειγμα δικτύου μεταφοράς με μερικώς παράλληλα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς...	28
Σχήμα 2.5 Γραμμή μεταφοράς (α) τριών σημείων (β) με ενδιάμεση λήψη .....	29
Σχήμα 2.6 Σύνθετη γραμμή μεταφοράς .....	29
Σχήμα 2.7 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους.....	31
Σχήμα 2.8 Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικής γραμμής μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα με χρήση πινάκων για την αναπαράσταση των στοιχείων της γραμμής (σύνθετες αντιστάσεις, πηγές) και διανυσμάτων για την αναπαράσταση των μετρούμενων σημάτων στα άκρα της και στο σημείο του σφάλματος F .....	31
Σχήμα 2.9 Αναπαράσταση αντίστασης σφάλματος για: (α) μονοφασικό ως προς γη σφάλμα, (β) διφασικό σφάλμα, (γ) διφασικό ως προς γη σφάλμα, (δ) τριφασικό σφάλμα, (ε) τριφασικό ως προς γη σφάλμα .....	32
Σχήμα 2.10 Πλήρης αντιμετάθεση φάσεων σε τριφασική γραμμή μεταφοράς .....	33
Σχήμα 2.11 Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής, (γ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα .....	35
Σχήμα 2.12 Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό ως προς γη σφάλμα με αντίσταση σφάλματος.....	36
Σχήμα 2.13 Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα.....	37
Σχήμα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με τα δύο κυκλώματα σε λειτουργία (α) γενικό, (β) εναλλακτικό κύκλωμα .....	38
Σχήμα 2.15 Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με το υγιές κύκλωμα της γραμμής εκτός λειτουργίας και τα άκρα του γειωμένα.....	38
Σχήμα 2.16 Ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα με χρήση του ονομαστικού Π μοντέλου .....	39
Σχήμα 2.17 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους με κατανεμημένες παραμέτρους.....	39
Σχήμα 2.18 Ισοδύναμο Π κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους για την i-στη ακολουθία.....	40
Σχήμα 2.19 Γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στο μέσο της .....	43
Σχήμα 2.20 Συστοιχία σειριακών πυκνωτών: (α) διάταξη αντιστάθμισης σειράς με πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας, (β) διάταξη αντιστάθμισης σειράς με πυκνωτές ελεγχόμενης χωρητικότητας μέσω θυρίστορ, (γ) χαρακτηριστική v-i MOV.....	44
Σχήμα 2.21 Λειτουργία SCs και MOVs κατά την εκδήλωση μονοφασικού ως προς γη σφάλματος (a-g): (α) κυματομορφές φασικών ρευμάτων που εισέρχονται στο κύκλωμα των SCs και MOVs, (β) κυματομορφές πτώσεων τάσης στα άκρα των SCs και MOVs, (γ) κυματομορφή ρεύματος που ρέει στο σειριακό πυκνωτή ( $i_C$ ) και MOV ( $i_{MOV}$ ) της εσφαλμένης φάσης a .....	45
Σχήμα 2.22 Τοποθέτηση των μετασχηματιστών μέτρησης στην περίπτωση σειριακής αντιστάθμισης και στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς (α) από την πλευρά του διακόπτη ισχύος (σε σχέση με τη διάταξη αντιστάθμισης), (β) από την πλευρά της γραμμής .....	46
Σχήμα 2.23 Γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στο μέσο κάθε κυκλώματος .....	46
Σχήμα 2.24 Γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στα άκρα κάθε κυκλώματος .....	47
Σχήμα 3.1 Διαδοχικά στάδια μέτρησης των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων .....	50
Σχήμα 3.2 Σχηματικό διάγραμμα ενός χωρητικού MT: $C_1$ , $C_2$ – συστοιχίες πυκνωτών (stack capacitors), $L_{CR}$ – πηνίο αντιστάθμισης (compensation reactor), Tr – επαγωγικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης (inductive step-down transformer), A-FSC – κύκλωμα καταστολής σιδηροσυντονισμού (anti-ferroresonance suppressing circuit), αντίσταση του τροφοδοτούμενου φορτίου (burden).....	51

Σχήμα 3.3 Παραδείγματα κυκλωμάτων καταστολής σιδηροσυντονισμού (FSC): (α) παθητικό φίλτρο (passive PFSC), (β) ενεργό φίλτρο (active AFSC).....	52
Σχήμα 3.4 Κυματομορφή της τάσης εξόδου χωρητικού MT κατά τη διακοπή βραχυκυκλώματος στο δευτερεύον του: (—) χωρίς φίλτρο AFSC, (---) με φίλτρο AFSC.....	52
Σχήμα 3.5 Μεταβατική απόκριση χωρητικών MT τύπου: (---) high-C και (---) extra high-C όταν η τάση πρωτεύοντος μηδενίζεται διερχόμενη από το μηδέν.....	53
Σχήμα 3.6 Μεταβατική απόκριση χωρητικών MT τύπου: (---) high-C και (---) extra high-C όταν η τάση πρωτεύοντος μηδενίζεται διερχόμενη από τη μέγιστη τιμή της.....	54
Σχήμα 3.7 Ισοδύναμο κύκλωμα ME (όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο δευτερεύον τύλιγμα).....	55
Σχήμα 3.8 Κορεσμός ME – κυματομορφή ρεύματος πρωτεύοντος (εκφρασμένη στο δευτερεύον) και δευτερεύοντος του ME.....	56
Σχήμα 3.9 Κύκλωμα RC σε διάταξη βαθυπερατού φίλτρου.....	58
Σχήμα 3.10 Βαθυπερατό φίλτρο Sallen-Key 1 <sup>ης</sup> τάξης.....	58
Σχήμα 3.11 Βαθυπερατό φίλτρο Sallen-Key 2 <sup>ης</sup> τάξης.....	58
Σχήμα 3.12 Επίδραση αναλογικού αντιαναδιπλωτικού φίλτρου στο σήμα εισόδου.....	59
Σχήμα 3.13 Στάδια μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	60
Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστική μεταφοράς ιδανικού μονοπολικού μετατροπέα A/D (διακεκομμένη γραμμή) και ενός A/D τριών bits (συνεχής γραμμή).....	61
Σχήμα 3.15 Διάγραμμα ροής-καταχώρησης των δειγμάτων στα στοιχεία του πίνακα.....	64
Σχήμα 3.16 Διάγραμμα της διαδικασίας ψηφιακού φιλτραρίσματος που περιγράφεται από την (3.10).....	64
Σχήμα 3.17 Απόκριση μέτρου του διακριτού μετασχηματισμού Fourier για βηματική-ημιτονοειδή μεταβολή.....	65
Σχήμα 3.18 Απόκριση φασικής γωνίας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier για βηματική-ημιτονοειδή μεταβολή.....	66
Σχήμα 3.19 Απόκριση συχνότητας FIR φίλτρων συνημιτόνου και ημιτόνου.....	67
Σχήμα 3.20 Απόκριση μέτρου του διακριτού μετασχηματισμού Fourier 8 και 16 δειγμάτων.....	68
Σχήμα 3.21 Επίδραση της DC συνιστώσας στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier και το φίλτρο συνημιτόνου.....	69
Σχήμα 3.22 Σήμα αναφοράς και τοπικό σήμα με σύγκριση γωνίας.....	70
Σχήμα 3.23 Κύκλωμα R-L γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα.....	71
Σχήμα 4.1 Ταξινόμηση των μεθόδων εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.....	73
Σχήμα 4.2 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος με υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης στο τοπικό άκρο μέτρησης.....	75
Σχήμα 4.3 Γραφική αναπαράσταση των σφαλμάτων υπολογισμού της θέσης του σφάλματος, με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο της γραμμής, συναρτήσει της αντίστασης σφάλματος και του ρεύματος φόρτισης της γραμμής πριν από το σφάλμα.....	76
Σχήμα 4.4 Εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin (αρχή της επαλληλίας) για το διαχωρισμό του ισοδύναμου κυκλώματος της εσφαλμένης γραμμής (α): κύκλωμα προ του σφάλματος (β), κύκλωμα που αντιπροσωπεύει τις μεταβολές στις τάσεις και τα ρεύματα της γραμμής λόγω του σφάλματος (superimposed component network) (γ). .....	77
Σχήμα 4.5 Σχήμα εντοπισμού της θέσης του σφάλματος με χρήση τοπικών μετρήσεων και μεταφορά της μετρούμενης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής μέσω καναλιού επικοινωνίας.....	81
Σχήμα 4.6 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με χρήση μετρήσεων από το κοινό άκρο των παράλληλων κυκλωμάτων.....	83
Σχήμα 4.7 Εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμή μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς με χρήση μετρήσεων από το τοπικό άκρο μόνο.....	84
Σχήμα 4.8 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος θεμελιώδους συχνότητας συστοιχίας SC/MOV για σειριακή αντιστάθμιση.....	85
Σχήμα 4.9 Ισοδύναμη ωμική αντίσταση (α) και χωρητική αντίδραση (β) συστοιχίας SC/MOV για διάφορους βαθμούς σειριακής αντιστάθμισης γραμμής μεταφοράς 400 kV, 300 km.....	85
Σχήμα 4.10 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς (α) χωρίς σφάλμα, (β) για σφάλμα μετά, (γ) για σφάλμα πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.....	86
Σχήμα 4.11 (α) Διαδικασία προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς, (β) επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού της θέσης του σφάλματος $d_2$ στο τμήμα της γραμμής πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.....	88
Σχήμα 4.12 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς.....	91
Σχήμα 4.13 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς.....	92

Σχήμα 4.14 Χρονική στοίχιση μη συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα γραμμής με εισαγωγή της γωνίας συγχρονισμού για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος .....	92
Σχήμα 4.15 (α) Κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς πριν από το σφάλμα. Κυκλώματα (β) θετικής, (γ) αρνητικής, (δ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα .....	93
Σχήμα 4.16 Ισοδύναμο Π κύκλωμα i-οστής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς κατά την εκδήλωση σφάλματος πριν από τη συστοιχία των SCs/MOVs .....	100
Σχήμα 5.1 Στοιχεία A, B, C, και D συναρτήσεως της απόκλισης συχνότητας $\Delta\hat{f}$ .....	109
Σχήμα 5.2 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi 50.5t)$ , $f(t)=50.5$ Hz).....	110
Σχήμα 5.3 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi 50t+2\pi t^2)$ , $f(t)=50+2t$ Hz) .....	111
Σχήμα 5.4 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi 50t-\cos(4\pi t))$ , $f(t)=50+2\sin(4\pi t)$ Hz).112	112
Σχήμα 5.5 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}_{13}$ . (β) Εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}_1$ . (Σήμα εισόδου: $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1 \cos(6\pi 49.5t)$ , $f(t) = 49.5$ Hz).....	117
Σχήμα 5.6 (α)-(β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις $\hat{f}_{13}$ και $\hat{f}_1$ αντίστοιχα. (Σήμα εισόδου: $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1 \cos(6\pi 49.5t)$ , $f(t) = 49.5$ Hz).....	118
Σχήμα 5.7 (α)-(β) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη όπως υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις $\hat{f}_{13}$ και $\hat{f}_1$ αντίστοιχα (Σήμα εισόδου: $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1 \cos(6\pi 49.5t)$ , $f(t) = 49.5$ Hz).....	119
Σχήμα 5.8 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}_{135}$ . (β) Εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}_1$ . (γ) Εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}_{13}$ . (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi(50t-t^2))+0.15\cos(6\pi(50t-t^2))+0.03\cos(10\pi(50t-t^2))$ , $f(t)=50-2t$ Hz).....	119
Σχήμα 5.9 (α)-(γ) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις $\hat{f}_{135}$ , $\hat{f}_1$ και $\hat{f}_{13}$ αντίστοιχα (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi(50t-t^2))+0.15\cos(6\pi(50t-t^2))+0.03\cos(10\pi(50t-t^2))$ , $f(t)=50-2t$ Hz) .....	120
Σχήμα 5.10 (α)-(γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις $\hat{f}_{135}$ , $\hat{f}_1$ και $\hat{f}_{13}$ αντίστοιχα (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi(50t-t^2))+0.15\cos(6\pi(50t-t^2))+0.03\cos(10\pi(50t-t^2))$ , $f(t)=50-2t$ Hz) .....	120
Σχήμα 5.11 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις $\hat{f}_1$ και $\hat{f}_{13}$ αντίστοιχα. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο που χρησιμοποιεί τις $\hat{f}_1$ και $\hat{f}_{13}$ αντίστοιχα. (Σήμα εισόδου: $x(t)=\cos(2\pi 49.5t)+0.1\cos(6\pi 49.5t)$ , με SNR=60 dB).....	121
Σχήμα 6.1 Τύπος πυλώνα γραμμής μεταφοράς δύο κυκλωμάτων .....	124
Σχήμα 6.2 Ακολουθιακά κυκλώματα ιδιοσυνιστωσών γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος.....	127
Σχήμα 6.3 Προτεινόμενη διάταξη μετρήσεων για τον εντοπισμό της θέσης σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος .....	128
Σχήμα 6.4 Ισοδύναμο Π κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος.....	129
Σχήμα 6.5 Ισοδύναμο Π δίκτυο των αποζευγμένων ακολουθιακών κυκλωμάτων .....	131
Σχήμα 6.6 Αντιστάσεις σφάλματος στο σημείο του σφάλματος F .....	137
Σχήμα 7.1 Απεικόνιση του προτεινόμενου σχήματος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων .....	145

Σχήμα 7.2	Ισοδύναμο Π κύκλωμα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος πριν την εκδήλωση του σφάλματος.....	145
Σχήμα 7.3	Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος.....	146
Σχήμα 7.4	Προτεινόμενος αλγόριθμος διάκρισης μεταξύ συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων...	149
Σχήμα 7.5	Πιθανές λύσεις για τη γωνία συγχρονισμού $\delta$ για ένα τριφασικό σφάλμα με $R_F = 10 \Omega$ στο 80% του μήκους της γραμμής.....	157
Σχήμα 7.6	Διαδικασία υπολογισμού στατιστικών ιδιοτήτων ως προς τη θέση του σφάλματος λόγω της ύπαρξης τυχαίων σφαλμάτων μέτρησης με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo.....	163
Σχήμα 7.7	Κατανομή των εκτιμήσεων για τη θέση του σφάλματος σε περίπτωση ανακρίβειας των μετρήσεων.....	163
Σχήμα 8.1	Απεικόνιση του προτεινόμενου σχήματος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων.....	166
Σχήμα 8.2	Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής και (γ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων κατά το σφάλμα.....	167
Σχήμα 8.3	Ονομαστικό Π κύκλωμα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων κατά το σφάλμα.....	170
Σχήμα 8.4	Γεωμετρική διάταξη πυλώνων και τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγών γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος 400 kV.....	172
Σχήμα 8.5	Επίδραση των κατανεμημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος (πραγματική θέση του σφάλματος: 20% του μήκους της γραμμής, κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: Π, αντίσταση σφάλματος $R_F: 10 \Omega$ ) – (α) μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, (β) διφασικά σφάλματα, (γ) διφασικά ως προς γη σφάλματα, (δ) τριφασικά σφάλματα.....	177
Σχήμα 8.6	Επίδραση των κατανεμημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος (πραγματική θέση του σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: Π, αντίσταση σφάλματος $R_F: 10 \Omega$ ) – (α) μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, (β) διφασικά σφάλματα, (γ) διφασικά ως προς γη σφάλματα, (δ) τριφασικά σφάλματα.....	178
Σχήμα 8.7	Διαδικασία υπολογισμού στατιστικών ιδιοτήτων ως προς τη θέση του σφάλματος λόγω της επίδρασης των σφαλμάτων μέτρησης με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo.....	181
Σχήμα 8.8	Κατανομή των εκτιμώμενων θέσεων σφάλματος σε περίπτωση ανακρίβειας των μετρήσεων.....	182
Σχήμα 8.9	Τυπική απόκλιση των εκτιμώμενων θέσεων σφάλματος ως συνάρτηση της πραγματικής θέσης του σφάλματος και της αντίστασης σφάλματος για διάφορα σφάλματα μέτρησης. (α), (β) $\sigma_m=4\%$ (για εσφαλμένες φάσεις), $\sigma_m=2\%$ (για υγιείς φάσεις), $\sigma_a=4^\circ$ (για εσφαλμένες φάσεις) και $\sigma_a=2^\circ$ (για υγιείς φάσεις). (γ), (δ) $\sigma_m=5\%$ (για εσφαλμένες φάσεις), $\sigma_m=3\%$ (για υγιείς φάσεις), $\sigma_a=5^\circ$ (για εσφαλμένες φάσεις) και $\sigma_a=3^\circ$ (για υγιείς φάσεις). (α), (γ) $R_F=10 \Omega$ . (β), (δ) $R_F=100 \Omega$ .....	183
Σχήμα 9.1	Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς.....	186
Σχήμα 9.2	Λογική ανίχνευσης του τύπου σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς: (α) σύνθεση διαφορικών στοιχείων φάσεων με χρήση συγχρονισμένων φασιθετών εντάσεων, (β) λογική ανίχνευσης σφαλμάτων που εμπλέκουν ένα μόνο κύκλωμα της διπλής γραμμής, (γ) λογική ανίχνευσης σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής.....	188
Σχήμα 9.3	Ισοδύναμο Π δίκτυα των αποξενωμένων ακολουθιακών κυκλωμάτων γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος: (α) για σφάλμα πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, (β) για σφάλμα μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.....	189
Σχήμα 9.4	Μοντέλα μετασχηματιστών μέτρησης στο πρόγραμμα ATP/EMTP (α) ΜΕ, (β) χωρητικός ΜΤ.....	198
Σχήμα 9.5	Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα ΙΑΠΒΓ: (α)-(ε) καταγραφές κυματομορφών των μετρούμενων σημάτων εισόδου στον εντοπιστή σφαλμάτων, (στ)-(η) στοιχεία της λογικής ανίχνευσης του τύπου σφάλματος.....	199

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 Κλάσεις ακριβείας χωρητικών ΜΤ.....	51
Πίνακας 4.1 Φασικές τάσεις και εντάσεις για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης $Z_{FL}$ .....	78
Πίνακας 4.2 Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών της (4.7) για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης $Z_{FL}$ .....	78
Πίνακας 4.3 Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών για το συνολικό ρεύμα σφάλματος $I_F$ που προκύπτουν με μερική απαλοιφή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας $I_{F0}$ .....	81
Πίνακας 4.4 Φασικές τάσεις και εντάσεις για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης $Z_{FL}$ σε γραμμές διπλού κυκλώματος.....	82
Πίνακας 4.5 Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών της (4.22) για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης $Z_{FL}$ σε γραμμές διπλού κυκλώματος.....	82
Πίνακας 6.1 Συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αγνώστων μεταβλητών $I_{sf0\_II}$ και $I_{sf0\_I}$ .....	136
Πίνακας 6.2 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz στο ATP/EMTP .....	139
Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος στη γραμμή διπλού κυκλώματος των 400 kV (η ισοδύναμη πηγή στο S προπορεύεται αυτής στο R κατά 30 <sup>0</sup> ).....	140
Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος στη γραμμή διπλού κυκλώματος των 400 kV (η ισοδύναμη πηγή στο S προπορεύεται αυτής στο R κατά 45 <sup>0</sup> ).....	140
Πίνακας 7.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz .....	152
Πίνακας 7.2 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα.....	153
Πίνακας 7.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα.....	154
Πίνακας 7.4 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα .....	154
Πίνακας 7.5 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα.....	155
Πίνακας 7.6 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά προς γη σφάλματα.....	155
Πίνακας 7.7 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά προς γη σφάλματα.....	156
Πίνακας 7.8 Εφικτές εκτιμήσεις της θέσης του σφάλματος για ένα τριφασικό σφάλμα με $R_F = 10 \Omega$ στο 80% του μήκους της γραμμής μεταφοράς.....	157
Πίνακας 7.9 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.).....	158
Πίνακας 7.10 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.).....	158
Πίνακας 7.11 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά ως προς γη σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.) .....	158
Πίνακας 7.12 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 $\Omega$ ).....	159
Πίνακας 7.13 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 $\Omega$ ).....	159
Πίνακας 7.14 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S και R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 $\Omega$ ).....	160
Πίνακας 7.15 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2% στο μέτρο των μετρούμενων τάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα .....	161
Πίνακας 7.16 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2 <sup>0</sup> στη γωνία των μετρούμενων τάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα .....	161
Πίνακας 7.17 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2% στο μέτρο των μετρούμενων εντάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα .....	162

Πίνακας 7.18 Επίδραση συστηματικού σφάλματος $2^0$ στη γωνία των μετρούμενων εντάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα .....	162
Πίνακας 7.19 Περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος (αντίσταση σφάλματος $R_F$ : 10 Ω).....	164
Πίνακας 8.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz .....	173
Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος μέσω της προτεινόμενης μεθόδου (κύκλωμα διπλής γραμμής: Π, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω).....	174
Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα εκτίμησης της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου (κύκλωμα διπλής γραμμής: Π, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω).....	175
Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για μεταβολές της αντίστασης σφάλματος (κύκλωμα διπλής γραμμής: Π).....	176
Πίνακας 8.5 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω) .....	178
Πίνακας 8.6 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω) .....	179
Πίνακας 8.7 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S και R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω).....	179
Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος και της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για ενδοκυκλωματικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 20% του μήκους της γραμμής).....	179
Πίνακας 8.9 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος και της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για ενδοκυκλωματικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής).....	180
Πίνακας 8.10 Περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος (κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: Π, αντίσταση σφάλματος $R_F$ : 10 Ω) .....	182
Πίνακας 9.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz στο ATP/EMTP .....	197
Πίνακας 9.2 Επίδραση της θέσης του σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου .....	200
Πίνακας 9.3 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου .....	200
Πίνακας 9.4 Επίδραση της γωνίας έναυσης του σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου .....	200
Πίνακας 9.5 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου	201
Πίνακας 9.6 Επίδραση του βαθμού αντιστάθμισης στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου .....	201

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

<b>ADC</b>	Analog-to-Digital Converter
<b>AFSC</b>	Anti-Ferroresonance Supression Circuit
<b>CT</b>	Current Transformer
<b>CVT</b>	Capacitive Voltage Transformer
<b>DFR</b>	Digital Fault Recorder
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>FIR</b>	Finite Impulse Response
<b>FL</b>	Fault Locator
<b>FLA</b>	Fault Location Algorithm
<b>FSC</b>	Fixed Series Capacitor
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HCFT</b>	Half-Cycle Fourier Transform
<b>IIR</b>	Infinite Impulse Response
<b>MOV</b>	Metal-Oxide Varistor
<b>PMU</b>	Phasor Measurement Unit
<b>SC</b>	Series Capacitor
<b>SCADA</b>	Supervisory Control and Data Acquisition
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>TCSC</b>	Thyristor Controlled Series Capacitor
<b>VT</b>	Voltage Transformer
<b>H/N</b>	Ηλεκτρονόμος Προστασίας
<b>MA</b>	Μετασχηματιστής Απομόνωσης
<b>ME</b>	Μετασχηματιστής Έντασης
<b>MT</b>	Μετασχηματιστής Τάσης



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), που ποικίλλουν σε μέγεθος και πολυπλοκότητα, βρίσκονται διαρκώς εκτεθειμένα σε βλάβες και αστοχίες των στοιχείων τους (π.χ. γεννήτριες, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές, κινητήρες κτλ.) που μπορεί να προέρχονται είτε από εξωτερικά (π.χ. κεραυνοί, χιονοπτώσεις, ανεμοθύελλες, πτώσεις δένδρων και παρεμβολή ζώων σε αγωγούς κτλ.) είτε από εσωτερικά αίτια (π.χ. γήρανση μονώσεως κτλ.). Οι βλάβες αυτές συνήθως προκαλούν βραχυκυκλώματα που εκδηλώνονται άμεσα ή εξελίσσονται σταδιακά. Σε κάθε τέτοια περίπτωση το στοιχείο του ΣΗΕ, που έχει υποστεί τη βλάβη, πρέπει να απομονωθεί το ταχύτερο ώστε: (α) να περιοριστεί κατά το δυνατόν η βλάβη του στοιχείου, (β) να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις στο υπόλοιπο σύστημα, και ιδιαίτερα να αποφευχθεί η θέση εκτός λειτουργίας και άλλων στοιχείων αυτού, (γ) να αποφευχθεί η δημιουργία επικίνδυνων καταστάσεων για φυσικά πρόσωπα (π.χ. ηλεκτροπληξιών) ή πράγματα (π.χ. πυρκαγιών). Επιπλέον, είναι γνωστό ότι κάθε υπέρβαση των χαρακτηριστικών μεγεθών των στοιχείων ενός ΣΗΕ (π.χ. της τάσης) ή της ικανότητας φορτίσεώς τους, μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη τους.

Ο ρόλος των διατάξεων προστασίας (π.χ. ηλεκτρονόμων (H/N), διακοπών ισχύος (Δ/Ι), ασφαλειών κτλ.) ενός ΣΗΕ συνίσταται στο να προλάβουν μια βλάβη ή, εάν για τον οποιοδήποτε λόγο συμβεί ένα σφάλμα, να περιορίσουν κατά το δυνατόν περισσότερο τις επιπτώσεις του στο υπόλοιπο δίκτυο [265]. Την ίδια στιγμή, ο γρήγορος και ακριβής εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς ή διανομής ηλεκτρικής ενέργειας επιταχύνει σημαντικά το χρόνο αποκατάστασης των ΣΗΕ, μειώνει τη διάρκεια διακοπών της παρεχόμενης ισχύος προς τους καταναλωτές, και, γενικά, βελτιώνει την αξιοπιστία των ΣΗΕ [126], [208]. Αναγνωρίζοντας τη σπουδαιότητα των παραγόντων αυτών για τις εταιρείες ηλεκτρισμού, παρατηρείται τα τελευταία χρόνια ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων, γεγονός που έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας που ασχολείται με την προστασία των Σ.Η.Ε και στην περιοχή αυτή της έρευνας.

Οι βασικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στους εντοπιστές σφαλμάτων αποσκοπούν στο να υπολογίσουν τη θέση του σφάλματος με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Οι εντοπιστές σφαλμάτων σχετίζονται άμεσα με τους H/N προστασίας. Ειδικότερα, οι H/N αποστάσεως που χρησιμοποιούνται για την προστασία των γραμμών μεταφοράς παρέχουν μια γρήγορη και, συνήθως, αξιόπιστη ένδειξη για την περιοχή γύρω από την οποία έχει εκδηλωθεί το σφάλμα, αλλά δεν είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να προσδιορίζουν την ακριβή θέση του. Επιπλέον, οι H/N αποστάσεως και οι εντοπιστές σφαλμάτων επεξεργάζονται τα ίδια σήματα τάσεων και εντάσεων, που λαμβάνονται μέσω των μετασχηματιστών μέτρησης στα σημεία σύνδεσής τους με τις γραμμές μεταφοράς. Ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό γνώρισμα κάθε σχήματος προστασίας. Η γρήγορη εύρεση του σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς μειώνει το χρόνο επανένταξης της γραμμής σε λειτουργία και, συνεπώς, συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος. Για το λόγο αυτό, τα δύο αντικείμενα – προστασία και εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς - είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Υπάρχουν, όμως, διαφορετικές απαιτήσεις που οδηγούν σε διαφορετικές λύσεις ανά περίπτωση. Έτσι, οι αλγόριθμοι προστασίας σε γραμμές μεταφοράς στοχεύουν, κυρίως, στο να διαγνώσουν όσο το δυνατό πιο γρήγορα τα σφάλματα που εκδηλώνονται στις γραμμές και να εκκινήσουν τη διαδικασία εκκαθάρισής τους. Για το λόγο αυτό, εκτελούνται σε πραγματικό χρόνο στους H/N αποστάσεως, γεγονός που επιβάλλει γρήγορους και απλούς υπολογισμούς. Από την άλλη, οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων απαιτούν πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούν πολύ πιο περίπλοκες διαδικασίες υπολογισμού, γεγονός που συνήθως επιβάλλει την εκτέλεσή τους offline με χρήση δεδομένων μέτρησης από καταγραφές σφαλμάτων.

Παρά τις μέχρι τώρα προσπάθειες που έχουν γίνει σε ερευνητικό επίπεδο, η ανάπτυξη αξιόπιστων και υψηλής ακριβείας αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση. Αυτό οφείλεται στα ποικίλα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάζονται στην πράξη, και τα οποία έχουν σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεριφορά των υπαρχόντων αλγορίθμων. Συνεπώς, η έρευνα

στην περιοχή της προστασίας των ΣΗΕ που αφορά τον εντοπισμό σφαλμάτων παραμένει ελκυστική και εξελίσσεται διαρκώς ώστε να υπάρξει μια καλύτερη κατανόηση της ουσίας του προβλήματος και να αναπτυχθούν νέες προηγμένες λύσεις.

## 1.1 Συμβολή – Δομή της διατριβής

Οι περισσότεροι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων, που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα, αναφέρονται κυρίως σε γραμμές μεταφοράς. Αυτό οφείλεται στο ότι τα σφάλματα στο σύστημα μεταφοράς μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία ολόκληρου του ΣΗΕ και στο ότι ο χρόνος που απαιτείται για τη φυσική εξέταση των γραμμών μεταφοράς είναι κατά πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με αυτόν που απαιτείται για τις γραμμές υπομεταφοράς και διανομής, λόγω του μεγάλου μήκους τους και των δυσκολιών προσβασιμότητας στις περιοχές που αυτές εκτείνονται. Τελευταία, λόγω της μεγάλης διείσδυσης διεσπαρμένης παραγωγής στα συστήματα υπομεταφοράς και διανομής, ο εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμές υπομεταφοράς και διανομής έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών ([40], [63], [200]). Ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητάς τους και των δυσκολιών που προκαλούνται από την ανομοιογένεια των γραμμών διανομής, την αβεβαιότητα των φορτίων και της ασυμμετρίας των φάσεων.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη καινοτόμων αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συγχρονισμένων ή μη μετρήσεων σε κάθε άκρο των γραμμών. Ως κριτήρια απόδοσης των αλγορίθμων, που τους διαφοροποιούν σημαντικά από τις υπάρχουσες μεθόδους, ορίζονται: α) η ακρίβεια των δεδομένων μέτρησης που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου, β) η εξάλειψη των παραμέτρων που ορίζονται από το χρήστη ή λαμβάνονται από εξωτερικές πηγές (π.χ. H/N, SCADA), και μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων (π.χ. ηλεκτρικές παράμετροι των γραμμών, παράμετροι των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα των γραμμών, μοντέλο της διάταξης αντιστάθμισης σε γραμμές με χωρητική αντιστάθμιση σειράς, τύπος του σφάλματος κ.τ.λ.), γ) η ακρίβεια του μοντέλου αναπαράστασης των γραμμών μεταφοράς, π.χ. αν πρόκειται για γραμμές μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μήκους, δ) ο περιορισμός του όγκου των δεδομένων μέτρησης που πρέπει να μεταφερθούν από τα άκρα των γραμμών, προκειμένου να αποσυμφορηθούν τα κανάλια επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό.

Με βάση τα παραπάνω κριτήρια, στην παρούσα διατριβή, αναπτύσσονται επιτυχώς και παρουσιάζονται λεπτομερώς προηγμένοι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων) και γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, με ή χωρίς χωρητική αντιστάθμιση σειράς, μικρού ή μεγάλου μήκους κ.τ.λ.). Επιπλέον, αναπτύσσεται μια νέα μέθοδος υπολογισμού των φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων, που λαμβάνονται ως δεδομένα εισόδου στις παραπάνω μεθόδους, όταν η συχνότητα του συστήματος μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή:

- 1) Αναπτύσσεται μια καινοτόμος μέθοδος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων των φασικών τάσεων και εντάσεων στα άκρα τους [13]. Η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί τη χρήση των ηλεκτρικών παραμέτρων των γραμμών, γεγονός που την καθιστά πολύ ελκυστική σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους, οι οποίες λαμβάνουν ως δεδομένα εισόδου τις παραμέτρους αυτές, θεωρώντας ότι έχουν υπολογιστεί σωστά και ότι είναι γνωστές εκ των προτέρων. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για γραμμές με πλήρη όσο και χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, σε αντίθεση με τις υπάρχουσες μεθόδους οι οποίες θεωρούν ότι οι γραμμές μεταφοράς είναι πλήρως συμμετρικές, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούν αποκλειστικά τη θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών. Τέλος, η πειραματική επαλήθευση της μεθόδου καταδεικνύει ότι η μέθοδος παρέχει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη θέση του σφάλματος, χωρίς η ακρίβεια της να επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα των γραμμών και τις συνθήκες του σφάλματος (π.χ. τύπος, αντίσταση, γωνία έναυσης του σφάλματος). Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος δεν είναι αρκετά ευαίσθητη στα σφάλματα των μετρήσεων.

- 2) Μελετάται μια νέα μέθοδος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων των εντάσεων θετικής ακολουθίας στα άκρα τους [15]. Η προτεινόμενη μέθοδος, όπως και η προαναφερθείσα που αφορά την περίπτωση γραμμών απλού κυκλώματος, δεν απαιτεί τη χρήση των ηλεκτρικών παραμέτρων των γραμμών. Όμως, στην περίπτωση των γραμμών διπλού κυκλώματος προστίθενται επιπλέον οι ηλεκτρικές παράμετροι που σχετίζονται με την αμοιβαία σύζευξη των δύο παράλληλων κυκλωμάτων, γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαιότητα της μεθόδου. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε γραμμές με πλήρη όσο και χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος πραγματοποιείται με χρήση ελαχίστων δεδομένων μέτρησης από τα δύο αντίθετα άκρα των διπλών γραμμών, ενώ η ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος που επιτυγχάνεται είναι πολύ μεγάλη.
- 3) Παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος [138], η οποία βασίζεται στο μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους και χρησιμοποιεί ελάχιστο αριθμό μη συγχρονισμένων μετρήσεων των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων σε δύο αντι-παράλληλα τερματικά σημεία των γραμμών. Η μέθοδος είναι κατάλληλη κυρίως για γραμμές διπλού κυκλώματος μεγάλου μήκους, ενώ η ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος που επιτυγχάνεται είναι πολύ μεγάλη ακόμα και για σφάλματα που εμπλέκουν φάσεις και στα δύο κυκλώματα της γραμμής.
- 4) Γίνεται ανάπτυξη μεθόδου για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με ελεγχόμενη ή σταθερής χωρητικότητας αντιστάθμιση σειράς [12]. Ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος πραγματοποιείται με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων των ακολουθιακών εντάσεων στα δύο άκρα των γραμμών, ενώ απαιτείται επιπλέον και η μέτρηση των ακολουθιακών τάσεων σε ένα εκ των δύο άκρων. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτείται η γνώση του ακριβούς μοντέλου της διάταξης αντιστάθμισης, πράγμα που συνεπάγεται ότι αποφεύγονται τυχόν σφάλματα που υπεισέρχονται από τη μη λεπτομερή αναπαράσταση της διάταξης στον αλγόριθμο εντοπισμού σφαλμάτων και από τυχόν ανακρίβειες των παραμέτρων της. Επιπλέον, η μαθηματική θεμελίωση της μεθόδου γίνεται με χρήση του μοντέλου γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη και για γραμμές μεγάλου μήκους. Η ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος που επιτυγχάνεται είναι αρκετά ικανοποιητική.
- 5) Παρουσιάζεται μια νέα βελτιωμένη μέθοδος εκτίμησης των φασιστετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων [16], που αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για τις προαναφερθείσες μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων, μέσω ψηφιακών φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης ορθογώνιων μεταξύ τους (orthogonal FIR filters), όταν μεταβάλλεται η συχνότητα του συστήματος.

Η δομή της παραπάνω διατριβής είναι η ακόλουθη:

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 παρουσιάζονται όλοι οι πιθανοί τύποι γραμμών μεταφοράς που απαντώνται στα σύγχρονα ΣΗΕ καθώς και τα μοντέλα αναπαράστασής τους, που χρησιμοποιούνται στους αλγόριθμους εντοπισμού σφαλμάτων.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παρουσιάζονται τα στάδια μέτρησης των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων καθώς και οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας που εφαρμόζονται στα σήματα εισόδου, προκειμένου να εκτιμηθούν κρίσιμες παράμετροι για την εύρεση της θέσης του σφάλματος (π.χ. φασιστέτες θεμελιώδους συχνότητας των σημάτων εισόδου, ηλεκτρικές παράμετροι του τμήματος της γραμμής μεταφοράς που εμπλέκεται στο σφάλμα κτλ.). Επιπλέον, αναλύεται η επίδραση κάθε σταδίου μέτρησης στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων ως προς τη θέση του σφάλματος.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 παρατίθεται λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα. Αναλύονται αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης από ένα μόνο ή περισσότερα τερματικά σημεία γραμμών απλού και διπλού κυκλώματος, καθώς και γραμμών με αντιστάθμιση σειράς, και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος υπολογισμού των φασιθετών θεμελιώδους συχνότητας των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων και στους H/N προστασίας όταν μεταβάλλεται η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος. Η μέθοδος βασίζεται στη διόρθωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, υπολογιζόμενου στη θεμελιώδη συχνότητα, και από άλλα ζεύγη ορθογωνίων φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης, με χρήση μιας ακριβούς εκτίμησης της στιγμιαίας συχνότητας των σημάτων εισόδου. Παρατίθενται πολλά αποτελέσματα προσομοιώσεων που καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές διπλού κυκλώματος με χρήση περιορισμένου αριθμού μη συγχρονισμένων μετρήσεων από δύο αντιπαράλληλα τερματικά σημεία των γραμμών. Η μαθηματική θεμελίωση της μεθόδου γίνεται με χρήση ενός μετασχηματισμού ρυθμών που αποζευγνύει τα αμοιβαία συζευγμένα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας των διπλών γραμμών και επιτρέπει την ανάπτυξη ισοδυνάμων  $\Pi$  κυκλωμάτων για κάθε νέα ιδιοσυνιστώσα της διπλής γραμμής. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου, τα οποία προκύπτουν από λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων στο ATP/EMTP, παρατίθενται και σχολιάζονται.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 παρουσιάζεται μια καινοτόμος μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, η οποία δε χρησιμοποιεί τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών ως δεδομένα εισόδου. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί μη συγχρονισμένες μετρήσεις των φασικών τάσεων και εντάσεων σε κάθε άκρο των γραμμών. Τα αποτελέσματά της, που προκύπτουν από λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων στο ATP/EMTP, παρατίθενται και αξιολογούνται.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 παρουσιάζεται μια καινοτόμος μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, η οποία δε χρησιμοποιεί τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών ως δεδομένα εισόδου. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί μη συγχρονισμένες μετρήσεις των εντάσεων θετικής ακολουθίας σε κάθε άκρο των γραμμών. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται και σχολιάζονται αποτελέσματα που προκύπτουν από λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων στο ATP/EMTP.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς. Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων από κάθε άκρο των γραμμών και δεν εξαρτάται από το μοντέλο της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται και σχολιάζονται αποτελέσματα που προκύπτουν από λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων στο ATP/EMTP.

Το ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10 αποτελεί μια σύννοχη των θεμάτων που πραγματεύεται η διατριβή. Συγκεντρώνονται και παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα προηγούμενα κεφάλαια και διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις αναφορικά με τα σημεία στα οποία προτείνεται να επικεντρωθεί η μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11 παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 2.1 Εισαγωγή

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα ΣΗΕ εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως τον τρόπο κατασκευής των γραμμών (π.χ. εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια, τον τύπο και τα φυσικά χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιούνται, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των γραμμών κτλ.), το επίπεδο της τάσης λειτουργίας (π.χ. μέση, υψηλή ή υπερυψηλή), τον αριθμό των κυκλωμάτων και τη διάταξη των τριφασικών γραμμών (π.χ. γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος, γραμμές τριών ή περισσότερων τερματικών σημείων, γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις κτλ.), τη χωρητική αντίσταση σειράς κτλ. Όλες αυτές οι λεπτομέρειες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων αναπαράστασης των γραμμών μεταφοράς, τόσο κατά τη μόνιμη, όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Τα μοντέλα αυτά σε συνδυασμό με τις σχετικές διαδικασίες μέτρησης, που αναπτύσσονται στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3, αποτελούν τα βασικά συστατικά των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων. Στο Κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια συνοπτική παρουσίαση των διαφορετικών τύπων γραμμών μεταφοράς και των αντίστοιχων μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στους αλγορίθμους εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.

#### 2.2 Τύποι εναέριων γραμμών μεταφοράς

##### 2.2.1 Γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος

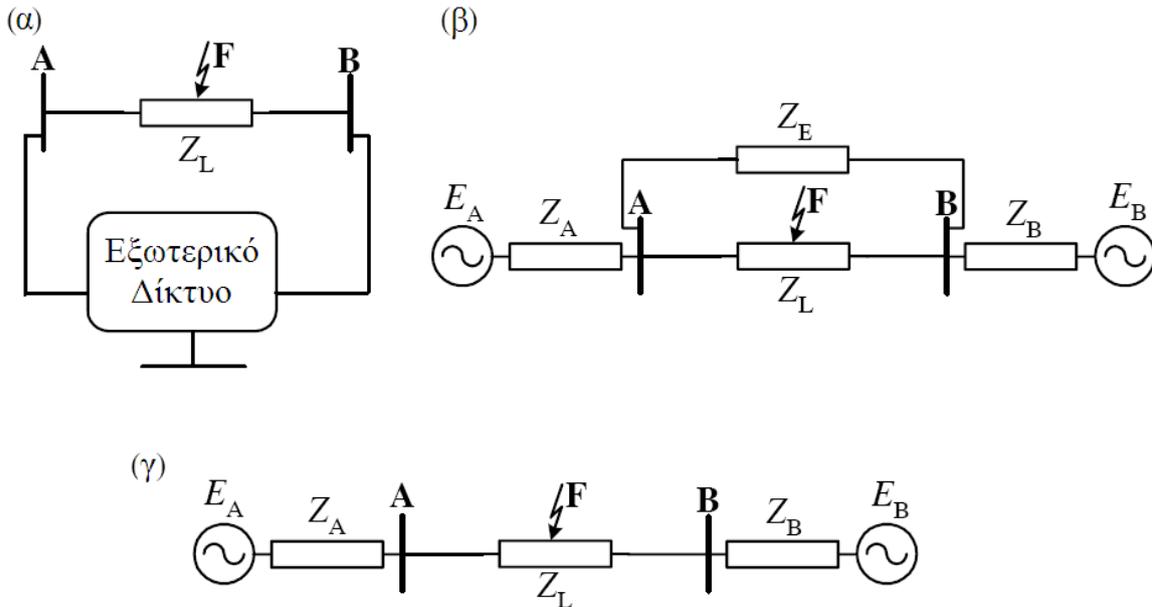
Οι εναέριες τριφασικές γραμμές απλού κυκλώματος αποτελούν τα απλούστερα μέσα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης ενός ΣΗΕ. Στο Σχήμα 2.1(α) παρουσιάζεται το σχηματικό διάγραμμα ενός ηλεκτρικού δικτύου με μια γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος, όπου  $Z_L$  είναι η σύνθετη αντίσταση της γραμμής, Α και Β είναι τα τερματικά σημεία (άκρα) της γραμμής, και F αντιπροσωπεύει το σφάλμα που εκδηλώνεται κατά μήκος της γραμμής. Το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου - πλην της θεωρούμενης γραμμής μεταφοράς Α-Β - αναπαρίσταται από ένα εξωτερικό δίκτυο (Σχήμα 2.1(β)), το οποίο στη γενική περίπτωση αποτελείται από:

- Δύο ισοδύναμες πηγές πίσω από τα άκρα Α και Β της γραμμής, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τις αντίστοιχες ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις ( $E_A, E_B$ ) και τις σύνθετες αντιστάσεις ( $Z_A, Z_B$ ) τους.
- Μία επιπλέον σύνδεση σύνθετης αντίστασης,  $Z_E$ , στα άκρα Α και Β της γραμμής.

Από τη στιγμή που η συνολική παραγωγή και το φορτίο σε ένα ΣΗΕ υπόκεινται διαρκώς σε αυξομειώσεις, το εξωτερικό δίκτυο της γραμμής μεταφοράς δε μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Συνέπεια αυτού είναι οι σύνθετες αντιστάσεις των ισοδύναμων πηγών στα άκρα της γραμμής να αποτελούν παραμέτρους αβεβαιότητας. Για το λόγο αυτό, οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που δεν χρησιμοποιούν τις σύνθετες αντιστάσεις των ισοδύναμων πηγών στα άκρα των γραμμών, είναι γενικά πιο ακριβείς σε σχέση με αυτούς που θεωρούν τις τιμές των παραμέτρων αυτών ως δεδομένα εισόδου. Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται σε μετρήσεις μόνο από το τοπικό άκρο μιας γραμμής μεταφοράς, απαιτούν συχνά τη χρήση των ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής, οι οποίες εξαιτίας των δυναμικών μεταβολών του ηλεκτρικού δικτύου είναι πρακτικά αδύνατο να είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια. Στις περισσότερες εφαρμογές αρκεί να δοθούν κάποιες ενδεικτικές τιμές για τις σύνθετες αντιστάσεις των ισοδύναμων πηγών, που αντιπροσωπεύουν τις πιο συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του

ηλεκτρικού δικτύου. Πιθανές αποκλίσεις μεταξύ των τιμών αυτών και των πραγματικών δεν προκαλούν σημαντικά προβλήματα στην ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του σφάλματος. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στην περίπτωση ισχυρών ισοδύναμων δικτύων, όπου η σύνθετη αντίσταση της πηγής είναι αρκετά μικρή σε σχέση με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Αν η γραμμή μεταφοράς  $Z_L$  αποτελεί το μοναδικό τρόπο σύνδεσης των άκρων A και B, τότε η επιπλέον σύνδεση  $Z_E$  δεν υφίσταται και, συνεπώς, απομένουν μόνο οι ισοδύναμες πηγές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(γ). Αυτό είναι το γνωστό μοντέλο δύο μηχανών.



**Σχήμα 2.1** Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταφοράς με μία γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος: (α) γενική περίπτωση, (β) γενικευμένο ισοδύναμο κύκλωμα, (γ) απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα με τη γραμμή μεταφοράς ως τη μοναδική σύνδεση μεταξύ των ζυγών A και B

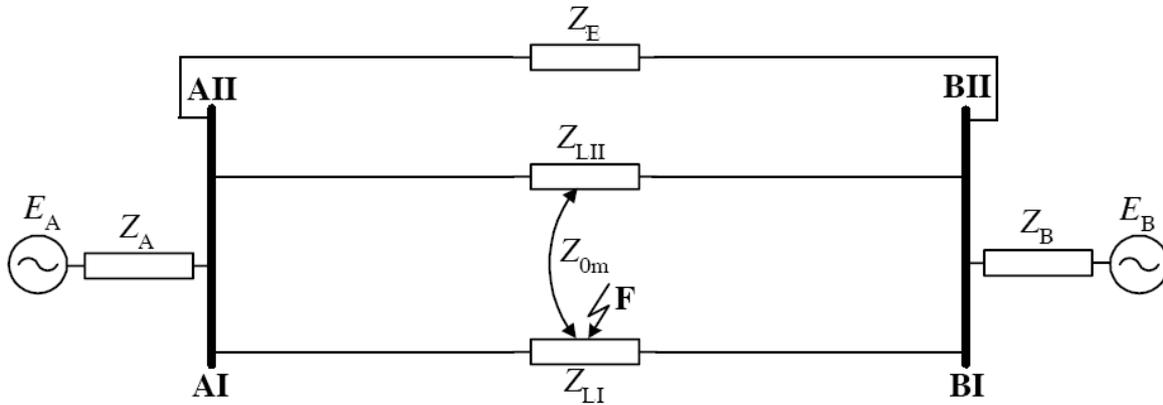
### 2.2.2 Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος (ή διαφορετικά διπλές γραμμές) έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας, λόγω των ιδιοτήτων που εμφανίζουν τόσο στην προστασία όσο και στην εύρεση της θέσης του σφάλματος ([5], [30], [54], [60], [70], [89], [92], [95], [96], [100], [99], [104], [115], [125], [160], [161], [166], [217], [222], [223], [230], [257]). Οι γραμμές αυτές κατασκευάζονται, κατά κύριο λόγο, εξαιτίας των περιορισμών που επιβάλλονται στη χάραξη καινούργιων ζωνών διέλευσης εναέριων γραμμών. Οι γραμμές διπλού κυκλώματος αποτελούνται από δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα, παράλληλα μεταξύ τους, που τοποθετούνται στον ίδιο πυλώνα ή σε γειτονικούς πυλώνες που διέρχονται, όμως, από την ίδια ζώνη διέλευσης. Η τάση του κάθε κυκλώματος μπορεί να είναι διαφορετική. Άλλες φορές, περισσότερα από δύο κυκλώματα μπορούν να τοποθετηθούν σε ανάλογη διάταξη [260].

Λόγω της γειννίας των παράλληλων κυκλωμάτων της διπλής γραμμής, υπάρχει αμοιβαία μαγνητική σύζευξη μεταξύ τους. Η μαγνητική σύζευξη σχετίζεται με την επίδραση που έχει το ρεύμα στο ένα κύκλωμα της γραμμής στη διαμόρφωση της τάσης στο γειτονικό κύκλωμα. Συνεπώς, η τάση σε κάθε κύκλωμα της γραμμής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα που το διαρρέει.

Το φαινόμενο της αμοιβαίας σύζευξης, που παρατηρείται στις γραμμές διπλού κυκλώματος, μπορεί να εκφραστεί με βάση τις ενδοκυκλωματικές αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις των γραμμών. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία συμμετρικών συνιστωσών προκύπτει ότι οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας της γραμμής είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις αντίστοιχες σύνθετες αντιστάσεις που χαρακτηρίζουν κάθε κύκλωμα της γραμμής ξεχωριστά. Για το

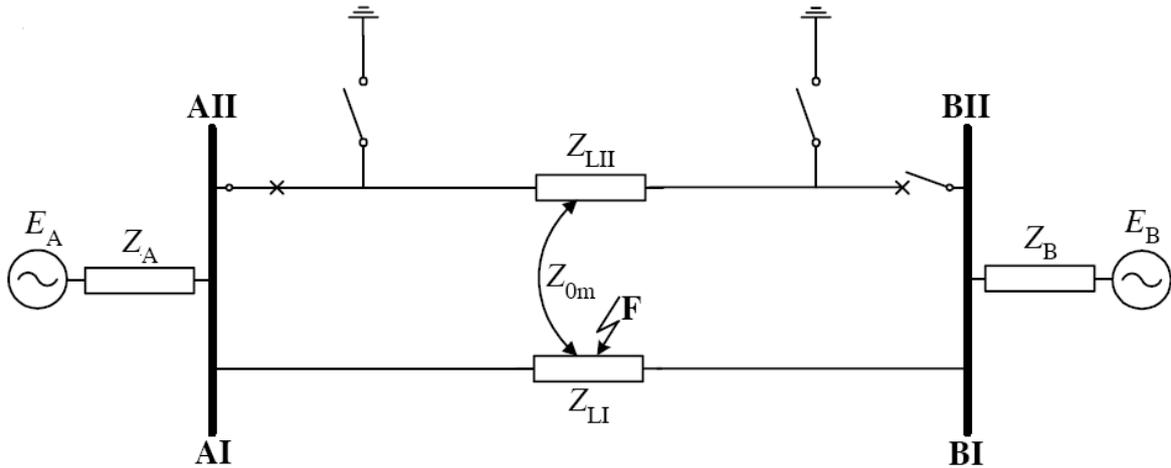
λόγο αυτό, στις περισσότερες των περιπτώσεων, οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας αμελούνται στην ανάλυση των γραμμών διπλού κυκλώματος. Αντίθετα, η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση των κυκλωμάτων μηδενικής ακολουθίας,  $Z_{0m}$ , λαμβάνει σχετικά μεγάλες τιμές, και για το λόγο αυτό δε μπορεί να αγνοηθεί κατά την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων που εμπλέκουν τη γη. Για τον ίδιο λόγο, η αμοιβαία σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας αποτελεί πολύ κρίσιμη παράμετρο για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε διπλές γραμμές [92].



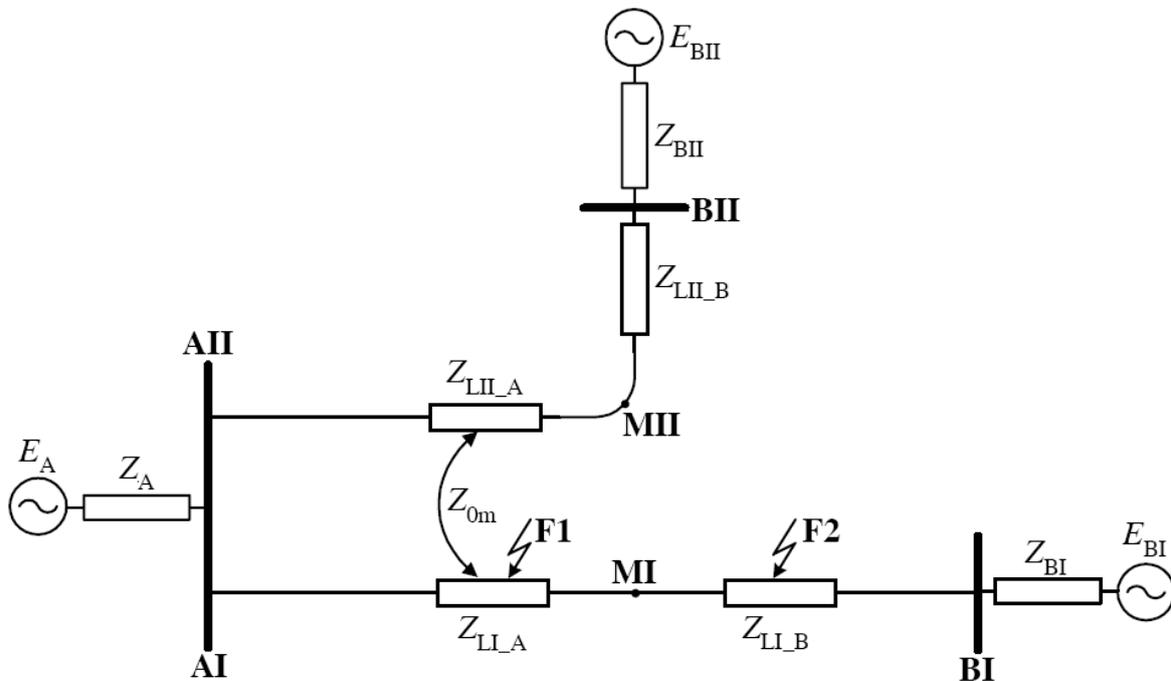
**Σχήμα 2.2** Σχηματική αναπαράσταση δικτύου μεταφοράς με μία γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Διαφορετικές διαμορφώσεις των γραμμών διπλού κυκλώματος συναντώνται στα ΣΗΕ. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η κλασική περίπτωση ενός ηλεκτρικού δικτύου με μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος, τα τερματικά σημεία της οποίας στα άκρα αναχώρησης και άφιξης βρίσκονται σε κοινούς ζυγούς. Στο Σχήμα 2.2 το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο αναπαρίσταται από δύο ισόδυναμες πηγές ( $E_A, Z_A$ ) και ( $E_B, Z_B$ ) στα κοινά άκρα Α και Β της γραμμής, αντίστοιχα, και μία εξωτερική σύνδεση, που αντιπροσωπεύει τα υπόλοιπα στοιχεία του δικτύου (γραμμές μεταφοράς, Μ/Σ) που παρεμβάλλονται μεταξύ των ζυγών Α και Β. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η εξωτερική σύνδεση μεταξύ των ζυγών Α και Β δεν υφίσταται, ιδιαίτερα σε δίκτυα υψηλής τάσης που δεν είναι αρκετά διασυνδεδεμένα. Οι συνθήκες λειτουργίας μιας γραμμής διπλού κυκλώματος μπορούν να μεταβάλλονται για διάφορους λόγους, π.χ. εξαιτίας της κατανομής του φορτίου, της απώλειας ενός κυκλώματος της γραμμής λόγω σφάλματος ή προγραμματισμένης συντήρησης κτλ. Η αμοιβαία σύζευξη των γραμμών διπλού κυκλώματος εξαρτάται από τον τρόπο λειτουργίας του υγιούς κυκλώματος  $Z_{LII}$ , όταν για παράδειγμα εκδηλωθεί σφάλμα στο παράλληλο κύκλωμα  $Z_{LI}$  των γραμμών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Προκειμένου να αναπαρασταθούν όλοι οι πιθανοί τρόποι λειτουργίας που καθορίζουν την αμοιβαία σύζευξη στις γραμμές διπλού κυκλώματος, χρησιμοποιούνται οι καταστάσεις των διακοπών και των γειωτών στα άκρα του υγιούς κυκλώματος  $Z_{LII}$  της γραμμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Η αμοιβαία σύζευξη των κυκλωμάτων μηδενικής ακολουθίας μιας διπλής γραμμής εμφανίζεται, με βάση το Σχήμα 2.3, όταν το υγιές κύκλωμα βρίσκεται σε λειτουργία (διακόπτες κλειστοί - γειωτές ανοικτοί), ή όταν βρίσκεται εκτός λειτουργίας με τα δύο άκρα του γειωμένα. Για κάθε άλλη περίπτωση, που προκύπτει από το συνδυασμό των καταστάσεων διακοπών-γειωτών στο Σχήμα 2.3, προκαλείται ασυνέχεια για το ρεύμα που διαρρέει το υγιές κύκλωμα της γραμμής και, συνεπώς, δεν παρατηρείται αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των κυκλωμάτων της.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα κυκλώματα της διπλής γραμμής μπορεί να είναι παράλληλα μόνο σε ένα τμήμα της ζώνης διέλευσης. Στο τμήμα αυτό τα δύο κυκλώματα είναι αμοιβαία συζευγμένα, όμως στο υπόλοιπο της ζώνης διέλευσης στηρίζονται σε διαφορετικούς πυλώνες και τερματίζουν σε απομακρυσμένους υποσταθμούς, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2.4. Στο Σχήμα 2.4, η επίδραση της αμοιβαίας σύζευξης των παράλληλων κυκλωμάτων εξαρτάται από το σημείο που εκδηλώνεται το σφάλμα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση σφάλματος στο σημείο F2, λαμβάνεται υπόψη η αμοιβαία σύζευξη μόνο για το τμήμα ΑΙ-ΜΙ της γραμμής και όχι για το τμήμα ΜΙ-F2.



Σχήμα 2.3 Τρόποι λειτουργίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αμοιβαία σύζευξη των παράλληλων κυκλωμάτων



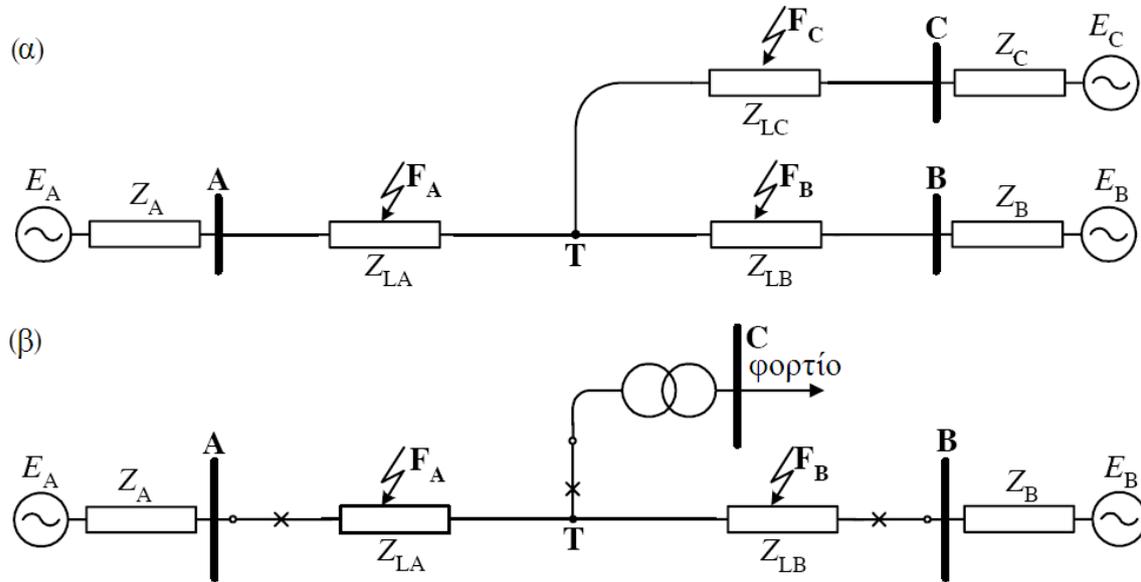
Σχήμα 2.4 Παράδειγμα δικτύου μεταφοράς με μερικώς παράλληλα κυκλώματα γραμμών μεταφοράς

### 2.2.3 Γραμμές μεταφοράς με πολλά τερματικά σημεία και γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις

Πολύ συχνά, οικονομικοί και περιβαλλοντικοί λόγοι επιβάλλουν στα σύγχρονα ΣΗΕ τη χρήση γραμμών μεταφοράς πολλών σημείων (multi-terminal lines) ή γραμμών με ενδιάμεσες λήψεις (tapped lines) [260]. Ανάλογα με τον αριθμό των τερματικών σημείων διακρίνονται γραμμές τριών, τεσσάρων ή περισσότερων σημείων. Πίσω από κάθε σημείο σύνδεσης των γραμμών αυτών θεωρείται σημαντική παραγωγή ισχύος (Σχήμα 2.5(α)). Αντίθετα, στις γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις, στα σημεία διακλάδωσης των γραμμών συνδέονται φορτία μέσω Μ/Σ ισχύος (Σχήμα 2.5(β)).

Ο εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς πολλών τερματικών σημείων ή με ενδιάμεσες λήψεις είναι αρκετά πιο δύσκολος σε σχέση με τις συμβατικές γραμμές και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια:

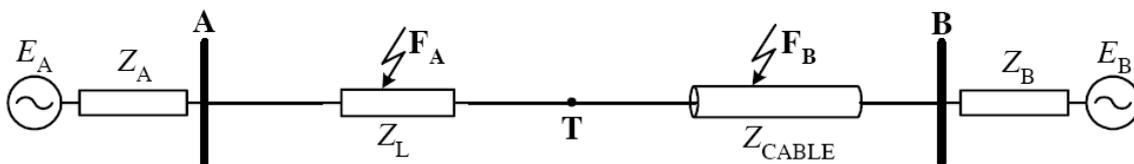
- Προσδιορισμός του τμήματος της γραμμής, στο οποίο έχει εκδηλωθεί το σφάλμα ( $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_C$ ).
- Προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος στο εσφαλμένο τμήμα της γραμμής, ανάλογα με τον αριθμό των διαθέσιμων μετρήσεων σε κάθε άκρο της.



Σχήμα 2.5 Γραμμή μεταφοράς (α) τριών σημείων (β) με ενδιάμεση λήψη

### 2.2.4 Σύνθετες γραμμές μεταφοράς

Στο Σχήμα 2.6 εικονίζεται η περίπτωση μιας σύνθετης γραμμής μεταφοράς, όπου ένα τμήμα της αποτελείται από εναέρια γραμμή και το υπόλοιπο από υπόγειο καλώδιο. Ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμές τέτοιου τύπου είναι εξαιρετικά δύσκολος εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς μεταξύ των ηλεκτρικών παραμέτρων της εναέριας γραμμής και του καλωδίου ([164], [233]). Επιπλέον, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές των παραμέτρων του καλωδίου λόγω της γήρανσής του (κυρίως η μεταβολή της σχετικής διαπερατότητας).



Σχήμα 2.6 Σύνθετη γραμμή μεταφοράς

### 2.3 Μαθηματικά μοντέλα αναπαράστασης γραμμών μεταφοράς

Τα μοντέλα των γραμμών μεταφοράς είναι άρτια συνυφασμένα με τις εφαρμογές που εξυπηρετούν. Η θεώρηση ενός μοντέλου γραμμής είναι το πρώτο βήμα για τη διατύπωση ενός αλγορίθμου εντοπισμού σφαλμάτων. Στην περίπτωση αυτή, το μοντέλο γραμμής επιτελεί δύο στόχους:

- Την αναπαράσταση της εσφαλμένης γραμμής στον αλγόριθμο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.

- Την προσομοίωση σφαλμάτων για την παραγωγή δεδομένων μέτρησης κατάλληλων για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Τα μοντέλα των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση σφαλμάτων σε ηλεκτρικά δίκτυα περιγράφονται λεπτομερώς στα τεχνικά εγχειρίδια των προγραμμάτων υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων, όπως το ATP/EMTP [44], και για το λόγο αυτό δε γίνεται εκτενής αναφορά στη διατριβή.

Οι παράμετροι του μοντέλου γραμμής μεταφοράς υπολογίζονται από ειδικές υπορουτίνες που διατίθενται στα προγράμματα τύπου EMTP, οι οποίες θεωρούν ως δεδομένα: τη γεωμετρία του πυλώνα, την ύπαρξη αντιμετάθεσης φάσεων, τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των αγωγών της γραμμής, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, το εύρος συχνοτήτων για το οποίο πρέπει να υπολογισθεί το μοντέλο γραμμής κτλ. Σε άλλες περιπτώσεις, ο προσδιορισμός των ηλεκτρικών παραμέτρων της γραμμής πραγματοποιείται με on-line μετρήσεις, είτε υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας είτε υπό συνθήκες σφάλματος στη γραμμή.

Γενικότερα, χρησιμοποιούνται δύο τύποι μοντέλων γραμμών μεταφοράς:

- Τα μοντέλα γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους.
- Τα μοντέλα γραμμών με κατανεμημένες παραμέτρους.

Τα μοντέλα γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους αναπαριστούν τις γραμμές μεταφοράς με συγκεντρωμένα στοιχεία, οι παράμετροι των οποίων υπολογίζονται για μία συγκεκριμένη συχνότητα λειτουργίας, η οποία είναι συνήθως η ονομαστική συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Με τα μοντέλα αυτά, μπορούν να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί για τη θέση του σφάλματος στη μόνιμη κατάσταση και προσομοιώσεις μεταβατικών φαινομένων σε μια περιοχή συχνοτήτων περί τη θεωρηθείσα για τον υπολογισμό των παραμέτρων της γραμμής.

Σε αντίθεση με τα μοντέλα γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους, τα μοντέλα γραμμών με κατανεμημένες παραμέτρους προσφέρουν μια πιο ακριβή αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς. Τα μοντέλα γραμμών με κατανεμημένες παραμέτρους διακρίνονται σε δύο κύριες υποκατηγορίες:

- Μοντέλα μη εξαρτημένα από τη συχνότητα.
- Μοντέλα εξαρτημένα από τη συχνότητα.

Οι εν σειρά παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια γραμμή μεταφοράς είναι η ωμική αντίσταση ( $R$ ) και η αυτεπαγωγή ( $L$ ), ενώ οι εγκάρσιες παράμετροι είναι η χωρητικότητα ( $C$ ) και η αγωγιμότητα ( $G$ ). Συνήθως, η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής, που εκφράζει το ρεύμα διαρροής της γραμμής κατά μήκος των μονωτήρων και στον αέρα, δε λαμβάνεται υπόψη, παρά μόνο στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Η εγκάρσια χωρητικότητα θεωρείται στις περισσότερες περιπτώσεις ότι είναι ανεξάρτητη της συχνότητας. Όμως, οι παραδοχές αυτές αφορούν κυρίως τις προσομοιώσεις των σφαλμάτων στα προγράμματα υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων, παρά την αναπαράσταση των γραμμών στους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων.

### 2.3.1 Μοντέλα γραμμών με συγκεντρωμένες παραμέτρους

Στο απλουστευμένο μοντέλο γραμμής μεταφοράς με συγκεντρωμένες παραμέτρους, μόνο η εν σειρά ωμική αντίσταση,  $R$ , και επαγωγική αντίδραση,  $X_L$ , λαμβάνονται υπόψη (Σχήμα 2.7). Το μοντέλο αυτό θεωρείται επαρκές για την αναπαράσταση γραμμών μικρού μήκους, που δεν ξεπερνούν τα 80 km [68].

Στο Σχήμα 2.7, χρησιμοποιούνται τα ακόλουθα σήματα και οι εξής παράμετροι:

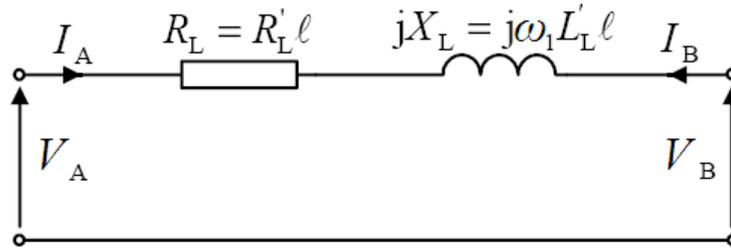
$V_A, V_B$  : τάση στα άκρα A και B της γραμμής, αντίστοιχα

$I_A, I_B$  : ένταση στα άκρα A και B της γραμμής, αντίστοιχα

$R'_L, L'_L$  : ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή της γραμμής ανά μονάδα μήκους

$l$  : συνολικό μήκος της γραμμής (km)

$\omega_l$  : θεμελιώδης γωνιακή συχνότητα του συστήματος (rad/s)

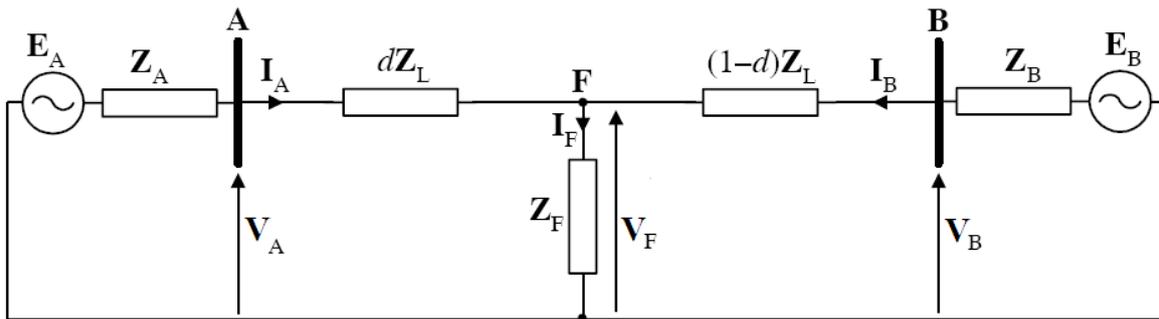


Σχήμα 2.7 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους

Το κύκλωμα του σχήματος 2.7 μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για μονοφασικές γραμμές ή για γραμμές με πλήρως αντιμετατεθειμένους αγωγούς σε συνθήκες συμμετρικής λειτουργίας. Στη δεύτερη περίπτωση, η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση συγκροτούν τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος θετικής ακολουθίας. Αντίστοιχα, οι τάσεις  $V_A, V_B$  και οι εντάσεις  $I_A, I_B$  αναπαριστούν τις τάσεις και τις εντάσεις θετικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής.

Σε συνθήκες ασύμμετρης λειτουργίας, ιδιαίτερα κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η τριφασική αναπαράσταση της γραμμής. Το Σχήμα 2.8 δείχνει μια γραμμή μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα, μαζί με τις ισοδύναμες πηγές στα άκρα της. Το σφάλμα στο σημείο F χωρίζει τη γραμμή σε δύο τμήματα:

- Το τμήμα A-F με α.μ. μήκος  $d$ .
- Το τμήμα F-B με α.μ. μήκος  $1-d$ .



Σχήμα 2.8 Κυκλωματικό διάγραμμα τριφασικής γραμμής μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα με χρήση πινάκων για την αναπαράσταση των στοιχείων της γραμμής (σύνθετες αντιστάσεις, πηγές) και διανυσμάτων για την αναπαράσταση των μετρούμενων σημάτων στα άκρα της και στο σημείο του σφάλματος F

Οι τάσεις και εντάσεις στο κύκλωμα του σχήματος 2.8 είναι τριφασικές (συμβολίζονται με δείκτες: a, b, c για κάθε φάση αντίστοιχα) και συνεπώς αναπαρίστανται από ένα διάνυσμα  $3 \times 1$ . Για παράδειγμα, το διάνυσμα των τριφασικών τάσεων στο άκρο A της γραμμής είναι:

$$\mathbf{V}_A = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Όλες οι σύνθετες αντιστάσεις της γραμμής αναπαρίστανται από το συμμετρικό  $3 \times 3$  πίνακα των εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων:

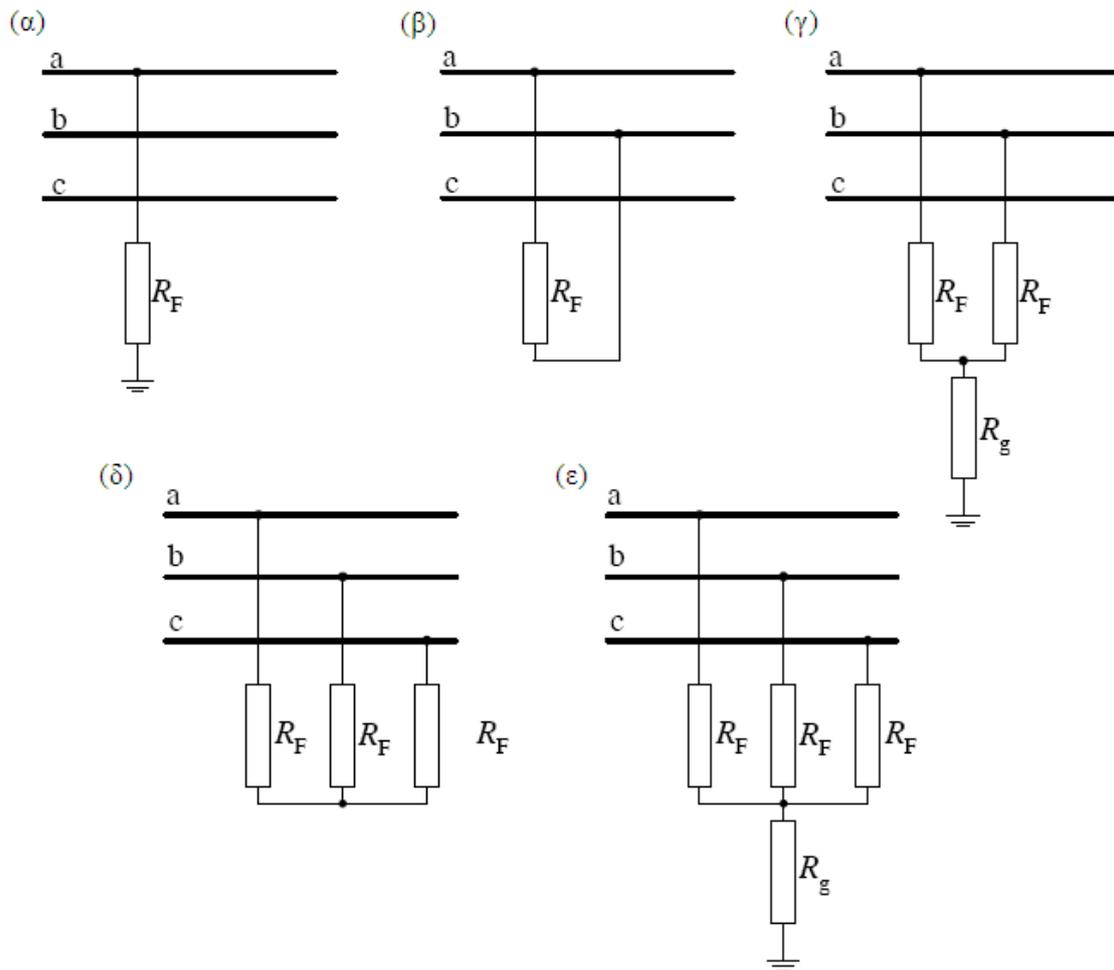
$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

όπου τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα αντιστοιχούν στις ίδιες σύνθετες αντιστάσεις των αγωγών φάσεων, ενώ τα μη διαγώνια στοιχεία στις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεων, για τις οποίες ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$Z_{Lab} = Z_{Lba}, Z_{Lac} = Z_{Lca}, Z_{Lbc} = Z_{Lcb} \quad (2.3)$$

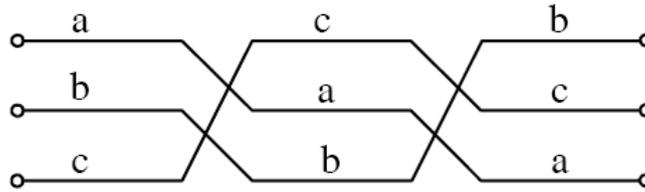
Πρέπει να τονισθεί ότι στο Σχήμα 2.8 λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εν σειρά παράμετροι της γραμμής, ενώ αγνοούνται οι εγκάρσιες παράμετροι.

Στο σημείο F του σφάλματος, θεωρείται ο πίνακας  $Z_F$  που αναπαριστά την αντίσταση σφάλματος η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ των φάσεων, ή των φάσεων και της γης, που εμπλέκονται στο σφάλμα. Ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, ο πίνακας  $Z_F$  μπορεί να λάβει διάφορες μορφές (Σχήμα 2.9).



**Σχήμα 2.9 Αναπαράσταση αντίστασης σφάλματος για: (α) μονοφασικό ως προς γη σφάλμα, (β) διφασικό σφάλμα, (γ) διφασικό ως προς γη σφάλμα, (δ) τριφασικό σφάλμα, (ε) τριφασικό ως προς γη σφάλμα**

Η ίδια και οι αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις και αγωγιμότητες που αντιστοιχούν σε κάθε φάση της γραμμής μεταφοράς, καθορίζονται από τη γεωμετρία της γραμμής και δεν είναι όμοιες για κάθε φάση. Παρόλα αυτά, ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων  $Z_L$  της γραμμής είναι πάντα συμμετρικός λόγω της (2.3). Στην περίπτωση που τόσο τα στοιχεία της διαγωνίου όσο και τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $Z_L$  είναι ίσα μεταξύ τους, τότε, θεωρείται γραμμή με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων. Η πλήρης αντιμετάθεση επιτυγχάνεται αλλάζοντας θέση στους αγωγούς κάθε φάσης με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε φάση (a, b, c) να καταλαμβάνει την ίδια θέση για διάστημα ίσο με το 1/3 του συνολικού μήκους της γραμμής μεταφοράς (Σχήμα 2.10).


**Σχήμα 2.10** Πλήρης αντιμετάθεση φάσεων σε τριφασική γραμμή μεταφοράς

Για γραμμή μεταφοράς με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, ο πίνακας  $\mathbf{Z}_L$  γράφεται στη μορφή:

$$\mathbf{Z}_L = \begin{bmatrix} Z_{Ls} & Z_{Lm} & Z_{Lm} \\ Z_{Lm} & Z_{Ls} & Z_{Lm} \\ Z_{Lm} & Z_{Lm} & Z_{Ls} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

όπου  $Z_{Ls}$  αντιστοιχεί στις ίδιες σύνθετες αντιστάσεις των αγωγών φάσεων και  $Z_{Lm}$  στις αμοιβαίες σύνθετες αντιστάσεις μεταξύ των αγωγών φάσεων.

Για να επιτευχθεί η πλήρης αντιμετάθεση των αγωγών κατά μήκος όλης της γραμμής, απαιτούνται ειδικές και δαπανηρότερες από τις συνήθεις, κατασκευές χαλύβδινων πύργων. Η πράξη έχει επίσης δείξει ότι οι θέσεις της αντιμετάθεσης των αγωγών προσφέρουν αυξημένες πιθανότητες βλάβης. Πρέπει, επομένως, το λειτουργικό όφελος από την αντιμετάθεση να αξιολογείται σε σύγκριση με τις επιπλέον δαπάνες και την πιθανή μείωση της αξιοπιστίας της γραμμής. Κατά τη σημερινή πάντως γενική άποψη, η αντιμετάθεση δεν δικαιολογείται στις γραμμές απλού κυκλώματος [86].

Στις περιπτώσεις που δεν εφαρμόζεται η τεχνική της αντιμετάθεσης, ισχύει η (2.2) για τον πίνακα σύνθετων αντιστάσεων  $\mathbf{Z}_L$ . Ακόμα και στις γραμμές χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, όμως, μπορεί να εφαρμοστεί η ακόλουθη απλουστευτική διαδικασία, η οποία βασίζεται στη χρήση της μέσης τιμής των διαγωνίων και μη διαγωνίων στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{Z}_L$ , ως ακολούθως:

$$Z_{Ls} = \frac{1}{3}(Z_{Laa} + Z_{Lbb} + Z_{Lcc}) \quad (2.5)$$

$$Z_{Lm} = \frac{1}{3}(Z_{Lab} + Z_{Lbc} + Z_{Lca}) \quad (2.6)$$

Ως αποτέλεσμα, λαμβάνεται ο πίνακας  $\mathbf{Z}_L$  της (2.4), που αντιστοιχεί σε μία συμμετρική γραμμή με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα που αυτό επιφέρει στους υπολογισμούς των γραμμών. Όμως, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παραπάνω απλούστευση επηρεάζει αρνητικά την ακρίβεια του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς και κατά συνέπεια την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος.

Στην περίπτωση συμμετρικής τριφασικής γραμμής, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών, η οποία αναπτύχθηκε από τον Fortesque το 1918 και παρουσιάζεται λεπτομερώς σε πολλά τεχνικά εγχειρίδια και αναφορές. Με τη μέθοδο αυτή, κάθε τριφασικό σύστημα φασικών διανυσμάτων μπορεί να εκφραστεί σε μορφή συμμετρικών συνιστωσών, εφαρμόζοντας τον ακόλουθο γραμμικό μετασχηματισμό π.χ. για τις τάσεις στο άκρο A της γραμμής:

$$\begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ V_{Aa1} \\ V_{Aa2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Ab} \\ V_{Ac} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

όπου

$V_{Aa}, V_{Ab}, V_{Ac}$ : φασικές τάσεις (a, b, c) στο άκρο A της γραμμής

$V_{Aa0}, V_{Aa1}, V_{Aa2}$ : τάση μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο άκρο A της γραμμής

$$a = 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.5\sqrt{3}$$

Για την ανάλυση του συστήματος χρησιμοποιούνται συνήθως οι συμμετρικές συνιστώσες της φάσεως a. Οι συμμετρικές συνιστώσες των άλλων φάσεων μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις:

$$\begin{bmatrix} V_{Ab0} \\ V_{Ab1} \\ V_{Ab2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ a^2 V_{Aa1} \\ a V_{Aa2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} V_{Ac0} \\ V_{Ac1} \\ V_{Ac2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ a V_{Aa1} \\ a^2 V_{Aa2} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός, από συμμετρικές σε φασικές συνιστώσες, ορίζεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Ab} \\ V_{Ac} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Aa0} \\ V_{Aa1} \\ V_{Aa2} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Το τριφασικό σύστημα, με το μετασχηματισμό των συμμετρικών συνιστωσών, μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη ομάδα τριών μονοφασικών κυκλωμάτων, θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Στα κυκλώματα ακολουθίας, η γραμμή μεταφοράς αναπαρίσταται από τις παρακάτω σύνθετες αντιστάσεις:

- Τις σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας:

$$Z_{1L} = Z_{2L} = Z_{Ls} - Z_{Lm} \quad (2.10)$$

- Τη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας:

$$Z_{0L} = Z_{Ls} + 2Z_{Lm} \quad (2.11)$$

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζονται τα ακολουθιακά κυκλώματα μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα, μαζί με τις ισοδύναμες πηγές στα άκρα της. Πρόκειται για τρία ανεξάρτητα μεταξύ τους κυκλώματα, που το καθένα μπορεί να αναλυθεί ξεχωριστά. Με κατάλληλη σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας, που υπαγορεύεται από τον τύπο του σφάλματος, στο σημείο της ασυμμετρίας, και ταυτόχρονη συμπερίληψη της αντίστασης σφάλματος, μπορεί να υπολογιστεί το ρεύμα σφάλματος που επιμερίζεται στο καθένα από τα κυκλώματα ακολουθίας ( $I_{F0}, I_{F1}, I_{F2}$ ). Το Σχήμα 2.12 δείχνει τη σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα, που αφορά τη φάση a (a-g fault). Τα κυκλώματα ακολουθίας συνδέονται σε σειρά, και η αντίσταση σφάλματος  $R_F$  εμφανίζεται με τριπλάσια τιμή, πράγμα που ισχύει για όλες τις αντιστάσεις σφάλματος που διαρρέονται από ομοπολικά ρεύματα (ρεύματα μηδενικής ακολουθίας). Η σειριακή σύνδεση των κυκλωμάτων ακολουθίας εφαρμόζεται και για τους άλλους δύο τύπους μονοφασικών σφαλμάτων: b-g και c-g, αλλά απαραίτητη προϋπόθεση είναι η χρησιμοποίηση των συμμετρικών συνιστωσών των φάσεων b και c, αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 2.13 εικονίζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας μιας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος.

Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας μιας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος, όταν και τα δύο παράλληλα κυκλώματα βρίσκονται σε λειτουργία. Λόγω της αμοιβαίας σύζευξης των κυκλωμάτων της διπλής γραμμής, το ρεύμα που διαρρέει το εσφαλμένο κύκλωμα ΑΙ-ΒΙ επηρεάζει την τάση στο υγιές κύκλωμα ΑΙΙ-ΒΙΙ και αντίστροφα. Συγκεκριμένα, στο εσφαλμένο κύκλωμα της γραμμής (ΑΙ-ΒΙ) διακρίνονται οι ακόλουθες πτώσεις τάσης (Σχήμα 2.14(α)):

- Πτώσεις τάσης που προκαλούνται από το ρεύμα που ρέει στο εσφαλμένο κύκλωμα της γραμμής:

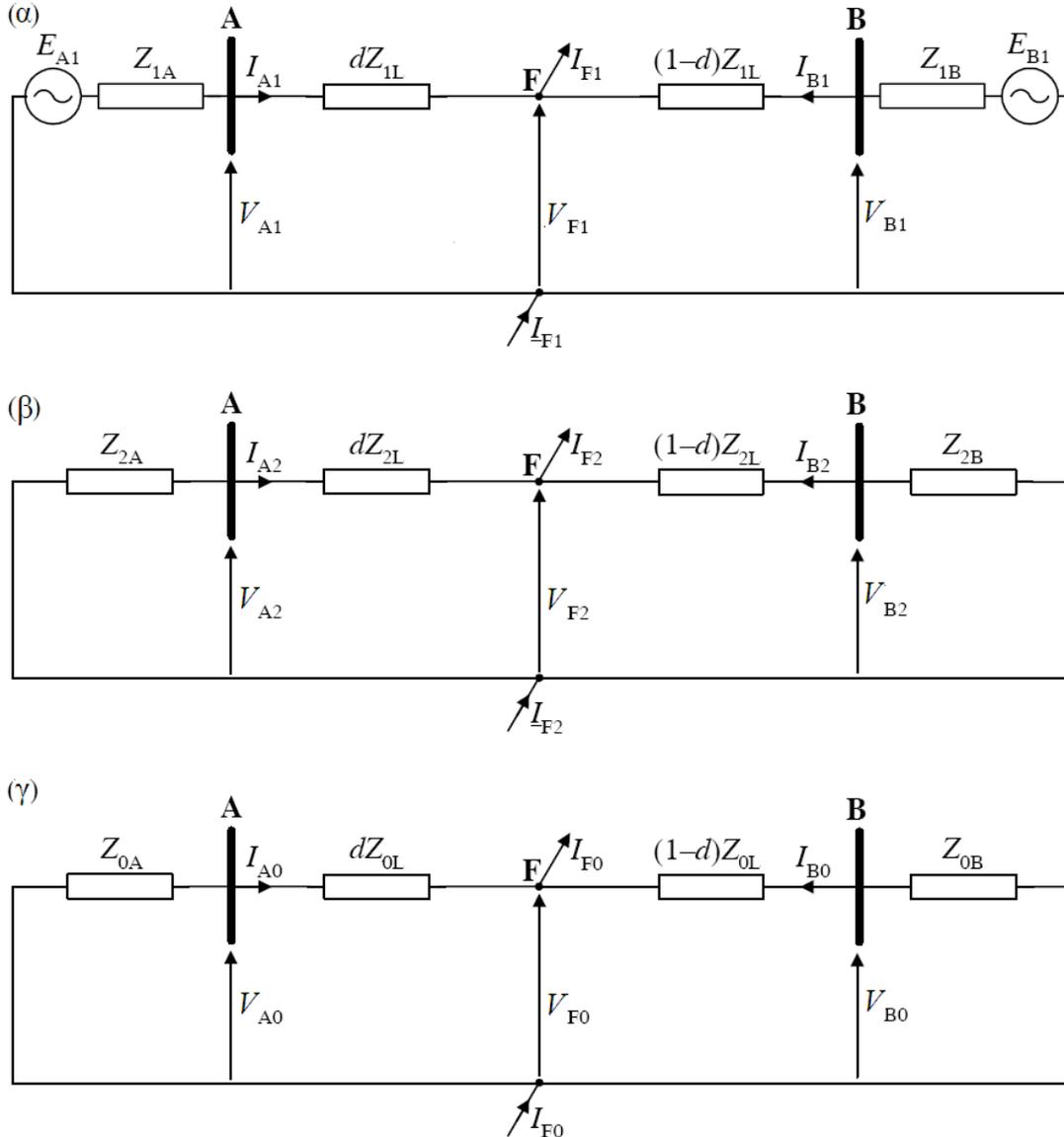
$$V_0^A = dZ_{0LI} I_{AIO} \quad (2.12)$$

$$V_0^B = (1-d)Z_{0LI} (I_{AIO} - I_{F0}) \quad (2.13)$$

- Πτώσεις τάσης που προκαλούνται από το ρεύμα που ρέει στο υγιές, παράλληλο κύκλωμα της γραμμής:

$$V_0^C = dZ_{0m} I_{AII0} \quad (2.14)$$

$$V_0^D = (1-d)Z_{0m} I_{AII0} \quad (2.15)$$



**Σχήμα 2.11** Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής, (γ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα

Στο υγιές κύκλωμα της γραμμής (AII-BII) παρατηρούνται οι ακόλουθες πτώσεις τάσης:

- Πτώσεις τάσης που προκαλούνται από το ρεύμα που ρέει στο υγιές κύκλωμα:

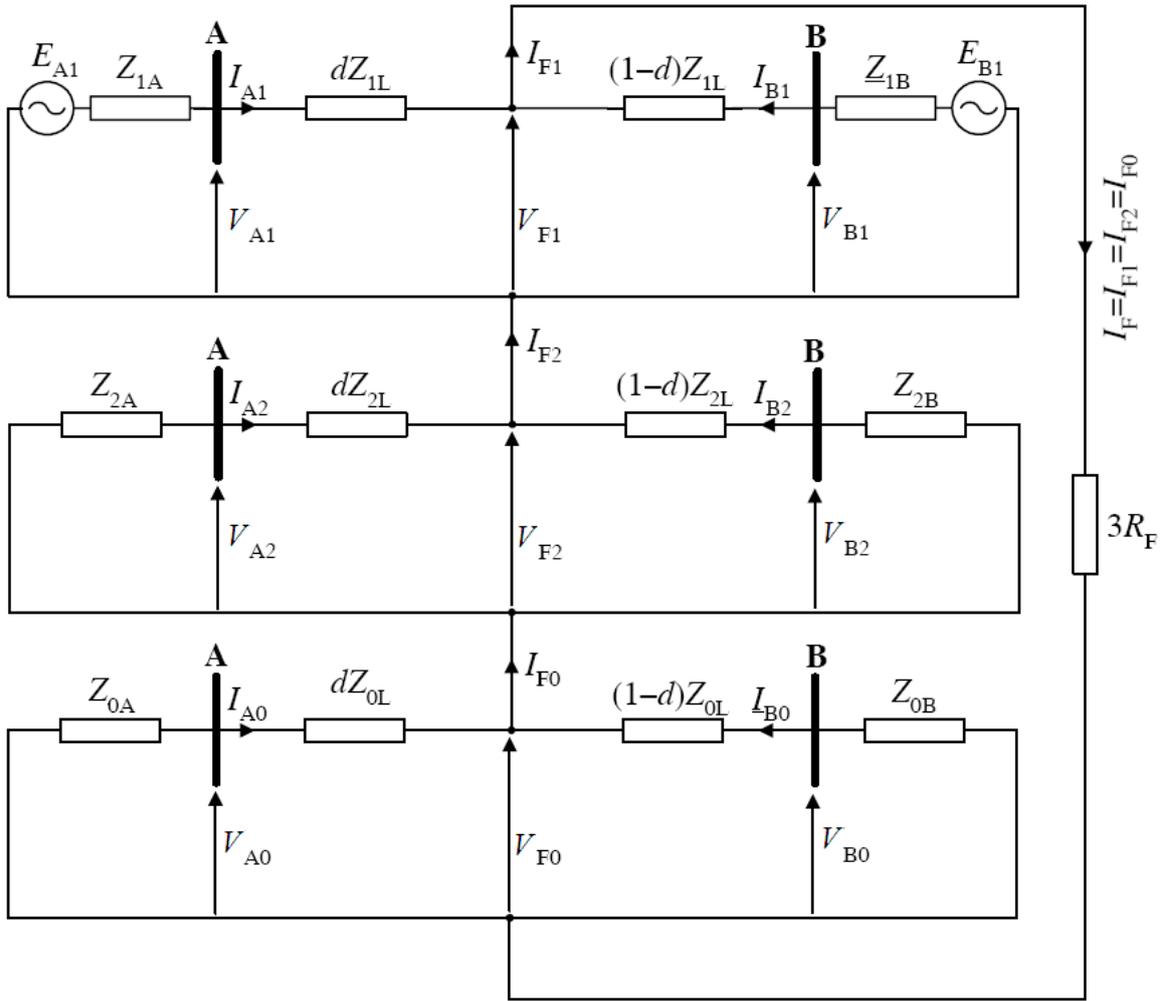
$$V_0^E = dZ_{0LII} I_{AII0} \quad (2.16)$$

$$V_0^F = (1-d)Z_{0LII} I_{AII0} \quad (2.17)$$

- Πτώσεις τάσης που προκαλούνται από το ρεύμα που ρέει στο εσφαλμένο κύκλωμα:

$$V_0^G = dZ_{0m} I_{AIO} \quad (2.18)$$

$$V_0^H = (1-d)Z_{0m} (I_{AIO} - I_{F0}) \quad (2.19)$$



**Σχήμα 2.12** Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό ως προς γη σφάλμα με αντίσταση σφάλματος.

Το κύκλωμα του σχήματος 2.14(α) μπορεί να μετατραπεί στη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2.14(β), η οποία διευκολύνει περισσότερο την ανάλυση. Για το λόγο αυτό, προσδιορίζεται η πτώση τάσης μεταξύ του ζυγού AI και της θέσης του σφάλματος F, λαμβάνοντας υπόψη τις (2.12) και (2.14):

$$V_0^{(AI-F)} = dZ_{0LI}I_{AI0} + dZ_{0m}I_{AII0} \quad (2.20)$$

Προσθαιρώντας τον όρο  $dZ_{0m}I_{AI0}$  στο δεξιό μέλος της (2.20), προκύπτει η ακόλουθη εναλλακτική μορφή:

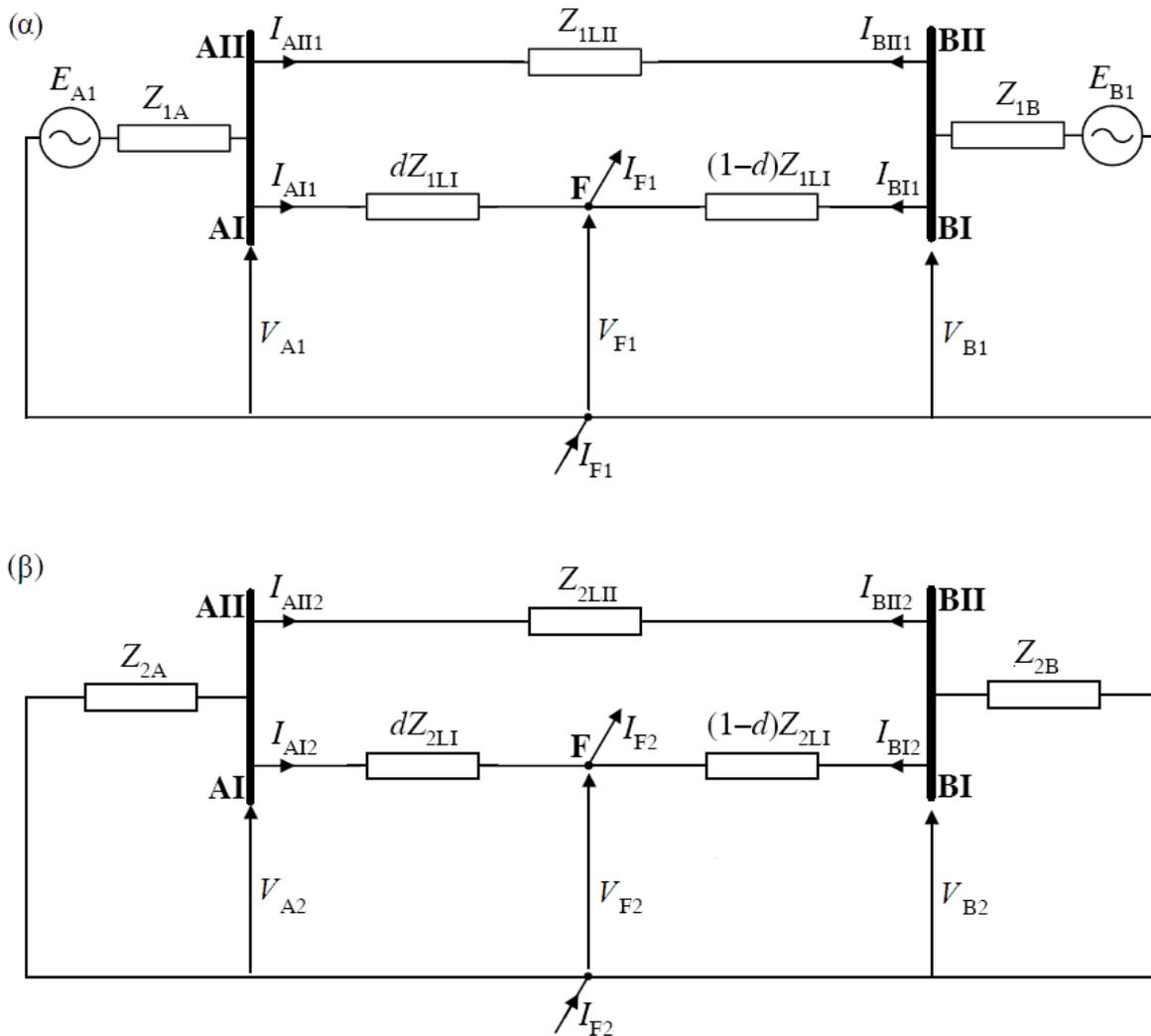
$$V_0^{(AI-F)} = dZ_{0m}(I_{AI0} + I_{AII0}) + d(Z_{0LI} - Z_{0m})I_{AI0} \quad (2.21)$$

Ανάλογα, θεωρώντας τις (2.13) και (2.15), προκύπτει η πτώση τάσης μεταξύ του ζυγού BI και της θέσης του σφάλματος F:

$$V_0^{(F-BI)} = (1-d)(Z_{0LI} - Z_{0m})(I_{AI0} - I_{F0}) + (1-d)Z_{0m}(I_{AI0} + I_{AII0} - I_{F0}) \quad (2.22)$$

Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, για το υγιές κύκλωμα της γραμμής, η πτώση τάσης μεταξύ των ζυγών AII και BII είναι:

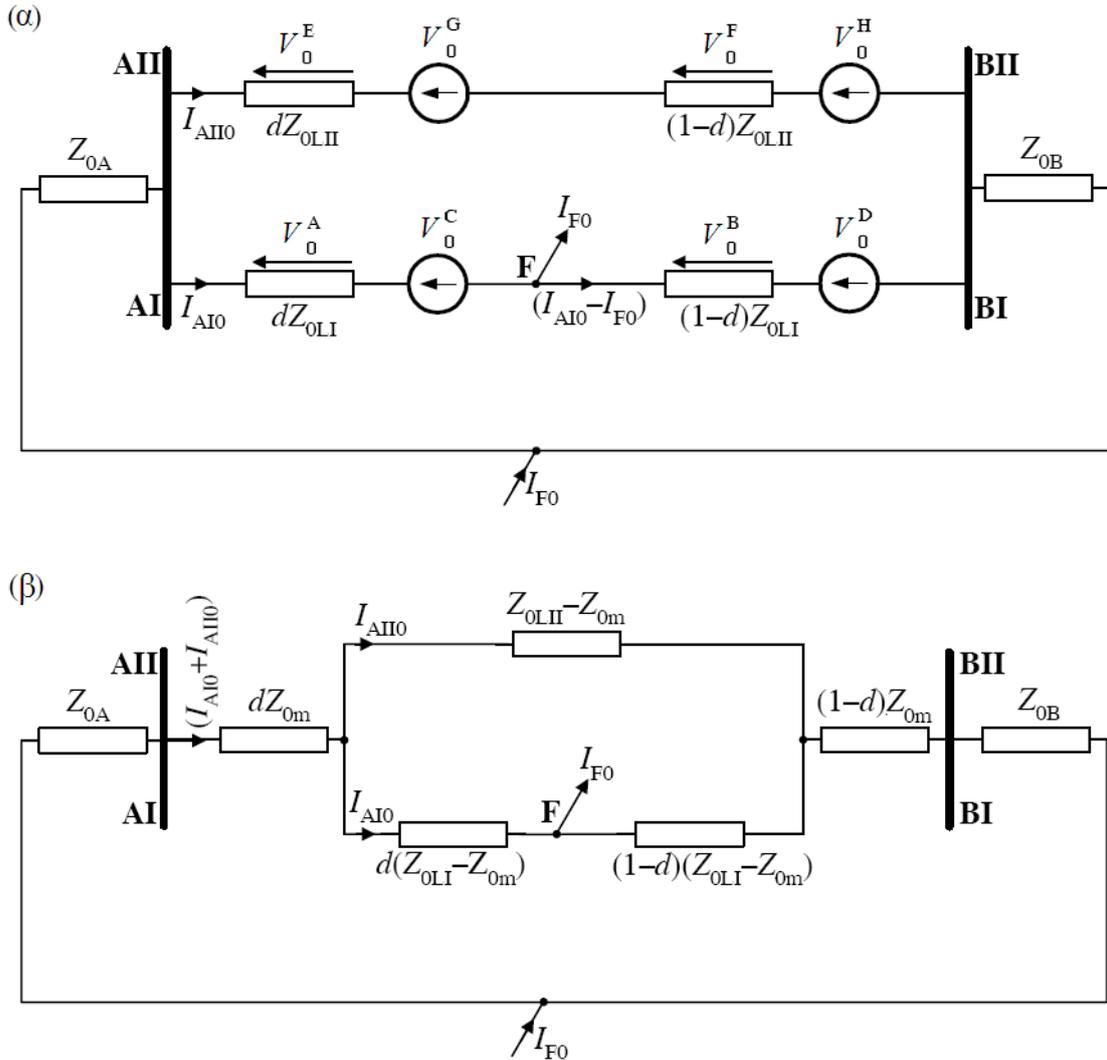
$$V_0^{(AII-BII)} = dZ_{0m}(I_{AI0} + I_{AII0}) + (Z_{0LII} - Z_{0m})I_{AII0} + (1-d)Z_{0m}(I_{AI0} + I_{AII0} - I_{F0}) \quad (2.23)$$



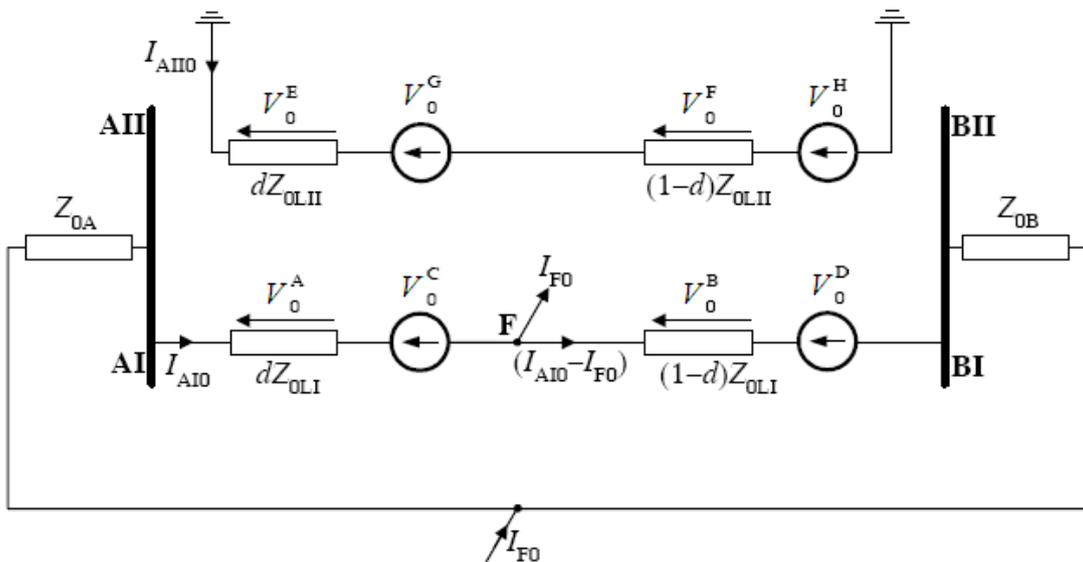
Σχήμα 2.13 Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα

Λαμβάνοντας υπόψη τις (2.21) και (2.23), προκύπτει το κύκλωμα του σχήματος 2.14(β). Στο Σχήμα 2.15, εικονίζεται το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας για μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος, με το υγιές κύκλωμα της γραμμής εκτός λειτουργίας αλλά με γειωμένα τα δύο άκρα του. Οι πτώσεις τάσης που προκαλούνται στα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής υπολογίζονται όπως στις (2.12)-(2.19). Σε περίπτωση που δε μπορεί να μετρηθεί απευθείας το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας που ρέει στο υγιές κύκλωμα της γραμμής, θα πρέπει να εκτιμηθεί από τις διαθέσιμες μετρήσεις [96].

Στα μοντέλα γραμμών μεταφοράς που έχουν αναφερθεί προηγουμένως (σχήματα 2.7, 2.8 και 2.11-2.15) λαμβάνονται υπόψη μόνο οι εν σειρά παράμετροι των γραμμών. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την αναπαράσταση γραμμών μικρού μήκους. Για γραμμές μεσαίου μήκους, της τάξης των 80 έως 240 km, ενσωματώνεται στα παραπάνω μοντέλα η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα της γραμμής [68]. Η εγκάρσια αγωγιμότητα συνήθως αμελείται και μόνο η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής λαμβάνεται υπόψη. Αποτελεί κοινή πρακτική, η εγκάρσια χωρητικότητα να συγκεντρώνεται και να μοιράζεται μεταξύ των δύο τερματικών άκρων της γραμμής. Με τον τρόπο αυτό προκύπτει το ονομαστικό Π κύκλωμα των γραμμών μεταφοράς [68].



Σχήμα 2.14 Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με τα δύο κυκλώματα σε λειτουργία (α) γενικό, (β) εναλλακτικό κύκλωμα



Σχήμα 2.15 Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με το υγιές κύκλωμα της γραμμής εκτός λειτουργίας και τα άκρα του γειωμένα

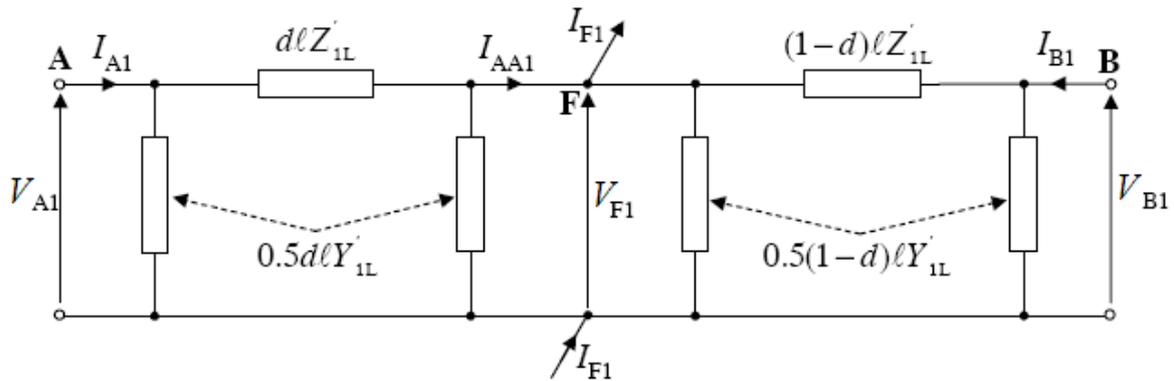
Το Σχήμα 2.16 απεικονίζει το κύκλωμα θετικής ακολουθίας μιας γραμμής μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα, για το οποίο και τα δύο τμήματα (A-F) και (F-B) αναπαρίστανται με τα ονομαστικά Π κυκλώματα. Η παράμετρος  $Y_{1L}$  χρησιμοποιείται για την περιγραφή της εγκάρσια σύνθετης αγωγιμότητας της γραμμής:

$$Y_{1L} = j\omega_1 C'_{1L} l \quad (2.24)$$

όπου

$C'_{1L}$  : η χωρητικότητα του κυκλώματος θετικής ακολουθίας της γραμμής ανά μονάδα μήκους

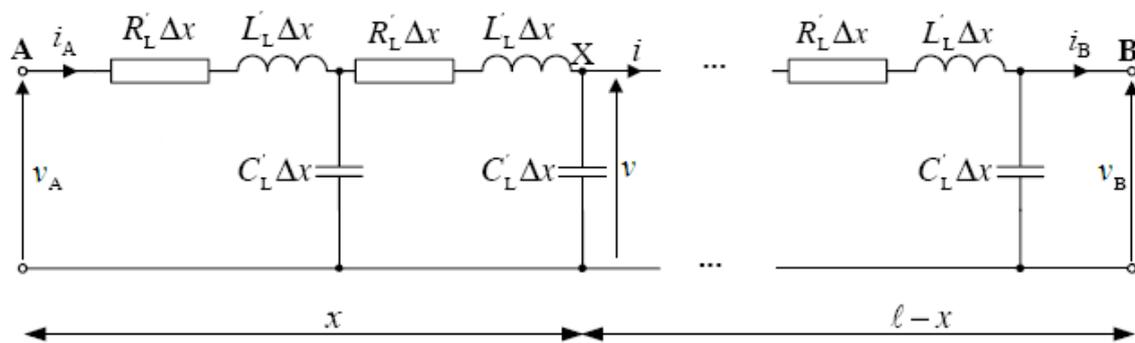
Τα ισοδύναμα κυκλώματα αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας προκύπτουν με ανάλογο τρόπο.



Σχήμα 2.16 Ισοδύναμο κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος που υπόκειται σε σφάλμα με χρήση του ονομαστικού Π μοντέλου

### 2.3.2 Μοντέλα γραμμών μεταφοράς με καταναμημένες παραμέτρους

Για την αναπαράσταση γραμμών μεταφοράς μικρού και μεσαίου μήκους το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους είναι αρκετά ικανοποιητικό. Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, ιδιαίτερα στην περίπτωση γραμμών μεγάλου μήκους, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα καταναμημένα χαρακτηριστικά τους.



Σχήμα 2.17 Μοντέλο γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους με καταναμημένες παραμέτρους

Στα μοντέλα γραμμών με καταναμημένες παραμέτρους, η τάση και το ρεύμα κατά μήκος των γραμμών είναι συνάρτηση της απόστασης από το άκρο αναχώρησης  $x$  (σημείο X) και του χρόνου  $t$  (Σχήμα 2.17). Η τάση  $v(x,t)$  και η ένταση  $i(x,t)$  συνδέονται με τις παραμέτρους της γραμμής ( $R'_L, L'_L, C'_L$  - ωμική αντίσταση, αυτεπαγωγή και χωρητικότητα της γραμμής ανά μονάδα μήκους) μέσω των τηλεγραφικών εξισώσεων ([23], [69], [126]):

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + L'_L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = -R'_L i(x,t) \quad (2.25)$$

$$C'_L \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2.26)$$

Πρέπει να τονισθεί ότι στην (2.26) δεν συμπεριλαμβάνεται, ως συνήθως, η εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής.

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις (2.25)-(2.26) μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών γραμμών ή γραμμών ολισθήσεως του Collatz [37]. Για το σκοπό αυτό διατυπώνονται οι τροποποιημένες τηλεγραφικές εξισώσεις:

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} - \chi^2 \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = -\eta i(x,t) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (2.28)$$

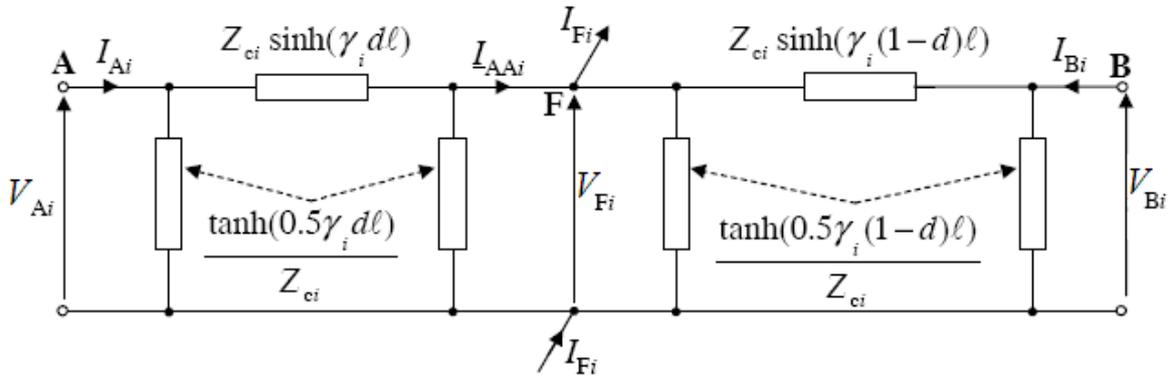
όπου

$$u(x,t) = -C'_L v(x,t)$$

$$\chi = \sqrt{L'_L C'_L}$$

$$\eta = R'_L C'_L$$

Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των οδοντών κυμάτων για την επίλυση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (2.27)-(2.28). Στη μέθοδο αυτή, θεωρείται ότι η τάση και το ρεύμα αποτελούνται από δύο συνιστώσες: το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα τάσης και έντασης, αντίστοιχα [126].



**Σχήμα 2.18** Ισοδύναμο Π κύκλωμα γραμμής μεταφοράς με κατανεμημένες παραμέτρους για την *i*-στη ακολουθία

Το μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους μπορεί να εφαρμοστεί και με μορφή φασιθετών. Στην περίπτωση αυτή, επιστρατεύεται το ισοδύναμο Π κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς [68]. Στο Σχήμα 2.18, χρησιμοποιούνται δύο τέτοια κυκλώματα για να αναπαραστήσουν τα τμήματα της γραμμής A-F και B-F, που προκύπτουν από το σφάλμα στο σημείο F. Το μοντέλο του σχήματος 2.18 εκφράζει τη γενική περίπτωση, όπου  $i=0,1,2$  αντιστοιχεί στο κύκλωμα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας.

Στο Σχήμα 2.18, οι εν σειρά και οι εγκάρσιες κατανεμημένες παράμετροι της γραμμής εκφράζονται μέσω:

- Της χαρακτηριστικής αντίστασης της γραμμής για την *i*-οστή ακολουθία:

$$Z_{ci} = \sqrt{\frac{Z'_{iL}}{Y'_{iL}}} \quad (2.29)$$

- Της σταθεράς μετάδοσης της γραμμής για την *i*-οστή ακολουθία:

$$\gamma_{ci} = \sqrt{Z'_{iL} Y'_{iL}} \quad (2.30)$$

Χρησιμοποιώντας το ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα της γραμμής, η τάση και η ένταση στο σημείο του σφάλματος μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τάσης και της έντασης στο άκρο A της γραμμής, ως ακολούθως:

$$V_{Fi} = \cosh(\gamma_i dl) V_{Ai} - Z_{ci} \sinh(\gamma_i dl) I_{Ai} \quad (2.31)$$

$$I_{AAi} = -\frac{1}{Z_{ci}} \sinh(\gamma_i dl) V_{Ai} + \cosh(\gamma_i dl) I_{Ai} \quad (2.32)$$

### 2.3.3 Μετασχηματισμοί ρυθμών

Ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών εφαρμόζεται με επιτυχία για την αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς μόνο όταν αυτές είναι συμμετρικές, δηλαδή όταν παρουσιάζουν τουλάχιστον διαγώνια συμμετρία ώστε τα τρία μονοφασικά κυκλώματα ακολουθίας να είναι ανεξάρτητα και μη συζευγμένα. Εάν, όμως, θεωρηθεί μια γραμμή με μη αντιμετατεθειμένους αγωγούς, με  $Z_{Lab} \neq Z_{Lbc} \neq Z_{Lca}$ , τότε η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών δεν προσφέρει σχεδόν καμία απλοποίηση. Στην περίπτωση αυτή, η προσπάθεια έγκειται στην εύρεση ενός κατάλληλου μετασχηματισμού προς μετατροπή της τριφασικής γραμμής σε μονοφασικά ανεξάρτητα κυκλώματα χωρίς συζεύξεις. Στη γλώσσα της γραμμικής άλγεβρας ζητείται η διαγωνιοποίηση μιας μήτρας φυσικών αντιστάσεων, όσο ασύμμετρη και να είναι αυτή. Ο μετασχηματισμός αυτός καλείται κανονικός και η μήτρα μετασχηματισμού έχει ως στήλες τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος. Στη γλώσσα των μηχανικών γίνεται λόγος για συνιστώσες ρυθμών και μετασχηματισμό ρυθμών (ή ιδιοκαταστάσεων). Ο μετασχηματισμός των συμμετρικών συνιστωσών αποτελεί μια τέτοια περίπτωση μετασχηματισμού.

Χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς ρυθμών, οι πίνακες σύνθετων αντιστάσεων και αγωγιμοτήτων,  $\mathbf{Z}$  και  $\mathbf{Y}$ , μπορούν να μετατραπούν στους πίνακες  $\mathbf{Z}_{\text{mode}}$  και  $\mathbf{Y}_{\text{mode}}$  αντίστοιχα:

$$\mathbf{Z}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_v^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{T}_i \quad (2.33)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{T}_v \quad (2.34)$$

Ο μετασχηματισμός που περιγράφεται από τις (2.33)-(2.34) πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι πίνακες  $\mathbf{Z}_{\text{mode}}$  και  $\mathbf{Y}_{\text{mode}}$  που προκύπτουν να είναι διαγώνιοι. Τα διανύσματα  $\mathbf{V}$  και  $\mathbf{I}$  των φασικών τάσεων και εντάσεων μετατρέπονται στα διανύσματα ιδιοκαταστάσεων  $\mathbf{V}_{\text{mode}}$  και  $\mathbf{I}_{\text{mode}}$ , χρησιμοποιώντας τους πίνακες  $\mathbf{T}_v$  και  $\mathbf{T}_i$  ως εξής:

$$\mathbf{V}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_v^{-1} \mathbf{V} \quad (2.35)$$

$$\mathbf{I}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{I} \quad (2.36)$$

Για συμμετρικές γραμμές (με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων), οι πίνακες  $\mathbf{T}_v$  και  $\mathbf{T}_i$  είναι όμοιοι μεταξύ τους και τα στοιχεία τους είναι πραγματικοί αριθμοί. Διακρίνονται, κατά κύριο λόγο, οι ακόλουθοι μετασχηματισμοί:

- Μετασχηματισμός Clarke:

$$\mathbf{T}_v = \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_v^{-1} = \mathbf{T}_i^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

- Μετασχηματισμός Karrenbauer:

$$\mathbf{T}_v = \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_v^{-1} = \mathbf{T}_i^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

- Μετασχηματισμός Wedepohl:

$$\mathbf{T}_v = \mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & -2 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_v^{-1} = \mathbf{T}_i^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{3}{2} & 0 & -\frac{3}{2} \\ \frac{1}{2} & -1 & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

Στην περίπτωση γραμμών χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, τα στοιχεία των πινάκων  $\mathbf{T}_v$  και  $\mathbf{T}_i$  είναι εν γένει μιγαδικοί αριθμοί και μπορούν να προσδιοριστούν με βάση τη θεωρία ιδιοτιμών/ιδιοδιανυσμάτων [107].

### 2.3.4 Γραμμές με αντιστάθμιση σειράς

Η ικανότητα μεταφερόμενης ισχύος ( $P$ ) μιας συμβατικής γραμμής μεταφοράς, χωρίς σειριακή αντιστάθμιση καθορίζεται από τη γνωστή σχέση (αμελώντας την ωμική αντίσταση και τη χωρητικότητα της γραμμής):

$$P = \frac{V_A V_B}{X_L} \sin(\delta) \quad (2.40)$$

όπου

$V_A, V_B$ : οι φασιθέτες των τάσεων στα άκρα A και B της γραμμής

$X_L$ : η επαγωγική αντίδραση της γραμμής

$\delta$ : η διαφορά φάσεως των τάσεων  $V_A, V_B$

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η γωνία  $\delta$  καθορίζεται από το όριο στατικής ευστάθειας και, συνεπώς, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα μεταφερόμενης ισχύος πρέπει να μειωθεί η επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Αυτό μπορεί να γίνει με την εισαγωγή πυκνωτών σειριακής αντιστάθμισης. Η ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση της γραμμής μετά την ένταξη των σειριακών πυκνωτών είναι:

$$X_{total} = X_L - X_C \quad (2.41)$$

όπου  $X_C$  είναι η χωρητική αντίδραση των πυκνωτών.

Ο βαθμός αντιστάθμισης εκφράζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k_{SC} = \frac{X_C}{X_L} 100\% \quad (2.42)$$

και συνήθως κυμαίνεται από 50 έως 90%.

Οι κυριότερες διατάξεις αντιστάθμισης σειράς που εφαρμόζονται στα δίκτυα μεταφοράς υψηλής τάσης διακρίνονται σε αυτές που χρησιμοποιούν σειριακούς πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας (Fixed Series Capacitor – FSC) και σε αυτές που χρησιμοποιούν σειριακούς πυκνωτές ελεγχόμενης χωρητικότητας μέσω θυρίστορ (Thyristor Controlled Series Capacitor – TCSC).

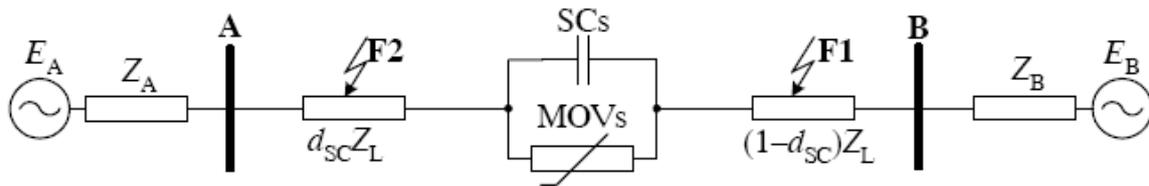
Η εφαρμογή της αντιστάθμισης σειράς, εκτός από την αύξηση της ικανότητας μεταφερόμενης ισχύος, προσφέρει και άλλα πλεονεκτήματα στην λειτουργία ενός ΣΗΕ, όπως:

- Βελτίωση του ορίου στατικής ευστάθειας.

- Μείωση των απωλειών μεταφοράς της ισχύος.
- Αποδοτικό έλεγχο τάσης.
- Ευέλικτο έλεγχο της ροής ισχύος.

Επιπλέον, οικονομικοί και περιβαλλοντικοί λόγοι ευνοούν τη χρησιμοποίηση διατάξεων αντιστάθμισης σειράς αντί για την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, προκειμένου να αυξηθούν τα περιθώρια φόρτισης ενός ΣΗΕ.

Συνήθως στις γραμμές μεταφοράς συνδέεται μια τριφασική συστοιχία σειριακών πυκνωτών. Σε ό,τι αφορά τις γραμμές απλού κυκλώματος, το αντίστοιχο μονογραμμικό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.19. Οι σειριακοί πυκνωτές (SCs) βρίσκονται τοποθετημένοι σε α.μ. απόσταση  $d_{SC}$  από το άκρο Α της γραμμής. Για την προστασία των σειριακών πυκνωτών έναντι υπερτάσεων συνδέονται στα άκρα τους μη γραμμικές αντιστάσεις (Varistor) που αποτελούνται από οξειδία μετάλλου (Metal-Oxide Varistor – MOV).



**Σχήμα 2.19** Γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στο μέσο της

Το Σχήμα 2.20(α) απεικονίζει τη διάταξη της συστοιχίας αντιστάθμισης για μία φάση της γραμμής μεταφοράς και περιλαμβάνει σειριακούς πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας ([127], [155], [204]). Εκτός από τον πυκνωτή σειράς (SC) και το κύκλωμα MOV υπάρχει και μια διάταξη προστασίας του MOV έναντι υπερθέρμανσης (OP). Η βασική ιδιότητα του MOV είναι ότι η αντίστασή του μειώνεται απότομα όταν η τάση στα άκρα του αυξάνεται, και κυρίως όταν ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή αναφοράς ( $V_{REF}$ ). Η χαρακτηριστική εξίσωση του MOV είναι της μορφής:

$$\frac{i_{MOV}}{P} = \left( \frac{v_x}{V_{REF}} \right)^q \quad (2.43)$$

όπου

$i_{MOV}$ : το ρεύμα που διαρρέει το MOV

$v_x$ : η τάση στα άκρα του MOV

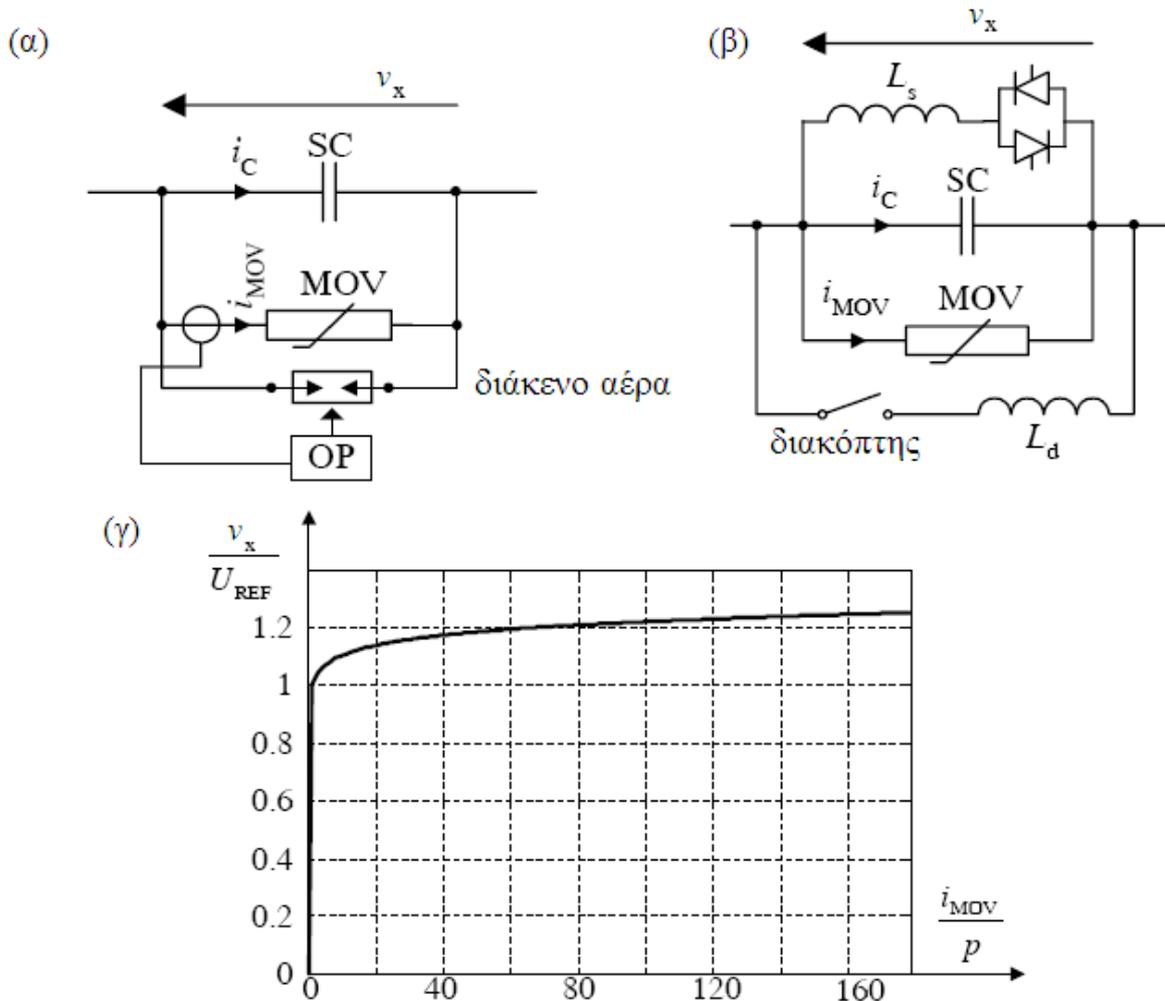
$P$ : το ρεύμα αναφοράς του MOV (kA)

Ως τάση αναφοράς του MOV, πάνω από την οποία αρχίζει να άγει, καθορίζεται η τιμή της τάσης προστασίας του πυκνωτή, το επίπεδο της οποίας είναι συνήθως μεγαλύτερο από τις αναμενόμενες τιμές κατά την εμφάνιση βραχυκύκλωμα στη γραμμή μεταφοράς, οπότε το MOV, που μέχρι πρότινος διαρρεόταν από ένα πολύ μικρό ρεύμα, αρχίζει να άγει, με αποτέλεσμα να μειώνεται η τιμή του ρεύματος που ρέει στον πυκνωτή και η τάση στα άκρα του να παραμένει κάτω από το όριο προστασίας. Σε περίπτωση που, κατά το στάδιο αυτό, το MOV απορροφήσει ενέργεια περισσότερη από το επιτρεπτό όριο, ενεργεί η θερμική προστασία (υπερφόρτισης) OP, η οποία δίνει εντολή να διασπαστεί το διάκενο αέρος και βραχυκυκλώνει το MOV.

Στο Σχήμα 2.20(β) εικονίζεται η συστοιχία ελεγχόμενης αντιστάθμισης σειράς μέσω θυρίστορ. Στο Σχήμα 2.20(γ) φαίνεται η χαρακτηριστική λειτουργίας  $v-i$  του MOV για τις ακόλουθες προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων της (2.43) ( $q = 23$ ,  $P = 1$  kA,  $V_{REF} = 150$  kV).

Οι διατάξεις αντιστάθμισης σειράς που τοποθετούνται κατά μήκος μιας γραμμής μεταφοράς μπορούν να δημιουργήσουν πολλά προβλήματα στη λειτουργία των H/N προστασίας ([47], [58], [59], [67], [72], [103], [119], [121], [127], [163], [172], [183], [195], [194], [205], [212], [213], [218]) αλλά και των εντοπιστών σφάλματος ([8], [49], [89], [93], [168], [173], [197], [203], [204], [210], [209], [211], [214], [215], [216], [255]). Κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων στο τμήμα

της γραμμής που βρίσκεται πίσω από τη χωρητική αντιστάθμιση σειράς (σφάλμα F1 στο Σχήμα 2.19), το κύκλωμα που εμπλέκεται στο βρόχο του σφάλματος, όπως «φαίνεται» από το άκρο A της γραμμής, γίνεται, λόγω της παρουσίας των SCs και MOVs, εξαιρετικά μη γραμμικό, με αποτέλεσμα τόσο η μεταβατική όσο και η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας να είναι αρκετά διαφορετικές από αυτές των συμβατικών γραμμών. Στην περίπτωση που εκδηλώνεται βραχυκύκλωμα στο τμήμα της γραμμής πριν τη σειριακή αντιστάθμιση, το κύκλωμα που εμπλέκεται στο βρόχο του σφάλματος, όπως φαίνεται από το άκρο A, δεν περιλαμβάνει τους SCs-MOVs. Παρόλα αυτά, επηρεάζεται και πάλι από τη συνεισφορά στο ρεύμα σφάλματος του απομακρυσμένου άκρου της γραμμής.

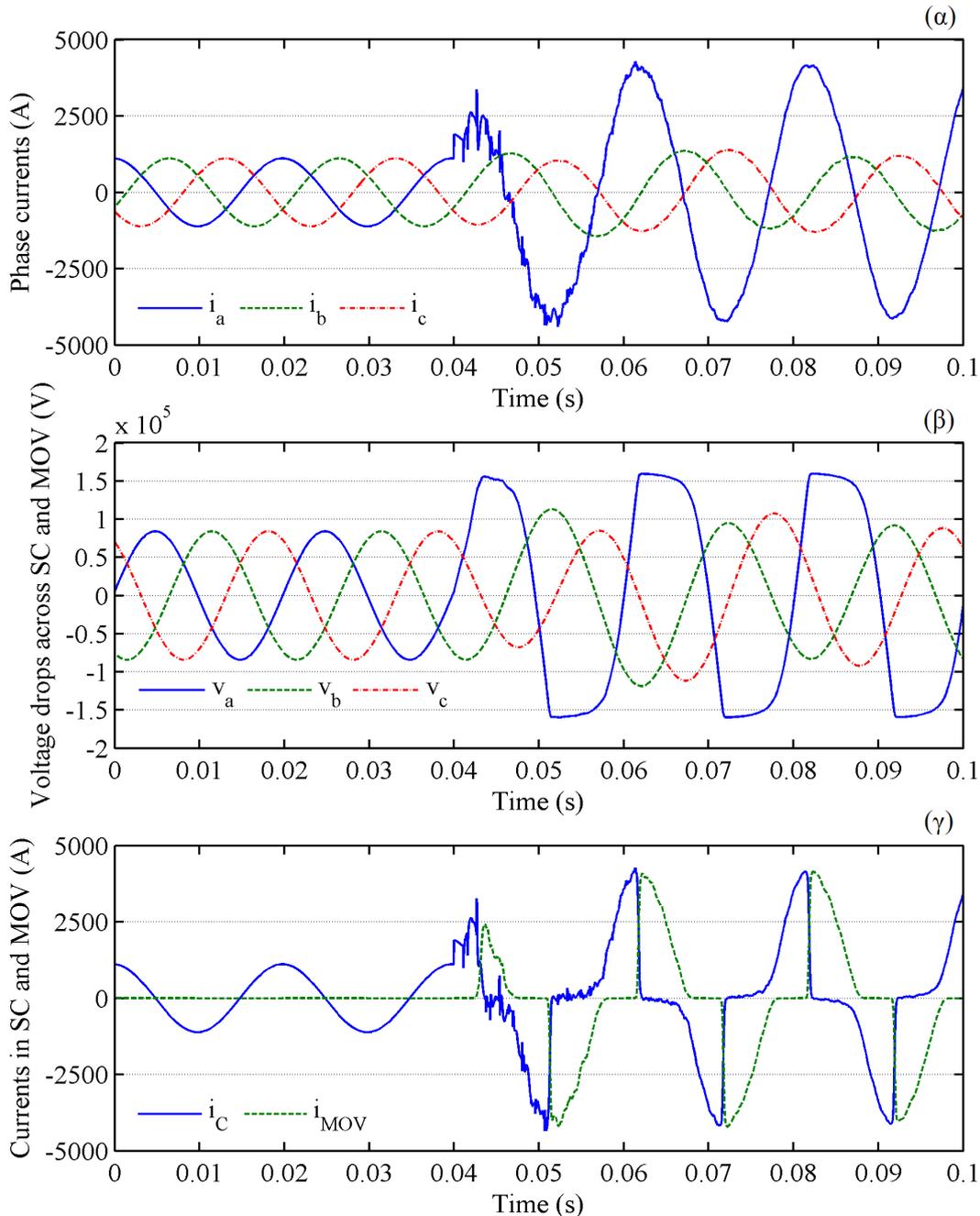


Σχήμα 2.20 Συστοιχία σειριακών πυκνωτών: (α) διάταξη αντιστάθμισης σειράς με πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας, (β) διάταξη αντιστάθμισης σειράς με πυκνωτές ελεγχόμενης χωρητικότητας μέσω θυρίστορ, (γ) χαρακτηριστική v-i MOV

Η ακριβής αναπαράσταση των SCs και MOVs στους αλγόριθμους προστασίας και εντοπισμού σφαλμάτων είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία τους. Αν οι αλγόριθμοι βασίζονται στη χρήση φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων, τότε η συστοιχία των SCs/MOVs μπορεί να αναπαρασταθεί ανά φάση από ένα ισοδύναμο κύκλωμα στη θεμελιώδη συχνότητα, που έχει τη μορφή ενός εν σειρά κλάδου με παραμέτρους (ωμική και χωρητική αντίσταση) που εξαρτώνται από το ρεύμα που διαρρέει τον κλάδο. Για την περίπτωση αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τις διαφορικές εξισώσεις της γραμμής, η συστοιχία των SCs/MOVs αναπαρίσταται με βάση τη στιγμιαία εκτιμώμενη πτώση τάσης στα άκρα της διάταξης αντιστάθμισης ([8], [58], [59], [204], [212], [213]).

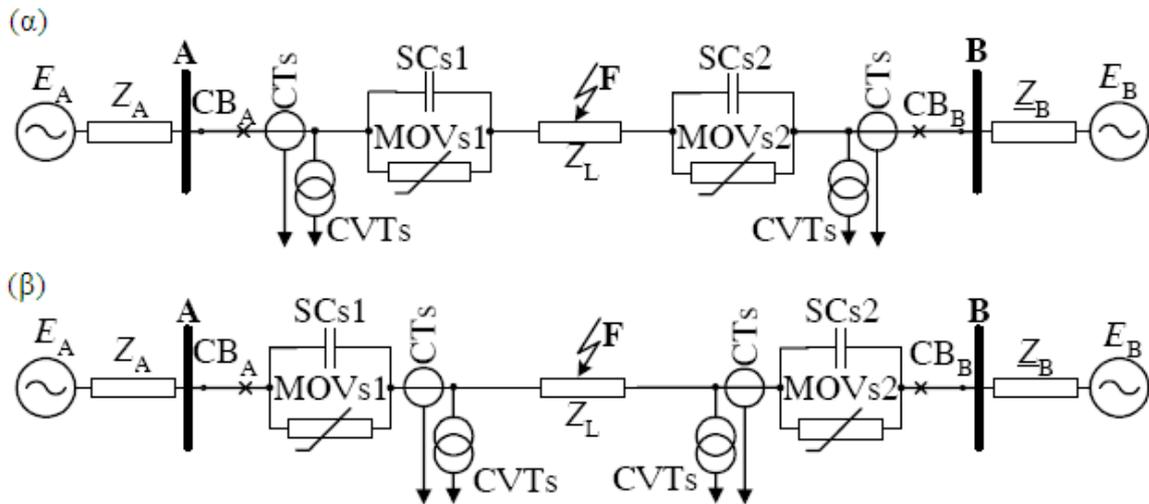
Στο Σχήμα 2.21 παρουσιάζεται η λειτουργία της συστοιχίας των SCs/MOVs για ένα σφάλμα σε γραμμή 400 kV, 300 km με αντιστάθμιση  $k_{SC} = 80\%$ . Η γραμμή μεταφοράς μαζί με την διάταξη

αντιστάθμισης σειράς έχουν εξομοιωθεί στο πρόγραμμα υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP. Οι προσεγγιστικές τιμές των παραμέτρων της (2.43) είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαραγωγή της χαρακτηριστικής του MOV στο Σχήμα 2.20(α). Οι κυματομορφές του σχήματος 2.21 αντιστοιχούν σε ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα με αντίστασης σφάλματος  $10 \Omega$ , ακριβώς μετά τη συστοιχία των SCs/MOVs ως προς το άκρο A της γραμμής (Σχήμα 2.19). Στο Σχήμα 2.21(α) φαίνονται τα τριφασικά ρεύματα που εισέρχονται στη διάταξη αντιστάθμισης σειράς. Στο Σχήμα 2.21(β) εικονίζονται οι πτώσεις τάσης στα άκρα των SCs και MOVs.



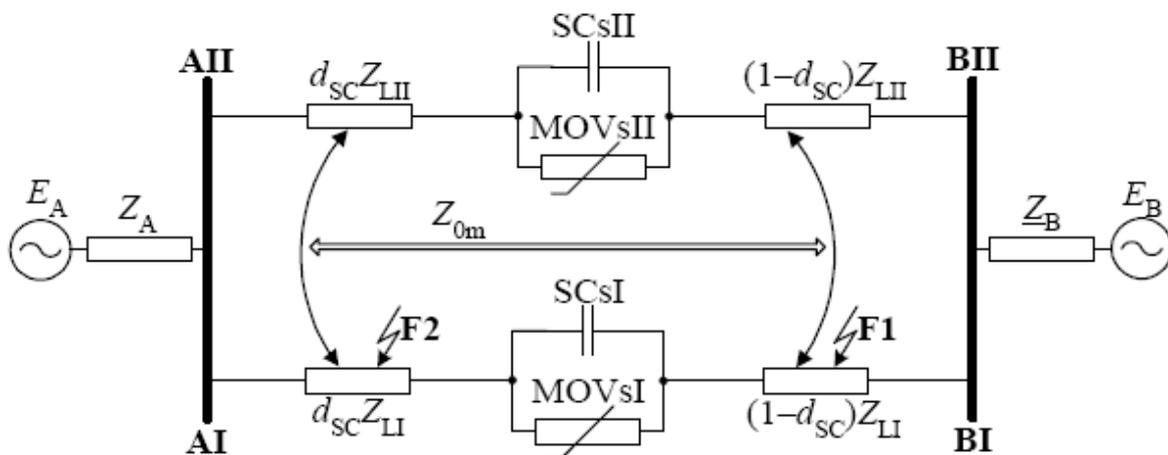
**Σχήμα 2.21** Λειτουργία SCs και MOVs κατά την εκδήλωση μονοφασικού ως προς γη σφάλματος (a-g): (α) κυματομορφές φασικών ρευμάτων που εισέρχονται στο κύκλωμα των SCs και MOVs, (β) κυματομορφές πτώσεων τάσης στα άκρα των SCs και MOVs, (γ) κυματομορφή ρεύματος που ρέει στο σειριακό πυκνωτή ( $i_C$ ) και MOV ( $i_{MOV}$ ) της εσφαλμένης φάσης a

Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η πτώση τάσης στην εσφαλμένη φάση  $a$  περιορίζεται στο εύρος τιμών  $\pm 150$  kV. Ο περιορισμός αυτός προκαλείται από την εφαρμογή του MOV με τάση αναφοράς  $V_{REF} = 150$  kV. Οι κυματομορφές της πτώσης τάσης για τις υγιείς φάσεις της γραμμής παραμορφώνονται από την επίδραση των υποσύγχρονων ταλαντώσεων συντονισμού, οι οποίες προκαλούνται επειδή τα MOVs των υγιών φάσεων λειτουργούν στη γραμμική περιοχή, όπου άγουν μικρό ρεύμα. Οι υποσύγχρονες ταλαντώσεις εμφανίζονται και στα ρεύματα των υγιών φάσεων που διαρρέουν τη γραμμή (Σχήμα 2.21(α)). Στο Σχήμα 2.21(γ) απεικονίζεται η διαίρεση του ρεύματος της εσφαλμένης φάσης στους δύο παράλληλους κλάδους SC και MOV. Ο SC και το MOV άγουν το ρεύμα σφάλματος εναλλάξ, περίπου για διάστημα ίσο με το ένα τέταρτο της θεμελιώδους περιόδου.



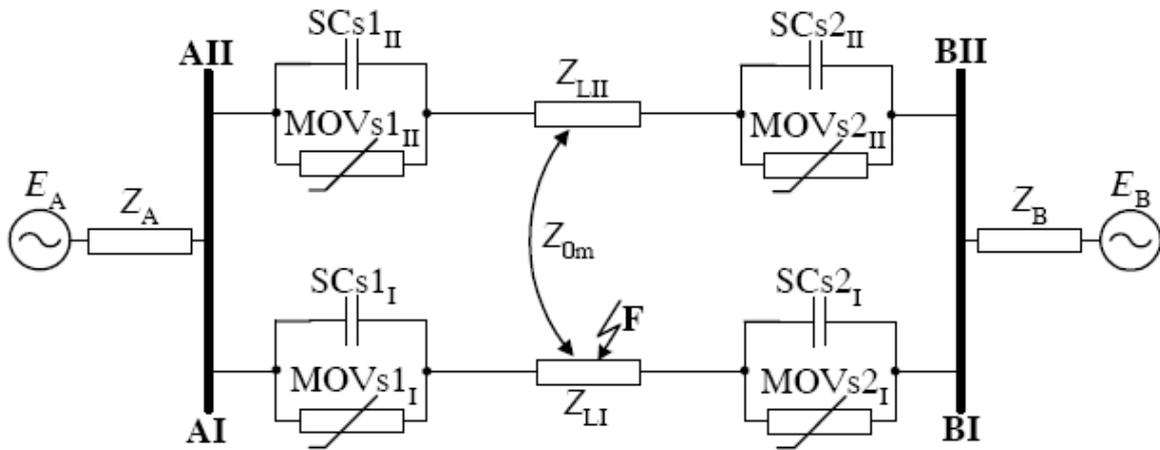
Σχήμα 2.22 Τοποθέτηση των μετασχηματιστών μέτρησης στην περίπτωση σειριακής αντιστάθμισης και στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς (α) από την πλευρά του διακόπτη ισχύος (σε σχέση με τη διάταξη αντιστάθμισης), (β) από την πλευρά της γραμμής

Το Σχήμα 2.22 απεικονίζει την περίπτωση σειριακής αντιστάθμισης, όπου οι συστοιχίες των πυκνωτών αντιστάθμισης είναι εγκατεστημένες στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς. Σε μια τέτοια περίπτωση, η τοποθέτηση των μετασχηματιστών τάσης και έντασης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, με πλεονέκτημα να παρουσιάζουν οι εφαρμογές όπου οι μετασχηματιστές μέτρησης τοποθετούνται από την πλευρά της γραμμής και όχι του διακόπτη ισχύος εκατέρωθεν της διάταξης χωρητικής αντιστάθμισης.



Σχήμα 2.23 Γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στο μέσο κάθε κυκλώματος

Αντίστοιχα με τις γραμμές απλού κυκλώματος, μπορεί να εφαρμοστεί αντιστάθμιση σειράς και στις γραμμές διπλού κυκλώματος στο μέσο ή στα άκρα τους (Σχήματα 2.23 και 2.24).



Σχήμα 2.24 Γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς στα άκρα κάθε κυκλώματος



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΙΣΟΔΟΥ ΣΤΟΥΣ ΕΝΤΟΠΙΣΤΕΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

### 3.1 Εισαγωγή

Στο λειτουργικό διάγραμμα του σχήματος 3.1 παρουσιάζονται τα διαδοχικά στάδια μέτρησης των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων. Οι εντοπιστές σφαλμάτων, όταν λειτουργούν ως ανεξάρτητες διατάξεις καταγραφής συμβάντων ή όταν ενσωματώνονται σε ψηφιακούς Η/Ν προστασίας, συνδέονται στα τερματικά σημεία των γραμμών μεταφοράς που επιτηρούν μέσω μετασχηματιστών τάσης (MT) και έντασης (ME). Οι MT και ME υποβιβάζουν τις τριφασικές τάσεις και εντάσεις στα σημεία σύνδεσης των εντοπιστών σφαλμάτων σε επίπεδα που επιτρέπουν την απευθείας μέτρησή τους. Οι ονομαστικές τάσεις και εντάσεις στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών μέτρησης είναι συνήθως 100 ή 110 V (για την τάση) και 1 ή 5 A (για την ένταση) αντίστοιχα. Στη συνέχεια, τα σήματα αυτά διαβιβάζονται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας των εντοπιστών σφαλμάτων μέσω των μετασχηματιστών απομόνωσης (MA). Οι MA παρέχουν ηλεκτρική απομόνωση από τα κυκλώματα ισχύος και στις εξόδους τους παράγουν το χαμηλού επιπέδου σήμα τάσης (της τάξης των  $\pm 5$  ή  $\pm 10$  V) για κάθε μετρούμενο μέγεθος, το οποίο ψηφιοποιείται μέσω ενός μετατροπέα A/D ([14], [264]). Πριν τη μετατροπή τους από αναλογικά σε ψηφιακά, τα σήματα των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων διέρχονται μέσα από ένα αναλογικό αντιαναδιπλωτικό φίλτρο, προκειμένου να απομακρυνθεί τυχόν υψίσυχνος θόρυβος που μπορεί να προκαλέσει αναδίπλωση των σημάτων κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας. Τέλος, στην έξοδο των A/D μετατροπέων λαμβάνονται τα δείγματα των μετρούμενων σημάτων, που χρησιμοποιούνται από εξειδικευμένους αλγόριθμους ψηφιακής επεξεργασίας, προκειμένου να εκτιμηθούν κρίσιμες παράμετροι του προβλήματος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος (π.χ. εκτίμηση φασιθετών θεμελιώδους συχνότητας των μετρούμενων σημάτων, εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς κτλ.).

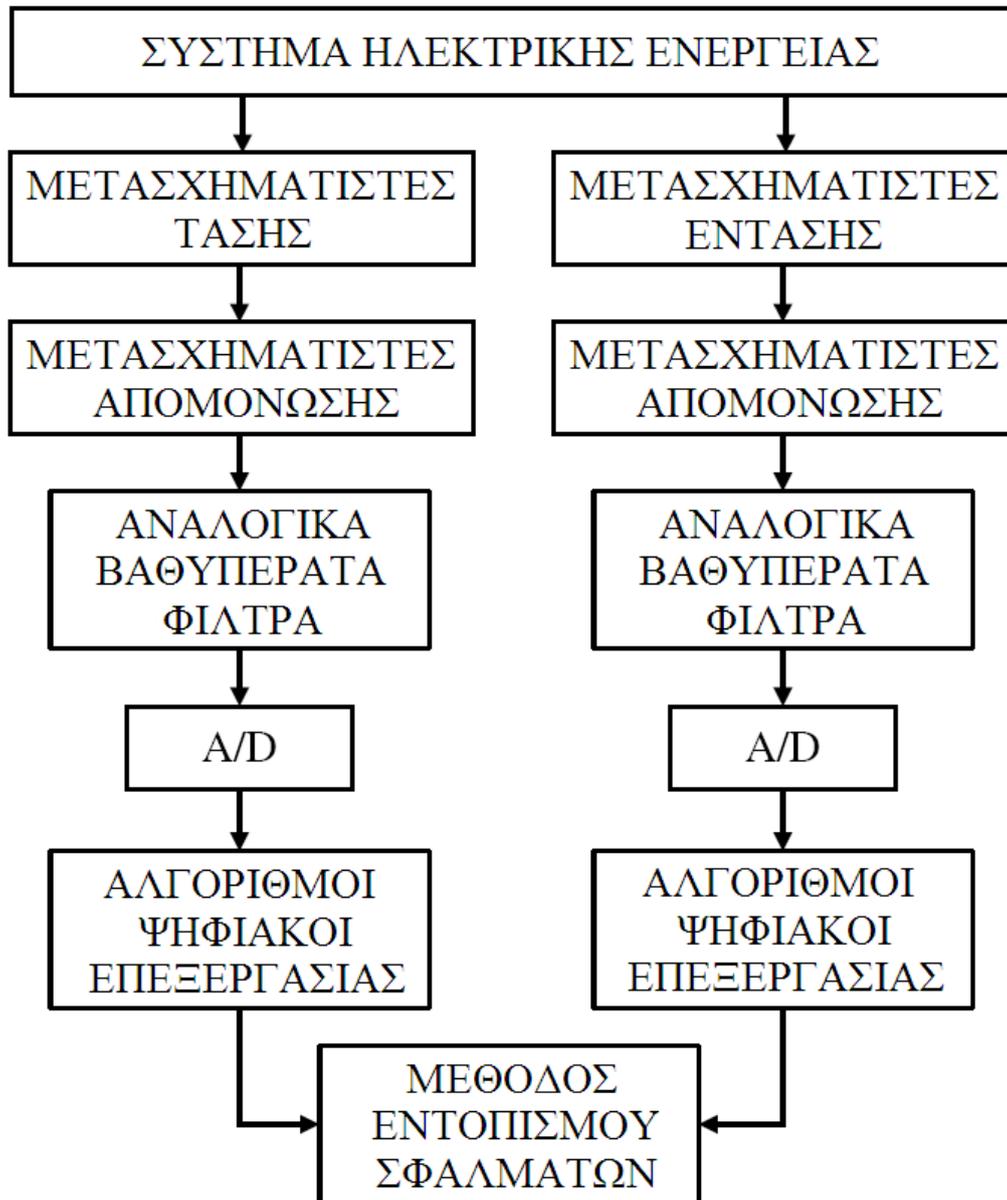
Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, καθένα από τα στάδια μέτρησης των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων μπορεί να επηρεάσει σε διαφορετικό βαθμό την ακρίβεια υπολογισμού της θέσης του σφάλματος. Τη μεγαλύτερη επίδραση έχουν οι MT και ME, οι οποίοι λόγω κατασκευαστικών περιορισμών εμφανίζουν, συχνά, ανεπιθύμητη μεταβατική συμπεριφορά κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα. Γενικότερα, η ακρίβεια με την οποία οι MT και ME μετασχηματίζουν τα προς μέτρηση μεγέθη, τόσο κατά τη μόνιμη όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος ([3], [101], [176], [189], [207], [245]). Για το λόγο αυτό καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια σε ερευνητικό επίπεδο να αντισταθμιστούν ή να περιοριστούν στο ελάχιστο τα σφάλματα που προέρχονται από τους μετασχηματιστές μέτρησης.

Στις επόμενες ενότητες, γίνεται μια συνοπτική αναφορά σε καθένα από τα επιμέρους στάδια μέτρησης του σχήματος 3.1 και αναγνωρίζονται οι παράγοντες εκείνοι που συμβάλλουν περισσότερο στην ποιότητα αναπαραγωγής των πρωτογενών σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων.

### 3.2 Χωρητικοί μετασχηματιστές τάσης

Στα δίκτυα υψηλής και υπερυψηλής τάσης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για εφαρμογές προστασίας, ελέγχου και μετρήσεων χωρητικοί MT (capacitor voltage transformers – CVTs) καθώς αποτελούν μια αποτελεσματική και συνάμα οικονομική λύση. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός χωρητικού MT, στο οποίο έχουν παραληφθεί οι ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων

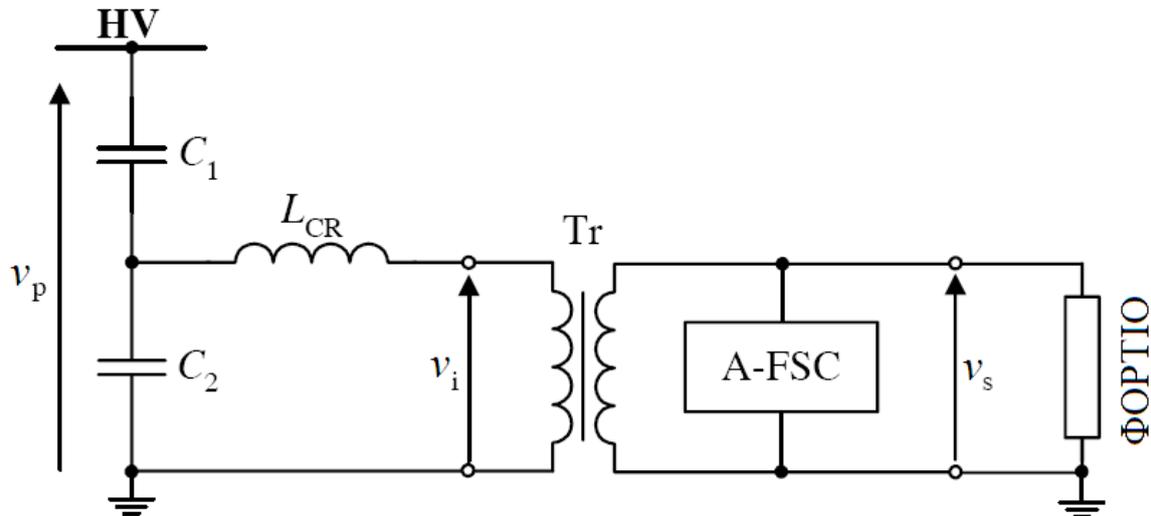
καθώς και οι σκεδάσεις του δευτερεύοντος. Στο Σχήμα 3.2, εκτός από τις τάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος,  $v_p$  και  $v_s$  αντίστοιχα, φαίνεται και η ενδιάμεση τάση  $v_i$ , που είναι συνήθως της τάξης των 20 kV.



Σχήμα 3.1 Διαδοχικά στάδια μέτρησης των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων

Εκτός από τα σφάλματα μόνιμης κατάστασης που παρουσιάζουν οι χωρητικοί ΜΤ, τα οποία αναγράφονται στα ονομαστικά τους χαρακτηριστικά και εκφράζονται με βάση την κλάση ακριβείας τους (Πίνακας 3.1), εμφανίζουν και σφάλματα κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, τα οποία μάλιστα είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια. Η μεταβατική συμπεριφορά των χωρητικών ΜΤ καθορίζεται από δύο κυρίως παράγοντες ([94], [124]):

- Τις μη γραμμικές ταλαντώσεις που εμφανίζονται κατά τον κορεσμό του μαγνητικού πυρήνα του επαγωγικού μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης των χωρητικών ΜΤ.
- Την εκφόρτιση της συσσωρευμένης εσωτερικής ενέργειας στους χωρητικούς ΜΤ κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων στις συνδεδεμένες γραμμές μεταφοράς.



Σχήμα 3.2 Σχηματικό διάγραμμα ενός χωρητικού MT:  $C_1$ ,  $C_2$  – συστοιχίες πυκνωτών (stack capacitors) ,  $L_{CR}$  – πηνίο αντιστάθμισης (compensation reactor),  $Tr$  – επαγωγικός μετασχηματιστής υποβιβασμού τάσης (inductive step-down transformer), A-FSC – κύκλωμα καταστολής σιδηροσυντονισμού (anti-ferroresonance suppressing circuit), αντίσταση του τροφοδοτούμενου φορτίου (burden)

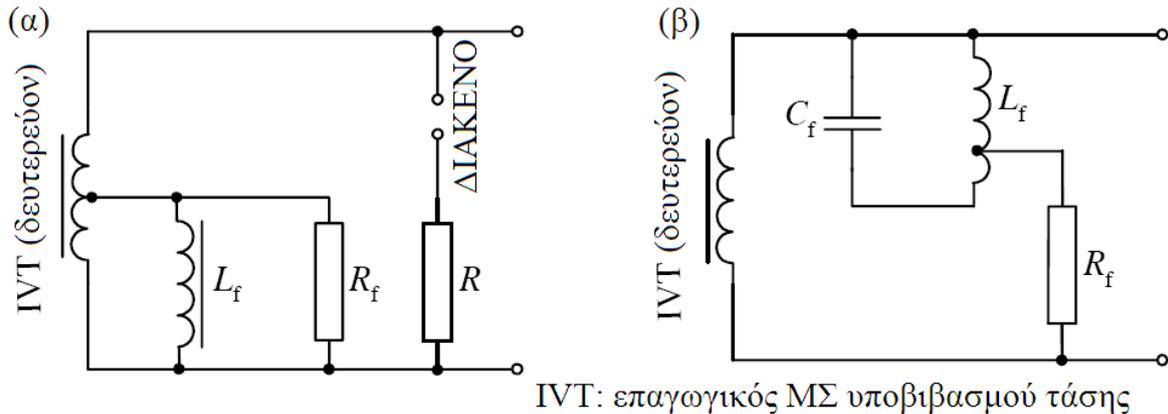
Πίνακας 3.1 Κλάσεις ακριβείας χωρητικών MT

Κλάση ακριβείας χωρητικών MT	Μέγιστο σφάλμα στο μέτρο της τάσης	Μέγιστο σφάλμα στη γωνία της τάσης
Κλάση 1	$\pm 1\%$	$\pm 0.67^\circ$
Κλάση 2	$\pm 2\%$	$\pm 1.33^\circ$

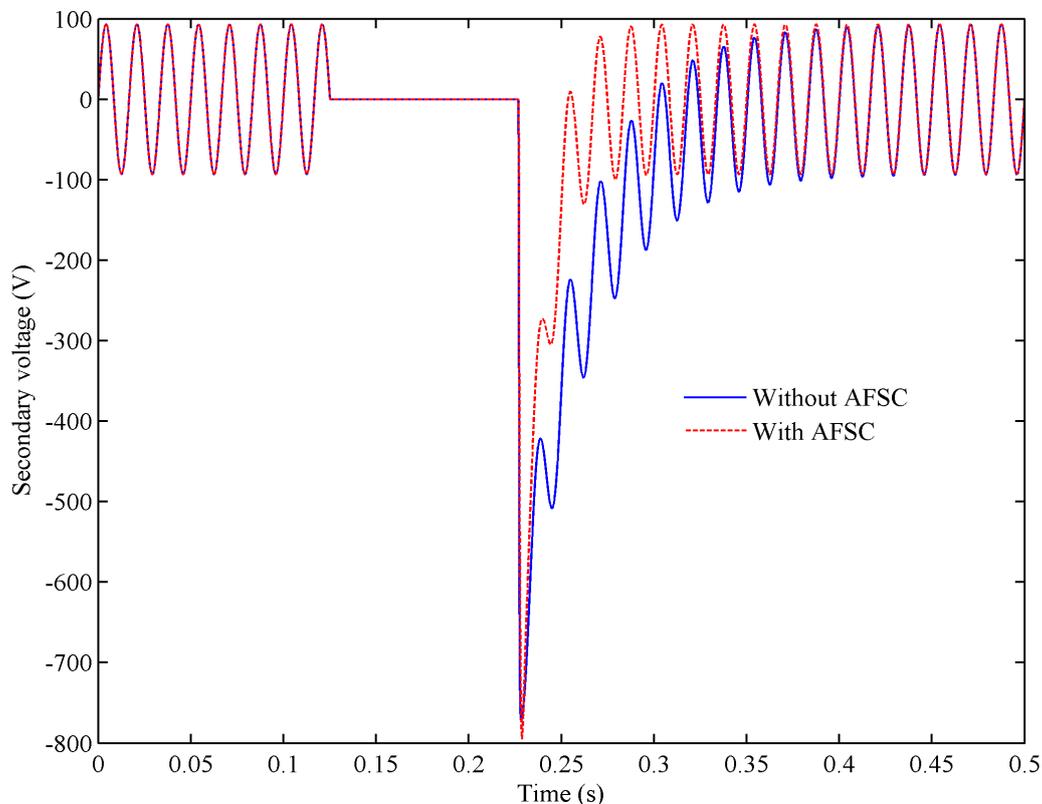
Οι μη γραμμικές ταλαντώσεις παρουσιάζονται όταν το σημείο λειτουργίας της χαρακτηριστικής μαγνήτισης του επαγωγικού μετασχηματιστή υποβιβασμού τάσης ολισθήσει στην περιοχή κορεσμού. Για το λόγο αυτό, οι χωρητικοί MT είναι εφοδιασμένοι με ειδικά κυκλώματα καταστολής του σιδηροσυντονισμού (anti-ferroresonance suppression circuits – FSCs) (Σχήμα 3.3) που αποτρέπουν τη σταθεροποίηση των παραγόμενων υποαρμονικών συχνοτήτων και εξασφαλίζουν γρήγορη και αποτελεσματική απόσβεση των ταλαντώσεων ([128], [246]). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται οι τάσεις εξόδου ενός χωρητικού MT κατά τη διακοπή ενός βραχυκυκλώματος στο δευτερεύον τύλιγμα, οι οποίες έχουν προκύψει από προσομοιώσεις με το πρόγραμμα υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP. Ο διακόπτης που εξομοιώνει το σφάλμα στην προσομοίωση κλείνει τη χρονική στιγμή  $t_c = 125$  ms και παραμένει κλειστός για έξι κύκλους, οπότε το βραχυκύκλωμα εκκαθαρίζεται. Η μπλε κυματομορφή (συνεχής γραμμή) αντιστοιχεί στην περίπτωση που ο χωρητικός MT δε διαθέτει κύκλωμα καταστολής του σιδηροσυντονισμού. Μπορεί να παρατηρηθεί κανείς ότι οι παραγόμενες ταλαντώσεις διατηρούνται μέχρι τη χρονική στιγμή  $t_c = 400$  ms, οπότε και επιτυγχάνεται σταθεροποίηση. Η κόκκινη κυματομορφή (διακεκομμένη γραμμή) παριστάνει την περίπτωση όπου το κύκλωμα καταστολής του σιδηροσυντονισμού έχει συμπεριληφθεί στο μοντέλο του MT. Είναι εμφανές από το Σχήμα 3.4 ότι οι ταλαντώσεις αποσβένονται σε χρόνο λιγότερο από 75 ms, γεγονός που καταδεικνύει το σωστό σχεδιασμό του κυκλώματος FSC.

Παρόλη τη θετική τους συμβολή στην απόσβεση των μη γραμμικών ταλαντώσεων, τα κυκλώματα καταστολής του σιδηροσυντονισμού επηρεάζουν τη μεταβατική συμπεριφορά των χωρητικών MT. Η εκφόρτιση της εσωτερικής ενέργειας των χωρητικών MT (που βρίσκεται συσσωρευμένη τόσο στις συστοιχίες πυκνωτών όσο και στο πηνίο αντιστάθμισης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος), στο βαθμό που αυτή καθορίζεται από τη βύθιση τάσης που προκαλείται από το σφάλμα στο πρωτεύον κύκλωμα, προκαλεί σημαντική παραμόρφωση στην κυματομορφή της τάσης στο δευτερεύον των χωρητικών MT.

Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της τάσης στο πρωτεύον, τόσο πιο έντονα είναι τα μεταβατικά φαινόμενα που προέρχονται από τους χωρητικούς ΜΤ (Σχήματα 3.5 και 3.6). Συγκεκριμένα, τα βραχυκυκλώματα που εκδηλώνονται στο σημείο μηδενισμού της τάσης πρωτεύοντος προκαλούν σημαντικά σφάλματα στη μεταβατική απόκριση των ΜΤ και, συνεπώς, επηρεάζουν τη λειτουργία τόσο των Η/Ν προστασίας όσο και των εντοπιστών σφαλμάτων που αυτοί τροφοδοτούν. Τα μεταβατικά φαινόμενα των χωρητικών ΜΤ προκαλούνται είτε από μεταβολές της λειτουργικής κατάστασης του ηλεκτρικού δικτύου, είτε από προγραμματισμένους χειρισμούς διακοπών, είτε από εκδήλωση σφαλμάτων στο δίκτυο.



Σχήμα 3.3 Παραδείγματα κυκλωμάτων καταστολής σιδηροσυντονισμού (FSC): (α) παθητικό φίλτρο (passive PFSC), (β) ενεργό φίλτρο (active AFSC)

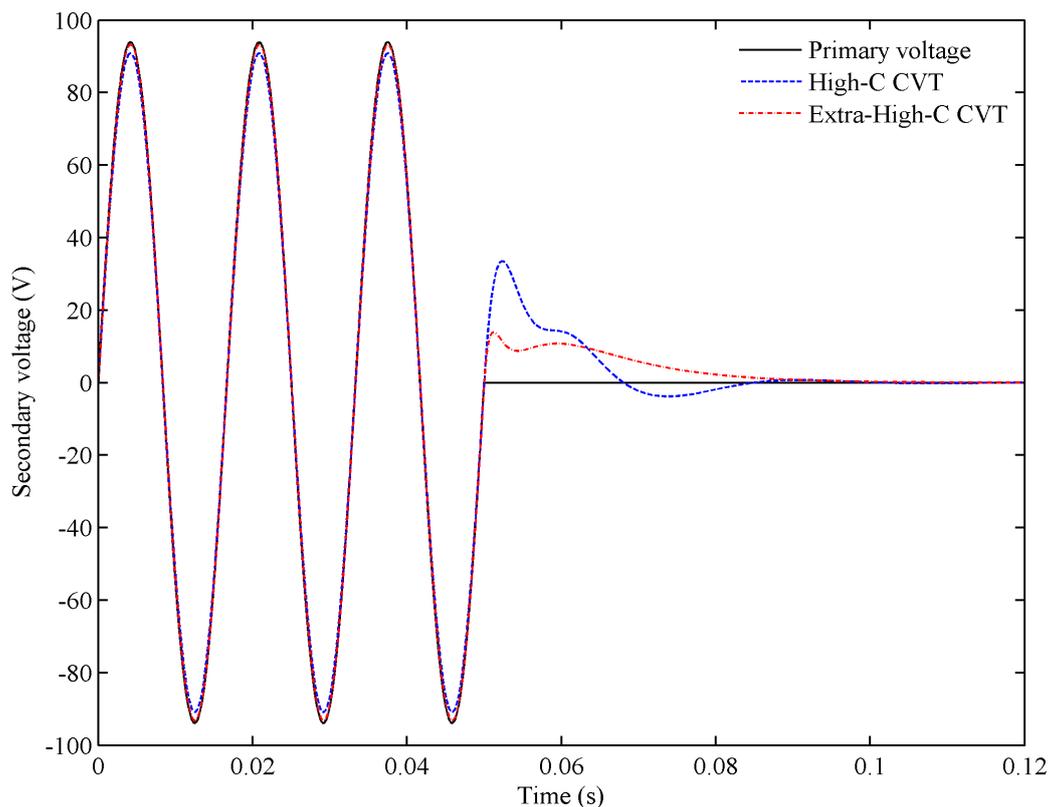


Σχήμα 3.4 Κυματομορφή της τάσης εξόδου χωρητικού ΜΤ κατά τη διακοπή βραχυκυκλώματος στο δευτερεύον του: (—) χωρίς φίλτρο AFSC, (---) με φίλτρο AFSC

Μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων των χωρητικών ΜΤ, εκείνες που συμβάλλουν περισσότερο στη δημιουργία μεταβατικών φαινομένων είναι οι χωρητικότητες των συστοιχιών πυκνωτών που συνθέτουν το διαιρέτη τάσης στο ισοδύναμο κύκλωμα των χωρητικών ΜΤ. Στην εργασία [124] διακρίνονται δύο τύποι χωρητικών ΜΤ:

- “high-C-CVT” – το άθροισμα των χωρητικοτήτων των συστοιχιών πυκνωτών είναι μικρότερο από 100 nF.
- “extra high-C-CVT” – το άθροισμα των χωρητικοτήτων των συστοιχιών πυκνωτών είναι μεγαλύτερο από 100 nF.

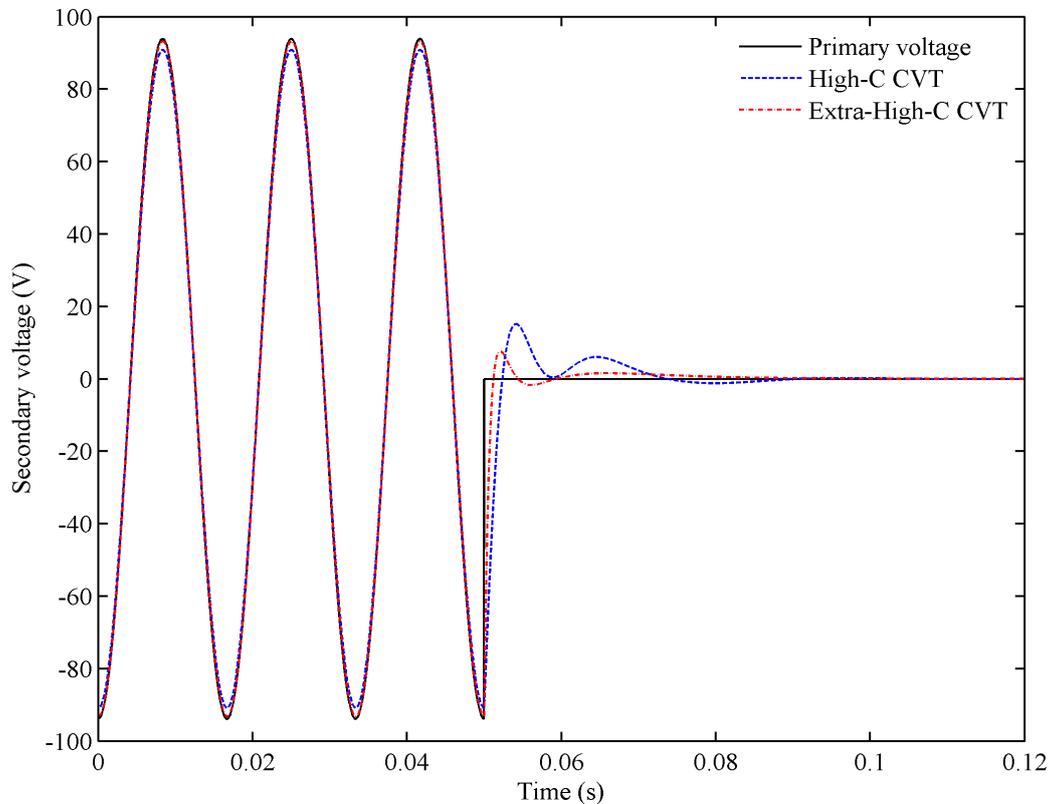
Στα σχήματα 3.5 και 3.6 απεικονίζονται τυπικές μεταβατικές αποκρίσεις των χωρητικών ΜΤ. Αναλυτική παρουσίαση των παραγόμενων μεταβατικών αποκρίσεων δίνεται στην εργασία [124]. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η περίπτωση στην οποία η τάση πρωτεύοντος «βυθίζεται» από την ονομαστική της τιμή στο μηδέν (π.χ. για ένα σφάλμα χωρίς αντίσταση ακριβώς μπροστά στο σημείο σύνδεσης του χωρητικού ΜΤ στη γραμμή μεταφοράς), όταν η κυματομορφή της διέρχεται από το σημείο μηδέν (zero-crossing). Η τάση στο δευτερεύον του χωρητικού ΜΤ τείνει επίσης στο μηδέν, αφότου όμως πρώτα εκλυθεί η συσσωρευμένη εσωτερική ενέργεια στο χωρητικό ΜΤ. Η μορφή της παραγόμενης τάσης κατά τη μεταβατική περίοδο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή των χωρητικοτήτων των συστοιχιών πυκνωτών. Στην περίπτωση χωρητικού ΜΤ τύπου “high-C”, η παραγόμενη τάση φτάνει περίπου μέχρι το 40% της ονομαστικής της τιμής, ενώ για τον τύπο “extra high-C” δεν ξεπερνά το 20%. Σε κάθε περίπτωση το μεταβατικό φαινόμενο δε διαρκεί περισσότερο από δύο κύκλους.



**Σχήμα 3.5** Μεταβατική απόκριση χωρητικών ΜΤ τύπου: (---) high-C και (---) extra high-C όταν η τάση πρωτεύοντος μηδενίζεται διερχόμενη από το μηδέν

Στο Σχήμα 3.6 εικονίζεται η περίπτωση στην οποία η τάση πρωτεύοντος «βυθίζεται» από την ονομαστική της τιμή στο μηδέν (π.χ. για ένα σφάλμα χωρίς αντίσταση ακριβώς μπροστά στο σημείο σύνδεσης του χωρητικού ΜΤ), όταν η κυματομορφή της διέρχεται από την τιμή κορυφής (peak

value). Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η τάση εξόδου για κάθε τύπο χωρητικού MT στην περίπτωση αυτή τείνει πιο γρήγορα στο μηδέν.



**Σχήμα 3.6** Μεταβατική απόκριση χωρητικών MT τύπου: (---) high-C και (· · ·) extra high-C όταν η τάση πρωτεύοντος μηδενίζεται διερχόμενη από τη μέγιστη τιμή της

Προκειμένου να μειωθεί η επίδραση των μεταβατικών φαινομένων που προκαλούνται από τους χωρητικούς MT στη λειτουργία των H/N προστασίας και των εντοπιστών σφαλμάτων, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που αποσκοπούν είτε στην αντιστάθμιση αυτών των φαινομένων ([94], [128]) είτε στην αναγνώρισή τους και την άμεση λήψη αντιμέτρων [85].

### 3.3 Μετασχηματιστές έντασης

Οι ME (current transformers – CTs) υποβιβάζουν τις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τα κυκλώματα ισχύος σε επίπεδα που επιτρέπουν την απευθείας μέτρησή τους και είναι κυρίως της τάξης του 1 ή των 5 A. Τα ρεύματα στα δευτερεύοντα των ME σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι σχεδόν ευθέως ανάλογα με τα ρεύματα πρωτεύοντος. Τα σφάλματα μόνιμης κατάστασης των ME κατηγοριοποιούνται σε «σφάλματα ρεύματος» ή «λόγου μετασχηματισμού» και σε «σφάλματα γωνίας». Τα σφάλματα των ME, τόσο κατά τη μόνιμη όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, καλύπτονται επαρκώς από τα αναγνωρισμένα διεθνή πρότυπα, IEC και IEEE ([91], [87]).

Στο Σχήμα 3.7 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ME και τα ακόλουθα ηλεκτρικά μεγέθη:

$i_p, i_s$ : το ρεύμα πρωτεύοντος (ανηγμένο στο δευτερεύον) και δευτερεύοντος του ME

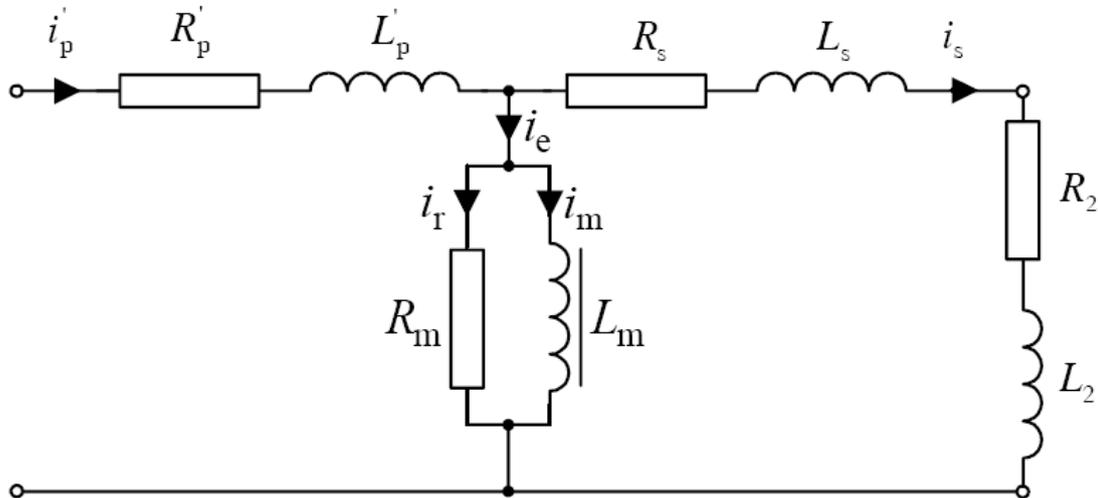
$i_e, i_r, i_m$ : το ρεύμα διέγερσης και η ενεργός και άεργος συνιστώσα του, αντίστοιχα

$R_p, L_p$ : η ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή σκεδάσεως στο πρωτεύον τύλιγμα του ME (ανηγμένες στο δευτερεύον)

$R_s, L_s$  : η ωμική αντίσταση και αυτεπαγωγή σκεδάσεως στο δευτερεύον τύλιγμα του ΜΕ

$R_m, L_m$  : η ωμική αντίσταση που εκφράζει τις απώλειες του μαγνητικού κυκλώματος του πυρήνα του ΜΕ και η μη γραμμική αυτεπαγωγή μαγνήτισης, αντίστοιχα

$R_2, L_2$  : η ωμική αντίσταση και επαγωγική αντίδραση του φορτίου του ΜΕ



**Σχήμα 3.7** Ισοδύναμο κύκλωμα ΜΕ (όλα τα μεγέθη αναφέρονται στο δευτερεύον τύλιγμα)

Οι ΜΕ σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε συνθήκες κανονικής φόρτισης, δηλαδή στο χαμηλότερο τμήμα της γραμμικής περιοχής της χαρακτηριστικής V-I του κλάδου μαγνήτισης. Το σημείο «γονάτου» (knee point) χωρίζει τη χαρακτηριστική μαγνήτισης στη γραμμική και τη μη γραμμική περιοχή. Η τάση «γονάτου» θεωρείται το σημείο της καμπύλης μαγνήτισης στο οποίο η αύξηση κατά 10% της μαγνητικής επαγωγής (τάση) προκαλεί αύξηση κατά 50% της έντασης του μαγνητικού πεδίου (ρεύμα). Για υψηλά ρεύματα βραχυκύκλωσης στο πρωτεύον κύκλωμα των ΜΕ χωρίς την ύπαρξη συνεχούς (DC) συνιστώσας, το σημείο λειτουργίας στη χαρακτηριστική μαγνήτισης παραμένει στη γραμμική περιοχή χωρίς να ξεπερνά το σημείο «γονάτου» της χαρακτηριστικής. Παρόλα αυτά, αν οι συνθήκες του σφάλματος είναι τέτοιες που ευνοούν την παρεμβολή DC συνιστώσας στο ρεύμα πρωτεύοντος, τότε λαμβάνει χώρα σημαντική αύξηση της μαγνητικής ροής στον πυρήνα των ΜΕ. Συνέπεια αυτού είναι ο κορεσμός του μαγνητικού πυρήνα. Επιπλέον, οι ΜΕ έχουν την ικανότητα να διατηρούν την παραμένουσα ροή στον πυρήνα τους και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος ([57], [116], [117], [261]). Η παραμένουσα ροή μπορεί να «αντιταχθεί» ή να συμβάλει στην εγκατάσταση μαγνητικής ροής στον πυρήνα των ΜΕ, ανάλογα με την πολικότητά της.

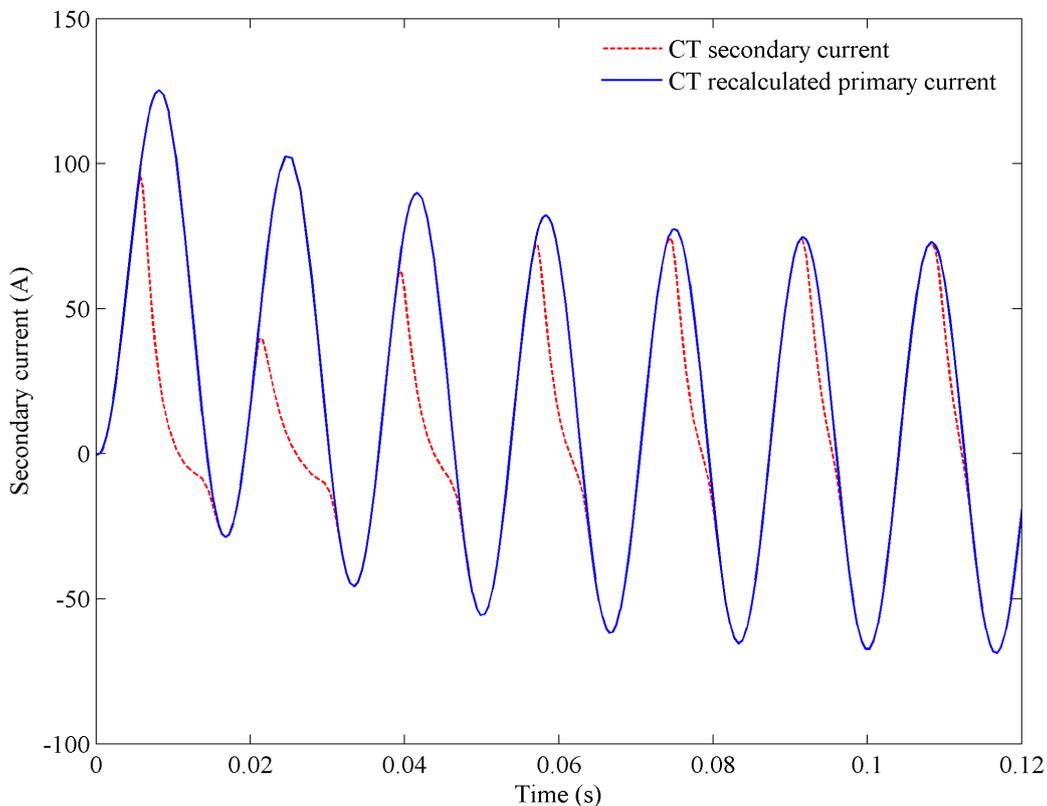
Όταν ένας ΜΕ κορένεται, το ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα του ΜΕ παραμορφώνεται και εμφανίζεται μεγάλο σφάλμα μετασχηματισμού. Στο Σχήμα 3.8 εικονίζονται οι κυματομορφές του ρεύματος πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ενός ΜΕ σε συνθήκες κορεσμού του μαγνητικού του πυρήνα. Οι κυματομορφές αυτές έχουν προκύψει από προσομοιώσεις ενός ΜΕ με το πρόγραμμα ATP/EMTP ([53], [262]). Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στο Σχήμα 3.8, υπάρχουν διαστήματα που το αναπαραγόμενο ρεύμα στο δευτερεύον του ΜΕ διαφέρει σημαντικά από το ρεύμα πρωτεύοντος. Εκτός από τον παροδικό κορεσμό, οι ΜΕ σε ορισμένες περιπτώσεις εμφανίζουν και μόνιμο κορεσμό. Στις περιπτώσεις αυτές, δεν υφίσταται πλέον γραμμική σχέση μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος στους ΜΕ.

Στην υπάρχουσα βιβλιογραφία παρατίθενται πολλές αναλύσεις για τη συμπεριφορά των ΜΕ, τόσο κατά τη μόνιμη όσο και κατά τη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας. Οι αναλύσεις αυτές εστιάζουν κυρίως στο πως οι παραμορφωμένες κυματομορφές των ρευμάτων στο δευτερεύον των ΜΕ μπορούν να προκαλέσουν ανεπιθύμητη ή καθυστερημένη λειτουργία των Η/Ν προστασίας, στο πως μπορεί να αποφευχθεί ο κορεσμός των ΜΕ και στο πως μπορούν να σχεδιαστούν αλγόριθμοι προστασίας που δεν επηρεάζονται από τα αποτελέσματα του κορεσμού ([28], [247]). Η επίδραση

του κορεσμού των ΜΕ στην ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του σφάλματος έχει επίσης αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας [245].

Τα μέτρα που λαμβάνονται για να εξασφαλιστεί ικανοποιητική ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος, κατά την εκδήλωση κορεσμού στους ΜΕ, περιλαμβάνουν:

- Τη χρήση υλικού (hardware) για την αποφυγή του κορεσμού.
- Τη χρήση μόνο σημάτων τάσης ([28], [29], [145], [175], [256]).
- Τη χρήση από κοινού σημάτων τάσης και έντασης, αλλά με αποκλεισμό των εντάσεων που προέρχονται από κορεσμένους ΜΕ.
- Την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων εκτίμησης της θέσης του σφάλματος που προκαλούνται από τον κορεσμό των ΜΕ και την εφαρμογή ψηφιακών τεχνικών για την ανακατασκευή του ρεύματος πρωτεύοντος των ΜΕ ([116], [118], [141], [189]).
- Τη χρήση σημάτων έντασης από κορεσμένους ΜΕ, που αντιστοιχούν όμως αποκλειστικά σε χρονικά διαστήματα όπου υφίσταται γραμμική σχέση μεταξύ των ρευμάτων πρωτεύοντος-δευτερεύοντος (δεν υπάρχει κορεσμός) [123].



**Σχήμα 3.8 Κορεσμός ΜΕ – κυματομορφή ρεύματος πρωτεύοντος (εκφρασμένη στο δευτερεύον) και δευτερεύοντος του ΜΕ**

Όλα τα παραπάνω μέτρα, εκτός από αυτά που αφορούν τη χρήση αποκλειστικά σημάτων τάσης, απαιτούν την ανίχνευση του κορεσμού των ΜΕ. Σε γενικές γραμμές, η ανίχνευση του κορεσμού γίνεται αναγνωρίζοντας τις χρονικές στιγμές έναρξης και λήξης του φαινομένου. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικοί ανιχνευτές κορεσμού (saturation detectors) σε πολλές εφαρμογές προστασίας, ελέγχου και μετρήσεων. Διακρίνονται δύο οικογένειες μεθόδων ανίχνευσης του κορεσμού των ΜΕ:

- Μέθοδοι βασισμένες στη χρήση υλικού (hardware based), στις οποίες ένα σήμα εξαιρετικά χαμηλής ισχύος και υψηλής συχνότητας υπερτίθεται στο δευτερεύον κύκλωμα των ΜΕ και

επιτηρεί την αυτεπαγωγή του πυρήνα (η τιμή αυτής της αυτεπαγωγής καθορίζει αν και σε ποιο βαθμό ο επιτηρούμενος ΜΕ είναι κορεσμένος).

- Μέθοδοι βασισμένες στην ανάλυση των κυματομορφών των ρευμάτων στο δευτερεύον των ΜΕ.

Πρέπει να τονιστεί ότι η σωστή επιλογή και διαστασιολόγηση των ΜΕ - κατά περίπτωση - μπορεί να περιορίσει σε μεγάλο βαθμό ή ακόμα και να αποτρέψει την εκδήλωση των ανεπιθύμητων μεταβατικών συμπεριφορών των ΜΕ που αναφέρθηκαν παραπάνω.

### 3.4 Αναλογικά αντιαναδιπλωτικά φίλτρα (Analog anti-aliasing filters)

Ο ρόλος των ΜΑ αναφέρθηκε στην εισαγωγική ενότητα 3.1. Οι ΜΑ δεν αλλοιώνουν τα αναλογικά σήματα στα δευτερεύοντα των ΜΤ και ΜΕ, αλλά τα μετατρέπουν σε σήματα χαμηλής ισχύος εφαρμόζοντας γραμμικούς μετασχηματισμούς. Η δειγματοληψία των αναλογικών σημάτων στις εξόδους των ΜΑ πραγματοποιείται με χρήση κυκλωμάτων συγκράτησης (sample & hold circuits).

Για να ισχύει το θεώρημα δειγματοληψίας του Shannon ([174], [228]), ο ρυθμός δειγματοληψίας  $f_s$  που εφαρμόζεται πρέπει να είναι διπλάσιος από τη μέγιστη συχνότητα  $f_{max}$  των σημάτων εισόδου. Αν χρησιμοποιηθεί μικρότερος ρυθμός δειγματοληψίας θα προκληθούν σφάλματα λόγω του φαινομένου της αναδίπλωσης (aliasing effect). Για το λόγο αυτό, στους Η/Ν προστασίας και στους εντοπιστές σφαλμάτων χρησιμοποιούνται - πριν τη δειγματοληψία - ειδικά φίλτρα που αποκόπτουν τις υψηλές συχνότητες των σημάτων εισόδου, με συνέπεια να μην μπορεί να ξεπεραστεί από κάποιες συχνότητες, παρούσες στα σήματα αυτά, η τιμή  $f_s/2$ , που θα είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαμηλών ανεπιθύμητων συχνοτήτων κατά την ανασύνθεση των σημάτων, οι οποίες θα αλλοίωναν ουσιαστικά τη φυσιογνωμία τους. Τα φίλτρα αυτά είναι αναλογικά, βαθυπερατά και είναι γνωστά ως αντιαναδιπλωτικά φίλτρα (anti-aliasing filters).

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζεται ένα απλό κύκλωμα RC, σε διάταξη βαθυπερατού φίλτρου, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιαναδιπλωτικό φίλτρο. Θεωρώντας ότι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου είναι άπειρη ( $Z_B \rightarrow \infty$ ), η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$G(s) = \frac{1}{(RC)^2 s^2 + 3RCs + 1} \quad (3.1)$$

Η συχνότητα αποκοπής  $f_c$  του αναλογικού βαθυπερατού φίλτρου ορίζεται ως:

$$|G_{AF}(j\omega_c)| = \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3.2)$$

όπου  $\omega_c = 2\pi f_c$ .

Συνδυάζοντας τις (3.1) και (3.2) προκύπτει:

$$\omega_c^4 (RC)^4 + 7\omega_c^2 (RC)^2 - 1 = 0 \quad (3.3)$$

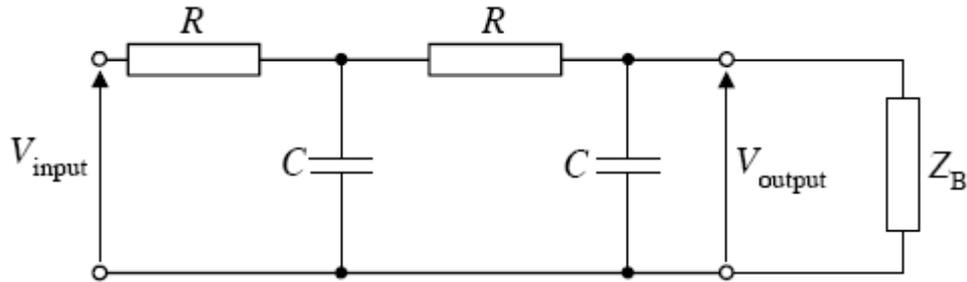
Επιλύοντας την (3.3) και επιλέγοντας τη λύση για  $(RC)^2 > 0$ , προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$RC = \frac{\sqrt{2\sqrt{53} - 14}}{4\pi f_c} \quad (3.4)$$

Η χρονική σταθερά  $RC$  μπορεί να υπολογιστεί από την (3.4), αφότου καθοριστεί η απαιτούμενη συχνότητα αποκοπής, η οποία επιλέγεται συνήθως στο διάστημα από το ένα τρίτο έως το μισό της συχνότητας δειγματοληψίας:

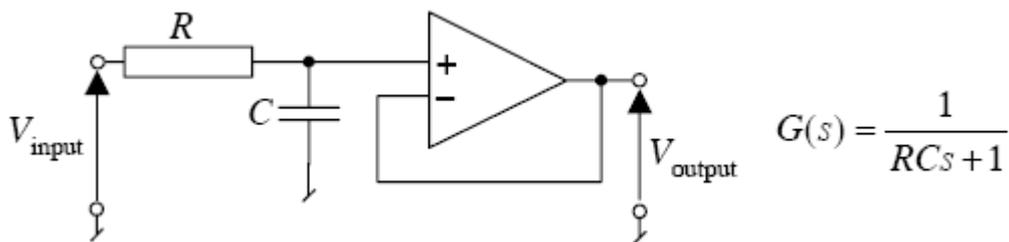
$$\frac{1}{3}f_s < f_c < \frac{1}{2}f_s \quad (3.5)$$

Στη γενικότερη περίπτωση, η τιμή της συχνότητας αποκοπής εξαρτάται και από την τάξη του φίλτρου.

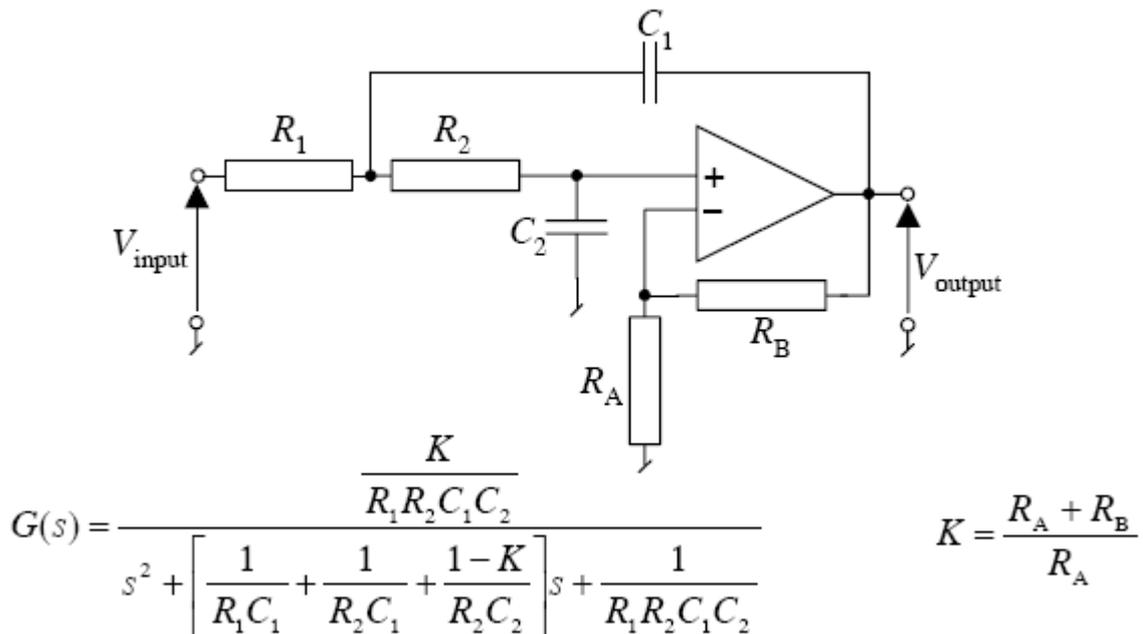


Σχήμα 3.9 Κύκλωμα RC σε διάταξη βαθυπερατού φίλτρου

Στα Σχήματα 3.10 και 3.11 εικονίζονται δύο βασικά δομικά blocks: κυκλώματα Sallen-Key με τελεστικούς ενισχυτές για την υλοποίηση των αναλογικών αντιαναδιπλωτικών φίλτρων και των συναρτήσεων μεταφορά τους [228].



Σχήμα 3.10 Βαθυπερατό φίλτρο Sallen-Key 1<sup>ης</sup> τάξης



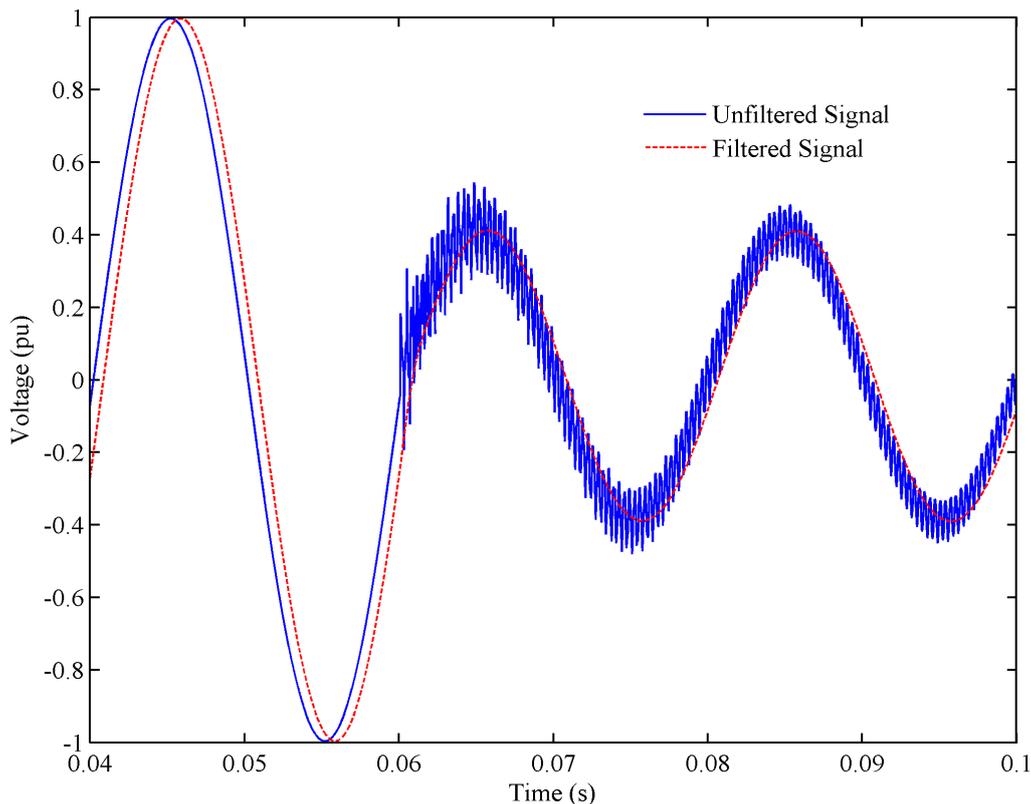
Σχήμα 3.11 Βαθυπερατό φίλτρο Sallen-Key 2<sup>ης</sup> τάξης

Χρησιμοποιώντας τα φίλτρα Sallen-Key 1<sup>ης</sup> (Σχήμα 3.10) και 2<sup>ης</sup> (Σχήμα 3.11) τάξης, μπορεί κανείς να κατασκευάσει αντιαναδιπλωτικά αναλογικά φίλτρα μεγαλύτερης τάξης. Αυτό μπορεί να

πραγματοποιηθεί επίσης, κάνοντας χρήση φίλτρων διακοπτόμενων πυκνωτών, τα οποία αποτελούνται από πυκνωτές και ηλεκτρονικούς διακόπτες.

Η σχεδίαση των αναλογικών αντιαναδιπλωτικών φίλτρων, με βάση την επιλεγείσα συχνότητα αποκοπής, απαιτεί την αντίστοιχη προσέγγιση της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου και της τάξης του. Τρεις τύποι αναλογικών φίλτρων χρησιμοποιούνται ευρέως: Butterworth, Chebyshev και Bessel [228]. Οι συναρτήσεις μεταφοράς τους προκύπτουν βελτιστοποιώντας διάφορες παραμέτρους λειτουργίας.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η επίδραση που έχει ένα αναλογικό βαθυπερατό φίλτρο Butterworth 2<sup>ης</sup> τάξης με συχνότητα αποκοπής 350 Hz στο σήμα εισόδου του. Το σήμα εισόδου είναι η φασική τάση μιας γραμμής μεταφοράς που υπόκειται σε σφάλμα. Όπως είναι εμφανές από το Σχήμα 3.12, το αναλογικό φίλτρο απομακρύνει με επιτυχία τις υψίσυχνες αρμονικές που εμφανίζονται στο σήμα εισόδου μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Παρόλα αυτά, όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς, υπάρχει μια μικρή καθυστέρηση μεταξύ του σήματος εισόδου και του φιλτραρισμένου σήματος. Η καθυστέρηση αυτή εκδηλώνεται ως μετατόπιση γωνίας στη μόνιμη κατάσταση. Από τη στιγμή που κάθε σήμα εισόδου διέρχεται από το ίδιο αντιαναδιπλωτικό φίλτρο, εξασφαλίζεται ότι η φασική απόκλιση μεταξύ των σημάτων εισόδου παραμένει σταθερή. Διατηρώντας τη συχνότητα αποκοπής σταθερά μεγαλύτερη από τη θεμελιώδη συχνότητα του συστήματος, ελαχιστοποιούνται σε μεγάλο βαθμό οι μεταβολές στην καθυστέρηση φάσης λόγω των διακυμάνσεων στις τιμές των στοιχείων που συνθέτουν το αναλογικό βαθυπερατό φίλτρο.



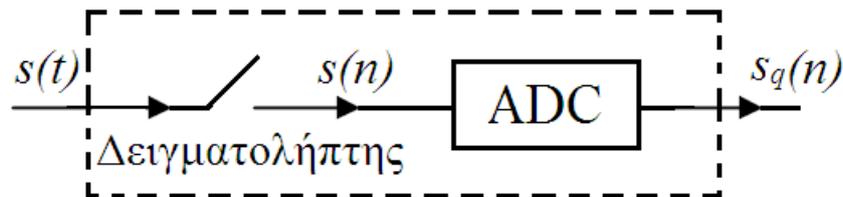
Σχήμα 3.12 Επίδραση αναλογικού αντιαναδιπλωτικού φίλτρου στο σήμα εισόδου

### 3.5 Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Για να ψηφιοποιηθεί ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα απαιτείται η χρήση ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος που καλείται μετατροπέας A/D. Η πρώτη επεξεργασία που επιδέχονται τα αναλογικά σήματα στην είσοδο των μετατροπέων A/D (ή αντίστοιχα στην έξοδο των αντιαναδιπλωτικών φίλτρων) είναι η δειγματοληψία (Σχήμα 3.23). Ο δειγματολήπτης (sampler), που είναι στην

πραγματικότητα ένα κύκλωμα συγκράτησης, μετατρέπει το σήμα συνεχούς χρόνου  $s(t)$  σε διακριτό,  $s(n)$ , κρατώντας τις τιμές του σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές και αγνοώντας τις υπόλοιπες. Αν αυτές οι χρονικές στιγμές επιλεγούν, ώστε να είναι ισαπέχουσες μεταξύ τους, έχουμε ομοιόμορφη δειγματοληψία. Η απόσταση μεταξύ των χρονικών στιγμών είναι γνωστή ως περίοδος  $T_s$  της δειγματοληψίας. Το στάδιο αυτό της διαδικασίας μετατροπής του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό θεωρείται ακριβές και δεν εισάγει σφάλματα.

Στο δεύτερο στάδιο του σχήματος 3.23, κάθε δείγμα της ακολουθίας  $s(n)$  εκφράζεται από έναν πεπερασμένο αριθμό bits, δημιουργώντας την ακολουθία  $s_q(n)$ . Η διαφορά μεταξύ των στοιχείων των ακολουθιών  $s_q(n)$  και  $s(n)$ ,  $E_{Ts}=s_q(n)-s(n)$ , καλείται σφάλμα κβαντοποίησης (quantizing error). Η διαδικασία κβαντοποίησης, καθώς μετατρέπει την αναλογική πληροφορία σε αριθμητική μορφή, προσεγγίζει τις τιμές του σήματος εισόδου είτε με αποκοπή είτε με στρογγυλοποίηση.



Σχήμα 3.13 Στάδια μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

### 3.5.1 Χαρακτηριστικά των μετατροπέων A/D

Τα κύρια χαρακτηριστικά των μετατροπέων A/D (analog-to-digital converters – ADCs), οι οποίοι κατασκευάζονται αποκλειστικά με τη μορφή ολοκληρωμένου κυκλώματος που περιέχει όλα τα δομικά τους μέρη, είναι ο αριθμός των bits εξόδου, ο χρόνος και το εύρος μετατροπής. Ο αριθμός των bits της ψηφιακής λέξης είναι συνήθως 8, 10, 12, 14 ή 16. Ο χρόνος μετατροπής εξαρτάται έντονα από την τεχνική υλοποίησης του μετατροπέα, και κυμαίνεται από λίγα ns έως 100δες μs. Το εύρος μετατροπής εκφράζει την περιοχή τιμών του αναλογικού σήματος εισόδου και καθορίζεται από την τάση αναφοράς. Το εύρος μετατροπής των μονοπολικών (unipolar) ADCs είναι συνήθως 0–5V και 0–10V και των διπολικών (bipolar)  $\pm 5V$  ή  $\pm 10V$ .

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του ιδανικού ADC με άπειρο αριθμό bits είναι μια ευθεία γραμμή, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 3.14 με τη διακεκομμένη γραμμή. Με συνεχή γραμμή παρουσιάζεται η απόκριση ενός ADC των 3bits. Εξαιτίας του πεπερασμένου αριθμού των bits εξόδου η αναλογική τάση εισόδου, η οποία λαμβάνει άπειρες τιμές, προσεγγίζεται από ένα συγκεκριμένο αριθμό επιπέδων. Επομένως, προκύπτει ιδανικά ένα σφάλμα ίσο με  $\pm 1/2$  LSB, το οποίο είναι το σφάλμα κβαντοποίησης. Αντίστοιχα, η διακριτική ικανότητα (resolution) του ADC είναι η ελάχιστη μεταβολή της τάσης εισόδου που προκαλεί αλλαγή της ψηφιακής εξόδου κατά 1LSB (least significant bit).

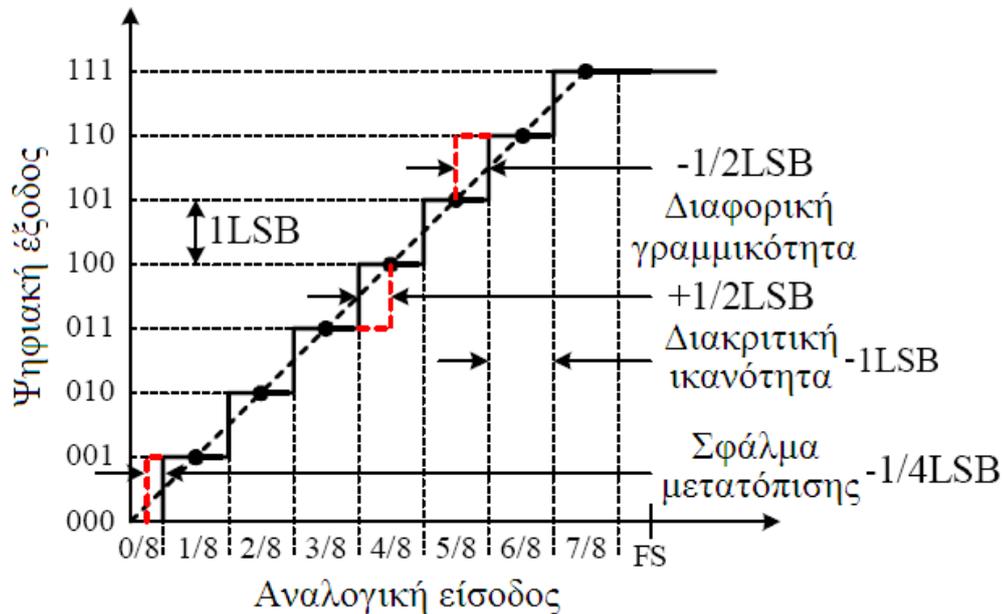
Η διαφορική γραμμικότητα (differential linearity) του ADC ορίζεται ως η μέγιστη απόκλιση της αναλογικής τάσης εισόδου, από την τάση που αντιστοιχεί στο 1LSB, ώστε να μεταβληθεί η ψηφιακή έξοδος κατά 1LSB. Το σφάλμα διαφορικής γραμμικότητας πρέπει να είναι μικρότερο από το  $\pm 1/2$  LSB και συχνά από το  $\pm 1/4$  LSB.

Η μονοτονικότητα (monotonicity) εκφράζει ότι ο ψηφιακός κώδικας εξόδου του ADC αυξάνεται ή μειώνεται αντίστοιχα όταν αυξάνεται (μειώνεται) το αναλογικό σήμα εισόδου. Η μονοτονικότητα του μετατροπέα δεν υφίσταται όταν το σφάλμα γραμμικότητας γίνει μεγαλύτερο από  $\pm 1/2$  LSB. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν κάποιοι ψηφιακοί κώδικες να μην εμφανίζονται στην έξοδο του ADC, για οποιαδήποτε τιμή της τάσης εισόδου (missing codes).

Το σφάλμα πλήρους κλίμακας (full scale error) είναι η διαφορά μεταξύ της τάσης εισόδου, η οποία έπρεπε να παρέχει ιδανικά το μέγιστο ψηφιακό κώδικα, και της πραγματικής τάσης που προκαλεί τη μέγιστη τιμή του κώδικα.

Το σφάλμα μετατόπισης (offset error) είναι η διαφορά μεταξύ της ιδανικής τάσης εισόδου ( $1/2$  LSB) και της πραγματικής τάσης εισόδου, η οποία προκαλεί τη μετάβαση της ψηφιακής εξόδου από

το 0 στο 1LSB (Σχήμα 3.14). Το σφάλμα μετατόπισης προκαλεί τη μετακίνηση ολόκληρης της χαρακτηριστικής μεταφοράς του ADC κατά την ίδια τιμή.



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστική μεταφοράς ιδανικού μονοπολικού μετατροπέα A/D (διακεκομμένη γραμμή) και ενός A/D τριών bits (συνεχής γραμμή)

### 3.5.2 Μοντέλο αναπαράστασης των μετατροπέων A/D στους εντοπιστές σφαλμάτων ([100], [141], [142])

Θεωρείται διπολικός ADC με εύρος μετατροπής  $\pm V_{AD}$ , στην είσοδο του οποίου εφαρμόζεται σήμα τάσης  $v$  Volts. Η κβαντοποιημένη τιμή  $Q_{AD}$  στην έξοδο του μετατροπέα A/D, αν  $v > 0$ , δίνεται από την (3.6):

$$Q_{AD} = Ron \left[ \frac{v(2^n - 1)}{V_{AD}} \right] \quad (3.6)$$

όπου ο τελεστής  $Ron$  αντιπροσωπεύει τη στρωγγυλοποίηση του ορίσματος. Αν  $v < 0$ , τότε η κβαντοποιημένη τιμή υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_{AD} = Ron \left[ \frac{(2V_{AD} - |v|)2^n}{V_{AD}} \right] \quad (3.7)$$

Ο κορεσμός του μετατροπέα A/D μοντελοποιείται επιλέγοντας την τιμή  $+V_{AD}$  για θετικές τιμές των σημάτων εισόδου που ξεπερνούν το εύρος μετατροπής, και την τιμή  $-V_{AD}$  για αρνητικές τιμές.

## 3.6 Αλγόριθμοι ψηφιακής επεξεργασίας

Οι αλγόριθμοι ψηφιακής επεξεργασίας, οι οποίοι εφαρμόζονται στα σήματα διακριτού χρόνου στην έξοδο των μετατροπέων A/D, είναι άρτια συνυφασμένοι με την αναπαράσταση των μετρούμενων σημάτων-μεταβλητών στο κυκλωματικό μοντέλο της γραμμής μεταφοράς (και του εξωτερικού της δικτύου, αν λαμβάνεται υπόψη) σε σχέση με τη μέθοδο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος. Με βάση τη διαπίστωση αυτή, διακρίνονται δύο κύριες κατηγορίες αλγορίθμων:

- Οι αλγόριθμοι στο πεδίο της συχνότητας ή μη παραμετρικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι υπολογίζουν αποκλειστικά τους φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των σημάτων εισόδου. Οι περισσότερες μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων βασίζονται σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων [193]. Οι φασιθέτες είναι βασικά εργαλεία ανάλυσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων εναλλασσομένου ρεύματος (AC). Σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν σε μιγαδική μορφή τις ημιτονοειδείς συναρτήσεις των τάσεων και των εντάσεων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Ακόμα, όμως, και όταν το ηλεκτρικό δίκτυο δε βρίσκεται στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση, οι φασιθέτες αποδεικνύονται εξαιρετικά χρήσιμοι στο να περιγράψουν τη συμπεριφορά του. Για παράδειγμα, όταν το ηλεκτρικό δίκτυο υφίσταται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, η συχνότητα του δε διατηρείται σταθερή και οι φασιθέτες με την κλασική τους έννοια δεν μπορούν να εφαρμοστούν για να αναπαραστήσουν τα ηλεκτρικά μεγέθη. Εντούτοις, επειδή στις συνθήκες αυτές οι μεταβολές των τάσεων και των εντάσεων είναι σχετικά αργές, οι φασιθέτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν τη λειτουργία του δικτύου προσεγγίζοντας τις μεταβολές αυτές ως μια ακολουθία διαδοχικών μονίμων καταστάσεων («οιονεί» στατική ανάλυση). Επιπλέον, σχετικά πρόσφατα [177], αναγνωρίστηκε ότι οι φασιθέτες – υπό προϋποθέσεις - μπορούν να βρουν εφαρμογή ακόμα και όταν οι κυματομορφές των θεωρούμενων τάσεων και εντάσεων μεταβάλλονται πολύ γρήγορα συναρτήσει του χρόνου, σε περιπτώσεις γρήγορων μεταβατικών φαινομένων. Έτσι, στους αλγορίθμους προστασίας και εντοπισμού σφαλμάτων, γίνεται συχνά λόγος για φασιθέτες που αντιστοιχούν σε χρόνο παραθύρου επεξεργασίας ίσο με έναν πλήρη κύκλο, και οι υπολογισμοί που γίνονται με βάση τη θεώρηση αυτή βρίσκονται σε πλήρη εναρμόνιση με την ευρέως εννοούμενη σημασία του φασιθέτη ([42], [68]).
- Οι αλγόριθμοι στο πεδίο του χρόνου ή παραμετρικοί αλγόριθμοι, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με την κλασική θεωρία κυκλωμάτων, όπου τα μεταβατικά φαινόμενα περιγράφονται από ένα σύνολο αλγεβρικών (που αντιστοιχούν στους νόμους του Kirchhoff) και διαφορικών (που αναπαριστούν τα μαθηματικά μοντέλα των στοιχείων του κυκλώματος) εξισώσεων. Στο πεδίο του διακριτού χρόνου, οι διαφορικές εξισώσεις αντικαθίστανται από εξισώσεις διαφορών. Μια τέτοια προσέγγιση είναι η πλέον κατάλληλη για τη σωστή αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των κυκλωμάτων.

### 3.6.1 Υπολογισμός των φασιθετών

Για τον υπολογισμό των φασιθετών των μετρούμενων σημάτων, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος, έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι ψηφιακής επεξεργασίας. Οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Αλγόριθμοι που βασίζονται στη χρήση ψηφιακών φίλτρων, πεπερασμένης (FIR) ή άπειρης (IIR) κρουστικής απόκρισης, με κύριους εκφραστές τα FIR φίλτρα συνημιτόνου και ημιτόνου, που υπολογίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, της συνιστώσας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT) στη θεμελιώδη συχνότητα για κάθε ακολουθία διαδοχικών δειγμάτων των μετρούμενων σημάτων ([108], [174], [179], [192], [228]).
- Αλγόριθμοι ελαχίστων τετραγώνων (αναδρομικοί ή μη) ([108], [179], [182], [192], [250]).
- Αλγόριθμοι βασισμένοι στο φίλτρο Kalman ([62], [66]).
- Αλγόριθμοι με χρήση του μετασχηματισμού Fourier βραχέος χρόνου (STFT) και του μετασχηματισμού κυματιδίων (Wavelet transform) ([2], [31], [32], [34], [77], [83], [110], [133], [134], [157], [190], [225], [251], [258]).

Στην ενότητα αυτή, εξετάζονται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier και οι παραλλαγές του, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις περισσότερες εμπορικές εφαρμογές ψηφιακών H/N και εντοπιστών σφαλμάτων.

### 3.6.1.1 Ψηφιακό φιλτράρισμα

Ψηφιακό φιλτράρισμα καλείται η διαδικασία επεξεργασίας των διαδοχικών δειγμάτων που προκύπτουν από το στάδιο της δειγματοληψίας, προκειμένου να προκύψουν οι ψηφιακές ποσότητες, που αναπαριστούν τους φασιθέτες των σημάτων εισόδου. Υπάρχουν δύο τύποι ψηφιακών φίλτρων: τα φίλτρα άπειρης κρουστικής απόκρισης (infinite impulse response – IIR) και τα φίλτρα πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (finite impulse response – FIR). Τα φίλτρα IIR είναι αναδρομικά και χρησιμοποιούν ως εισαγόμενες τιμές και προηγούμενες εξαγόμενες τιμές, όπως μαρτυρά η εξίσωση (3.8). Τα φίλτρα FIR εκτελούν τον αλγόριθμο που υπαγορεύεται από την (3.9), όπου η έξοδος  $y_n$  του φίλτρου εξαρτάται μόνο από τις τρέχουσες και προηγούμενες τιμές των δειγμάτων εισόδου  $x_i$ . Η διαδικασία καθορισμού των συντελεστών βάρους  $b_i$  και  $a_i$ , με τους οποίους πολλαπλασιάζονται οι εισοδοί και οι προηγούμενες εξοδοί των φίλτρων αντίστοιχα, αναπτύσσεται λεπτομερώς στις ([38], [102]).

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_i b_i - \sum_{j=1}^{M-1} y_{(n-j)} a_j \quad (3.8)$$

$$y_n = \sum_{i=0}^{N-1} x_i b_i \quad (3.9)$$

Ανάλογα με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά απόκρισης, μπορεί κανείς να επιλέξει είτε FIR είτε IIR φίλτρα. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα των φίλτρων FIR είναι ότι παρουσιάζουν γραμμική απόκριση φάσης, με αποτέλεσμα να διατηρούν τη φασική σχέση των αρμονικών του σήματος για μεταβολές της συχνότητας, και συνεπώς τη μορφή του. Η ιδιότητα αυτή κάνει τα φίλτρα FIR πολύ ελκυστικά για εφαρμογές προστασίας και ελέγχου. Συγκεκριμένα, τα FIR φίλτρα συνημιτόνου και ημιτόνου, που υπολογίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, των φασματικών συνιστωσών (frequency-bins) του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, είναι τα πλέον κατάλληλα για τον προσδιορισμό της ενεργούς (RMS) τιμής και της φάσης ενός σήματος, συνιστάμενου από μία μόνο συχνότητα.

Αν στο σήμα εισόδου πραγματοποιείται σύγχρονη δειγματοληψία, δηλαδή ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας του σήματος, τότε η συνιστώσα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier στη θεμελιώδη συχνότητα υπολογίζεται από την εξίσωση (3.10), όπου  $N$  είναι ο αριθμός των δειγμάτων του σήματος εισόδου που λαμβάνονται σε κάθε περίοδο,  $k=1$  αντιστοιχεί στη θεμελιώδη συνιστώσα και  $n$  είναι ο δείκτης του γινομένου δείγματος-συντελεστή στο άθροισμα της (3.10). Ο όρος  $X_k$  αναπαριστά το φασιθέτη του σήματος εισόδου και είναι μία μιγαδική μεταβλητή, της οποίας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος υπολογίζονται από δύο FIR φίλτρα, που διέπονται από σχέση ορθογωνιότητας μεταξύ τους, σύμφωνα με τις (3.11)-(3.12). Ο φασιθέτης μπορεί επίσης να εκφραστεί σε πολική μορφή (μέτρο-γωνία) μέσω των (3.13)-(3.14).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n c_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.10)$$

$$\text{Re}(X_k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (3.11)$$

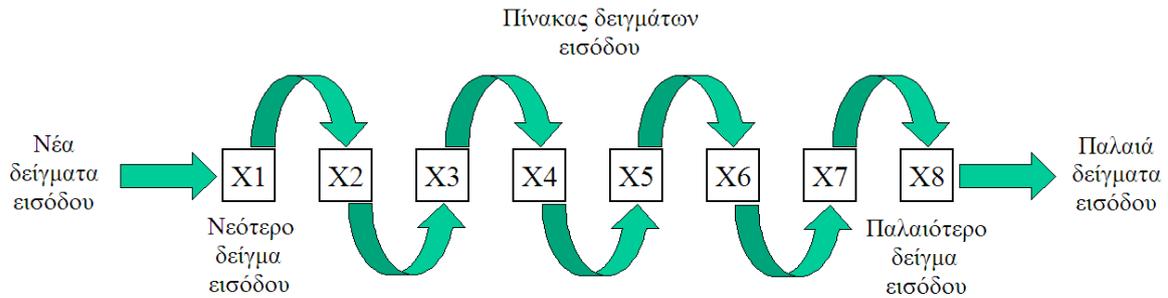
$$\text{Im}(X_k) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (3.12)$$

$$|X_k| = \sqrt{\text{Re}(X_k)^2 + \text{Im}(X_k)^2} \quad (3.13)$$

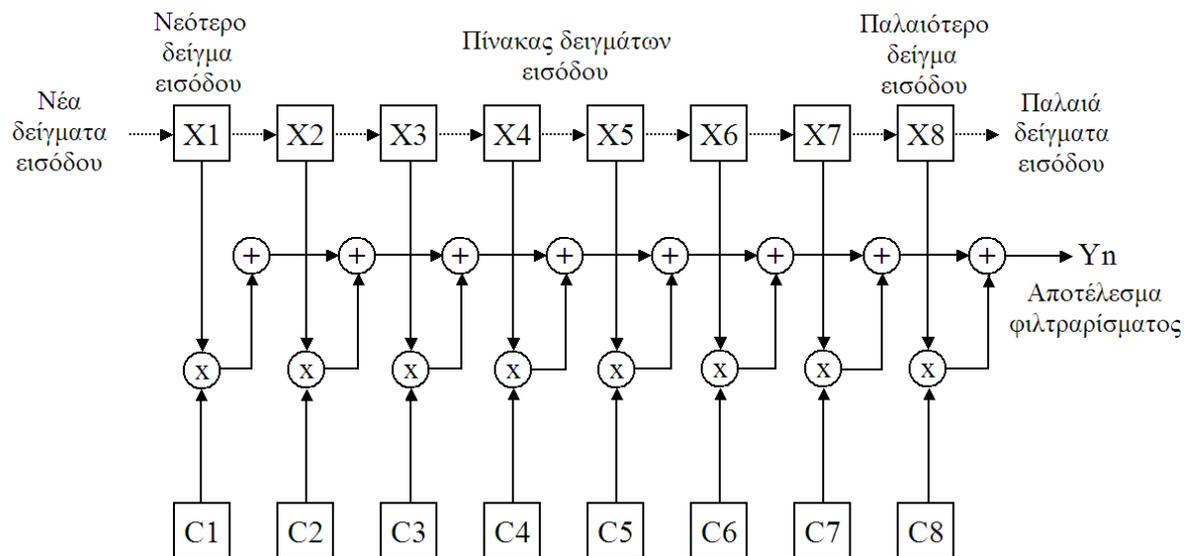
$$\angle X_k = \arctan(\text{Re}(X_k)/\text{Im}(X_k)) \quad (3.14)$$

Στα σχήματα 3.15 και 3.16 παρουσιάζεται η διαδικασία του ψηφιακού φιλτραρίσματος ως μια ακολουθία στιγμιαίων μετρήσεων μετακινούμενων σε διαδοχικά στοιχεία ενός πίνακα, τα οποία

συμβολίζουν τους καταχωρητές σε ένα υπολογιστικό σύστημα και αντιστοιχούν στον αριθμό  $N$  των δειγμάτων που λαμβάνονται για τα σήματα εισόδου σε κάθε περίοδο. Στο Σχήμα 3.15, η τελευταία χρονικά μέτρηση τοποθετείται στο αριστερό άκρο του πίνακα ενώ η παλιότερη μέτρηση απομακρύνεται. Τα ενδιάμεσα δείγματα μετακινούνται κατά μια θέση δεξιά στον πίνακα χωρίς να αλλοιώνεται η αλληλουχία τους. Ένας δεύτερος πίνακας, με τον ίδιο αριθμό στοιχείων, περιλαμβάνει τους συντελεστές του φίλτρου. Στο Σχήμα 3.16 φαίνεται πως παράγεται η έξοδος του φίλτρου  $Y_n$ , πολλαπλασιάζοντας τους συντελεστές του με τα αντίστοιχα χρονικά δείγματα και αθροίζοντάς τα.



Σχήμα 3.15 Διάγραμμα ροής-καταχώρησης των δειγμάτων στα στοιχεία του πίνακα

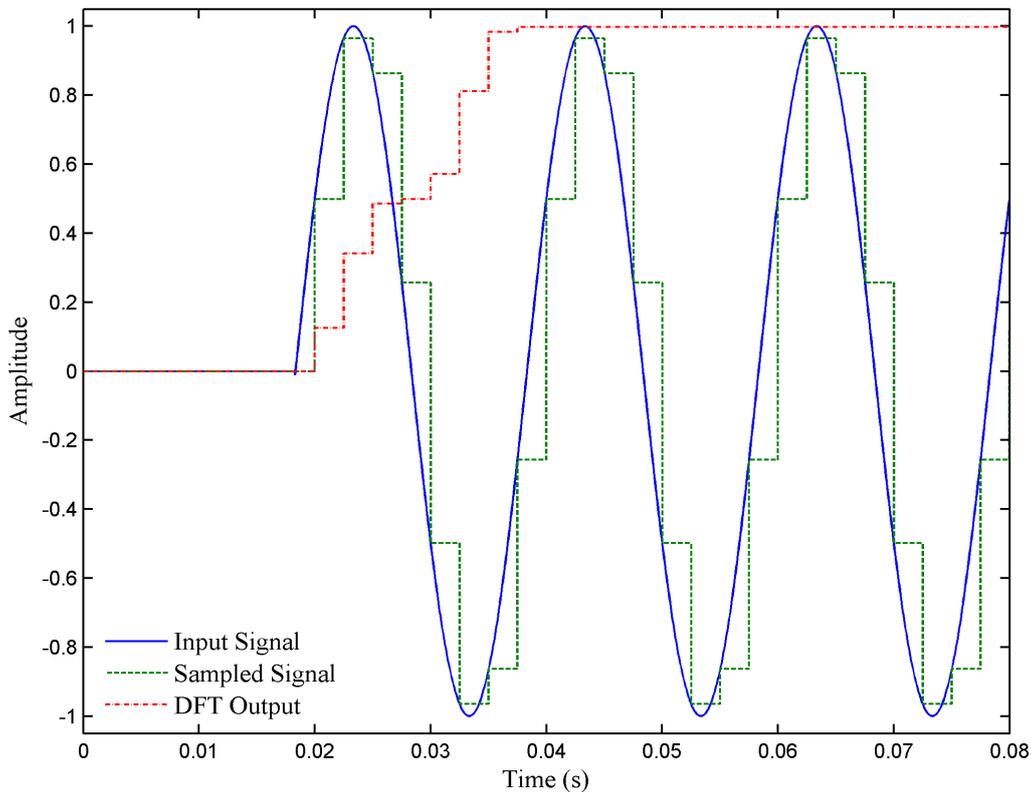


Σχήμα 3.16 Διάγραμμα της διαδικασίας ψηφιακού φιλτραρίσματος που περιγράφεται από την (3.10)

### 3.6.1.2 Μεταβατική απόκριση διακριτού μετασχηματισμού Fourier

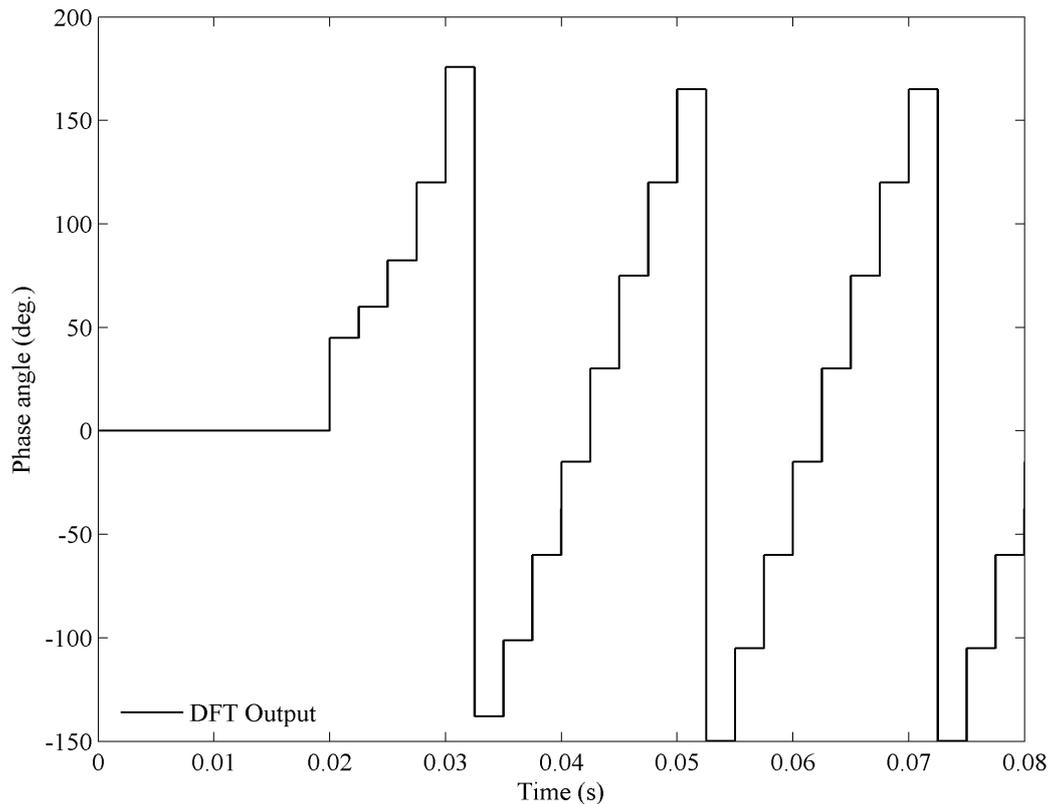
Η διαδικασία μετατροπής των διαδοχικών δειγμάτων σε φασιθέτες λειτουργεί πολύ ικανοποιητικά όσο τα σήματα εισόδου αντικατοπτρίζουν τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας - δηλαδή το μέτρο, η συχνότητα και η φασική γωνία τους διατηρούνται σταθερά - ή όταν μεταβάλλονται πολύ αργά σε σχέση με τη συχνότητα του συστήματος. Σε περίπτωση, όμως, που τα σήματα εισόδου μεταβαίνουν απότομα από μία μόνιμη κατάσταση σε μία άλλη, όπως συμβαίνει π.χ. κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων, τότε η έξοδος του διακριτού μετασχηματισμού Fourier μεταβάλλεται διαρκώς και δε σταθεροποιείται έως ότου τα στοιχεία του πίνακα στο Σχήμα 3.15 συμπληρωθούν εξ' ολοκλήρου από δείγματα που εκφράζουν τη νέα μόνιμη κατάσταση. Στο διάστημα της μετάβασης, τα αποτελέσματα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier δεν αποτελούν ακριβή αναπαράσταση του μέτρου και της γωνίας του σήματος εισόδου, το οποίο έχει ήδη φτάσει σε μόνιμη κατάσταση.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις φαίνονται στα σχήματα 3.17 και 3.18, όπου το σφάλμα στο ηλεκτρικό δίκτυο έχει μοντελοποιηθεί ως βηματική-ημιτονοειδής μεταβολή. Η συνιστώσα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier στη θεμελιώδη συχνότητα έχει υπολογιστεί για παράθυρο επεξεργασίας μήκους  $N=8$  δειγμάτων ανά κύκλο (DFT 8-σημείων), που αντιστοιχεί σε ρυθμό δειγματοληψίας ίσο με  $f_s = 400$  Hz, θεωρώντας ότι η θεμελιώδης συχνότητα του σήματος εισόδου συμπίπτει με την ονομαστική συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου,  $f_N = 50$  Hz. Στο Σχήμα 3.17, το μέτρο του υπολογιζόμενου φασιθέτη δεν εκφράζει την ενεργό (RMS) τιμή αλλά την τιμή κορυφής (peak). Για να ληφθεί η RMS τιμή, ο όρος  $\frac{2}{N}$  στην (3.10) πρέπει να αντικατασταθεί από  $\frac{\sqrt{2}}{N}$ .



**Σχήμα 3.17** Απόκριση μέτρου του διακριτού μετασχηματισμού Fourier για βηματική-ημιτονοειδή μεταβολή

Παρατηρώντας την έξοδο του διακριτού μετασχηματισμού Fourier ως προς τη φασική γωνία στο Σχήμα 3.18, διαπιστώνεται ότι αυτή μεταβάλλεται, με την έλευση κάθε νέου δείγματος, κατά  $\frac{360^\circ}{N} = 45^\circ$ , όταν το σήμα εισόδου εκφράζει τη μόνιμη κατάσταση. Το φαινόμενο αυτό καλείται αναδίπλωση φάσης (phase wrapping) και προκαλείται από το γεγονός ότι δεν έχει οριστεί κάποια χρονική ή φασική αναφορά για τη γωνία του φασιθέτη. Παρόλα αυτά, η διαφορά γωνίας δύο φασιθετών υπολογιζόμενων από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, αναπαριστά με απόλυτη ακρίβεια τη φασική σχέση των σημάτων εισόδου, αν αυτά έχουν την ίδια συχνότητα και στο καθένα εφαρμόζεται σύγχρονη δειγματοληψία. Γενικά, η απόλυτη τιμή της φασικής γωνίας σε κάθε χρονική στιγμή είναι τυχαία, εκτός και αν τα δείγματα εισόδου συγχρονίζονται με κάποιο σήμα αναφοράς.



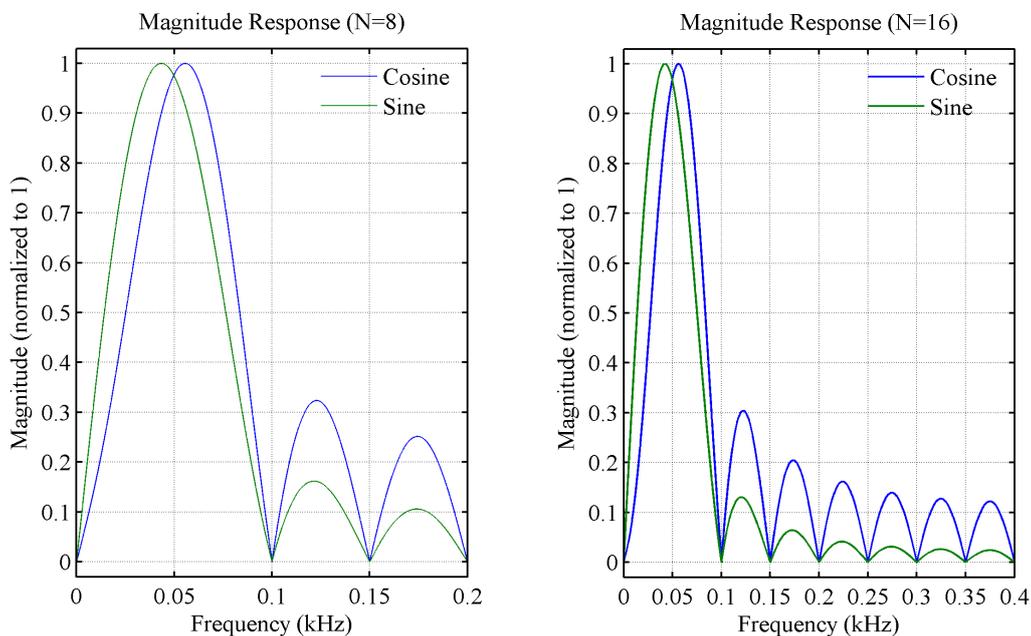
**Σχήμα 3.18** Απόκριση φασικής γωνίας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier για βηματική-ημιτονοειδή μεταβολή

### 3.6.1.3 Απόκριση συχνότητας διακριτού μετασχηματισμού Fourier

Στο Σχήμα 3.19 απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας των FIR φίλτρων συνημιτόνου (cosine filter) και ημιτόνου (sine filter), που είναι μεταξύ τους ορθογώνια και υπολογίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος, αντίστοιχα, της συνιστώσας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier στη θεμελιώδη συχνότητα για 8 και 16 δείγματα ανά κύκλο (θεμελιώδη περίοδο) του σήματος εισόδου (DFT 8 και 16-σημείων). Με βάση το Σχήμα 3.19, μπορούν να γίνουν οι ακόλουθες διαπιστώσεις:

- Το φίλτρο ημιτόνου καταστέλλει πιο ικανοποιητικά από το φίλτρο συνημιτόνου τις υψίσυχνες φασματικές συνιστώσες. Αντίθετα, το φίλτρο συνημιτόνου αποδυναμώνει περισσότερο τις συχνότητες κοντά στο μηδέν και για το λόγο αυτό είναι πιο αποτελεσματικό για την αντιμετώπιση της εκθετικά φθίνουσας DC συνιστώσας, που εμφανίζεται κυρίως στις κυματομορφές των εντάσεων κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων, σε σχέση με το φίλτρο ημιτόνου.
- Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier, υπολογιζόμενος στη θεμελιώδη συχνότητα, εμφανίζει μηδενικά κέρδη στη μηδενική (DC) και τις ανώτερες αρμονικές συνιστώσες.
- Το πλάτος του σήματος, που υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, εξασθενεί αν η συχνότητα του σήματος δε βρίσκεται στο κέντρο της ζώνης διέλευσης των δύο ορθογωνίων FIR φίλτρων. Στο Σχήμα 3.19, τα φίλτρα συνημιτόνου και ημιτόνου έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν στα 50 Hz. Αν η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι π.χ. 45 Hz, τότε το μέτρο που υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier είναι ίσο με 98% του πραγματικού πλάτους του σήματος. Σε ότι αφορά τη μετατόπιση της φασικής γωνίας, αυτή είναι ευθέως ανάλογη προς την απόκλιση της συχνότητας. Περισσότερα για την επίδραση της μεταβολής της συχνότητας στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier αναφέρονται στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

- Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier των 16 δειγμάτων ανά κύκλο, παρέχει καλύτερη απόρριψη των αρμονικών συνιστωσών του σήματος εισόδου από τον αντίστοιχο των 8 δειγμάτων, αλλά σε καμία περίπτωση δε μειώνει το χρόνο μεταβατικής απόκρισης του αλγορίθμου. Οι παρατηρήσεις αυτές αποτυπώνονται καλύτερα στο Σχήμα 3.20, όπου έχει θεωρηθεί ότι στο σήμα εισόδου της μορφής  $x_1(t) = \cos(2\pi 50t)$ , υπεισέρχεται μία πέμπτη αρμονική συνιστώσα με πλάτος 30% της θεμελιώδους,  $x_5(t) = 0.3\cos(2\pi 250t)$ , και μια έβδομη αρμονική συνιστώσα, της μορφής  $x_7(t) = 0.2\cos(2\pi 350t)$ . Λόγω του φαινομένου της αναδίπλωσης (aliasing), ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier των 8 δειγμάτων ανά κύκλο αδυνατεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια το πραγματικό μέτρο του φασιθέτη θεμελιώδους συχνότητας, σε αντίθεση με αυτόν των 16 δειγμάτων που δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Από το Σχήμα 3.20 φαίνεται επίσης ότι σε κάθε περίπτωση απαιτείται να παρέλθει χρόνος ίσος με τη θεμελιώδη περίοδο του σήματος, προκειμένου να σταθεροποιηθεί το αποτέλεσμα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier.



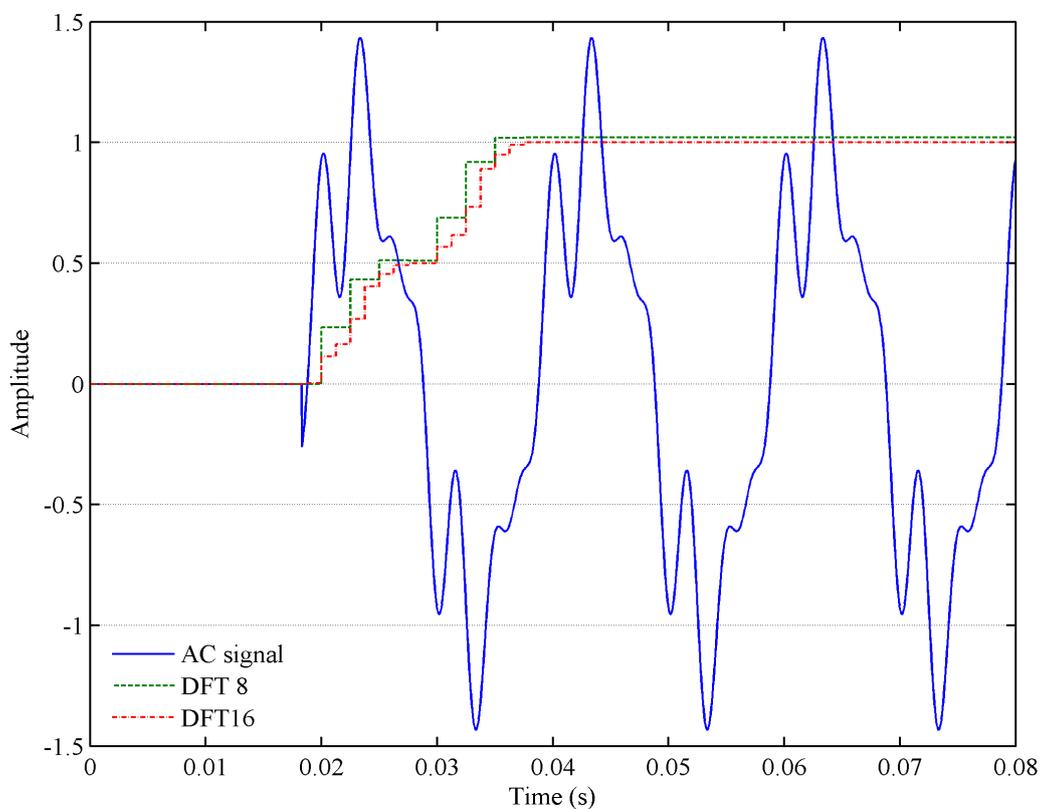
**Σχήμα 3.19 Απόκριση συχνότητας FIR φίλτρων συνημιτόνου και ημιτόνου**

Υπάρχει, τέλος, και ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μισού κύκλου, ο οποίος έχει χρόνο απόκρισης ίσο με το μισό της θεμελιώδους περιόδου του σήματος εισόδου και καταστέλλει πλήρως τις περιττές αρμονικές, αλλά όχι και τις άρτιες αρμονικές συνιστώσες. Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν το διακριτό μετασχηματισμό Fourier μισού κύκλου πολύ χρήσιμο, αφού κατά κανόνα στα ηλεκτρικά δίκτυα κυριαρχούν οι περιττές αρμονικές, που οφείλονται είτε στον κορεσμό των μετασχηματιστών ισχύος είτε σε μη γραμμικά φορτία (εκτεταμένη χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος κτλ.)

### 3.6.1.4 Επίδραση της συνιστώσας συνεχούς ρεύματος (DC) στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier

Στην πράξη, οι υψηλές αρμονικές συνιστώσες και οι υψίσυχνες ταλαντώσεις που προκαλούνται από τη διέγερση των φυσικών συχνοτήτων συντονισμού στα ΣΗΕ, απομακρύνονται με χρήση των αναλογικών αντιαναδιπλωτικών φίλτρων πριν το στάδιο της δειγματοληψίας. Αν και τα φίλτρα συνημιτόνου και ημιτόνου εμφανίζουν μηδενικά κέρδη στη συνεχή συνιστώσα (DC), όπως προκύπτει από τη γραφική παράσταση του μέτρου της απόκρισης συχνότητας των δύο FIR φίλτρων σε συνάρτηση με τη συχνότητα στο Σχήμα 3.19, εντούτοις κατά την εκδήλωση βραχυκυκλωμάτων, παράγονται στα ΣΗΕ συνιστώσες χαμηλής συχνότητας, που επικάθονται στη θεμελιώδη συνιστώσα των ρευμάτων, κυρίως, και οι οποίες έχει επικρατήσει να αποκαλούνται DC συνιστώσα. Στην

πραγματικότητα, δεν πρόκειται για DC συνιστώσα αλλά για μια εκθετικά φθίνουσα συνάρτηση που υπεισέρχεται στη συνιστώσα AC, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21. Στο Σχήμα 3.21 φαίνονται επίσης τα μέτρα του σήματος εισόδου, όπως υπολογίζονται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier με και χωρίς την επίδραση της DC συνιστώσας. Όπως είναι φανερό, η επίδραση της DC συνιστώσας είναι ότι οδηγεί το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πιο γρήγορα σε σταθεροποίηση, το οποίο θα μπορούσε αρχικά να ληφθεί ως πλεονέκτημα. Στην πράξη όμως, το σφάλμα που παρατηρείται στο μέτρο του εκτιμώμενου φασιθέτη - σε σχέση με το πραγματικό της συνιστώσας AC - μπορεί να οδηγήσει σε πιο γρήγορη ή ακόμα και σε ανεπιθύμητη λειτουργία των H/N προστασίας και να διαταράξει τη διαβάθμιση των προστασιών σε ένα ΣΗΕ. Επιπλέον, η κυμάτωση που παρατηρείται γύρω από την πραγματική τιμή του μέτρου του φασιθέτη, μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί μέχρι σήμερα πολλές τεχνικές που προσπαθούν να εξαλείψουν την επίδραση της DC συνιστώσας στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier ([20], [33], [61], [73], [74], [114], [201], [221]).



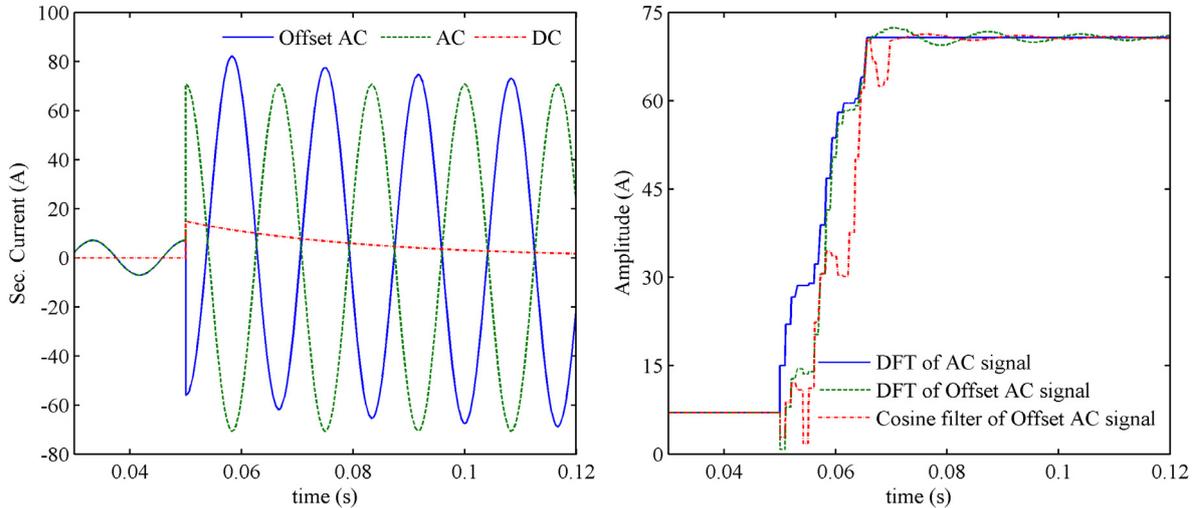
**Σχήμα 3.20** Απόκριση μέτρου του διακριτού μετασχηματισμού Fourier 8 και 16 δειγμάτων

Μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως σε εμπορικές εφαρμογές για τον περιορισμό της DC συνιστώσας είναι η χρήση αποκλειστικά του φίλτρου συνημιτόνου [221]. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.6.1.3, το φίλτρο συνημιτόνου εμφανίζει πιο ικανοποιητική απόκριση στις χαμηλές συχνότητες σε σχέση με το φίλτρο ημιτόνου. Το φίλτρο συνημιτόνου χρησιμοποιεί την τρέχουσα έξοδο του φίλτρου, για να αναπαραστήσει το πραγματικό μέρος του φασιθέτη, και την καθυστερημένη έξοδο του φίλτρου κατά  $\frac{1}{4}$  της θεμελιώδους περιόδου, για να αναπαραστήσει το φανταστικό του μέρος, όπως φαίνεται στις εξισώσεις (3.15)-(3.16). Η απόκριση του φίλτρου συνημιτόνου αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.21, για το ίδιο σήμα εισόδου όπως προηγουμένως. Συγκρίνοντας την απόκριση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier με αυτήν του φίλτρου συνημιτόνου, προκύπτει ότι το τελευταίο εμφανίζει μικρότερο σφάλμα από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier και προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά το πραγματικό μέτρο του φασιθέτη θεμελιώδους συχνότητας του σήματος εισόδου. Το μειονέκτημα του φίλτρου συνημιτόνου είναι ότι

είναι πιο αργό κατά  $\frac{1}{4}$  του κύκλου σε σχέση με το διακριτό μετασχηματισμό Fourier και πιο ευάλωτο στις μεταβολές της συχνότητας [221].

$$Yc_n = \sum_{n=0}^{N-1} x_n c_n = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (3.15)$$

$$Y_n = Yc_n + jYc_{n-N/4} \quad (3.16)$$



**Σχήμα 3.21 Επίδραση της DC συνιστώσας στο διακριτό μετασχηματισμό Fourier και το φίλτρο συνημιτόνου**

### 3.6.1.5 Συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών

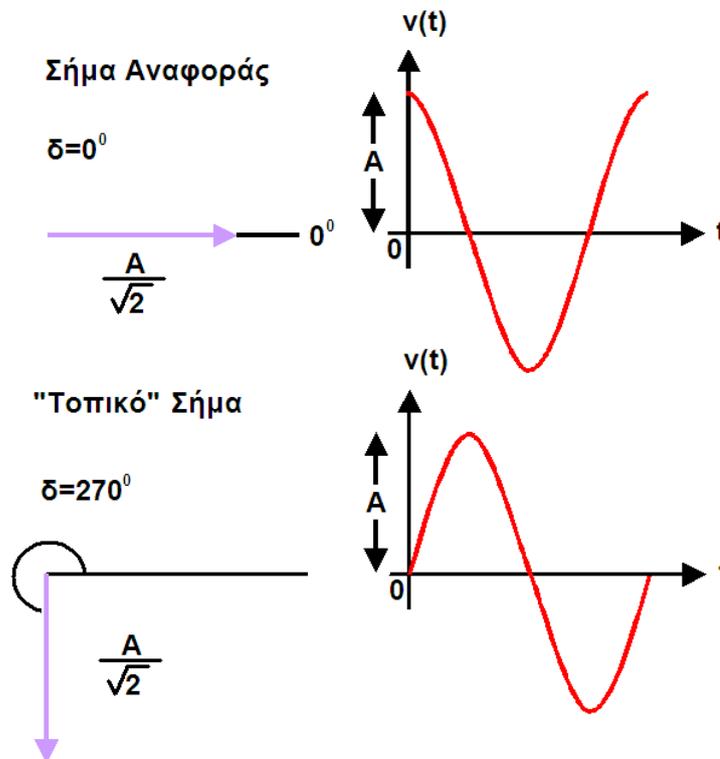
Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών ([17], [22], [178], [184]) παρέχουν τη δυνατότητα σύγκρισης των φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων σε διάφορα σημεία ενός ηλεκτρικού δικτύου ως προς μία απόλυτη χρονική αναφορά. Αυτό γίνεται εφικτό, με τη χρήση χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας, συγχρονισμένων μέσω GPS (Global Positioning System). Τα χρονομέτρα με τεχνολογία GPS εξασφαλίζουν χρονική διακριτική ικανότητα μικρότερη από 1  $\mu$ s, που καθιστά δυνατή τη μέτρηση της φασικής γωνίας με ακρίβεια μικρότερη από  $0,02^\circ$ . Μέσω των χρονομέτρων αυτών, οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units - PMUs) παράγουν ένα σήμα αναφοράς. Το σήμα αναφοράς είναι ένα ημιτονοειδές κύμα θεμελιώδους συχνότητας, του οποίου η μέγιστη τιμή προκύπτει ακριβώς στην αρχή κάθε δευτερολέπτου. Οι μετρούμενες τάσεις και εντάσεις συγκρίνονται με το παραγόμενο σήμα αναφοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.22.

Το σήμα αναφοράς εξαρτάται αποκλειστικά από το χρονικό σήμα που παράγεται από το GPS. Συνεπώς, είναι το ίδιο για κάθε PMU, ανεξάρτητα από το σημείο τοποθέτησής του στο ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, ο φασιθέτης στο τοπικό σημείο μέτρησης μπορεί να συγκριθεί με το φασιθέτη σε οποιοδήποτε άλλο σημείο, και η διαφορά γωνίας μεταξύ τους αναπαριστά την απόλυτη χρονική διαφορά μεταξύ των δύο σημείων. Έχοντας διαθέσιμη την τιμή αυτή, μπορούν να κατανοηθούν και να αναλυθούν καλύτερα όλα τα φαινόμενα στα Σ.Η.Ε, και, σε συνδυασμό με τα κατάλληλα μέσα επικοινωνίας, να αναπτυχθούν προηγμένες εφαρμογές προστασίας και ελέγχου, καθώς και εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.

Συνήθως στις μονάδες μέτρησης φασιθετών εκτελούνται εξειδικευμένοι αλγόριθμοι ψηφιακής επεξεργασίας (παραλλαγές του διακριτού μετασχηματισμού Fourier) για τον προσδιορισμό των φασιθετών θεμελιώδους συχνότητας. Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών, οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τα ακόλουθα ([17], [122], [184]):

- Η εκτίμηση της γωνίας και του μέτρου του φασιθέτη επηρεάζεται από τη συχνότητα του συστήματος στο σημείο μέτρησης, η οποία μπορεί να διαφέρει από την ονομαστική του ΣΗΕ.
- Οι μετρήσεις των φασιθετών πρέπει να είναι ακριβείς, ακόμα και για μεταβολές που οφείλονται σε υποσύγχρονες ταλαντώσεις ισχύος ή άλλα μεταβατικά φαινόμενα χαμηλής συχνότητας.
- Τα στάδια μέτρησης που παρεμβάλλονται – μετασχηματιστές μέτρησης, μορφοτροπείς, αναλογικά φίλτρα, διατάξεις AC – δεν είναι ιδανικά και απαιτείται δυναμική διόρθωσή τους σε κάθε βήμα υπολογισμού των συγχρονισμένων φασιθετών.
- Απαιτούνται συστήματα επικοινωνίας με πολύ γρήγορους ρυθμούς μετάδοσης των φασιθετών, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση των μεταβατικών φαινομένων.

Μερικά από τα παραπάνω προβλήματα δεν έχουν πλήρως επιλυθεί. Για παράδειγμα, δεν είναι πλήρως ξεκάθαρο με ποιο τρόπο πρέπει να υπολογίζονται οι συγχρονισμένοι φασιθέτες για δυναμικές καταστάσεις που παρατηρούνται στα ΣΗΕ ([184], [259]).



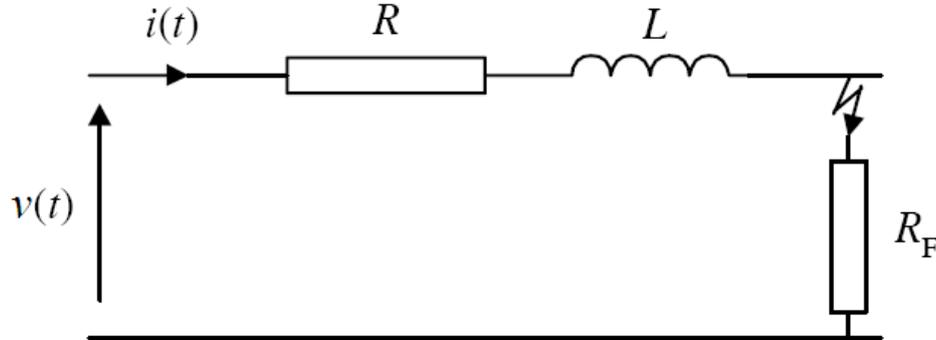
Σχήμα 3.22 Σήμα αναφοράς και τοπικό σήμα με σύγκριση γωνίας

### 3.6.2 Αλγόριθμοι στο πεδίο του χρόνου

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται στις ηλεκτρικές ιδιότητες των στοιχείων του συστήματος, κατηγοριοποιούνται ως αλγόριθμοι στο πεδίο του χρόνου. Όταν ένα σφάλμα εκδηλώνεται σε μια γραμμή μεταφοράς, η τάση της γραμμής «βυθίζεται» και, συνεπώς, μειώνονται και τα χωρητικά ρεύματα που οφείλονται στις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής. Αμελώντας τις εγκάρσιες χωρητικότητες, η γραμμή μεταφοράς μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μία ωμική αντίσταση σε σειρά με μία αυτεπαγωγή. Το κύκλωμα  $R-L$  του σχήματος 3.23 αναπαριστά το μοντέλο της γραμμής κατά το σφάλμα και παρουσιάζει δύο πλεονεκτήματα. Το πρώτο πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να μετρηθεί η αυτεπαγωγή  $L$  της γραμμής, από το σημείο μέτρησης μέχρι το σημείο του σφάλματος. Η παράμετρος αυτή είναι ανεξάρτητη από τη συχνότητα του συστήματος, και συνεπώς οι μετρήσεις ισχύουν τόσο για την ονομαστική όσο και για συχνότητες πέραν αυτής. Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι η DC συνιστώσα του ρεύματος δεν επηρεάζει τις μετρήσεις.

Η τάση στο σημείο μέτρησης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του ρεύματος της γραμμής από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση (αμελώντας την αντίσταση  $R_F$  του σφάλματος):

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.17)$$



Σχήμα 3.23 Κύκλωμα R-L γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα

Ολοκληρώνοντας τα δύο μέλη της (3.17) στα διαστήματα  $[t_0, t_1]$  και  $[t_1, t_2]$ , προκύπτουν οι (3.18) και (3.19) αντίστοιχα:

$$\int_{t_0}^{t_1} v(t) dt = R \int_{t_0}^{t_1} i(t) dt + L(i(t_1) - i(t_0)) \quad (3.18)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} v(t) dt = R \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt + L(i(t_2) - i(t_1)) \quad (3.19)$$

Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο τραπεζοειδούς ολοκλήρωσης και θεωρώντας ότι το χρονικό διάστημα  $\Delta T$  μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων είναι πολύ μικρό, τα ολοκληρώματα μεταξύ των δειγμάτων  $k$  έως  $k+1$  και  $k+1$  έως  $k+2$  γράφονται ως:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} v(t) dt = \frac{\Delta T}{2} [v_k + v_{k+1}] \quad (3.20)$$

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} i(t) dt = \frac{\Delta T}{2} [i_k + i_{k+1}] \quad (3.21)$$

$$\int_{t_{k+1}}^{t_{k+2}} v(t) dt = \frac{\Delta T}{2} [v_{k+1} + v_{k+2}] \quad (3.22)$$

$$\int_{t_{k+1}}^{t_{k+2}} i(t) dt = \frac{\Delta T}{2} [i_{k+1} + i_{k+2}] \quad (3.23)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.20)-(3.23) στις (3.18) και (3.19), αναδιατάσσοντας τις εξισώσεις που προκύπτουν, και εκφράζοντας τες υπό μορφή πινάκων, προκύπτει η μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{2}(i_{k+1} + i_k) & (i_{k+1} - i_k) \\ \frac{\Delta T}{2}(i_{k+2} + i_{k+1}) & (i_{k+2} - i_{k+1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta T}{2}(v_{k+1} + v_k) \\ \frac{\Delta T}{2}(v_{k+2} + v_{k+1}) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Η ωμική αντίσταση και η αυτεπαγωγή, όπως υπολογίζονται από τον κανόνα του Cramer, δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

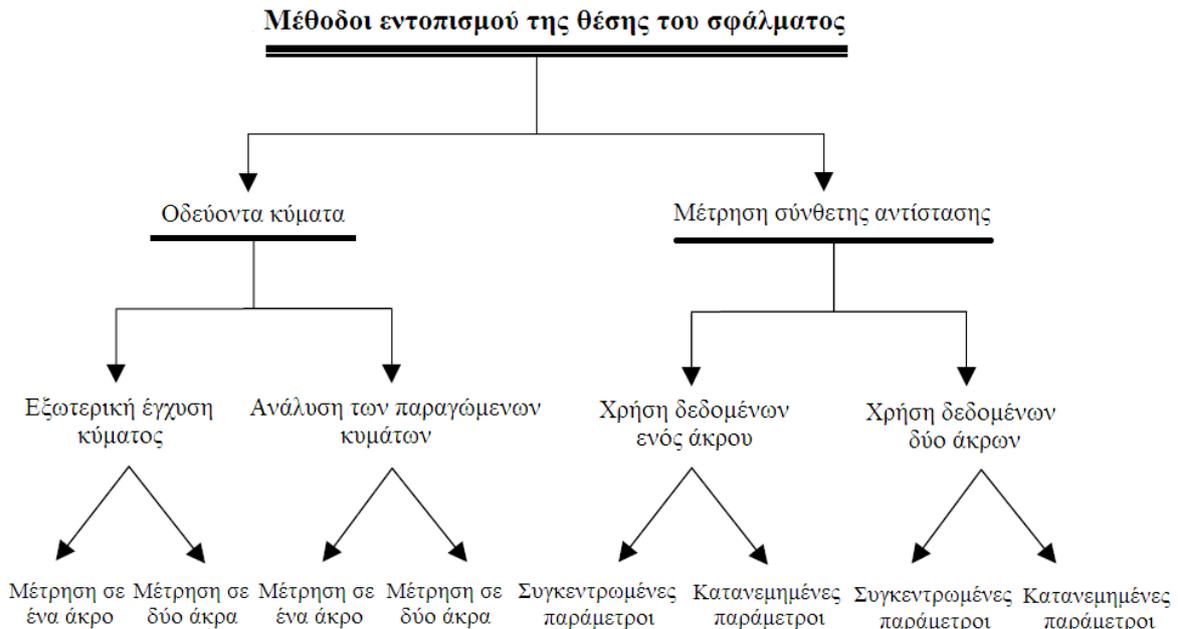
$$R = \frac{(v_{k+1} + v_k)(i_{k+2} - i_{k+1}) - (v_{k+2} + v_{k+1})(i_{k+1} - i_k)}{2(i_k i_{k+2} - i_{k+1}^2)} \quad (3.25)$$

$$L = \frac{\Delta T}{2} \left( \frac{(v_{k+2} + v_{k+1})(i_{k+1} + i_k) - (v_{k+1} + v_k)(i_{k+2} - i_{k+1})}{2(i_k i_{k+2} - i_{k+1}^2)} \right) \quad (3.26)$$

Η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων του τμήματος της γραμμής που εμπλέκεται στο σφάλμα, χρησιμοποιεί τρία διαδοχικά δείγματα των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων. Ο παρονομαστής στις (3.25) και (3.26) δεν παραμένει σταθερός, αλλά μεταβάλλεται με το χρόνο, με τοπικό ελάχιστο στα σημεία που τόσο το ρεύμα γραμμής όσο και η παράγωγός του λαμβάνουν μικρές τιμές. Λόγω των ταχέων μεταβολών των τάσεων και των ρευμάτων της γραμμής μετά την εκδήλωση του σφάλματος, πολλές φορές οι εκτιμήσεις που προκύπτουν για την ωμική αντίσταση και την αυτεπαγωγή της γραμμής δεν είναι σταθερές. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές φιλτραρίσματος τόσο στο στάδιο προεπεξεργασίας των δειγμάτων όσο και μεταεπεξεργασίας των αποτελεσμάτων. Κάποιες από αυτές περιλαμβάνουν τη χρήση ορθογώνιων φίλτρων ελαχίστων δειγμάτων (προεπεξεργασία) ή τη χρήση φίλτρου μετακινούμενου μέσου (moving average filter) (μεταεπεξεργασία) [199].

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4****ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΝΑΕΡΙΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ**

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στους αλγόριθμους εκείνους που χρησιμοποιούν οδεύοντα κύματα και σε αυτούς που βασίζονται στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης της γραμμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν οδεύοντα κύματα μπορούν να αξιοποιηθούν είτε πραγματοποιώντας έγχυση ενός συγκεκριμένου οδεύοντος κύματος στο σημείο σύνδεσης του εντοπιστή σφαλμάτων είτε με ανάλυση των οδευόντων κυμάτων που προκαλούνται κατά την εκδήλωση του σφάλματος. Οι μέθοδοι που βασίζονται στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης ταξινομούνται με βάση το αν χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης μόνο από το ένα ή και τα δύο άκρα της γραμμής. Κάθε κατηγορία μπορεί επιπλέον να ταξινομηθεί ανάλογα με το μοντέλο γραμμής που έχει θεωρηθεί προκειμένου να ληφθεί η εκτίμηση για τη θέση του σφάλματος (συγκεντρωμένες ή κατανεμημένες παράμετροι της γραμμής).



**Σχήμα 4.1 Ταξινόμηση των μεθόδων εντοπισμού της θέσης του σφάλματος**

### 4.1 Αλγόριθμοι με χρήση οδευόντων κυμάτων

Η υιοθέτηση των οδευόντων κυμάτων ως μέσο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε υπόγεια καλώδια και εναέριες γραμμές μεταφοράς αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1931 [191]. Το 1951, ο Lewis ταξινόμησε τις μεθόδους που χρησιμοποιούν οδεύοντα κύματα σε τέσσερις διαφορετικούς τύπους Α, Β, Γ και Δ, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους [56]. Οι τύποι Α και Δ βασίζονται στην ανάλυση των ταχέων μεταβατικών φαινομένων που προκαλούνται από το ίδιο το σφάλμα, χωρίς να απαιτείται, επιπλέον, η έγχυση κύματος από κάποια γεννήτρια παραγωγής παλμών. Ο τύπος Α καταγράφει τις μεταβατικές υπερτάσεις που εκδηλώνονται σε ένα μόνο άκρο της γραμμής μεταφοράς ή του καλωδίου, και βασίζεται στα ταχέα μεταβατικά φαινόμενα που προκαλούνται από το τόξο υπερπήδησης κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Εντούτοις, η υπόθεση ότι οι παραγόμενες μεταβατικές υπερτάσεις καταγράφονται στο άκρο της γραμμής δεν ικανοποιείται πάντα. Επιπλέον,

το ίδιο το τόξο του σφάλματος μπορεί να εξαφανιστεί πολύ γρήγορα. Αυτό καθιστά σχεδόν αδύνατη την αξιοποίηση των προαναφερθέντων οδευόντων κυμάτων. Ο τύπος Δ βασίζεται σε καταγραφές ταχέα μεταβαλλόμενων σημάτων στα δύο άκρα της γραμμής, και εξαρτάται από τη διαφορά των χρόνων άφιξης των παραγόμενων οδευόντων κυμάτων σε κάθε άκρο. Εντούτοις, η επικοινωνία και ο σωστός συγχρονισμός μεταξύ των μετρήσεων στα άκρα της γραμμής είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη λήψη σωστών αποτελεσμάτων ως προς τη θέση του σφάλματος. Στους τύπους Β (χρήση δεδομένων από ένα μόνο άκρο) και Γ (χρήση δεδομένων και από τα δύο άκρα) εφαρμόζεται ένα κύκλωμα παραγωγής παλμών. Και οι δύο τύποι βασίζονται στη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται προκειμένου οι εγχυόμενοι παλμοί να σταλούν και να ληφθούν από κάθε άκρο, μετά την ανάκλασή τους στο σημείο του σφάλματος. Αυτή η χρονική περίοδος μπορεί να ερμηνευθεί έμμεσα ως απόσταση της θέσης του σφάλματος. Μία νέα μέθοδος με χρήση δεδομένων από ένα μόνο άκρο (τύπος Ε) προτάθηκε το 1993 ([25], [140]). Αντίθετα από τους προηγούμενους τύπους, εκμεταλλεύεται τα οδευόντα κύματα που προκύπτουν από την επανενεργοποίηση της γραμμής μέσω του διακόπτη ισχύος. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι ελπιδοφόρα και το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης δεν υπερβαίνει το 2.7%.

Οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται σε οδευόντα κύματα, όταν λειτουργούν κατάλληλα, μπορούν να δώσουν πολύ ακριβή αποτελέσματα, με σφάλμα εκτίμησης που δεν ξεπερνά τα 300 m. Εντούτοις, διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την απόδοσή τους. Η διάδοση των οδευόντων κυμάτων μπορεί να επηρεαστεί από τις παραμέτρους του συστήματος και τη διαμόρφωση της γραμμής, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε έντονη εξασθένησή τους. Μια ακόμη δυσκολία προκύπτει για σφάλματα πλησίον των ζυγών, ή εκείνα που εκδηλώνονται σε μία φάση της γραμμής, όταν το κύμα της φασικής τάσης διέρχεται από το σημείο μηδέν (zero crossing). Επιπλέον, τα ανακλώμενα κύματα μπορούν να επηρεαστούν σοβαρά από τις ασυνέχειες των γραμμών, όπως είναι οι ενδιάμεσοι κλάδοι-φορτία και τα τμήματα των υπογείων καλωδίων, που παρεμβάλλονται κατά μήκος των γραμμών. Η πολυπλοκότητα της προσομοίωσής τους, ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση των παραμέτρων του συστήματος από τη συχνότητα, είναι επίσης άλλη μία δυσκολία [9]. Τέλος, ο οικονομικός παράγοντας είναι ένα ουσιαστικό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών, λόγω του πρόσθετου υλικού που απαιτείται προκειμένου να παραχθούν και να καταγραφούν τα οδευόντα κύματα, καθώς επίσης και του εξοπλισμού επικοινωνίας και συγχρονισμού, που απαιτείται στην περίπτωση χρήσης δεδομένων και από τα δύο άκρα.

## 4.2 Αλγόριθμοι βασισμένοι στη μέτρηση της σύνθετης αντίστασης

### 4.2.1 Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που βασίζονται στη χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο της γραμμής μεταφοράς (one-end algorithms) υπολογίζουν τη θέση του σφάλματος μέσω της σύνθετης αντίστασης που «βλέπει» ο εντοπιστής σφαλμάτων ή ο ψηφιακός Η/Ν αποστάσεως, ο οποίος βρίσκεται συνδεδεμένος στο εν λόγω άκρο. Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των αλγορίθμων αυτών, θεωρείται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος του σχήματος 4.2, όπου η γραμμή αναπαρίσταται μέσω συγκεντρωμένων παραμέτρων και η εγκάρσια χωρητικότητα αμελείται. Η γραμμή τροφοδοτείται εκατέρωθεν των δύο άκρων της από τις ισοδύναμες πηγές  $E_A$  και  $E_B$ , αντίστοιχα. Στη γραμμή εκδηλώνεται σφάλμα σε απόσταση  $d$  (α.μ. μήκους – p.u.) από το άκρο Α, όπου βρίσκεται εγκατεστημένος ο εντοπιστής σφαλμάτων. Με βάση το Σχήμα 4.2, μπορεί να γραφεί η ακόλουθη εξίσωση για την τάση στο σημείο μέτρησης Α:

$$V_A - dZ_L I_A - R_F I_F = 0 \quad (4.1)$$

όπου

$V_A$ : η τάση στο άκρο Α της γραμμής

$I_A, I_B$ : το ρεύμα στα άκρα Α και Β της γραμμής, αντίστοιχα

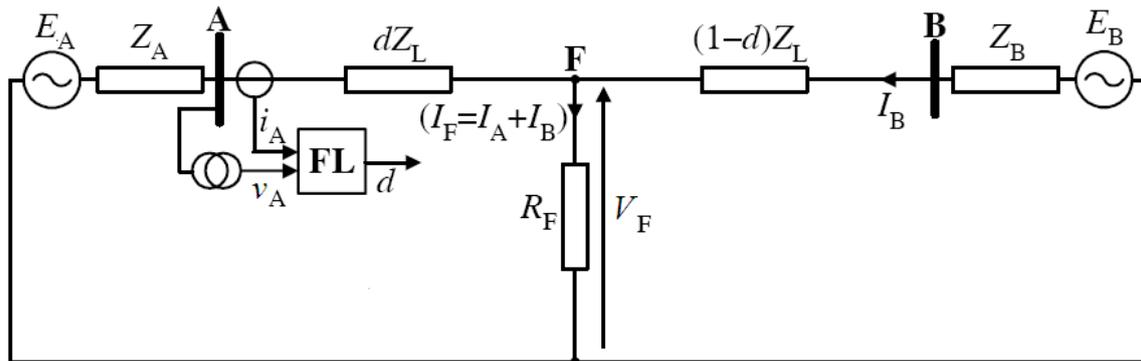
$V_F, I_F$ : η τάση και το ρεύμα στο σημείο του σφάλματος, αντίστοιχα

$Z_L$  : η εν σειρά σύνθετη αντίσταση (θετικής ακολουθίας) της γραμμής

$R_F$  : η αντίσταση σφάλματος (καθαρά ωμικού χαρακτήρα)

Η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση  $Z_{FL}$ , που «βλέπουν» ο εντοπιστής σφαλμάτων ή ο H/N αποστάσεως στο άκρο μέτρησης A της γραμμής, μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας την (4.1) με το μετρούμενο ρεύμα  $I_A$  :

$$Z_{FL} = \frac{V_A}{I_A} = dZ_L + \frac{I_F}{I_A} R_F \quad (4.2)$$



**Σχήμα 4.2 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος με υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης στο τοπικό άκρο μέτρησης**

Αν ο λόγος του ρεύματος σφάλματος  $I_F$  προς το ρεύμα στο άκρο μέτρησης της γραμμής  $I_A$  είναι μιγαδικός αριθμός, τότε η αντίσταση σφάλματος θα αναπαρίσταται ως σύνθετη αντίσταση με μία άεργος συνιστώσα. Η άεργος συνιστώσα μπορεί να είναι είτε επαγωγική είτε χωρητική, ανάλογα με τη γωνία του λόγου των δύο ρευμάτων. Η άεργος συνιστώσα θα είναι μηδενική, μόνο στην περίπτωση που η παραπάνω γωνία είναι ίση με το μηδέν. Στην περίπτωση αυτή, το ρεύμα που συνεισφέρει στο σφάλμα το απομακρυσμένο άκρο της γραμμής  $I_B$  είναι μηδενικό ή συμφασικό με το ρεύμα  $I_A$  στο τοπικό άκρο μέτρησης. Η άεργος συνιστώσα μπορεί να προκαλέσει σημαντικό σφάλμα στην εκτίμηση της θέσης του σφάλματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Προκειμένου να αναλυθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν τη γωνία του λόγου  $I_F/I_A$ , εφαρμόζεται η αρχή της επαλληλίας για το διαχωρισμό του ισοδύναμου κυκλώματος της εσφαλμένης γραμμής (Σχήμα 4.4(α)), αφενός στο κύκλωμα που εκφράζει την κατάσταση προ του σφάλματος (Σχήμα 4.4(β)), και αφετέρου στο κύκλωμα που αποτυπώνει τις μεταβολές λόγω της ροής του ρεύματος σφάλματος (Σχήμα 4.4(γ)). Έστω ότι  $I_A^{pre}$  αντιστοιχεί στο ρεύμα φόρτισης της γραμμής προ του σφάλματος και  $\Delta I_A = I_A - I_A^{pre}$  (incremental current) αντιστοιχεί στη μεταβολή του ρεύματος στο άκρο μέτρησης A, που προκαλείται από το σφάλμα. Τότε, η εξίσωση (4.2) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$Z_{FL} = \frac{V_A}{I_A} = dZ_L + \frac{1}{k_F k_L} R_F \quad (4.3)$$

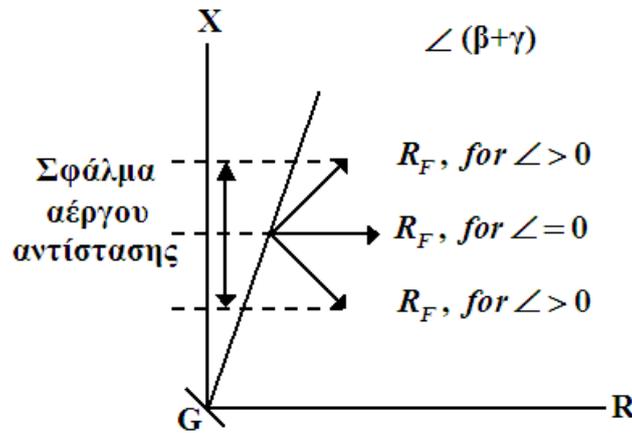
όπου

$k_F$  : ο συντελεστής κατανομής του ρεύματος σφάλματος, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση (4.4) ([48], [89], [92], [244])

$k_L$  : ο συντελεστής φόρτισης, ο οποίος ορίζεται από τη σχέση (4.5)

$$k_F = \frac{\Delta I_A}{I_F} = \frac{Z_B + (1-d)Z_L}{Z_A + Z_L + Z_B} = |k_F| \angle \beta \quad (4.4)$$

$$k_L = \frac{I_A}{\Delta I_A} = |k_L| \angle \gamma \quad (4.5)$$



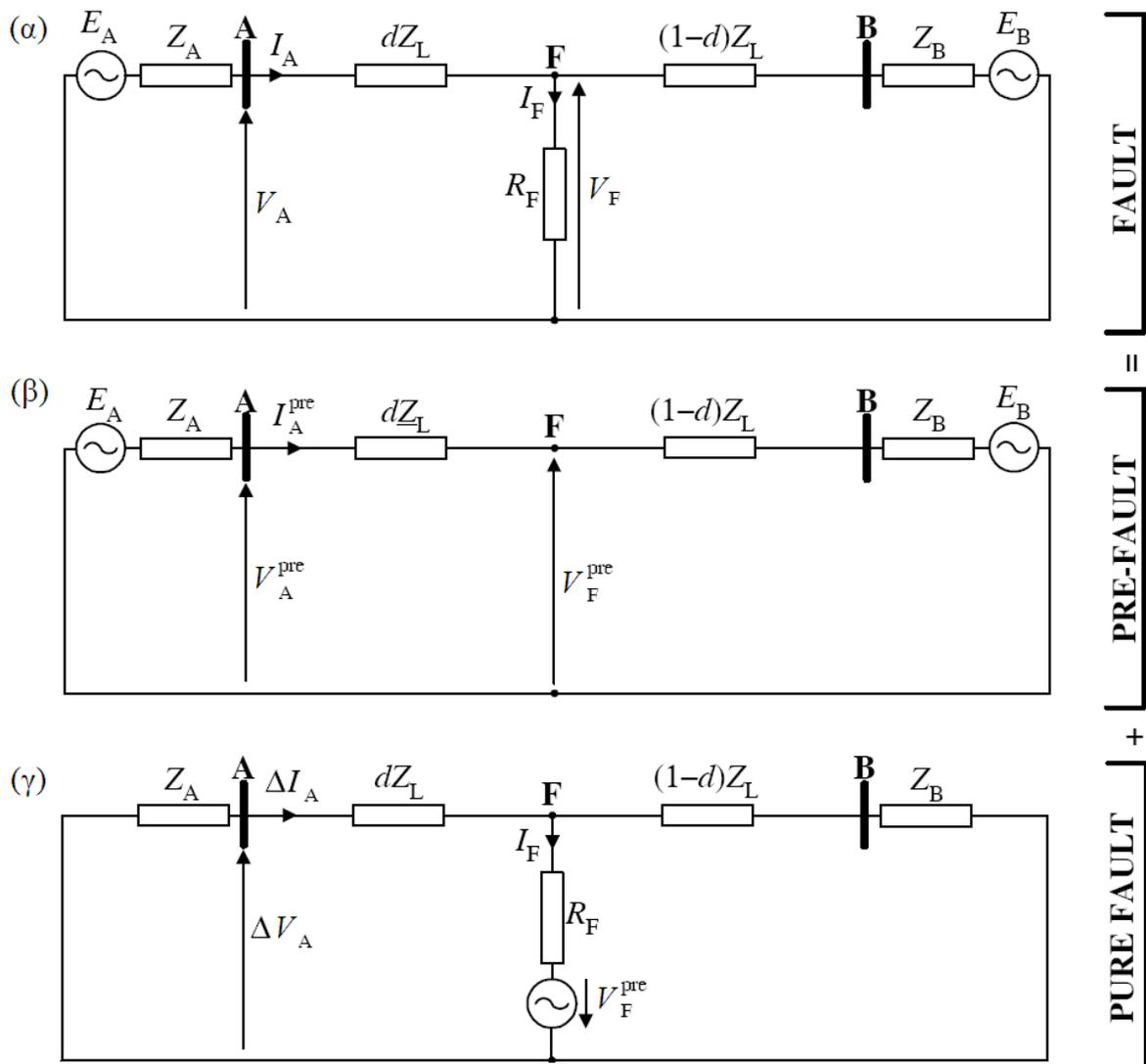
**Σχήμα 4.3** Γραφική αναπαράσταση των σφαλμάτων υπολογισμού της θέσης του σφάλματος, με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο της γραμμής, συναρτήσεως της αντίστασης σφάλματος και του ρεύματος φόρτισης της γραμμής πριν από το σφάλμα

Έτσι, η γωνία του λόγου των ρευμάτων  $I_F/I_A$  και, κατά συνέπεια, η άεργος συνιστώσα που οφείλεται στην αντίσταση σφάλματος, καθορίζεται από δύο συντελεστές. Ο συντελεστής  $k_F$  εξαρτάται από τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής  $Z_L$ , και τις σύνθετες αντιστάσεις των ισοδυνάμων πηγών στα άκρα της,  $Z_A$  και  $Z_B$  αντίστοιχα. Αν το δίκτυο του σχήματος 4.2 είναι ομογενές, δηλαδή η χαρακτηριστική γωνία της γραμμής είναι ίση με αυτή των ισοδυνάμων πηγών ( $\angle Z_L = \angle Z_A = \angle Z_B$ ), τότε η γωνία  $\beta$  του συντελεστή  $k_F$  είναι ίση με το μηδέν. Αν υπάρχει ροή φορτίου στη γραμμή πριν από το σφάλμα, τότε η γωνία  $\gamma$  του συντελεστή  $k_L$  δεν είναι μηδενική. Επιπλέον, αν το ρεύμα σφάλματος  $I_F$  είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με το ρεύμα φόρτισης της γραμμής πριν από το σφάλμα,  $I_A^{pre}$ , τότε η γωνία  $\gamma$  τείνει στο μηδέν. Το άθροισμα των δύο γωνιών,  $(\beta + \gamma)$ , καθορίζει την άεργο συνιστώσα που προκαλείται από την αντίσταση σφάλματος.

Πολλές τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν για να αντισταθμιστεί η επίδραση τη αντίστασης σφάλματος  $R_F$  στους εντοπιστές σφαλμάτων που χρησιμοποιούν μετρήσεις από ένα μόνο άκρο της γραμμής μεταφοράς. Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνικές βασίζονται σε απλουστευτικές παραδοχές, ώστε να είναι εφικτή η υλοποίησή τους. Στην επόμενη παράγραφο, παρουσιάζονται ορισμένοι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας (με χρήση μόνο τοπικών δεδομένων μέτρησης).

#### 4.2.2 Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος

Ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, μπορούν να υλοποιηθούν διάφοροι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μετρήσεων από ένα μόνο άκρο των γραμμών. Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει ορισμένους από αυτούς τους αλγορίθμους, οι οποίοι έχουν ως στόχο να περιορίσουν το σφάλμα που προκαλείται στην εκτίμηση της θέσης του σφάλματος λόγω της αντίστασης σφάλματος και του ρεύματος φόρτισης της γραμμής προ του σφάλματος.



Σχήμα 4.4 Εφαρμογή του θεωρήματος Thevenin (αρχή της επαλληλίας) για το διαχωρισμό του ισοδύναμου κυκλώματος της εσφαλμένης γραμμής (α): κύκλωμα προ του σφάλματος (β), κύκλωμα που αντιπροσωπεύει τις μεταβολές στις τάσεις και τα ρεύματα της γραμμής λόγω του σφάλματος (superimposed component network) (γ).

#### 4.2.2.1 Μέθοδος επαγωγικής αντίδρασης (Simple reactance method)

Στη μέθοδο αυτή, ο εντοπιστής σφαλμάτων μετρά τη φαινόμενη σύνθετη αντίσταση μέσω της (4.3) και στη συνέχεια διαιρεί το φανταστικό της μέρος με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς. Ο λόγος αυτός είναι ανάλογος με την απόσταση του σφάλματος από το άκρο μέτρησης της γραμμής. Η εν λόγω μέθοδος κάνει την παραδοχή ότι το ρεύμα που ρέει στην αντίσταση σφάλματος είναι συμφασικό με το ρεύμα που μετρά ο εντοπιστής σφάλματος, και ότι η γραμμή είναι αρχικά αφόρτιστη. Η θέση  $d$  του σφάλματος προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d = \frac{\text{Im}(V_A/I_A)}{\text{Im}(Z_L)} \quad (4.6)$$

Ο αλγόριθμος εύρεσης της θέσης του σφάλματος με βάση την (4.6), προκύπτει θεωρώντας το μονοφασικό κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος του σχήματος 4.2. Στην πράξη, για τριφασικές γραμμές με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, χρησιμοποιούνται είτε οι φασικές είτε οι συμμετρικές συνιστώσες των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων στο σημείο σύνδεσης του

εντοπιστή σφαλμάτων. Οι μετρούμενες τάσεις και εντάσεις που χρησιμοποιούνται για κάθε τύπο σφάλματος παρατίθενται στον Πίνακα 4.1.

**Πίνακας 4.1 Φασικές τάσεις και εντάσεις για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης  $Z_{FL}$**

Τύπος σφάλματος	Μετρούμενες τάσεις ( $V_A$ )	Μετρούμενες εντάσεις ( $I_A$ )
a-g	$V_{Aa}$	$I_{Aa} + k_0 I_{A0}$
b-g	$V_{Ab}$	$I_{Ab} + k_0 I_{A0}$
c-g	$V_{Ac}$	$I_{Ac} + k_0 I_{A0}$
a-b ή a-b-g	$V_{Aa} - V_{Ab}$	$I_{Aa} - I_{Ab}$
b-c ή b-c-g	$V_{Ab} - V_{Ac}$	$I_{Ab} - I_{Ac}$
c-a ή c-a-g	$V_{Ac} - V_{Aa}$	$I_{Ac} - I_{Aa}$
a-b-c ή a-b-c-g	$V_{Aa} - V_{Ab}$ ή $V_{Ab} - V_{Ac}$ ή $V_{Ac} - V_{Aa}$	$I_{Aa} - I_{Ab}$ ή $I_{Ab} - I_{Ac}$ ή $I_{Ac} - I_{Aa}$

Στην περίπτωση χρήσης συμμετρικών συνιστωσών, η τάση  $V_A$  και η ένταση  $I_A$  στο άκρο A της γραμμής, μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$\begin{cases} V_A = a_1 V_{A1} + a_2 V_{A2} + a_0 V_{A0} \\ I_A = a_1 I_{A1} + a_2 I_{A2} + a_0 \frac{Z_{0L}}{Z_{1L}} I_{A0} \end{cases} \quad (4.7)$$

όπου  $Z_{1L}$  και  $Z_{0L}$  είναι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και μηδενικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς, και  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_0$  είναι οι συντελεστές των συμμετρικών συνιστωσών που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο σφάλματος και παρατίθενται στον Πίνακα 4.2.

**Πίνακας 4.2 Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών της (4.7) για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης  $Z_{FL}$**

Τύπος σφάλματος	$a_1$	$a_2$	$a_0$
a-g	1	1	1
b-g	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	1
c-g	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	1
a-b ή a-b-g	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
b-c ή b-c-g	$-\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0
c-a ή c-a-g	$-1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0
a-b-c ή a-b-c-g	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$ ή $-\sqrt{3}$ ή $-1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$ ή $\sqrt{3}$ ή $-1.5 - j0.5\sqrt{3}$	0

Για παράδειγμα, για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα a-g, η θέση του σφάλματος προκύπτει από την (4.6) ως εξής:

$$d = \frac{\text{Im}(V_{Aa}/(I_{Aa} + k_0 I_{A0}))}{\text{Im}(Z_{1L})} \quad (4.8)$$

$$\text{όπου } k_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{3Z_{1L}}.$$

Το σφάλμα που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς της (4.6) είναι μηδενικό, αν η αντίσταση σφάλματος είναι μηδενική (μεταλλικό σφάλμα) ή αν τα ρεύματα  $I_A$  και  $I_F$  είναι συμφασικά. Σε αντίθετη περίπτωση, ο αλγόριθμος (4.6) εισάγει σημαντικό σφάλμα στην εκτιμώμενη επαγωγική αντίδραση της γραμμής που εμπλέκεται στο σφάλμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Η επίδραση αυτής της πρόσθετης επαγωγικής αντίδρασης μπορεί να οδηγήσει είτε σε υποεκτίμηση είτε σε υπερεκτίμηση της πραγματικής θέσης του σφάλματος. Ορισμένοι αλγόριθμοι με χρήση μετρήσεων από το τοπικό μόνο άκρο της γραμμής, αντισταθμίζουν το σφάλμα που υπεισέρχεται στην εκτιμώμενη επαγωγική αντίδραση, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

#### 4.2.2.2 Μέθοδος Takagi – Μέθοδοι υπολογισμού της θέσης του σφάλματος χωρίς τη χρήση των σύνθετων αντιστάσεων των ισοδυνάμων πηγών της γραμμής

Η μέθοδος Takagi ([234], [235]) χρησιμοποιεί τη μεταβολή του ρεύματος στο σημείο μέτρησης,  $\Delta I_A$ , που προκαλείται από την εκδήλωση του σφάλματος, προκειμένου να περιορίσει την επίδραση του ρεύματος φορτίου και της αντίστασης σφάλματος στον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος. Χρησιμοποιώντας τους όρους  $\Delta I_A$  και  $k_F$ , η (4.1) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$V_A = dZ_L I_A + R_F \frac{\Delta I_A}{k_F} \quad (4.9)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (4.9) με το συζυγή μιγαδικό  $\Delta I_A^*$  και παίρνοντας το φανταστικό μέρος, προκύπτει:

$$\text{Im}(V_A \Delta I_A^*) = d \text{Im}(Z_L I_A \Delta I_A^*) + R_F \text{Im}\left(\frac{1}{k_F}\right) \quad (4.10)$$

Αν το σύστημα της γραμμής και των ισοδυνάμων πηγών είναι ομογενές, τότε η γωνία  $\beta$  του συντελεστή κατανομής του ρεύματος σφάλματος,  $k_F$ , είναι μηδενική και συνεπώς ισχύει

$$\text{Im}\left(\frac{1}{k_F}\right) = 0, \text{ ή διαφορετικά:}$$

$$d = \frac{\text{Im}(V_A \Delta I_A^*)}{\text{Im}(Z_L I_A \Delta I_A^*)} \quad (4.11)$$

Συνεπώς, η συνθήκη επιτυχίας για τη μέθοδο Takagi είναι οι γωνίες του ρεύματος στο σημείο μέτρησης και του ρεύματος σφάλματος να είναι ίσες ( $\beta = 0$ ). Σε αντίθετη περίπτωση, το σφάλμα που εισάγει η μέθοδος στον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος είναι ανάλογο με την αντίσταση σφάλματος και τον όρο  $\sin \beta$ . Η τιμή της γωνίας  $\beta$  μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση του σφάλματος και δε μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια, παρά μόνο αν είναι γνωστές οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις των πηγών στα άκρα της γραμμής. Γενικά ισχύει ότι, όσο πιο ισχυρό είναι το ισοδύναμο δίκτυο της γραμμής στο τοπικό άκρο μέτρησης τόσο μικρότερη είναι η επίδραση της γωνίας  $\beta$  στην εκτίμηση της θέσης του σφάλματος. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η μέθοδος Takagi αντισταθμίζει το σφάλμα που προκαλείται από το συντελεστή φόρτισης  $k_L$ .

Μια άλλη μέθοδος [170] κάνει τη θεώρηση ότι ο συντελεστής κατανομής του ρεύματος σφάλματος στο κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας της γραμμής ( $k_{F2} = \frac{\Delta I_{A2}}{I_{F2}} = \frac{I_{A2}}{I_{F2}}$ ) είναι πραγματικός αριθμός. Στην περίπτωση ασύμμετρων σφαλμάτων που εμπλέκουν τη γη, η παραπάνω μέθοδος δεν απαιτεί τη χρήση των ρευμάτων της γραμμής προ του σφάλματος, και ο συντελεστής

κατανομής του ρεύματος σφάλματος στο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας,  $k_{F0}$ , δεν επηρεάζει τις εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος. Αν και για τις περισσότερες περιπτώσεις σφαλμάτων η μέθοδος της [170] επιτυγχάνει σχετικά ικανοποιητική ακρίβεια, εντούτοις οι παραδοχές που γίνονται οδηγούν συχνά σε προσεγγιστικές μόνο λύσεις για τη θέση του σφάλματος. Δύο μέθοδοι αντίστοιχες της [170] περιγράφονται στις ([219], [244]).

#### 4.2.2.3 Μέθοδοι υπολογισμού της θέσης του σφάλματος με χρήση των σύνθετων αντιστάσεων των ισοδυνάμων πηγών στα άκρα της γραμμής

Η τροποποιημένη μέθοδος Takagi [236] χρησιμοποιεί για τον εντοπισμό σφαλμάτων ως προς γη, αντί για τη μεταβολή του ρεύματος  $\Delta I_A$ , το τριπλάσιο του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας  $I_{AG} = 3I_{A0}$  (residual current). Με τον τρόπο αυτό, δεν απαιτείται η χρήση δεδομένων μέτρησης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή επιτρέπει τη διόρθωση της γωνίας  $\beta$ , σε περίπτωση που είναι γνωστές οι σύνθετες αντιστάσεις μηδενικής ακολουθίας των ισοδυνάμων πηγών στα άκρα της γραμμής. Βέβαια, η διόρθωση της γωνίας  $\beta$  ισχύει μόνο για μία συγκεκριμένη θέση του σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, όπως προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{3I_{A0}}{I_{F0}} = \frac{(1-d)Z_{0L} + Z_{0A}}{Z_{0A} + Z_{0B} + Z_{0L}} = |k_{F0}| \angle \beta \quad (4.12)$$

Για τις υπόλοιπες θέσεις σφαλμάτων ως προς γη, τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν είναι τόσο ακριβή και προκύπτουν ως εξής:

$$d = \frac{\text{Im}(V_A I_{AG}^* e^{-j\beta})}{(Z_L I_A I_{AG}^* e^{-j\beta})} \quad (4.13)$$

Μία μέθοδος που αντισταθμίζει πλήρως τα σφάλματα που προκαλούνται από την επίδραση της αντίστασης σφάλματος και της γωνίας  $\beta$ , έχει προταθεί στην εργασία [48]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της γραμμής μεταφοράς και τις σύνθετες αντιστάσεις των ισοδυνάμων πηγών στα άκρα της. Στην περίπτωση αυτή, η θέση του σφάλματος μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια, χωρίς να γίνει καμία παραδοχή, από την ακόλουθη τετραγωνική εξίσωση:

$$A_2 d^2 + A_1 d + A_0 + A_{00} R_F = 0 \quad (4.14)$$

όπου  $A_2$ ,  $A_1$ ,  $A_0$  και  $A_{00}$  είναι μιγαδικοί συντελεστές, που εξαρτώνται από τις μετρούμενες τάσεις και εντάσεις και τις παραμέτρους του συστήματος μεταφοράς ως ακολούθως:

$$A_2 = -Z_{1L}^2 \quad (4.15)$$

$$A_1 = (Z_{1L} + Z_{1B})Z_{1L} + Z_{1L} \frac{a_1 V_{A1} + a_2 V_{A2} + a_0 V_{A0}}{a_1 I_{A1} + a_2 I_{A2} + a_0 I_{A0}} \quad (4.16)$$

$$A_0 = -(Z_{1L} + Z_{1B}) \frac{a_1 V_{A1} + a_2 V_{A2} + a_0 V_{A0}}{a_1 I_{A1} + a_2 I_{A2} + a_0 I_{A0}} \quad (4.17)$$

$$A_{00} = (Z_{1L} + Z_{1A} + Z_{1B}) \frac{a_{F1} \Delta I_{A1} + a_{F2} I_{A2}}{a_1 I_{A1} + a_2 I_{A2} + a_0 I_{A0}} \quad (4.18)$$

όπου  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_0$  είναι οι συντελεστές των συμμετρικών συνιστωσών που δίνονται από τον Πίνακα 4.2, και  $a_{F1}$ ,  $a_{F2}$  είναι οι αντίστοιχοι συντελεστές για το συνολικό ρεύμα σφάλματος  $I_F$ , που προκύπτουν με μερική απαλοιφή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας,  $I_{F0}$ , για κάθε τύπο σφάλματος, και δίνονται στον Πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.3** Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών για το συνολικό ρεύμα σφάλματος  $I_F$  που προκύπτουν με μερική απαλοιφή του ρεύματος μηδενικής ακολουθίας  $I_{F0}$

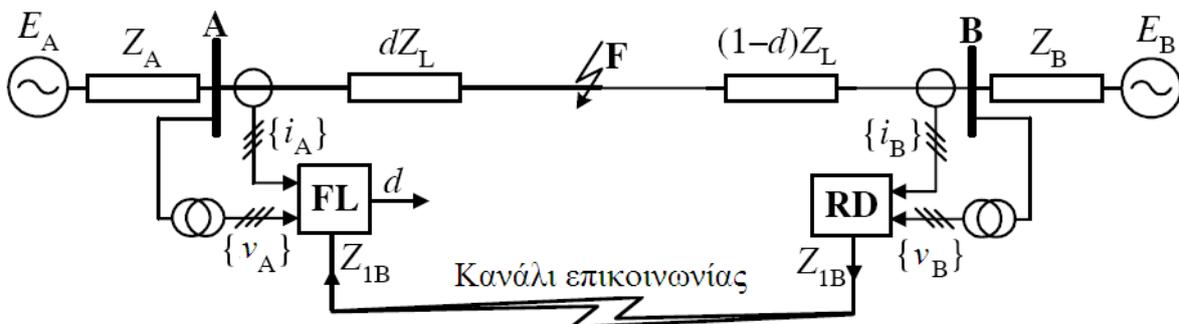
Τύπος σφάλματος	$a_{F1}$	$a_{F2}$
a-g	1.5	1.5
b-g	$-0.75 - j0.75\sqrt{3}$	$-0.75 + j0.75\sqrt{3}$
c-g	$-0.75 + j0.75\sqrt{3}$	$-0.75 - j0.75\sqrt{3}$
a-b	$0.75 + j0.25\sqrt{3}$	$0.75 - j0.25\sqrt{3}$
b-c	$-j0.5\sqrt{3}$	$j0.5\sqrt{3}$
c-a	$-0.75 + j0.25\sqrt{3}$	$-0.75 - j0.25\sqrt{3}$
a-b-g	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$
b-c-g	$-j\sqrt{3}$	$j\sqrt{3}$
c-a-g	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$
a-b-c ή a-b-c-g	$1.5 + j0.5\sqrt{3}$	$1.5 - j0.5\sqrt{3}$

Διαχωρίζοντας την (4.14) σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, προκύπτει ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους: τη θέση του σφάλματος  $d$  και την αντίσταση σφάλματος  $R_F$ . Απαλείφοντας την αντίσταση σφάλματος, προκύπτει η λύση για τη θέση του σφάλματος. Μια αντίστοιχη μέθοδος έχει αναπτυχθεί στην [66]. Οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων που χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου τις τιμές των ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, εξαρτώνται από την ακρίβεια αυτών των δεδομένων. Σε ότι αφορά τις ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο άκρο μέτρησης της γραμμής, αυτές μπορούν να υπολογιστούν απευθείας, με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$Z_{1,A} = -\frac{\Delta V_{A1}}{\Delta I_{A1}} \quad (4.19)$$

$$Z_{2,A} = -\frac{V_{A2}}{I_{A2}} \quad (4.20)$$

$$Z_{0,A} = -\frac{V_{A0}}{I_{A0}} \quad (4.21)$$



**Σχήμα 4.5** Σχήμα εντοπισμού της θέσης του σφάλματος με χρήση τοπικών μετρήσεων και μεταφορά της μετρούμενης ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής μέσω καναλιού επικοινωνίας

Οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής είτε είναι γνωστές εκ των προτέρων, πράγμα αρκετά δύσκολο λόγω της διαρκούς μεταβολής της τοπολογίας του δικτύου, είτε στην καλύτερη περίπτωση διαβιβάζονται από το απομακρυσμένο στο τοπικό άκρο μέσω επικοινωνιακού διαύλου [78], όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.

### 4.2.3 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Γενικά, οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων που χρησιμοποιούν μετρήσεις από ένα μόνο άκρο δεν ενδείκνυται για παράλληλες γραμμές ή γραμμές διπλού κυκλώματος, λόγω της αμοιβαίας σύζευξης των κυκλωμάτων μηδενικής ακολουθίας. Με βάση τα Σχήματα 2.13(α)-(β) και 2.14(β), τα σήματα εισόδου που πρέπει να ληφθούν από το άκρο AI, για τον προσδιορισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης μέσω της (4.3), για οποιοδήποτε μονοφασικό σφάλμα στο κύκλωμα AI-BI της διπλής γραμμής, παρατίθενται στον Πίνακα 4.4.

**Πίνακας 4.4 Φασικές τάσεις και εντάσεις για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης  $Z_{FL}$  σε γραμμές διπλού κυκλώματος**

Τύπος σφάλματος	Μετρούμενες τάσεις ( $V_A$ )	Μετρούμενες εντάσεις ( $I_A$ )
a-g	$V_{Aa}$	$I_{A1a} + k_0 I_{A10} + k_{0m} I_{A100}$
b-g	$V_{Ab}$	$I_{A1b} + k_0 I_{A10} + k_{0m} I_{A100}$
c-g	$V_{Ac}$	$I_{A1c} + k_0 I_{A10} + k_{0m} I_{A100}$

Στην περίπτωση χρήσης συμμετρικών συνιστωσών, η τάση  $V_A$  και η ένταση  $I_{A1}$  στο άκρο AI της γραμμής, μπορούν να γραφούν ως ακολούθως:

$$\begin{cases} V_A = a_1 V_{A1} + a_2 V_{A2} + a_0 V_{A0} \\ I_{A1} = a_1 I_{A11} + a_2 I_{A12} + a_0 \left( \frac{Z_{0LI}}{Z_{1LI}} I_{A10} + \frac{Z_{0m}}{Z_{1LI}} I_{A100} \right) \end{cases} \quad (4.22)$$

όπου  $Z_{1LI}$  και  $Z_{0LI}$  είναι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής και μηδενικής ακολουθίας του κυκλώματος I της διπλής γραμμής,  $Z_{0m}$  είναι η σύνθετη αντίσταση αμοιβαίας σύζευξης των κυκλωμάτων μηδενικής ακολουθίας, και  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_0$  είναι οι συντελεστές των συμμετρικών συνιστωσών που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο μονοφασικού σφάλματος και παρατίθενται στον Πίνακα 4.5.

**Πίνακας 4.5 Συντελεστές συμμετρικών συνιστωσών της (4.22) για τον υπολογισμό της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης  $Z_{FL}$  σε γραμμές διπλού κυκλώματος**

Τύπος σφάλματος	$a_1$	$a_2$	$a_0$
a-g	1	1	1
b-g	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	1
c-g	$-0.5 + j0.5\sqrt{3}$	$-0.5 - j0.5\sqrt{3}$	1

Για παράδειγμα, για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα a-g στο κύκλωμα AI-BI της διπλής γραμμής, η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση στο άκρο AI του κυκλώματος της γραμμής που εμπλέκεται στο σφάλμα, υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_{FLI} = \frac{V_{Aa}}{I_{A1a}} = dZ_L + \frac{I_{F1}}{I_{A1a} + k_0 I_{A10} + k_{0m} I_{A10}} R_F \quad (4.23)$$

όπου  $k_0 = \frac{Z_{0LI} - Z_{1LI}}{Z_{1LI}}$  και  $k_{0m} = \frac{Z_{0m}}{Z_{1LI}}$ .

Από την (4.23) προκύπτει ότι, εκτός από το ρεύμα που συνεισφέρει στο σφάλμα το απέναντι άκρο της γραμμής και την αντίσταση σφάλματος, πρέπει να είναι γνωστό και το ρεύμα μηδενικής ακολουθίας του υγιούς κυκλώματος II της διπλής γραμμής, προκειμένου να υπολογιστεί η θέση του σφάλματος. Το γεγονός αυτό καθιστά πολύ δύσκολο τον εντοπισμό σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο. Στην περίπτωση, όμως, που τα κυκλώματα της διπλής γραμμής παραμένουν παράλληλα σε όλο το μήκος της, και τα τερματικά σημεία τους βρίσκονται στους ίδιους ζυγούς αναχώρησης και άφιξης, τότε ο εντοπισμός σφαλμάτων είναι εφικτός με χρήση, επιπροσθέτως, μετρήσεων των ρευμάτων του υγιούς κυκλώματος της γραμμής στο κοινό άκρο ([7], [100], [113], [125], [148], [187], [222], [229]). Η περίπτωση αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6. Η τάση στο σημείο σύνδεσης του εντοπιστή σφάλματος είναι:

$$V_A = dZ_{1LI} I_{A1} + \frac{R_F}{1-d} N_{12} \quad (4.24)$$

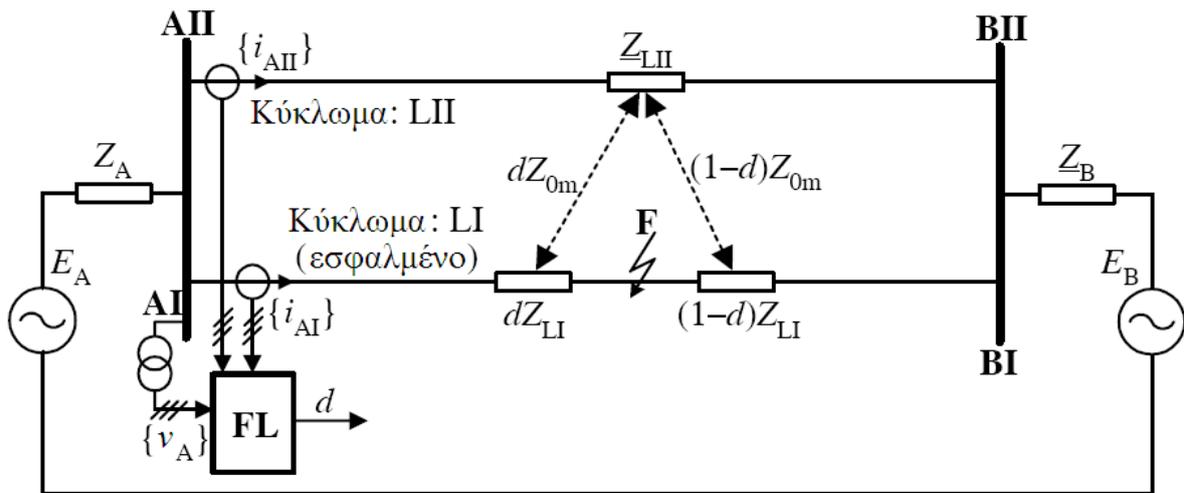
όπου ο συντελεστής

$$N_{12} = a_{F1} \left( I_{A11} - \frac{Z_{1LII}}{Z_{1LI}} I_{A11} \right) + a_{F2} \left( I_{A12} - \frac{Z_{2LII}}{Z_{2LI}} I_{A12} \right) \quad (4.25)$$

προκύπτει χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες θετικής και αρνητικής ακολουθίας του ρεύματος σφάλματος  $I_F$  από τις (4.26) και (4.27) αντίστοιχα, απαλείφοντας μερικώς τη συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας  $I_{F0}$  μέσω των συντελεστών  $a_{F1}$  και  $a_{F2}$  στον Πίνακα 4.3.

$$I_{F1} = \frac{I_{A11} - \frac{Z_{1LII}}{Z_{1LI}} I_{A11}}{1-d} \quad (4.26)$$

$$I_{F2} = \frac{I_{A12} - \frac{Z_{2LII}}{Z_{2LI}} I_{A12}}{1-d} \quad (4.27)$$



Σχήμα 4.6 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με χρήση μετρήσεων από το κοινό άκρο των παράλληλων κυκλωμάτων

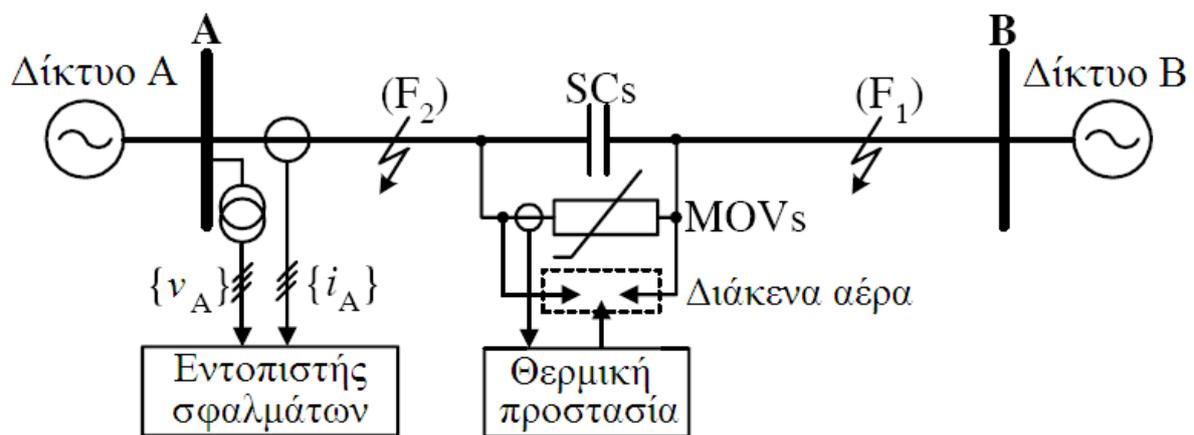
Παίρνοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη της (4.24) και εξαλείφοντας τον όρο  $R_F/(1-d)$ , προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τη θέση του σφάλματος:

$$d = \frac{\text{Im}(V_A)\text{Re}(N_{12}) - \text{Re}(V_A)\text{Im}(N_{12})}{\text{Im}(Z_{1L1}I_{A1})\text{Re}(N_{12}) - \text{Re}(Z_{1L1}I_{A1})\text{Im}(N_{12})} \quad (4.28)$$

Η σχέση (4.28) δεν εξαρτάται από τις σύνθετες αντιστάσεις των ισοδύναμων πηγών στα άκρα της διπλής γραμμής, ούτε από τα ρεύματα φόρτισης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος. Επιπλέον, η αβεβαιότητα για τις παραμέτρους του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, που είναι και οι πιο δύσκολες να προσδιοριστούν με ακρίβεια, περιορίζεται σε κάποιο βαθμό, αφού η πτώση τάσης στον κλάδο του σφάλματος υπολογίζεται απαλείφοντας μερικώς τις συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας. Βελτιωμένα αποτελέσματα για τη θέση του σφάλματος μπορούν να προκύψουν με χρήση του μοντέλου γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους.

#### 4.2.4 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς

Ο εντοπισμός σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο σε γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς (Σχήμα 4.7) είναι εξαιρετικά δύσκολος, λόγω της μη γραμμικής συμπεριφοράς της συστοιχίας των σειριακών πυκνωτών (SCs) και των κυκλωμάτων προστασίας τους από υπερτάσεις (MOVs). Επιπλέον, η παρουσία της τριφασικής συστοιχίας των SCs/MOVs στη γραμμή μεταφοράς πρέπει να αποτυπωθεί στον αλγόριθμο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, λόγω των απλουστεύσεων στο μοντέλο αναπαράστασης της συστοιχίας ή της αβεβαιότητας σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας της. Τέλος, η ανίχνευση του τμήματος της γραμμής στο οποίο έχει εκδηλωθεί το σφάλμα (πριν ή μετά τη σειριακή αντιστάθμιση σε σχέση με το άκρο μέτρησης) αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τον ορθό προσδιορισμό της θέσης του.



Σχήμα 4.7 Εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμή μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς με χρήση μετρήσεων από το τοπικό άκρο μόνο

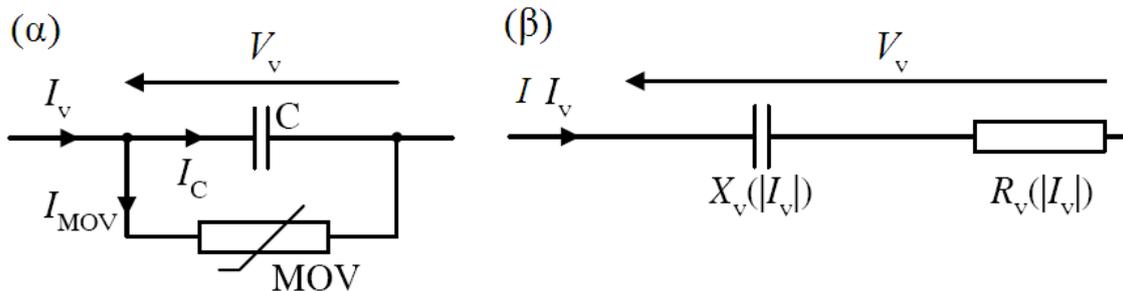
Γενικά, οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς, με χρήση μετρήσεων από ένα μόνο άκρο των γραμμών, προσπαθούν να υπολογίσουν την πτώση τάσης στα άκρα της συστοιχίας των SCs/MOVs, είτε χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο κύκλωμα της συστοιχίας στη θεμελιώδη συχνότητα ([93], [209]), ώστε να είναι δυνατή η αξιοποίηση των φασιθετών των μετρούμενων σημάτων, είτε επιλύοντας την έντονα μη γραμμική διαφορική εξίσωση που συνθέτουν ο SC με το MOV ([197], [212]), οπότε ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος λαμβάνει χώρα στο πεδίο του χρόνου (time-domain method).

Στην πρώτη περίπτωση, η παράλληλη σύνδεση του σειριακού πυκνωτή σταθερής χωρητικότητας SC με τη μη γραμμική αντίσταση του MOV (Σχήμα 4.8(α)) αναπαρίσταται στη μόνιμη κατάσταση

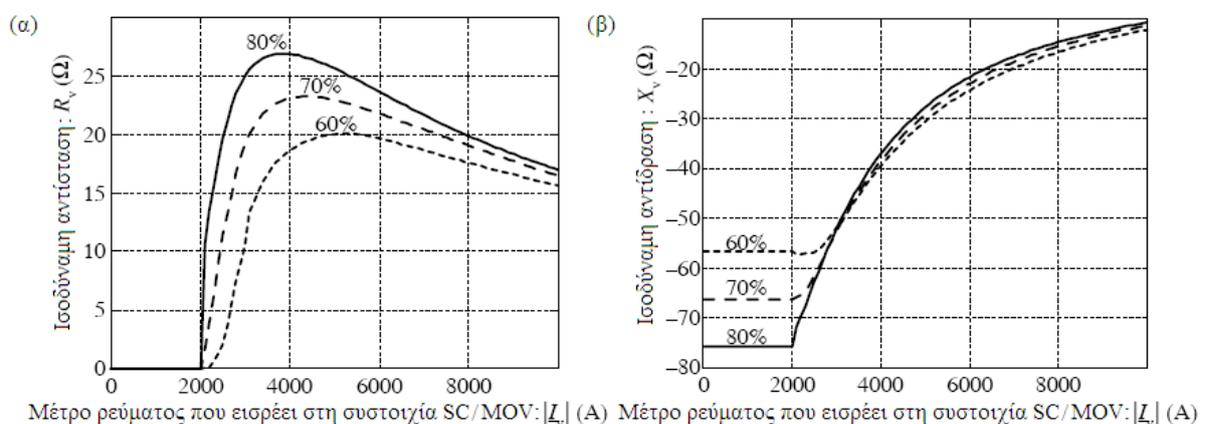
λειτουργίας από ένα ισοδύναμο κύκλωμα, αποτελούμενο από μία ωμική αντίσταση ( $R_v$ ) σε σειρά με μία χωρητική αντίδραση ( $X_v$ ) (Σχήμα 4.8(β)), που εξαρτώνται από το πλάτος του ρεύματος που διαρρέει τη συστοιχία SC/MOV ( $|I_v|$ ). Οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των ρευμάτων και των τάσεων στα δύο κυκλώματα του σχήματος 4.8 πρέπει να συμπίπτουν μεταξύ τους. Γνωρίζοντας το βαθμό αντιστάθμισης της γραμμής (C) και τις παραμέτρους του κυκλώματος MOV που συνθέτουν τη χαρακτηριστική  $v-i$  της (2.43), οι τιμές των  $R_v$  και  $X_v$  μπορούν να υπολογιστούν θεωρώντας ημιτονοειδείς κυματομορφές θεμελιώδους συχνότητας για το ρεύμα εισόδου στη συστοιχία SC/MOV, και υπολογίζοντας το φασιθέτη θεμελιώδους συχνότητας της πτώσης τάσης στα άκρα της συστοιχίας, και κατ' επέκταση τη σύνθετη αντίσταση  $Z_v$ . Ο υπολογισμός αυτός γίνεται για ένα ευρύ φάσμα τιμών του πλάτους του ρεύματος εισόδου και στη συνέχεια οι χαρακτηριστικές  $R_v(|I_v|)$  και  $X_v(|I_v|)$  προκύπτουν με κάποια μορφή πολυωνυμικής προσέγγισης.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας προσδιορισμού του ισοδύναμου κυκλώματος της συστοιχίας των SCs/MOVs μιας γραμμής μεταφοράς 400 kV, 300 km για διάφορους βαθμούς σειριακής αντιστάθμισης. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η χωρητικότητα του σειριακού πυκνωτή (ή ο βαθμός αντιστάθμισης) επηρεάζει περισσότερο την ισοδύναμη ωμική αντίσταση  $R_v$ . Σε ότι αφορά την ισοδύναμη αντίδραση  $X_v$ , αυτή διαφέρει για κάθε βαθμό αντιστάθμισης μόνο για μικρές τιμές του ρεύματος σφάλματος (που αντιστοιχούν στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του MOV). Το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα των SCs και MOVs μπορεί να περιγραφεί από τον ακόλουθο πίνακα, σε μορφή φασικών συνιστωσών:

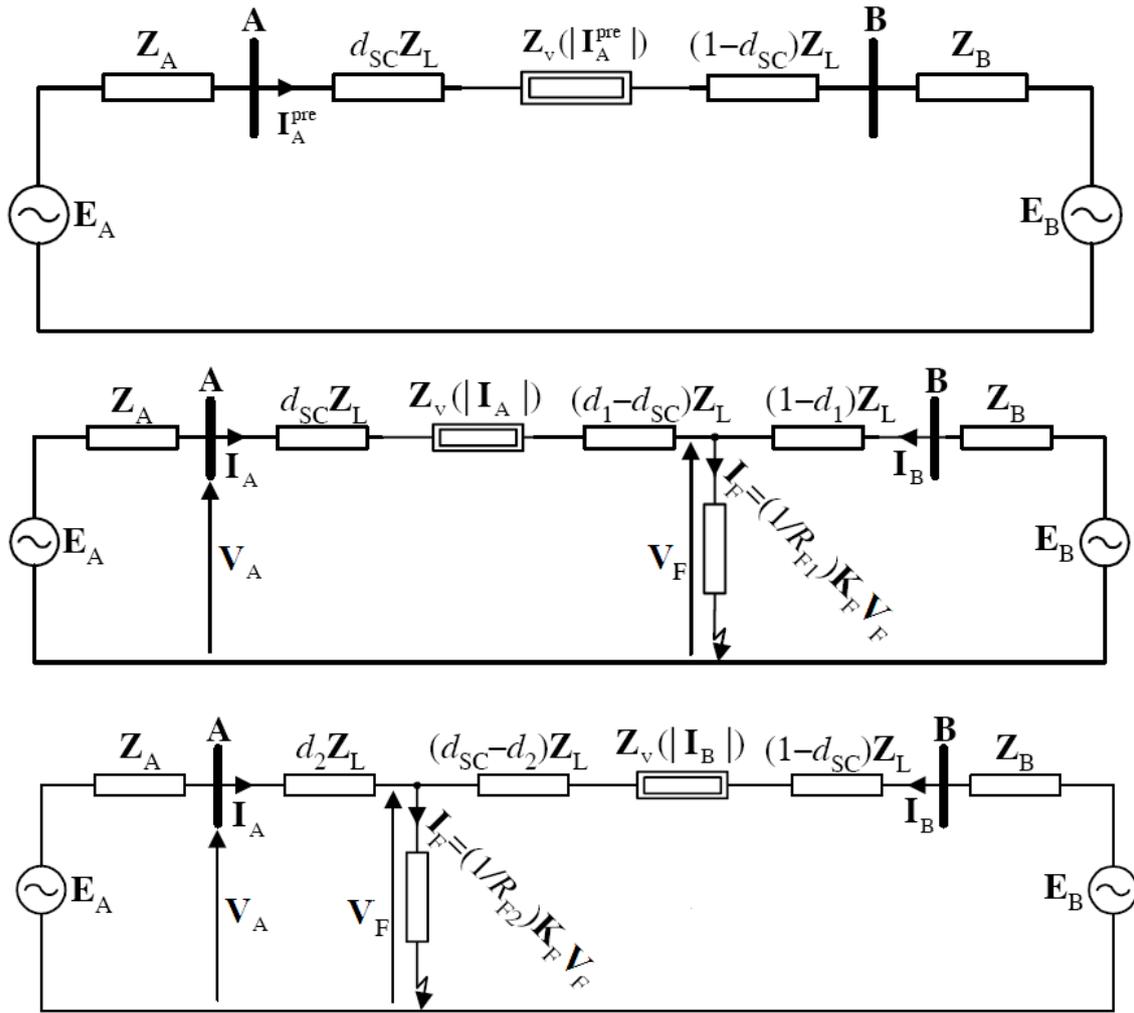
$$Z_v(|I|) = \begin{bmatrix} Z_{va}(|I_a|) & 0 & 0 \\ 0 & Z_{vb}(|I_b|) & 0 \\ 0 & 0 & Z_{vc}(|I_c|) \end{bmatrix} \quad (4.29)$$



Σχήμα 4.8 Υπολογισμός ισοδύναμου κυκλώματος θεμελιώδους συχνότητας συστοιχίας SC/MOV για σειριακή αντιστάθμιση



Σχήμα 4.9 Ισοδύναμη ωμική αντίσταση (α) και χωρητική αντίδραση (β) συστοιχίας SC/MOV για διάφορους βαθμούς σειριακής αντιστάθμισης γραμμής μεταφοράς 400 kV, 300 km



Σχήμα 4.10 Ισοδύναμα κυκλώματα γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς (α) χωρίς σφάλμα, (β) για σφάλμα μετά, (γ) για σφάλμα πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης

#### 4.2.4.1 Προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος σε γραμμές με σειριακή αντιστάθμιση

Στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζονται τα ισοδύναμα κυκλώματα μιας γραμμής μεταφοράς με σειριακή αντιστάθμιση πριν (α) και μετά την εκδήλωση του σφάλματος, η θέση του οποίου μπορεί να βρίσκεται μετά (β) ή πριν (γ) τη σειριακή αντιστάθμιση. Η ισοδύναμη πηγή στο τοπικό άκρο A μέτρησης της γραμμής, αναπαρίσταται από το διάνυσμα  $3 \times 1$  των φασικών ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων,  $\mathbf{E}_A$ :

$$\mathbf{E}_A = [E_{Aa} \quad E_{Ab} \quad E_{Ac}]^T \quad (4.30)$$

και τον  $3 \times 3$  πίνακα των ίδιων ( $Z_{As}$ ) και αμοιβαίων ( $Z_{Am}$ ) σύνθετων αντιστάσεων,  $\mathbf{Z}_A$ . Θεωρώντας σύστημα με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, ο πίνακας  $\mathbf{Z}_A$  λαμβάνει τη μορφή:

$$\mathbf{Z}_A = \begin{bmatrix} Z_{As} & Z_{Am} & Z_{Am} \\ Z_{Am} & Z_{As} & Z_{Am} \\ Z_{Am} & Z_{Am} & Z_{As} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

όπου οι σύνθετες αντιστάσεις  $Z_{As} = \frac{1}{3}(Z_{A0} + 2Z_{A1})$  και  $Z_{Am} = \frac{1}{3}(Z_{A0} - Z_{A1})$  προκύπτουν από τα δεδομένα μηδενικής και θετικής ακολουθίας,  $Z_{A0}$  και  $Z_{A1}$ . Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν για την ισοδύναμη πηγή στο απομακρυσμένο άκρο B της γραμμής ( $\mathbf{E}_B$  και  $\mathbf{Z}_B$ ), αλλά και για τον πίνακα σύνθετων αντιστάσεων της γραμμής,  $\mathbf{Z}_L$ , μέσω των (2.2)-(2.3). Η αναπαράσταση των ισοδυνάμων κυκλωμάτων της γραμμής με φασικές συνιστώσες επιβάλλεται από τη χρήση της (4.29) για τη μαθηματική περιγραφή του κυκλώματος των SCs/MOVs.

Στην περίπτωση που το σφάλμα εκδηλώνεται μετά τη διάταξη της σειριακής αντιστάθμισης (SUB\_1), προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις από το Σχήμα 4.10(β):

$$\mathbf{E}_A - \mathbf{E}_B = (\mathbf{Z}_A + d_1 \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_v(|\mathbf{I}_A|)) \mathbf{I}_A - ((1 - d_1) \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_B) \mathbf{I}_B \quad (4.32)$$

$$\mathbf{V}_A - \mathbf{V}_F = (d_1 \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_v(|\mathbf{I}_A|)) \mathbf{I}_A \quad (4.33)$$

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B \quad (4.34)$$

όπου  $d_{SC}$  συμβολίζει την απόσταση της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης από το άκρο μέτρησης A και  $d_1$  την απόσταση του σφάλματος F από το άκρο A στο εσφαλμένο τμήμα της γραμμής. Ισχύει:  $d_{SC} < d_1 < 1$ .

Για τον κλάδο του σφάλματος, ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\mathbf{I}_F = \frac{1}{R_{F1}} \mathbf{K}_F \mathbf{V}_F \quad (4.35)$$

όπου  $R_{F1}$  συμβολίζει την αντίσταση σφάλματος και  $\mathbf{K}_F$  είναι ένας  $3 \times 3$  πίνακας, τα στοιχεία του οποίου καθορίζονται από τις σχέσεις που διέπουν τις φασικές τάσεις,  $\mathbf{V}_F$ , και εντάσεις,  $\mathbf{I}_F$ , ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος. Για τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $\mathbf{K}_F$  ισχύει:

$$k_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{αν οι φάσεις } i \text{ και } j \text{ εμπλέκονται στο σφάλμα} \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad \text{όπου } i, j = a, b, c \quad (4.36)$$

ενώ τα διαγώνια στοιχεία υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$k_{ii} = \sum_{j=a}^{j=c} |k_{ij}| \quad \text{όπου } i = a, b, c \quad (4.37)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός διφασικού (a-b) και διφασικού ως προς γη σφάλματος (a-b-g), ο πίνακας  $\mathbf{K}_F$  παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (a-b), } \mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (a-b-g)} \quad (4.38)$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα της γραμμής με αντιστάθμιση σειράς πριν από την εκδήλωση του σφάλματος, χαρακτηρίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\mathbf{E}_A - \mathbf{E}_B = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_v(|\mathbf{I}_A^{\text{pre}}|) + \mathbf{Z}_B) \mathbf{I}_A^{\text{pre}} \quad (4.39)$$

όπου το διάνυσμα  $\mathbf{I}_A^{\text{pre}}$  αντιπροσωπεύει τα τριφασικά ρεύματα της γραμμής πριν από το σφάλμα. Συνδυάζοντας τις (4.32)-(4.39) και θεωρώντας ότι οι ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις στα άκρα της γραμμής δε μεταβάλλονται κατά το σφάλμα, προκύπτει:

$$\mathbf{A}d_1^2 - \mathbf{B}d_1 + \mathbf{C} - \mathbf{D}R_{F1} = 0 \quad (4.40)$$

όπου

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}_L \mathbf{K}_F \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_L \mathbf{K}_F (\mathbf{V}_A + (\mathbf{Z}_L - \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_A|)) \mathbf{I}_A) + \mathbf{Z}_B \mathbf{K}_F \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_B) \mathbf{K}_F (\mathbf{V}_A - \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_A|) \mathbf{I}_A)$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_B) (\mathbf{I}_A - \mathbf{I}_A^{\text{pre}}) + \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_A|) \mathbf{I}_A - \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_A^{\text{pre}}|) \mathbf{I}_A^{\text{pre}}$$

Μετασχηματίζοντας την (4.40) σε βαθμωτή μορφή, προκύπτει η ακόλουθη τετραγωνική εξίσωση, με αγνώστους τη θέση του σφάλματος  $d_1$ , στο τμήμα της γραμμής μετά τη σειριακή αντιστάθμιση, και την αντίσταση σφάλματος  $R_{F1}$ :

$$A_2 d_1^2 - A_1 d_1 + A_0 - R_{F1} = 0 \quad (4.41)$$

όπου  $A_2$ ,  $A_1$  και  $A_0$  είναι μιγαδικοί συντελεστές που υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$A_2 = \mathbf{P}\mathbf{A}, \quad A_1 = \mathbf{P}\mathbf{B}, \quad A_0 = \mathbf{P}\mathbf{C}, \quad \mathbf{P} = \frac{\mathbf{D}^T}{\mathbf{D}^T \mathbf{D}}, \quad \text{και } T \text{ είναι ο τελεστής ανάστροφων πινάκων-}$$

διανυσμάτων.

Παίρνοντας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (4.41) προκύπτει ένα σύστημα δύο εξισώσεων για τους αγνώστους  $d_1$  και  $R_{F1}$ . Η λύση  $(d_1, R_{F1})$  προκύπτει κατ' αντιστοιχία με την (4.14) ικανοποιώντας τον περιορισμό  $d_{SC} < d_1 < 1$ .

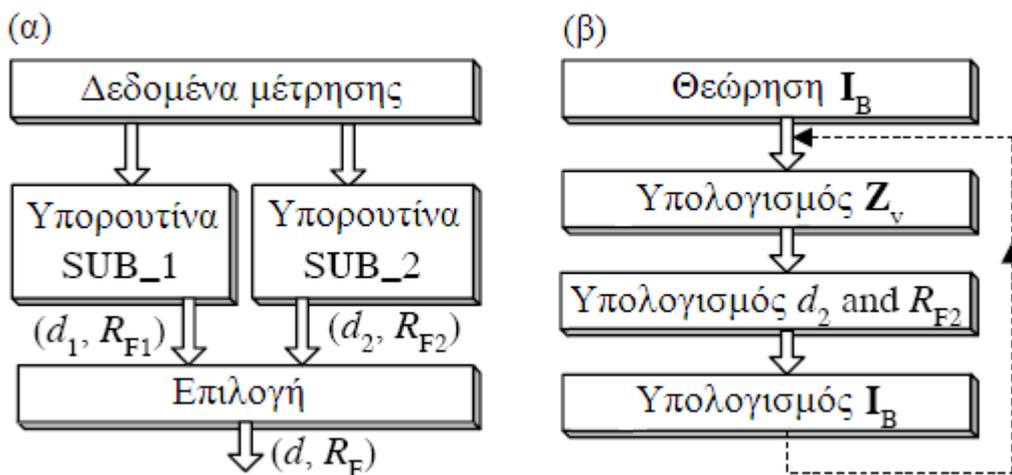
Στην περίπτωση που το σφάλμα εκδηλωθεί πριν από τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης (SUB\_2), το ρεύμα που διαρρέει τη συστοιχία των SCs/MOVs,  $\mathbf{I}_B$ , στο Σχήμα 4.10(γ), δεν είναι άμεσα διαθέσιμο στον εντοπιστή σφαλμάτων στο άκρο A, γεγονός που κάνει πιο περίπλοκο τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτει μια σχέση παρόμοια με την (4.40) αλλά με τους ακόλουθους συντελεστές:

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}_L \mathbf{K}_F \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_L \mathbf{K}_F \mathbf{V}_A + (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_B|) + \mathbf{Z}_B) \mathbf{K}_F \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_A$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_B|)) \mathbf{K}_F \mathbf{V}_A$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_B) (\mathbf{I}_A - \mathbf{I}_A^{\text{pre}}) + \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_B|) \mathbf{I}_A - \mathbf{Z}_v (|\mathbf{I}_A^{\text{pre}}|) \mathbf{I}_A^{\text{pre}}$$



Σχήμα 4.11 (α) Διαδικασία προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς, (β) επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού της θέσης του σφάλματος  $d_2$  στο τμήμα της γραμμής πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης

Η λύση  $(d_2, R_{F2})$  δίνεται από μια επαναληπτική διαδικασία, θεωρώντας κατάλληλη αρχική τιμή για το ρεύμα  $I_B$  με βάση τις παραμέτρους του ισοδύναμου δικτύου στο άκρο B ( $E_B$  και  $Z_B$ ). Η λύση πρέπει να ικανοποιεί τον ακόλουθο περιορισμό:  $0 < d_2 < d_{SC}$ . Στο Σχήμα 4.10(α) φαίνεται η διαδικασία προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος, με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα μόνο άκρο γραμμής με χωρητική αντιστάθμιση σειράς. Στο Σχήμα 4.10(β) παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της λύσης  $(d_2, R_{F2})$  για σφάλματα πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης σε σχέση με το τοπικό άκρο μέτρησης.

Για την επιλογή της σωστής λύσης  $(d, R_F)$  μεταξύ των δύο λύσεων  $(d_1, R_{F1})$  και  $(d_2, R_{F2})$ , που προκύπτουν από τις υπορουτίνες υπολογισμού της θέσης του σφάλματος σε κάθε τμήμα της γραμμής μεταφοράς SUB\_1 και SUB\_2 αντίστοιχα, χρησιμοποιείται ο παρακάτω αλγόριθμος:

- Αν  $d_1 \notin [d_{SC}, 1]$  και  $d_2 \in [0, d_{SC}]$ , τότε η σωστή λύση είναι η  $(d_2, R_{F2})$ .
- Αν  $d_1 \in [d_{SC}, 1]$  και  $d_2 \notin [0, d_{SC}]$ , τότε η σωστή λύση είναι η  $(d_1, R_{F1})$ .

Συνοψίζοντας, τα δεδομένα που απαιτούνται για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς, πέραν των μετρήσεων στο τοπικό άκρο που βρίσκεται εγκατεστημένος ο εντοπιστής σφαλμάτων, είναι:

- Ο πίνακας σύνθετων αντιστάσεων της γραμμής,  $Z_L$ .
- Ο πίνακας των ισοδυνάμων σύνθετων αντιστάσεων στο τοπικό άκρο,  $Z_A$ .
- Ο πίνακας των ισοδυνάμων σύνθετων αντιστάσεων στο απομακρυσμένο άκρο,  $Z_B$ .
- Η θέση της διάταξης αντιστάθμισης σειράς σε σχέση με το τοπικό άκρο,  $d_{SC}$ .
- Το ισοδύναμο κύκλωμα της συστοιχίας των SCs/MOVs ( $R_v$  και  $X_v$ ).
- Η αρχική τιμή του ρεύματος  $I_B$  στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής, σε περίπτωση σφάλματος πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η μη επαρκής γνώση των δεδομένων αυτών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ακρίβεια των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν τοπικές μόνο μετρήσεις για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς. Το ίδιο ισχύει και για τους αντίστοιχους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς ([215], [216]). Τέλος, στις εργασίες ([197], [214]) παρουσιάζονται αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων στο πεδίο του χρόνου για γραμμές με αντιστάθμιση σειράς.

#### 4.2.5 Βελτίωση ακριβείας των αλγορίθμων με χρήση μετρήσεων από ένα μόνο άκρο με αξιοποίηση του μοντέλου γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους

Οι αλγόριθμοι που παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες, έχουν προκύψει θεωρώντας το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους και αμελώντας τις εγκάρσιες χωρητικότητες των γραμμών. Καλύτερη ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί θεωρώντας το μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους (Σχήμα 2.18). Κάνοντας χρήση αυτού του μοντέλου, η τάση  $V_F$  και η ένταση  $I_{FA}$  στο σημείο του σφάλματος (Σχήμα 4.2) μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τάσης  $V_A$  και της έντασης  $I_A$  στο σημείο μέτρησης, ως εξής:

$$V_F = \cosh(\gamma dl)V_A - Z_c \sinh(\gamma dl)I_A \quad (4.42)$$

$$I_{FA} = -\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma dl)V_A + \cosh(\gamma dl)I_A \quad (4.43)$$

Η τάση στο σημείο του σφάλματος F μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$$V_F = R_F I_F = R_F k_F I_{FA} \quad (4.44)$$

όπου  $k_F$  είναι ο συντελεστής καταμερισμού του ρεύματος σφάλματος,  $I_F$ . Συνδυάζοντας τις (4.42)-(4.44) προκύπτει η σχέση:

$$F(d) = R_F k_F(d) = \frac{\cosh(\gamma dl)V_A - Z_c \sinh(\gamma dl)I_A}{-\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma dl)V_A + \cosh(\gamma dl)I_A} \quad (4.45)$$

Αν θεωρηθεί ότι τα ρεύματα στα δύο άκρα της γραμμής έχουν την ίδια φασική γωνία, τότε ο συντελεστής  $k_F(d)$  είναι πραγματικός αριθμός και, κατά συνέπεια, θα ισχύει:

$$\text{Im} \left( \frac{\cosh(\gamma dl)V_A - Z_c \sinh(\gamma dl)I_A}{-\frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma dl)V_A + \cosh(\gamma dl)I_A} \right) = 0 \quad (4.46)$$

Η εξίσωση (4.46) μπορεί να επιλυθεί κάνοντας χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου. Με τον ίδιο τρόπο, το μοντέλο γραμμής με κατανομημένες παραμέτρους μπορεί να συμπεριληφθεί σε κάθε αλγόριθμο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος.

#### 4.2.6 Αξιολόγηση αλγορίθμων με χρήση δεδομένων μέτρησης από ένα άκρο

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης μόνο από το τοπικό άκρο της γραμμής αποτελούν μια πολύ οικονομική λύση, και για το λόγο αυτό εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως. Παρόλα αυτά, πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή τους, όπως:

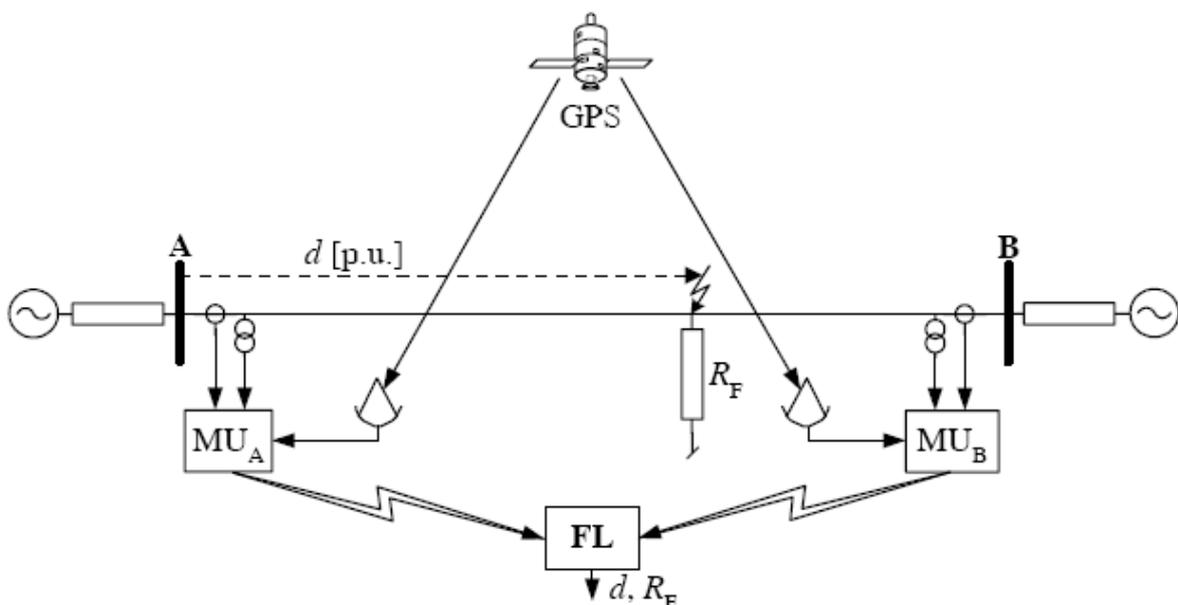
- (α) Ο συνδυασμός του ρεύματος και της αντίστασης σφάλματος (reactance effect). Η τιμή της αντίστασης σφάλματος μπορεί να λάβει πολύ μεγάλες τιμές για σφάλματα γης, τα οποία έχουν και τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης σε εναέριες γραμμές μεταφοράς.
- (β) Η λανθασμένη επιλογή των φάσεων της γραμμής που εμπλέκονται στο σφάλμα (fault type identification).
- (γ) Η αβεβαιότητα ως προς τις παραμέτρους της γραμμής και κυρίως ως προς τη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας  $Z_{0L}$ . Είναι συχνά πολύ δύσκολο να υπολογίσει κανείς με μεγάλη ακρίβεια την  $Z_{0L}$ . Η τιμή της εξαρτάται από την αντίσταση του εδάφους, η οποία είναι δύσκολο να μετρηθεί, και δεν παραμένει σταθερή. Ένα σφάλμα της τάξεως του 20% στην  $Z_{0L}$  μπορεί να εισαγάγει σφάλμα μεγαλύτερο από 15% για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος. Επιπλέον, αυτή η σύνθετη αντίσταση δεν κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς.
- (δ) Η μη επαρκής ακρίβεια του μοντέλου της γραμμής μεταφοράς, όπου γραμμές χωρίς αντιμετάθεση φάσεων αναπαρίστανται ως γραμμές με αντιμετάθεση, ή όπου η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής αμελείται κτλ.
- (ε) Η παρουσία εγκάρσιων επαγωγέων και πυκνωτών.
- (στ) Τα σφάλματα μέτρησης, π.χ. σφάλματα των μετασχηματιστών τάσης και έντασης, σφάλμα κβαντοποίησης των μετατροπέων A/D κτλ.
- (ζ) Το σύστημα φιλτραρίσματος που απαιτείται ώστε να εξαχθούν οι φασιθέτες των φασικών τάσεων και εντάσεων στο σημείο μέτρησης. Για παράδειγμα, αν οι τάσεις και οι εντάσεις δεν φτάσουν γρήγορα στη μόνιμη κατάσταση (στην περίπτωση σφάλματος με χρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση τόξου (arcing fault)) ή το σφάλμα εκκαθαριστεί με χρονική καθυστέρηση μικρότερη από το χρόνο απόκρισης του φίλτρου, τότε η εκτιμώμενη θέση του σφάλματος θα ενέχει σημαντικά σφάλματα.
- (στ) Η παρουσία της συστοιχίας των SCs/MOVs σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς.

Για να βελτιωθούν οι εκτιμήσεις της θέσης του σφάλματος, πρέπει να μειωθεί ή ακόμα και να εξαλειφθεί η επίδραση των παραπάνω πηγών σφάλματος. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο αν υπάρχει περισσότερη πληροφόρηση για το σύστημα της γραμμής και το σφάλμα.

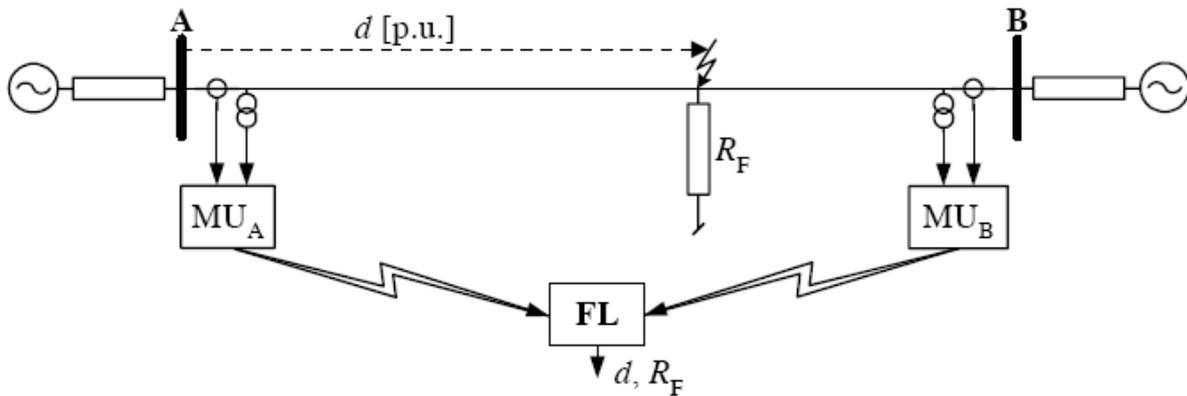
### 4.3 Αλγόριθμοι με χρήση δεδομένων μέτρησης και από τα δύο άκρα

Προκειμένου να ξεπεραστούν τα προβλήματα των αλγορίθμων εντοπισμού σφαλμάτων που χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης από ένα μόνο άκρο των γραμμών μεταφοράς, και να βελτιωθεί η ακρίβεια υπολογισμού της θέσης του σφάλματος, έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία αλγόριθμοι που αξιοποιούν δεδομένα μέτρησης και από τα δύο άκρα των γραμμών. Οι αλγόριθμοι αυτοί διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: α) σε αυτούς που χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις των τάσεων και εντάσεων στα άκρα των γραμμών ([30], [50], [88], [90], [105], [106], [131], [132], [153], [154], [178], [180], [223], [242], [255]) και β) σε αυτούς που χρησιμοποιούν μη συγχρονισμένες μετρήσεις ([39], [97], [104], [144], [149], [169], [171], [170], [226], [240], [239]).

Στην περίπτωση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις (Σχήμα 4.12), απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη συγχρονισμού είναι η παρουσία μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMUs) και δεκτών GPS υψηλής ακρίβειας. Στην περίπτωση των αλγορίθμων που χρησιμοποιούν μη συγχρονισμένες μετρήσεις (Σχήμα 4.13), εκτός από τη θέση του σφάλματος προστίθεται στις άγνωστες παραμέτρους του προβλήματος και η γωνία συγχρονισμού, που εκφράζει τη χρονική διαφορά διενέργειας των μετρήσεων στα άκρα της γραμμής. Αυτό αποτυπώνεται καλύτερα στο Σχήμα 4.14, όπου οι μετρήσεις δεν έχουν κοινή χρονική αναφορά. Τα στιγμιότυπα δειγματοληψίας, που αναπαρίστανται με μικρούς κύκλους στους άξονες των χρόνων  $t_A$  και  $t_B$  σε κάθε άκρο μέτρησης της γραμμής, δε συμπίπτουν μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει γιατί οι μετατροπείς A/D σε κάθε εντοπιστή σφαλμάτων δεν ελέγχονται μέσω GPS. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια χρονική μετατόπιση ( $\Delta T_{B-A}$ ) μεταξύ των διενεργούμενων μετρήσεων. Για να επιτευχθεί συγχρονισμός των μετρήσεων, πρέπει να εξισωθούν οι χρόνοι ανίχνευσης του σφάλματος ( $t_A = 0$  και  $t_B = 0$ ) σε κάθε άκρο μέτρησης. Αυτό πραγματοποιείται θεωρώντας τις μετρήσεις στο ένα άκρο (A) της γραμμής ως αναφορά και στοιχίζοντας χρονικά ως προς αυτές, τις μετρήσεις στο απομακρυσμένο άκρο (B). Στην περίπτωση που ο αλγόριθμος εντοπισμού σφαλμάτων βασίζεται στη χρήση φασιθετών θεμελιώδους συχνότητας των μετρούμενων σημάτων, η χρονική στοίχιση επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας τους φασιθέτες των τριφασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο B της γραμμής, με τον τελεστή  $e^{j\delta}$ , όπου  $\delta$  είναι η γωνία συγχρονισμού.



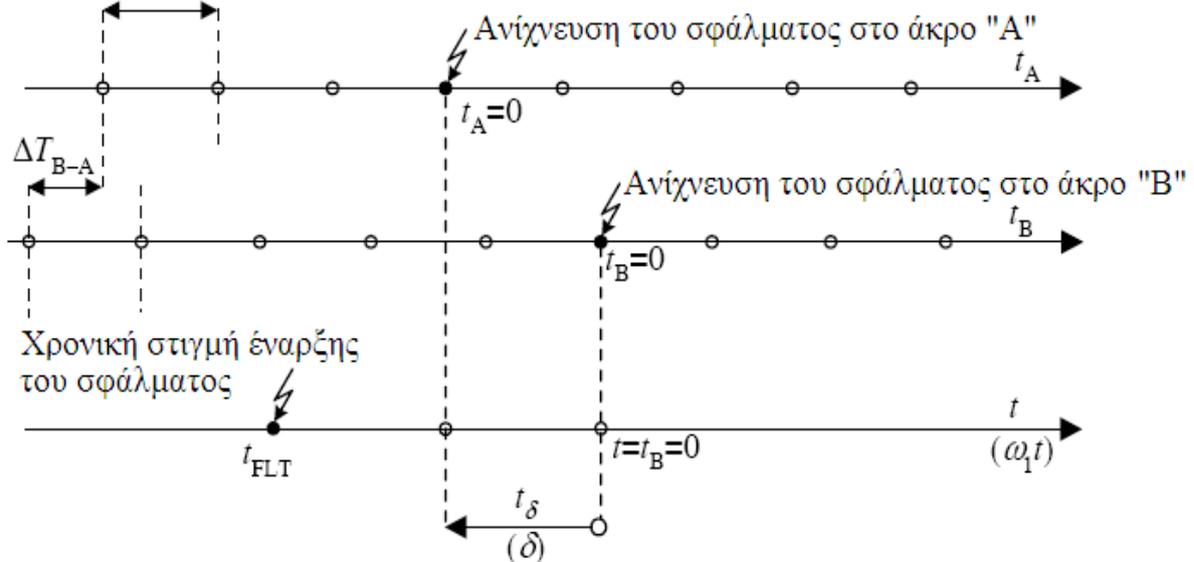
Σχήμα 4.12 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς



Σχήμα 4.13 Εντοπισμός της θέσης του σφάλματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς

Οι αλγόριθμοι με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων διακρίνονται σε αυτούς που αξιοποιούν περιορισμένο αριθμό μετρήσεων (τριφασικές τάσεις και εντάσεις από το ένα άκρο της γραμμής και τριφασικές μόνο τάσεις ή εντάσεις από το άλλο άκρο [152], τριφασικές μόνο τάσεις [29] ή εντάσεις από κάθε άκρο της γραμμής κτλ.) και σε αυτούς που επιστρατεύουν όλα τα δεδομένα μέτρησης από κάθε άκρο. Οι αλγόριθμοι με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων διακρίνονται, ανάλογα με το μοντέλο γραμμής που υιοθετείται, σε αυτούς που χρησιμοποιούν: (α) το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους ([64], [139], [239]), (β) το μοντέλο γραμμής με καταναμημένες παραμέτρους ([144], [145], [171]), (γ) συνδυασμό και των δύο ([97], [98]). Επιπλέον, οι αλγόριθμοι με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων διακρίνονται σε αυτούς που χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος [[143]] και σε αυτούς που χρησιμοποιούν αποκλειστικά δεδομένα μέτρησης κατά τη διάρκεια του σφάλματος ([64], [97], [98], [144], [145], [239]). Η ίδια κατηγοριοποίηση, τέλος, μπορεί να ισχύσει και για τους αντίστοιχους αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί για γραμμές διπλού κυκλώματος ([30], [107], [112], [196], [230], [232]), αλλά και για γραμμές πολλών σημείων ([1], [28]).

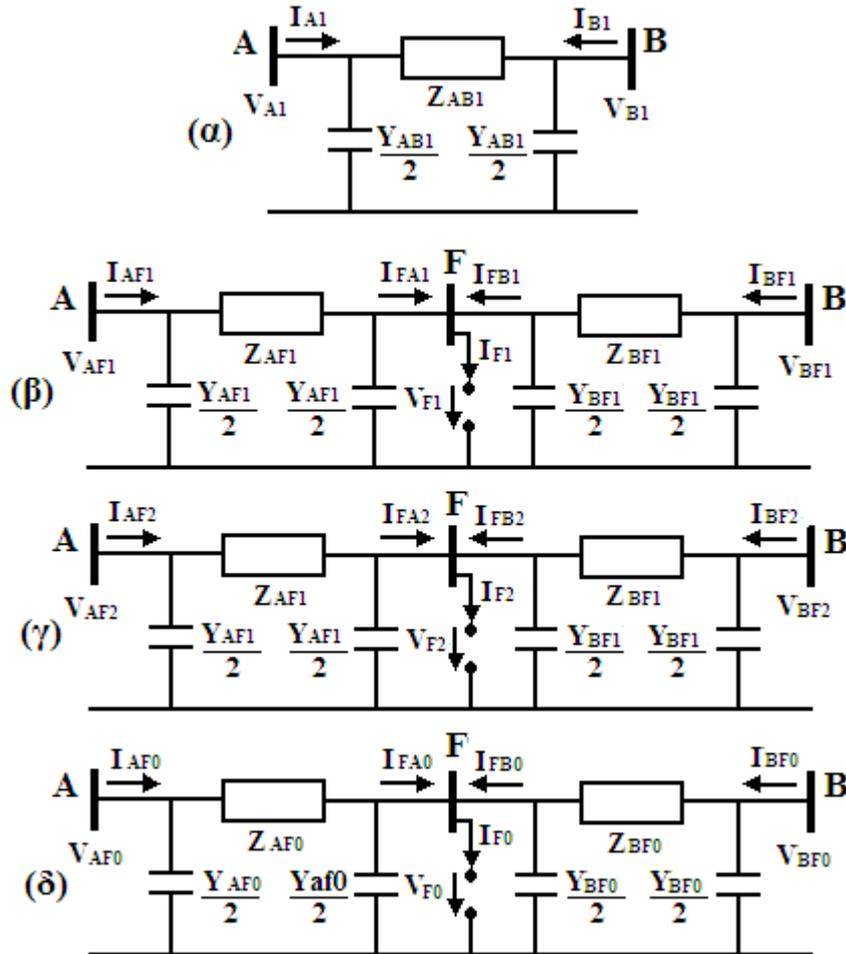
Διάστημα δειγματοληψίας



Σχήμα 4.14 Χρονική στοίχιση μη συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα γραμμής με εισαγωγή της γωνίας συγχρονισμού για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος

Για την παρουσίαση των αλγορίθμων αυτών επιστρατεύονται τα ακολουθιακά ισοδύναμα  $\Pi$  κυκλώματα της γραμμής μεταφοράς του σχήματος 4.15. Θεωρείται ότι η γραμμή μεταφοράς είναι

συμμετρική με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, και επομένως για την ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος των συμμετρικών συνιστωσών.



**Σχήμα 4.15** (α) Κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς πριν από το σφάλμα. Κυκλώματα (β) θετικής, (γ) αρνητικής, (δ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς κατά το σφάλμα

Στο Σχήμα 4.15 χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί [263]:

$Z_{AB1}$ ,  $Y_{AB1}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση και εγκάρσια αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας της γραμμής AB, αντίστοιχα

$Z_{AF1}$ ,  $Z_{BF1}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του τμήματος AF και BF της γραμμής, αντίστοιχα

$Y_{AF1}$ ,  $Y_{BF1}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας του τμήματος AF και BF της γραμμής, αντίστοιχα

$Z_{AF0}$ ,  $Z_{BF0}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του τμήματος AF και BF της γραμμής, αντίστοιχα

$Y_{AF0}$ ,  $Y_{BF0}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα μηδενικής ακολουθίας του τμήματος AF και BF της γραμμής, αντίστοιχα

$V_{A1}$ ,  $I_{A1}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας της τάσης και της έντασης θετικής ακολουθίας στο άκρο A της γραμμής, πριν από το σφάλμα

$V_{B1}$ ,  $I_{B1}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας της τάσης και της έντασης θετικής ακολουθίας στο άκρο B της γραμμής, πριν από το σφάλμα

$V_{AF1}, V_{AF2}, V_{AF0}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των τάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, στο άκρο Α της γραμμής κατά το σφάλμα

$I_{AF1}, I_{AF2}, I_{AF0}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των εντάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, στο άκρο Α της γραμμής κατά το σφάλμα

$V_{BF1}, V_{BF2}, V_{BF0}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των τάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, στο άκρο Β της γραμμής κατά το σφάλμα

$I_{BF1}, I_{BF2}, I_{BF0}$ : φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των εντάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, στο άκρο Β της γραμμής κατά το σφάλμα

$Z_{c1}, Z_{c0}$ : χαρακτηριστική αντίσταση θετικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, της γραμμής μεταφοράς

$\gamma_1, \gamma_0$ : χαρακτηριστική σταθερά μετάδοσης θετικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα, της γραμμής μεταφοράς

$l$ : συνολικό μήκος της γραμμής μεταφοράς (km)

$x$ : απόσταση α.μ. μήκους (p.u) μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του άκρου αναφοράς Α

Οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις και αγωγιμότητες της γραμμής μεταφοράς εκφράζονται με βάση το μοντέλο γραμμής μεγάλου μήκους με κατανεμημένες παραμέτρους, ως ακολούθως:

$$Z_{AB1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) \quad (4.47)$$

$$Z_{AFi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i x l) \quad (4.48)$$

$$Z_{BFi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i (1-x) l) \quad (4.49)$$

$$Y_{AB1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_1 l / 2) \quad (4.50)$$

$$Y_{AFi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i x l / 2) \quad (4.51)$$

$$Y_{BFi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i (1-x) l / 2) \quad (4.52)$$

$$Z_{ci} = \sqrt{Z'_i / Y'_i} \quad (4.53)$$

$$\gamma_i = \sqrt{Z'_i Y'_i} \quad (4.54)$$

όπου:  $i=0,1$ ,  $Z_{ci}$  και  $\gamma_i$  είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση και σταθερά μετάδοσης της γραμμής αντίστοιχα,  $Z'_i = R'_i + jX'_i$  και  $Y'_i = jB'_i$  είναι η εν σειρά σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα της γραμμής αντίστοιχα, ανά μονάδα μήκους,  $R'_i$  και  $X'_i$  είναι η εν σειρά ωμική και επαγωγική αντίδραση αντίστοιχα, και  $B'_i$  η εγκάρσια χωρητική αγωγιμότητα της γραμμής, ανά μονάδα μήκους.

### 4.3.1 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με πλήρη αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων από κάθε άκρο της γραμμής μεταφοράς

Στην περίπτωση αυτή, η θέση του σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί αξιοποιώντας αποκλειστικά το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της γραμμής (Σχήμα 4.15(β)) και τους συγχρονισμένους φασιθέτες θετικής ακολουθίας των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων στα άκρα της, κατά το σφάλμα. Με τον τρόπο αυτό δεν απαιτείται εξειδικευμένος αλγόριθμος ανίχνευσης του τύπου σφάλματος, μιας και οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας είναι οι μοναδικές που απαντώνται σε κάθε σφάλμα (συμμετρικό ή μη). Η τάση στο σημείο του σφάλματος F, στο Σχήμα 4.15(β), μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$V_{F1,A} = V_{AF1} (1 + (Y_{AF1}/2) Z_{AF1}) - I_{AF1} Z_{AF1} \quad (4.55)$$

$$V_{F1,B} = V_{BF1} (1 + (Y_{BF1}/2) Z_{BF1}) - I_{BF1} Z_{BF1} \quad (4.56)$$

Ισχύει:

$$V_{F1,A} = V_{F1,B} \quad (4.57)$$

Αντικαθιστώντας τις (4.48)-(4.49) στις (4.55)-(4.56) αντίστοιχα, προκύπτει:

$$V_{F1,A} = \cosh(\gamma_1 x l) V_{AF1} - \sinh(\gamma_1 x l) Z_{c1} V_{AF1} \quad (4.58)$$

$$V_{F1,B} = \cosh(\gamma_1 (1-x) l) V_{AF1} - \sinh(\gamma_1 (1-x) l) Z_{c1} V_{AF1} \quad (4.59)$$

Χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες τριγωνομετρικές ταυτότητες:

$$\cosh(\gamma_1 (1-x) l) = \cosh(\gamma_1 l) \cosh(\gamma_1 x l) - \sinh(\gamma_1 l) \sinh(\gamma_1 x l) \quad (4.60)$$

$$\sinh(\gamma_1 (1-x) l) = \sinh(\gamma_1 l) \cosh(\gamma_1 x l) - \cosh(\gamma_1 l) \sinh(\gamma_1 x l) \quad (4.61)$$

η (4.57) γράφεται ως:

$$V_{F1,B} = \cosh(\gamma_1 x l) (\cosh(\gamma_1 l) V_{BF1} - \sinh(\gamma_1 l) Z_{c1} I_{BF1}) + \sinh(\gamma_1 x l) (-\sinh(\gamma_1 l) V_{BF1} + \cosh(\gamma_1 l) Z_{c1} I_{BF1}) \quad (4.62)$$

Συνδυάζοντας τις (4.57), (4.58) και (4.62) προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τη θέση του σφάλματος:

$$x = \frac{1}{\gamma_1 l} \tanh^{-1} \left( \frac{\cosh(\gamma_1 l) V_{BF1} - Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) I_{BF1} - V_{AF1}}{\sinh(\gamma_1 l) V_{BF1} - Z_{c1} \cosh(\gamma_1 l) I_{BF1} - Z_{c1} I_{AF1}} \right) \quad (4.63)$$

Αντίστοιχη λύση μπορεί να προκύψει χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας σε περίπτωση ασύμμετρου σφάλματος, και τις συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας σε περίπτωση σφάλματος ως προς γη.

### 4.3.2 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση περιορισμένου αριθμού συγχρονισμένων μετρήσεων

Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται μόνο οι συγχρονισμένοι φασιθέτες των τριφασικών τάσεων ή εντάσεων από το ένα άκρο της γραμμής (B), ενώ από το άλλο άκρο (A) αξιοποιείται ο πλήρης αριθμός δεδομένων μέτρησης. Απαραίτητη προϋπόθεση για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος, σε μια τέτοια περίπτωση, είναι να είναι γνωστός εκ των προτέρων ο τύπος σφάλματος. Αν θεωρηθεί ότι χρησιμοποιούνται μόνο οι μετρήσεις των τάσεων στο άκρο B της γραμμής, τότε ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τις ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F (Σχήμα 4.15):

$$V_{Fi} = V_{AFi} (1 + (Y_{AF1}/2) Z_{AF1}) - I_{AFi} Z_{AF1}, \quad i = 1, 2 \quad (4.64)$$

$$V_{F0} = V_{AF0} (1 + (Y_{AF0}/2) Z_{AF0}) - I_{AF0} Z_{AF0} \quad (4.65)$$

$$I_{FAi} = (I_{AFi} - V_{AFi} (Y_{AF1}/2)) - (I_{AFi} - (I_{AFi} - V_{AFi} (Y_{AF1}/2)) Z_{AF1}) (Y_{AF1}/2), \quad i = 1, 2 \quad (4.66)$$

$$I_{FA0} = (I_{AF0} - V_{AF0} (Y_{AF0}/2)) - (I_{AF0} - (I_{AF0} - V_{AF0} (Y_{AF0}/2)) Z_{AF0}) (Y_{AF0}/2) \quad (4.67)$$

$$I_{FBi} = (V_{BFi} - V_{Fi}) / Z_{BF1} + V_{BFi} (Y_{BF1}/2), \quad i = 1, 2 \quad (4.68)$$

$$I_{FB0} = (V_{BF0} - V_{F0}) / Z_{BF0} + V_{BF0} (Y_{BF0}/2) \quad (4.69)$$

$$I_{Fi} = I_{FAi} + I_{FBi}, \quad i = 0, 1, 2 \quad (4.70)$$

Η εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο σφάλματος στο σημείο F και αξιοποιώντας τις (4.64)-(4.70). Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός μονοφασικού σφάλματος ως προς γη, που εμπλέκει τη φάση  $a$  της γραμμής, ισχύει η ακόλουθη εξίσωση (θεωρώντας ότι η αντίσταση σφάλματος έχει καθαρά ωμικό χαρακτήρα):

$$F(x) = \text{Im}(f(x)) = \text{Im}(V_{Fa}(x)/I_{Fa}(x)) = \text{Im}((V_{F0} + V_{F1} + V_{F2}) / (I_{F0} + I_{F1} + I_{F2})) = 0 \quad (4.71)$$

Η μόνη άγνωστη παράμετρος στην (4.71) είναι η θέση του σφάλματος  $x$ , η οποία μπορεί να προσδιοριστεί εφαρμόζοντας μια αριθμητική μέθοδο που υπολογίζει σε κάθε επανάληψη τη διάθροση  $\Delta x_k$ :

$$\Delta x_k = -\frac{F(x_k)}{F'(x_k)} \quad (4.72)$$

όπου  $k=0,1,2,\dots$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων,  $\Delta x_k = x_{k+1} - x_k$  και  $F'(x_k) = \frac{dF(x_k)}{dx} = \text{Im}\left(\frac{df(x_k)}{dx}\right)$  είναι η παράγωγος της  $F(x)$  στην  $k$ -οστή επανάληψη. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται, όταν η διόρθωση  $\Delta x_k$  γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή.

Ως αρχική τιμή  $x_0$  για τη θέση του σφάλματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η λύση της ακόλουθης τετραγωνικής εξίσωσης, που προκύπτει επιστρατεύοντας το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους στην (4.71):

$$a_2 x^2 + a_1 x + a_0 = 0, \quad x \in (0,1) \quad (4.73)$$

όπου

$$a_2 = \text{Im}\left(\sum_{i=0}^2 I_{AFi} Z_i' l\right) \quad (4.74)$$

$$a_1 = -\text{Im}\left(\sum_{i=0}^2 (V_{AFi} + I_{AFi} Z_i' l)\right) \quad (4.75)$$

$$a_0 = \text{Im}\left(\sum_{i=0}^2 (V_{AFi} - I_{AFi} - (V_{BFi} - V_{AFi}) / (Z_i' l))\right) \quad (4.76)$$

και  $i=0,1,2$  με  $Z_2' = Z_1'$ . Με αντίστοιχο τρόπο προσδιορίζεται η θέση του σφάλματος και για τους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων.

### 4.3.3 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος

Στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιείται αρχικά το κύκλωμα θετικής ακολουθίας της γραμμής πριν από το σφάλμα (Σχήμα 4.15(α)), ώστε να υπολογιστεί η γωνία συγχρονισμού  $\delta$ . Στη συνέχεια, η θέση του σφάλματος προσδιορίζεται από την (4.63) ως εξής:

$$x = \frac{1}{\gamma_1 l} \tanh^{-1} \left( \frac{\cosh(\gamma_1 l) V_{BF1} e^{j\delta} - Z_{c1} \sinh(\gamma_1 l) I_{BF1} e^{j\delta} - V_{AF1}}{\sinh(\gamma_1 l) V_{BF1} e^{j\delta} - Z_{c1} \cosh(\gamma_1 l) I_{BF1} e^{j\delta} - Z_{c1} I_{AF1}} \right) \quad (4.77)$$

Ο υπολογισμός της γωνίας συγχρονισμού μπορεί να γίνει με έναν από τους παρακάτω τρόπους:

- Με χρήση των τάσεων και εντάσεων θετικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής, πριν από το σφάλμα:

$$e^{j\delta} = \frac{-I_{A1} + V_{A1} (Y_{AB1}/2)}{I_{B1} - V_{B1} (Y_{AB1}/2)} \quad (4.78)$$

- Με χρήση των τάσεων θετικής ακολουθίας στα δύο άκρα της γραμμής και του ρεύματος θετικής ακολουθίας στο ένα άκρο, πριν από το σφάλμα:

$$e^{j\delta} = \frac{V_{A1} (1 + (Y_{AB1}/2) Z_{AB1}) - I_{A1} Z_{AB1}}{V_{B1}} \quad (4.79)$$

- Με χρήση των εντάσεων θετικής ακολουθίας στα δύο άκρα της γραμμής και της τάσης θετικής ακολουθίας στο ένα άκρο, πριν από το σφάλμα:

$$e^{j\delta} = \frac{-I_{A1}}{I_{B1}(1 + (Y_{AB1}/2)Z_{AB1}) - V_{B1}(Y_{AB1}/2)(2 + (Y_{AB1}/2)Z_{AB1})} \quad (4.80)$$

#### 4.3.4 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων κατά τη διάρκεια του σφάλματος

Στην περίπτωση αυτή, η γωνία συγχρονισμού και η θέση του σφάλματος υπολογίζονται αποκλειστικά από τους φασιθέτες των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων θετικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής μεταφοράς, μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Θεωρώντας το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους, προκύπτει η ακόλουθη σχέση για τους δύο αγνώστους:

$$V_{AF1} - xZ'_1 I_{AF1} + (1-x)Z'_1 I_{BF1} e^{j\delta} - V_{BF1} e^{j\delta} = 0 \quad (4.81)$$

Η (4.81) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$x = \frac{A_1 e^{j\delta} + A_2}{A_3 e^{j\delta} + A_4} \quad (4.82)$$

όπου

$$A_1 = Z'_1 I_{BF1} - V_{BF1} \quad (4.83)$$

$$A_2 = V_{AF1} \quad (4.84)$$

$$A_3 = Z'_1 I_{BF1} \quad (4.85)$$

$$A_4 = Z'_1 I_{AF1} \quad (4.86)$$

Η θέση του σφάλματος  $x$  είναι πραγματικός αριθμός, οπότε:

$$\text{Im}(x) = 0 \Leftrightarrow \frac{A_1 e^{j\delta} + A_2}{A_3 e^{j\delta} + A_4} - \frac{A_1^* e^{-j\delta} + A_2^*}{A_3^* e^{-j\delta} + A_4^*} = 0 \Leftrightarrow (a_2 - a_3) \sin(\delta) + (b_2 + b_3) \cos(\delta) + b_1 = 0 \quad (4.87)$$

όπου:

$$a_1 + jb_1 = A_1 A_3^* + A_2 A_4^* \quad (4.88)$$

$$a_2 + jb_2 = A_1 A_4^* \quad (4.89)$$

$$a_3 + jb_3 = A_2 A_3^* \quad (4.90)$$

Η γωνία συγχρονισμού  $\delta$  στην (4.87) μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson, ως εξής:

$$\delta_{k+1} = \delta_k - \frac{F(\delta_k)}{F'(\delta_k)} \quad (4.91)$$

$$F(\delta_k) = (a_2 - a_3) \sin(\delta_k) + (b_2 + b_3) \cos(\delta_k) + b_1 \quad (4.92)$$

$$F'(\delta_k) = (a_2 - a_3) \cos(\delta_k) - (b_2 + b_3) \sin(\delta_k) \quad (4.93)$$

Η επαναληπτική διαδικασία σταματά όταν η διαφορά  $\delta_{k+1} - \delta_k$  γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή, π.χ.  $\delta_{k+1} - \delta_k < 10^{-4}$ . Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει τετραγωνική σύγκλιση και απαιτεί μια αρχική τιμή  $\delta_0$  για τη γωνία συγχρονισμού. Αν οι γωνίες των τάσεων θετικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής μεταφοράς τεθούν ίσες με το μηδέν, τότε η γωνία  $\delta$  αντιστοιχεί στη διαφορά φάσης των τάσεων και δεν εξαρτάται από το σφάλμα συγχρονισμού. Στην πράξη, η γωνία αυτή ανήκει σε ένα περιορισμένο πεδίο τιμών γύρω από το μηδέν. Συνεπώς, θέτοντας τη  $\delta_0$

ιση με το μηδέν, η μέθοδος Newton-Raphson συγκλίνει γρήγορα στην τελική λύση για τη γωνία συγχρονισμού.

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της θέσης του σφάλματος. Αυτός πραγματοποιείται αντικαθιστώντας τη γωνία  $\delta$  στην (4.82), ως εξής:

$$x = \operatorname{Re} \left( \frac{A_1 e^{j\delta} + A_2}{A_3 e^{j\delta} + A_4} \right) \quad (4.94)$$

Η λύση που προκύπτει για τη θέση του σφάλματος και τη γωνία συγχρονισμού, χρησιμοποιώντας το μοντέλο γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους, δεν είναι αρκετά ακριβής, κυρίως στην περίπτωση γραμμών μεγάλου μήκους, όπου η επίδραση των εγκάρσιων αγωγιμοτήτων είναι αρκετά σημαντική για να αμεληθεί. Επιστρατεύοντας το μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση, η οποία συνδέει τις τάσεις και τις εντάσεις θετικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής με τους δύο αγνώστους:

$$f(X) = V_{AF1}(1 + (Y_{AF1}/2)Z_{AF1}) - I_{AF1}Z_{AF1} - V_{BF1}e^{j\delta}(1 + (Y_{BF1}/2)Z_{BF1}) + I_{BF1}e^{j\delta}Z_{BF1} \quad (4.95)$$

όπου  $X = [x, \delta]^T$  αναπαριστά το διάνυσμα των δύο αγνώστων. Αν θεωρηθεί το διάνυσμα συναρτήσεων  $F(X)$ , το οποίο αποτελείται από τις συναρτήσεις:

$$F_1(X) = \operatorname{Re}(f(X)) \quad (4.96)$$

$$F_2(X) = \operatorname{Im}(f(X)) \quad (4.97)$$

τότε η εύρεση των δύο αγνώστων μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική μέθοδο, η οποία σε κάθε επανάληψη υπολογίζει τη διόρθωση  $\Delta X_k = X_{k+1} - X_k$ :

$$\Delta X_k = -J^{-1}(X_k)F(X_k) \quad (4.98)$$

$$J(X_k) = \frac{\partial F(X_k)}{\partial X} \quad (4.99)$$

όπου  $k = 0, 1, 2, \dots$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων και  $J$  ο Ιακωβιανός πίνακας. Η επαναληπτική μέθοδος σταματά όταν η νόρμα του διανύσματος διόρθωσης γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή (ανοχή)  $\epsilon$ . Ως αρχικές τιμές για το διάνυσμα  $X$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές της γωνίας συγχρονισμού και της θέσης του σφάλματος, που έχουν προκύψει μέσω του μοντέλου γραμμής με συγκεντρωμένες παραμέτρους.

#### 4.3.5 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων στο πεδίο του χρόνου

Στην παράγραφο 2.3.2 διατυπώθηκαν οι τροποποιημένες τηλεγραφικές εξισώσεις των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους. Μερικές διαφορικές εξισώσεις αυτού του τύπου μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών του Collatz [37]. Η μέθοδος αυτή εισάγει την έννοια των χαρακτηριστικών γραμμών (ή χαρακτηριστικών ολισθήσεως), με τη βοήθεια των οποίων οι μερικές διαφορικές εξισώσεις μεταπίπτουν σε συνήθεις διαφορικές εξισώσεις.

Χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές γραμμών, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που συνδέουν την τάση  $u$  και την ένταση  $i$  στις (2.27) και (2.28) μπορούν να γραφούν ως συνήθεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{du}{ds} - \chi \frac{di}{ds} = \frac{\eta i}{\sqrt{1 + \chi^2}} \quad (4.100)$$

$$\frac{du}{d\rho} + \chi \frac{di}{d\rho} = \frac{-\eta i}{\sqrt{1+\chi^2}} \quad (4.101)$$

όπου  $s, \rho$  είναι τα μήκη των δύο χαρακτηριστικών:  $t \pm \chi x$  που είναι ευθείες στο επίπεδο απόστασης-χρόνου,  $x-t$ .

Για τη λύση των (4.100) και (4.101) απαιτείται η διακριτοποίηση του συστήματος συνεχούς χρόνου. Υιοθετώντας τη σύμβαση της εργασίας [69], όπου ο άξονας των  $x$  διακριτοποιείται από το δείκτη  $j$  και ο άξονας των  $t$  από το δείκτη  $k$ , προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις για την τάση και το ρεύμα:

$$u_{j,k} = \frac{1}{2}(u_{j-1,k-1} + u_{j-1,k+1}) + \frac{Z_c}{2}(i_{j-1,k-1} - i_{j-1,k+1}) + \frac{R'_L \Delta x}{4}(i_{j-1,k-1} + i_{j-1,k+1}) - \frac{R'_L \Delta x}{2} i_{j,k} \quad (4.102)$$

$$i_{j,k} = \frac{1}{2Z_c}(u_{j-1,k-1} - u_{j-1,k+1}) + \frac{1}{2}(i_{j-1,k-1} + i_{j-1,k+1}) + \frac{R'_L \Delta x}{4Z_c}(i_{j-1,k-1} - i_{j-1,k+1}) \quad (4.103)$$

όπου  $Z_c = \sqrt{L'_L/C'_L}$  είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Ξεκινώντας κανείς από τα άκρα της γραμμής, μπορεί να υπολογίσει την τάση και την ένταση κατά μήκος της, εφαρμόζοντας τις (4.102) και (4.103).

Αν στις (4.102) και (4.103) μηδενιστεί η εν σειρά ωμική αντίσταση α.μ. μήκους  $R'_L$ , τότε αυτές μεταπίπτουν στις γνωστές εξισώσεις του Bergeron για γραμμές μεγάλου μήκους [68]. Οι εξισώσεις του Bergeron για την τάση και την ένταση στο σημείο  $x_j$ , τη χρονική στιγμή  $t_k$ , μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τάσης και της έντασης στο άκρο της γραμμής και της απόστασης του σημείου  $x_j$  από αυτό, ως εξής:

$$u_{j,k} = \frac{1}{2}(u_{0,k-j} + u_{0,k+j}) + \frac{Z_c}{2}(i_{0,k-j} - i_{0,k+j}) \quad (4.104)$$

$$i_{j,k} = \frac{1}{2Z_c}(u_{0,k-j} - u_{0,k+j}) + \frac{1}{2}(i_{0,k-j} + i_{0,k+j}) \quad (4.105)$$

Χρησιμοποιώντας τις μορφές της τάσης και της έντασης, που έχουν προκύψει με χρήση των χαρακτηριστικών γραμμών, ο υπολογισμός της θέσης του σφάλματος μέσω της [69] συνίσταται στα ακόλουθα βήματα:

- Εύρεση κατάλληλου μετασχηματισμού ρυθμών για την αποσύζευξη της τριφασικής γραμμής σε τρία ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά κυκλώματα ιδιοσυνιστωσών.
- Διακριτοποίηση της γραμμής μεταφοράς: Με βάση τη συχνότητα δειγματοληψίας του μετατροπέα A/D, κάθε κύκλωμα ιδιοσυνιστώσας της γραμμής διακριτοποιείται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων.
- Εντοπισμός κατά προσέγγιση του σημείου του σφάλματος: Για κάθε διακριτό σημείο του παραπάνω βήματος, υπολογίζεται η τάση συναρτήσει της τάσης και του ρεύματος στο άκρο αναχώρησης της γραμμής. Η ίδια διαδικασία επιτελείται χρησιμοποιώντας την τάση και το ρεύμα στο άκρο άφιξης της γραμμής. Στη συνέχεια, υπολογίζεται για κάθε σημείο το τετράγωνο της διαφοράς των δύο τάσεων. Το κατά προσέγγιση σημείο του σφάλματος είναι αυτό για το οποίο εμφανίζεται το ελάχιστο τετράγωνο της διαφοράς των τάσεων.
- Χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική λύση του προηγούμενου βήματος, προσδιορίζεται η ακριβής λύση για τη θέση του σφάλματος, μετασχηματίζοντας τις ιδιοσυνιστώσες των τάσεων και των εντάσεων στις αρχικές φασικές συνιστώσες και αξιοποιώντας τις σχέσεις που τις διέπουν στο σημείο του σφάλματος.

### 4.3.6 Αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση συγχρονισμένων ή μη μετρήσεων σε γραμμές με αντιστάθμιση σειράς

Αντίστοιχοι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί και για γραμμές με αντιστάθμιση σειράς ([8], [51], [137], [202], [203], [255]). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι εκείνοι που χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις των τάσεων και εντάσεων στα άκρα της γραμμής χωρίς, όμως, να εξαρτώνται από το μοντέλο της συστοιχίας των SCs/MOVs ([202], [255]). Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των αλγορίθμων αυτών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.16 το ισοδύναμο Π κύκλωμα της  $i$ -οστής ακολουθίας μιας γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς.

Σε πλήρη αντιστοιχία με το Σχήμα 4.15, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί για την αναπαράσταση των σύνθετων εν σειρά αντιστάσεων και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων της γραμμής με αντιστάθμιση σειράς:

$$Z_{AFi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i x d_{SC} l) \quad (4.106)$$

$$Z_{MFi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i (1-x) d_{SC} l) \quad (4.107)$$

$$Z_{BNi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i (1-d_{SC}) l) \quad (4.108)$$

$$Y_{AFi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i x d_{SC} l / 2) \quad (4.109)$$

$$Y_{MFi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i (1-x) d_{SC} l / 2) \quad (4.110)$$

$$Y_{BNi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i (1-d_{SC}) l / 2) \quad (4.111)$$

όπου  $i = 0, 1, 2$  αντιπροσωπεύει τις συνιστώσες μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα, και  $d_{SC}$  είναι η απόσταση της συστοιχίας των SCs/MOVs από το άκρο αναφοράς A της γραμμής. Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι οι σύνθετες εν σειρά αντιστάσεις και εγκάρσιες αγωγιμότητες, που αντιστοιχούν στα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας της γραμμής, είναι ίσες μεταξύ τους.

Με βάση το Σχήμα 4.16 προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{Fi} = V_{AFi} (1 + (Y_{AFi}/2) Z_{AFi}) - I_{AFi} Z_{AFi} \quad (4.112)$$

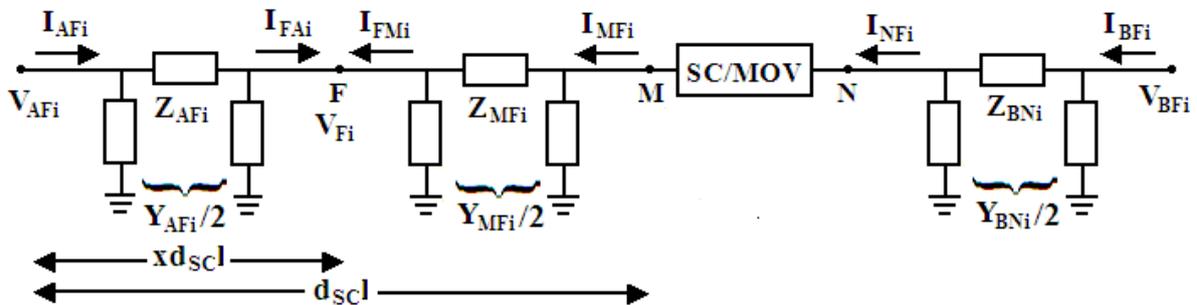
$$I_{FAi} = (I_{AFi} - V_{AFi} (Y_{AFi}/2)) - (V_{AFi} - (I_{AFi} - V_{AFi} (Y_{AFi}/2)) Z_{AFi}) (Y_{AFi}/2) \quad (4.113)$$

$$I_{NFi} = (I_{BFi} - V_{BFi} (Y_{BNi}/2)) - (V_{BFi} - (I_{BFi} - V_{BFi} (Y_{BNi}/2)) Z_{BNi}) (Y_{BNi}/2) \quad (4.114)$$

$$I_{MFi} = I_{NFi} \quad (4.115)$$

$$I_{FMi} = I_{MFi} (1 + Z_{MFi} (Y_{MFi}/2)) - V_{Fi} (Y_{MFi}/2) (2 + Z_{MFi} (Y_{MFi}/2)) \quad (4.116)$$

$$I_{Fi} = I_{FAi} + I_{FMi} \quad (4.117)$$



Σχήμα 4.16 Ισοδύναμο Π κύκλωμα  $i$ -οστής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς κατά την εκδήλωση σφάλματος πριν από τη συστοιχία των SCs/MOVs

Η εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μπορεί να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες που ισχύουν για κάθε τύπο σφάλματος στο σημείο F και αξιοποιώντας τις (4.112)-(4.117), όπως στην παράγραφο 4.3.2. Μία αντίστοιχη λύση προκύπτει στην περίπτωση που το σφάλμα εκδηλωθεί μετά τη σειριακή αντιστάθμιση ως προς το άκρο αναφοράς A της γραμμής. Με

έναν κατάλληλο αλγόριθμο επιλογής του εσφαλμένου τμήματος της γραμμής, όπως στην παράγραφο 4.2.4.1, μπορεί να προσδιοριστεί η σωστή λύση για τη θέση του σφάλματος.

#### **4.3.7 Αξιολόγηση αλγορίθμων με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς**

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο της γραμμής μεταφοράς, εμφανίζουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με τους αντίστοιχους αλγορίθμους που αξιοποιούν τα δεδομένα μέτρησης από ένα μόνο άκρο. Όμως, και οι αλγόριθμοι αυτοί επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- 1) Η ακρίβεια των δεδομένων μέτρησης.
- 2) Η ακρίβεια των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς.
- 3) Ο όγκος δεδομένων μέτρησης που πρέπει να μεταφερθούν από κάθε άκρο της γραμμής.

Στα επόμενα Κεφάλαια, αναπτύσσονται μέθοδοι που αποσκοπούν στο να περιορίσουν ή ακόμα και να εξαλείψουν την επίδραση των παραπάνω παραγόντων στους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων, με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς.

#### **4.4 Μη ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι εντοπισμού της θέσης του σφάλματος**

Αντί των αυστηρά μαθηματικών αλγορίθμων που αναφέρθηκαν παραπάνω, έχουν προταθεί και άλλοι μη ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι για τον εντοπισμό σφαλμάτων, που βασίζονται σε τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, όπως είναι: τα νευρωνικά δίκτυα (ANNs) ([109], [156], [162], [168], [237]), τα ασαφή σύνολα (fuzzy sets) ([4], [34], [158]), και οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA algorithms) ([46], [129], [130]). Αυτές οι μέθοδοι έχουν τα δικά τους προβλήματα, που προκύπτουν από την ακρίβεια του θεωρούμενου μοντέλου γραμμής, την έλλειψη εμπορικών εφαρμογών για την πιστοποίησή τους, και τις αυξημένες υπολογιστικές τους απαιτήσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

# ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΩΝ ΦΙΛΤΡΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΗΣ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

## 5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3, οι ψηφιακοί Η/Ν προστασίας και οι διατάξεις εντοπισμού σφαλμάτων υπολογίζουν τους φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων κάνοντας χρήση ενός ζεύγους ορθογωνίων φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (Finite Impulse Response - FIR), τα οποία είναι σχεδιασμένα ώστε να έχουν μοναδιαίο κέρδος στην ονομαστική συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου (50 ή 60 Hz) και μηδενικά κέρδη στη συνεχή συνιστώσα (DC component) και στις ανώτερες αρμονικές, καθώς και διαφορά γωνίας μεταξύ των εξόδων τους ίση με  $90^{\circ}$ . Οι κυριότεροι εκπρόσωποι αυτής της οικογένειας ψηφιακών φίλτρων είναι τα FIR φίλτρα που υπολογίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της συνιστώσας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier πλήρους και μισού κύκλου (full and half-cycle DFT) στη θεμελιώδη συχνότητα, καθώς και το φίλτρο συνημιτόνου (cosine filter) [221].

Τα αποτελέσματα υπολογισμού των φασιθετών είναι άκρως ικανοποιητικά όταν η θεμελιώδης συχνότητα των περιοδικών σημάτων τάσης και έντασης είναι ίση με την ονομαστική συχνότητα του δικτύου. Στην αντίθετη περίπτωση, στους φασιθέτες που υπολογίζονται από το ζεύγος των ορθογωνίων FIR φίλτρων υπεισέρχονται σφάλματα, τόσο στο μέτρο όσο και στη γωνία τους [180]. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να προκαλέσουν λανθασμένη λειτουργία των ηλεκτρονόμων προστασίας [84], μειωμένη ακρίβεια υπολογισμού της θέσης του σφάλματος από τους εντοπιστές σφαλμάτων [36] και συγχρονισμένους φασιθέτες κακής ποιότητας από τις μονάδες μέτρησης φασιθετών (Phasor Measurement Units – PMUs) [177].

Στην πράξη, δεν είναι απαραίτητο η συχνότητα στα διάφορα σημεία μέτρησης να είναι ακριβώς ίση με την ονομαστική συχνότητα του δικτύου. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η συχνότητα ενός ηλεκτρικού δικτύου μεταβάλλεται διαρκώς σε μικρό βαθμό γύρω από την ονομαστική. Στην περίπτωση αυτή, τα σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των φασιθετών είναι μικρά. Κατά την εκδήλωση, όμως, διαταραχών στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να προκληθεί σημαντική μεταβολή της συχνότητας, γεγονός που θα έχει δυσμενή επίδραση στην ακρίβεια υπολογισμού των φασιθετών από το ζεύγος των ορθογωνίων FIR φίλτρων. Σε μια τέτοια κατάσταση, η παρουσία αρμονικών στο δίκτυο μπορεί να επιδεινώσει ακόμα περισσότερο το πρόβλημα. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων καταστάσεων είναι οι συνδέσεις και αποσυνδέσεις μεγάλων γεννητριών, οι εκκινήσεις και απώλειες ομάδων επαγωγικών κινητήρων και οι ταλαντώσεις ισχύος.

Ο DFT είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος υπολογισμού φασιθετών σε εμπορικές εφαρμογές, όπως αναφέρθηκε στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Για το λόγο αυτό, έχουν προταθεί μέχρι σήμερα πολλές τεχνικές αντιστάθμισης των σφαλμάτων που προκαλούνται από τον DFT στον υπολογισμό των φασιθετών, λόγω των μεταβολών της συχνότητας. Η πιο δημοφιλής μεταξύ αυτών είναι γνωστή ως παρακολούθηση συχνότητας (frequency tracking) [248]. Ο μηχανισμός παρακολούθησης συχνότητας εκτιμά τη στιγμιαία συχνότητα (instantaneous frequency) στο τοπικό σημείο μέτρησης ([18], [26], [181]), και στη συνέχεια τροποποιεί τη διαδικασία υπολογισμού του φασιθέτη μεταβάλλοντας μία εκ των τριών παραμέτρων: α) τη συχνότητα δειγματοληψίας, ώστε να είναι σύγχρονη με τη συχνότητα του σήματος εισόδου [19], β) το μήκος του παραθύρου επεξεργασίας, ώστε να περιλαμβάνει αριθμό δειγμάτων που ανταποκρίνεται σε έναν πλήρη κύκλο του σήματος εισόδου [79], γ) τους συντελεστές των δύο FIR φίλτρων, ώστε να είναι συντονισμένα στην πραγματική συχνότητα του σήματος [224].

Οι προαναφερθείσες τεχνικές χρησιμοποιούν το σφάλμα φασικής γωνίας, που εισάγεται από τον DFT εξαιτίας της μη σύγχρονης δειγματοληψίας, ώστε να εκτιμήσουν τη στιγμιαία συχνότητα.

Όμως, δε λαμβάνουν υπόψη το συνολικό σφάλμα που υπεισέρχεται στη φασική γωνία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται επιπλέον εξομάλυνση (πολυωνυμική προσέγγιση -polynomial fitting – ([18], [181]) ή φίλτρο κινούμενου μέσου - moving average filter - [79]), προκειμένου να επιτευχθεί σωστή εκτίμηση της στιγμιαίας συχνότητας, η οποία εισάγει επιπλέον καθυστέρηση στο μηχανισμό παρακολούθησης συχνότητας και κατά συνέπεια στον υπολογισμό του φασιθέτη. Μόνο η μέθοδος του «έξυπνου» μετασχηματισμού Fourier (SDFT) στην [249] συμπεριλαμβάνει πλήρως στους υπολογισμούς της όλα τα σφάλματα που προκαλούνται από τον DFT. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τον SDFT, τόσο για τη στιγμιαία συχνότητα όσο και για τους φασιθέτες των μετρούμενων σημάτων, είναι πολύ ικανοποιητικά. Παρόλα αυτά, η μέθοδος είναι αρκετά πολύπλοκη και γίνεται υπολογιστικά ασύμφορη όταν υπάρχουν αρμονικές στα σήματα εισόδου. Επιπλέον, ο SDFT επικεντρώνεται αποκλειστικά στο να αντισταθμίσει τα σφάλματα του DFT, και δε μπορεί να εφαρμοστεί σε άλλα ζεύγη ορθογωνίων FIR φίλτρων.

Υπάρχουν, τέλος, και άλλες μέθοδοι στη βιβλιογραφία για τον υπολογισμό φασιθετών (φίλτρο Kalman [65], ελάχιστα τετράγωνα [111], μέθοδος Newton [238], ανάπτυξη μιγαδικών σειρών Taylor ([41], [184]), κτλ.), οι οποίες παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περίπτωση κρίσιμων διαταραχών στα ΣΗΕ. Παρόλα αυτά, όμως, οι μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση δύο ορθογωνίων FIR φίλτρων για την εκτίμηση των φασιθετών – όπως ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier, υπολογιζόμενος στη θεμελιώδη συχνότητα – έχουν επικρατήσει σε εμπορικές εφαρμογές, κυρίως λόγω του χαμηλού υπολογιστικού κόστους και της απλότητάς τους, και αυτό αποτελεί κίνητρο για επιπλέον έρευνα, ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά τους σε ότι αφορά τις μεταβολές της συχνότητας.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος που συμβάλλει προς αυτή την κατεύθυνση [16]. Για να το επιτύχει αυτό, η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί μία ακριβή και, συνάμα, εύκολα υπολογίσιμη εκτίμηση της τοπικά στιγμιαίας συχνότητας. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε τεχνική ψηφιακού φιλτραρίσματος συνίσταται από δύο FIR φίλτρα ορθογώνια μεταξύ τους. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου καθώς και η αξιολόγησή της παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Επιπλέον, προτείνεται μια επέκταση της μεθόδου, η οποία αντιμετωπίζει το πρόβλημα ύπαρξης αρμονικών συνιστωσών στα σήματα εισόδου.

## 5.2 Θεωρητική ανάλυση

### 5.2.1 Μέθοδος αντιστάθμισης φασιθετών

Θεωρείται ημιτονοειδές σήμα εισόδου  $x(t)$  της μορφής:

$$x(t) = A \cos(\delta(t)) \quad (5.1)$$

όπου  $A$  είναι το πλάτος και  $\delta(t)$  η χρονικά μεταβαλλόμενη φασική γωνία του σήματος.

Η στιγμιαία συχνότητα του σήματος εισόδου, με βάση τον ορισμό που δίνεται στις ([18], [26], [181]), είναι:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\delta(t)}{dt} \quad (5.2)$$

Αντικαθιστώντας την (5.2) στην (5.1), το σήμα  $x(t)$  μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$x(t) = A \cos\left(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \phi\right) \quad (5.3)$$

όπου  $\phi$  είναι η αρχική φασική γωνία του σήματος εισόδου ως προς μια τυχαία χρονική αναφορά.

Αν υποθεθεί ότι το σήμα  $x(t)$  δειγματοληπτείται με συχνότητα  $f_s = Nf_N$ , όπου  $f_N$  είναι η ονομαστική συχνότητα και  $N$  ο αριθμός των δειγμάτων ανά κύκλο, τότε κάθε δείγμα  $x[k]$  που προκύπτει θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$x[k] = x(k\Delta T) = A \cos(\delta(k\Delta T)) = A \cos(\delta[k]) \quad (5.4)$$

όπου  $\Delta T = 1/(Nf_N)$  είναι η περίοδος δειγματοληψίας και  $k = 0, 1, 2, \dots$  είναι ο δείκτης των δειγμάτων. Επιπλέον, το δείγμα  $x[k]$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$x[k] = \left( A e^{j\delta[k]} + A e^{-j\delta[k]} \right) / 2 \quad (5.5)$$

Ο φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας,  $\overline{X}_m$ , του συνόλου των δειγμάτων  $\{x[k]\}$ , τη χρονική στιγμή  $r$  της δειγματοληψίας, δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{X}_m[r] = \sum_{n=0}^{N-1} x[r+n] (a_n + jb_n) \quad (5.6)$$

όπου  $a_n$  και  $b_n$  αποτελούν τους συντελεστές των δύο FIR φίλτρων, οι οποίοι είναι πραγματικοί αριθμοί και οι τιμές τους σχετίζονται με τον τύπο του φίλτρου.

Για παράδειγμα, οι συντελεστές των FIR φίλτρων που υπολογίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της συνιστώσας του διακριτού μετασχηματισμού Fourier πλήρους κύκλου (full-cycle DFT) στη θεμελιώδη συχνότητα, υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$a_n + jb_n = \frac{2}{N} e^{-j\frac{2\pi n}{N}} = \frac{2}{N} \left( \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right) = \frac{2}{N} e^{-j2\pi n f_N \Delta T}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (5.7)$$

Για το διακριτό μετασχηματισμό Fourier μισού κύκλου (half-cycle DFT), του οποίου το παράθυρο επεξεργασίας είναι το μισό από αυτό του διακριτού μετασχηματισμού Fourier πλήρους κύκλου, δηλαδή λαμβάνεται υπόψη μόνο ο αριθμός των δειγμάτων που αντιστοιχούν στο πρώτο μισό της ονομαστικής περιόδου, οι αντίστοιχοι συντελεστές προκύπτουν από τη σχέση:

$$a_n + jb_n = \frac{4}{N} e^{-j\frac{2\pi n}{N}} = \frac{4}{N} \left( \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \right) = \frac{4}{N} e^{-j2\pi n f_N \Delta T}, \quad n = 0, 1, \dots, N/2-1 \quad (5.8)$$

Τέλος, για το φίλτρο συνημιτόνου πλήρους κύκλου (full-cycle cosine filter), το οποίο περιορίζει δραστηκότερα από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier την εκθετικά φθίνουσα DC συνιστώσα που εμφανίζεται στα ρεύματα βραχυκύκλωσης, ο φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r] &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[r+n] + jx[r+n-N/4]) \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x[r+n] + jx[r+n-N/4]) \left( e^{-j2\pi n f_N \Delta T} + e^{j2\pi n f_N \Delta T} \right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Συνδυάζοντας τις (5.5) και (5.6), προκύπτει:

$$\overline{X}_m[r] = \frac{A}{2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\delta[r+n]} (a_n + jb_n) + \frac{A}{2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\delta[r+n]} (a_n + jb_n) \quad (5.10)$$

Στην πράξη, δεν είναι εφικτό να υπολογιστούν τα αθροίσματα στην (5.10), λόγω του όρου  $\delta[r+n]$ . Είναι προφανές ότι κάποια μορφή προσέγγισης απαιτείται ώστε να απαλειφθεί ο όρος αυτός. Εν προκειμένω, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος γραμμικής παρεμβολής πρώτης τάξης, υποθέτοντας ότι η φασική γωνία μεταβάλλεται γραμμικά μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών δειγματοληψίας,  $r\Delta T$  και  $(r+1)\Delta T$ . Με βάση αυτή την παραδοχή, ο όρος  $\delta[r+n]$  γράφεται ως εξής:

$$\delta[r+n] = \delta[r] + \frac{\delta[r+1] - \delta[r]}{(r+1)\Delta T - r\Delta T} ((r+n)\Delta T - r\Delta T) = \delta[r] + \frac{\delta[r+1] - \delta[r]}{\Delta T} n\Delta T \quad (5.11)$$

Αντικαθιστώντας την (5.11) στην (5.10), είναι:

$$\overline{X}_m[r] = \frac{A}{2} e^{j\delta[r]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \left( \frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1] - \delta[r]}{\Delta T} \right) n\Delta T} (a_n + jb_n) + \frac{A}{2} e^{-j\delta[r]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi \left( \frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1] - \delta[r]}{\Delta T} \right) n\Delta T} (a_n + jb_n) \quad (5.12)$$

Η εξίσωση (5.12) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\overline{X}_m[r] = \frac{A}{2} e^{j\delta[r]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \hat{f}[r] n\Delta T} (a_n + jb_n) + \frac{A}{2} e^{-j\delta[r]} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi \hat{f}[r] n\Delta T} (a_n + jb_n) \quad (5.13)$$

όπου  $\hat{f}[r]$  είναι η εκτίμηση για τη στιγμιαία συχνότητα με βάση τη (5.2):

$$\hat{f}[r] = \frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1] - \delta[r]}{\Delta T} \quad (5.14)$$

Έστω ότι ο πραγματικός φασιθέτης  $\overline{X}$  του ημιτονοειδούς σήματος εισόδου τη χρονική στιγμή  $r$  της δειγματοληψίας, αναπαρίσταται ως εξής:

$$\overline{X}[r] = Ae^{j\delta[r]} \quad (5.15)$$

Χρησιμοποιώντας την (5.15) και την ακόλουθη ταυτότητα:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \left( e^{j\theta} \right)^n = \frac{\sin \frac{N\theta}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} e^{j(N-1)\frac{\theta}{2}} \quad (5.16)$$

η εξίσωση (5.13) μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\overline{X}_m[r] = \overline{P}(\hat{f}[r])\overline{X}[r] + \overline{Q}(\hat{f}[r])\overline{X}^*[r] \quad (5.17)$$

όπου \* αναπαριστά το συζυγή μιγαδικό και  $\overline{P}$ ,  $\overline{Q}$  είναι δύο μιγαδικές συναρτήσεις διόρθωσης, οι οποίες για κάθε τεχνική ψηφιακού φιλτραρίσματος ορίζονται ως εξής:

- **Διακριτός μετασχηματισμός Fourier πλήρους κύκλου**

$$\begin{cases} \overline{P}_{DFT}(\hat{f}[r]) = \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} \\ \overline{Q}_{DFT}(\hat{f}[r]) = \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \end{cases} \quad (5.18)$$

- **Διακριτός μετασχηματισμός Fourier μισού κύκλου**

$$\begin{cases} \overline{P}_{HCFT}(\hat{f}[r]) = \frac{2 \sin(\pi N(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j\left(\frac{N}{2}-1\right)(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} \\ \overline{Q}_{HCFT}(\hat{f}[r]) = \frac{2 \sin(\pi N(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j\left(\frac{N}{2}-1\right)(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \end{cases} \quad (5.19)$$

- **Φίλτρο συνημιτόνου πλήρους κύκλου**

$$\begin{cases} \overline{P}_{Cos}(\hat{f}[r]) = \frac{1}{2N} \left( 1 + je^{-j\frac{N\pi\hat{f}[r]\Delta T}{2}} \left( \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} + \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \right) \right) \\ \overline{Q}_{Cos}(\hat{f}[r]) = \frac{1}{2N} \left( 1 + je^{j\frac{N\pi\hat{f}[r]\Delta T}{2}} \left( \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} + \frac{\sin(\pi N(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \right) \right) \end{cases}$$

(5.20)

Αν οι όροι  $\vec{P}$ ,  $\vec{Q}$ ,  $\vec{X}_m$  και  $\vec{X}$  στην (5.17) αναλυθούν σε πραγματικά και φανταστικά μέρη,  $\vec{P} = P_R + jP_I$ ,  $\vec{Q} = Q_R + jQ_I$ ,  $\vec{X}_m = X_{mR} + jX_{mI}$  και  $\vec{X} = X_R + jX_I$ , προκύπτει:

$$\begin{pmatrix} X_{mR}[r] \\ X_{mI}[r] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_R(\hat{f}[r]) + Q_R(\hat{f}[r]) & Q_I(\hat{f}[r]) - P_I(\hat{f}[r]) \\ P_I(\hat{f}[r]) + Q_I(\hat{f}[r]) & P_R(\hat{f}[r]) - Q_R(\hat{f}[r]) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_R[r] \\ X_I[r] \end{pmatrix}. \quad (5.21)$$

Ο πραγματικός φασιθέτης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\begin{pmatrix} X_R[r] \\ X_I[r] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_R(\hat{f}[r]) + Q_R(\hat{f}[r]) & Q_I(\hat{f}[r]) - P_I(\hat{f}[r]) \\ P_I(\hat{f}[r]) + Q_I(\hat{f}[r]) & P_R(\hat{f}[r]) - Q_R(\hat{f}[r]) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_{mR}[r] \\ X_{mI}[r] \end{pmatrix}. \quad (5.22)$$

Από τη στιγμή που απαιτείται η γνώση της στιγμιαίας συχνότητας σε κάθε χρονική στιγμή για τον υπολογισμό του πραγματικού φασιθέτη στην (5.22), πρέπει να υπολογιστεί πρώτη. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας την αναδρομική διαδικασία που περιγράφεται στην ακόλουθη παράγραφο.

### 5.2.2 Υπολογισμός της στιγμιαίας συχνότητας $\hat{f}$

Με βάση τη σχέση (5.10), ο φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας που υπολογίζεται τη χρονική στιγμή  $r-1$  γράφεται ως εξής:

$$\vec{X}_m[r-1] = \frac{A}{2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\delta[r-1+n]} (a_n + jb_n) + \frac{A}{2} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\delta[r-1+n]} (a_n + jb_n) \quad (5.23)$$

Εφαρμόζοντας τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής για τον όρο  $\delta[r-1+n]$  και αντικαθιστώντας στην (5.23) προκύπτει:

$$\begin{aligned} \vec{X}_m[r-1] &= \frac{A}{2} e^{j\delta(r)} e^{-j2\pi\left(\frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1]-\delta[r]}{\Delta T}\right)\Delta T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi\left(\frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1]-\delta[r]}{\Delta T}\right)n\Delta T} (a_n + jb_n) \\ &\quad + \frac{A}{2} e^{-j\delta(r)} e^{j2\pi\left(\frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1]-\delta[r]}{\Delta T}\right)\Delta T} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi\left(\frac{1}{2\pi} \frac{\delta[r+1]-\delta[r]}{\Delta T}\right)n\Delta T} (a_n + jb_n) \end{aligned} \quad (5.24)$$

Συνδυάζοντας τις (5.14)-(5.17) και (5.24), είναι:

$$\vec{X}_m[r-1] = e^{-j2\pi\hat{f}[r]\Delta T} \vec{P}(\hat{f}[r])\vec{X}[r] + e^{j2\pi\hat{f}[r]\Delta T} \vec{Q}(\hat{f}[r])\vec{X}^*[r] \quad (5.25)$$

Ο φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας τη χρονική στιγμή  $r-2$  μπορεί να υπολογιστεί ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία όπως προηγουμένως, ως ακολούθως:

$$\vec{X}_m[r-2] = e^{-j2(2\pi\hat{f}[r]\Delta T)} \vec{P}(\hat{f}[r])\vec{X}[r] + e^{j2(2\pi\hat{f}[r]\Delta T)} \vec{Q}(\hat{f}[r])\vec{X}^*[r] \quad (5.26)$$

Έστω ότι:

$$\vec{z} = e^{j2\pi\hat{f}[r]\Delta T} \quad (5.27)$$

Αντικαθιστώντας την (5.27) στις (5.25) και (5.26) και πολλαπλασιάζοντας τον όρο  $\vec{X}_m[r]$  με  $\vec{X}_m^*[r-1]$  και  $\vec{X}_m^*[r-2]$  αντίστοιχα, προκύπτει:

$$\begin{aligned} \vec{X}_m[r] \cdot \vec{X}_m^*[r-1] &= \left( \vec{P}(\hat{f}[r])\vec{X}[r] + \vec{Q}(\hat{f}[r])\vec{X}^*[r] \right) \cdot \left( \vec{z}^* \vec{P}(\hat{f}[r])\vec{X}^*(r) + \vec{z}^{-1} \vec{Q}(\hat{f}[r])\vec{X}[r] \right) \\ &= \vec{z} \left| \vec{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \vec{X}[r] \right|^2 + \vec{z}^{-1} \vec{P}(\hat{f}[r]) \vec{Q}^*(\hat{f}[r]) \left( \vec{X}[r] \right)^2 + \vec{z} \vec{P}(\hat{f}[r]) \vec{Q}(\hat{f}[r]) \left( \vec{X}^*[r] \right)^2 + \vec{z}^{-1} \left| \vec{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \vec{X}[r] \right|^2 \end{aligned}$$

$$(5.28)$$

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r] \cdot \overline{X}_m^*[r-2] &= \left( \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{X}[r] + \overline{Q}(\hat{f}[r]) \overline{X}^*[r] \right) \cdot \left( \overline{z}^{-2} \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{X}[r] + \overline{z}^{-2} \overline{Q}(\hat{f}[r]) \overline{X}^*[r] \right) \\ &= \overline{z}^2 \left| \overline{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 + \overline{z}^{-2} \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}[r] \right)^2 + \overline{z}^2 \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}^*[r] \right)^2 + \overline{z}^{-2} \left| \overline{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 \end{aligned} \quad (5.29)$$

Παίρνοντας το συζυγή μιγαδικό των εκφράσεων στα αριστερά μέλη των (5.28) και (5.29), είναι:

$$\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-1] = \overline{z}^{-1} \left| \overline{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 + \overline{z}^{-1} \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}[r] \right)^2 + \overline{z} \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}^*[r] \right)^2 + \overline{z} \left| \overline{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 \quad (5.30)$$

$$\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-2] = \overline{z}^{-2} \left| \overline{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 + \overline{z}^{-2} \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}[r] \right)^2 + \overline{z}^2 \overline{P}(\hat{f}[r]) \overline{Q}(\hat{f}[r]) \left( \overline{X}^*[r] \right)^2 + \overline{z}^{-2} \left| \overline{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \left| \overline{X}[r] \right|^2 \quad (5.31)$$

Αφαιρώντας τις (5.30) και (5.28) από τις (5.31) και (5.29) αντίστοιχα, προκύπτει:

$$\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m^*[r-1] - \overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-1] = \left( \overline{z} - \overline{z}^{-1} \right) \left( \left| \overline{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 - \left| \overline{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \right) \left| \overline{X}[r] \right|^2 \quad (5.32)$$

$$\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m^*[r-2] - \overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-2] = \left( \overline{z}^2 - \overline{z}^{-2} \right) \left( \left| \overline{P}(\hat{f}[r]) \right|^2 - \left| \overline{Q}(\hat{f}[r]) \right|^2 \right) \left| \overline{X}[r] \right|^2 \quad (5.33)$$

Διαιρώντας την (5.33) με την (5.32) και χρησιμοποιώντας την (5.27), προκύπτει:

$$\frac{\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m^*[r-2] - \overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-2]}{\overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m^*[r-1] - \overline{X}_m^*[r] \cdot \overline{X}_m[r-1]} = \frac{\overline{z}^2 - \overline{z}^{-2}}{\overline{z} - \overline{z}^{-1}} = \overline{z} + \overline{z}^{-1} \quad (5.34)$$

Η εξίσωση (5.34) μπορεί να εκφραστεί σε καρτεσιανές συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας τον ορισμό του  $\overline{z}$  από την (5.27), ως εξής:

$$\frac{X_{ml}[r]X_{mR}[r-2] - X_{mR}[r]X_{ml}[r-2]}{X_{ml}[r]X_{mR}[r-1] - X_{mR}[r]X_{ml}[r-1]} = 2 \operatorname{Re}(\overline{z}) \quad (5.35)$$

Από τις (5.27) και (5.35), υπολογίζεται η λύση για τη στιγμιαία συχνότητα  $\hat{f}$  κάθε χρονική στιγμή  $r$ , ως ακολούθως:

$$\hat{f}[r] = \frac{1}{2\pi\Delta T} \cos^{-1} \left( \frac{X_{ml}[r]X_{mR}[r-2] - X_{mR}[r]X_{ml}[r-2]}{2(X_{ml}[r]X_{mR}[r-1] - X_{mR}[r]X_{ml}[r-1])} \right) \quad (5.36)$$

Μετά τον υπολογισμό της  $\hat{f}[r]$ , μπορεί να υπολογιστεί ο πραγματικός φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας μέσω της (5.22).

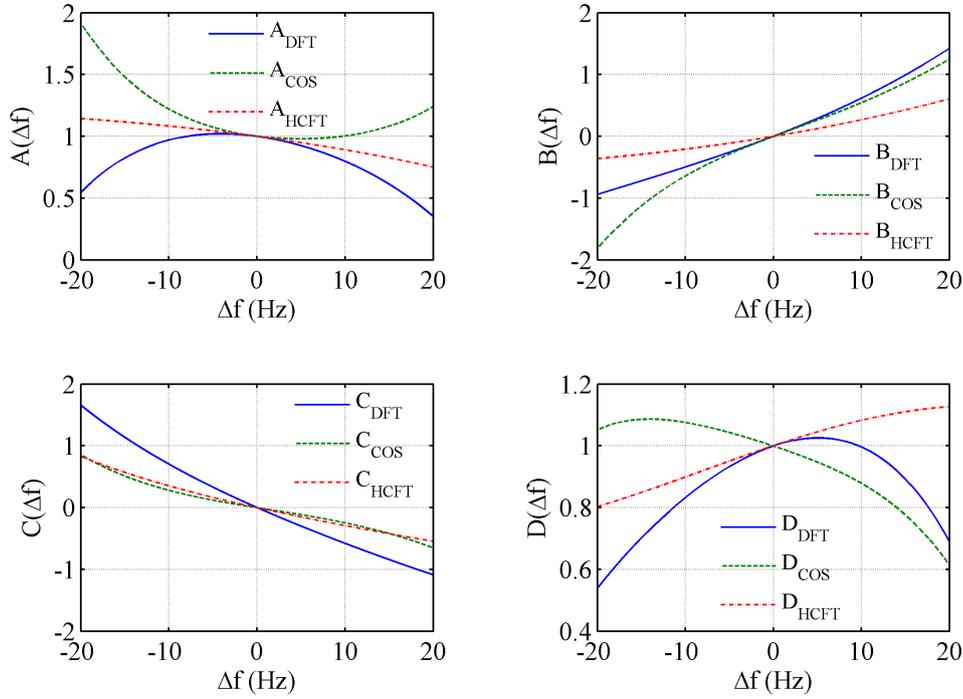
## 5.3 Επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου

### 5.3.1 Υπολογιστική εφαρμογή

Για την επαλήθευση της προτεινόμενης μεθόδου, έχουν εκτελεστεί πολλές δοκιμές προσομοίωσης στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB [159]. Για κάθε δοκιμή, η συχνότητα δειγματοληψίας έχει θεωρηθεί ίση με 800 Hz, το παράθυρο επεξεργασίας των δειγμάτων ίσο με  $N=16$ , ενώ η ονομαστική συχνότητα  $f_N$  ίση με 50 Hz. Επιπλέον, έχει εξομοιωθεί το αναπόφευκτο σφάλμα κβαντοποίησης, που παρουσιάζεται σε κάθε σήμα εισόδου λόγω της μετατροπής του από αναλογικό σε ψηφιακό (ADC), ως εξής:

$$y[k] = 2^{-M} \cdot \text{Ron}\left(x[k] / 2^{-M}\right), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (5.37)$$

όπου  $M = 16$  bits είναι το μήκος της ψηφιακής λέξης, που έχει θεωρηθεί για το μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.



**Σχήμα 5.1** Στοιχεία  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , και  $D$  συναρτήσεσι της απόκλισης συχνότητας  $\Delta\hat{f}$

Τα στοιχεία του αντιστρόφου πίνακα στην εξίσωση (5.22) μπορούν να προϋπολογιστούν για διάφορες αποκλίσεις της συχνότητας  $\Delta\hat{f} = \hat{f} - f_N$ , ώστε να επιταχυνθεί ο υπολογισμός του πραγματικού φασιστέτη. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί, γράφοντας την (5.22) στην ακόλουθη μορφή:

$$\begin{pmatrix} X_R(r) \\ X_I(r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(\Delta\hat{f}[r]) & B(\Delta\hat{f}[r]) \\ C(\Delta\hat{f}[r]) & D(\Delta\hat{f}[r]) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{mR}[r] \\ X_{mI}[r] \end{pmatrix} \quad (5.38)$$

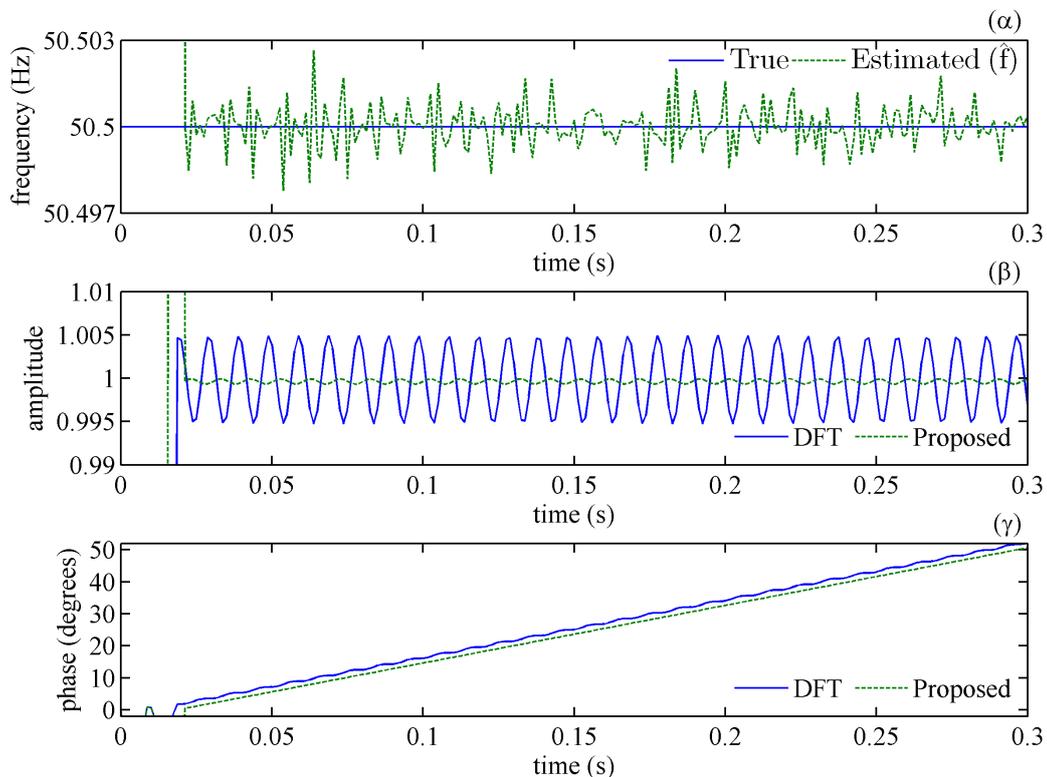
όπου κάθε στοιχείο  $A$ ,  $B$ ,  $C$  και  $D$  του πίνακα αναπαρίσταται από ένα πολυώνυμο τάξεως  $m$ , οι συντελεστές του οποίου προκύπτουν εφαρμόζοντας ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) [21] σε ένα προεπιλεγμένο εύρος αποκλίσεων της συχνότητας  $\Delta\hat{f}$ . Στην περίπτωση υλοποίησης της μεθόδου σε πραγματικό χρόνο, οι τιμές για τα τέσσερα στοιχεία του πίνακα μπορούν να αποθηκευθούν σε έναν πίνακα αναζήτησης (Look-Up Table – LUT) και να χρησιμοποιηθούν απευθείας, αφότου η απόκλιση συχνότητας  $\Delta\hat{f}$  προσδιοριστεί μέσω της (5.36). Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζονται τα γραφήματα των στοιχείων  $A$ ,  $B$ ,  $C$  και  $D$  που προκύπτουν για κάθε ζεύγος ορθογωνίων FIR φίλτρων, εφαρμόζοντας πολυωνυμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων 5<sup>ου</sup> βαθμού για ένα εύρος τιμών απόκλισης συχνότητας από (-20 έως 20) Hz, και τα οποία χρησιμοποιούνται για όλες τις περιπτώσεις δοκιμών που εξετάζονται.

Επιπλέον, από τη στιγμή που οι φασιστέτες θεμελιώδους συχνότητας που υπολογίζονται από το ζεύγος των FIR φίλτρων και την προτεινόμενη μέθοδο διόρθωσης είναι στρεφόμενοι εξ' ορισμού, μπορούν να μετατραπούν σε στάσιμους, πολλαπλασιάζοντας τους φασιστέτες που υπολογίζονται από

τις (5.6) και (5.22) με τον όρο  $e^{-j2\pi f_N r \Delta T}$  για κάθε χρονική στιγμή της δειγματοληψίας. Με τον τρόπο αυτό, οι φασικές γωνίες των φασιθετών αναπαρίστανται αποκλειστικά από την απόκλιση συχνότητας και την αρχική φασική γωνία, με βάση τη σχέση:  $2\pi \Delta f t + \phi$ . Αυτό βοηθάει στο να παρατηρούνται οι αλλαγές στους στάσιμους φασιθέτες ως προς τη φασική γωνία λόγω των μεταβολών της συχνότητας.

### 5.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

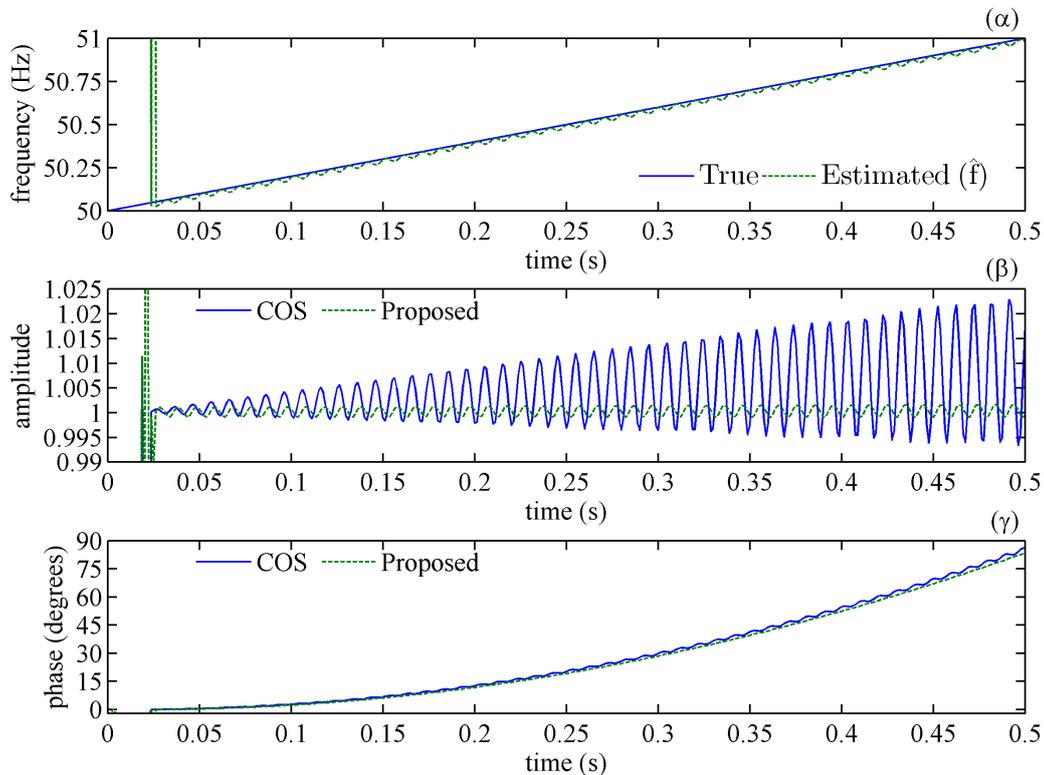
Τρεις περιπτώσεις δοκιμών έχουν εξομοιωθεί για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου: η περίπτωση της σταθερής απόκλισης από την ονομαστική συχνότητα, η περίπτωση της γραμμικής μεταβολής της συχνότητας (ramp) και η περίπτωση της ημιτονοειδούς μεταβολής της συχνότητας.



**Σχήμα 5.2 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi 50.5t)$ ,  $f(t)=50.5$  Hz)**

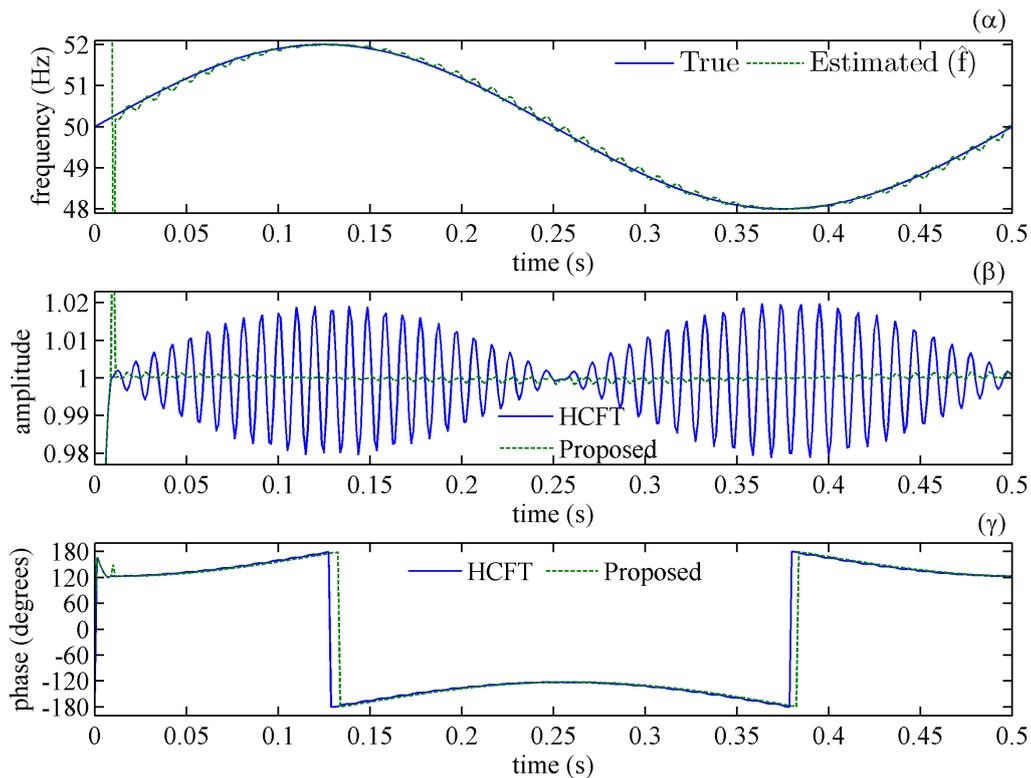
Το Σχήμα 5.2 αντιστοιχεί σε μια τυπική απόκλιση της συχνότητας κατά 0.5 Hz. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier πλήρους κύκλου επιστρατεύεται για τον υπολογισμό του φασιθέτη θεμελιώδους συχνότητας. Το Σχήμα 5.3 αντιστοιχεί σε μία γραμμική μεταβολή της συχνότητας από 50 σε 51 Hz για χρονικό διάστημα 0.5 sec. Η μεταβολή της συχνότητας με ρυθμό 2 Hz/sec μπορεί να προκληθεί σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο από την απώλεια ενός σημαντικού φορτίου. Στην περίπτωση αυτή, για τον υπολογισμό του φασιθέτη χρησιμοποιείται το φίλτρο συνημιτόνου πλήρους κύκλου. Το Σχήμα 5.4 αντιστοιχεί σε μια ημιτονοειδή μεταβολή της συχνότητας για χρονικό διάστημα 0.5 sec, και αποτελεί μια καλή αναπαράσταση της διαμόρφωσης γωνίας που παρουσιάζεται στα ηλεκτρικά δίκτυα κατά την εκδήλωση ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μισού κύκλου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του φασιθέτη. Το σήμα εισόδου που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση έχει τη μορφή:  $x(t) = \cos(\delta(t))$ . Η περίπτωση

ημιτονοειδούς σήματος στο οποίο υπεισέρχονται και ανώτερες αρμονικές εξετάζεται στην επόμενη παράγραφο.



**Σχήμα 5.3 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi 50t+2\pi t^2)$ ,  $f(t)=50+2t$  Hz)**

Στο Σχήμα 5.2(α) απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμώμενης συχνότητας  $\hat{f}$ , για την περίπτωση σταθερής απόκλισης της συχνότητας του σήματος εισόδου από την ονομαστική. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, η εκτίμηση  $\hat{f}$  παρέχει έναν ακριβή τρόπο μέτρησης της συχνότητας του σήματος, με μέγιστο σφάλμα που δεν ξεπερνά τα 0.003 Hz. Στο Σχήμα 5.2(β) παρουσιάζεται η εκτίμηση του μέτρου του φασιθέτη που επιτυγχάνεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο αντίστοιχα. Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι η προτεινόμενη μέθοδος απαλείφει αποτελεσματικά το σφάλμα που υπεισέρχεται στο μέτρο του φασιθέτη μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, και το οποίο έχει τη μορφή κυμάτωσης γύρω από το πραγματικό πλάτος. Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος αντισταθμίζει πλήρως το σφάλμα που προκαλείται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier στη φασική γωνία. Το σφάλμα αυτό έχει τη μορφή μικρής διακύμανσης, η οποία υπερτίθεται πάνω στη μέση κλίση της φασικής γωνίας που αντιστοιχεί στον όρο  $2\pi\Delta f t$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2(γ).



**Σχήμα 5.4 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη που υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο. (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi 50t-\cos(4\pi t))$ ,  $f(t)=50+2\sin(4\pi t)$  Hz)**

Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.3 και 5.4. Τα σχήματα 5.3(α) και 5.4(α) καταδεικνύουν ότι η ικανότητα παρακολούθησης της συχνότητας, μέσω της εκτίμησης  $\hat{f}$ , είναι πολύ ικανοποιητική στην περίπτωση δυναμικών μεταβολών της. Στα σχήματα 5.3(β) και 5.4(β) δείχνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος δίνει σωστές εκτιμήσεις για το μέτρο του φασιθέτη, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το φίλτρο συνημιτόνου και το διακριτό μετασχηματισμό Fourier μισού κύκλου, που περιλαμβάνουν σφάλματα, τα οποία επιδεινώνονται όσο η συχνότητα αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή. Αντίστοιχα συμπεράσματα ισχύουν και για τις εκτιμήσεις της φασικής γωνίας, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3(γ) και 5.4(γ).

Για κάθε περίπτωση δοκιμής που έχει προσομοιωθεί, η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει μια επιπλέον χρονική καθυστέρηση ίση με το 1/8 του χρόνου που απαιτείται από το αντίστοιχο ζεύγος των FIR φίλτρων για την εκτίμηση του φασιθέτη. Αυτή η χρονική καθυστέρηση ισούται με το χρόνο που πρέπει να παρέλθει προκειμένου να ληφθεί μια λύση της  $\hat{f}$  από την (5.36), και σε κάθε περίπτωση υπερσκελιζεται από την ακρίβεια των φασιθετών που επιτυγχάνεται από την προτεινόμενη μέθοδο.

## 5.4 Αντιμετώπιση των αρμονικών

Η παραδοχή ενός καθαρά ημιτονοειδούς σήματος είναι μια ιδανική κατάσταση που δύσκολα απαντάται στην πράξη, κυρίως στα μοντέρνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος έχουν αυξήσει σημαντικά την περιεκτικότητα των αρμονικών στις μετρούμενες τάσεις και εντάσεις. Η προτεινόμενη μέθοδος, που θεμελιώθηκε μαθηματικά στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να επεκταθεί περαιτέρω ώστε να συμπεριλάβει και την περίπτωση των αρμονικών συνιστωσών. Οι τροποποιήσεις που απαιτούνται για το σκοπό αυτό, αναπτύσσονται

στην επόμενη παράγραφο. Τρεις επιπλέον περιπτώσεις δοκιμών παρουσιάζονται, που καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια της εκτεταμένης μεθόδου.

### 5.4.1 Θεώρηση μίας μόνο αρμονικής

Θεωρείται ότι το ημιτονοειδές σήμα εισόδου, χρονικά μεταβαλλόμενης συχνότητας  $f(t)$  αποτελείται από τη θεμελιώδη και την  $k$ -οστή αρμονική συνιστώσα, ως εξής:

$$x(t) = A_1 \cos(2\pi \int_0^t f(\tau) d\tau + \phi_1) + A_k \cos(2\pi k \int_0^t f(\tau) d\tau + \phi_k) \quad (5.39)$$

όπου  $A_1, A_k$  και  $\phi_1, \phi_k$  είναι τα πλάτη και οι αρχικές φασικές γωνίες της θεμελιώδους και της  $k$ -οστής αρμονικής, αντίστοιχα.

Με βάση την ανάλυση της παραγράφου 5.2, ο φασιθέτης  $\overline{X}_m$ , που υπολογίζεται από το ζεύγος των ορθογώνιων FIR φίλτρων τη χρονική στιγμή  $r$  της δειγματοληψίας, δίνεται από μια έκφραση παρόμοια με αυτή της (5.17):

$$\overline{X}_m[r] = \overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r] + \overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r] + \overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r] + \overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r] \quad (5.40)$$

όπου

$\overline{X}_1$  και  $\overline{X}_k$ : οι πραγματικοί φασιθέτες που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη και την  $k$ -οστή αρμονική συνιστώσα, αντίστοιχα

$\overline{P}_1$  και  $\overline{Q}_1$ : οι συντελεστές διόρθωσης που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη συνιστώσα, και υπολογίζονται από τις (5.18)-(5.20),

$\overline{P}_k$  και  $\overline{Q}_k$ : οι συντελεστές διόρθωσης που αντιστοιχούν στην  $k$ -οστή αρμονική, οι οποίοι για κάθε τεχνική ψηφιακού φιλτραρίσματος ορίζονται ως εξής:

- Διακριτός μετασχηματισμός Fourier πλήρους κύκλου

$$\begin{cases} \overline{P}_{k_{DFT}}(\hat{f}[r]) = \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} \\ \overline{Q}_{k_{DFT}}(\hat{f}[r]) = \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \end{cases} \quad (5.41)$$

- Διακριτός μετασχηματισμός Fourier μισού κύκλου

$$\begin{cases} \overline{P}_{k_{HCFT}}(\hat{f}[r]) = \frac{2 \sin(\pi N(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j(\frac{N}{2}-1)(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} \\ \overline{Q}_{k_{HCFT}}(\hat{f}[r]) = \frac{2 \sin(\pi N(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{N \sin(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j(\frac{N}{2}-1)(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \end{cases} \quad (5.42)$$

- Φίλτρο συνημιτόνου πλήρους κύκλου

$$\begin{cases} \overline{P}_{k_{\cos}}(\hat{f}[r]) = \frac{1}{2N} \left( 1 + j e^{-j\frac{N\pi\hat{f}[r]\Delta T}{2}} \left( \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} + \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \right) \right) \\ \overline{Q}_{k_{\cos}}(\hat{f}[r]) = \frac{1}{2N} \left( 1 + j e^{j\frac{N\pi\hat{f}[r]\Delta T}{2}} \left( \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] - f_N)\Delta T)} + \frac{\sin(\pi N(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)}{\sin(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} e^{-j(N-1)(\pi(k\hat{f}[r] + f_N)\Delta T)} \right) \right) \end{cases} \quad (5.43)$$

Με βάση τις (5.25) και (5.26), οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας που υπολογίζονται τις χρονικές στιγμές  $r-1$ ,  $r-2$ ,  $r-3$  και  $r-4$  είναι:

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r-1] = & \overline{z}^{-1} \overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r] + \overline{z} \overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r] \\ & + \overline{z}^{-k} \overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r] + \overline{z}^k \overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r] \end{aligned} \quad (5.44)$$

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r-2] = & \overline{z}^{-2} \overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r] + \overline{z}^2 \overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r] \\ & + \overline{z}^{-2k} \overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r] + \overline{z}^{2k} \overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r] \end{aligned} \quad (5.45)$$

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r-3] = & \overline{z}^{-3} \overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r] + \overline{z}^3 \overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r] \\ & + \overline{z}^{-3k} \overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r] + \overline{z}^{3k} \overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r] \end{aligned} \quad (5.46)$$

$$\begin{aligned} \overline{X}_m[r-4] = & \overline{z}^{-4} \overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r] + \overline{z}^4 \overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r] \\ & + \overline{z}^{-4k} \overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r] + \overline{z}^{4k} \overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r] \end{aligned} \quad (5.47)$$

όπου ο όρος  $\overline{z}$  έχει οριστεί στην (5.27).

Οι εξισώσεις (5.44)-(5.47) συνιστούν ένα  $4 \times 4$  γραμμικό σύστημα, με αγνώστους τους όρους  $\overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r]$ ,  $\overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r]$ ,  $\overline{P}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k[r]$  και  $\overline{Q}_k(\hat{f}[r])\overline{X}_k^*[r]$ . Λύνοντας ως προς αυτούς τους όρους και αντικαθιστώντας τις λύσεις τους στην (5.40), προκύπτει η ακόλουθη πολυωνυμική εξίσωση τάξεως  $2k+2$ :

$$a_8 \overline{z}^{-2k+2} + a_7 \overline{z}^{-2k+1} + a_6 \overline{z}^{-2k} + a_5 \overline{z}^{-k+2} + a_4 \overline{z}^{-k+1} + a_3 \overline{z}^{-k} + a_2 \overline{z}^{-2} + a_1 \overline{z} + a_0 = 0 \quad (5.48)$$

όπου  $a_i$ ,  $i=0, \dots, 8$  είναι οι μιγαδικοί συντελεστές του πολυώνυμου, που ορίζονται ως ακολούθως:

$$a_0 = a_2 = a_6 = a_8 = \overline{X}_m[r-2] \quad (5.49)$$

$$a_1 = a_3 = a_5 = a_7 = -\overline{X}_m[r-1] - \overline{X}_m[r-3] \quad (5.50)$$

$$a_4 = \overline{X}_m[r] + 2\overline{X}_m[r-2] + \overline{X}_m[r-4] \quad (5.51)$$

Επιλύοντας το πολυώνυμο της (5.48) ως προς τη μεταβλητή  $\overline{z}$  για κάθε χρονική στιγμή  $r$ , μπορεί να υπολογιστεί μία ακριβής εκτίμηση για τη στιγμιαία συχνότητα  $\hat{f}$  - υπό την παρουσία αρμονικών συνιστωσών στο σήμα εισόδου - μέσω της (5.27), και το φασιθέτη θεμελιώδους συνιστώσας  $\overline{X}_1$ , από την ακόλουθη έκφραση, η οποία απορρέει από τη λύση του γραμμικού συστήματος (5.44)-(5.47):

$$\begin{aligned} \overline{X}_1[r] = & \left[ \left( \frac{\overline{z}^{-k+4}}{\overline{z}^{-2k+2} \overline{z}^{-2k} \overline{z}^{-k+3} \overline{z}^{-k-1} \overline{z}^{-2}} \right) \overline{X}_m[r-1] + \left( \frac{\overline{z}^{-2k+4} \overline{z}^{-k+3} \overline{z}^{-4}}{\overline{z}^{-2k+2} \overline{z}^{-2k} \overline{z}^{-k+3} \overline{z}^{-k-1} \overline{z}^{-2}} \right) \overline{X}_m[r-2] \right. \\ & \left. + \left( \frac{\overline{z}^{-2k+3} \overline{z}^{-k+4} \overline{z}^{-3}}{\overline{z}^{-2k+2} \overline{z}^{-2k} \overline{z}^{-k+3} \overline{z}^{-k-1} \overline{z}^{-2}} \right) \overline{X}_m[r-3] + \left( \frac{\overline{z}^{-k+3}}{\overline{z}^{-2k+2} \overline{z}^{-2k} \overline{z}^{-k+3} \overline{z}^{-k-1} \overline{z}^{-2}} \right) \overline{X}_m[r-4] \right] \overline{P}_1(\hat{f}[r])^{-1} \end{aligned} \quad (5.52)$$

Το μιγαδικό πολυώνυμο της (5.48) είναι τάξης  $2k+2$ , γεγονός που υποδηλώνει ότι υπάρχουν ακριβώς  $2k+2$  μιγαδικές ρίζες για τη μεταβλητή  $\overline{z}$ . Για να βρεθεί η σωστή λύση, μπορεί να εφαρμοστεί η επαναληπτική μέθοδος Newton, και για κάθε χρονική στιγμή  $r$  να χρησιμοποιηθεί ως αρχική λύση η μιγαδική τιμή  $\overline{z}_0$ , η οποία αντιστοιχεί στην τιμή της  $\hat{f}$  που υπολογίζεται από την (5.36), και λαμβάνει υπόψη μόνο τη συμμετοχή της θεμελιώδους αρμονικής συνιστώσας. Στην πράξη, αυτή η αρχική τιμή είναι αρκετά πρακτική, αφού η συνεισφορά της θεμελιώδους στη διαμόρφωση της  $\hat{f}$ , υπό την παρουσία και άλλων αρμονικών, είναι η πιο σημαντική, ως κυρίαρχη συνιστώσα. Η λύση για τη  $\overline{z}$  βρίσκεται στην περιοχή έλξης γύρω από τη  $\overline{z}_0$ , και αυτό εξασφαλίζει γρήγορη σύγκλιση για την επαναληπτική μέθοδο Newton [186].

## 5.4.2 Θεώρηση περισσότερων αρμονικών

Με βάση την ανάλυση της προηγούμενης παραγράφου, παρουσιάζεται η παρακάτω διαδικασία υπολογισμού του φασιθέτη θεμελιώδους συνιστώσας  $\overline{X}_1$ , υπό την παρουσία οποιουδήποτε αριθμού αρμονικών στο σήμα εισόδου:

- 1) Για κάθε επιπλέον αρμονική συνιστώσα, χρησιμοποιούνται δύο προγενέστερα υπολογισμένοι φασιθέτες  $\overline{X}_m[r-2i+1]$  και  $\overline{X}_m[r-2i]$ , όπου  $i=2, \dots, p$  αναπαριστά τον αύξοντα αριθμό των αρμονικών και  $p$  αντιστοιχεί στο συνολικό αριθμό των θεωρούμενων αρμονικών στο σήμα εισόδου. Με τον τρόπο αυτό σχηματίζεται ένα  $2p \times 2p$  γραμμικό σύστημα αντίστοιχο με αυτό των εξισώσεων (5.44)-(5.47).
- 2) Επιλύεται το  $2p \times 2p$  γραμμικό σύστημα ως προς τις άγνωστες μεταβλητές  $\overline{P}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1[r]$ ,  $\overline{Q}_1(\hat{f}[r])\overline{X}_1^*[r]$ , ...,  $\overline{P}_j(\hat{f}[r])\overline{X}_j[r]$ ,  $\overline{Q}_j(\hat{f}[r])\overline{X}_j^*[r]$ , όπου  $j=2, \dots, q$  αντιπροσωπεύει την τάξη κάθε αρμονικής και  $q$  είναι η μεγαλύτερη τάξη αρμονικής, που λαμβάνεται υπόψη.
- 3) Αντικαθίσταται η λύση ως προς κάθε άγνωστη μεταβλητή στο προηγούμενο βήμα, σε μια εξίσωση παρόμοια με την (5.40), που συνδέει το φασιθέτη θεμελιώδους συνιστώσας, όπως υπολογίζεται από το ζεύγος των FIR φίλτρων τη χρονική στιγμή  $r$ , με τους πραγματικούς φασιθέτες  $\overline{X}_1, \dots, \overline{X}_q$  την ίδια χρονική στιγμή. Αυτό οδηγεί σε ένα πολυώνυμο μεγάλου βαθμού, παρόμοιο με αυτό της (5.48), με άγνωστο τον όρο  $\overline{z}$ .
- 4) Προσδιορίζεται η ρίζα του πολυωνύμου εφαρμόζοντας σε κάθε χρονική στιγμή  $r$  τη μέθοδο Newton με βάση τον αλγόριθμο του Horner [227]. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ως αρχική τιμή  $\overline{z}_0$  το αποτέλεσμα της (5.27) για την τιμή της  $\hat{f}$  που υπολογίζεται στην (5.36).
- 5) Αφότου προσδιοριστεί η λύση για τη  $\overline{z}$  σε κάθε χρονική στιγμή  $r$ , υπολογίζεται η πραγματική τιμή της  $\hat{f}$  υπό την παρουσία αρμονικών από την (5.27):

$$\hat{f}[r] = \frac{1}{2\pi\Delta T} \cos^{-1} \left( \text{Re}(\overline{z}) \right). \quad (5.53)$$

- 6) Συνδυάζοντας τις λύσεις ως προς τις  $\overline{z}$  και  $\hat{f}[r]$  από την (5.53), υπολογίζονται οι φασιθέτες θεμελιώδους συνιστώσας  $\overline{X}_1[r]$  και οι φασιθέτες των υπολοίπων αρμονικών  $\overline{X}_j[r]$ , κάνοντας χρήση εκφράσεων παρομοίων με την (5.52), οι οποίες προκύπτουν από την επίλυση του  $2p \times 2p$  γραμμικού συστήματος.

Η χρήση του αλγόριθμου Newton-Horner διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα για υλοποίηση πραγματικού χρόνου της εκτεταμένης μεθόδου υπολογισμού φασιθετών. Συγκεκριμένα, για ένα πολυώνυμο  $n$  βαθμού απαιτούνται μόνο  $n$  πολλαπλασιασμοί και  $n$  προσθέσεις, ενώ η κλασική μέθοδος Newton απαιτεί  $n(n+1)/2$  πολλαπλασιασμούς και  $n$  προσθέσεις, γεγονός που επιφέρει σημαντική υπολογιστική ελάφρυνση.

Επιπλέον, ο ρυθμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται στην εκτεταμένη μέθοδο, καθορίζει το πλήθος των αρμονικών και τη μεγαλύτερης τάξης αρμονική συνιστώσα που μπορούν να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς, μέσω του θεωρήματος του Nyquist. Από τη στιγμή που η προτεινόμενη μέθοδος επικεντρώνεται αποκλειστικά σε εφαρμογές προστασίας, ελέγχου και μετρήσεων σε Σ.Η.Ε, όπου οι ρυθμοί δειγματοληψίας είναι της τάξεως των 400 έως 1920 Hz, είναι προφανές ότι πρέπει να επιλεγεί ένας κατάλληλος ρυθμός δειγματοληψίας. Κριτήρια επιλογής του ρυθμού δειγματοληψίας είναι η ελάττωση του αριθμού των αρμονικών, που μπορούν να θεωρηθούν στην προτεινόμενη μέθοδο, και η μείωση του αριθμού των επαναλήψεων που απαιτούνται από τη μέθοδο Newton, σε χρονικό διάστημα ίσο με την περίοδο δειγματοληψίας, ώστε αυτή να συγκλίνει.

Σύμφωνα με την παραπάνω συλλογιστική, ένας ρυθμός δειγματοληψίας 12 ή 16 δειγμάτων ανά κύκλο θεωρείται μια καλή επιλογή.

Τέλος, παρότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να λάβει υπόψη όλες τις αρμονικές συνιστώσες που επιβάλλονται από το ρυθμό δειγματοληψίας, εντούτοις, είναι προφανές ότι θα ήταν υπολογιστικά πιο αποδοτικό να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς μόνο εκείνες οι τάξεις αρμονικών που συνεισφέρουν περισσότερο κατά περίπτωση (π.χ. η δεύτερη αρμονική στην περίπτωση διαφορικής προστασίας M/Σ κτλ.).

### 5.4.3 Αξιολόγηση της εκτεταμένης μεθόδου μέσω προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζονται τρεις επιπλέον περιπτώσεις δοκιμών προκειμένου να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της εκτεταμένης μεθόδου. Οι παράμετροι των προσομοιώσεων είναι ίδιες με αυτές τις παραγράφου 5.3.1. Τα σχήματα 5.5 έως 5.7 αναφέρονται σε μια σταθερή απόκλιση της συχνότητας από την ονομαστική, όπου στο καθαρά ημιτονοειδές σήμα εισόδου έχει προστεθεί και μια 3<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα. Το φίλτρο συνημιτόνου εφαρμόζεται για τον υπολογισμό του φασιθέτη θεμελιώδους συχνότητας. Τα σχήματα 5.8 έως 5.10 αντιστοιχούν σε μια γραμμική μεταβολή της συχνότητας, όπου στο καθαρά ημιτονοειδές σήμα εισόδου έχει προστεθεί ένας συνδυασμός 3<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> αρμονικής. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier μισού κύκλου για τον υπολογισμό των φασιθετών. Το Σχήμα 5.11 απεικονίζει την συμπεριφορά της εκτεταμένης μεθόδου στην περίπτωση που στο σήμα εισόδου υπεισέρχεται λευκός θόρυβος. Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier πλήρους κύκλου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του φασιθέτη.

Το πολυώνυμο που πρέπει να επιλυθεί, καθώς και η αναλυτική έκφραση που απαιτείται για τον υπολογισμό του φασιθέτη θεμελιώδους συνιστώσας, όταν τόσο η 3<sup>η</sup> όσο και η 5<sup>η</sup> αρμονική θεωρούνται στην εκτεταμένη μέθοδο παρατίθενται ως ακολούθως. Το πολυώνυμο μεγάλου βαθμού ως προς  $\bar{z}$  είναι:

$$\begin{aligned} a_{18}\bar{z}^{-18} + a_{17}\bar{z}^{-17} + a_{16}\bar{z}^{-16} + a_{15}\bar{z}^{-15} + a_{14}\bar{z}^{-14} + a_{13}\bar{z}^{-13} + a_{12}\bar{z}^{-12} + a_{11}\bar{z}^{-11} + a_{10}\bar{z}^{-10} \\ + a_9\bar{z}^{-9} + a_8\bar{z}^{-8} + a_7\bar{z}^{-7} + a_6\bar{z}^{-6} + a_5\bar{z}^{-5} + a_4\bar{z}^{-4} + a_3\bar{z}^{-3} + a_2\bar{z}^{-2} + a_1\bar{z} + a_0 = 0 \end{aligned} \quad (5.54)$$

όπου  $a_i$ ,  $i=0, \dots, 18$  είναι οι μιγαδικοί συντελεστές του πολυωνύμου που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$a_0 = a_2 = a_{16} = a_{18} = \overline{X_m}[r-3] \quad (5.55)$$

$$a_1 = a_3 = a_{15} = a_{17} = -\overline{X_m}[r-2] - \overline{X_m}[r-4] \quad (5.56)$$

$$a_4 = a_{14} = \overline{X_m}[r-1] + 2\overline{X_m}[r-3] + \overline{X_m}[r-5] \quad (5.57)$$

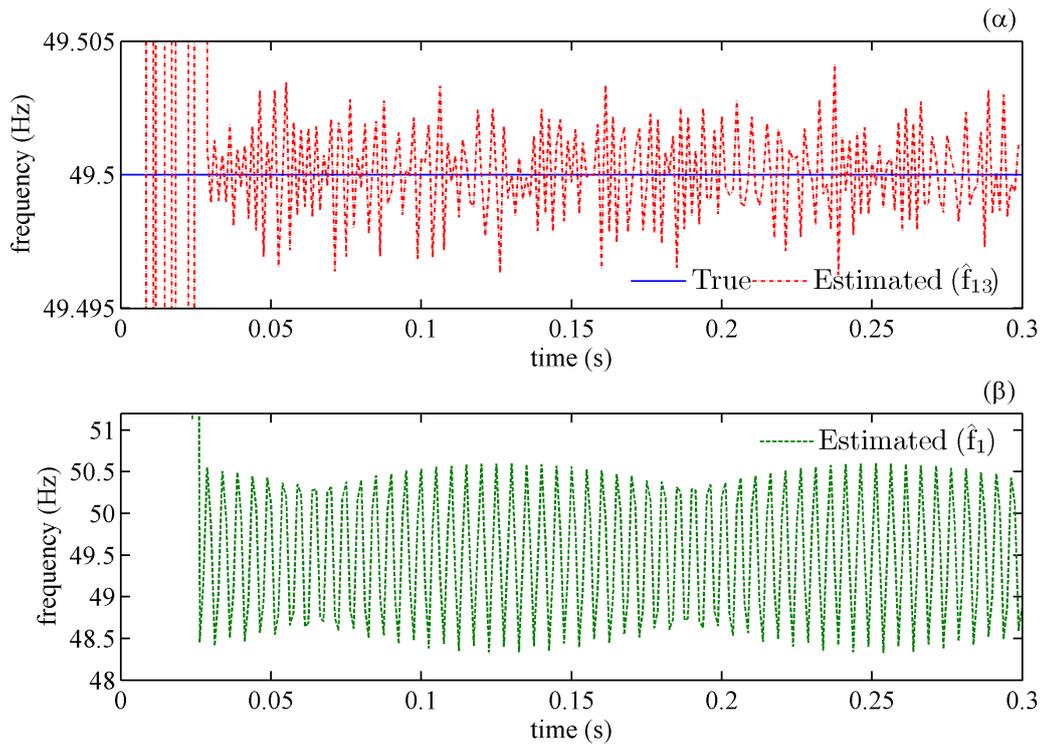
$$a_5 = a_7 = a_{11} = a_{13} = -2\overline{X_m}[r-2] - 2\overline{X_m}[r-4] \quad (5.58)$$

$$a_6 = a_8 = a_{10} = a_{12} = \overline{X_m}[r-1] + 3\overline{X_m}[r-3] + \overline{X_m}[r-5] \quad (5.59)$$

$$a_9 = -\overline{X_m}[r] - 3\overline{X_m}[r-2] - 3\overline{X_m}[r-4] - \overline{X_m}[r-6] \quad (5.60)$$

Ο φασιθέτης θεμελιώδους συχνότητας σε κάθε χρονική στιγμή  $r$  δίνεται από τη σχέση (5.61). Στην περίπτωση που στο σήμα εισόδου προστίθεται μόνο η τρίτη αρμονική, το χαρακτηριστικό πολυώνυμο και η χαρακτηριστική εξίσωση για τον όρο  $\overline{X_1}$  προκύπτουν από τις (5.48) και (5.52) αντίστοιχα, θέτοντας  $k=3$ .

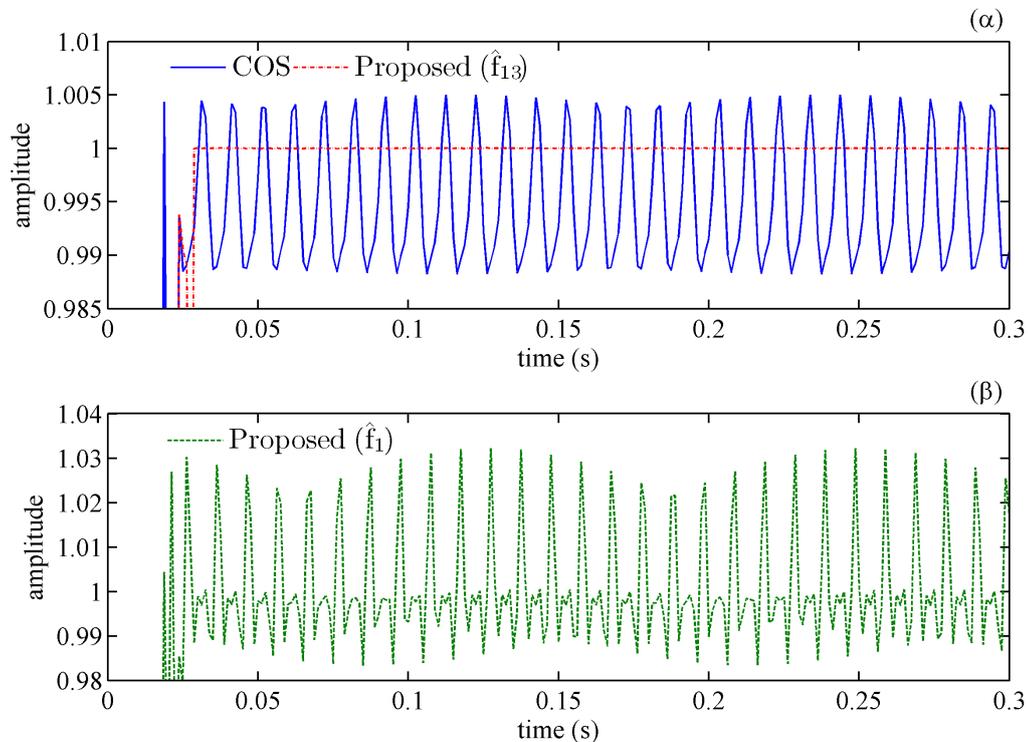
$$\begin{aligned}
 \overline{X}_1[r] = & \left( \frac{z^{-13}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-1] \\
 & + \left( \frac{-z^{-8} - z^{-10} - z^{-12} - z^{-16} - z^{-18}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-2] \\
 & + \left( \frac{z^{-5} + z^{-7} + z^{-9} + z^{-11} + 2z^{-13} + 2z^{-15} + z^{-17} + z^{-21}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-3] \\
 & + \left( \frac{-z^{-4} - z^{-8} - 2z^{-10} - 2z^{-12} - z^{-14} - z^{-16} - z^{-18} - z^{-20}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-4] \\
 & + \left( \frac{z^{-7} + z^{-9} + z^{-13} + z^{-15} + z^{-17}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-5] \\
 & + \left( \frac{-z^{-12}}{z^{-18} - 2z^{-16} - z^{-14} + 3z^{-12} + z^{-10} - z^{-8} - 3z^{-6} + z^{-4} + 2z^{-2} - 1} \right) \overline{X}_m[r-6] \Big] \overline{P}_1(\hat{f}[r])^{-1}
 \end{aligned} \tag{5.61}$$



**Σχήμα 5.5 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_{13}$ . (β) Εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_1$ . (Σήμα εισόδου:  $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1\cos(6\pi 49.5t)$ ,  $f(t) = 49.5$  Hz)**

Στο Σχήμα 5.5(α),(β) απεικονίζονται τα αποτελέσματα των εκτιμώμενων συχνοτήτων  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$ , όπως προκύπτουν από την εκτεταμένη μέθοδο, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη θεμελιώδη και, επιπλέον, την 3<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα αντίστοιχα. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η εκτίμηση  $\hat{f}_{13}$  δίνει πολύ ακριβή αποτελέσματα για την πραγματική συχνότητα του σήματος, ενώ η εκτίμηση  $\hat{f}_1$  ενέχει σφάλματα, διότι κατά τον υπολογισμό της δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της 3<sup>ης</sup>

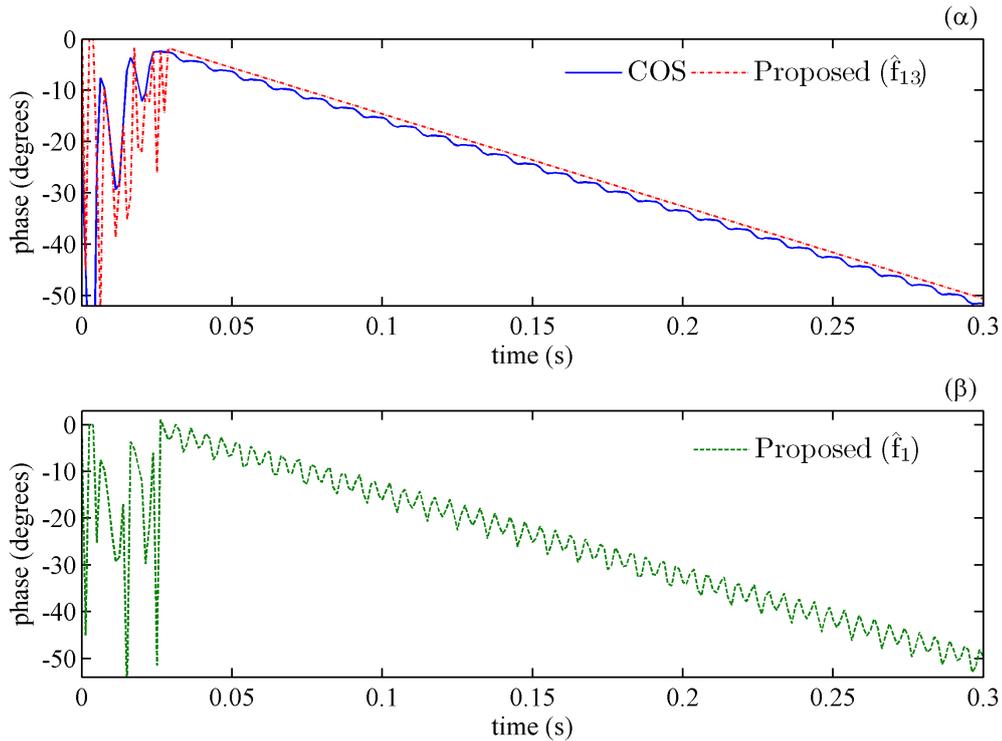
αρμονικής. Επιπλέον, τα σφάλματα στην  $\hat{f}_1$  εισάγουν σφάλματα και στον εκτιμώμενο φασιθέτη, τόσο στο μέτρο όσο και τη γωνία του, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.6(β) και 5.7(β). Αντίθετα, η εκτεταμένη μέθοδος με θεώρηση επιπλέον της 3<sup>ης</sup> αρμονικής, αντισταθμίζει πλήρως τα σφάλματα που προκαλούνται από το φίλτρο συνημιτόνου και παρέχει ακριβείς εκτιμήσεις των φασιθετών, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.6(α) και 5.7(α), αντίστοιχα.



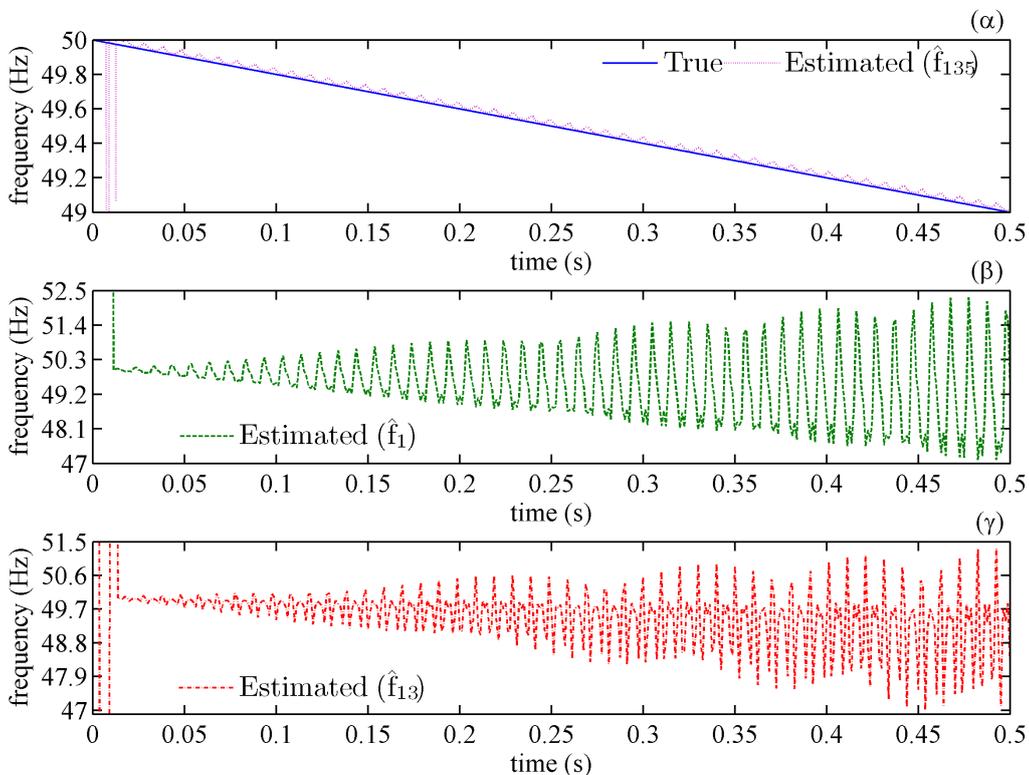
**Σχήμα 5.6 (α)-(β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις  $\hat{f}_{13}$  και  $\hat{f}_1$  αντίστοιχα. (Σήμα εισόδου:  $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1\cos(6\pi 49.5t)$ ,  $f(t) = 49.5$  Hz)**

Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τα σχήματα 5.8 έως 5.10. Στο Σχήμα 5.8(α),(β),(γ) γίνεται εμφανές ότι, ενώ η εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_{135}$ , η οποία λαμβάνει υπόψη τόσο την επίδραση της 3<sup>ης</sup> όσο και της 5<sup>ης</sup> αρμονικής, παρακολουθεί πολύ αποτελεσματικά την πραγματική συχνότητα του σήματος εισόδου, οι εκτιμήσεις  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$  αποτυγχάνουν να κάνουν το ίδιο. Αυτό έχει άμεσο αντίκτυπο στα αποτελέσματα για το μέτρο και τη φασική γωνία της προτεινόμενης μεθόδου, με χρήση αποκλειστικά της θεμελιώδους συνιστώσας, αλλά και της εκτεταμένης μεθόδου, με θεώρηση επιπλέον της 3<sup>ης</sup> αρμονικής, αν και η τελευταία επιδεικνύει καλύτερη συμπεριφορά έναντι της πρώτης, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.9(β),(γ) και 5.10(β),(γ) αντίστοιχα. Μόνο η εκτεταμένη μέθοδος, με θεώρηση και της 5<sup>ης</sup> αρμονικής, επιτυγχάνει να δώσει ακριβείς εκτιμήσεις για το φασιθέτη και απαλείφει πλήρως τα σφάλματα που υπεισέρχονται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier μισού κύκλου, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.9(α) και 5.10(α). Αυτό, όμως, συμβαίνει με κόστος μια επιπλέον χρονική καθυστέρηση, που οφείλεται στο ότι απαιτείται η χρησιμοποίηση περισσότερων φασιθετών που έχουν υπολογιστεί σε προηγούμενες χρονικές στιγμές μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier μισού κύκλου.

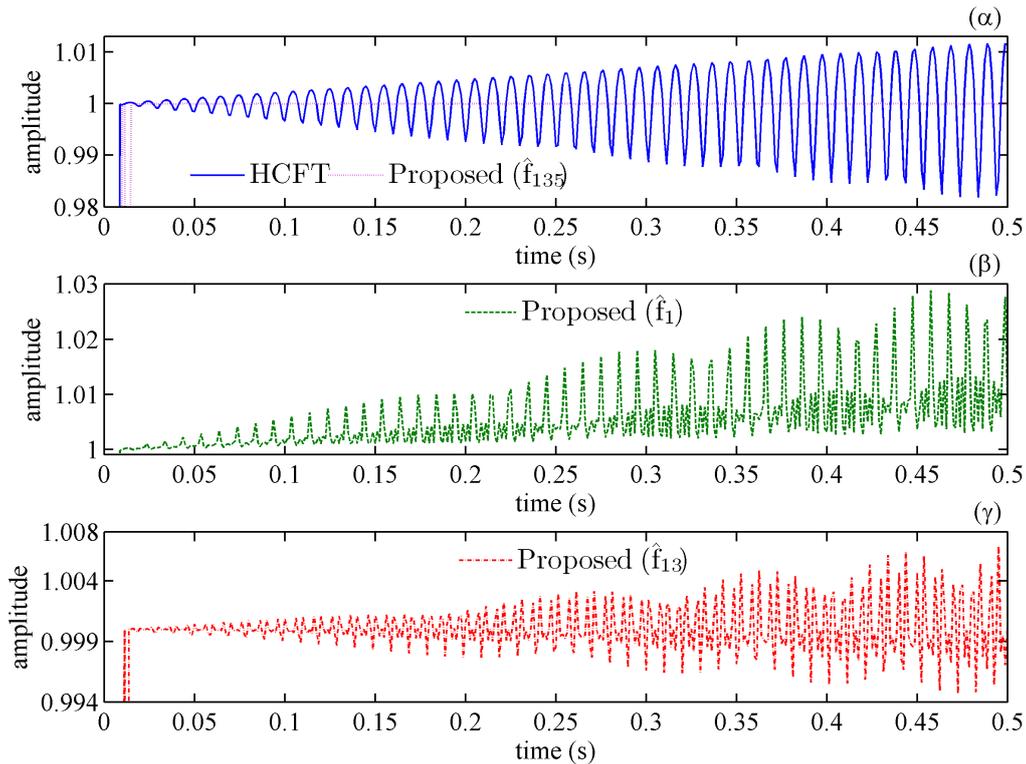
Για τη χρησιμοποίηση της μεθόδου σε πρακτικές εφαρμογές, πρέπει να εξετασθεί η συμπεριφορά της όταν τα σήματα εισόδου εμπεριέχουν θόρυβο. Στο Σχήμα 5.11, η συχνότητα του σήματος εισόδου είναι ίση με 49.5 Hz, και σε αυτό έχει προστεθεί επιπλέον μία 3<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα με πλάτος ίσο με 10% του πλάτους της θεμελιώδους, καθώς και λευκός θόρυβος κανονικής κατανομής (white Gaussian noise) με λόγο σήματος-θορύβου (signal-to-noise ratio – SNR) ίσο με 60 dB.



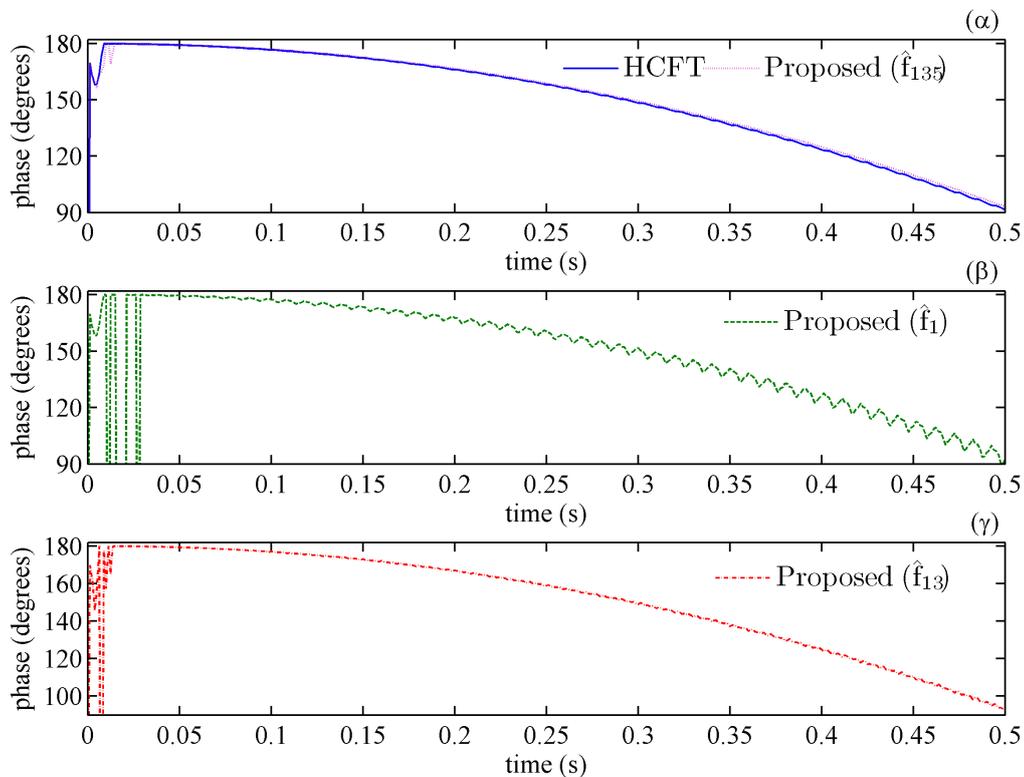
Σχήμα 5.7 (α)-(β) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη όπως υπολογίζεται από το φίλτρο συνημιτόνου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις  $\hat{f}_{13}$  και  $\hat{f}_1$  αντίστοιχα (Σήμα εισόδου:  $x(t) = \cos(2\pi 49.5t) + 0.1\cos(6\pi 49.5t)$ ,  $f(t) = 49.5$  Hz)



Σχήμα 5.8 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_{135}$ . (β) Εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_1$ . (γ) Εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_{13}$ . (Σήμα εισόδου:  $x(t) = \cos(2\pi(50t - t^2)) + 0.15\cos(6\pi(50t - t^2)) + 0.03\cos(10\pi(50t - t^2))$ ,  $f(t) = 50 - 2t$  Hz)



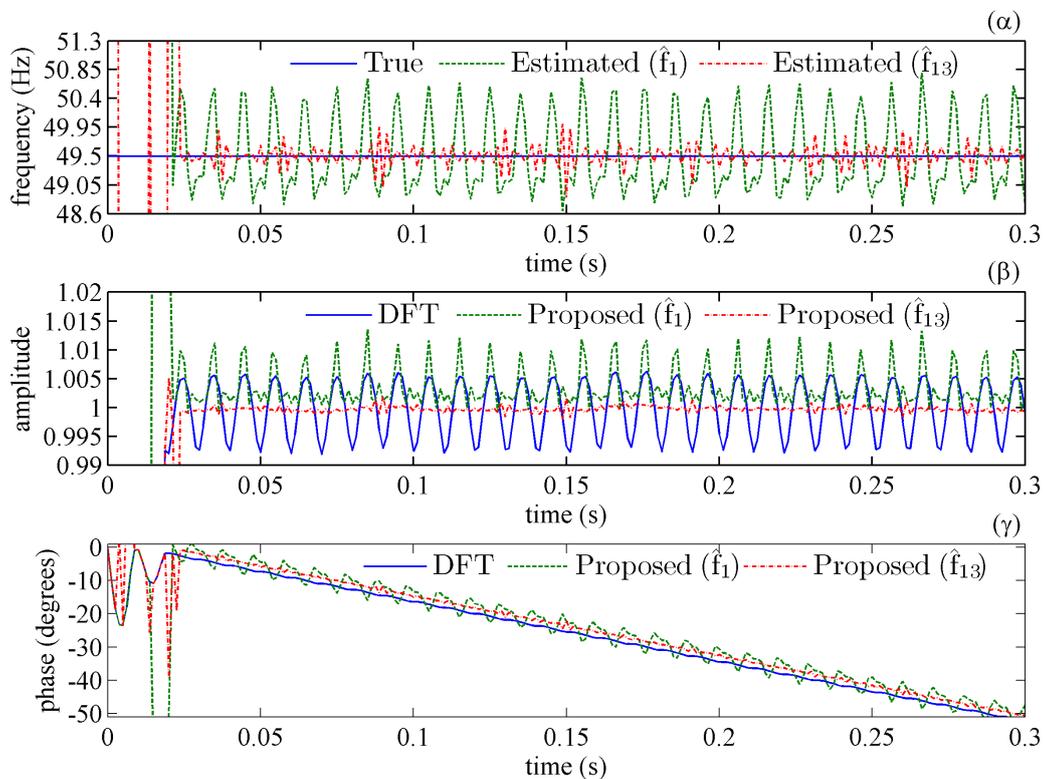
Σχήμα 5.9 (α)-(γ) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις  $\hat{f}_{135}$ ,  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$  αντίστοιχα (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi(50t-t^2))+0.15\cos(6\pi(50t-t^2))+0.03\cos(10\pi(50t-t^2))$ ,  $f(t)=50-2t$  Hz)



Σχήμα 5.10 (α)-(γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από τον DFT μισού κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις  $\hat{f}_{135}$ ,  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$  αντίστοιχα (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi(50t-t^2))+0.15\cos(6\pi(50t-t^2))+0.03\cos(10\pi(50t-t^2))$ ,  $f(t)=50-2t$  Hz)

Στο Σχήμα 5.11(α) μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι, σε αντίθεση με την εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}_1$ , η οποία δε λαμβάνει υπόψη την 3<sup>η</sup> αρμονική, η εκτίμηση  $\hat{f}_{13}$  επιτυγχάνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η μικρή κυμάτωση γύρω από την πραγματική τιμή της συχνότητας οφείλεται στην παρουσία του θορύβου στο σήμα εισόδου. Αν επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια, η επίδραση του θορύβου μπορεί να περιοριστεί περισσότερο, χρησιμοποιώντας κατάλληλα φίλτρα εξομάλυνσης (π.χ. φίλτρο κινούμενου μέσου). Πρέπει να επισημανθεί, όμως, ότι μια τέτοια ενέργεια θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συνολικού χρόνου απόκρισης της μεθόδου. Τέλος, από τα σχήματα 5.11(α) και (β) γίνεται εμφανές ότι τα σφάλματα στο μέτρο και τη γωνία των φασιθετών που υπολογίζονται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την προτεινόμενη μέθοδο, με χρήση αποκλειστικά της θεμελιώδους συνιστώσας, είναι κατά πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της εκτεταμένης μεθόδου με θεώρηση και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής.

Σε όλα τα παραδείγματα προσομοίωσης, όπως και σε άλλες πειραματικές δοκιμές που έχουν διενεργηθεί, βρέθηκε ότι η μέθοδος Newton απαιτεί το πολύ 4 επαναλήψεις για να συγκλίνει, αν επιλεγεί ένα κριτήριο σύγκλισης της τάξης του  $10^{-6}$ . Αυτό κρίνεται πολύ ενθαρρυντικό σε ότι αφορά την υλοποίηση της μεθόδου σε πραγματικό χρόνο, και αποτελεί μια απόδειξη ότι η αρχικοποίηση που χρησιμοποιείται σε κάθε διάστημα δειγματοληψίας είναι αρκετά πρακτική.



**Σχήμα 5.11 (α) Πραγματική και εκτιμώμενη συχνότητα  $\hat{f}$ . (β) Σύγκριση μεταξύ του μέτρου του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο, χρησιμοποιώντας τις  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$  αντίστοιχα. (γ) Σύγκριση μεταξύ της γωνίας του φασιθέτη, όπως υπολογίζεται από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier πλήρους κύκλου και την εκτεταμένη μέθοδο που χρησιμοποιεί τις  $\hat{f}_1$  και  $\hat{f}_{13}$  αντίστοιχα. (Σήμα εισόδου:  $x(t)=\cos(2\pi 49.5t)+0.1\cos(6\pi 49.5t)$ , με SNR=60 dB)**

## 5.5 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος μέτρησης των φασιθετών τάσης και έντασης σε ηλεκτρικά δίκτυα, στα οποία παρατηρούνται μεταβολές της συχνότητας. Η μέθοδος αυτή διορθώνει τα σφάλματα που υπεισέρχονται στον υπολογισμό των φασιθετών από τη χρήση ορθογωνίων FIR φίλτρων, μέσω μιας ακριβούς εκτίμησης της τοπικά στιγμιαίας συχνότητας, η οποία προκύπτει με μία αναδρομική διαδικασία καθόλα σύγχρονη με τη διαδικασία υπολογισμού των φασιθετών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων καταδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της μεθόδου, όπως: η ευκολία υλοποίησης, η ακρίβεια και η αποτελεσματική αντιμετώπιση των αρμονικών και του θορύβου. Παρότι δεν έχει γίνει υλοποίηση της μεθόδου σε πραγματικό χρόνο, έχουν γίνει συγκεκριμένες προτάσεις προς αυτή την κατεύθυνση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΔΥΟ ΑΝΤΙ-ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΑΚΡΑ ΤΟΥΣ

#### 6.1 Γενικά

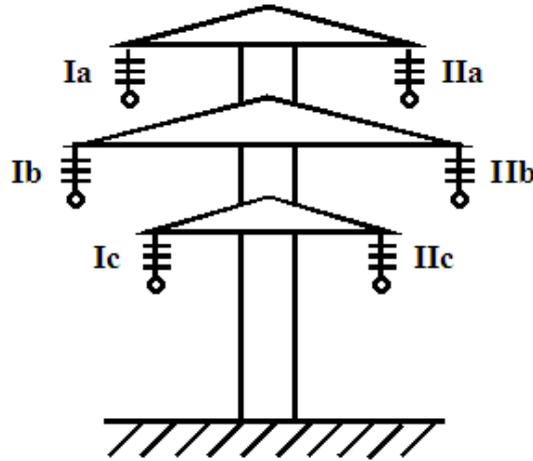
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, η οποία βασίζεται αποκλειστικά στις μετρήσεις των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων σε δύο αντι-παράλληλα τερματικά σημεία των γραμμών [138]. Χρησιμοποιώντας περιορισμένο αριθμό μετρήσεων, η προτεινόμενη μέθοδος καταφέρνει να μειώσει δραστικά τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν από κάθε σημείο μέτρησης. Επιπλέον, σε σχέση με τις μεθόδους [230], [231], οι οποίες επίσης χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης και από τα δύο άκρα της γραμμής, η προτεινόμενη μέθοδος είναι πιο ασφαλής, αφού δε χρησιμοποιεί τις εντάσεις των ρευμάτων σε κάθε τερματικό σημείο της διπλής γραμμής και, συνεπώς, δεν επηρεάζεται στο βαθμό που επηρεάζονται οι [230], [231] από τα σφάλματα των μετασχηματιστών έντασης (ME). Τέλος, ενώ η προτεινόμενη μέθοδος δεν απαιτεί το συγχρονισμό των μετρήσεων στα δύο σημεία μέτρησης, εντούτοις, μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα σχήμα εντοπισμού σφαλμάτων με χρήση μόνο συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Σε ένα τέτοιο σχήμα, η προτεινόμενη μέθοδος εξασφαλίζει την τοποθέτηση ελάχιστων μονάδων μέτρησης φασιθετών (PMUs) για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος, γεγονός που κρίνεται ως σημαντική συμβολή στην προσπάθεια επίτευξης παρατηρησιμότητας ως προς τη θέση του σφάλματος σε συστήματα μεταφοράς με χρήση του μικρότερου, κατά το δυνατόν, αριθμού PMUs [152].

Το υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού οργανώνεται ως εξής. Στην παράγραφο 6.2 παρουσιάζεται ένας μετασχηματισμός ρυθμών (modal transformation), ο οποίος χρησιμοποιείται για την αποσύζευξη του εξαφασικού κυκλώματος της διπλής γραμμής, σε κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα [147]. Αν υποθεθεί ότι στη γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος εφαρμόζεται πλήρης αντιμετάθεση φάσεων, τότε το ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα θετικής και αρνητικής ακολουθίας, βασισμένο στο μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους, μπορεί εύκολα να οριστεί. Λόγω της αμοιβαίας σύζευξης, δεν ισχύει το ίδιο και για το ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής. Κάνοντας χρήση του προτεινόμενου ιδιομετασχηματισμού, τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας αποζευγνύονται στα κυκλώματα κοινής και διαφορικής ιδιοσυνιστώσας αντίστοιχα [229], τα οποία μπορούν να αναλυθούν ανεξάρτητα. Στην παράγραφο 6.3, αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου, η οποία αποτελείται από τις ακόλουθες διαδικασίες: α) υπολογισμός των φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων, β) προσδιορισμός του σφάλματος συγχρονισμού, γ) ανίχνευση του τύπου σφάλματος, δ) επιλογή του εσφαλμένου κυκλώματος της διπλής γραμμής, ε) εντοπισμός της θέσης του σφάλματος. Χρησιμοποιώντας τους φασιθέτες θεμελιώδους συνιστώσας των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα σημεία μέτρησης, καθώς και τα ισοδύναμα  $\Pi$  ακολουθιακά κυκλώματα που προκύπτουν από την ανάλυση της παραγράφου 6.2, οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος μπορούν να εκφραστούν αποκλειστικά συναρτήσει της θέσης του σφάλματος. Κατόπιν, εφαρμόζοντας τις οριακές συνθήκες που ισχύουν για κάθε τύπο σφάλματος, μπορεί να υπολογιστεί η θέση του χρησιμοποιώντας μια αριθμητική μέθοδο. Στην παράγραφο 6.4, η προτεινόμενη μέθοδος επαληθεύεται πειραματικά με χρήση λεπτομερών προσομοιώσεων, που πραγματοποιούνται με το πρόγραμμα προσομοίωσης ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ATP/EMTP [44] και το υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB [159].

## 6.2 Καθορισμός των ισοδύναμων $\Pi$ ακολουθιακών κυκλωμάτων γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Ο σκοπός της παραγράφου αυτής είναι να καθοριστούν τα ισοδύναμα  $\Pi$  κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας μια γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος, θεωρώντας αναπαράστασή της με κατανεμημένες παραμέτρους. Αυτό εξασφαλίζει την επιθυμητή ακρίβεια των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από την προτεινόμενη μέθοδο εντοπισμού σφαλμάτων.

Οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος αποτελούνται από δύο παράλληλα μεταξύ τους κυκλώματα. Στο Σχήμα 6.1 εικονίζεται ένας τύπος πυλώνα και μια τυπική διάταξη των αγωγών φάσεων μιας γραμμής διπλού κυκλώματος. Λαμβάνοντας υπόψη τη σύζευξη μεταξύ των αγωγών, και θεωρώντας ότι τα δύο κυκλώματα της γραμμής είναι πανομοιότυπα (ίδιες ηλεκτρικές παράμετροι για κάθε κύκλωμα της γραμμής) και έχουν πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, οι τάσεις και εντάσεις κατά μήκος της γραμμής ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση [71]:



Σχήμα 6.1 Τύπος πυλώνα γραμμής μεταφοράς δύο κυκλωμάτων

$$\begin{cases} \frac{d[V_{phase}]}{dx} = [Z_{phase}][I_{phase}] \\ \frac{d[I_{phase}]}{dx} = [Y_{phase}][V_{phase}] \end{cases} \quad (6.1)$$

όπου  $[V_{phase}] = [V_{a\_I} \ V_{b\_I} \ V_{c\_I} \ V_{a\_II} \ V_{b\_II} \ V_{c\_II}]^T$  και  $[I_{phase}] = [I_{a\_I} \ I_{b\_I} \ I_{c\_I} \ I_{a\_II} \ I_{b\_II} \ I_{c\_II}]^T$  είναι οι φασικές τάσεις και εντάσεις των κυκλωμάτων I και II της γραμμής στο θεωρηθέν σημείο  $x$ , αντίστοιχα, και  $[Z_{phase}]$  και  $[Y_{phase}]$  είναι οι πίνακες φασικών εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων της γραμμής, οι οποίοι εκφράζονται ως ακολούθως:

$$[Z_{phase}] = \begin{pmatrix} Z_s & Z_m & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z_p & Z_p & Z_p \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_p & Z_p & Z_p & Z_m & Z_m & Z_s \end{pmatrix}, [Y_{phase}] = \begin{pmatrix} Y_s & Y_m & Y_m & Y_p & Y_p & Y_p \\ Y_m & Y_s & Y_m & Y_p & Y_p & Y_p \\ Y_m & Y_m & Y_s & Y_p & Y_p & Y_p \\ Y_p & Y_p & Y_p & Y_s & Y_m & Y_m \\ Y_p & Y_p & Y_p & Y_m & Y_s & Y_m \\ Y_p & Y_p & Y_p & Y_m & Y_m & Y_s \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

όπου  $Z_s$ ,  $Z_m$  και  $Y_s$ ,  $Y_m$  είναι η ίδια και αμοιβαία σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα κάθε κυκλώματος της γραμμής ξεχωριστά, αντίστοιχα, και  $Z_p$ ,  $Y_p$  είναι η σύνθετη αντίσταση και

αγωγιμότητα, οι οποίες εκφράζουν την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των τριών αγωγών του ενός κυκλώματος με καθέναν από τους τρεις αγωγούς του άλλου κυκλώματος.

Η εξίσωση (6.1) μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή συμμετρικών συνιστωσών ως εξής:

$$\begin{cases} \frac{d[V_{symm}]}{dx} = [S]^{-1} [Z_{phase}] [S] [I_{symm}] = [Z_{symm}] [I_{symm}] \\ \frac{d[I_{symm}]}{dx} = [S]^{-1} [Y_{phase}] [S] [V_{symm}] = [Y_{symm}] [V_{symm}] \end{cases} \quad (6.3)$$

όπου  $[V_{symm}] = [V_{1_I} \ V_{2_I} \ V_{0_I} \ V_{1_{II}} \ V_{2_{II}} \ V_{0_{II}}]^T$  και  $[I_{symm}] = [I_{1_I} \ I_{2_I} \ I_{0_I} \ I_{1_{II}} \ I_{2_{II}} \ I_{0_{II}}]^T$  είναι τα διανύσματα των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων της γραμμής, και  $S$  είναι ο πίνακας μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών, που ορίζεται ως:

$$[S] = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & a^2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a^2 & a & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a & a^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

όπου  $a = e^{j120}$ , και  $[Z_{symm}]$ ,  $[Y_{symm}]$  είναι οι πίνακες συμμετρικών συνιστωσών των εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων που ισούνται με:

$$[Z_{symm}] = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 & 0 & 0 & Z_{M0} \\ 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{M0} & 0 & 0 & Z_0 \end{pmatrix}, [Y_{symm}] = \begin{pmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_0 & 0 & 0 & Y_{M0} \\ 0 & 0 & 0 & Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_1 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{M0} & 0 & 0 & Y_0 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

όπου  $Z_1 = Z_s - Z_m$ ,  $Z_0 = Z_s + 2Z_m$ ,  $Z_{M0} = 3Z_p$  και  $Y_1 = Y_s - Y_m$ ,  $Y_0 = Y_s + 2Y_m$ ,  $Y_{M0} = 3Y_p$  είναι η θετική, μηδενική και αμοιβαία μηδενική σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα της γραμμής αντίστοιχα.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από την (6.5), ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών δε διαγωνιοποιεί τους πίνακες συμμετρικών συνιστωσών, λόγω της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των κυκλωμάτων μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής. Κάνοντας χρήση της θεωρίας ιδιοτιμών [243], οι πίνακες μετασχηματισμού  $[T_v]$  και  $[T_i]$ , οι οποίοι αποξενώνουν τις τάσεις και τις εντάσεις μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διαγωνιοποίηση των πινάκων της (6.5). Έτσι, η (6.3) γράφεται ως εξής:

$$\begin{cases} \frac{d[V_{mode}]}{dx} = [T_v]^{-1} [Z_{symm}] [T_i] [I_{mode}] = [Z_{mode}] [I_{mode}] \\ \frac{d[I_{mode}]}{dx} = [T_i]^{-1} [Y_{symm}] [T_v] [V_{mode}] = [Y_{mode}] [V_{mode}] \end{cases} \quad (6.6)$$

όπου  $[V_{mode}] = [T_v]^{-1} [V_{symm}] = \begin{bmatrix} V_{1\_I} & V_{2\_I} & V_{1\_II} & V_{2\_II} & \frac{1}{2}(V_{0\_II} - V_{0\_I}) & \frac{1}{2}(V_{0\_I} + V_{0\_II}) \end{bmatrix}^T$  και

$[I_{mode}] = [T_i]^{-1} [I_{symm}] = \begin{bmatrix} I_{1\_I} & I_{2\_I} & I_{1\_II} & I_{2\_II} & \frac{1}{2}(I_{0\_II} - I_{0\_I}) & \frac{1}{2}(I_{0\_I} + I_{0\_II}) \end{bmatrix}^T$  είναι τα

διανύσματα ιδιοκαταστάσεων (modes) των τάσεων και εντάσεων στο θεωρηθέν σημείο  $x$  της γραμμής, και:

$$[T_v] = [T_i] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}, [T_v]^{-1} = [T_i]^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 & 0 & 0 & 1/2 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} \quad (6.7)$$

Στην (6.6), οι  $[Z_{mode}]$  και  $[Y_{mode}]$  είναι οι πίνακες ιδιοκαταστάσεων των εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων και εγκάρσιων αγωγιμοτήτων της γραμμής, που ισούνται με:

$$[Z_{mode}] = \begin{pmatrix} Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{1L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_G \end{pmatrix}, [Y_{mode}] = \begin{pmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{1L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Y_G \end{pmatrix} \quad (6.8)$$

όπου  $Z_{1L} = Z_0 - Z_{M0}$ ,  $Z_G = Z_0 + Z_{M0}$  και  $Y_{1L} = Y_0 - Y_{M0}$ ,  $Y_G = Y_0 + Y_{M0}$  είναι η μεταξύ των κυκλωμάτων και η ως προς γη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα της γραμμής διπλού κυκλώματος, αντίστοιχα [45].

Στο χώρο των ιδιοσυνιστωσών ισχύει:

$$Z_{c1} = \sqrt{Z_1/Y_1}, \gamma_{c1} = \sqrt{Z_1 Y_1} \quad (6.9)$$

$$Z_{c0d} = \sqrt{Z_{1L}/Y_{1L}}, \gamma_{c0d} = \sqrt{Z_{1L} Y_{1L}} \quad (6.10)$$

$$Z_{c0c} = \sqrt{Z_G/Y_G}, \gamma_{c0c} = \sqrt{Z_G Y_G} \quad (6.11)$$

$$V_{0d} = \frac{1}{2}(V_{0\_II} - V_{0\_I}), I_{0d} = \frac{1}{2}(I_{0\_II} - I_{0\_I}) \quad (6.12)$$

$$V_{0c} = \frac{1}{2}(V_{0\_I} + V_{0\_II}), I_{0c} = \frac{1}{2}(I_{0\_I} + I_{0\_II}) \quad (6.13)$$

όπου  $Z_{c1}$  και  $\gamma_{c1}$  είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση και σταθερά μετάδοσης, θετικής και αρνητικής ακολουθίας, κάθε κυκλώματος της διπλής γραμμής,  $Z_{c0d}$ ,  $\gamma_{c0d}$  και  $Z_{c0c}$ ,  $\gamma_{c0c}$  είναι η χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση και σταθερά μετάδοσης του κυκλώματος διαφορικής και κοινής ακολουθίας, στα οποία αποξενώνονται τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής, αντίστοιχα, και  $V_{0d}$ ,  $I_{0d}$  and  $V_{0c}$ ,  $I_{0c}$  είναι η τάση και το ρεύμα διαφορικής και κοινής ακολουθίας, αντίστοιχα.

Έχοντας ως βάση την (6.6) και το Σχήμα 6.2, οι ιδιοσυνιστώσες των τάσεων και εντάσεων μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$V_{1\_i} = V_{s1\_i} \cosh(\gamma_{c1} x) - I_{s1\_i} Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} x) \quad (6.14)$$

$$I_{1\_i} = I_{s1\_i} \cosh(\gamma_{c1} x) - V_{s1\_i} \sinh(\gamma_{c1} x) / Z_{c1} \quad (6.15)$$

$$V_{2\_i} = V_{s2\_i} \cosh(\gamma_{c1}x) - I_{s2\_i} Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1}x) \quad (6.16)$$

$$I_{2\_i} = I_{s2\_i} \cosh(\gamma_{c1}x) - V_{s2\_i} \sinh(\gamma_{c1}x)/Z_{c1} \quad (6.17)$$

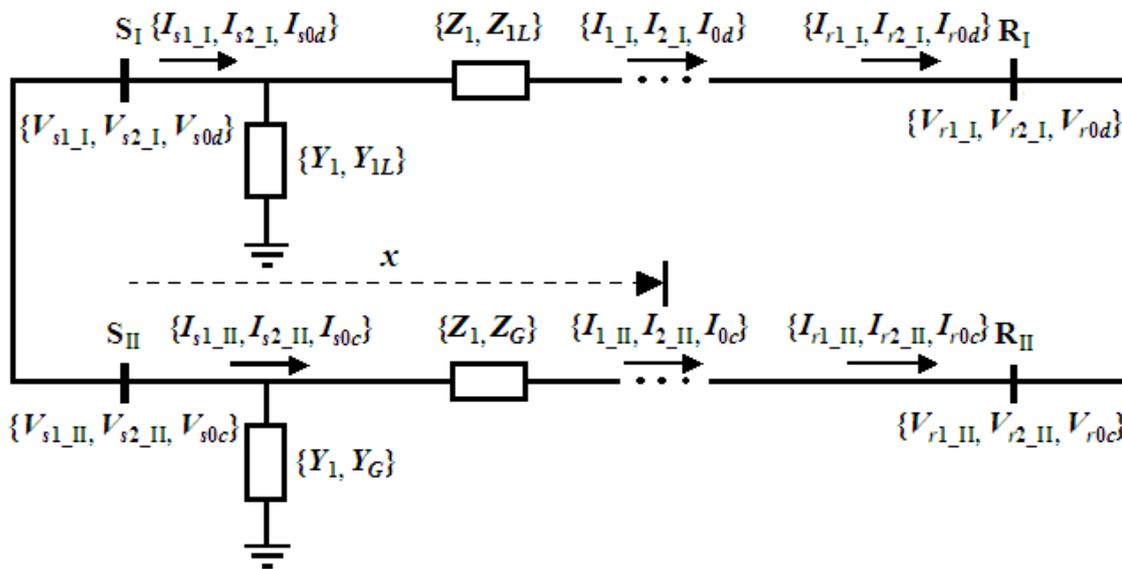
$$V_{0d} = V_{s0d} \cosh(\gamma_{c0d}x) - I_{s0d} Z_{c0d} \sinh(\gamma_{c0d}x) \quad (6.18)$$

$$I_{0d} = I_{s0d} \cosh(\gamma_{c0d}x) - V_{s0d} \sinh(\gamma_{c0d}x)/Z_{c0d} \quad (6.19)$$

$$V_{0c} = V_{s0c} \cosh(\gamma_{c0c}x) - I_{s0c} Z_{c0c} \sinh(\gamma_{c0c}x) \quad (6.20)$$

$$I_{0c} = I_{s0c} \cosh(\gamma_{c0c}x) - V_{s0c} \sinh(\gamma_{c0c}x)/Z_{c0c} \quad (6.21)$$

όπου  $V_{s1\_i}$ ,  $V_{s2\_i}$ ,  $V_{s0d}$ ,  $V_{s0c}$  και  $I_{s1\_i}$ ,  $I_{s2\_i}$ ,  $I_{s0d}$ ,  $I_{s0c}$  είναι οι ιδιοσυνιστώσες των τάσεων και εντάσεων στο άκρο S της διπλής γραμμής, και  $i=I,II$  για το κύκλωμα I και II της γραμμής, αντίστοιχα. Συνδυάζοντας τις (6.14)-(6.21), καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός του ισοδύναμου Π κυκλώματος για κάθε ακολουθιακή συνιστώσα της γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος, που αποτελεί και τη βάση για την ανάλυση της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων. Η ανάλυση αυτή δίνεται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 6.2 Ακολουθιακά κυκλώματα ιδιοσυνιστωσών γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος

### 6.3 Ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος

Στο Σχήμα 6.3 απεικονίζεται η προτεινόμενη διάταξη μετρήσεων για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος. Θεωρείται ότι ο εντοπιστής σφαλμάτων (Fault Locator – FL) βρίσκεται εγκατεστημένος στο άκρο της γραμμής  $S_I$  και τροφοδοτείται απευθείας από τα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών τάσης και έντασης,  $VTs\_S_I$  και  $CTs\_S_I$ , αντίστοιχα. Συγχρόνως, τα δευτερεύοντα σήματα από τους μετασχηματιστές μέτρησης,  $VTs\_R_{II}$  και  $CTs\_R_{II}$ , στο αντι-παράλληλο τερματικό σημείο  $R_{II}$  της γραμμής, καταγράφονται από έναν ψηφιακό καταγραφέα σφαλμάτων (Digital Fault Recorder - DFR) και αποστέλλονται μέσω καναλιών επικοινωνίας στον εντοπιστή σφαλμάτων. Οι μετασχηματιστές έντασης βρίσκονται συνδεδεμένοι στην πλευρά του διακόπτη ισχύος που «βλέπει» προς τη γραμμή (όχι προς το ζυγό), γεγονός που επιτρέπει στην προτεινόμενη μέθοδο να λειτουργεί ικανοποιητικά και για σφάλματα γης, με το ένα κύκλωμα της γραμμής σε λειτουργία και το άλλο εκτός λειτουργίας με τα δύο άκρα του γειωμένα.

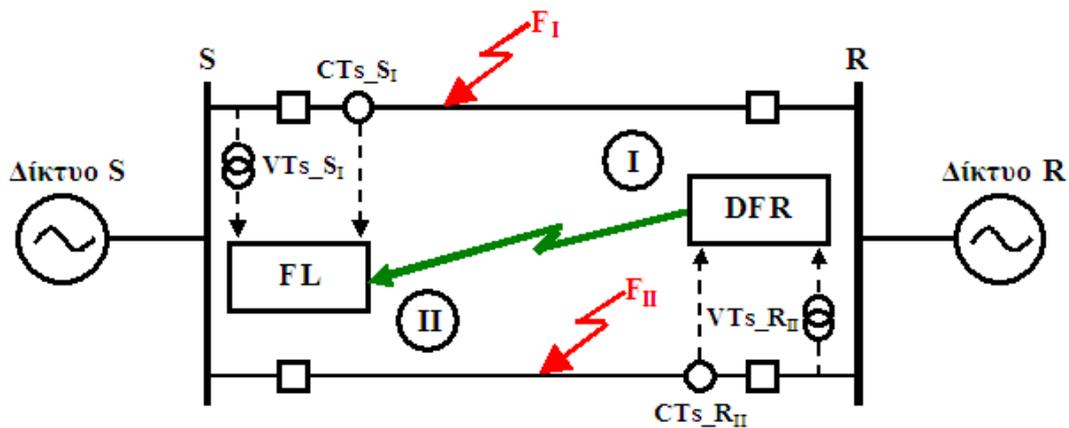
Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν πραγματοποιείται συγχρονισμός μεταξύ των μετρήσεων στα δύο αντι-παράλληλα άκρα της γραμμής, και συνεπώς, μπορεί να γίνει μια πιο γενική θεώρηση μη συγχρονισμένων μετρήσεων, όπως στην [51]. Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι οι παράλληλες γραμμές που συνθέτουν το διπλό κύκλωμα έχουν πλήρη αντιμετάθεση φάσεων και ίδιες ηλεκτρικές

παραμέτρους, γεγονός που επιτρέπει τη χρησιμοποίηση της θεωρίας που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Η προτεινόμενη μέθοδος εκτίμησης της θέσης του σφάλματος εκτελεί τις ακόλουθες διαδικασίες:

- Εκτίμηση των φασιθετών των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων, ανίχνευση του τύπου σφάλματος, κατάτμηση των καταγραφών σφάλματος σε περιοχές πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος, χρονική στοίχιση των καταγραφών σφάλματος από κάθε άκρο μέτρησης της γραμμής.
- Προσδιορισμός του σφάλματος συγχρονισμού με χρήση δεδομένων μέτρησης πριν την εκδήλωση του σφάλματος.
- Επιλογή του εσφαλμένου κυκλώματος της γραμμής με χρήση δεδομένων μέτρησης μετά την εκδήλωση του σφάλματος.
- Εκτίμηση της θέσης του σφάλματος.

Οι παραπάνω διαδικασίες καθώς και θέματα που αφορούν την υλοποίησή τους αναπτύσσονται λεπτομερώς στις ακόλουθες παραγράφους.



Σχήμα 6.3 Προτεινόμενη διάταξη μετρήσεων για τον εντοπισμό της θέσης σφάλματος σε γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος

### 6.3.1 Εκτίμηση φασιθετών μετρούμενων σημάτων, ανίχνευση του τύπου σφάλματος, κατάτμηση των καταγραφών σφάλματος σε περιοχές πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος, χρονική ευθυγράμμιση των καταγραφών σφάλματος

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί αποκλειστικά τους φασιθέτες των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων. Συνεπώς, σε πρώτη φάση, οι κυματορφές των φασικών τάσεων και εντάσεων, που λαμβάνονται από τους καταγραφείς σφαλμάτων (DFRs) στα δύο άκρα μέτρησης της γραμμής, πρέπει να μετατραπούν σε φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας. Αυτό επιτυγχάνεται σε τρία στάδια. Αρχικά, οι φασικές τάσεις και εντάσεις φιλτράρονται μέσω ενός βαθυπερατού αναδιπλασιαστικού φίλτρου, για να απομακρυνθούν ο θόρυβος και οι υψηλές αρμονικές που προκαλούνται από το σφάλμα στη γραμμή μεταφοράς. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι φασιθέτες των φασικών τάσεων και εντάσεων με χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT) πλήρους κύκλου. Τέλος, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός των συμμετρικών συνιστωσών, ώστε να ληφθούν οι φασιθέτες των τάσεων και εντάσεων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, αντίστοιχα.

Μετά τον υπολογισμό των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα δύο σημεία μέτρησης, ανιχνεύεται ο τύπος και ο χρόνος εκδήλωσης του σφάλματος. Στις γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος μπορούν να εκδηλωθούν διάφοροι τύποι σφαλμάτων. Για το λόγο αυτό, κρίνεται πολύ σημαντική η σωστή επιλογή του τύπου σφάλματος, αφού κάθε τύπος αντιστοιχεί σε διαφορετικές οριακές συνθήκες στο σημείο του σφάλματος. Σε ότι αφορά, κυρίως, τα σφάλματα στα οποία εμπλέκονται φάσεις και από τα δύο κυκλώματα της γραμμής, η σωστή ανίχνευση των

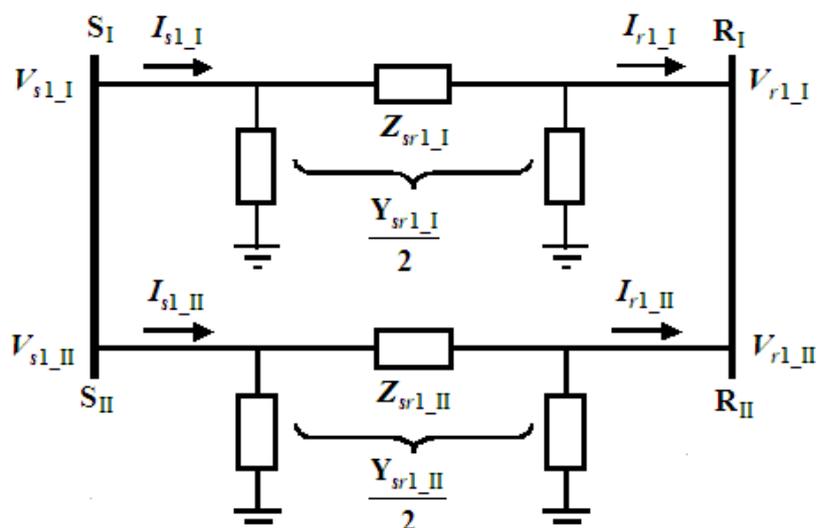
εμπλεκόμενων φάσεων είναι απολύτως αναγκαία. Με βάση τα παραπάνω, έχει υλοποιηθεί ένας πολύ ασφαλής αλγόριθμος επιλογής του τύπου σφάλματος [120]. Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να αντιμετωπίσει πολύ αποτελεσματικά τις δύσκολες περιπτώσεις που συναντώνται στις γραμμές διπλού κυκλώματος, δηλαδή τα ασθενή ισοδύναμα δίκτυα στα άκρα των γραμμών και τα ενδοκυκλωματικά σφάλματα. Επιπλέον, μέσω της διαδικασίας επιλογής του τύπου σφάλματος, μπορεί να προσδιοριστεί ο χρόνος έναρξής του. Χρησιμοποιώντας αυτή την πληροφορία, μπορούν να διαχωριστούν τα σήματα των καταγραφών σε περιοχές πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Ο διαχωρισμός αυτός είναι εξαιρετικής σημασίας, αφού η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιεί δεδομένα μέτρησης τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Τέλος, τα δεδομένα των καταγραφών από τα δύο άκρα μέτρησης πρέπει να στοιχηθούν χρονικά. Οι καταγραφές σφαλμάτων προέρχονται από DFRs που δεν είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους. Για τη χρονική ευθυγράμμιση των καταγραφών, πρέπει να ανιχνευθούν οι χρόνοι εκδήλωσης του σφάλματος σε καθεμιά από αυτές, και στη συνέχεια να επιλεγεί η καταγραφή με το μικρότερο χρόνο ως αναφορά. Κατόπιν, τα σήματα της άλλης καταγραφής στοιχίζονται με τα αντίστοιχα σήματα της καταγραφής αναφοράς, εξισώνοντας το χρόνο εκδήλωσης του σφάλματος με αυτόν της καταγραφής αναφοράς.

### 6.3.2 Προσδιορισμός του σφάλματος συγχρονισμού

Ο αλγόριθμος ανίχνευσης του τύπου σφάλματος χρησιμοποιείται για τη χρονική ευθυγράμμιση των σημάτων των καταγραφών σφάλματος στα δύο αντι-παράλληλα τερματικά σημεία της γραμμής μεταφοράς. Παρόλα αυτά, υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω βελτίωση του συγχρονισμού μεταξύ των φασιθετών στα δύο σημεία μέτρησης, γιατί μπορεί να παρουσιαστεί σφάλμα της τάξεως ενός διαστήματος δειγματοληψίας μετά το στάδιο της χρονικής στοίχισης των δεδομένων. Για παράδειγμα, αν υποθεθεί ότι υπάρχει χρονική διαφορά ενός διαστήματος δειγματοληψίας και χρησιμοποιηθεί ρυθμός δειγματοληψίας ίσος με 1 kHz, τότε θα παρατηρηθεί μετατόπιση φασικής γωνίας ίση με  $18^\circ$  μεταξύ των φασιθετών των σημάτων στις δύο καταγραφές. Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων είναι ευαίσθητη σε μια τέτοια φασική διαφορά και απαιτείται επιπλέον προσπάθεια για να επιτευχθεί καλύτερος συγχρονισμός.

Για να λυθεί το πρόβλημα αυτό, θεωρείται συμμετρική κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου λίγο πριν την εκδήλωση του σφάλματος, και αξιοποιώντας το ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα θετικής ακολουθίας της διπλής γραμμής, που φαίνεται στο Σχήμα 6.4, υπολογίζεται η διαφορά φασικής γωνίας μεταξύ των δύο φασιθετών τάσης και έντασης, αντίστοιχα, στο τοπικό ( $S_I$ ) και στο απομακρυσμένο ( $R_{II}$ ) της γραμμής.



Σχήμα 6.4 Ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Στο Σχήμα 6.4 χρησιμοποιείται η ακόλουθη ονοματολογία:

$V_{s1\_I}, I_{s1\_I}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας πριν το σφάλμα, στο άκρο μέτρησης  $S_I$  της γραμμής,

$V_{r1\_I}, I_{r1\_I}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας πριν το σφάλμα, στο άκρο  $R_I$  της γραμμής,

$V_{s1\_II}, I_{s1\_II}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας πριν το σφάλμα, στο άκρο  $S_{II}$  της γραμμής,

$V_{r1\_II}, I_{r1\_II}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας πριν το σφάλμα, στο άκρο μέτρησης  $R_{II}$  της γραμμής,

$Z_{sr1\_I}, Z_{sr1\_II}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των κυκλωμάτων I και II της γραμμής,

$Y_{sr1\_I}, Y_{sr1\_II}$ : ισοδύναμη εγκάρσια αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας των κυκλωμάτων I και II της γραμμής.

Οι ισοδύναμες παράμετροι του κυκλώματος θετικής ακολουθίας της διπλής γραμμής, εκφράζονται με βάση το μοντέλο καταναμημένων παραμέτρων, λαμβάνοντας υπόψη τις (6.14)-(6.15):

$$Z_{sr\_I} = Z_{sr\_II} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} l) \quad (6.22)$$

$$Y_{sr\_I} = Y_{sr\_II} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} l/2) \quad (6.23)$$

Με βάση το Σχήμα 6.4, και θεωρώντας ως αναφορά τις μετρήσεις στο άκρο  $S_I$  της γραμμής, ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{r1\_I} = V_{s1\_I} (1 + (Y_{sr1\_I} / 2) Z_{sr1\_I}) - I_{s1\_I} Z_{sr1\_I} \quad (6.24)$$

$$V_{s1\_II} = V_{r1\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{sr1\_II} / 2) Z_{sr1\_II}) - I_{r1\_II} e^{j\delta_i} Z_{sr1\_II} \quad (6.25)$$

όπου  $\delta_v, \delta_i$  είναι οι γωνίες συγχρονισμού μεταξύ των δύο τάσεων και εντάσεων, αντίστοιχα, στα άκρα  $S_I$  και  $R_{II}$  της γραμμής, οι οποίες αντιπροσωπεύουν οποιοδήποτε πιθανό σφάλμα συγχρονισμού.

Τα δύο κυκλώματα της γραμμής στο Σχήμα 6.4 έχουν την ίδια τάση σε καθένα από τα άκρα της, S και R. Συνεπώς:

$$V_{r1\_I} = V_{r1\_II} e^{j\delta_v}, \quad V_{s1\_II} = V_{s1\_I} \quad (6.26)$$

Συνδυάζοντας τις (6.24)-(6.26), υπολογίζονται οι γωνίες συγχρονισμού  $\delta_v$  και  $\delta_i$ :

$$\delta_v = \arg((V_{s1\_I} (1 + (Y_{sr1\_I} / 2) Z_{sr1\_I}) - I_{s1\_I} Z_{sr1\_I}) / V_{r1\_II}) \quad (6.27)$$

$$\delta_i = \arg((V_{r1\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{sr1\_II} / 2) Z_{sr1\_II}) - V_{s1\_I}) / (I_{r1\_II} Z_{sr1\_II})) \quad (6.28)$$

### 6.3.3 Επιλογή του εσφαλμένου κυκλώματος της γραμμής

Η επιλογή του εσφαλμένου κυκλώματος της διπλής γραμμής μπορεί να γίνει αντικαθιστώντας στις (6.24) και (6.25) τις τάσεις και τις εντάσεις στα σημεία μέτρησης πριν από το σφάλμα, με αυτές που υφίστανται κατά το σφάλμα, ως ακολούθως:

$$V_{rf1\_I,c} = V_{sf1\_I} (1 + (Y_{sr1\_I} / 2) Z_{sr1\_I}) - I_{sf1\_I} Z_{sr1\_I} \quad (6.29)$$

$$V_{sf1\_II,c} = V_{rf1\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{sr1\_II} / 2) Z_{sr1\_II}) - I_{rf1\_II} e^{j\delta_i} Z_{sr1\_II} \quad (6.30)$$

όπου:

$V_{sf1\_I}, I_{sf1\_I}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας κατά το σφάλμα, στο άκρο μέτρησης  $S_I$  της γραμμής,

$V_{rf1\_II}$ ,  $I_{rf1\_II}$ : τάση και ένταση θετικής ακολουθίας κατά το σφάλμα, στο άκρο μέτρησης  $R_{II}$  της γραμμής,

$V_{sf1\_II,c}$ ,  $V_{rf1\_I,c}$ : υπολογιζόμενες τάσεις θετικής ακολουθίας στα άκρα  $S_{II}$  and  $R_I$  της γραμμής αντίστοιχα.

Για τις τάσεις στα άκρα S και R κατά το σφάλμα, ισχύει:

$$V_{rf1\_I,m} = V_{rf1\_II} e^{j\delta_v}, \quad V_{sf1\_II,m} = V_{sf1\_I} \quad (6.31)$$

όπου  $V_{sf1\_II,m}$ ,  $V_{rf1\_I,m}$  είναι οι τάσεις θετικής ακολουθίας στα μη μετρούμενα άκρα,  $S_{II}$  και  $R_I$  της γραμμής αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας τις (6.29)-(6.31), ορίζονται τα ακόλουθα διαφορικά:

$$\Delta V_{rf1\_I} = |V_{rf1\_I,m} - V_{rf1\_I,c}| \quad (6.32)$$

$$\Delta V_{sf1\_II} = |V_{sf1\_II,m} - V_{sf1\_II,c}| \quad (6.33)$$

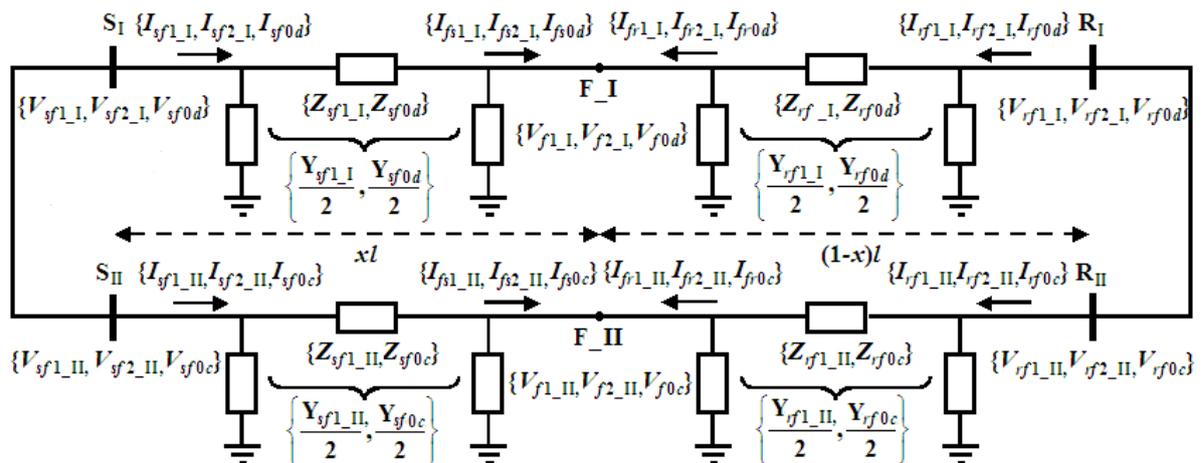
Αν θεωρηθεί ότι το σφάλμα βρίσκεται στο κύκλωμα I της γραμμής, προκύπτει:

$$\Delta V_{rf1\_I} \gg 0 \text{ και } \Delta V_{sf1\_II} \approx 0 \quad (6.34)$$

Συνεπώς, το κριτήριο του ελάχιστου διαφορικού,  $\min(\Delta V_{rf1\_I}, \Delta V_{sf1\_II})$ , καθορίζει το «υγιές» κύκλωμα της διπλής γραμμής. Είναι επιπλέον ξεκάθαρο ότι, όταν ισχύει  $\Delta V_{rf1\_I} \gg 0$  και  $\Delta V_{sf1\_II} \gg 0$ , έχει εκδηλωθεί σφάλμα που εμπλέκει και τα δύο κυκλώματα της γραμμής.

### 6.3.4 Εκτίμηση της θέσης του σφάλματος

Με βάση την ανάλυση της παραγράφου 6.2 και του σχήματος 6.5, η θέση του σφάλματος μπορεί να προσδιοριστεί σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος εκφράζονται συναρτήσει των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα δύο σημεία μέτρησης και της θέσης του σφάλματος. Στη συνέχεια, η θέση του σφάλματος υπολογίζεται μέσω μιας αριθμητικής μεθόδου, από τις οριακές συνθήκες που επικρατούν στο σημείο του σφάλματος, και οι οποίες καθορίζονται αποκλειστικά από τον τύπο του.



Σχήμα 6.5 Ισοδύναμο II δίκτυο των αποξευγμένων ακολουθιακών κυκλωμάτων

Στο Σχήμα 6.5, έχουν υιοθετηθεί για ευκολία οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

$V_{sf1\_I}$ ,  $I_{sf1\_I}$ ,  $V_{sf2\_I}$ ,  $I_{sf2\_I}$ : τάση και ένταση θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, κατά το σφάλμα στο άκρο μέτρησης  $S_I$ ,

$V_{rf1\_II}, I_{rf1\_II}, V_{rf2\_II}, I_{rf2\_II}$ : τάση και ένταση θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, κατά το σφάλμα στο άκρο μέτρησης R<sub>II</sub>,

$V_{sf1\_II}, I_{sf1\_II}, V_{sf2\_II}, I_{sf2\_II}$ : τάση και ένταση θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, κατά το σφάλμα στο άκρο S<sub>II</sub>,

$V_{rf1\_I}, I_{rf1\_I}, V_{rf2\_I}, I_{rf2\_I}$ : τάση και ένταση θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, κατά το σφάλμα στο άκρο R<sub>I</sub>,

$V_{sf0c}, I_{sf0c}, V_{rf0c}, I_{rf0c}$ : τάση και ένταση κοινής (μηδενικής) ακολουθίας κατά το σφάλμα στα άκρα S και R της γραμμής αντίστοιχα,

$V_{sf0d}, I_{sf0d}, V_{rf0d}, I_{rf0d}$ : τάση και ένταση διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας κατά το σφάλμα στα άκρα S και R της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sf1\_I}, Z_{sf1\_II}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του τμήματος SF της γραμμής για τα κυκλώματα I και II,

$Z_{rf1\_I}, Z_{rf1\_II}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του τμήματος RF της γραμμής για τα κυκλώματα I και II,

$Z_{sf0c}, Z_{sf0d}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση κοινής και διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας του τμήματος SF της γραμμής,

$Z_{rf0c}, Z_{rf0d}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση κοινής και διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας του τμήματος RF της γραμμής,

$Y_{sf1\_I}, Y_{sf1\_II}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας του τμήματος SF της γραμμής για τα κυκλώματα I και II,

$Y_{rf1\_I}, Y_{rf1\_II}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας του τμήματος RF της γραμμής για τα κυκλώματα I και II,

$Y_{sf0c}, Y_{sf0d}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα κοινής και διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας του τμήματος SF της γραμμής,

$Y_{rf0c}, Y_{rf0d}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα κοινής και διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας του τμήματος RF της γραμμής.

Οι ισοδύναμες παράμετροι της γραμμής διπλού κυκλώματος εκφράζονται με βάση το μοντέλο γραμμής με κατανομημένους παραμέτρους, λαμβάνοντας υπόψη τις (6.14)-(6.21), ως εξής:

$$Z_{sf1\_I} = Z_{sf1\_II} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1}xl) \quad (6.35)$$

$$Y_{sf1\_I} = Y_{sf1\_II} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1}xl/2) \quad (6.36)$$

$$Z_{rf1\_I} = Z_{rf1\_II} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1}(1-x)l) \quad (6.37)$$

$$Y_{rf1\_I} = Y_{rf1\_II} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1}(1-x)l/2) \quad (6.38)$$

$$Z_{sf0c} = Z_{c0c} \sinh(\gamma_{c0c}xl) \quad (6.39)$$

$$Y_{sf0c} = (2/Z_{c0c}) \tanh(\gamma_{c0c}xl/2) \quad (6.40)$$

$$Z_{rf0c} = Z_{c0c} \sinh(\gamma_{c0c}(1-x)l) \quad (6.41)$$

$$Y_{rf0c} = (2/Z_{c0c}) \tanh(\gamma_{c0c}(1-x)l/2) \quad (6.42)$$

$$Z_{sf0d} = Z_{c0d} \sinh(\gamma_{c0d}xl) \quad (6.43)$$

$$Y_{sf0d} = (2/Z_{c0d}) \tanh(\gamma_{c0d}xl/2) \quad (6.44)$$

$$Z_{rf0d} = Z_{c0d} \sinh(\gamma_{c0d}(1-x)l) \quad (6.45)$$

$$Y_{rf0d} = (2/Z_{c0d}) \tanh(\gamma_{c0d}(1-x)l/2) \quad (6.46)$$

όπου  $x$  είναι η α.μ. απόσταση του σφάλματος από το άκρο αναφοράς S.

### 6.3.4.1 Ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος

Οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των γνωστών ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα δύο άκρα μέτρησης, S<sub>I</sub> and R<sub>II</sub>, και της άγνωστης θέσης του σφάλματος. Οι τάσεις και οι εντάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στα άκρα S<sub>II</sub> and R<sub>I</sub> είναι άγνωστες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν συναρτήσει των γνωστών τάσεων και εντάσεων και της θέσης του σφάλματος, εφαρμόζοντας τις εξισώσεις δικτύου που ισχύουν για κάθε περίπτωση σφάλματος ως προς γη, στη γραμμή διπλού κυκλώματος.

Με βάση το Σχήμα 6.5, μπορούν να γραφούν τις ακόλουθες εξισώσεις:

- **Κύκλωμα θετικής ακολουθίας:** Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα I της διπλής γραμμής

$$V_{rf1\_I} = V_{rf1\_II} e^{j\delta_v} \quad (6.47)$$

$$V_{f1\_I} = V_{sf1\_I} (1 + (Y_{sf1\_I} / 2) Z_{sf1\_I}) - I_{sf1\_I} Z_{sf1\_I} \quad (6.48)$$

$$I_{fs1\_I} = (V_{sf1\_I} - V_{f1\_I}) / Z_{sf1\_I} - V_{f1\_I} (Y_{sf1\_I} / 2) \quad (6.49)$$

$$I_{fr1\_I} = (V_{rf1\_I} - V_{f1\_I}) / Z_{rf1\_I} - V_{f1\_I} (Y_{rf1\_I} / 2) \quad (6.50)$$

$$I_{f1\_I} = I_{fs1\_I} + I_{fr1\_I} \quad (6.51)$$

- **Κύκλωμα θετικής ακολουθίας:** Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα II της διπλής γραμμής

$$V_{sf1\_II} = V_{sf1\_I} \quad (6.52)$$

$$V_{f1\_II} = V_{rf1\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf1\_II} / 2) Z_{rf1\_II}) - I_{rf1\_II} e^{j\delta_i} Z_{rf1\_II} \quad (6.53)$$

$$I_{fs1\_II} = (V_{sf1\_II} - V_{f1\_II}) / Z_{sf1\_II} - V_{f1\_II} (Y_{sf1\_II} / 2) \quad (6.54)$$

$$I_{fr1\_II} = (V_{rf1\_II} e^{j\delta_v} - V_{f1\_II}) / Z_{rf1\_II} - V_{f1\_II} (Y_{rf1\_II} / 2) \quad (6.55)$$

$$I_{f1\_II} = I_{fs1\_II} + I_{fr1\_II} \quad (6.56)$$

- **Κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας:** Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα I της διπλής γραμμής

$$V_{rf2\_I} = V_{rf2\_II} e^{j\delta_v} \quad (6.57)$$

$$V_{f2\_I} = V_{sf2\_I} (1 + (Y_{sf2\_I} / 2) Z_{sf2\_I}) - I_{sf2\_I} Z_{sf2\_I} \quad (6.58)$$

$$I_{fs2\_I} = (V_{sf2\_I} - V_{f2\_I}) / Z_{sf2\_I} - V_{f2\_I} (Y_{sf2\_I} / 2) \quad (6.59)$$

$$I_{fr2\_I} = (V_{rf2\_I} - V_{f2\_I}) / Z_{rf2\_I} - V_{f2\_I} (Y_{rf2\_I} / 2) \quad (6.60)$$

$$I_{f2\_I} = I_{fs2\_I} + I_{fr2\_I} \quad (6.61)$$

- **Κύκλωμα αρνητικής ακολουθίας:** Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα II της διπλής γραμμής

$$V_{sf2\_II} = V_{sf2\_I} \quad (6.62)$$

$$V_{f2\_II} = V_{rf2\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf2\_II} / 2) Z_{rf2\_II}) - I_{rf2\_II} e^{j\delta_i} Z_{rf2\_II} \quad (6.63)$$

$$I_{fs2\_II} = (V_{sf2\_II} - V_{f2\_II}) / Z_{sf2\_II} - V_{f2\_II} (Y_{sf2\_II} / 2) \quad (6.64)$$

$$I_{fr2\_II} = (V_{rf2\_II} e^{j\delta_v} - V_{f2\_II}) / Z_{rf2\_II} - V_{f2\_II} (Y_{rf2\_II} / 2) \quad (6.65)$$

$$I_{f2\_II} = I_{fs2\_II} + I_{fr2\_II} \quad (6.66)$$

- **Κύκλωμα διαφορικής ακολουθίας**

$$V_{f0d} = V_{sf0d} (1 + (Y_{sf0d} / 2) Z_{sf0d}) - I_{sf0d} Z_{sf0d} = V_{rf0d} (1 + (Y_{rf0d} / 2) Z_{rf0d}) - I_{rf0d} Z_{rf0d} \quad (6.67)$$

$$I_{fs0d} = I_{sf0d} (1 + (Y_{sf0d} / 2) Z_{sf0d}) - V_{sf0d} (Y_{sf0d} + Z_{sf0d} (Y_{sf0d} / 2)^2) \quad (6.68)$$

$$I_{fr0d} = I_{rf0d} (1 + (Y_{rf0d} / 2) Z_{rf0d}) - V_{rf0d} (Y_{rf0d} + Z_{rf0d} (Y_{rf0d} / 2)^2) \quad (6.69)$$

• **Κύκλωμα κοινής ακολουθίας**

$$V_{f0c} = V_{sf0c}(1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c}) - I_{sf0c}Z_{sf0c} = V_{rf0c}(1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c}) - I_{rf0c}Z_{rf0c} \quad (6.70)$$

$$I_{fs0c} = I_{sf0c}(1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c}) - V_{sf0c}(Y_{sf0c} + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)^2) \quad (6.71)$$

$$I_{fr0c} = I_{rf0c}(1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c}) - V_{rf0c}(Y_{rf0c} + Z_{rf0c}(Y_{rf0c}/2)^2) \quad (6.72)$$

Συνδυάζοντας τις (6.67)-(6.72) και (6.12)-(6.13), οι τάσεις και οι εντάσεις μηδενικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος F έχουν ως εξής:

• **Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας: Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα I της διπλής γραμμής**

$$V_{rf0\_I} = V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} \quad (6.73)$$

$$V_{f0\_I} = V_{fs0\_I} = \frac{1}{2} V_{sf0\_I} [2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} + Z_{sf0d}) + \frac{1}{2} V_{sf0\_II} [(Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} I_{sf0\_II} (Z_{sf0c} - Z_{sf0d}) \quad (6.74)$$

$$I_{fs0\_I} = \frac{1}{2} I_{sf0\_I} [2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} V_{sf0\_I} [(Y_{sf0c} + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)^2) + (Y_{sf0d} + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2)^2)] + \frac{1}{2} I_{sf0\_II} [(Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} V_{sf0\_II} [(Y_{sf0c} + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)^2) - (Y_{sf0d} + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2)^2)] \quad (6.75)$$

$$V_{f0\_I} = V_{fr0\_I} = \frac{1}{2} V_{rf0\_I} [2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2} I_{rf0\_I} (Z_{rf0c} + Z_{rf0d}) + \frac{1}{2} V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} [(Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2} I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (Z_{rf0c} - Z_{rf0d}) \quad (6.76)$$

$$I_{fr0\_I} = \frac{1}{2} I_{rf0\_I} [2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2} V_{rf0\_I} [(Y_{rf0c} + Z_{rf0c}(Y_{rf0c}/2)^2) + (Y_{rf0d} + Z_{rf0d}(Y_{rf0d}/2)^2)] + \frac{1}{2} I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} [(Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2} V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} [(Y_{rf0c} + Z_{rf0c}(Y_{rf0c}/2)^2) - (Y_{rf0d} + Z_{rf0d}(Y_{rf0d}/2)^2)] \quad (6.77)$$

$$I_{f0\_I} = I_{fs0\_I} + I_{fr0\_I} \quad (6.78)$$

• **Κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας: Περίπτωση σφάλματος στο κύκλωμα II της διπλής γραμμής**

$$V_{sf0\_II} = V_{sf0\_I} \quad (6.79)$$

$$V_{f0\_II} = V_{fs0\_II} = \frac{1}{2} V_{sf0\_I} [(Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} - Z_{sf0d}) + \frac{1}{2} V_{sf0\_II} [2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} I_{sf0\_II} (Z_{sf0c} + Z_{sf0d}) \quad (6.80)$$

$$I_{fs0\_II} = \frac{1}{2} I_{sf0\_I} [(Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} V_{sf0\_I} [(Y_{sf0c} + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)^2) - (Y_{sf0d} + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2)^2)] + \frac{1}{2} I_{sf0\_II} [2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}] - \frac{1}{2} V_{sf0\_II} [(Y_{sf0c} + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)^2) + (Y_{sf0d} + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2)^2)] \quad (6.81)$$

$$V_{f0\_II} = V_{f0\_II} = \frac{1}{2}V_{rf0\_I}[(Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2}I_{rf0\_I}(Z_{rf0c} - Z_{rf0d}) + \frac{1}{2}V_{rf0\_II}e^{j\delta_v}[2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2}I_{rf0\_II}e^{j\delta_i}(Z_{rf0c} + Z_{rf0d}) \quad (6.82)$$

$$I_{f0\_II} = \frac{1}{2}I_{rf0\_I}[(Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2}V_{rf0\_I}[(Y_{rf0c} + Z_{rf0c}(Y_{rf0c}/2)^2) - (Y_{rf0d} + Z_{rf0d}(Y_{rf0d}/2)^2)] + \frac{1}{2}I_{rf0\_II}e^{j\delta_v}[2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d}] - \frac{1}{2}V_{rf0\_II}e^{j\delta_i}[(Y_{rf0c} + Z_{rf0c}(Y_{rf0c}/2)^2) + (Y_{rf0d} + Z_{rf0d}(Y_{rf0d}/2)^2)] \quad (6.83)$$

$$I_{f0\_II} = I_{fs0\_II} + I_{fr0\_II} \quad (6.84)$$

Από τις (6.47)-(6.66) είναι ξεκάθαρο ότι οι τάσεις και εντάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος F, για τα κυκλώματα I και II της διπλής γραμμής, μπορούν να εκφραστούν αποκλειστικά ως συνάρτηση των γνωστών τάσεων  $V_{sf1\_I}$ ,  $V_{rf1\_II}$ ,  $V_{sf2\_I}$ ,  $V_{rf2\_II}$  και εντάσεων  $I_{sf1\_I}$ ,  $I_{rf1\_II}$ ,  $I_{sf2\_I}$ ,  $I_{rf2\_II}$  στα άκρα μέτρησης S<sub>I</sub> και R<sub>II</sub>, αντίστοιχα. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τις τάσεις και εντάσεις μηδενικής ακολουθίας, οι οποίες εξαρτώνται επιπλέον από τις άγνωστες μεταβλητές  $I_{sf0\_II}$ ,  $I_{rf0\_I}$ . Για να εξαλειφθούν οι δύο άγνωστες μεταβλητές από τις (6.73)-(6.84), επιλύεται το ακόλουθο 2×2 γραμμικό σύστημα, το οποίο αντικατοπτρίζει τις εξισώσεις περιορισμού που ισχύουν για το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής, κατά την εκδήλωση οποιοδήποτε τύπου σφάλματος εμπλέκει τη γη:

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sf0\_II} \\ I_{rf0\_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_{sf0\_II} \\ I_{rf0\_I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \quad (6.85)$$

όπου  $a, b, c, d, e, f$  είναι συντελεστές που καθορίζονται για κάθε περίπτωση σφάλματος ως προς τη και παρατίθενται στον Πίνακα 6.1.

Αντικαθιστώντας τη λύση της (6.85) στις (6.74)-(6.77) και (6.80)-(6.83) αντίστοιχα, υπολογίζονται οι τάσεις και εντάσεις μηδενικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος F για τα κυκλώματα I και II της γραμμής, συναρτήσει των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων μηδενικής ακολουθίας στα σημεία μέτρησης S<sub>I</sub> και R<sub>II</sub> και της θέσης του σφάλματος.

### 6.3.4.2 Θεωρία εκτίμησης της θέσης του σφάλματος

Σε κάθε περίπτωση σφάλματος, ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος, ισχύουν διαφορετικές οριακές συνθήκες. Οι οριακές συνθήκες για το σφάλμα μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τάσης  $V_f$  και της έντασης  $I_f$  που επικρατούν στο σημείο του σφάλματος, καθώς και της αντίστασης σφάλματος  $R_f$ , ως εξής:

$$V_f = R_f I_f \quad (6.86)$$

Στην (6.86), η αντίσταση σφάλματος  $R_f$  θεωρείται άγνωστη παράμετρος. Η τάση  $V_f$  μπορεί να υπολογιστεί από τις ακολουθιακές τάσεις  $V_{f1\_I}$ ,  $V_{f1\_II}$ ,  $V_{f2\_I}$ ,  $V_{f2\_II}$ ,  $V_{f0\_I}$ ,  $V_{f0\_II}$  στο σημείο του σφάλματος μέσω των (6.48), (6.53), (6.58), (6.63), (6.74) και (6.82) αντίστοιχα, οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να εκφραστούν αποκλειστικά και μόνο ως συνάρτηση των γνωστών τάσεων  $V_{sfk\_I}$ ,  $V_{rfk\_II}$  και εντάσεων  $I_{sfk\_I}$ ,  $I_{rfk\_II}$  στα άκρα S<sub>I</sub> και R<sub>II</sub> της διπλής γραμμής, όπου  $k = 0, 1, 2$ . Συνεπώς η τάση  $V_f$  μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$V_f(x) = f(V_{sfk\_I}, V_{rfk\_II}, I_{sfk\_I}, I_{rfk\_II}, x) \quad (6.87)$$

**Πίνακας 6.1** Συντελεστές που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αγνώστων μεταβλητών  $I_{sf0\_II}$  και  $I_{rf0\_I}$

	Εσφαλμένο Κύκλωμα I ( $V_{fs0\_II} = V_{fr0\_II}$ & $I_{f0\_II} = 0$ )	Εσφαλμένο Κύκλωμα II ( $V_{fs0\_I} = V_{fr0\_I}$ & $I_{f0\_I} = 0$ )	Εσφαλμένα Κυκλώματα I & II ( $V_{fs0\_I} = V_{fr0\_I}$ & $V_{fs0\_II} = V_{fr0\_II}$ )
<b>a</b>	$-\frac{1}{2}(Z_{sf0c} + Z_{sf0d})$	$-\frac{1}{2}(Z_{sf0c} - Z_{sf0d})$	$-\frac{1}{2}(Z_{sf0c} - Z_{sf0d})$
<b>b</b>	$\frac{1}{2}(Z_{rf0c} - Z_{rf0d})$	$\frac{1}{2}(Z_{rf0c} + Z_{rf0d})$	$\frac{1}{2}(Z_{rf0c} + Z_{rf0d})$
<b>c</b>	$\frac{1}{2}(2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d})$	$\frac{1}{2}((Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c} - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d})$	$-\frac{1}{2}(Z_{sf0c} + Z_{sf0d})$
<b>d</b>	$\frac{1}{2}((Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d})$	$\frac{1}{2}(2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d})$	$\frac{1}{2}(Z_{rf0c} - Z_{rf0d})$
<b>e</b>	$V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c})$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (Z_{rf0c} + Z_{rf0d})$ $-V_{sf0\_I} (1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c})$ $+\frac{1}{2}I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} - Z_{sf0d})$	$V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c})$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (Z_{rf0c} - Z_{rf0d})$ $-V_{sf0\_I} (1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c})$ $+\frac{1}{2}I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} + Z_{sf0d})$	$V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c})$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (Z_{rf0c} - Z_{rf0d})$ $-V_{sf0\_I} (1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c})$ $+\frac{1}{2}I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} + Z_{sf0d})$
<b>f</b>	$V_{sf0\_I} (Y_{sf0c} + Z_{sf0c} (Y_{sf0c}/2^2))$ $-\frac{1}{2}I_{sf0\_I} ((Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c}) - (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}$ $+V_{rf0\_II} e^{j\delta_i} ((Y_{rf0c} + Z_{rf0c} (Y_{rf0c}/2^2))$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (2 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} + (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d})$	$V_{sf0\_I} ((Y_{sf0c} + Z_{sf0c} (Y_{sf0c}/2^2))$ $-\frac{1}{2}I_{sf0\_I} (2 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c}) + (Y_{sf0d}/2)Z_{sf0d}$ $+V_{rf0\_II} e^{j\delta_i} ((Y_{rf0c} + Z_{rf0c} (Y_{rf0c}/2^2))$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} ((Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c} - (Y_{rf0d}/2)Z_{rf0d})$	$V_{rf0\_II} e^{j\delta_v} (1 + (Y_{rf0c}/2)Z_{rf0c})$ $-\frac{1}{2}I_{rf0\_II} e^{j\delta_i} (Z_{rf0c} + Z_{rf0d})$ $-V_{sf0\_I} (1 + (Y_{sf0c}/2)Z_{sf0c})$ $+\frac{1}{2}I_{sf0\_I} (Z_{sf0c} - Z_{sf0d})$

Στην (6.87) ο μοναδικός άγνωστος είναι η απόσταση της θέσης του σφάλματος  $x$ . Παρόμοια με την (6.87), το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$I_f(x) = g(V_{sfk\_I}, V_{rfk\_II}, I_{sfk\_I}, I_{rfk\_II}, x) \quad (6.88)$$

Σύμφωνα με τις (6.86)-(6.88), η εξίσωση  $V_f = R_f I_f$  μπορεί να μετατραπεί στην εξίσωση εντοπισμού της θέσης του σφάλματος:

$$F(x) = \text{Im} \left\{ \frac{V_f(x)}{I_f(x)} \right\} = \text{Im} \left\{ \frac{f(V_{sfk\_I}, V_{rfk\_II}, I_{sfk\_I}, I_{rfk\_II}, x)}{g(V_{sfk\_I}, V_{rfk\_II}, I_{sfk\_I}, I_{rfk\_II}, x)} \right\} = 0 \quad (6.89)$$

όπου  $\text{Im}$  αντιστοιχεί στο φανταστικό μέρος του ορίσματος.

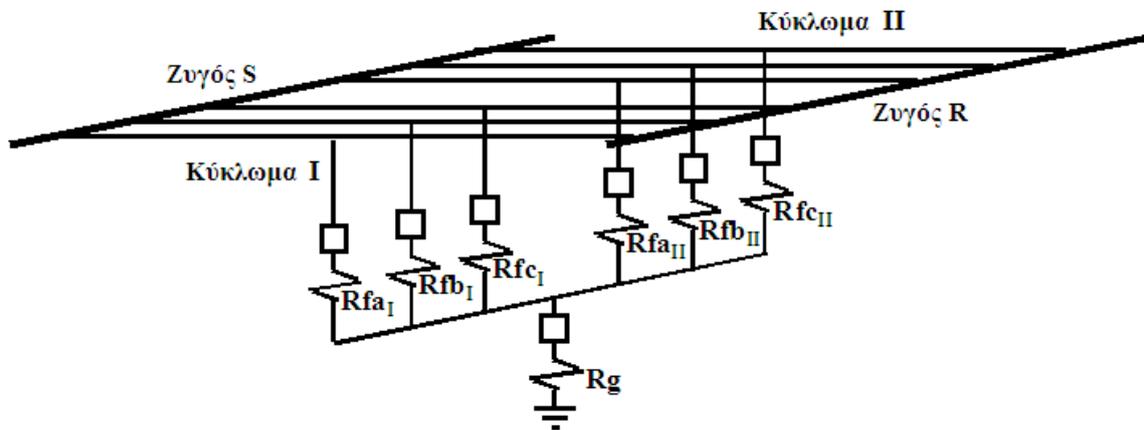
Από την (6.89), διαπιστώνει κανείς ότι η εξίσωση εντοπισμού της θέσης του σφάλματος είναι μη γραμμική. Για τη λύση της (6.89) χρησιμοποιείται η ευρέως διαδομένη μέθοδος Newton-Raphson, η οποία σε κάθε επανάληψη της υπολογίζει τη διόρθωση  $\Delta x_v$ :

$$\Delta x_v = -\frac{F(x_v)}{F'(x_v)} \quad (6.90)$$

όπου  $v = 0, 1, 2, \dots$  είναι ο δείκτης των επαναλήψεων,  $\Delta x_v = x_{v+1} - x_v$  και  $F'(x_v) = \frac{dF(x_v)}{dx}$  είναι η παράγωγος της  $F(x)$  στην  $v$ -οστή επανάληψη. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται, όταν η διόρθωση  $\Delta x_v$  γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή.

### 6.3.4.3 Χαρακτηριστικές εξισώσεις για διαφόρους τύπους σφαλμάτων

Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς όλους τους πιθανούς τύπους σφάλματος που μπορούν να εκδηλωθούν σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει σφάλματα που εμπλέκουν τις φάσεις ενός μόνο κυκλώματος της διπλής γραμμής, π.χ. IAG, IBC, ΠBCG, ΠABC κτλ. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει σφάλματα που εμπλέκουν φάσεις και των δύο κυκλωμάτων, ή αλλιώς τα ενδοκυκλωματικά ή cross-country σφάλματα, π.χ. ΙΑΠBG, ΙΑΠBCG, ΙBCΠCG, ΙΑΒΠBC, ΙΑΒCΠAB κτλ. Ο αστέρας με τις αντιστάσεις σφάλματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.6, επιτρέπει την αναπαράσταση οποιουδήποτε τύπου σφάλματος, εξαλείφοντας κάθε φορά του κλάδου των φάσεων που δεν εμπλέκονται στο σφάλμα [6]. Για παράδειγμα, για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα ΙΑΠBG διατηρούνται στον αστέρα μόνο οι αντιστάσεις σφάλματος  $R_{faI}$ ,  $R_{fbII}$  και  $R_g$ , ενώ οι υπόλοιπες αμελούνται.



Σχήμα 6.6 Αντιστάσεις σφάλματος στο σημείο του σφάλματος F

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις για τα σφάλματα τύπου IAG και ΙΑΠBG, που είναι και τα πιο συνηθισμένα στις γραμμές διπλού κυκλώματος. Αντίστοιχες εξισώσεις προκύπτουν για οποιονδήποτε τύπο σφάλματος, έχοντας ως αναφορά αυτούς τους δύο.

#### Α) Χαρακτηριστικές εξισώσεις για σφάλματα που εμπλέκουν μόνο το ένα κύκλωμα της γραμμής

Η οριακή συνθήκη για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα τύπου IAG μπορεί να καθοριστεί από το Σχήμα 6.6, ως ακολούθως:

$$V_{fa\_I} = I_{fa\_I} R_f \quad (6.91)$$

όπου:  $V_{fa\_I} = V_{f1\_I} + V_{f2\_I} + V_{f0\_I}$  και  $I_{fa\_I} = I_{f1\_I} + I_{f2\_I} + I_{f0\_I}$  είναι η τάση και το ρεύμα σφάλματος, και  $R_f = R_{fa\_I} + R_g$  είναι η συνολική αντίσταση σφάλματος που υπεισέρχεται στο σφάλμα. Ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος εμπλέκει μόνο το κύκλωμα I της διπλής γραμμής. Συνεπώς, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι τιμές για τους συντελεστές  $a, b, c, d, e, f$  που αντιστοιχούν στην πρώτη στήλη του Πίνακα 6.1, προκειμένου να καθοριστούν οι τιμές των αγνώστων μεταβλητών  $I_{sf0\_II}$  και  $I_{rf0\_I}$ . Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις (6.47)-(6.51), (6.57)-(6.61) και (6.73)-(6.78), η εξίσωση εύρεσης της θέσης του σφάλματος στην (6.89) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\text{Im} \left( \frac{V_f(x)}{I_f(x)} \right) = \text{Im} \left( \frac{V_{fa\_I}}{I_{fa\_I}} \right) = \text{Im} \left( \frac{f(V_{sf1\_I}, V_{rf1\_II}, I_{sf1\_I}, V_{sf2\_I}, V_{rf2\_II}, I_{sf2\_I}, V_{sf0\_I}, V_{rf0\_II}, I_{sf0\_I}, I_{rf0\_II}, x)}{g(V_{sf1\_I}, V_{rf1\_II}, I_{sf1\_I}, V_{sf2\_I}, V_{rf2\_II}, I_{sf2\_I}, V_{sf0\_I}, V_{rf0\_II}, I_{sf0\_I}, I_{rf0\_II}, x)} \right) = 0 \quad (6.92)$$

Από την (6.92), μπορεί να υπολογιστεί απευθείας η θέση του σφάλματος, μιας και είναι η μοναδική άγνωστη παράμετρος της εξίσωσης. Με αντίστοιχο τρόπο, μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις εύρεσης της θέσης του σφάλματος, οι οποίες αντιστοιχούν και στους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων, που εμπλέκουν το ένα μόνο κύκλωμα της διπλής γραμμής.

### **Β) Χαρακτηριστικές εξισώσεις για σφάλματα που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της γραμμής**

Οι οριακές συνθήκες για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα τύπου ΙΑΠΒΓ μπορεί να καθοριστούν εύκολα από το Σχήμα 6.6, ως ακολούθως:

$$V_{fa\_I} - I_{fa\_I} R_{fa\_I} = (I_{fa\_I} + I_{fb\_II}) R_g \quad (6.93)$$

$$V_{fa\_I} - I_{fa\_I} R_{fa\_I} = V_{fb\_II} - I_{fb\_II} R_{fb\_II} \quad (6.94)$$

όπου:  $V_{fb\_II} = a^2 V_{f1\_II} + a V_{f2\_II} + V_{f0\_II}$  και  $I_{fb\_II} = a^2 I_{f1\_II} + a I_{f2\_II} + I_{f0\_II}$  είναι η τάση και το ρεύμα σφάλματος στο κύκλωμα ΙΙ της γραμμής. Λαμβάνοντας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (6.94) αντίστοιχα, η άγνωστη αντίσταση σφάλματος  $R_{fa\_I}$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των τάσεων και εντάσεων σφάλματος στα δύο κυκλώματα της γραμμής, ως ακολούθως:

$$R_{fa\_I} = \frac{\text{Re}\{I_{fb\_II}\} \text{Im}\{V_{fa\_I} - V_{fb\_II}\} - \text{Im}\{I_{fb\_II}\} \text{Re}\{V_{fa\_I} - V_{fb\_II}\}}{\text{Re}\{I_{fb\_II}\} \text{Im}\{I_{fa\_I}\} - \text{Im}\{I_{fb\_II}\} \text{Re}\{I_{fa\_I}\}} \quad (6.95)$$

Επιπλέον, επειδή ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος εμπλέκει και τα δύο κυκλώματα της γραμμής, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι τιμές για τους συντελεστές  $a, b, c, d, e, f$  που αντιστοιχούν στην τρίτη στήλη του Πίνακα 6.1, προκειμένου να καθοριστούν οι τιμές των αγνώστων μεταβλητών  $I_{sf0\_II}$  και  $I_{rf0\_I}$ . Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τις (6.47)-(6.66), (6.73)-(6.84) και (6.94), η εξίσωση εύρεσης της θέσης του σφάλματος στην (6.89) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\text{Im} \left( \frac{V_f(x)}{I_f(x)} \right) = \text{Im} \left( \frac{V_{fa\_I} - I_{fa\_I} R_{fa\_I}}{I_{fa\_I} + I_{fb\_II}} \right) = \text{Im} \left( \frac{f(V_{sf1\_I}, V_{rf1\_II}, I_{sf1\_I}, I_{rf1\_II}, V_{sf2\_I}, V_{rf2\_II}, I_{sf2\_I}, I_{rf2\_II}, V_{sf0\_I}, V_{rf0\_II}, I_{sf0\_I}, I_{rf0\_II}, x)}{g(V_{sf1\_I}, V_{rf1\_II}, I_{sf1\_I}, I_{rf1\_II}, V_{sf2\_I}, V_{rf2\_II}, I_{sf2\_I}, I_{rf2\_II}, V_{sf0\_I}, V_{rf0\_II}, I_{sf0\_I}, I_{rf0\_II}, x)} \right) = 0 \quad (6.96)$$

Από την (6.96), μπορεί να υπολογιστεί απευθείας η θέση του σφάλματος, μιας και είναι η μοναδική άγνωστη παράμετρος της εξίσωσης. Με αντίστοιχο τρόπο, μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις εύρεσης της θέσης του σφάλματος, οι οποίες αντιστοιχούν και στους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων, που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής.

## **6.4 Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου**

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων μέσω του προγράμματος υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP προκειμένου να διαπιστωθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Για το σκοπό αυτό, έχει χρησιμοποιηθεί ένα πρότυπο δίκτυο δοκιμών 400 kV, το οποίο περιλαμβάνει μια γραμμή διπλού κυκλώματος μήκους 300 km (Πίνακας 6.2). Η γραμμή διπλού κυκλώματος αναπαρίσταται στο ATP/EMTP μέσω του μοντέλου γραμμής του Clarke με κατανομημένες παραμέτρους. Το μοντέλο του δικτύου που έχει εξομοιωθεί στο ATP/EMTP δεν περιλαμβάνει τους μετασχηματιστές τάσεις και εντάσεις (VTs και CTs) στα δύο άκρα μέτρησης της διπλής γραμμής, ώστε να προσδιοριστούν τα ίδια σφάλματα της μεθόδου.

Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Τα αναλογικά φίλτρα, που απαιτούνται προκειμένου να απομακρυνθεί ο θόρυβος και οι υψηλές αρμονικές από τα σήματα των τάσεων και εντάσεων που λαμβάνονται από τις προσομοιώσεις στο ATP/EMTP, υλοποιούνται με χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρου Butterworth 4<sup>ης</sup> τάξης με συχνότητα αποκοπής ίση με 500 Hz. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι φασιθέτες των φασικών τάσεων και εντάσεων με χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier,

ο οποίος χρησιμοποιεί 20 δείγματα ανά κύκλο. Τέλος, υπολογίζονται οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στα δύο σημεία μέτρησης της γραμμής κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών.

Μετά το στάδιο της εκτίμησης των φασιθετών των μετρούμενων σημάτων, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος επιλογής του τύπου σφάλματος, προκειμένου να προσδιοριστούν οι φάσεις που εμπλέκονται στο σφάλμα. Κατά τη διαδικασία αυτή, τα δεδομένα που εξάγονται από τις προσομοιώσεις στο ATP/EMTP, χωρίζονται σε δεδομένα πριν και μετά το σφάλμα. Το βήμα της μεθόδου, που συνδέεται με τη χρονική ευθυγράμμιση των μετρήσεων στα δύο τερματικά σημεία της διπλής γραμμής δεν εκτελείται, διότι τα δεδομένα των προσομοιώσεων από το ATP/EMTP είναι ήδη χρονικά στοιχισμένα μεταξύ τους. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι διαδικασίες προσδιορισμού του σφάλματος συγχρονισμού και εύρεσης του εσφαλμένου κυκλώματος της γραμμής, χρησιμοποιώντας δεδομένα φασιθετών τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Στο τελικό στάδιο, λαμβάνονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης για τη θέση του σφάλματος.

**Πίνακας 6.2 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz στο ATP/EMTP**

Στοιχεία	Παράμετροι	
Δεδομένα γραμμής μεταφοράς	$l$	300 km
	$Z_1$	0.0276+j0.3151 Ω/km
	$B_1$	4.0841 μS/km
	$Z_0$	0.2680+j1.0371 Ω/km
	$B_0$	2.7018 μS/km
	$Z_{0M}$	0.2300+j0.6308 Ω/km
	$B_{0M}$	1.6242 μS/km
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο S της γραμμής	$Z_{S1}$	1.312+j15.0 Ω
	$Z_{S0}$	2.334+j26.6 Ω
	μέτρο της $E_S$	1.00 (p.u.)
	γωνία της $E_S$	0°
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο R της γραμμής	$Z_{R1}$	$2Z_{S1}$
	$Z_{R0}$	$2Z_{S0}$
	μέτρο της $E_R$	0.99 (p.u.)
	γωνία της $E_R$	-30°

Ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων, για διαφόρους τύπους σφαλμάτων με διαφορετικές αντιστάσεις σφάλματος και διαφορετικές θέσεις για το σφάλμα κατά μήκος της γραμμής, έχει εκτελεστεί, προκειμένου να αξιολογηθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Για να εξομοιωθούν τα σφάλματα συγχρονισμού των μετρήσεων, οι φασιθέτες των τάσεων και των εντάσεων στο άκρο R<sub>II</sub> της γραμμής έχουν περιστραφεί κατά 18° και 9° αντίστοιχα, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Για να εκτιμηθεί η απόσταση του σφάλματος, η επαναληπτική μέθοδος τερματίζεται, όταν η διάθρωση γίνει μικρότερη από 10<sup>-6</sup>. Η αρχική τιμή για την απόσταση του σφάλματος  $x_0$  που χρησιμοποιείται είναι ίση με 0.5 p.u.

Για κάθε περίπτωση σφάλματος, η προτεινόμενη μέθοδος επιδεικνύει εξαιρετική συμπεριφορά, οδηγώντας σε σωστές αποφάσεις για τον τύπο του σφάλματος και το εσφαλμένο κύκλωμα της διπλής γραμμής, και σε εκτιμήσεις υψηλής ακρίβειας για τις γωνίες συγχρονισμού. Επιπλέον για κάθε περίπτωση, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που απαιτείται για τη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου δεν ξεπερνά τις έξι.

Στον Πίνακα 6.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για τέσσερις διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων που εμπλέκουν μόνο το ένα κύκλωμα της διπλής γραμμής και έξι τύπους σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα. Το σφάλμα εκτίμησης για τη θέση του σφάλματος ορίζεται ως εξής:

$$\% \text{Σφάλμα} = \frac{|\text{πραγματική θέση σφάλματος} - \text{εκτιμώμενη θέση σφάλματος}|}{\text{συνολικό μήκος γραμμής μεταφοράς}} \times 100\% \quad (6.97)$$

**Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος στη γραμμή διπλού κυκλώματος των 400 kV (η ισοδύναμη πηγή στο S προπορεύεται αυτής στο R κατά 30°)**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)						50 (km)		100 (km)		150 (km)		200 (km)		250 (km)		
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	x (km)	error (%)								
IAG	0						10	49.99	0.004	100.03	0.009	150.06	0.020	200.08	0.026	250.31	0.102
IIBC					1	1		49.97	0.011	100.03	0.011	150.05	0.018	200.04	0.013	250.05	0.015
IBCG		0.5	0.5				4	49.99	0.005	99.91	0.027	149.87	0.043	199.79	0.071	249.80	0.068
IIABC				0.5	0.5	0.5		49.45	0.183	99.55	0.151	149.91	0.031	199.92	0.028	250.05	0.018
IIIBC	1				0.5	0.5	10	50.08	0.026	99.96	0.015	150.00	0.001	199.99	0.003	250.01	0.003
IIIBG	0.5				1		10	50.05	0.016	100.13	0.042	150.09	0.030	200.34	0.112	249.90	0.033
IBCIIBG		0.5	0.5		1		10	50.04	0.005	100.02	0.007	150.03	0.011	200.06	0.019	250.07	0.022
ICAIICA	0.5		0.5	0.5		0.5		50.00	0.000	99.91	0.031	149.91	0.030	200.02	0.005	250.09	0.029
IABCIIBCG	0.25	0.25	0.25		0.5	0.5	10	50.00	0.002	99.99	0.002	149.99	0.005	199.96	0.012	250.01	0.003
IABICAG	0.5	0.5		1		1	10	50.00	0.001	100.00	0.001	150.01	0.002	200.00	0.001	249.98	0.008
IAG	0						100	49.90	0.032	99.92	0.027	150.05	0.017	200.45	0.150	250.56	0.185
IIBC					2.5	2.5		49.95	0.018	99.97	0.010	149.99	0.004	200.00	0.001	250.02	0.005
IBCG		2.5	2.5				35	49.94	0.002	99.99	0.003	150.00	0.001	200.00	0.002	250.09	0.030
IIABC				1	1	1		49.55	0.151	99.55	0.151	149.90	0.034	199.93	0.028	250.04	0.013
IIIBC	2				1	1	100	50.39	0.129	100.59	0.198	150.01	0.000	200.50	0.166	250.34	0.115
IIIBG	1				2		100	50.05	0.017	100.08	0.026	150.05	0.017	200.12	0.039	249.96	0.013
IBCIIBG		1	1		2		100	50.01	0.002	100.02	0.006	150.03	0.009	200.05	0.017	250.27	0.089
ICAIICA	1		1	1		1		50.00	0.000	99.97	0.012	149.94	0.019	200.01	0.003	250.07	0.023
IABCIIBCG	0.5	0.5	0.5		1	1	100	50.03	0.011	100.00	0.001	150.01	0.003	200.01	0.004	249.94	0.022
IABICAG	1	1		2		2	100	49.99	0.002	99.99	0.002	150.01	0.002	200.01	0.004	249.98	0.007

**Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος στη γραμμή διπλού κυκλώματος των 400 kV (η ισοδύναμη πηγή στο S προπορεύεται αυτής στο R κατά 45°)**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)						50 (km)		100 (km)		150 (km)		200 (km)		250 (km)		
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	x (km)	error (%)								
IAG	0						0	50.00	0.004	100.03	0.009	150.03	0.011	200.07	0.023	250.06	0.019
	0						100	49.93	0.024	99.93	0.022	150.05	0.017	200.40	0.132	250.63	0.211
	0						250	49.94	0.022	99.92	0.026	150.14	0.046	200.73	0.243	248.97	0.345
	0						500	50.04	0.013	99.99	0.004	150.31	0.104	201.14	0.379	251.42	0.472
IBICG		0.5				0.5	0	50.06	0.002	100.05	0.015	150.27	0.088	200.75	0.250	249.86	0.048
		0.5				0.5	100	50.04	0.014	100.04	0.014	150.12	0.039	200.17	0.057	250.14	0.048
		1				1	250	50.04	0.001	100.04	0.011	150.13	0.044	200.85	0.288	249.48	0.174
		1				1	500	50.04	0.013	100.04	0.013	150.18	0.058	198.84	0.387	250.94	0.312

Είναι ξεκάθαρο ότι το μέγιστο σφάλμα στον Πίνακα 6.3 δεν ξεπερνά το 0.2%, γεγονός που καταδεικνύει την πολύ μεγάλη ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Από τον Πίνακα 6.3 φαίνεται επιπλέον ότι η αντίσταση σφάλματος έχει πολύ μικρή επίδραση στην ακρίβεια της μεθόδου. Προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω η επίδραση της αντίστασης σφάλματος και των συνθηκών φόρτισης της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, εξετάζονται επιπλέον περιπτώσεις σφαλμάτων στον Πίνακα 6.4. Στον πίνακα αυτό, οι τύποι σφάλματος, που έχουν εξομοιωθεί, είναι οι IAG και IBICG, που είναι και οι πιο πιθανοί μεταξύ των τύπων σφάλματος που εμπλέκουν το ένα μόνο ή και τα δύο κυκλώματα της γραμμής αντίστοιχα. Οι θεωρούμενες αντιστάσεις σφάλματος κυμαίνονται από 0 έως 500 Ohm. Η επίδραση των συνθηκών φόρτισης της γραμμής, πριν την εκδήλωση του σφάλματος, έχει ληφθεί υπόψη, μεταβάλλοντας τη γωνία του ισοδύναμου δικτύου στο άκρο R στις 45°. Από τον Πίνακα 6.4 είναι εμφανές ότι η αντίσταση σφάλματος και η φόρτιση της γραμμής πριν το σφάλμα έχουν ελάχιστη επίδραση στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου.

## 6.5 Σύνοψη-Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος εκτίμησης της θέσης του σφάλματος σε μία γραμμή διπλού κυκλώματος, με χρήση περιορισμένου αριθμού μετρήσεων τάσεων και εντάσεων σε δύο αντι-παράλληλα τερματικά σημεία της γραμμής. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στο μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους, κάνοντας χρήση ενός πίνακα διαγωνιοποίησης ο οποίος αποζευγνύει τα αμοιβαία συζευγμένα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής. Συνεπώς, η μέθοδος επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια κυρίως για γραμμές διπλού κυκλώματος μεγάλου μήκους. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά κάθε τύπο σφάλματος, που μπορεί να εκδηλωθεί σε μια διπλή γραμμή. Επιπλέον, δεν επηρεάζεται από την αντίσταση σφάλματος, τη φόρτιση της γραμμής πριν από το σφάλμα και τα ισοδύναμα δίκτυα σε κάθε άκρο της γραμμής. Η τεκμηρίωση της μεθόδου έχει πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια εκτεταμένου αριθμού σφαλμάτων, τα οποία εξομοιώθηκαν στο ATP-EMTP. Για κάθε περίπτωση, η μέθοδος επιδεικνύει μεγάλη ακρίβεια και πολύ καλή συμπεριφορά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

#### 7.1 Γενικά

Ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα των αλγορίθμων εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε εναέριες γραμμές μεταφοράς που αναφέρθηκαν στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4, είναι ότι προϋποθέτουν την ακριβή γνώση των παραμέτρων των γραμμών, τις οποίες θεωρούν ως δεδομένα εισόδου. Στην πράξη, οι ηλεκτρικές παράμετροι μιας γραμμής μεταφοράς δεν είναι σχεδόν ποτέ γνωστές εκ των προτέρων με μεγάλη ακρίβεια, ενώ επιπλέον μπορεί να μεταβάλλονται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες και τις συνθήκες φόρτισης της γραμμής. Το γεγονός αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ακρίβεια των παραπάνω αλγορίθμων.

Προκειμένου να μετριαστεί η επίδραση των παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς στην ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, στην εργασία [30] περιγράφεται μια online μέθοδος εκτίμησης των παραμέτρων μιας γραμμής διπλού κυκλώματος σε τακτά χρονικά διαστήματα, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές καταστάσεις κανονικής λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου. Σε περίπτωση εκδήλωσης σφάλματος στη γραμμή, οι εκτιμώμενες παράμετροι που αναφέρονται στην τελευταία χρονικά κατάσταση λειτουργίας πριν από το σφάλμα, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος. Όμως, η μέθοδος αυτή απαιτεί τη συνεχή εποπτεία της γραμμής διπλού κυκλώματος και προϋποθέτει τη χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών για την επίτευξη συγχρονισμού μεταξύ των δεδομένων μέτρησης από τα δύο άκρα της γραμμής, γεγονός που την καθιστά οικονομικά ασύμφορη. Μια αντίστοιχη μέθοδος έχει διατυπωθεί στην [35] για γραμμές απλού κυκλώματος.

Πιο πρόσφατοι αλγόριθμοι που δεν απαιτούν την πλήρη και ακριβή γνώση των παραμέτρων των γραμμών, παρουσιάζονται στις ([143], [146], [150], [188]). Για να εντοπίσουν τη θέση του σφάλματος, οι συγγραφείς της [143] θεωρούν το μοντέλο γραμμής μεταφοράς με συγκεντρωμένες παραμέτρους, αμελώντας την εγκάρσια χωρητικότητα, και χρησιμοποιούν μη συγχρονισμένες μετρήσεις των φασικών τάσεων και εντάσεων στα άκρα της γραμμής κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Επιπλέον, η συνολική ίδια (self) και αμοιβαία (mutual) σύνθετη αντίσταση της γραμμής, καθώς και η γωνία συγχρονισμού μεταξύ των μετρήσεων στα δύο άκρα της, μπορούν να υπολογιστούν ως υποπαράγωγα της μεθόδου. Στην εργασία [150], η μέθοδος της [143] επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει και την εγκάρσια χωρητικότητα, κάνοντας χρήση του μοντέλου γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους και αξιοποιώντας τις μετρήσεις στα άκρα της γραμμής τόσο πριν όσο και μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Οι παράμετροι του κυκλώματος θετικής ακολουθίας της γραμμής μπορούν επίσης να εκτιμηθούν μέσω της μεθόδου αυτής. Οι μέθοδοι που αναφέρθηκαν παραπάνω εξετάζουν αποκλειστικά την περίπτωση γραμμών απλού κυκλώματος. Μια μέθοδος αντίστοιχη με αυτήν της [150], έχει αναπτυχθεί για την περίπτωση των γραμμών μεταφοράς τριών σημείων (three-terminal lines) [11]. Μέσω της μεθόδου αυτής, καθίσταται επιπλέον δυνατή η εκτίμηση των παραμέτρων μηδενικής ακολουθίας της γραμμής, που υπολογίζονται δυσκολότερα με την απαιτούμενη ακρίβεια.

Οι προηγούμενες μέθοδοι, παρότι καινοτόμες, υπολογίζουν τη θέση του σφάλματος μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία απαιτεί κατάλληλες αρχικές τιμές για τις παραμέτρους των υπό εξέταση γραμμών. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε γραμμές μεταφοράς με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, και για το λόγο αυτό όλες σχεδόν βασίζονται στη θεωρία των συμμετρικών συνιστωσών. Οι συγγραφείς της [188] απαλείφουν πλήρως τις παραμέτρους της γραμμής μεταφοράς από τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος, χρησιμοποιώντας συγχρονισμένες μετρήσεις των τάσεων και εντάσεων θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, στα άκρα της γραμμής. Μια παρόμοια αλλά πιο σύνθετη μέθοδος

περιγράφεται στην [146], όπου λαμβάνονται υπόψη μη συγχρονισμένες μετρήσεις στα άκρα της γραμμής, και απαιτείται επιπλέον η εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού προκειμένου να υπολογιστεί η θέση του σφάλματος. Οι δύο αυτές μέθοδοι, παρότι ευρηματικές και καινοτόμες, βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε γραμμές απλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, δε λαμβάνουν υπόψη την εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής, και δε μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά την περίπτωση τριφασικών συμμετρικών σφαλμάτων.

Στην παρούσα ενότητα προτείνεται μια νέα μέθοδος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφορές απλού κυκλώματος, η οποία δεν εξαρτάται από τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε γραμμές με πλήρη όσο και χωρίς αντιμετάθεση φάσεων [13]. Η προτεινόμενη μέθοδος, στη γενικευμένη της μορφή, χρησιμοποιεί μη συγχρονισμένες μετρήσεις των φασικών τάσεων και εντάσεων στα άκρα των γραμμών πριν και κατά τη διάρκεια του σφάλματος, και οι μόνες παραδοχές που θεωρούνται για την επιτυχή της υλοποίηση είναι: α) η διαθεσιμότητα των δεδομένων μέτρησης πριν την εκδήλωση του σφάλματος, η οποία πρέπει να θεωρείται δεδομένη σε κάθε καταγραφή σφάλματος, εκτός από την περίπτωση της αυτόματης επαναφοράς σε εν εξελίξει σφάλμα στη γραμμή, και β) η «αμεταβλητότητα» των παραμέτρων της γραμμής μετά την εκδήλωση του σφάλματος, ανεξάρτητα από την αύξηση της θερμοκρασίας στους εσφαλμένους αγωγούς, παραδοχή η οποία γίνεται ευρέως αποδεκτή στους περισσότερους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων της βιβλιογραφίας.

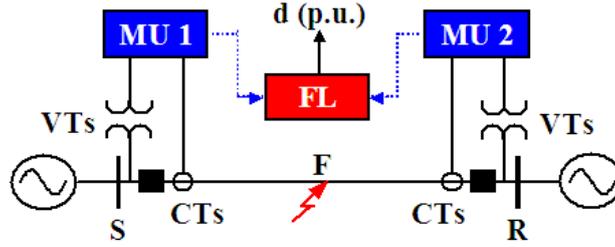
Η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιεί μια διαδικασία δύο σταδίων (two-stage approach) για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος. Στο πρώτο στάδιο, λαμβάνεται υπόψη το μοντέλο γραμμής μεταφοράς με συγκεντρωμένες παραμέτρους, παραβλέποντας την εγκάρσια χωρητικότητα, και οι υπολογισμοί αποσκοπούν στο να ληφθούν κάποιες αρχικές εκτιμήσεις για την άγνωστη γωνία συγχρονισμού, που εκφράζει τον ετεροχρονισμό των μετρήσεων στα δύο άκρα της γραμμής, και τη θέση του σφάλματος. Στη συνέχεια, οι τιμές που προκύπτουν από το πρώτο στάδιο, χρησιμοποιούνται για την αρχικοποίηση μιας επαναληπτικής μεθόδου, που λαμβάνει υπόψη την επίδραση των εγκάρσιων χωρητικοτήτων της γραμμής, ώστε να ληφθούν νέες, βελτιωμένες τιμές για τους δύο αγνώστους.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται λεπτομερώς η προτεινόμενη μέθοδος και παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα της αξιολόγησής της με χρήση του προγράμματος ATP/EMTP [44] και του υπολογιστικού περιβάλλοντος της MATLAB [159].

## 7.2 Μαθηματική θεμελίωση της προτεινόμενης μεθόδου

Το προτεινόμενο σχήμα εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος απεικονίζεται στο Σχήμα 7.1. Στα δύο άκρα της γραμμής (S, R) βρίσκονται τοποθετημένοι μετασχηματιστές τάσης (MT) και έντασης (ME), οι οποίοι παρέχουν τις υποβιβασμένες τάσεις και εντάσεις στις μονάδες μέτρησης και καταγραφής συμβάντων (MUs – Measuring Units). Στις μονάδες αυτές πραγματοποιούνται ψηφιακές μετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστούν οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των φασικών τάσεων και εντάσεων. Οι μετρήσεις αυτές μεταφέρονται μέσω καναλιών επικοινωνίας στη μονάδα εντοπισμού σφαλμάτων (FL – Fault Locator), η οποία θεωρείται ως ανεξάρτητη διάταξη, άμα τη εκδήλωσει του σφάλματος. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει έλεγχος των διενεργούμενων ψηφιακών μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μέσω σήματος GPS (Global Positioning System). Αυτό συνεπάγεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για μη συγχρονισμένες μετρήσεις.

Στο Σχήμα 7.3 απεικονίζεται το ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα της γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος με συγκεντρωμένες παραμέτρους, ακριβώς λίγο πριν την εκδήλωση του σφάλματος. Στο σχήμα αυτό, έχει υιοθετηθεί η ακόλουθη ονοματολογία:



Σχήμα 7.1 Απεικόνιση του προτεινόμενου σχήματος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων

$[V_S] = [V_{Sa} \ V_{Sb} \ V_{Sc}]^T$ ,  $[I_S] = [I_{Sa} \ I_{Sb} \ I_{Sc}]^T$ : διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο S της γραμμής πριν από το σφάλμα,

$[V_R] = [V_{Ra} \ V_{Rb} \ V_{Rc}]^T$ ,  $[I_R] = [I_{Ra} \ I_{Rb} \ I_{Rc}]^T$ : διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο R της γραμμής πριν από το σφάλμα,

$[Z_{SR}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix}$ : συμμετρικός πίνακας εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων της γραμμής

μεταφοράς SR (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων),

$[Y_{SR}] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix}$ : συμμετρικός πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων της γραμμής μεταφοράς

SR (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων),

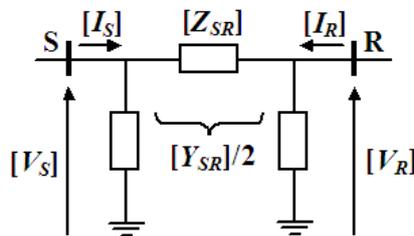
T: τελεστής αντιμετάθεσης διανύσματος ή πίνακα.

Με βάση το Σχήμα 7.2 μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες εξισώσεις για τη γραμμή μεταφοράς πριν από την εκδήλωση του σφάλματος:

$$[V_S] - [V_R]e^{j\delta} = [Z_{SR}] \left( ([Y_{SR}]/2)[V_R]e^{j\delta} - [I_R]e^{j\delta} \right) \quad (7.1)$$

$$[V_R]e^{j\delta} - [V_S] = [Z_{SR}] \left( ([Y_{SR}]/2)[V_S] - [I_S] \right) \quad (7.2)$$

όπου  $\delta$  είναι η γωνία συγχρονισμού μεταξύ των μετρήσεων στα άκρα S και R της γραμμής, η οποία αναπαριστά οποιοδήποτε τυχόν σφάλμα συγχρονισμού.

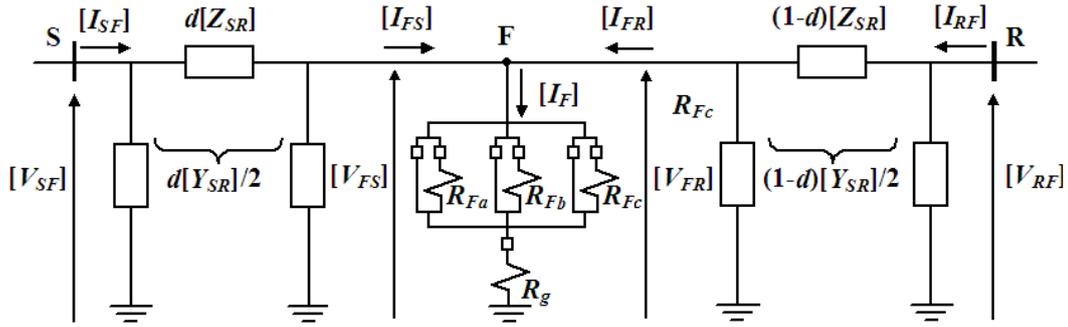


Σχήμα 7.2 Ισοδύναμο  $\Pi$  κύκλωμα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος πριν την εκδήλωση του σφάλματος

Προσθαφαιρώντας τις (7.1) και (7.2), προκύπτει:

$$[I_S] + [I_R]e^{j\delta} = ([Y_{SR}]/2) \left( [V_S] + [V_R]e^{j\delta} \right) \quad (7.3)$$

$$2 \left( [V_S] - [V_R]e^{j\delta} \right) = [Z_{SR}] \left( ([I_S] - [I_R]e^{j\delta}) - ([Y_{SR}]/2) \left( [V_S] - [V_R]e^{j\delta} \right) \right) \quad (7.4)$$



**Σχήμα 7.3** Ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος

Το Σχήμα 7.3 δείχνει το μοντέλο της γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Το σημείο F υποδηλώνει τη θέση του σφάλματος. Η ακόλουθη ονοματολογία χρησιμοποιείται:

$[V_{SF}] = [V_{SFa} \ V_{SFb} \ V_{SFc}]^T$ ,  $[I_{SF}] = [I_{SFa} \ I_{SFb} \ I_{SFc}]^T$ : διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο S της γραμμής κατά το σφάλμα,

$[V_{RF}] = [V_{RFa} \ V_{RFb} \ V_{RFc}]^T$ ,  $[I_{RF}] = [I_{RFa} \ I_{RFb} \ I_{RFc}]^T$ : διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο R της γραμμής κατά το σφάλμα,

$d$ : απόσταση της θέσης του σφάλματος από το άκρο αναφοράς S της γραμμής α.μ. (p.u.),

$R_{Fa}, R_{Fb}, R_{Fc}, R_g$ : άγνωστες αντιστάσεις σφάλματος.

Οι ακόλουθες εξισώσεις ισχύουν στο σημείο του σφάλματος F:

$$[V_F] = [V_{SF}] + [Z_{SR}] \left( d^2 \left( [Y_{SR}]/2 \right) [V_{SF}] - d [I_{SF}] \right) \quad (7.5)$$

$$[V_F] = [V_{RF}] e^{j\delta} + [Z_{SR}] \left( (1-d)^2 \left( [Y_{SR}]/2 \right) [V_{RF}] - (1-d) [I_{RF}] \right) e^{j\delta} \quad (7.6)$$

όπου  $[V_F] = [V_{Fa} \ V_{Fb} \ V_{Fc}]^T$  είναι το διάνυσμα των φασικών τάσεων στο σημείο του σφάλματος.

Συνδυάζοντας τις (7.5) και (7.6), προκύπτει:

$$[V_{SF}] - [V_{RF}] e^{j\delta} = [Z_{SR}] \left( \left( [Y_{SR}]/2 \right) \left( (1-d)^2 [V_{RF}] e^{j\delta} - d^2 [V_{SF}] \right) + d \left( [I_{SF}] + [I_{RF}] e^{j\delta} \right) - [I_{RF}] e^{j\delta} \right) \quad (7.7)$$

Εφαρμόζοντας την ιδιότητα της αντιμετάθεσης διανυσμάτων και πινάκων στην (7.7), δίνει:

$$[V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} = \left( \left( (1-d)^2 [V_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [V_{SF}]^T \right) \left( [Y_{SR}]/2 \right) + d \left( [I_{SF}]^T + [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) - [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) [Z_{SR}] \quad (7.8)$$

Στη συνέχεια, πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της (7.8) με τον όρο  $\left( \left( [I_S] - [I_R] e^{j\delta} \right) - \left( [Y_{SR}]/2 \right) \left( [V_S] - [V_R] e^{j\delta} \right) \right)$ , προκύπτει:

$$\begin{aligned} & \left( [V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \left( \left( [I_S] - [I_R] e^{j\delta} \right) - \left( [Y_{SR}]/2 \right) \left( [V_S] - [V_R] e^{j\delta} \right) \right) = \\ & \left( \left( (1-d)^2 [V_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [V_{SF}]^T \right) \left( [Y_{SR}]/2 \right) + d \left( [I_{SF}]^T + [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) - [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \\ & \cdot [Z_{SR}] \left( \left( [I_S] - [I_R] e^{j\delta} \right) - \left( [Y_{SR}]/2 \right) \left( [V_S] - [V_R] e^{j\delta} \right) \right) \end{aligned} \quad (7.9)$$

Αντικαθιστώντας την (7.4) και (7.9), προκύπτει:

$$\begin{aligned} & \left( [V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \left( ([I_S] - [I_R] e^{j\delta}) - ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \right) = \\ & 2 \left( (1-d)^2 [V_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [V_{SF}]^T \right) ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \\ & + 2 \left( d ([I_{SF}]^T + [I_{RF}]^T e^{j\delta}) - [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \end{aligned} \quad (7.10)$$

Αναδιατάσσοντας την (7.10), προκύπτει:

$$\begin{aligned} & \left( [V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([I_S] - [I_R] e^{j\delta}) - 2 \left( d ([I_{SF}]^T + [I_{RF}]^T e^{j\delta}) - [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \\ & = \left( 2 \left( (1-d)^2 [V_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [V_{SF}]^T \right) + \left( [V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \right) ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \end{aligned} \quad (7.11)$$

Η εξίσωση (7.11) αποτελεί τη βάση για τον προσδιορισμό της γωνίας συγχρονισμού και της θέσης του σφάλματος που αντιστοιχεί σε αυτή, χωρίς τη χρήση των παραμέτρων της γραμμής μεταφοράς. Αυτό πραγματοποιείται σε δύο στάδια, όπως περιγράφεται στις ακόλουθες παραγράφους.

### 7.2.1 Στάδιο Ι – Χωρίς θεώρηση της εγκάρσιας χωρητικότητας της γραμμής

Στο πρώτο στάδιο της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, οι εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος δεν λαμβάνονται υπόψη. Αυτό γίνεται θεωρώντας ότι ο πίνακας αγωγιμοτήτων  $[Y_{SR}]$  στην (7.11) είναι μηδενικός. Στη συνέχεια, η (7.11) παίρνει τη μορφή:

$$\left( [V_{SF}]^T - [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([I_S] - [I_R] e^{j\delta}) - 2 \left( d ([I_{SF}]^T + [I_{RF}]^T e^{j\delta}) - [I_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) = 0 \quad (7.12)$$

Από την (7.12) προκύπτει ότι:

$$d = \frac{A_1 e^{j2\delta} + A_2 e^{j\delta} + A_3}{A_4 e^{j2\delta} + A_5 e^{j\delta} + A_6} \quad (7.13)$$

όπου  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5,$  και  $A_6$  είναι σταθερές, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$A_1 = [V_{RF}]^T [I_R] - 2 [I_{RF}]^T [V_R] \quad (7.14)$$

$$A_2 = 2 [I_{RF}]^T [V_S] - [V_{RF}]^T [I_S] - [V_{SF}]^T [I_R] \quad (7.15)$$

$$A_3 = [V_{SF}]^T [I_S] \quad (7.16)$$

$$A_4 = -2 [I_{RF}]^T [V_R] \quad (7.17)$$

$$A_5 = 2 [I_{RF}]^T [V_S] - 2 [I_{SF}]^T [V_R] \quad (7.18)$$

$$A_6 = 2 [I_{SF}]^T [V_S] \quad (7.19)$$

Στην εξίσωση (7.13), η θέση του σφάλματος  $d$  είναι πραγματικός αριθμός. Κατά συνέπεια, το φανταστικό μέρος της (7.13) πρέπει να ισούται με 0:

$$\frac{A_1 e^{j2\delta} + A_2 e^{j\delta} + A_3}{A_4 e^{j2\delta} + A_5 e^{j\delta} + A_6} - \frac{A_1^* e^{-j2\delta} + A_2^* e^{-j\delta} + A_3^*}{A_4^* e^{-j2\delta} + A_5^* e^{-j\delta} + A_6^*} = 0 \quad (7.20)$$

όπου \* συμβολίζει το συζυγή μιγαδικό.

Απλοποιώντας την (7.20), προκύπτει:

$$f(\delta) = a_1 \sin(2\delta) + b_1 \cos(2\delta) + a_2 \sin(\delta) + b_2 \cos(\delta) + b_3 = 0 \quad (7.21)$$

όπου  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2,$  και  $b_3$  είναι σταθερές, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$a_1 + jb_1 = A_1 A_6^* - A_4 A_3^* \quad (7.22)$$

$$a_2 + jb_2 = A_1 A_5^* + A_2 A_6^* - A_4 A_2^* - A_5 A_3^* \quad (7.23)$$

$$a_3 + jb_3 = A_1 A_4^* + A_2 A_5^* + A_3 A_6^* \quad (7.24)$$

Στη συνέχεια, η γωνία συγχρονισμού  $\delta$  μπορεί να προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson, η οποία σε κάθε επανάληψη υπολογίζει τη διόρθωση  $\Delta\delta_k$ :

$$\Delta\delta_k = -f(\delta_k) / \left( \frac{df(\delta_k)}{d\delta} \right) \quad (7.25)$$

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \Delta\delta_k \quad (7.26)$$

όπου  $\delta_k$  και  $\delta_{k+1}$  είναι οι τιμές της γωνίας  $\delta$  στην  $k$ -οστή και  $(k+1)$ -οστή επανάληψη, αντίστοιχα, και  $k=0,1,2,\dots$  είναι ο δείκτης των επαναλήψεων.

Η έκφραση της παραγώγου στην (7.25) δίνεται ως εξής:

$$\frac{df(\delta)}{d\delta} = 2a_1 \cos(2\delta) - 2b_1 \sin(2\delta) + a_2 \cos(\delta) - b_2 \sin(\delta) \quad (7.27)$$

Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η διόρθωση  $\Delta\delta$  γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή, για παράδειγμα  $10^{-4}$ . Αφότου προσδιοριστεί η γωνία συγχρονισμού, η θέση του σφάλματος  $d$  υπολογίζεται λαμβάνοντας το πραγματικό μέρος της (7.20):

$$d = \operatorname{Re} \left( \frac{A_1 e^{j2\delta} + A_2 e^{j\delta} + A_3}{A_4 e^{j2\delta} + A_5 e^{j\delta} + A_6} \right) \quad (7.28)$$

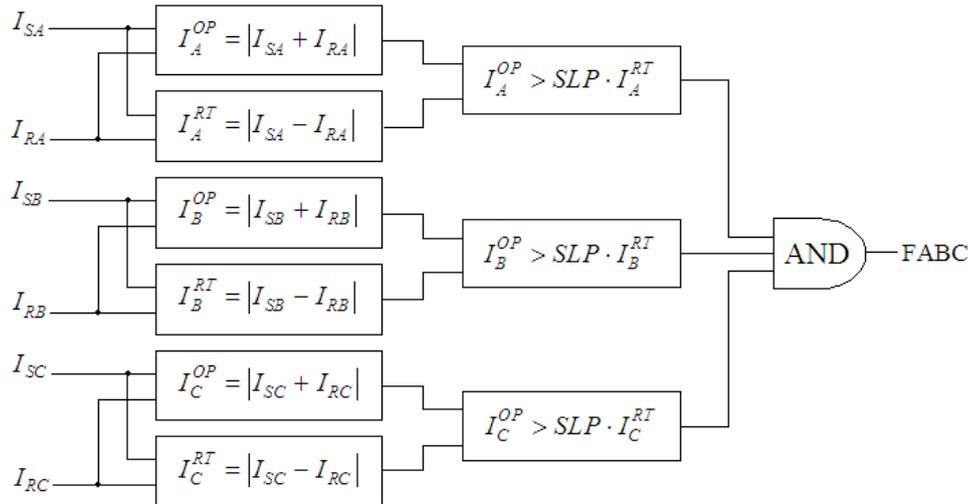
Περιορίζοντας το πεδίο τιμών για τη γωνία συγχρονισμού στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ , υπάρχουν το πολύ τέσσερις λύσεις για τη  $\delta$  στην (7.21). Στην περίπτωση ασύμμετρων σφαλμάτων, μία εκ των λύσεων βρίσκεται κοντά στο 0, ενώ οι υπόλοιπες, οι οποίες βρίσκονται σχετικά μακριά από το 0, μπορούν να απορριφθούν ή να χαρακτηριστούν ως μη ρεαλιστικές, αν οι θέσεις του σφάλματος που αντιστοιχούν σε αυτές μέσω της (7.28) βρίσκονται εκτός του διαστήματος  $(0,1)$  α.μ. Συνεπώς, για ασύμμετρα σφάλματα, μια αρχική τιμή για τη γωνία  $\delta$  ίση με το 0 μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια.

Στην περίπτωση τριφασικών συμμετρικών σφαλμάτων, μπορεί να προκύψουν δύο πιθανές λύσεις για τη γωνία συγχρονισμού, οι οποίες βρίσκονται κοντά στο 0 και κοντά η μία στην άλλη, με αποτέλεσμα να φαντάζουν εξίσου ρεαλιστικές. Στην περίπτωση αυτή, μια αρχική τιμή ίση με 0 μπορεί να οδηγήσει σε μια εφικτή αλλά μη έγκυρη λύση για τη γωνία συγχρονισμού, συμπαρασύροντας έτσι την εκτίμηση για τη θέση του σφάλματος μέσω της (7.28). Για τις σπάνιες περιπτώσεις των τριφασικών σφαλμάτων, προτείνεται αρχικά η γραφική αναπαράσταση της (7.21) στο διάστημα  $[-\pi, \pi]$ , και στη συνέχεια ο ορισμός διαστημάτων  $[a_i, b_i]$ , τα οποία περιλαμβάνουν αρνητικά περάσματα από το μηδέν (zero-crossings) για την  $f(\delta)$ , και για τα οποία ισχύει  $f(a_i) \cdot f(b_i) < 0$ . Έπειτα, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της Διχοτόμησης (Bisection method) [186], μπορούν να προσδιοριστούν όλες τις πιθανές λύσεις  $\delta_i$  για τη γωνία συγχρονισμού. Πρέπει επιπλέον να επισημανθεί ότι, οι δύο κυρίαρχες λύσεις, που βρίσκονται κοντά στο μηδέν, πρέπει να γίνουν εξίσου αποδεκτές ως εφικτές, αφού δεν υπάρχουν επιπλέον κριτήρια για να βρεθεί η έγκυρη λύση για τη  $\delta$ .

Λόγω του ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της γωνίας συγχρονισμού, για συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα, απαιτείται η «ενίσχυση» της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων με έναν αλγόριθμο επιλογής του τύπου σφάλματος (fault type selection). Ο αλγόριθμος αυτός θα πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει μεταξύ

συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων, χωρίς όμως να παρέχει επιπρόσθετη πληροφορία για τις φάσεις που εμπλέκονται στο σφάλμα, μιας και αυτό δεν απαιτείται από την προτεινόμενη μέθοδο.

Στο Σχήμα 7.4, εικονίζεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος για τη διάκριση μεταξύ συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην αρχή της διαφορικής προστασίας ρεύματος, και χρησιμοποιεί τα ρεύματα λειτουργίας και αναστολής, τα οποία σχηματίζονται με βάση τα αντίστοιχα φασικά ρεύματα που μετρώνται κατά το σφάλμα στα δύο άκρα της γραμμής. Με βάση το Σχήμα 7.4, ένα τριφασικό σφάλμα υποδεικνύεται μόνο στην περίπτωση που και τα τρία διαφορικά στοιχεία φάσεων, με χαρακτηριστική μοναδιαία κλίσης (SLP – Single Slope Characteristic) ενεργοποιηθούν συγχρόνως (γίνουν λογικό «1») [76]. Σε κάθε άλλη περίπτωση, ανιχνεύεται ασύμμετρο σφάλμα και η μέθοδος Newton-Raphson, με αρχική τιμή 0, εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της γωνίας συγχρονισμού.



Σχήμα 7.4 Προτεινόμενος αλγόριθμος διάκρισης μεταξύ συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων

### 7.2.2 Στάδιο II – Θεώρηση της εγκάρσια χωρητικότητας της γραμμής

Στο πρώτο στάδιο της προτεινόμενης μεθόδου, τα αποτελέσματα για τη γωνία συγχρονισμού και τη θέση του σφάλματος δεν είναι τόσο ακριβή, διότι η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής δε λαμβάνεται υπόψη. Για το λόγο αυτό, προτείνεται να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του πρώτου σταδίου ως αρχικές τιμές για τον υπολογισμό των δύο αγνώστων, συμπεριλαμβάνοντας αυτή τη φορά και την εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής.

Αυτό μπορεί να γίνει ξαναγράφοντας τον πίνακα αγωγιμοτήτων  $[Y_{SR}]$  στην ακόλουθη μορφή, αμελώντας τις αμοιβαίες αγωγιμότητες μεταξύ των φάσεων της γραμμής:

$$[Y_{SR}] = \begin{bmatrix} Y_a & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & Y_c \end{bmatrix} \quad (7.29)$$

Οι συνολικές αγωγιμότητες των φάσεων ως προς γη της γραμμής,  $Y_a$ ,  $Y_b$  και  $Y_c$ , μπορούν να προσδιοριστούν αξιοποιώντας την (7.3). Είναι:

$$Y_a = 2 \left( I_{Sa} + I_{Ra} e^{j\delta} \right) / \left( V_{Sa} + V_{Ra} e^{j\delta} \right) \quad (7.30)$$

$$Y_b = 2 \left( I_{Sb} + I_{Rb} e^{j\delta} \right) / \left( V_{Sb} + V_{Rb} e^{j\delta} \right) \quad (7.31)$$

$$Y_c = 2 \left( I_{Sc} + I_{Rc} e^{j\delta} \right) / \left( V_{Sc} + V_{Rc} e^{j\delta} \right) \quad (7.32)$$

Αντικαθιστώντας την απλοποιημένη έκφραση του πίνακα εγκάρσιων αγωγιμοτήτων  $[Y_{SR}]$  στην (7.11) και αναδιατάσσοντάς την, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\begin{aligned} f(d, \delta) = & \left( [V_{SF}]^T [I_S] - \left( [V_{SF}]^T [I_R] + [V_{RF}]^T [I_S] \right) e^{j\delta} + [V_{RF}]^T [I_R] e^{j2\delta} \right) \\ & - 2 \left( d [I_{SF}]^T [V_S] + \left( (d-1) [I_{RF}]^T [V_S] - d [I_{SF}]^T [V_R] \right) e^{j\delta} - (d-1) [I_{RF}]^T [V_R] e^{j2\delta} \right) \\ & - \left( (1-2d^2) [V_{SF}]^T + \left( 2(1-d)^2 - 1 \right) [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) = 0 \end{aligned} \quad (7.33)$$

Στη συνέχεια, ορίζεται το διάνυσμα συναρτήσεων  $F(X)$ , το οποίο αποτελείται από τις ακόλουθες δύο συναρτήσεις:

$$F_1(X) = \text{Re}(f(X)) \quad (7.34)$$

$$F_2(X) = \text{Im}(f(X)) \quad (7.35)$$

όπου  $X = [d, \delta]^T$  συμβολίζει το διάνυσμα των αγνώστων μεταβλητών.

Οι δύο άγνωστες μεταβλητές μπορούν να υπολογιστούν μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας Newton-Raphson [186]:

$$X_{v+1} = X_v + \Delta X_v \quad (7.36)$$

$$\Delta X_v = -J(X_v)^{-1} F(X_v) \quad (7.37)$$

$$J(X_v) = \frac{\partial F(X_v)}{\partial X} \quad (7.38)$$

όπου:

$X_v, X_{v+1}$ : το διάνυσμα των αγνώστων μεταβλητών πριν και μετά τη ν-οστή επανάληψη,

$v = 0, 1, 2, \dots$ : ο αριθμός των επαναλήψεων,

$\Delta X_v$ : το διάνυσμα διόρθωσης των αγνώστων μεταβλητών στη ν-οστή επανάληψη,

$J(X_v)$ : ο Ιακωβιανός πίνακας στη ν-οστή επανάληψη.

Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η νόρμα (norm) του διανύσματος διόρθωσης των δύο μεταβλητών γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη ανοχή. Ως αρχικές τιμές για τη γωνία συγχρονισμού και τη θέση του σφάλματος χρησιμοποιούνται οι τιμές που έχουν προκύψει από το πρώτο στάδιο του αλγορίθμου, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Οι μερικές παράγωγοι του διανύσματος συναρτήσεων  $F(X)$  σε σχέση με τις άγνωστες μεταβλητές, που απαιτούνται για το σχηματισμό του Ιακωβιανού πίνακα στην (7.38), παρατίθενται ακολούθως:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(X)}{\partial d} = & -2 \left( [I_{SF}]^T [V_S] + \left( [I_{RF}]^T [V_S] - [I_{SF}]^T [V_R] \right) e^{j\delta} - [I_{RF}]^T [V_R] e^{j2\delta} \right) \\ & + 4 \left( d [V_{SF}]^T + (1-d) [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \end{aligned} \quad (7.39)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(X)}{\partial \delta} = & - \left( [V_{SF}]^T [I_R] + [V_{RF}]^T [I_S] \right) e^{j\delta} (j) + [V_{RF}]^T [I_R] e^{j2\delta} (2j) \\ & - 2 \left( (d-1) [I_{RF}]^T [V_S] - d [I_{SF}]^T [V_R] \right) e^{j\delta} (j) + 2(d-1) [I_{RF}]^T [V_R] e^{j2\delta} (2j) \\ & - \left( 2(1-d)^2 - 1 \right) [V_{RF}]^T e^{j\delta} (j) ([Y_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \\ & - \left( (1-2d^2) [V_{SF}]^T + \left( 2(1-d)^2 - 1 \right) [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([Y'_{SR}]/2) ([V_S] - [V_R] e^{j\delta}) \\ & - \left( (1-2d^2) [V_{SF}]^T + \left( 2(1-d)^2 - 1 \right) [V_{RF}]^T e^{j\delta} \right) ([Y_{SR}]/2) (-[V_R] e^{j\delta} (j)) \end{aligned} \quad (7.40)$$

όπου  $[Y'_{SR}]$  είναι η παράγωγος του πίνακα  $[Y_{SR}]$  ως προς τη γωνία συγχρονισμού  $\delta$ :

$$[Y'_{SR}] = \begin{bmatrix} Y'_a & 0 & 0 \\ 0 & Y'_b & 0 \\ 0 & 0 & Y'_c \end{bmatrix} \quad (7.41)$$

και:

$$Y'_a = 2 \left( \left( V_{Sa} + V_{Ra} e^{j\delta} \right) I_{Ra} e^{j\delta} (j) - \left( I_{Sa} + I_{Ra} e^{j\delta} \right) V_{Ra} e^{j\delta} (j) \right) / \left( V_{Sa} + V_{Ra} e^{j\delta} \right)^2 \quad (7.42)$$

$$Y'_b = 2 \left( \left( V_{Sb} + V_{Rb} e^{j\delta} \right) I_{Rb} e^{j\delta} (j) - \left( I_{Sb} + I_{Rb} e^{j\delta} \right) V_{Rb} e^{j\delta} (j) \right) / \left( V_{Sb} + V_{Rb} e^{j\delta} \right)^2 \quad (7.43)$$

$$Y'_c = 2 \left( \left( V_{Sc} + V_{Rc} e^{j\delta} \right) I_{Rc} e^{j\delta} (j) - \left( I_{Sc} + I_{Rc} e^{j\delta} \right) V_{Rc} e^{j\delta} (j) \right) / \left( V_{Sc} + V_{Rc} e^{j\delta} \right)^2 \quad (7.44)$$

Επίσης, είναι:

$$\frac{\partial F_1(X)}{\partial d} = \text{Re} \left( \frac{\partial f(X)}{\partial d} \right) \quad (7.45)$$

$$\frac{\partial F_1(X)}{\partial \delta} = \text{Re} \left( \frac{\partial f(X)}{\partial \delta} \right) \quad (7.46)$$

$$\frac{\partial F_2(X)}{\partial d} = \text{Im} \left( \frac{\partial f(X)}{\partial d} \right) \quad (7.47)$$

$$\frac{\partial F_2(X)}{\partial \delta} = \text{Im} \left( \frac{\partial f(X)}{\partial \delta} \right) \quad (7.48)$$

## 7.3 Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου

### 7.3.1 Αναπαραγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων μέτρησης

Η προτεινόμενη μέθοδος έχει επαληθευθεί με χρήση δεδομένων μέτρησης, που έχουν προκύψει από πολύ λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων, με το πρόγραμμα ανάλυσης ταχέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ATP/EMTP, σε ένα πρότυπο δίκτυο δοκιμών που περιλαμβάνει μια γραμμή μεταφοράς απλού κυκλώματος 400 kV, 300 km χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Η γραμμή μεταφοράς έχει μοντελοποιηθεί στο πρόγραμμα ATP/EMTP κάνοντας χρήση του μοντέλου ασύμμετρης γραμμής σταθερής συχνότητας με κατανεμημένες παραμέτρους K. C. Lee [198]. Οι παράμετροι της γραμμής μεταφοράς, οι οποίες συνίστανται από τρία μοναδικά σύνολα ιδιοσυνιστωσών (modal parameters -  $Z'_{iL}, B'_{iL}$  με  $i=0,1,2$ ) και τον πίνακα διαγωνοποίησης  $T_i$ , καθώς και τα ισodύναμα κυκλώματα Thevenin στα άκρα της γραμμής βρίσκονται συγκεντρωμένα στον ακόλουθο Πίνακα 7.1.

Για να καταδειχθούν τα ίδια σφάλματα της μεθόδου, χωρίς να υπεισέρχονται επιπλέον σφάλματα μέτρησης, οι μετασχηματιστές τάσης (MT) και έντασης (ME), που βρίσκονται τοποθετημένοι στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς, μοντελοποιούνται ως ιδανικά στοιχεία. Τα σήματα στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών μέτρησης φιλτράρονται από ένα αναλογικό αντιαναδιπλωτικό φίλτρο (Butterworth) δεύτερης τάξης με συχνότητα αποκοπής 350 Hz. Έπειτα, τα φιλτραρισμένα σήματα δειγματοληπτούνται με ρυθμό 1 kHz και στα δείγματα που προκύπτουν εφαρμόζεται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) πλήρους κύκλου, προκειμένου να εξαχθούν οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων. Για να εισαχθεί το σφάλμα συγχρονισμού, οι φασιθέτες των μετρούμενων μεγεθών στο άκρο R της γραμμής έχουν περιστραφεί κατά  $10^0$  (0.1745 rad) για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Από τα διαδοχικά δεδομένα φασιθετών - πριν και κατά τη διάρκεια του σφάλματος - που προκύπτουν από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, υπολογίζεται ο μέσος όρος εντός ενός κύκλου, ακριβώς λίγο πριν την εκδήλωση του

σφάλματος, για τα δεδομένα φασιθετών πριν το σφάλμα, ενώ για τα δεδομένα φασιθετών κατά τη διάρκεια του σφάλματος, εξάγεται ο μέσος όρος για χρονικό διάστημα 3 έως 5 κύκλων, ακριβώς μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Σε αντίθετη περίπτωση, αν ληφθεί υπόψη όλο το σύνολο των δεδομένων μέτρησης, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια πιο γενικευμένη προσέγγιση, όπως αυτή που περιγράφεται στην [151].

**Πίνακας 7.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz**

Στοιχείο	Παράμετρος	
Γραμμή μεταφοράς SR	$l$	300 km
	$Z'_{0L}$	(0.3140+j1.0041) Ohm/km
	$B'_{0L}$	2.4916μS/km
	$Z'_{1L}$	(0.0247+j0.3189) Ohm/km
	$B'_{1L}$	3.6128μS/km
	$Z'_{2L}$	(0.0239+j0.2604) Ohm/km
	$B'_{2L}$	4.3040μS/km
	$T_i =$	$\begin{bmatrix} 0.59521098 & -0.70710678 & -0.41240852 \\ 0.53985903 & 0 & 0.81230439 \\ 0.59521098 & 0.70710678 & -0.41240852 \end{bmatrix}$
Ισοδύναμο κύκλωμα στο άκρο S της γραμμής	$Z_{1S}$	(1.312+j15) Ohm
	$Z_{0S}$	(2.334+j26.6) Ohm
	$E_S$	1.00∠0° p.u.
Ισοδύναμο κύκλωμα στο άκρο R της γραμμής	$Z_{1R}$	(2.624+j30) Ohm
	$Z_{0R}$	(4.668+j53.2) Ohm
	$E_R$	0.99∠-20° p.u.

Η παραπάνω διαδικασία, καθώς και ο προτεινόμενος αλγόριθμος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, έχουν υλοποιηθεί στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB. Στην ανάλυση αυτή, το ποσοστιαίο σφάλμα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος, που χρησιμοποιείται ως μέτρο ακριβείας της μεθόδου, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\% \text{ Σφάλμα} = \frac{|\text{Πραγματική θέση σφάλματος} - \text{Εκτιμώμενη θέση σφάλματος}|}{\text{Συνολικό μήκος γραμμής}} \times 100 \quad (7.49)$$

### 7.3.2 Έλεγχος ακριβείας της προτεινόμενης μεθόδου

Διάφοροι τύποι σφαλμάτων, σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς απλού κυκλώματος, έχουν εξομοιωθεί για τον έλεγχο ακριβείας της προτεινόμενης μεθόδου. Μία δεύτερη μέθοδος [146], που χρησιμοποιεί αποκλειστικά τις τάσεις και τις εντάσεις θετικής ακολουθίας στα δύο άκρα της γραμμής κατά τη διάρκεια του σφάλματος, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις εγκάρσιες αγωγιμότητες, εφαρμόζεται για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου. Στους Πίνακες 7.2, 7.4 και 7.6 παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος που λαμβάνονται για τρεις διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων (μονοφασικά προς γη (LG), διφασικά (LL) και διφασικά προς γη (LLG) σφάλματα). Στις στήλες 1 έως 3 των πινάκων παρατίθενται ο τύπος, η αντίσταση και η πραγματική θέση του σφάλματος, αντίστοιχα. Η εκτιμώμενη θέση του σφάλματος, μαζί με την ποσοστιαία απόκλιση από την πραγματική θέση, που προκύπτουν από την [146] και τα στάδια I και II της προτεινόμενης μεθόδου αποτυπώνονται στις στήλες 4 έως 6 και 7 έως 9 αντίστοιχα. Στους Πίνακες 7.3, 7.5 και 7.7, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που

λαμβάνονται από την [146] και τα δύο στάδια της προτεινόμενης μεθόδου για τη γωνία συγχρονισμού και το συνολικό αριθμό επαναλήψεων της ανακυκλωτικής διαδικασίας για τους αντίστοιχους τύπους σφαλμάτων.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα, η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια από αυτή της [146], και κατά συνέπεια αποτελεί μια πολύ καλύτερη λύση ιδιαίτερα για σφάλματα σε γραμμές απλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Επιπλέον, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, εφαρμόζοντας το δεύτερο στάδιο της μεθόδου, που λαμβάνει υπόψη τις εγκάρσιες αγωγιμότητες, επιτυγχάνεται μεγάλη βελτίωση της ακρίβειας των εκτιμήσεων της θέσης του σφάλματος. Το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης για τις περιπτώσεις που εξετάζονται είναι μικρότερο από: 0.18% (έναντι 25.40% της [146]) για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, 0.30% (έναντι 6.00% της [146]) για διφασικά σφάλματα, και 0.35% (έναντι 6.60% της [146]) για διφασικά ως προς γη σφάλματα, γεγονός που καταδεικνύει ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι πολύ ακριβής.

**Πίνακας 7.2 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)			Σφάλμα εκτίμησης (%)		
			[146]	‘Γ’	‘Π’	[146]	‘Γ’	‘Π’
AG	10	0.2	0.239	0.203	0.201	3.927	0.333	0.113
		0.4	0.445	0.403	0.401	4.453	0.248	0.106
		0.6	0.641	0.596	0.600	4.117	0.358	0.006
		0.8	0.816	0.789	0.800	1.578	1.058	0.016
	100	0.2	0.224	0.197	0.201	2.356	0.276	0.117
		0.4	0.604	0.401	0.401	20.43	0.131	0.094
		0.6	0.854	0.597	0.600	25.36	0.286	0.008
		0.8	1.034	0.788	0.799	23.38	1.163	0.080
BG	10	0.2	0.176	0.204	0.202	2.430	0.391	0.176
		0.4	0.403	0.401	0.401	0.330	0.101	0.113
		0.6	0.637	0.599	0.600	3.698	0.101	0.028
		0.8	0.814	0.797	0.800	1.371	0.261	0.019
	100	0.2	0.113	0.207	0.201	8.674	0.718	0.125
		0.4	0.312	0.401	0.401	8.839	0.045	0.130
		0.6	0.587	0.601	0.601	1.308	0.101	0.051
		0.8	0.806	0.808	0.800	0.553	0.794	0.026
CG	10	0.2	0.200	0.207	0.201	0.014	0.675	0.083
		0.4	0.371	0.403	0.401	2.928	0.266	0.117
		0.6	0.542	0.597	0.600	5.797	0.269	0.042
		0.8	0.709	0.794	0.800	9.103	0.589	0.018
	100	0.2	0.246	0.209	0.201	4.599	0.924	0.108
		0.4	0.392	0.404	0.401	0.755	0.433	0.118
		0.6	0.540	0.595	0.601	6.005	0.486	0.065
		0.8	0.684	0.785	0.800	11.56	1.553	0.007

Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν για τα αποτελέσματα της μεθόδου ως προς τη γωνία συγχρονισμού. Πρέπει να επισημανθεί ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι εκφρασμένα σε ακτίνια (radians). Η προτεινόμενη μέθοδος συγκλίνει μέσα σε έξι το πολύ επαναλήψεις στο πρώτο στάδιο, ενώ στο δεύτερο στάδιο απαιτούνται 3 το πολύ επαναλήψεις, γεγονός που καταδεικνύει ότι μπορεί να επιτευχθεί ταχύτατη σύγκλιση.

**Πίνακας 7.3 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη γωνία συγχρονισμού (rad.)			Αριθμός επαναλήψεων		
			[146]	‘I’	‘II’	[146]	‘I’	‘II’
AG	10	0.2	0.1276	0.1811	0.1725	5	6	3
		0.4	0.1651	0.1771	0.1745	5	5	2
		0.6	0.1642	0.1716	0.1741	5	5	2
		0.8	0.1456	0.1685	0.1748	5	5	3
	100	0.2	0.3266	0.1924	0.1748	8	6	3
		0.4	0.3247	0.1796	0.1744	8	5	2
		0.6	0.2947	0.1696	0.1740	7	5	2
		0.8	0.2601	0.1601	0.1740	6	5	3
BG	10	0.2	0.2570	0.1711	0.1736	6	5	2
		0.4	0.2935	0.1738	0.1744	7	5	2
		0.6	0.2785	0.1750	0.1744	7	5	2
		0.8	0.2334	0.1758	0.1749	6	5	2
	100	0.2	0.2235	0.1520	0.1748	6	5	3
		0.4	0.3061	0.1691	0.1746	7	5	2
		0.6	0.3133	0.1792	0.1743	7	5	2
		0.8	0.2866	0.1881	0.1743	6	5	3
CG	10	0.2	0.0806	0.1733	0.1752	4	5	2
		0.4	0.0792	0.1737	0.1751	4	5	2
		0.6	0.0540	0.1755	0.1750	4	5	2
		0.8	-0.002	0.1775	0.1748	2	6	3
	100	0.2	-0.097	0.1824	0.1754	5	5	3
		0.4	-0.082	0.1762	0.1755	5	5	2
		0.6	-0.105	0.1731	0.1754	5	5	2
		0.8	-0.174	0.1697	0.1751	6	5	2

**Πίνακας 7.4 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u.)			Σφάλμα εκτίμησης (%)		
			[146]	‘I’	‘II’	[146]	‘I’	‘II’
AB	1	0.2	0.219	0.204	0.201	1.857	0.395	0.122
		0.4	0.418	0.402	0.401	1.765	0.178	0.089
		0.6	0.622	0.598	0.600	2.235	0.234	0.039
		0.8	0.796	0.790	0.797	0.372	1.011	0.291
	10	0.2	0.216	0.204	0.201	1.634	0.385	0.121
		0.4	0.418	0.402	0.401	1.786	0.183	0.099
		0.6	0.629	0.598	0.601	2.887	0.215	0.050
		0.8	0.815	0.791	0.798	1.541	0.869	0.173
BC	1	0.2	0.197	0.205	0.201	0.281	0.505	0.138
		0.4	0.387	0.402	0.401	1.256	0.178	0.105
		0.6	0.575	0.598	0.600	2.519	0.197	0.044
		0.8	0.746	0.793	0.799	5.369	0.657	0.144
	10	0.2	0.198	0.205	0.201	0.223	0.517	0.130
		0.4	0.386	0.402	0.401	1.428	0.187	0.111
		0.6	0.571	0.598	0.600	2.892	0.202	0.042
		0.8	0.740	0.794	0.799	5.957	0.567	0.062
CA	1	0.2	0.210	0.205	0.201	0.953	0.537	0.130
		0.4	0.402	0.401	0.400	0.158	0.143	0.012
		0.6	0.592	0.597	0.600	0.819	0.305	0.007
		0.8	0.765	0.794	0.801	3.492	0.633	0.101
	10	0.2	0.212	0.205	0.201	1.151	0.522	0.127
		0.4	0.404	0.402	0.401	0.439	0.210	0.080
		0.6	0.594	0.597	0.600	0.637	0.296	0.009
		0.8	0.765	0.792	0.800	3.466	0.794	0.028

**Πίνακας 7.5 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη γωνία συγχρονισμού (rad.)			Αριθμός επαναλήψεων		
			[146]	‘I’	‘II’	[146]	‘I’	‘II’
AB	1	0.2	0.161	0.177	0.174	5	5	2
		0.4	0.215	0.176	0.175	6	5	2
		0.6	0.229	0.172	0.173	6	5	2
		0.8	0.215	0.171	0.173	6	5	3
	10	0.2	0.168	0.177	0.174	5	5	2
		0.4	0.221	0.175	0.175	6	5	2
		0.6	0.240	0.173	0.174	6	5	2
		0.8	0.235	0.171	0.173	6	5	3
BC	1	0.2	0.196	0.173	0.174	6	5	2
		0.4	0.188	0.174	0.174	6	5	2
		0.6	0.153	0.175	0.175	5	5	2
		0.8	0.093	0.174	0.173	4	5	2
	10	0.2	0.186	0.173	0.174	6	5	2
		0.4	0.182	0.174	0.174	5	5	2
		0.6	0.147	0.175	0.175	5	5	2
		0.8	0.083	0.175	0.174	4	5	2
CA	1	0.2	0.108	0.176	0.175	5	5	2
		0.4	0.128	0.174	0.173	5	5	2
		0.6	0.112	0.173	0.174	5	5	2
		0.8	0.067	0.175	0.177	4	5	2
	10	0.2	0.109	0.177	0.175	5	5	2
		0.4	0.128	0.174	0.174	5	5	2
		0.6	0.111	0.173	0.174	5	5	2
		0.8	0.063	0.173	0.175	4	5	2

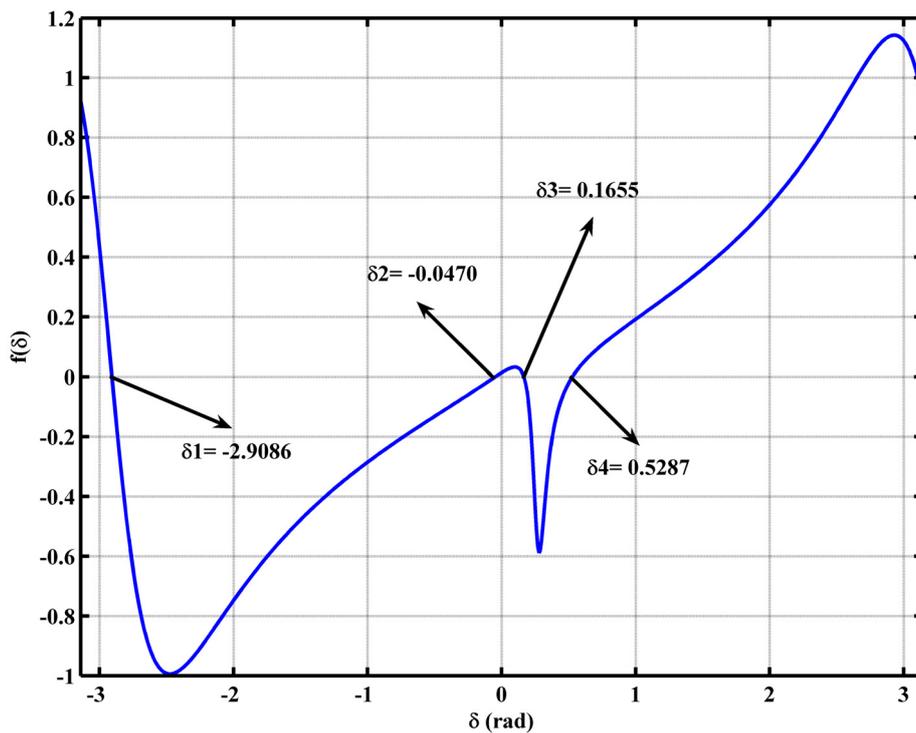
**Πίνακας 7.6 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u.)			Σφάλμα εκτίμησης (%)		
			[146]	‘I’	‘II’	[146]	‘I’	‘II’
ABG	5	0.2	0.222	0.204	0.201	2.171	0.390	0.123
		0.4	0.420	0.402	0.401	2.042	0.182	0.091
		0.6	0.628	0.598	0.600	2.795	0.246	0.031
		0.8	0.795	0.789	0.797	0.509	1.065	0.327
	50	0.2	0.220	0.204	0.201	1.948	0.396	0.122
		0.4	0.419	0.402	0.401	1.914	0.181	0.089
		0.6	0.626	0.598	0.600	2.644	0.247	0.028
		0.8	0.801	0.790	0.797	0.122	1.022	0.295
BCG	5	0.2	0.197	0.205	0.201	0.319	0.512	0.144
		0.4	0.385	0.402	0.401	1.465	0.171	0.102
		0.6	0.569	0.598	0.601	3.116	0.189	0.048
		0.8	0.734	0.793	0.798	6.570	0.677	0.190
	50	0.2	0.198	0.205	0.201	0.232	0.500	0.137
		0.4	0.387	0.402	0.401	1.278	0.174	0.104
		0.6	0.573	0.598	0.601	2.694	0.190	0.048
		0.8	0.742	0.794	0.799	5.770	0.653	0.151
CAG	5	0.2	0.207	0.205	0.201	0.646	0.542	0.134
		0.4	0.401	0.401	0.400	0.093	0.110	0.024
		0.6	0.595	0.597	0.600	0.462	0.311	0.015
		0.8	0.778	0.794	0.802	2.169	0.558	0.167
	50	0.2	0.208	0.205	0.201	0.804	0.540	0.132
		0.4	0.400	0.401	0.400	0.006	0.122	0.010
		0.6	0.591	0.597	0.600	0.899	0.306	0.007
		0.8	0.766	0.794	0.802	3.360	0.572	0.162

**Πίνακας 7.7 Συγκριτικά αποτελέσματα για την εκτίμηση της γωνίας συγχρονισμού μεταξύ της [146] και της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u.)	Εκτιμώμενη γωνία συγχρονισμού (rad.)			Αριθμός επαναλήψεων		
			[146]	‘I’	‘II’	[146]	‘I’	‘II’
ABG	5	0.2	0.154	0.178	0.174	5	6	2
		0.4	0.220	0.176	0.175	6	5	2
		0.6	0.240	0.172	0.173	6	5	2
		0.8	0.225	0.171	0.174	6	5	3
	50	0.2	0.156	0.177	0.174	5	5	2
		0.4	0.215	0.176	0.175	6	5	2
		0.6	0.234	0.172	0.173	6	5	2
		0.8	0.224	0.171	0.174	6	5	3
BCG	5	0.2	0.204	0.173	0.174	6	5	2
		0.4	0.191	0.174	0.174	6	5	2
		0.6	0.150	0.175	0.175	5	5	2
		0.8	0.078	0.174	0.173	4	5	2
	50	0.2	0.198	0.173	0.174	6	5	2
		0.4	0.192	0.174	0.174	6	5	2
		0.6	0.156	0.175	0.175	5	5	2
		0.8	0.094	0.174	0.173	4	5	2
CAG	5	0.2	0.107	0.176	0.174	5	5	2
		0.4	0.119	0.173	0.173	5	5	2
		0.6	0.105	0.173	0.174	5	5	2
		0.8	0.071	0.176	0.178	4	5	2
	50	0.2	0.111	0.176	0.175	5	5	2
		0.4	0.124	0.173	0.173	5	5	2
		0.6	0.105	0.173	0.174	5	5	2
		0.8	0.058	0.176	0.177	4	5	2

Στο Σχήμα 7.5, απεικονίζονται οι πιθανές λύσεις που υπολογίζονται από την προτεινόμενη μέθοδο, για ένα τριφασικό σφάλμα με αντίσταση σφάλματος  $R_F = 10 \Omega$ , στο 80% της γραμμής μεταφοράς. Στον Πίνακα 7.8 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εκτιμήσεις της θέσης του σφάλματος, σε κάθε στάδιο της μεθόδου. Η μέθοδος [146] δεν εφαρμόζεται για τριφασικά σφάλματα. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, μόνο δύο λύσεις για τη γωνία συγχρονισμού είναι ρεαλιστικές, η  $\delta_2$  και η  $\delta_3$ , οι οποίες βρίσκονται εξίσου κοντά στο μηδέν. Οι υπόλοιπες δύο λύσεις,  $\delta_1$  και  $\delta_4$ , σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος που προκύπτουν από αυτές, απορρίπτονται ως μη ρεαλιστικές. Στην προκειμένη περίπτωση, αν δοθεί μια αρχική τιμή της γωνίας συγχρονισμού  $\delta$  ίση με το μηδέν – όπως γίνεται για ασύμμετρα σφάλματα, η λύση που προκύπτει είναι η  $\delta_2$ , η οποία όμως δεν είναι η σωστή. Αυτό οφείλεται στο ότι η τιμή 0 ανήκει σε εκείνο το διάστημα τιμών όπου η ρίζα της  $f(\delta)$  στην (7.21) είναι ίση με  $\delta_2$ . Συνεπώς, στην περίπτωση αυτή, και οι δύο εφικτές λύσεις πρέπει να γίνουν αποδεκτές και απαιτείται επιπλέον διερεύνηση, από τα συνεργεία αποκατάστασης, για τον εντοπισμό της πραγματικής θέσης του σφάλματος.



Σχήμα 7.5 Πιθανές λύσεις για τη γωνία συγχρονισμού  $\delta$  για ένα τριφασικό σφάλμα με  $R_F = 10 \ \Omega$  στο 80% του μήκους της γραμμής

Πίνακας 7.8 Εφικτές εκτιμήσεις της θέσης του σφάλματος για ένα τριφασικό σφάλμα με  $R_F = 10 \ \Omega$  στο 80% του μήκους της γραμμής μεταφοράς

Πιθανές λύσεις για τη 'δ' (rad)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)		Εκτιμώμενη γωνία συγχρονισμού (rad.)
	'I'	'II'	'II'
-2.9086	-1.7054	N/A	N/A
-0.0470	0.5468	0.5546	-0.0471
0.1655	0.7767	0.7987	0.1709
0.5287	0.3225	0.3251	0.5316

### 7.3.3 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου

Οι Πίνακες 7.9 έως 7.11 αποτυπώνουν την επίδραση της μεταβολής της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, για κάθε τύπο ασύμμετρου σφάλματος (LG, LL, LLG) αντίστοιχα. Τα σφάλματα που εμπλέκουν τη γη έχουν διερευνηθεί για αντιστάσεις σφάλματος που κυμαίνονται από 0 έως 500  $\Omega$ . Αυτό το διάστημα τιμών καλύπτει όλες τις περιπτώσεις σφαλμάτων γης, χαμηλής και υψηλής αντίστασης. Τα σφάλματα που δεν εμπλέκουν τη γη έχουν διερευνηθεί για αντιστάσεις σφάλματος από 0 έως 30  $\Omega$ . Οι τιμές αυτές ξεπερνούν κατά πολύ τις τυπικές τιμές της αντίστασης τόξου, οι οποίες αναφέρονται στην [24]. Σε κάθε περίπτωση, η πραγματική θέση του σφάλματος έχει θεωρηθεί ίση με 0.6 α.μ., ενώ οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στο τοπικό και απομακρυσμένο άκρο της γραμμής έχουν θεωρηθεί ίσες με τις ονομαστικές. Παρατηρείται ότι οι εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος είναι εξαιρετικά ακριβείς, γεγονός που καταδεικνύει ότι η μέθοδος είναι ανεξάρτητη από την αντίσταση σφάλματος.

**Πίνακας 7.9 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.)**

Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Τύπος Σφάλματος					
	AG		BG		CG	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
0	0.600	0.045	0.600	0.023	0.600	0.024
1	0.600	0.039	0.600	0.023	0.600	0.025
5	0.600	0.020	0.600	0.025	0.600	0.033
10	0.600	0.006	0.600	0.028	0.600	0.042
20	0.600	0.005	0.600	0.033	0.601	0.053
50	0.600	0.003	0.600	0.041	0.601	0.061
100	0.600	0.008	0.601	0.051	0.601	0.065
200	0.600	0.031	0.601	0.070	0.601	0.072
400	0.599	0.081	0.601	0.108	0.601	0.087
500	0.599	0.107	0.601	0.127	0.601	0.094

**Πίνακας 7.10 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.)**

Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Τύπος Σφάλματος					
	AB		BC		CA	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
0	0.600	0.032	0.601	0.046	0.600	0.008
0.5	0.600	0.035	0.600	0.045	0.600	0.007
1	0.600	0.039	0.600	0.044	0.600	0.007
2.5	0.601	0.046	0.600	0.043	0.600	0.005
5	0.601	0.051	0.600	0.041	0.600	0.001
7.5	0.601	0.052	0.600	0.041	0.600	0.004
10	0.601	0.050	0.600	0.042	0.600	0.009
15	0.600	0.044	0.600	0.044	0.600	0.017
20	0.600	0.038	0.601	0.046	0.600	0.022
30	0.600	0.031	0.601	0.049	0.600	0.027

**Πίνακας 7.11 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για διφασικά ως προς γη σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u.)**

Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Τύπος Σφάλματος					
	ABG		BCG		CAG	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
0	0.600	0.034	0.601	0.048	0.600	0.019
1	0.600	0.033	0.601	0.048	0.600	0.018
5	0.600	0.031	0.601	0.048	0.600	0.015
10	0.600	0.029	0.601	0.048	0.600	0.013
25	0.600	0.028	0.601	0.048	0.600	0.009
50	0.600	0.028	0.601	0.048	0.600	0.007
100	0.600	0.029	0.601	0.047	0.600	0.007
150	0.600	0.030	0.601	0.046	0.600	0.007
200	0.600	0.031	0.601	0.046	0.600	0.007
250	0.600	0.031	0.601	0.046	0.600	0.007

### 7.3.4 Επίδραση των ισοδύναμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια της μεθόδου

Οι Πίνακες 7.12 έως 7.14 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για τη θέση του σφάλματος, όταν μεταβάλλεται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση στο τοπικό, στο απομακρυσμένο και στα δύο συγχρόνως άκρα της γραμμής μεταφοράς, αντίστοιχα. Οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν τρεις αντιπροσωπευτικούς τύπους σφαλμάτων (AG, BC, BCG) ενώ η πραγματική θέση του σφάλματος έχει θεωρηθεί ίση με 0.6 α.μ. και η αντίσταση σφάλματος ίση με 5 Ω. Οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στο τοπικό και στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής έχουν τεθεί ίσες με 20%, 50%, 100%, 200%, 250% των αντίστοιχων ονομαστικών τους τιμών. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, οι μεταβολές των ισοδύναμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς έχουν πολύ μικρή επίδραση στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, παρά το γεγονός ότι το ποσοστιαίο σφάλμα εκτίμησης μεγαλώνει με την αύξηση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης, π.χ. για μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης ίση με 250% της ονομαστικής (περίπτωση ασθενούς ισοδύναμου δικτύου).

**Πίνακας 7.12 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 Ω)**

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής (%)	Τύπος σφάλματος					
	AG		BC		BCG	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
20	0.601	0.090	0.601	0.131	0.601	0.132
50	0.601	0.057	0.601	0.093	0.601	0.092
100	0.600	0.020	0.600	0.042	0.601	0.048
200	0.600	0.032	0.600	0.033	0.600	0.030
250	0.599	0.059	0.599	0.058	0.600	0.054

**Πίνακας 7.13 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 Ω)**

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρο R της γραμμής (%)	Τύπος σφάλματος					
	AG		BC		BCG	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
20	0.599	0.146	0.600	0.050	0.600	0.016
50	0.599	0.091	0.600	0.043	0.600	0.037
100	0.600	0.020	0.600	0.041	0.601	0.048
200	0.602	0.195	0.602	0.240	0.603	0.260
250	0.602	0.185	0.604	0.372	0.604	0.404

**Πίνακας 7.14 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S και R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 0.6 p.u., αντίσταση σφάλματος: 5 Ω)**

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S&R της γραμμής (%)	Τύπος Σφάλματος					
	AG		BC		BCG	
	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης (%)
20	0.599	0.094	0.600	0.022	0.600	0.015
50	0.600	0.040	0.600	0.010	0.600	0.005
100	0.600	0.020	0.600	0.041	0.601	0.048
200	0.601	0.136	0.601	0.113	0.601	0.121
250	0.601	0.113	0.602	0.149	0.602	0.167

### 7.3.5 Επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια της μεθόδου

Στην πράξη, τόσο οι μετασχηματιστές τάσης όσο και οι μετασχηματιστές έντασης εισάγουν σημαντικά σφάλματα μέτρησης. Για να εξεταστεί η επίδραση τόσο των συστηματικών όσο και των τυχαίων σφαλμάτων μέτρησης στην προτεινόμενη μέθοδο, έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας της μεθόδου ως προς τα σφάλματα αυτά. Συστηματικά σφάλματα της τάξης του 2% για το μέτρο και 2<sup>ο</sup> για τη γωνία προστίθενται στις μετρούμενες τάσεις και εντάσεις στα δύο άκρα της γραμμής. Έχει ληφθεί υπόψη η χειρότερη περίπτωση, δηλαδή αυτή στην οποία οι μετρήσεις στα άκρα S και R εμφανίζουν το μέγιστο σφάλμα μέτρησης αλλά με αντίθετα πρόσημα για τα μέτρα (+2% για  $V_{local}$  / -2% για  $V_{remote}$  ή +2% για  $I_{local}$  / -2% για  $I_{remote}$ ) ή τις γωνίες (+2<sup>ο</sup> για  $V_{local}$  / -2<sup>ο</sup> για  $V_{remote}$  ή +2<sup>ο</sup> για  $I_{local}$  / -2<sup>ο</sup> για  $I_{remote}$ ).

Για παράδειγμα, αν οι τάσεις ή οι εντάσεις στα άκρα της γραμμής έχουν συστηματικό σφάλμα 2% (2% στο άκρο S και -2% στο άκρο R) στο μέτρο τους, τότε οι εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος, που προκύπτουν από την προτεινόμενη μέθοδο, για κάθε τύπο μονοφασικού σφάλματος εμφανίζονται στους Πίνακες 7.15 και 7.17 αντίστοιχα. Οι Πίνακες 7.16 και 7.18 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μεθόδου για συστηματικό σφάλμα 2<sup>ο</sup> (2<sup>ο</sup> στο άκρο S και -2<sup>ο</sup> στο άκρο R) στη γωνία των τάσεων ή των εντάσεων στα δύο άκρα της γραμμής, αντίστοιχα. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, τα συστηματικά σφάλματα των μετρήσεων επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου, για διαφορετικές θέσεις σφάλματος κατά μήκος της γραμμής και για κάθε εμπλεκόμενη στο σφάλμα φάση. Αυτό έχει να κάνει, κυρίως, με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της γραμμής. Παρόλα αυτά, πρέπει να επισημανθεί ότι η ευαισθησία των εκτιμήσεων για τη θέση του σφάλματος, ως προς τα συστηματικά σφάλματα μέτρησης, είναι σχετικά μικρή, ενώ το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης δεν ξεπερνά το 4% – που είναι και το συνολικό συστηματικό σφάλμα μέτρησης που έχει θεωρηθεί στα δύο άκρα της γραμμής. Τα αποτελέσματα της μεθόδου για άλλους τύπους σφαλμάτων είναι συγκρίσιμα.

Αντίστοιχα έχει διερευνηθεί η επίδραση τυχαίων σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo [52], όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.6. Έχει θεωρηθεί ότι τα σφάλματα των μετρούμενων φασιθετών τάσης και έντασης στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά και προς τις δύο διαστάσεις τους – μέτρο και γωνία, και ακολουθούν την κανονική κατανομή. Επιπλέον, στη συγκεκριμένη ανάλυση έχει γίνει η παραδοχή ότι η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων μέτρησης είναι 2% για το μέτρο και 2<sup>ο</sup> για τη γωνία των φασιθετών των τάσεων και εντάσεων.

**Πίνακας 7.15 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2% στο μέτρο των μετρούμενων τάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος ( $\Omega$ )	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης θέσης σφάλματος (%)
AG	10	0.2	0.1882	1.1771
		0.4	0.3952	0.4808
		0.6	0.5840	1.5963
		0.8	0.7679	3.2140
	100	0.2	0.1879	1.2067
		0.4	0.3952	0.4808
		0.6	0.5840	1.5999
		0.8	0.7673	3.2657
BG	10	0.2	0.1873	1.2665
		0.4	0.3948	0.5200
		0.6	0.5820	1.7981
		0.8	0.7613	3.8716
	100	0.2	0.1860	1.4035
		0.4	0.3950	0.4977
		0.6	0.5824	1.7555
		0.8	0.7617	3.8335
CG	10	0.2	0.1895	1.0520
		0.4	0.3954	0.4591
		0.6	0.5837	1.6338
		0.8	0.7624	3.7605
	100	0.2	0.1899	1.0089
		0.4	0.3953	0.4743
		0.6	0.5836	1.6372
		0.8	0.7625	3.7550

**Πίνακας 7.16 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2<sup>ο</sup> στη γωνία των μετρούμενων τάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

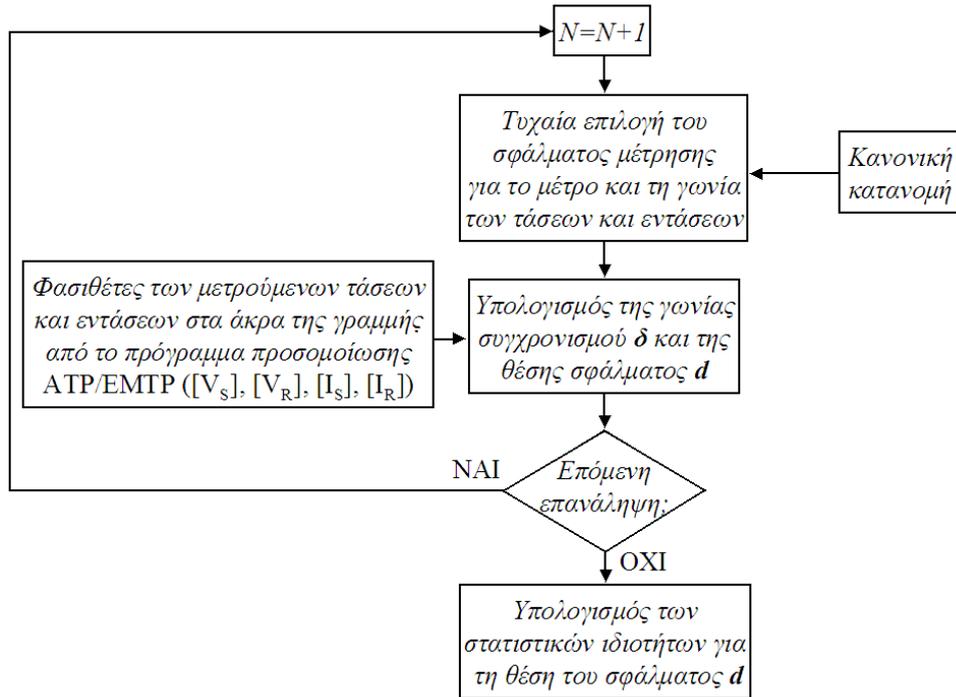
Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος ( $\Omega$ )	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης θέσης σφάλματος (%)
AG	10	0.2	0.2091	0.9135
		0.4	0.3976	0.2429
		0.6	0.5864	1.3574
		0.8	0.7793	2.0655
	100	0.2	0.2092	0.9235
		0.4	0.3973	0.2650
		0.6	0.5862	1.3783
		0.8	0.7786	2.1354
BG	10	0.2	0.2096	0.9616
		0.4	0.3968	0.3156
		0.6	0.5839	1.6139
		0.8	0.7736	2.6399
	100	0.2	0.2094	0.9354
		0.4	0.3972	0.2816
		0.6	0.5842	1.5752
		0.8	0.7737	2.6255
CG	10	0.2	0.2075	0.7481
		0.4	0.3966	0.3434
		0.6	0.5832	1.6826
		0.8	0.7702	2.9833
	100	0.2	0.2076	0.7591
		0.4	0.3965	0.3493
		0.6	0.5834	1.6618
		0.8	0.7705	2.9492

**Πίνακας 7.17 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2% στο μέτρο των μετρούμενων εντάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

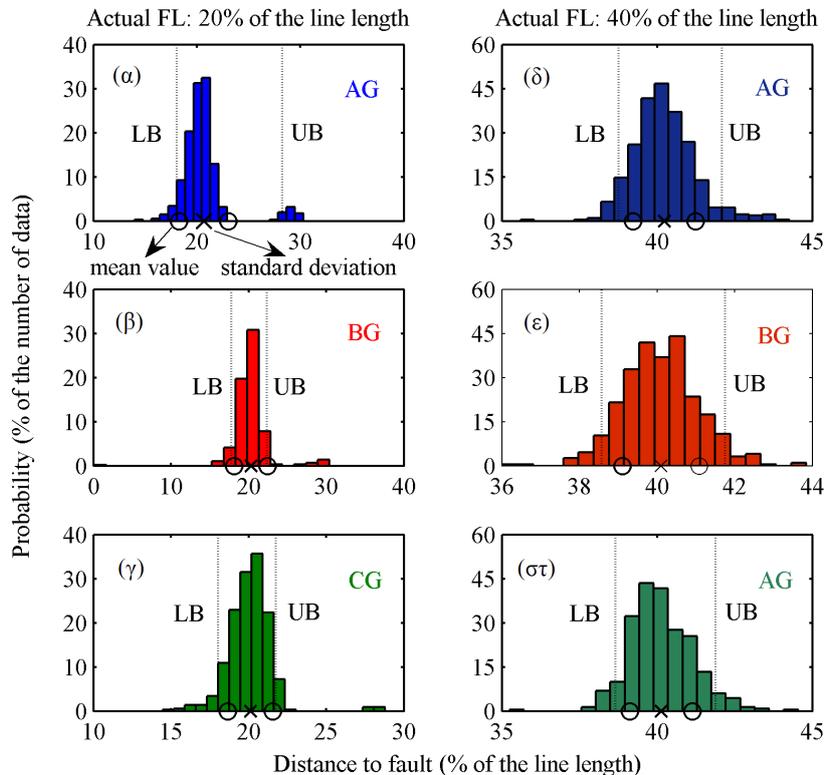
Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος ( $\Omega$ )	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης θέσης σφάλματος (%)
AG	10	0.2	0.194	0.578
		0.4	0.391	0.860
		0.6	0.590	1.032
		0.8	0.791	0.875
	100	0.2	0.194	0.575
		0.4	0.391	0.873
		0.6	0.590	1.035
		0.8	0.791	0.941
BG	10	0.2	0.195	0.516
		0.4	0.392	0.853
		0.6	0.590	1.005
		0.8	0.791	0.917
	100	0.2	0.194	0.566
		0.4	0.392	0.835
		0.6	0.590	0.982
		0.8	0.791	0.924
CG	10	0.2	0.194	0.604
		0.4	0.392	0.846
		0.6	0.590	0.989
		0.8	0.791	0.943
	100	0.2	0.194	0.579
		0.4	0.392	0.845
		0.6	0.590	0.965
		0.8	0.791	0.916

**Πίνακας 7.18 Επίδραση συστηματικού σφάλματος 2<sup>0</sup> στη γωνία των μετρούμενων εντάσεων στην ακρίβεια εκτίμησης της μεθόδου για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος ( $\Omega$ )	Πραγματική θέση σφάλματος (p.u)	Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (p.u)	Σφάλμα εκτίμησης θέσης σφάλματος (%)
AG	10	0.2	0.190	0.966
		0.4	0.405	0.533
		0.6	0.616	1.597
		0.8	0.822	2.224
	100	0.2	0.190	0.982
		0.4	0.405	0.531
		0.6	0.616	1.618
		0.8	0.822	2.163
BG	10	0.2	0.192	0.813
		0.4	0.407	0.661
		0.6	0.621	2.087
		0.8	0.830	3.032
	100	0.2	0.191	0.893
		0.4	0.407	0.662
		0.6	0.621	2.094
		0.8	0.830	3.003
CG	10	0.2	0.193	0.720
		0.4	0.407	0.736
		0.6	0.624	2.444
		0.8	0.841	4.098
	100	0.2	0.193	0.678
		0.4	0.407	0.743
		0.6	0.625	2.460
		0.8	0.841	4.102



Σχήμα 7.6 Διαδικασία υπολογισμού στατιστικών ιδιοτήτων ως προς τη θέση του σφάλματος λόγω της ύπαρξης τυχαίων σφαλμάτων μέτρησης με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo



Σχήμα 7.7 Κατανομή των εκτιμήσεων για τη θέση του σφάλματος σε περίπτωση ανακρίβειας των μετρήσεων

Η άγνωστη θέση του σφάλματος ορίζεται ως τυχαία μεταβλητή και τα αποτελέσματα που προκύπτουν για αυτή εκφράζονται από ένα σύνολο στατιστικών ιδιοτήτων (μέση τιμή, τυπική

απόκλιση, διάστημα εμπιστοσύνης κτλ.). Ο αριθμός επαναλήψεων  $N$  της μεθόδου Monte-Carlo στο Σχήμα 7.6 έχει τεθεί ίσος με 1000 προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή ακρίβεια.

Το Σχήμα 7.7 απεικονίζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος, για τρεις αντιπροσωπευτικούς τύπους σφαλμάτων (AG, BC, BCG), μέσω της ανάλυσης Monte-Carlo. Οι πραγματικές θέσεις του σφάλματος, που έχουν θεωρηθεί, είναι 20% και 40% του μήκους της γραμμής αντίστοιχα, ενώ η αντίσταση σφάλματος σε κάθε περίπτωση είναι ίση με 10 Ω. Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς, το ποσοστιαίο σφάλμα της μέσης τιμής δε ξεπερνά το 0.70% του μήκους της γραμμής για κάθε περίπτωση, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η τυπική απόκλιση είναι ίση με 2.37%. Ο Πίνακας 7.19 συνοψίζει τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τις δύο θέσεις του σφάλματος. Αναλυτικά, παρατίθενται για κάθε περίπτωση οι ακόλουθες στατιστικές ιδιότητες: μέση τιμή, τυπική απόκλιση, διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Είναι εμφανές, από τον Πίνακα 7.19, ότι η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη τυχαίου σφάλματος μέτρησης στα μέτρα και τις γωνίες των φασιθετών τάσης και έντασης στα άκρα της γραμμής μεταφοράς. Επιπλέον, για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση, η τυπική απόκλιση για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος δεν ξεπερνά τη μέγιστη ανακρίβεια των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων.

**Πίνακας 7.19 Περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος (αντίσταση σφάλματος  $R_F$ : 10 Ω)**

Τύπος σφάλματος	Στατιστικά αποτελέσματα θέσης σφάλματος		Πραγματική θέση σφάλματος (% του μήκους γραμμής)	
			Εκτιμώμενη θέση σφάλματος (% του μήκους γραμμής)	
			20	40
AG	Μέση τιμή		20.65	40.23
	Τυπική απόκλιση		2.37	1.01
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κατώτερο όριο	18.09	38.76
		Ανώτερο όριο	28.27	42.09
BG	Μέση τιμή		20.30	40.10
	Τυπική Απόκλιση		2.15	0.99
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κατώτερο όριο	17.77	38.58
		Ανώτερο όριο	22.36	41.76
CG	Μέση τιμή		20.11	40.13
	Τυπική Απόκλιση		1.45	1.01
	95% Διάστημα Εμπιστοσύνης	Κατώτερο όριο	18.04	38.65
		Ανώτερο όριο	21.75	41.88

## 7.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μία νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος, με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων στα άκρα τους πριν και κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές αξιολόγησης, καταδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου, τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

- Οι παράμετροι της γραμμής μεταφοράς δε χρησιμοποιούνται.
- Δεν απαιτείται εξειδικευμένος αλγόριθμος για την ανίχνευση των φάσεων που εμπλέκονται στο σφάλμα, εκτός από τη διάκριση μεταξύ συμμετρικών και ασύμμετρων σφαλμάτων.
- Οι ισοδύναμες πηγές στα άκρα της γραμμής μεταφοράς και η αντίσταση σφάλματος δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς της μεθόδου.
- Οι συμμετρικές συνιστώσες των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων δε χρειάζεται να υπολογιστούν.
- Ακόμα και για γραμμές χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, η προτεινόμενη μέθοδος δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Σε κάθε στάδιο της μεθόδου επιτυγχάνεται πολύ γρήγορη σύγκλιση με μικρό αριθμό επαναλήψεων.
- Η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα σφάλματα μέτρησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

# ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

## 8.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο εξετάστηκε μια νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος. Η μέθοδος αυτή απαλείφει πλήρως τις παραμέτρους των γραμμών από το πρόβλημα προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος και βασίζεται αποκλειστικά στις διενεργούμενες (μη συγχρονισμένες) μετρήσεις στα δύο άκρα των γραμμών. Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μια αντίστοιχη μέθοδος για γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος [15].

Στην περίπτωση των γραμμών διπλού κυκλώματος, εκτός από τις ηλεκτρικές παραμέτρους που σχετίζονται με κάθε κύκλωμα της διπλής γραμμής ξεχωριστά, προστίθενται επιπλέον οι παράμετροι που αντιπροσωπεύουν την αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των δύο παράλληλων κυκλωμάτων, γεγονός που καθιστά πολύ δύσκολη την αποδέσμευση του προβλήματος προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος από τις παραμέτρους των γραμμών. Για το λόγο αυτό, ελάχιστες μέθοδοι έχουν προταθεί μέχρι σήμερα προς αυτή την κατεύθυνση ([30], [223]). Οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούν συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών των τάσεων και εντάσεων στα άκρα της διπλής γραμμής, γεγονός που τις καθιστά οικονομικά ασύμφορες, ενώ επιπλέον αξιοποιούν και δεδομένα μέτρησης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος, γεγονός που μειώνει την αξιοπιστία τους και αυξάνει σημαντικά τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να μεταφερθούν μέσω καναλιών επικοινωνίας από κάθε άκρο της γραμμής. Επιπλέον, η μέθοδος της [223] μπορεί να εφαρμοστεί αποκλειστικά σε γραμμές με πλήρως αντιμετατεθειμένους αγωγούς, ενώ αυτή της [30] μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για γραμμές χωρίς αντιμετάθεση.

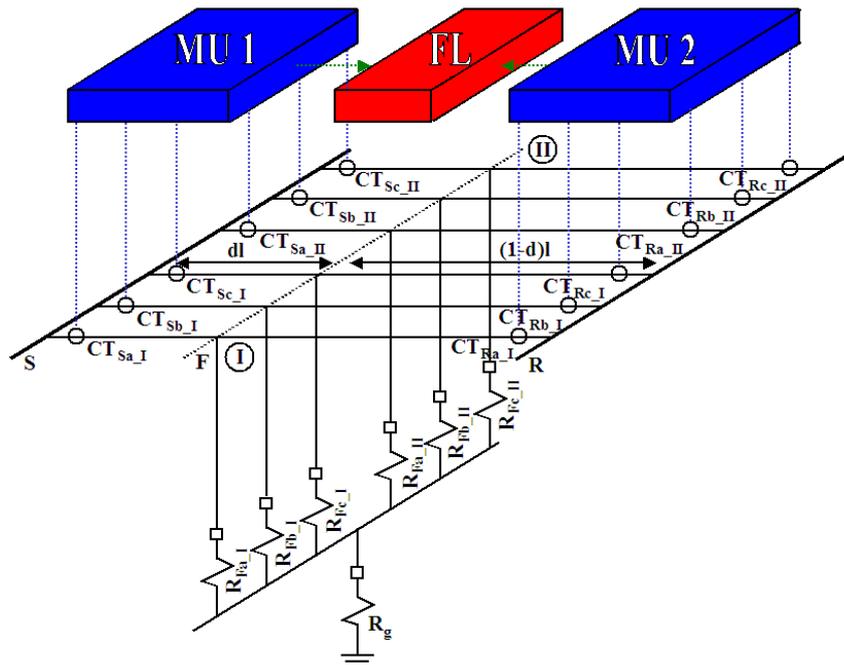
Σε αντίθεση με τις παραπάνω μεθόδους, η μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, η οποία εξετάζεται στο κεφάλαιο αυτό [15], χρησιμοποιεί αποκλειστικά μη συγχρονισμένες μετρήσεις των εντάσεων στα άκρα των διπλών γραμμών. Η μαθηματική διατύπωση της μεθόδου βασίζεται στο ονομαστικό  $\Pi$  κύκλωμα γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους, παρέχοντας έτσι αντιστάθμιση και για τα χωρητικά ρεύματα που αναπτύσσονται σε γραμμές μεγάλου μήκους. Η μέθοδος αξιοποιεί το νόμο των τάσεων του Kirchhoff στο βρόχο που ορίζουν τα δύο παράλληλα κυκλώματα της διπλής γραμμής κατά τη διάρκεια του σφάλματος, προκειμένου να εξαχθεί μια μιγαδική εξίσωση που περιλαμβάνει τη θέση του σφάλματος και την αντίστοιχη γωνία συγχρονισμού. Στη συνέχεια, οι δύο άγνωστοι υπολογίζονται με μία μη επαναληπτική διαδικασία, που αποτελεί ένα σημαντικό βήμα μπροστά σε σχέση με τις υπάρχουσες μεθόδους. Η προτεινόμενη μέθοδος κάνει χρήση μόνο των μετρούμενων φασιθετών των εντάσεων θετικής ακολουθίας, που αντιστοιχούν στους πρώτους κύκλους του σφάλματος, μειώνοντας έτσι δραστικά τον αριθμό των δεδομένων μέτρησης που πρέπει να μεταφερθούν από τα άκρα μιας διπλής γραμμής. Επιπλέον, η μέθοδος δεν απαιτεί τη χρήση εξειδικευμένου αλγορίθμου ανίχνευσης του τύπου σφάλματος, προκειμένου για τον καθορισμό των εμπλεκόμενων στο σφάλμα φάσεων.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται λεπτομερώς η προτεινόμενη μέθοδος και παρατίθενται αναλυτικά αποτελέσματα αξιολόγησής της με χρήση του προγράμματος υπολογισμού ταχέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ATP/EMTP ([43], [44]) και του υπολογιστικού περιβάλλοντος της MATLAB [159].

## 8.2 Μαθηματική θεμελίωση της προτεινόμενης μεθόδου

Το προτεινόμενο σχήμα εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος απεικονίζεται στο Σχήμα 8.1. Σε κάθε άκρο της διπλής γραμμής (S, R) υπάρχουν μετασχηματιστές

έντασης (ME), οι οποίοι παρέχουν τις υποβιβασμένες εντάσεις στις μονάδες μέτρησης και καταγραφής συμβάντων (MUs – Measuring Units). Στις μονάδες αυτές πραγματοποιούνται ψηφιακές μετρήσεις ώστε να προσδιοριστούν οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των φασικών ρευμάτων. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών για τον υπολογισμό των εντάσεων θετικής ακολουθίας, που αποτελούν και τα μοναδικά δεδομένα εισόδου της προτεινόμενης μεθόδου. Τα δεδομένα μέτρησης από κάθε άκρο της διπλής γραμμής μεταφέρονται μέσω καναλιών επικοινωνίας στη μονάδα εντοπισμού σφαλμάτων (FL – Fault Locator), η οποία θεωρείται ως ανεξάρτητη διάταξη, άμα τη εκδηλώσει του σφάλματος. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει έλεγχος των διενεργούμενων ψηφιακών μετρήσεων στα άκρα της γραμμής μέσω σήματος GPS (Global Positioning System). Αυτό συνεπάγεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και για μη συγχρονισμένες μετρήσεις.



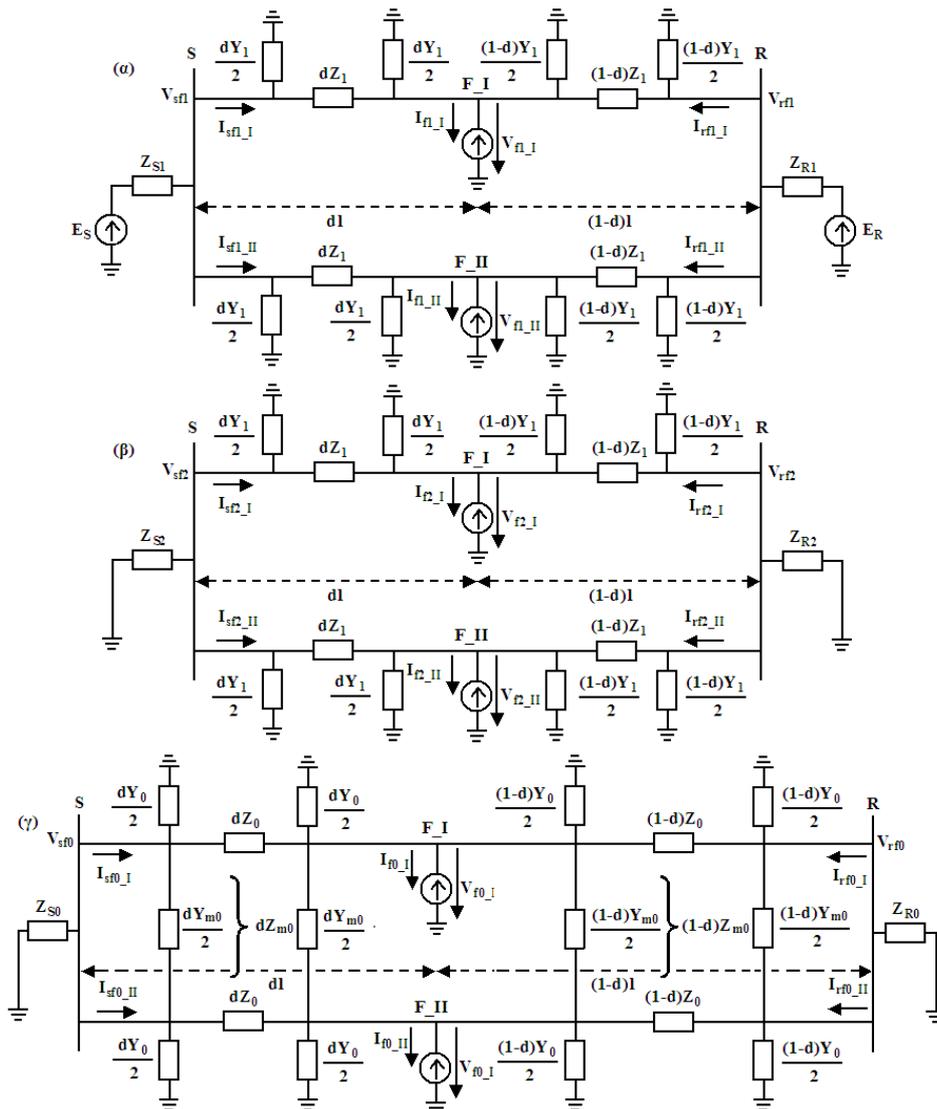
**Σχήμα 8.1** Απεικόνιση του προτεινόμενου σχήματος εντοπισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων

Ο αστέρας που συνθέτουν οι αντιστάσεις σφάλματος στο Σχήμα 8.1 επιτρέπει την αναπαράσταση κάθε τύπου σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος – ακόμα και σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της γραμμής, απαλείφοντας κάθε φορά τους κλάδους εκείνους των αντιστάσεων σφάλματος που δεν υφίστανται στο θεωρούμενο σφάλμα. Για παράδειγμα, ο τύπος σφάλματος IAIBG - που εμπλέκει τη φάση A από το κύκλωμα I και τη φάση B από το κύκλωμα II της διπλής γραμμής, καθώς και τη γη – αναπαρίσταται διατηρώντας τους κλάδους  $R_{Fa\_I}$ ,  $R_{Fb\_II}$  και  $R_g$  στον αστέρα των αντιστάσεων σφάλματος και απαλείφοντας τους υπολοίπους. Κάνοντας χρήση του παραπάνω κυκλωματικού μοντέλου για την αναπαράσταση του σφάλματος σε γραμμές διπλού κυκλώματος μπορεί να εξαχθεί πολύ εύκολα η μαθηματική διατύπωση της προτεινόμενης μεθόδου για γραμμές με και χωρίς αντιμετάθεση φάσεων.

### 8.2.1 Γραμμές διπλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων

Στο Σχήμα 8.2 απεικονίζονται τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας μιας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος για ένα ασύμμετρο σφάλμα στο σημείο F της γραμμής. Η γραμμή μεταφοράς αναπαρίσταται με το ονομαστικό  $\Pi$  κύκλωμα. Γίνεται η θεώρηση ότι τα δύο παράλληλα κυκλώματα της γραμμής είναι πανομοιότυπα και ότι στους αγωγούς τους εφαρμόζεται πλήρης αντιμετάθεση φάσεων. Στο Σχήμα 8.2 χρησιμοποιείται η ακόλουθη ονοματολογία:

$\{V_{sf1}, V_{sf2}, V_{sf0}\}, \{I_{sf1\_1}, I_{sf2\_1}, I_{sf0\_1}\}, \{I_{sf1\_II}, I_{sf2\_II}, I_{sf0\_II}\}$ : ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο άκρο S της γραμμής κατά το σφάλμα,  
 $\{V_{rf1}, V_{rf2}, V_{rf0}\}, \{I_{rf1\_1}, I_{rf2\_1}, I_{rf0\_1}\}, \{I_{rf1\_II}, I_{rf2\_II}, I_{rf0\_II}\}$ : ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο άκρο R της γραμμής κατά το σφάλμα,  
 $\{V_{f1\_1}, V_{f2\_1}, V_{f0\_1}\}, \{V_{f1\_II}, V_{f2\_II}, V_{f0\_II}\}, \{I_{f1\_1}, I_{f2\_1}, I_{f0\_1}\}, \{I_{f1\_II}, I_{f2\_II}, I_{f0\_II}\}$ : ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο F του σφάλματος,  
 $\{Z_1, Z_0, Z_{m0}\}, \{Y_1, Y_0, Y_{m0}\}$ : θετική, μηδενική και αμοιβαία μηδενική σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα της γραμμής αντίστοιχα,  
 $d$ : απόσταση της θέσης του σφάλματος από το άκρο αναφοράς S της γραμμής α.μ. (p.u.).



Σχήμα 8.2 Κύκλωμα (α) θετικής, (β) αρνητικής και (γ) μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων κατά το σφάλμα

Με βάση το Σχήμα 8.2(α) προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις για την τάση θετικής ακολουθίας στο απομακρυσμένο άκρο R της γραμμής:

$$V_{rf1}e^{i\delta} = V_{sf1} - (I_{sf1\_1} - V_{sf1}(dY_1/2))dZ_1 + (I_{rf1\_1}e^{i\delta} - V_{rf1}e^{i\delta}((1-d)Y_1/2))(1-d)Z_1 \quad (8.1)$$

$$V_{rf1}e^{i\delta} = V_{sf1} - (I_{sf1\_II} - V_{sf1}(dY_1/2))dZ_1 + (I_{rf1\_II}e^{i\delta} - V_{rf1}e^{i\delta}((1-d)Y_1/2))(1-d)Z_1 \quad (8.2)$$

όπου  $\delta$  είναι η γωνία συγχρονισμού μεταξύ των μετρήσεων στα άκρα S και R της γραμμής, η οποία αναπαριστά οποιοδήποτε τυχόν σφάλμα συγχρονισμού.

Τροποποιώντας τις (8.1) και (8.2), είναι:

$$V_{sf1} \left( 1 + d^2 (Y_1/2) Z_1 \right) - V_{rf1} e^{i\delta} \left( 1 + (1-d)^2 (Y_1/2) Z_1 \right) = dI_{sf1\_I} Z_1 - (1-d)I_{rf1\_I} e^{i\delta} Z_1 \quad (8.3)$$

$$V_{sf1} \left( 1 + d^2 (Y_1/2) Z_1 \right) - V_{rf1} e^{i\delta} \left( 1 + (1-d)^2 (Y_1/2) Z_1 \right) = dI_{sf1\_II} Z_1 - (1-d)I_{rf1\_II} e^{i\delta} Z_1 \quad (8.4)$$

Αφαιρώντας την (8.4) από την (8.3), προκύπτει:

$$\left( d(I_{sf1\_I} - I_{sf1\_II}) - (1-d)(I_{rf1\_I} - I_{rf1\_II}) e^{i\delta} \right) Z_1 = 0 \quad (8.5)$$

ή ισοδύναμα:

$$d(I_{sf1\_I} - I_{sf1\_II}) - (1-d)(I_{rf1\_I} - I_{rf1\_II}) e^{i\delta} = 0 \quad (8.6)$$

Με βάση το Σχήμα 8.2(β) και ακολουθώντας μια αντίστοιχη διαδικασία όπως παραπάνω, προκύπτει μια εξίσωση ανάλογη με την (8.6), η οποία συνδέει τις εντάσεις αρνητικής ακολουθίας στα άκρα της διπλής γραμμής:

$$d(I_{sf2\_I} - I_{sf2\_II}) - (1-d)(I_{rf2\_I} - I_{rf2\_II}) e^{i\delta} = 0 \quad (8.7)$$

Στην περίπτωση του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, όπως προκύπτει από το Σχήμα 8.2(γ), η τάση μηδενικής ακολουθίας στο άκρο R της γραμμής ικανοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις [147]:

$$\begin{aligned} V_{rf0} e^{i\delta} &= V_{sf0} - \left( I_{sf0\_I} - V_{sf0} (dY_0/2 + dY_{m0}/2) + V_{sf0} (dY_{m0}/2) \right) dZ_0 \\ &- \left( I_{sf0\_II} - V_{sf0} (dY_0/2 + dY_{m0}/2) + V_{sf0} (dY_{m0}/2) \right) dZ_{m0} \\ &+ \left( I_{rf0\_I} e^{i\delta} - V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_0/2 + (1-d)Y_{m0}/2 \right) + V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_{m0}/2 \right) \right) (1-d)Z_0 \\ &+ \left( I_{rf0\_II} e^{i\delta} - V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_0/2 + (1-d)Y_{m0}/2 \right) + V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_{m0}/2 \right) \right) (1-d)Z_{m0} \end{aligned} \quad (8.8)$$

$$\begin{aligned} V_{rf0} e^{i\delta} &= V_{sf0} - \left( I_{sf0\_II} - V_{sf0} (dY_0/2 + dY_{m0}/2) + V_{sf0} (dY_{m0}/2) \right) dZ_0 \\ &- \left( I_{sf0\_I} - V_{sf0} (dY_0/2 + dY_{m0}/2) + V_{sf0} (dY_{m0}/2) \right) dZ_{m0} \\ &+ \left( I_{rf0\_II} e^{i\delta} - V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_0/2 + (1-d)Y_{m0}/2 \right) + V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_{m0}/2 \right) \right) (1-d)Z_0 \\ &+ \left( I_{rf0\_I} e^{i\delta} - V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_0/2 + (1-d)Y_{m0}/2 \right) + V_{rf0} e^{i\delta} \left( (1-d)Y_{m0}/2 \right) \right) (1-d)Z_{m0} \end{aligned} \quad (8.9)$$

Αναδιατάσσοντας τις (8.8) και (8.9), είναι:

$$\begin{aligned} V_{sf0} \left( 1 + d^2 (Y_0/2)(Z_0 + Z_{m0}) \right) - V_{rf0} e^{i\delta} \left( 1 + (1-d)^2 (Y_0/2)(Z_0 + Z_{m0}) \right) \\ = dI_{sf0\_I} Z_0 + dI_{sf0\_II} Z_{m0} - (1-d)I_{rf0\_I} e^{i\delta} Z_0 - (1-d)I_{rf0\_II} e^{i\delta} Z_{m0} \end{aligned} \quad (8.10)$$

$$\begin{aligned} V_{sf0} \left( 1 + d^2 (Y_0/2)(Z_0 + Z_{m0}) \right) - V_{rf0} e^{i\delta} \left( 1 + (1-d)^2 (Y_0/2)(Z_0 + Z_{m0}) \right) \\ = dI_{sf0\_II} Z_0 + dI_{sf0\_I} Z_{m0} - (1-d)I_{rf0\_II} e^{i\delta} Z_0 - (1-d)I_{rf0\_I} e^{i\delta} Z_{m0} \end{aligned} \quad (8.11)$$

Αφαιρώντας την (8.11) από την (8.10), προκύπτει:

$$\left( d(I_{sf0\_I} - I_{sf0\_II}) - (1-d)(I_{rf0\_I} - I_{rf0\_II}) e^{i\delta} \right) (Z_0 - Z_{m0}) = 0 \quad (8.12)$$

ή ισοδύναμα:

$$d(I_{sf0\_I} - I_{sf0\_II}) - (1-d)(I_{rf0\_I} - I_{rf0\_II}) e^{i\delta} = 0 \quad (8.13)$$

Οι εξισώσεις (8.6), (8.7) και (8.13) αποτελούν τη βάση για τον προσδιορισμό της γωνίας συγχρονισμού και της θέσης του σφάλματος, χωρίς τη χρήση των παραμέτρων της γραμμής, αξιοποιώντας αντίστοιχα τις εντάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στα άκρα της γραμμής διπλού κυκλώματος. Από τις (8.6), (8.7) και (8.13) προκύπτει ότι:

$$d = \frac{A_2 e^{j\delta}}{A_1 + A_2 e^{j\delta}} \quad (8.14)$$

όπου  $A_1$  και  $A_2$  σταθερές που ορίζονται ως ακολούθως:

$$A_1 = I_{sfk\_I} - I_{sfk\_II} \quad (8.15)$$

$$A_2 = I_{rfk\_I} - I_{rfk\_II} \quad (8.16)$$

και  $k = 0, 1, 2$  αναπαριστά τη συνιστώσα μηδενικής, θετικής και αρνητικής ακολουθίας αντίστοιχα. Στην εξίσωση (8.14), η θέση του σφάλματος  $d$  είναι πραγματικός αριθμός. Κατά συνέπεια, το φανταστικό μέρος της (8.14) πρέπει να ισούται με 0, ή ισοδύναμα:

$$\frac{A_2 e^{j\delta}}{A_1 + A_2 e^{j\delta}} - \frac{A_2^* e^{-j\delta}}{A_1^* + A_2^* e^{-j\delta}} = 0 \quad (8.17)$$

Απλοποιώντας την (8.17), προκύπτει:

$$f(\delta) = a_1 \sin(\delta) + b_1 \cos(\delta) = \tan(\delta) + b_1/a_1 = 0 \quad (8.18)$$

όπου  $a_1$  και  $b_1$  είναι σταθερές, οι οποίες ορίζονται ως εξής:

$$a_1 + jb_1 = A_2 \bar{A}_1 \quad (8.19)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η γωνία συγχρονισμού  $\delta$ :

$$\delta = \tan^{-1}(-b_1/a_1) \quad (8.20)$$

Αφότου προσδιοριστεί η γωνία συγχρονισμού, η θέση του σφάλματος  $d$  υπολογίζεται λαμβάνοντας το πραγματικό μέρος της (8.14):

$$d = \operatorname{Re} \left( \frac{A_2 e^{j\delta}}{A_1 + A_2 e^{j\delta}} \right) \quad (8.21)$$

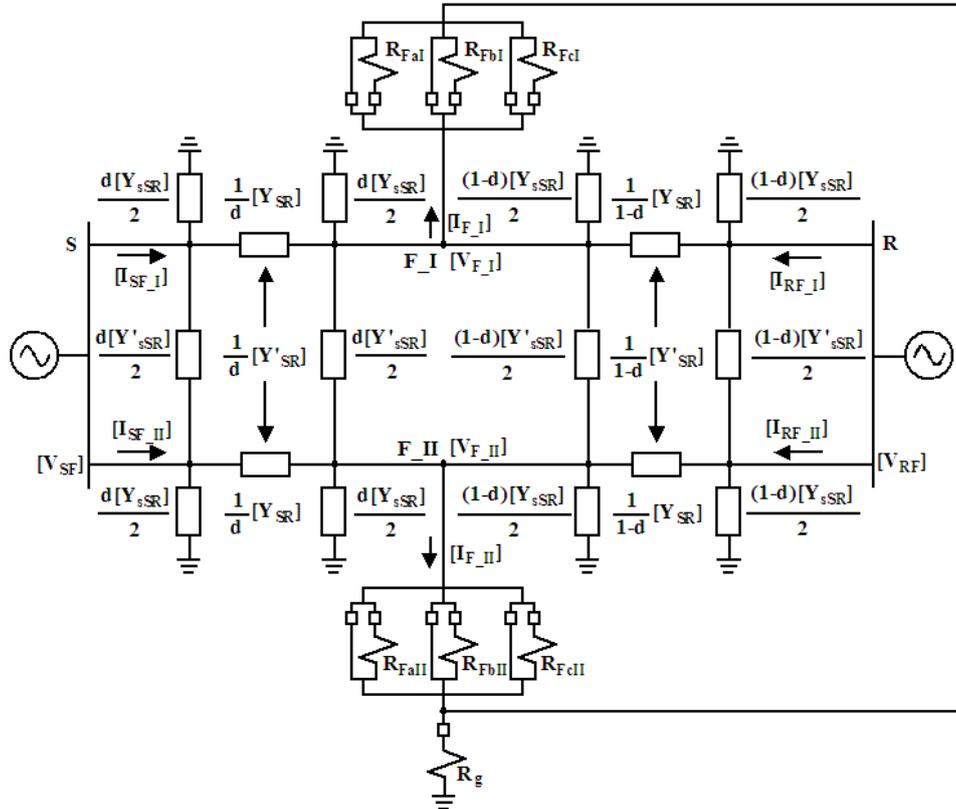
Περιορίζοντας το πεδίο τιμών για τη γωνία συγχρονισμού στο διάστημα  $[0, 2\pi)$ , προκύπτουν δύο μόνο λύσεις για τη  $\delta$  στην (8.20). Η μία λύση βρίσκεται στο διάστημα  $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$ , ενώ η δεύτερη στο διάστημα  $\left(\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}\right)$  και η μεταξύ τους διαφορά είναι  $\pi$  ακτίνια. Για να βρεθεί ποια από τις δύο

λύσεις είναι η σωστή, πρέπει να εξεταστούν οι θέσεις του σφάλματος που αντιστοιχούν σε αυτές μέσω της (8.21). Σε περίπτωση που μία εκ των θέσεων του σφάλματος, όπως λαμβάνονται από την (8.21), βρίσκεται εντός του διαστήματος  $(0, 1)$  α.μ., ενώ η άλλη είναι εκτός του διαστήματος αυτού, τότε η λύση για τη γωνία συγχρονισμού, που αντιστοιχεί στην πρώτη θέση του σφάλματος είναι η σωστή, ενώ η άλλη απορρίπτεται και χαρακτηρίζεται ως μη ρεαλιστική ([97], [144], [171], [253]).

Στην περίπτωση γραμμών διπλού κυκλώματος με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας είναι παρούσες σε κάθε τύπο σφάλματος, ενώ οι συνιστώσες αρνητικής ακολουθίας υφίστανται μόνο για ασύμμετρα σφάλματα και οι συνιστώσες μηδενικής ακολουθίας μόνο για σφάλματα που εμπλέκουν τη γη. Συνεπώς, για να αποφευχθεί η χρήση εξειδικευμένου αλγορίθμου επιλογής του τύπου σφάλματος, θα πρέπει η (8.14) να εφαρμόζεται αξιοποιώντας αποκλειστικά τις εντάσεις θετικής ακολουθίας στα άκρα της διπλής γραμμής.

### 8.2.2 Γραμμές διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων

Στο Σχήμα 8.3 απεικονίζεται το ονομαστικό  $\Pi$  κύκλωμα μιας γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων για ένα ασύμμετρο σφάλμα στο σημείο F της γραμμής [82].



Σχήμα 8.3 Ονομαστικό  $\Pi$  κύκλωμα γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων κατά το σφάλμα

Στο Σχήμα 8.3 χρησιμοποιείται η ακόλουθη ονοματολογία:

$[V_{SF}] = [V_{SFa} \ V_{SFb} \ V_{SFc}]^T$ ,  $[I_{SF\_I}] = [I_{SFa\_I} \ I_{SFb\_I} \ I_{SFc\_I}]^T$ ,  $[I_{SF\_II}] = [I_{SFa\_II} \ I_{SFb\_II} \ I_{SFc\_II}]^T$  :  
διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο S της γραμμής κατά το σφάλμα,

$[V_{RF}] = [V_{RFa} \ V_{RFb} \ V_{RFc}]^T$ ,  $[I_{RF\_I}] = [I_{RFa\_I} \ I_{RFb\_I} \ I_{RFc\_I}]^T$ ,  $[I_{RF\_II}] = [I_{RFa\_II} \ I_{RFb\_II} \ I_{RFc\_II}]^T$  :  
διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο άκρο R της γραμμής κατά το σφάλμα,

$[V_{F\_I}] = [V_{Fa\_I} \ V_{Fb\_I} \ V_{Fc\_I}]^T$ ,  $[V_{F\_II}] = [V_{Fa\_II} \ V_{Fb\_II} \ V_{Fc\_II}]^T$ ,  $[I_{F\_I}] = [I_{Fa\_I} \ I_{Fb\_I} \ I_{Fc\_I}]^T$ ,

$[I_{F\_II}] = [I_{Fa\_II} \ I_{Fb\_II} \ I_{Fc\_II}]^T$  : διανύσματα των φασικών τάσεων και εντάσεων στο σημείο F του σφάλματος,

$R_{Fa\_I}, R_{Fb\_I}, R_{Fc\_I}, R_{Fa\_II}, R_{Fb\_II}, R_{Fc\_II}, R_g$  : άγνωστες αντιστάσεις σφάλματος,

$[Y_{SR}] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{a'a'} & Y_{a'b'} & Y_{a'c'} \\ Y_{a'b'} & Y_{b'b'} & Y_{b'c'} \\ Y_{a'c'} & Y_{b'c'} & Y_{c'c'} \end{bmatrix}$  : πίνακας εν σειρά αγωγιμοτήτων (ή αντίστροφος του

συμμετρικού πίνακα των εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων) κάθε κυκλώματος ξεχωριστά της διπλής γραμμής SR (με ή χωρίς αντιμετάθεση φάσεων), όπου  $(a,b,c)$  και  $(a',b',c')$  αντιστοιχούν στο κύκλωμα I και II της γραμμής αντίστοιχα ([80], [81]),

$$[Y'_{SR}] = \begin{bmatrix} Y_{aa'} & Y_{ab'} & Y_{ac'} \\ Y_{ab'} & Y_{bb'} & Y_{bc'} \\ Y_{ac'} & Y_{bc'} & Y_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{a'a} & Y_{a'b} & Y_{a'c} \\ Y_{a'b} & Y_{b'b} & Y_{b'c} \\ Y_{a'c} & Y_{b'c} & Y_{c'c} \end{bmatrix} : \text{πίνακας εν σειρά αγωγιμοτήτων (ή αντίστροφος του}$$

συμμετρικού πίνακα των εν σειρά σύνθετων αντιστάσεων) αμοιβαίας σύζευξης των κυκλωμάτων της διπλής γραμμής SR,

$$[Y_{sSR}] = \begin{bmatrix} Y_{saa} & Y_{sab} & Y_{sac} \\ Y_{sab} & Y_{sbb} & Y_{sbc} \\ Y_{sac} & Y_{sbc} & Y_{scc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{sa'a'} & Y_{sa'b'} & Y_{sa'c'} \\ Y_{sa'b'} & Y_{sb'b'} & Y_{sb'c'} \\ Y_{sa'c'} & Y_{sb'c'} & Y_{sc'c'} \end{bmatrix} : \text{συμμετρικός πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων}$$

κάθε κυκλώματος ξεχωριστά της διπλής γραμμής SR,

$$[Y'_{sSR}] = \begin{bmatrix} Y_{saa'} & Y_{sab'} & Y_{sac'} \\ Y_{sab'} & Y_{sbb'} & Y_{sbc'} \\ Y_{sac'} & Y_{sbc'} & Y_{scc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{sa'a} & Y_{sa'b} & Y_{sa'c} \\ Y_{sa'b} & Y_{sb'b} & Y_{sb'c} \\ Y_{sa'c} & Y_{sb'c} & Y_{sc'e} \end{bmatrix} : \text{συμμετρικός πίνακας εγκάρσιων αγωγιμοτήτων}$$

αμοιβαίας σύζευξης των κυκλωμάτων της διπλής γραμμής SR.

Με βάση το Σχήμα 8.3 προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τις φασικές εντάσεις στο τοπικό άκρο S της γραμμής:

$$\begin{pmatrix} [I_{SF\_I}] \\ [I_{SF\_II}] \end{pmatrix} = \frac{1}{2} d \begin{pmatrix} [Y_{sSR}] + [Y'_{sSR}] & -[Y'_{sSR}] \\ -[Y'_{sSR}] & [Y_{sSR}] + [Y'_{sSR}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [V_{SF}] \\ [V_{SF}] \end{pmatrix} + \frac{1}{d} \begin{pmatrix} [Y_{SR}] & [Y'_{SR}] \\ [Y'_{SR}] & [Y_{SR}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [V_{SF}] - [V_{F\_I}] \\ [V_{SF}] - [V_{F\_II}] \end{pmatrix} \quad (8.22)$$

Αφαιρώντας τον πίνακα  $[I_{SF\_II}]$  από τον  $[I_{SF\_I}]$ , προκύπτει:

$$[I_{SF\_I}] - [I_{SF\_II}] = \frac{1}{d} ([Y'_{SR}] - [Y_{SR}]) ([V_{F\_I}] - [V_{F\_II}]) \quad (8.23)$$

Μία σχέση αντίστοιχη της (8.22) ισχύει για τα φασικά ρεύματα στο απομακρυσμένο άκρο R της γραμμής:

$$\begin{pmatrix} [I_{RF\_I}] e^{i\delta} \\ [I_{RF\_II}] e^{i\delta} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (1-d) \begin{pmatrix} [Y_{sSR}] + [Y'_{sSR}] & -[Y'_{sSR}] \\ -[Y'_{sSR}] & [Y_{sSR}] + [Y'_{sSR}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [V_{RF}] e^{i\delta} \\ [V_{RF}] e^{i\delta} \end{pmatrix} + \frac{1}{1-d} \begin{pmatrix} [Y_{SR}] & [Y'_{SR}] \\ [Y'_{SR}] & [Y_{SR}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [V_{RF}] e^{i\delta} - [V_{F\_I}] \\ [V_{RF}] e^{i\delta} - [V_{F\_II}] \end{pmatrix} \quad (8.24)$$

Αφαιρώντας τον πίνακα  $[I_{RF\_II}] e^{i\delta}$  από τον  $[I_{RF\_I}] e^{i\delta}$ , προκύπτει:

$$([I_{RF\_I}] - [I_{RF\_II}]) e^{i\delta} = \frac{1}{1-d} ([Y'_{SR}] - [Y_{SR}]) ([V_{F\_I}] - [V_{F\_II}]) \quad (8.25)$$

Συνδυάζοντας τις (8.23) και (8.25), είναι:

$$d([I_{SF\_I}] - [I_{SF\_II}]) - (1-d)([I_{RF\_I}] - [I_{RF\_II}]) e^{i\delta} = 0 \quad (8.26)$$

Η σχέση (8.26) αποτελεί τη βάση για τον προσδιορισμό της γωνίας συγχρονισμού και της θέσης του σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Οι ηλεκτρικές παράμετροι της γραμμής έχουν εξαλειφθεί πλήρως από την κλειστή λύση της (8.26), η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τα «ρεύματα κυκλοφορίας» ([80], [81]), τα οποία ρέουν κατά μήκος των παράλληλων κυκλωμάτων της διπλής γραμμής κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Πολλαπλασιάζοντας την (8.26) με τον πίνακα συμμετρικών συνιστωσών [S] παίρνουμε:

$$d(I_{s/k\_I} - I_{s/k\_II}) - (1-d)(I_{r/k\_I} - I_{r/k\_II}) e^{i\delta} = 0 \quad (8.27)$$

όπου:

$$[S] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}, \quad \alpha = e^{i120^\circ}, \quad \text{και } k=0,1,2 \text{ αναπαριστά το κύκλωμα μηδενικής, θετικής και}$$

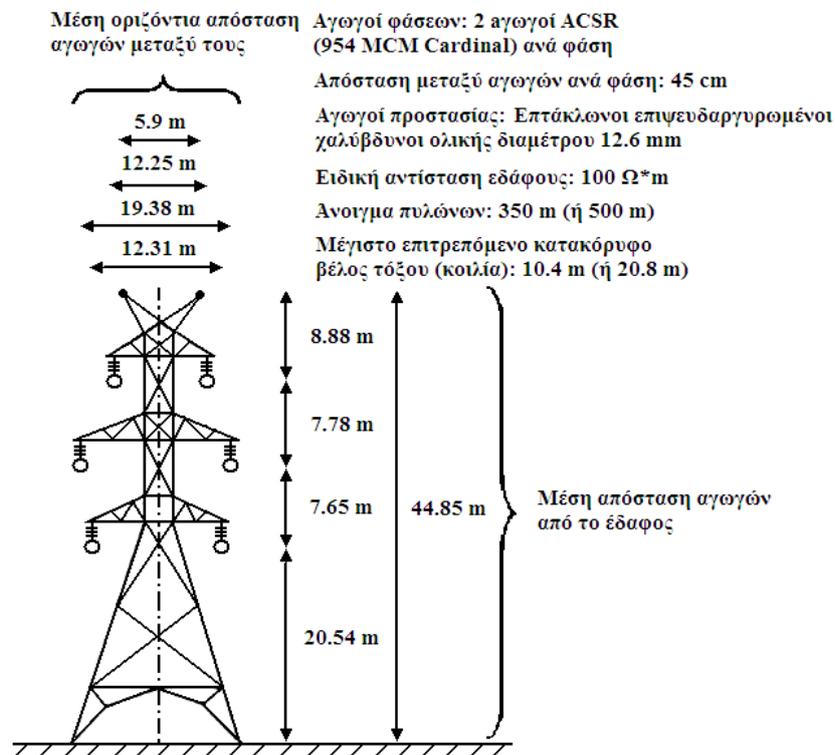
μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα.

Στη συνέχεια, η (8.26) μπορεί να γραφεί σύμφωνα με την (8.14) και η άγνωστη θέση του σφάλματος να προσδιοριστεί ακολουθώντας μια διαδικασία παρόμοια με αυτή της προηγούμενης παραγράφου. Πρέπει να τονισθεί ότι στην περίπτωση γραμμών διπλού κυκλώματος χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην (8.14) τόσο οι συνιστώσες θετικής όσο και οι συνιστώσες αρνητικής ή μηδενικής ακολουθίας λόγω της ασυμμετρίας της ίδιας της γραμμής.

### 8.3 Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου

#### 8.3.1 Αναπαραγωγή και προεπεξεργασία των δεδομένων μέτρησης

Η προτεινόμενη μέθοδος έχει επαληθευτεί με χρήση δεδομένων μέτρησης που έχουν προκύψει από λεπτομερείς προσομοιώσεις σφαλμάτων, με το πρόγραμμα ανάλυσης ταχέων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων ATP/EMTP, σε ένα πρότυπο δίκτυο δοκιμών που περιλαμβάνει μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος 400 kV, 250 km χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Η γραμμή μεταφοράς έχει μοντελοποιηθεί με βάση το μοντέλο ασύμμετρης γραμμής σταθερής συχνότητας με καταναμημένες παραμέτρους (K. C. Lee), και οι ηλεκτρικές της παράμετροι έχουν προσδιοριστεί, με βάση τα γεωμετρικά και τεχνικά χαρακτηριστικά που φαίνονται στο Σχήμα 8.4, από την υπορουτίνα υπολογισμού παραμέτρων γραμμών μεταφοράς του ATP/EMTP. Οι παράμετροι της γραμμής μεταφοράς, που συνίστανται από έξι μοναδικά σύνολα ιδιοσυνιστωσών (modal parameters -  $Z'_{iL}, B'_{iL}$  με  $i=1\dots 6$ ) και τον πίνακα διαγωνοποίησης  $T_i$ , καθώς και τα ισοδύναμα κυκλώματα Thevenin στα δύο άκρα της γραμμής έχουν συγκεντρωθεί, στον Πίνακα 8.1.



Σχήμα 8.4 Γεωμετρική διάταξη πυλώνα και τεχνικά χαρακτηριστικά αγωγών γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος 400 kV

**Πίνακας 8.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz**

Στοιχείο	Παράμετρος	
Γραμμή μεταφοράς SR	$l$	250 km
	$Z'_{1L}$	(0.5238 + j1.4575) Ω/km
	$B'_{1L}$	1.5246 μS/km
	$Z'_{2L}$	(0.0358 + j0.3615) Ω/km
	$B'_{2L}$	3.2079 μS/km
	$Z'_{3L}$	(0.0307 + j0.4068) Ω/km
	$B'_{3L}$	2.7916 μS/km
	$Z'_{4L}$	(0.0304 + j0.3050) Ω/km
	$B'_{4L}$	3.6806 μS/km
	$Z'_{5L}$	(0.0303 + j0.2772) Ω/km
	$B'_{5L}$	4.0520 μS/km
	$Z'_{6L}$	(0.0303 + j0.2866) Ω/km
	$B'_{6L}$	3.9208 μS/km
	$[T_i]$	$\begin{bmatrix} 0.3936 & 0.5357 & -0.3015 & 0.5078 & 0.3798 & -0.2463 \\ 0.3649 & -0.0446 & -0.5226 & 0.0370 & -0.4732 & 0.5802 \\ 0.4604 & -0.4594 & -0.3688 & -0.4906 & 0.3630 & -0.3205 \\ 0.3936 & 0.5357 & 0.3015 & -0.5078 & -0.3798 & -0.2463 \\ 0.3649 & -0.0446 & 0.5226 & -0.0370 & 0.4732 & 0.5802 \\ 0.4604 & -0.4594 & 0.3688 & 0.4906 & -0.3630 & -0.3205 \end{bmatrix}$
Ισοδύναμο κύκλωμα στο άκρο S της γραμμής	$Z_{1S}$	(2.6047+j14.7721) Ω
	$Z_{0S}$	(4.6364+j26.2944) Ω
	$E_S$	1.00∠0° p.u.
Ισοδύναμο κύκλωμα στο άκρο R της γραμμής	$Z_{1R}$	(5.2094 +j 29.5442) Ω
	$Z_{0R}$	(9.2728 +j 52.5887) Ω
	$E_R$	0.99∠-20° p.u.

Για να θεωρηθούν τα ίδια σφάλματα της μεθόδου, χωρίς να υπεισέρχονται επιπλέον σφάλματα μέτρησης, οι μετασχηματιστές έντασης (ME), που βρίσκονται τοποθετημένοι στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς έχουν μοντελοποιηθεί ως ιδανικά στοιχεία. Τα σήματα στα δευτερεύοντα των μετασχηματιστών έντασης φιλτράρονται από ένα αναλογικό αντιαναδιπλωτικό φίλτρο (Butterworth) δεύτερης τάξης με συχνότητα αποκοπής 350 Hz. Έπειτα, τα φιλτραρισμένα σήματα δειγματοληπτούνται με ρυθμό 1 kHz, που αντιστοιχεί σε 20 δείγματα ανά κύκλο, και καταχωρούνται για μεταεπεξεργασία.

Το επόμενο βήμα συνίσταται στο διαχωρισμό των διακριτοποιημένων δεδομένων σε δεδομένα πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Βασική προϋπόθεση για αυτό είναι ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής έναυσης του σφάλματος σε κάθε καταγραφή ρεύματος από τα δύο άκρα της γραμμής. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση κυκλωμάτων σκανδαλισμού (triggers) που, ανά χρονικό διάστημα ίσο με τη θεμελιώδη περίοδο, ανιχνεύουν «βίαιες» μεταβολές – οι οποίες στοιχειοθετούν σφάλμα - στις κυματομορφές των μετρούμενων εντάσεων [165]. Στη συνέχεια, αφού απομονωθεί το σύνολο των δειγμάτων που σχετίζονται με το σφάλμα, εφαρμόζεται ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT πλήρους κύκλου) προκειμένου να υπολογιστούν οι φασιθέτες θεμελιώδους συχνότητας των μετρούμενων ρευμάτων. Τέλος, υπολογίζονται οι συνιστώσες θετικής ακολουθίας

των εντάσεων, που είναι και οι μοναδικές που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι σε περίπτωση που η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων προορίζεται για υλοποίηση με χρήση ψηφιακών ηλεκτρονικών, τότε οι προαναφερθείσες λειτουργίες, που σχετίζονται με το διαχωρισμό των δεδομένων πριν και μετά την εκδήλωση του σφάλματος, καθώς και τον υπολογισμό των φασιθετών θετικής ακολουθίας των μετρούμενων εντάσεων, δεν εκτελούνται αλλά παρέχονται απευθείας από τους ηλεκτρονόμους.

Τα σήματα των εντάσεων που προκύπτουν από το πρόγραμμα ATP/EMTP είναι μεταξύ τους συγχρονισμένα με φυσικό τρόπο. Για να εισαχθεί το σφάλμα συγχρονισμού, οι φασιθέτες των μετρούμενων εντάσεων στο άκρο R της γραμμής έχουν περιστραφεί κατά 18<sup>0</sup> για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση. Από τα διαδοχικά δεδομένα φασιθετών που προκύπτουν από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, εξάγεται ο μέσος όρος για χρονικό διάστημα 2 έως 4 κύκλων, ακριβώς μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Συνεπώς, γίνεται εμφανές ότι στην περίπτωση «αυτό-αποσβενυμένων» σφαλμάτων ή σφαλμάτων πολύ μικρής διάρκειας (μικρότερης από 2 κύκλους) η προτεινόμενη μέθοδος δεν μπορεί να εφαρμοστεί με μεγάλη ασφάλεια.

Όλη η παραπάνω διαδικασία, μαζί με τον προτεινόμενο αλγόριθμο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος, έχει υλοποιηθεί στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB. Στην ανάλυση αυτή, το ποσοστιαίο σφάλμα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος που χρησιμοποιείται ως μέτρο ακριβείας της μεθόδου δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\% \text{ Σφάλμα} = \frac{|\text{Πραγματική θέση σφάλματος} - \text{Εκτιμώμενη θέση σφάλματος}|}{\text{Συνολικό μήκος γραμμής}} \times 100 \quad (8.28)$$

### 8.3.2 Έλεγχος ακριβείας της προτεινόμενης μεθόδου

Προκειμένου να μελετηθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, έχουν εξομοιωθεί στο πρόγραμμα ATP/EMTP όλοι οι πιθανοί τύποι σφαλμάτων (AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG, ABC) που αντιστοιχούν σε εννέα διαφορετικά σημεία του κυκλώματος II της διπλής γραμμής. Σε κάθε περίπτωση η αντίσταση σφάλματος έχει θεωρηθεί ίση με 10 Ω. Τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της θέσης του σφάλματος και τη γωνία συγχρονισμού παρουσιάζονται στους Πίνακες 8.2 και 8.3 αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης που προκύπτει για τις περιπτώσεις που εξετάζονται είναι μικρότερο από 0.15% για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα (AG, BG, CG), 0.17% για διφασικά σφάλματα (AB, BC, CA), 0.22% για διφασικά ως προς γη σφάλματα (ABG, BCG, CAG) και 0.14% για τριφασικά σφάλματα (ABC), γεγονός που καταδεικνύει ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι πολύ ακριβής. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι το σφάλμα εκτίμησης μηδενίζεται πρακτικά στο κέντρο της γραμμής μεταφοράς (50%), λόγω της συμμετρίας που εμφανίζει η γραμμή υπό αυτές τις συνθήκες σφάλματος.

**Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος μέσω της προτεινόμενης μεθόδου (κύκλωμα διπλής γραμμής: II, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω)**

Τύπος σφάλματος	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)								
	Σφάλμα εκτίμησης θέσης του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
AG	0.08	0.10	0.12	0.05	0.00	0.05	0.10	0.14	0.08
BG	0.08	0.12	0.13	0.06	0.00	0.05	0.09	0.10	0.08
CG	0.09	0.11	0.07	0.05	0.00	0.06	0.10	0.13	0.08
AB	0.04	0.16	0.13	0.08	0.00	0.02	0.00	0.14	0.11
BC	0.09	0.12	0.10	0.06	0.00	0.05	0.09	0.13	0.09
CA	0.04	0.12	0.11	0.07	0.00	0.07	0.02	0.12	0.09
ABG	0.02	0.21	0.14	0.08	0.00	0.06	0.04	0.20	0.11
BCG	0.08	0.12	0.09	0.05	0.00	0.04	0.06	0.14	0.09
CAG	0.01	0.12	0.10	0.07	0.00	0.10	0.12	0.13	0.09
ABC	0.07	0.13	0.11	0.06	0.00	0.04	0.05	0.12	0.10

**Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα εκτίμησης της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου (κύκλωμα διπλής γραμμής: Π, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω)**

Τύπος σφάλματος	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)								
	Εκτιμώμενη γωνία συγχρονισμού (°)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
AG	18.1	18.0	17.9	18.0	18.0	18.0	17.9	17.8	17.9
BG	18.1	18.0	17.9	18.0	18.0	18.0	17.9	17.9	17.9
CG	18.1	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9
AB	18.1	17.9	18.1	18.0	18.0	17.9	17.9	18.3	17.9
BC	18.1	18.1	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9	17.9
CA	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9	18.0	18.0	18.0
ABG	18.3	17.8	18.1	18.1	18.0	17.9	17.5	18.6	17.9
BCG	18.0	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9	17.9
CAG	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9	18.2	18.0	17.9
ABC	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.1	17.9

Αντίστοιχες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν και για τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την προτεινόμενη μέθοδο για τη γωνία συγχρονισμού. Για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις σφαλμάτων που εξετάζονται, η λύση για τη  $\delta$  είναι πολύ κοντά στη πραγματική τιμή ( $18^\circ$ ) και η μέγιστη απόκλιση από την τιμή αυτή δεν ξεπερνά τις  $0.5^\circ$  για ασύμμετρα σφάλματα και  $0.1^\circ$  για συμμετρικά.

### 8.3.3 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου

Ο Πίνακας 8.4 αποτυπώνει την επίδραση της μεταβολής της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου για όλους τους πιθανούς τύπους σφαλμάτων στο κύκλωμα Π της γραμμής. Τα σφάλματα που εμπλέκουν τη γη έχουν διερευνηθεί για αντιστάσεις σφάλματος που κυμαίνονται από 0 έως 1000 Ω. Αυτό το διάστημα τιμών καλύπτει όλες σχεδόν τις περιπτώσεις σφαλμάτων γης, χαμηλής και υψηλής αντίστασης. Τα σφάλματα που δεν εμπλέκουν τη γη, έχουν διερευνηθεί για αντιστάσεις σφάλματος από 0 έως 100 Ω. Οι τιμές αυτές ξεπερνούν κατά πολύ τις τυπικές τιμές για την αντίσταση τόξου που αναφέρονται στην [24]. Για κάθε περίπτωση που εξετάζεται, η πραγματική θέση του σφάλματος μεταβάλλεται από 10% έως 90% του μήκους της γραμμής, ενώ οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στο τοπικό και απομακρυσμένο άκρο της γραμμής θεωρούνται ίσες με τις ονομαστικές του δικτύου δοκιμών.

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης που προκύπτει για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις είναι μικρότερο από 0.19% για μονοφασικά ως προς γη σφάλματα (AG, BG, CG), 0.23% για διφασικά και διφασικά ως προς γη σφάλματα (AB-G, BC-G, CA-G) και 0.17% για τριφασικά σφάλματα (ABC), γεγονός που καταδεικνύει ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι πολύ ακριβής και ουσιαστικά ανεξάρτητη από την αντίσταση σφάλματος.

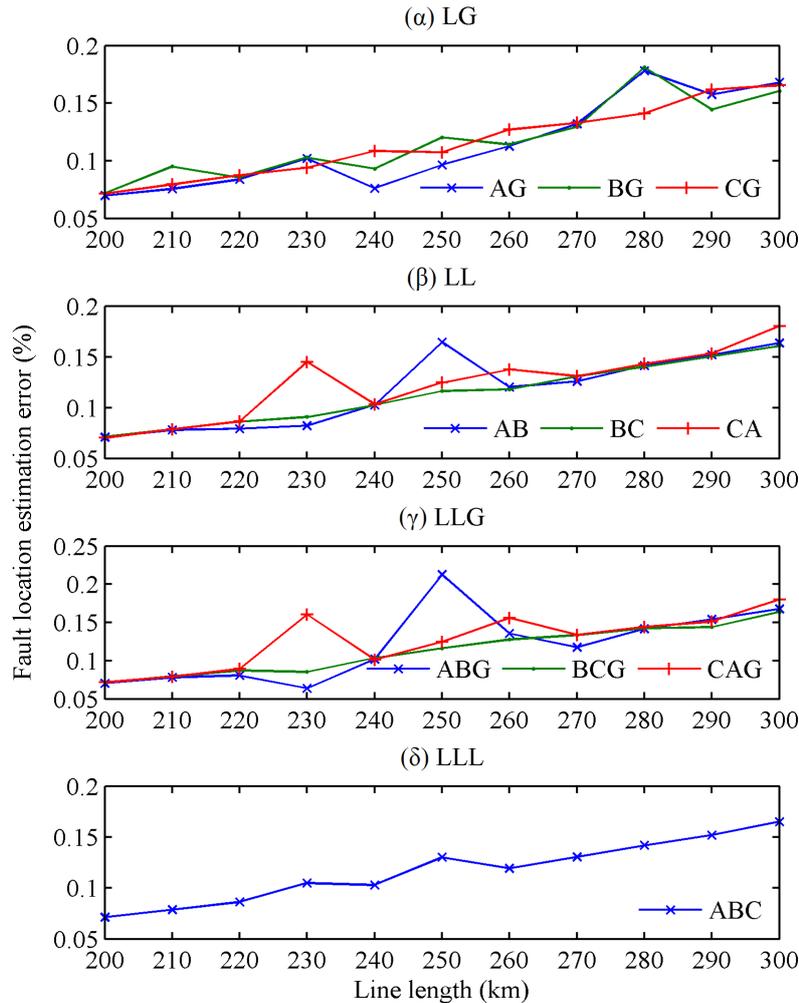
### 8.3.4 Επίδραση των κατανεμημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους στην ακρίβεια της μεθόδου

Η μαθηματική θεμελίωση της προτεινόμενης μεθόδου έγινε μέσω του ονομαστικού κυκλώματος Π της διπλής γραμμής, καθιστώντας τη μέθοδο πιο κατάλληλη για γραμμές μεσαίου μήκους ( $\leq 200$  km). Στην περίπτωση γραμμών μεγάλου μήκους, για τον ακριβή υπολογισμό της θέσης του σφάλματος πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι παράμετροι της γραμμής δεν είναι συγκεντρωμένες (όπως στην περίπτωση του ονομαστικού κυκλώματος Π), αλλά κατανεμημένες ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής. Για να διερευνηθεί η επίδραση των κατανεμημένων χαρακτηριστικών στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, στα σχήματα 8.5 και 8.6 απεικονίζονται τα ποσοστιαία σφάλματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος, όπως προκύπτουν από την προτεινόμενη μέθοδο για κάθε πιθανό τύπο σφάλματος στο κύκλωμα Π της διπλής γραμμής, μεταβάλλοντας το μήκος της από 200 έως 300 km. Οι πραγματικές θέσεις του σφάλματος έχουν θεωρηθεί στο 20% και στο 80% του μήκους της γραμμής αντίστοιχα, ενώ η αντίσταση σφάλματος έχει ληφθεί ίση με 10 Ω.

Όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει, ενώ τα κατανεμημένα χαρακτηριστικά της γραμμής μεταφοράς έχουν σε γενικές γραμμές αρνητική επίπτωση στην ακρίβεια της μεθόδου, όσο αυξάνεται το μήκος της γραμμής, εντούτοις το μέγιστο σφάλμα εκτίμησης, για κάθε τύπο σφάλματος, δεν ξεπερνά το 0.26%. Αυτό αποδεικνύει ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστεί και σε γραμμές μεγάλους μήκους.

**Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για μεταβολές της αντίστασης σφάλματος (κύκλωμα διπλής γραμμής: II)**

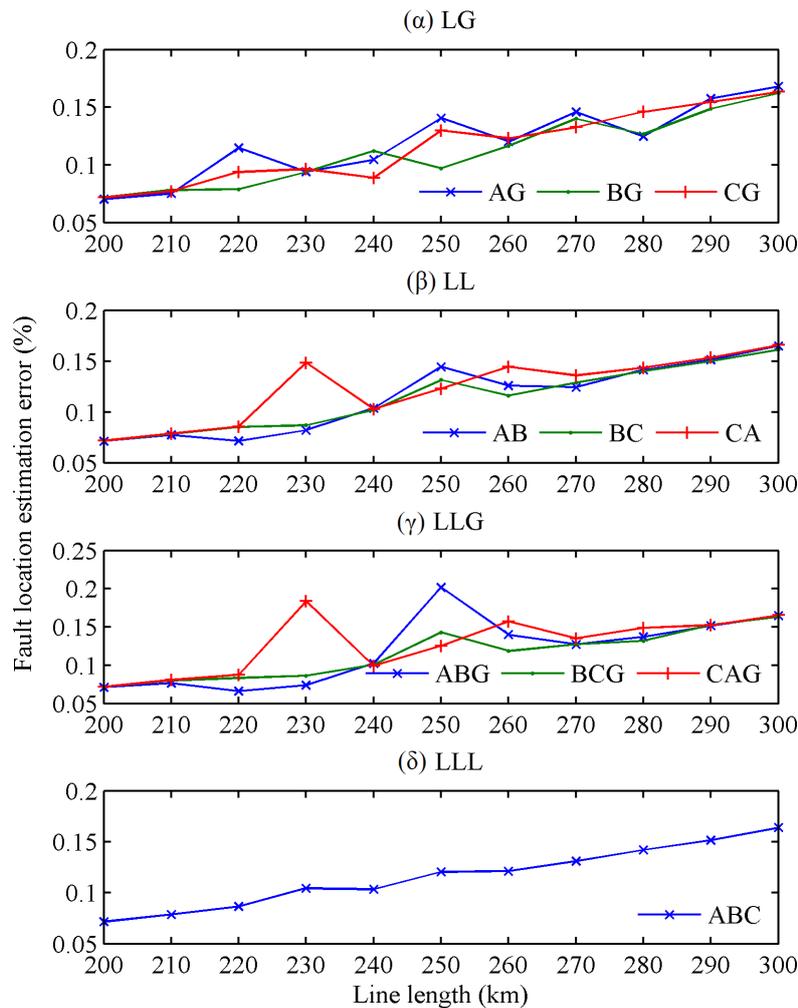
Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)								
		Σφάλμα εκτίμησης θέσης του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
AG	0	0.08	0.09	0.15	0.04	0.00	0.05	0.13	0.16	0.08
	10	0.08	0.10	0.12	0.05	0.00	0.05	0.10	0.14	0.08
	100	0.08	0.12	0.10	0.06	0.00	0.06	0.09	0.12	0.08
	1000	0.08	0.12	0.11	0.06	0.00	0.06	0.10	0.12	0.08
BG	0	0.08	0.11	0.18	0.06	0.00	0.05	0.10	0.10	0.08
	10	0.08	0.12	0.13	0.06	0.00	0.05	0.09	0.10	0.08
	100	0.09	0.12	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.11	0.09
	1000	0.09	0.12	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.12	0.09
CG	0	0.09	0.11	0.05	0.05	0.00	0.06	0.10	0.13	0.09
	10	0.09	0.11	0.07	0.05	0.00	0.06	0.10	0.13	0.08
	100	0.09	0.11	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.12	0.09
	1000	0.09	0.11	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.11	0.09
AB	0	0.02	0.22	0.14	0.09	0.00	0.06	0.03	0.20	0.11
	1	0.02	0.21	0.14	0.09	0.00	0.05	0.03	0.19	0.11
	10	0.04	0.16	0.13	0.08	0.00	0.02	0.00	0.14	0.11
	100	0.09	0.12	0.10	0.06	0.00	0.05	0.10	0.12	0.09
BC	0	0.08	0.12	0.10	0.05	0.00	0.05	0.06	0.15	0.09
	1	0.08	0.12	0.10	0.05	0.00	0.05	0.06	0.15	0.09
	10	0.09	0.12	0.10	0.06	0.00	0.05	0.09	0.13	0.09
	100	0.09	0.11	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.12	0.09
CA	0	0.01	0.12	0.11	0.07	0.00	0.10	0.17	0.12	0.10
	1	0.01	0.12	0.11	0.07	0.00	0.10	0.14	0.12	0.09
	10	0.04	0.12	0.11	0.07	0.00	0.07	0.02	0.12	0.09
	100	0.08	0.11	0.10	0.06	0.00	0.05	0.09	0.11	0.09
ABG	0	0.03	0.21	0.14	0.08	0.00	0.06	0.03	0.19	0.10
	10	0.02	0.21	0.14	0.08	0.00	0.06	0.04	0.20	0.11
	100	0.02	0.22	0.14	0.09	0.00	0.06	0.04	0.21	0.11
	1000	0.02	0.22	0.14	0.09	0.00	0.06	0.03	0.20	0.11
BCG	0	0.08	0.12	0.07	0.05	0.00	0.04	0.06	0.14	0.09
	10	0.08	0.12	0.09	0.05	0.00	0.04	0.06	0.14	0.09
	100	0.08	0.12	0.10	0.05	0.00	0.04	0.06	0.15	0.09
	1000	0.08	0.12	0.10	0.05	0.00	0.05	0.06	0.15	0.09
CAG	0	0.01	0.12	0.09	0.07	0.00	0.10	0.12	0.12	0.09
	10	0.01	0.12	0.10	0.07	0.00	0.10	0.12	0.13	0.09
	100	0.00	0.13	0.11	0.07	0.00	0.10	0.15	0.12	0.09
	1000	0.01	0.12	0.11	0.07	0.00	0.10	0.16	0.12	0.09
ABC	0	0.03	0.16	0.11	0.07	0.00	0.07	0.05	0.11	0.10
	1	0.03	0.15	0.11	0.07	0.00	0.06	0.03	0.11	0.10
	10	0.07	0.13	0.11	0.06	0.00	0.04	0.05	0.12	0.10
	100	0.09	0.11	0.10	0.06	0.00	0.06	0.10	0.11	0.09



**Σχήμα 8.5** Επίδραση των κατανομημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος (πραγματική θέση του σφάλματος: 20% του μήκους της γραμμής, κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: II, αντίσταση σφάλματος  $R_F$ : 10  $\Omega$ ) – (α) μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, (β) διφασικά σφάλματα, (γ) διφασικά ως προς γη σφάλματα, (δ) τριφασικά σφάλματα

### 8.3.5 Επίδραση των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια της μεθόδου

Οι Πίνακες 8.5, 8.6 και 8.7 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τη θέση του σφάλματος από την προτεινόμενη μέθοδο, όταν μεταβάλλεται η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση στο τοπικό, στο απομακρυσμένο και στα δύο συγχρόνως άκρα της γραμμής, αντίστοιχα. Οι προσομοιώσεις περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς τύπους σφαλμάτων (AG, BG, CG, AB, BC, CA, ABG, BCG, CAG, ABC) στο κύκλωμα II της διπλής γραμμής, ενώ η πραγματική θέση που έχει θεωρηθεί για το σφάλμα είναι ίση με 80% του μήκους της γραμμής, και η αντίσταση σφάλματος ίση με 10  $\Omega$ . Οι ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στο τοπικό και στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής έχουν τεθεί ίσες με 20%, 50%, 100%, 200%, 500% των αντίστοιχων ονομαστικών τιμών. Είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς, ότι οι μεταβολές των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα της γραμμής μεταφοράς έχουν πολύ μικρή επίδραση στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Αυτό βρίσκεται σε πλήρη εναρμόνιση με τη χαρακτηριστική εξίσωση (8.21), η οποία δεν περιλαμβάνει τις ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις στα άκρα των γραμμών, και συνεπώς η λύση της δεν εξαρτάται καθόλου από τις μεταβολές τους.



Σχήμα 8.6 Επίδραση των κατανομημένων χαρακτηριστικών της γραμμής μεταφοράς στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος (πραγματική θέση του σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: Π, αντίσταση σφάλματος  $R_F$ : 10  $\Omega$ ) – (α) μονοφασικά ως προς γη σφάλματα, (β) διφασικά σφάλματα, (γ) διφασικά ως προς γη σφάλματα, (δ) τριφασικά σφάλματα

Πίνακας 8.5 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10  $\Omega$ )

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής (%)	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	Σφάλμα εκτίμησης θέσης του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	AG	BG	CG	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG	ABC
20	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
50	0.12	0.12	0.09	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12
100	0.14	0.10	0.13	0.14	0.13	0.12	0.20	0.14	0.13	0.12
200	0.11	0.11	0.12	0.05	0.10	0.00	0.09	0.08	0.10	0.07
500	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.14	0.13	0.10	0.17	0.10

**Πίνακας 8.6 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω)**

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο R της γραμμής (%)	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	Σφάλμα εκτίμησης θέσης του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	AG	BG	CG	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG	ABC
20	0.12	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
50	0.08	0.10	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12
100	0.14	0.10	0.13	0.14	0.13	0.12	0.20	0.14	0.13	0.12
200	0.12	0.11	0.12	0.01	0.10	0.02	0.01	0.08	0.11	0.06
500	0.13	0.11	0.12	0.09	0.11	0.10	0.09	0.11	0.21	0.08

**Πίνακας 8.7 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S και R της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής, αντίσταση σφάλματος: 10 Ω)**

Μεταβολή της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στα άκρα S&R της γραμμής (%)	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	Σφάλμα εκτίμησης θέσης του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής μεταφοράς)									
	AG	BG	CG	AB	BC	CA	ABG	BCG	CAG	ABC
20	0.12	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
50	0.08	0.10	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12
100	0.14	0.10	0.13	0.14	0.13	0.12	0.20	0.14	0.13	0.12
200	0.12	0.11	0.12	0.01	0.10	0.02	0.01	0.08	0.11	0.06
500	0.13	0.11	0.12	0.09	0.11	0.10	0.09	0.11	0.21	0.08

**Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος και της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για ενδοκυκλωματικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 20% του μήκους της γραμμής)**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							Σφάλμα εκτίμησης (%)	Γωνία συγχρονισμού (deg.)
	$R_{Fal}$	$R_{Fbl}$	$R_{Fcl}$	$R_{FaiI}$	$R_{FbiI}$	$R_{FciI}$	$R_g$		
ICIIAG			1	1			100	0.13	17.9
ICIIBCG			1		1	1	50	0.11	18.1
IABIABG	1	1		2	2		100	0.11	18.1
IBIIAG		1		1			50	0.11	18.2
IACIIAC	1		1	1		1		N/A	0
IAIIAG	1			2			100	0.11	18.0
IAIIABG	1			1	1		50	0.11	18.1
IBCIIBCG		2	2		1	1	100	0.11	18.0
ICIIABCG			1	1	1	1	50	0.16	17.8
IBIIICG		1				1	50	0.11	18.1

### 8.3.6 Επίδραση των σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής στην ακρίβεια της μεθόδου

Οι Πίνακες 8.8 και 8.9 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για σφάλματα που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής (ενδοκυκλωματικά σφάλματα – intercircuit faults). Οι πραγματικές θέσεις του σφάλματος αντιστοιχούν στο 20% και στο 80% του μήκους της γραμμής για κάθε περίπτωση, ενώ εξετάζονται διάφοροι τύποι ενδοκυκλωματικών σφαλμάτων, με διαφορετικές αντιστάσεις σφάλματος κάθε φορά. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα αυτά, η προτεινόμενη μέθοδος εμφανίζει εξαιρετική συμπεριφορά για κάθε τύπο

σφάλματος, εκτός από την περίπτωση συμμετρικών ενδοκυκλωματικών σφαλμάτων της μορφής ICAΠCA (σφάλμα που εμπλέκει τις φάσεις C και A των κυκλωμάτων I και II της γραμμής, με την ίδια αντίσταση σφάλματος μεταξύ των δύο φάσεων). Για αυτές τις σπάνιες περιπτώσεις σφαλμάτων, η προτεινόμενη μέθοδος πρέπει να ενισχυθεί με έναν εξειδικευμένο αλγόριθμο επιλογής των φάσεων που εμπλέκονται στο σφάλμα. Ο αλγόριθμος αυτός θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στην αρχή διαφορικής προστασίας ρεύματος [120], μιας και η προτεινόμενη μέθοδος λαμβάνει ως δεδομένα εισόδου μόνο τις μετρούμενες εντάσεις στα άκρα της διπλής γραμμής.

**Πίνακας 8.9 Αποτελέσματα εκτίμησης της θέσης του σφάλματος και της γωνίας συγχρονισμού μέσω της προτεινόμενης μεθόδου για ενδοκυκλωματικά σφάλματα (πραγματική θέση σφάλματος: 80% του μήκους της γραμμής)**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος ( $\Omega$ )							Σφάλμα εκτίμησης (%)	Γωνία συγχρονισμού (deg.)
	$R_{Fal}$	$R_{Fbl}$	$R_{Fcl}$	$R_{FAl}$	$R_{FBII}$	$R_{FcII}$	$R_g$		
ICΠAG			1	1			100	0.13	17.9
ICΠBCG			1		1	1	50	0.11	18.1
IABΠABG	1	1		2	2		100	0.11	18.1
IBΠAG		1		1			50	0.11	18.2
IACΠAC	1		1	1		1		N/A	0
IAΠAG	1			2			100	0.11	18.0
IAΠABG	1			1	1		50	0.11	18.1
IBCΠBCG		2	2		1	1	100	0.11	18.0
ICΠABCG			1	1	1	1	50	0.16	17.8
IBΠCG		1				1	50	0.11	18.1

### 8.3.7 Επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια της μεθόδου

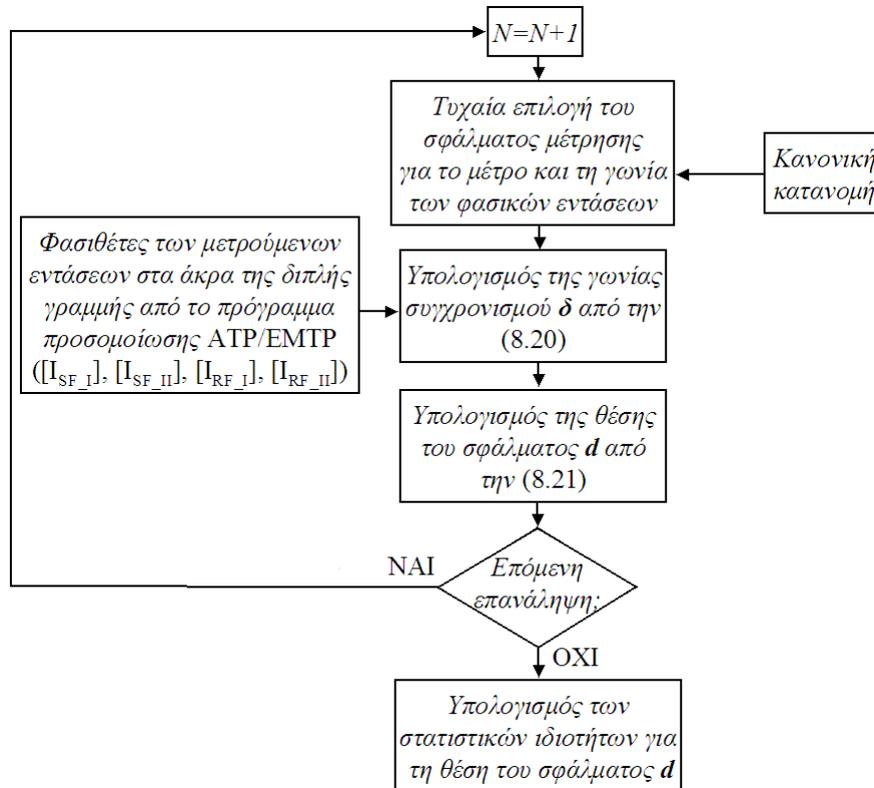
Οι φασιθέτες των εντάσεων θετικής ακολουθίας, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου της προτεινόμενης μεθόδου εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος, προκύπτουν από διαδικασίες μέτρησης και φιλτραρίσματος. Για το λόγο αυτό, είναι αναγκαίο να μελετηθεί η επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Τα σφάλματα μέτρησης μπορεί να οφείλονται σε ανακρίβειες των μετασχηματιστών έντασης, των καταγραφικών συμβάντων ή των ψηφιακών ηλεκτρονόμων, των ψηφιακών τεχνικών φιλτραρίσματος των σημάτων, σε διαφορές μεταξύ των χρόνων δειγματοληψίας που χρησιμοποιούν τα καταγραφικά σφαλμάτων στα άκρα των γραμμών κτλ. Για να διερευνηθεί η επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης στην ακρίβεια των εκτιμήσεων της θέσης σφάλματος, έχει ληφθεί υπόψη στην παρούσα ανάλυση, η πιθανοτική φύση των σφαλμάτων αυτών. Αυτή η προσέγγιση είναι πιο ρεαλιστική σε σχέση με αυτή της [144], που θεωρεί ότι μόνο συστηματικά σφάλματα υπεισέρχονται στις μετρήσεις των εντάσεων.

Έτσι, θεωρείται ότι τα σφάλματα των μετρούμενων φασιθετών έντασης στα δύο άκρα της γραμμής είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά και ως προς τις δύο διαστάσεις τους – μέτρο και γωνία, και ακολουθούν την κανονική κατανομή, όπως στις ([27], [220]). Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων μέτρησης είναι 4%, για το μέτρο των εμπλεκόμενων στο σφάλμα φασικών ρευμάτων, και 2%, για το μέτρο των εντάσεων των «υγιών» φάσεων, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τις γωνίες των φασιθετών των μετρούμενων εντάσεων είναι  $4^{\circ}$ , για τις εμπλεκόμενες στο σφάλμα φάσεις, και  $2^{\circ}$ , για τις «υγιείς» φάσεις.

Η άγνωστη θέση του σφάλματος ορίζεται ως τυχαία μεταβλητή περιγραφόμενη από ένα σύνολο στατιστικών ιδιοτήτων (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, διάστημα εμπιστοσύνης κτλ.). Για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων αυτών χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte-Carlo [52], όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.7. Ο αριθμός των επαναλήψεων  $N$  στο Σχήμα 8.7 έχει τεθεί ίσος με 1000 προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια.

Το Σχήμα 8.8 απεικονίζει τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος, όπως προκύπτουν από την ανάλυση Monte-Carlo, για τέσσερις αντιπροσωπευτικούς τύπους σφαλμάτων (AG, BC, BCG, ABC). Οι θέσεις του σφάλματος προσδιορίζονται για σφάλματα που έχουν εξομοιωθεί στο πρόγραμμα ATP/EMTP στο 80% του μήκους της γραμμής με αντίσταση

σφάλματος της τάξης των 10 Ω. Παρατηρώντας το Σχήμα 8.8, είναι εμφανές ότι το ποσοστιαίο σφάλμα της μέσης τιμής (αναμενόμενη τιμή), για κάθε τύπο σφάλματος, δεν ξεπερνά το 0.22%, ενώ η τυπική απόκλιση, που εκφράζει το μέτρο διασποράς γύρω από τη μέση τιμή, είναι μικρότερη από 1.5% του μήκους της γραμμής.



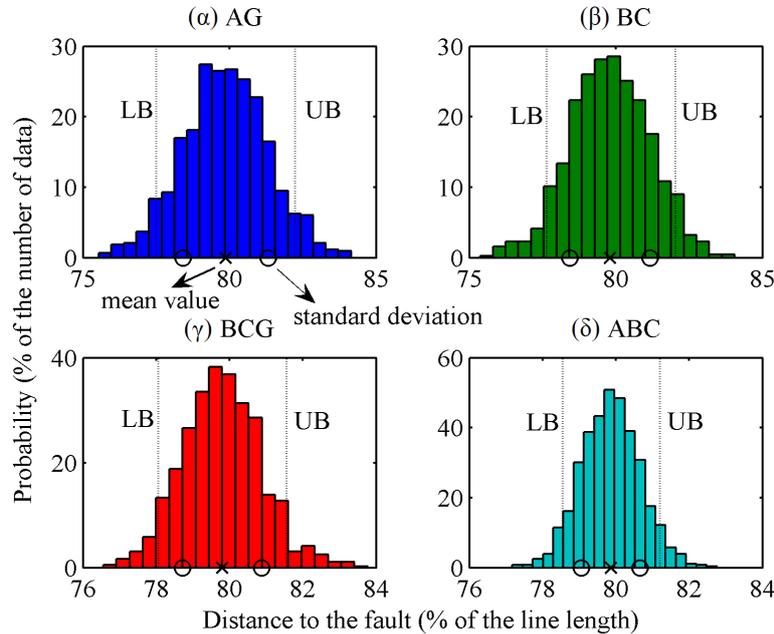
**Σχήμα 8.7 Διαδικασία υπολογισμού στατιστικών ιδιοτήτων ως προς τη θέση του σφάλματος λόγω της επίδρασης των σφαλμάτων μέτρησης με χρήση της μεθόδου Monte-Carlo.**

Επιπλέον, στο Σχήμα 8.8 διακρίνονται τα διαστήματα εμπιστοσύνης με πιθανότητα 95% (ανώτερο και κατώτερο όριο – LB έναντι UP) για τη μέση τιμή της θέσης του σφάλματος και για κάθε τύπο σφάλματος ξεχωριστά. Το διάστημα εμπιστοσύνης με πιθανότητα 95% είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο, λόγω της ισορροπίας που επιτυγχάνει μεταξύ ακρίβειας και αξιοπιστίας, και εκφράζει το βαθμό βεβαιότητας για την «πραγματική» θέση του σφάλματος. Μεταξύ των υπάρχουσών τεχνικών προσδιορισμού του διαστήματος εμπιστοσύνης 95%, έχει επιλεγεί η μέθοδος εκατοστημορίων (percentiles), διότι μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων, όπως ακριβώς ισχύει στην προκειμένη περίπτωση.

Ο Πίνακας 8.10 συνοψίζει τα περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα των εκτιμήσεων της θέσης του σφάλματος που λαμβάνονται από την ανάλυση Monte-Carlo, για εννέα διαφορετικά σημεία σφάλματος (10% έως 90%) κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, παρότι το τυπικό σφάλμα ως προς τα μέτρα και τις γωνίες των μετρούμενων εντάσεων είναι 4% και 4°, αντίστοιχα, για τις εμπλεκόμενες στο σφάλμα φάσεις, και 2% και 2° για τις υγιείς φάσεις, εντούτοις, η τυπική απόκλιση για τις εκτιμώμενες θέσεις του σφάλματος δεν ξεπερνά το 1.7% για κάθε τύπο σφάλματος, γεγονός που καταδεικνύει ότι η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου δεν επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη των σφαλμάτων μέτρησης.

Αντίστοιχα συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν με βάση τα αποτελέσματα που εκτίθενται στο Σχήμα 8.9, τα οποία αφορούν την ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου ως προς τη θέση του σφάλματος κατά μήκος της γραμμής, και τη μεταβολή της αντίστασης σφάλματος υπό την επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης. Τα σχήματα 8.9(α) και (β) αντιστοιχούν στις ίδιες συνθήκες σφαλμάτων μέτρησης που έχουν αναφερθεί παραπάνω, ενώ στα Σχήματα 8.9(γ) και (δ) έχει θεωρηθεί ότι η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων μέτρησης είναι 5% και 5° για το μέτρο και τη γωνία των μετρούμενων εντάσεων, αντίστοιχα, για τις εμπλεκόμενες στο σφάλμα φάσεις, και 3% και 3°,

αντίστοιχα, για τις «υγιείς» φάσεις. Στην πράξη, τα αποτελέσματα της μεθόδου διερευνώνται για δύο διαφορετικές αντιστάσεις σφάλματος,  $R_F=10$  και  $R_F=100 \Omega$ .



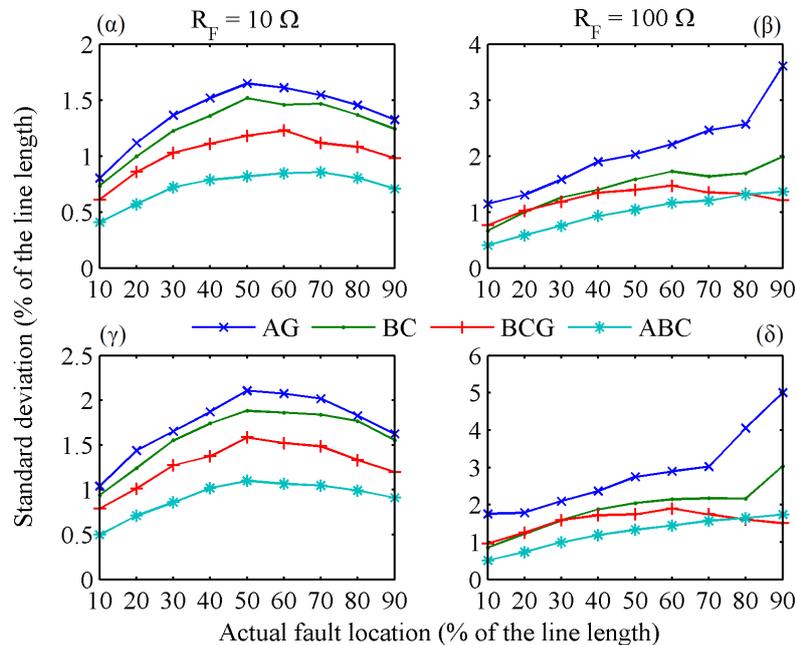
**Σχήμα 8.8** Κατανομή των εκτιμώμενων θέσεων σφάλματος σε περίπτωση ανακρίβειας των μετρήσεων

**Πίνακας 8.10** Περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος (κύκλωμα γραμμής μεταφοράς: Π, αντίσταση σφάλματος  $R_F$ : 10  $\Omega$ )

Τύπος σφάλματος	Στατιστικά αποτελέσματα για τη θέση του σφάλματος	Πραγματική θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής)									
		Εκτιμώμενη θέση του σφάλματος (% του μήκους της γραμμής)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	
AG	Μέση τιμή	10.03	20.10	30.19	40.01	49.96	59.84	69.83	79.86	89.78	
	Τυπική απόκλιση	0.80	1.12	1.37	1.52	1.65	1.61	1.55	1.45	1.32	
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	8.67	18.31	27.83	37.49	47.06	57.11	67.31	77.50	87.53
		Άνω Όριο	11.37	21.92	32.43	42.53	52.58	62.44	72.40	82.25	91.99
BC	Μέση τιμή	10.12	20.09	30.08	40.18	49.98	59.94	69.90	79.79	89.85	
	Τυπική απόκλιση	0.74	1.00	1.23	1.36	1.52	1.46	1.47	1.37	1.24	
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	8.94	18.45	28.14	38.07	47.58	57.57	67.51	77.63	87.84
		Άνω Όριο	11.32	21.75	32.10	42.50	52.46	62.35	72.37	82.04	91.85
BCG	Μέση τιμή	10.11	20.11	30.13	40.04	50.00	59.91	69.89	79.80	89.85	
	Τυπική απόκλιση	0.61	0.86	1.03	1.11	1.18	1.23	1.12	1.08	0.98	
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	9.08	18.69	28.41	38.18	48.05	57.89	68.08	78.06	88.23
		Άνω Όριο	11.15	21.54	31.76	41.84	52.06	62.06	71.71	81.56	91.49
ABC	Μέση τιμή	10.08	20.16	30.06	40.09	49.97	59.94	69.92	79.86	89.86	
	Τυπική απόκλιση	0.41	0.57	0.72	0.79	0.82	0.85	0.86	0.81	0.71	
	95% Διάστημα εμπιστοσύνης	Κάτω Όριο	9.41	19.23	28.87	38.85	48.67	58.55	68.49	78.55	88.68
		Άνω Όριο	10.79	21.11	31.25	41.38	51.33	61.32	71.34	81.21	91.01

Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, για κάθε περίπτωση σφαλμάτων μέτρησης, η τυπική απόκλιση της εκτιμώμενης θέσης του σφάλματος μεγαλώνει με την αύξηση της αντίστασης σφάλματος. Επιπλέον, είναι εμφανές από τα αποτελέσματα που λαμβάνονται ότι, για μια συγκεκριμένη αντίσταση σφάλματος, η τυπική απόκλιση αυξάνει καθώς μεγαλώνει το τυπικό σφάλμα στο μέτρο και στη γωνία των μετρούμενων εντάσεων στα άκρα της γραμμής. Παρόλα αυτά, η μεταβολή της τυπικής απόκλισης, για την ίδια αντίσταση σφάλματος, ακολουθεί την ίδια πορεία (trend), ανεξάρτητα από το θεωρούμενο σφάλμα μέτρησης. Επιπλέον, για κάθε εξεταζόμενη

περίπτωση, η μέγιστη τυπική απόκλιση για τη θέση του σφάλματος δεν ξεπερνά το τυπικό σφάλμα των μετρούμενων εντάσεων που λαμβάνεται υπόψη.



**Σχήμα 8.9** Τυπική απόκλιση των εκτιμώμενων θέσεων σφάλματος ως συνάρτηση της πραγματικής θέσης του σφάλματος και της αντίστασης σφάλματος για διάφορα σφάλματα μέτρησης. (α), (β)  $\sigma_m=4\%$  (για εσφαλμένες φάσεις),  $\sigma_m=2\%$  (για υγιείς φάσεις),  $\sigma_a=4^0$  (για εσφαλμένες φάσεις) και  $\sigma_a=2^0$  (για υγιείς φάσεις). (γ), (δ)  $\sigma_m=5\%$  (για εσφαλμένες φάσεις),  $\sigma_m=3\%$  (για υγιείς φάσεις),  $\sigma_a=5^0$  (για εσφαλμένες φάσεις) και  $\sigma_a=3^0$  (για υγιείς φάσεις). (α), (γ)  $R_F=10 \Omega$ . (β), (δ)  $R_F=100 \Omega$

## 8.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε μία νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος, με χρήση αποκλειστικά μη συγχρονισμένων μετρήσεων εντάσεων στα άκρα τους κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Η μέθοδος μπορεί να εντοπίσει τη θέση του σφάλματος όταν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής βρίσκονται σε λειτουργία. Τα αποτελέσματα των δοκιμών προσομοίωσης καταδεικνύουν την πολύ ικανοποιητική συμπεριφορά και τη μεγάλη ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Συνοπτικά, τα βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα και η κύρια συμβολή της μεθόδου συνίστανται στα ακόλουθα:

- Οι παράμετροι της γραμμής μεταφοράς δεν απαιτούνται για τον προσδιορισμό της θέσης του σφάλματος.
- Δεν απαιτείται εξειδικευμένος αλγόριθμος για την επιλογή των φάσεων της διπλής γραμμής που εμπλέκονται στο σφάλμα, εκτός από την περίπτωση συμμετρικών ενδοκυκλωματικών σφαλμάτων.
- Οι ισοδύναμες πηγές στα άκρα της γραμμής και η αντίσταση σφάλματος έχουν πρακτικά μηδενική επίδραση στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου.
- Τα καταναμημένα χαρακτηριστικά των γραμμών μεγάλου μήκους, τα οποία δεν λαμβάνονται υπόψη στη μαθηματική θεμελίωση της μεθόδου, δεν επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια των εκτιμήσεων για τη θέση του σφάλματος.
- Ακόμα και για γραμμές χωρίς αντιμετάθεση φάσεων, η προτεινόμενη μέθοδος δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.
- Ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος και της γωνίας συγχρονισμού πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση επαναληπτικής μεθόδου.

- Χρησιμοποιείται περιορισμένος αριθμός δεδομένων μέτρησης για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος (μόνο οι φασιθέτες των εντάσεων θετικής ακολουθίας).
- Η μέθοδος δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στα σφάλματα μέτρησης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

# ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗ ΣΕΙΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

## 9.1 Εισαγωγή

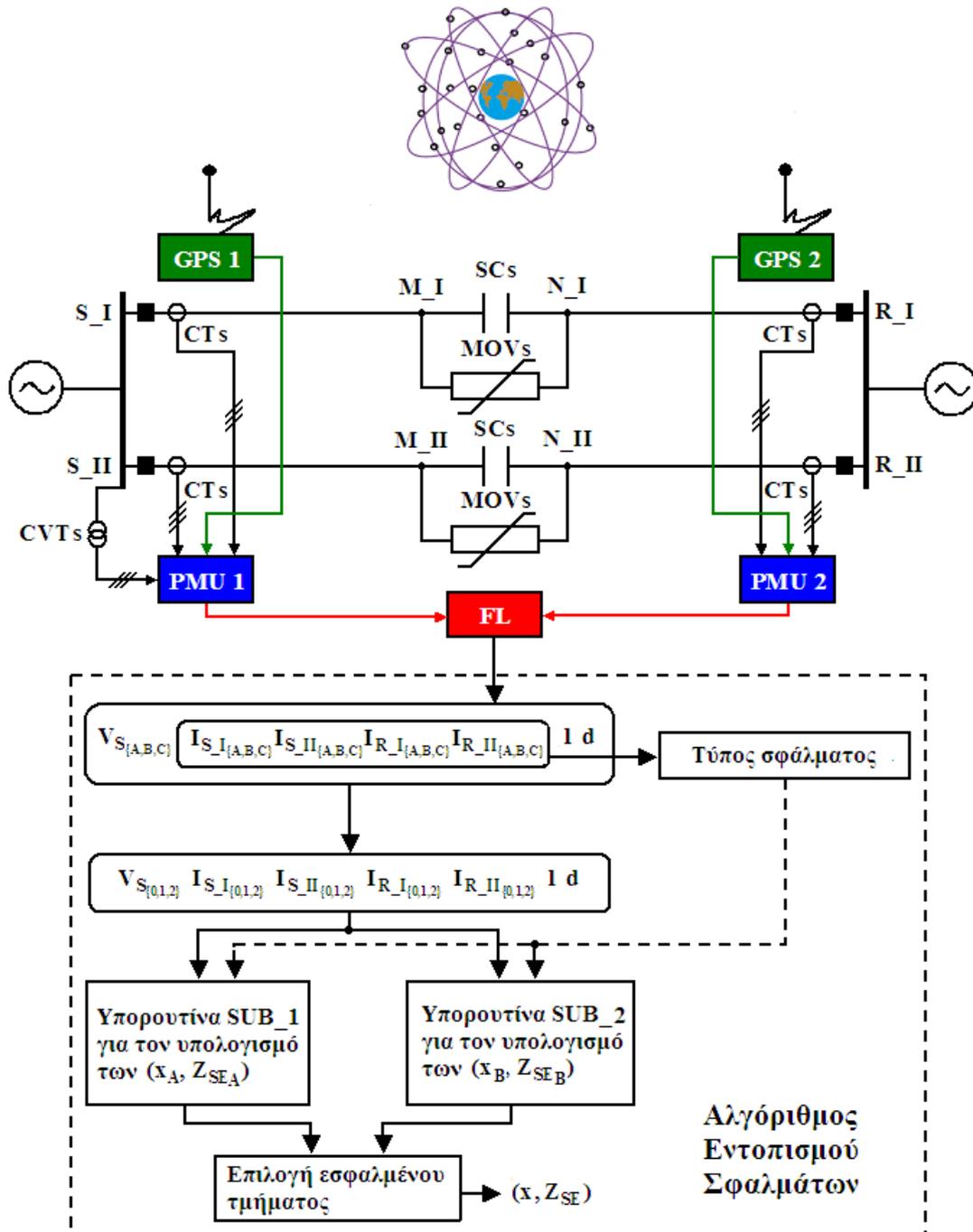
Στα εισαγωγικά κεφάλαια έγινε εκτενής αναφορά στις μεθόδους εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς με αντιστάθμιση σειράς και αναφέρθηκαν οι δυσκολίες που παρατηρούνται στον υπολογισμό της πτώσης τάσης στα άκρα των διατάξεων σειριακής αντιστάθμισης (SCs/MOVs ή TCSCs) κατά την εκδήλωση σφαλμάτων, λόγω μη γραμμικότητας. Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε μετρήσεις από ένα μόνο άκρο των γραμμών με αντιστάθμιση σειράς, εκτός από τις παραμέτρους των γραμμών και των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα τους, εξαρτώνται και από τις παραμέτρους του χρησιμοποιούμενου μοντέλου για την αναπαράσταση της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης. Η μη επαρκής γνώση των παραμέτρων αυτών, μπορεί να εισάγει σημαντικό σφάλμα στην ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος. Από τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης και από τα δύο άκρα των γραμμών, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αλγόριθμοι που δεν εξαρτώνται από το μοντέλο της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης ([202], [255]). Οι αλγόριθμοι αυτοί, όμως, αναφέρονται αποκλειστικά σε γραμμές απλού κυκλώματος. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται ένας αντίστοιχος αλγόριθμος για γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς [12]. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί συγχρονισμένες μετρήσεις των τριφασικών εντάσεων σε κάθε άκρο της διπλής γραμμής και της τριφασικής τάσης σε ένα μόνο άκρο, περιορίζοντας έτσι το συνολικό αριθμό δεδομένων μέτρησης και μετριάζοντας την εξάρτηση του αλγορίθμου από τα σφάλματα των χωρητικών ΜΤ. Επιπλέον, ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιοποιεί το μετασχηματισμό ρυθμών της παραγράφου 6.2, ο οποίος αποζευγνύει τα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας της διπλής γραμμής και επιτρέπει την ανάπτυξη ισοδυνάμων  $\Pi$  κυκλωμάτων βασισμένων στο μοντέλο γραμμής με κατανεμημένες παραμέτρους χωρίς απλοποιήσεις. Η μόνη προϋπόθεση για την επιτυχή υλοποίηση του αλγορίθμου, είναι η ύπαρξη συγχρονισμού μεταξύ των μετρήσεων, ο οποίος μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μονάδων μέτρησης φασιθετών και δεκτών GPS υψηλής ακρίβειας.

## 9.2 Εντοπισμός σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς

Στο Σχήμα 9.1 φαίνεται η προτεινόμενη διάταξη μετρήσεων για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς. Θεωρείται ότι ο εντοπιστής σφαλμάτων (Fault Locator – FL) αποτελεί ανεξάρτητη συσκευή, αν και θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε μία εκ των δύο μονάδων μέτρησης φασιθετών στα άκρα της διπλής γραμμής. Σε κάθε άκρο της γραμμής (S, R) υπάρχουν ΜΕ (CTs) που διαβιβάζουν τις υποβιβασμένες εντάσεις στις μονάδες μέτρησης φασιθετών. Οι ΜΕ βρίσκονται συνδεδεμένοι στην πλευρά του διακόπτη ισχύος που «βλέπει» προς τη γραμμή (όχι προς το ζυγό), γεγονός που επιτρέπει στην προτεινόμενη μέθοδο να λειτουργεί ικανοποιητικά και για σφάλματα γης, με το ένα κύκλωμα της γραμμής σε λειτουργία και το άλλο εκτός λειτουργίας με τα δύο άκρα του γειωμένα. Επιπλέον, η μονάδα μέτρησης φασιθετών στο άκρο S τροφοδοτείται με την τριφασική τάση στο εν λόγω άκρο μέσω των χωρητικών ΜΤ (CVTs) που βρίσκονται εγκατεστημένοι στο άκρο αυτό.

Στις μονάδες μέτρησης φασιθετών διενεργούνται ψηφιακές μετρήσεις για τον υπολογισμό των φασιθετών θεμελιώδους συχνότητας των τάσεων και εντάσεων, με χρήση ενός κοινού σήματος αναφοράς, το οποίο μεταδίδεται στα PMUs μέσω των δεκτών GPS που βρίσκονται τοποθετημένοι

σε κάθε άκρο της γραμμής. Οι μετρούμενοι φασιθέτες αποστέλλονται στη συνέχεια στον εντοπιστή σφαλμάτων και χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στον αλγόριθμο εντοπισμού της θέσης του σφάλματος. Οι φασιθέτες των εντάσεων αξιοποιούνται για τον καθορισμό του τύπου του σφάλματος. Οι φασιθέτες των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από δύο υπορουτίνες, SUB\_1 και SUB\_2, προκειμένου να προσδιοριστούν οι θέσεις του σφάλματος ( $x_A, x_B$ ) και οι αντίστοιχες πτώσεις τάσεις στα άκρα της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης ( $Z_{SE_A}, Z_{SE_B}$ ). Στο στάδιο αυτό, ο αλγόριθμος παράγει δύο ξεχωριστές λύσεις για τη θέση του σφάλματος, καθεμία εκ των οποίων ανήκει στο τμήμα της γραμμής πριν και μετά τη συστοιχία των SCs/MOVs αντίστοιχα. Στο επόμενο βήμα, επιλέγεται η σωστή λύση με βάση έναν εξειδικευμένο αλγόριθμο επιλογής του εσφαλμένου τμήματος της διπλής γραμμής.



Σχήμα 9.1 Σχηματικό διάγραμμα αλγορίθμου εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς.

Σε γενικές γραμμές, ο προτεινόμενος αλγόριθμος εντοπισμού σφαλμάτων, σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς, εκτελεί τις ακόλουθες διεργασίες:

1. Ανίχνευση του τύπου του σφάλματος.
2. Εκτίμηση των πιθανών θέσεων του σφάλματος ( $x_A, x_B$ ).
3. Επιλογή της σωστής θέσης του σφάλματος (σε σχέση με τη συστοιχία των SCs/MOVs).

Οι παραπάνω διεργασίες και τα θέματα που σχετίζονται με την υλοποίησή τους παρατίθενται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

### 9.2.1 Ανίχνευση του τύπου σφάλματος (Fault Type Identification – FTI Logic)

Η λογική ανίχνευσης του τύπου σφάλματος σε γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς, χρησιμοποιεί τους συγχρονισμένους φασιθέτες των φασικών εντάσεων σε κάθε τερματικό σημείο της διπλής γραμμής, προκειμένου να υπολογίσει το διανυσματικό άθροισμα των ρευμάτων σε κάθε φάση κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Για την ανίχνευση των εμπλεκόμενων στο σφάλμα φάσεων της διπλής γραμμής, η λογική FTI βασίζεται στα ρεύματα λειτουργίας  $I_{m\_j}^{OP}$  και αναστολής  $I_{m\_j}^{RT}$  που ορίζονται στις (9.1) και (9.2), αντίστοιχα:

$$I_{m\_j}^{OP} = |I_{Sm\_j} + I_{Rm\_j}| \quad (9.1)$$

$$I_{m\_j}^{RT} = |I_{Sm\_j} - I_{Rm\_j}| \quad (9.2)$$

όπου  $I_{Sm\_j}, I_{Rm\_j}$  είναι οι φασιθέτες των φασικών εντάσεων στα άκρα S και R κάθε κυκλώματος της διπλής γραμμής,  $m = A, B, C$  συμβολίζει την εκάστοτε φάση, και  $j = I, II$  αναπαριστά το κύκλωμα I και II της διπλής γραμμής, αντίστοιχα.

Τα ρεύματα λειτουργίας και αναστολής σχηματίζουν έξι διαφορετικά στοιχεία φάσεων, τα οποία ενεργοποιούνται όταν ικανοποιείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$I_{m\_j}^{OP} > SLP \cdot I_{m\_j}^{RT} \quad (9.3)$$

όπου  $SLP$  είναι η χαρακτηριστική μοναδιαία κλίση ( $SLP$  –Single Slope Characteristic) των διαφορικών στοιχείων [76].

Τα σφάλματα που εμπλέκουν τη γη προκαλούν αύξηση του συνολικού ομοπολικού ρεύματος  $I_{GT}$ , γεγονός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ανίχνευσής τους, αν πληρούται η ακόλουθη συνθήκη:

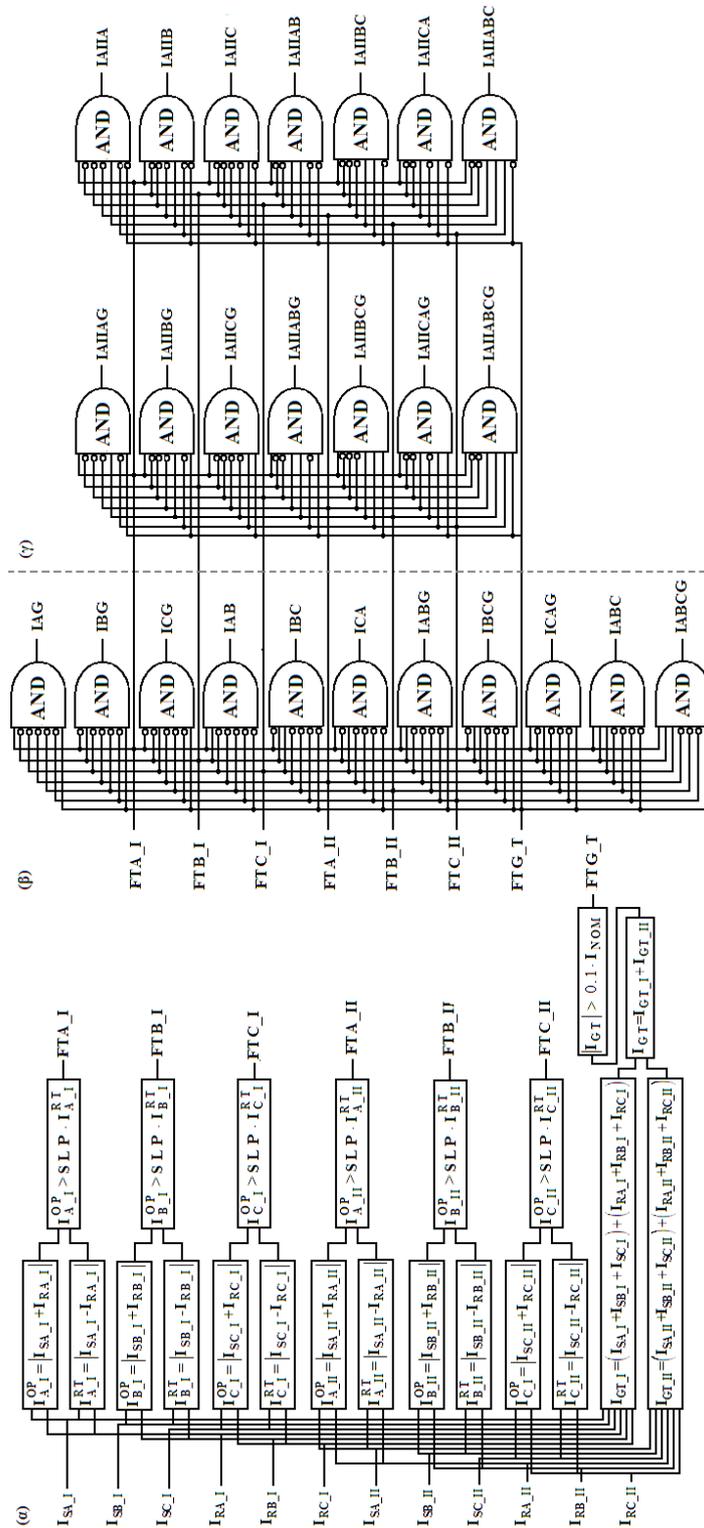
$$I_{GT} > 0.1 \cdot I_{NOM} \quad (9.4)$$

όπου  $I_{NOM}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα των μονάδων μέτρησης φασιθετών.

Η προτεινόμενη λογική ανίχνευσης του τύπου σφάλματος παρουσιάζεται στα Σχήματα 9.2(α), (β) και (γ). Για ένα σφάλμα που εμπλέκει τη φάση A του κυκλώματος I της διπλής γραμμής, διεγείρεται το στοιχείο FTA\_I, για σφάλμα στη φάση B του κυκλώματος II το στοιχείο FTB\_II κ.ο.κ. Για σφάλματα ως προς γη, ενεργοποιείται το στοιχείο FTG\_T. Με συνδυαστική λογική των επιμέρους στοιχείων, επιτυγχάνεται ο προσδιορισμός του τύπου σφάλματος. Η γνώση για τον τύπο σφάλματος, είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλεγούν οι κατάλληλες οριακές συνθήκες, για τις τάσεις και τις εντάσεις στο σημείο του σφάλματος, από τις οποίες θα προκύψει η θέση του σφάλματος.

### 9.2.2 Εκτίμηση της θέσης του σφάλματος

Ένα από τα πιο δύσκολα προβλήματα στους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς, είναι να προσδιοριστεί αν το σφάλμα έχει εκδηλωθεί πριν ή μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.

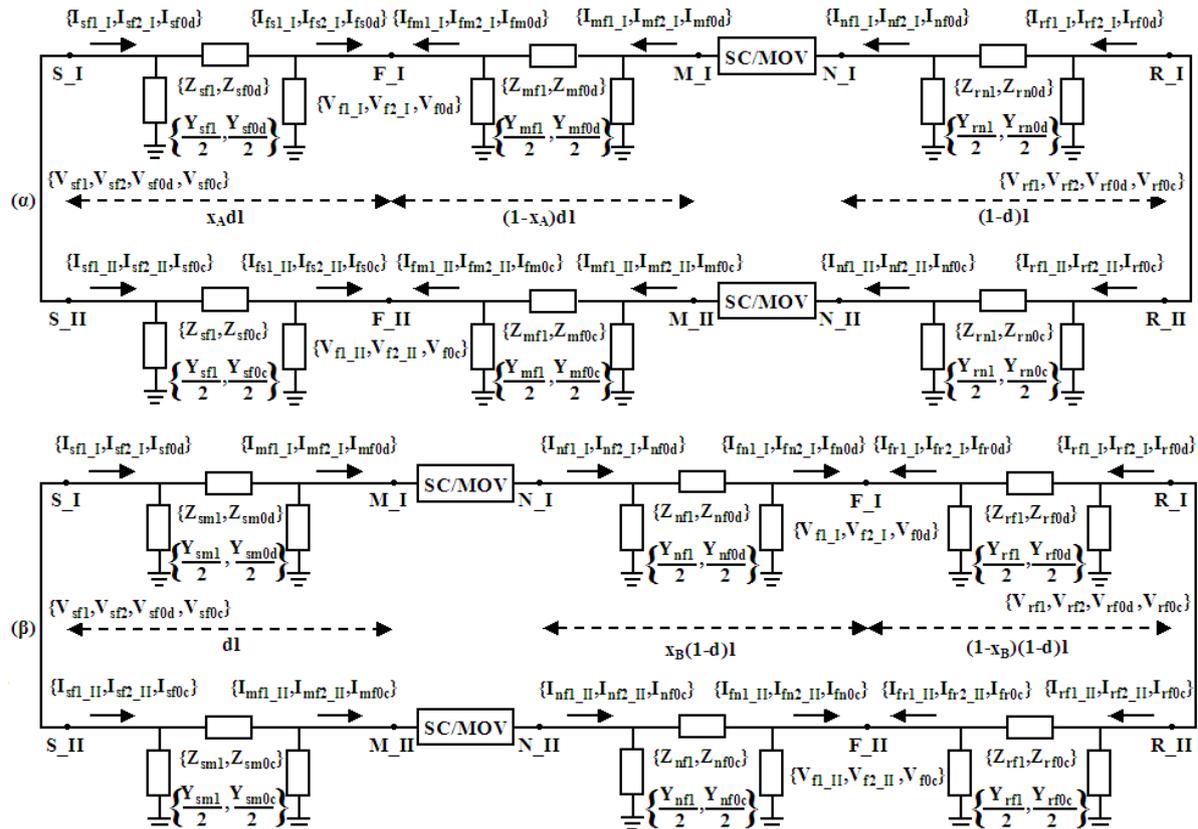


Σχήμα 9.2 Λογική ανίχνευσης του τύπου σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς: (α) σύνθεση διαφορικών στοιχείων φάσεων με χρήση συγχρονισμένων φασιθετών εντάσεων, (β) λογική ανίχνευσης σφαλμάτων που εμπλέκουν ένα μόνο κύκλωμα της διπλής γραμμής, (γ) λογική ανίχνευσης σφαλμάτων που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο χρησιμοποιούνται δύο ανεξάρτητες υπορουτίνες, SUB\_1 και SUB\_2, οι οποίες με βάση τις μετρούμενες τάσεις και εντάσεις στα άκρα της διπλής γραμμής,

υπολογίζουν τη θέση τη σφάλματος σε κάθε τμήμα της, πριν και μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης αντίστοιχα. Στη συνέχεια, επιλέγεται με κατάλληλα κριτήρια η πραγματική θέση του σφάλματος.

Με βάση την ανάλυση της παραγράφου 6.2 και το Σχήμα 9.3, η θέση του σφάλματος μπορεί να προσδιοριστεί σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο, οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος εκφράζονται συναρτήσει των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα δύο σημεία μέτρησης και της θέσης του σφάλματος. Στη συνέχεια, η θέση του σφάλματος υπολογίζεται μέσω μίας αριθμητικής μεθόδου, από τις οριακές συνθήκες που επικρατούν στο σημείο του σφάλματος, οι οποίες καθορίζονται αποκλειστικά από τον τύπο του.



Σχήμα 9.3 Ισοδύναμα Π δίκτυα των αποξενωμένων ακολουθιακών κυκλωμάτων γραμμής μεταφοράς διπλού κυκλώματος: (α) για σφάλμα πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, (β) για σφάλμα μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης

Στο Σχήμα 9.3, έχουν υιοθετηθεί οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

$V_{sf1}, V_{sf2}, V_{sf0}$ : μετρούμενες τάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο άκρο S της γραμμής,

$V_{rf1}, V_{rf2}, V_{rf0}$ : τάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας στο άκρο R της γραμμής,

$I_{sf1\_1}, I_{sf1\_II}, I_{sf2\_1}, I_{sf2\_II}$ : μετρούμενες εντάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο άκρο S της γραμμής,

$I_{rf1\_1}, I_{rf1\_II}, I_{rf2\_1}, I_{rf2\_II}$ : μετρούμενες εντάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο άκρο R της γραμμής,

$I_{sf0d}, I_{sf0c}, I_{rf0d}, I_{rf0c}$ : μετρούμενες εντάσεις διαφορικής και κοινής (μηδενικής) ακολουθίας στα άκρα S και R της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sf1}, Z_{mf1}, Z_{r1}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sf0d}, Z_{mf0d}, Z_{rn0d}$  : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sf0c}, Z_{mf0c}, Z_{rn0c}$  : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση κοινής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sm1}, Z_{nf1}, Z_{rf1}$  : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sm0d}, Z_{nf0d}, Z_{rf0d}$  : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sm0c}, Z_{nf0c}, Z_{rf0c}$  : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση κοινής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sf1}, Y_{mf1}, Y_{rn1}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sf0d}, Y_{mf0d}, Y_{rn0d}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sf0c}, Y_{mf0c}, Y_{rn0c}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα κοινής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SF, MF και RN της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sm1}, Y_{nf1}, Y_{rf1}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sm0d}, Y_{nf0d}, Y_{rf0d}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα διαφορικής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sm0c}, Y_{nf0c}, Y_{rf0c}$  : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα κοινής (μηδενικής) ακολουθίας των τμημάτων SM, NF και RF της γραμμής αντίστοιχα.

Οι ισοδύναμες παράμετροι της γραμμής διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς, εκφράζονται μέσω του μοντέλου γραμμής με καταναμημένους παραμέτρους, λαμβάνοντας υπόψη τις (6.14)-(6.21):

$$Z_{sf1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} x_A dl) \quad (9.5) \quad Y_{sf1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} x_A dl / 2) \quad (9.6)$$

$$Z_{sf0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} x_A dl) \quad (9.7) \quad Y_{sf0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} x_A dl / 2) \quad (9.8)$$

$$Z_{mf1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} (1 - x_A) dl) \quad (9.9) \quad Y_{mf1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} (1 - x_A) dl / 2) \quad (9.10)$$

$$Z_{mf0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} (1 - x_A) dl) \quad (9.11) \quad Y_{mf0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} (1 - x_A) dl / 2) \quad (9.12)$$

$$Z_{rn1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} (1 - d) l) \quad (9.13) \quad Y_{rn1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} (1 - d) l / 2) \quad (9.14)$$

$$Z_{rn0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} (1 - d) l) \quad (9.15) \quad Y_{rn0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} (1 - d) l / 2) \quad (9.16)$$

$$Z_{sm1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} dl) \quad (9.17) \quad Y_{sm1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} dl / 2) \quad (9.18)$$

$$Z_{sm0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} dl) \quad (9.19) \quad Y_{sm0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} dl / 2) \quad (9.20)$$

$$Z_{nf1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} x_B (1 - d) l) \quad (9.21) \quad Y_{nf1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} x_B (1 - d) l / 2) \quad (9.22)$$

$$Z_{nf0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} x_B (1 - d) l) \quad (9.23) \quad Y_{nf0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} x_B (1 - d) l / 2) \quad (9.24)$$

$$Z_{rf1} = Z_{c1} \sinh(\gamma_{c1} (1 - x_B) (1 - d) l) \quad (9.25) \quad Y_{rf1} = (2/Z_{c1}) \tanh(\gamma_{c1} (1 - x_B) (1 - d) l / 2) \quad (9.26)$$

$$Z_{rf0p} = Z_{c0p} \sinh(\gamma_{c0p} (1 - x_B) (1 - d) l) \quad (9.27) \quad Y_{rf0p} = (2/Z_{c0p}) \tanh(\gamma_{c0p} (1 - x_B) (1 - d) l / 2) \quad (9.28)$$

όπου  $p = d, c$ , αντιπροσωπεύει τη συνιστώσα διαφορικής και κοινής (μηδενικής) ακολουθίας αντίστοιχα,  $x_A$  είναι η α.μ. απόσταση του σφάλματος από το άκρο αναφοράς S για σφάλμα στο τμήμα της διπλής γραμμής πριν από τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης,  $x_B$  είναι η α.μ. απόσταση του σφάλματος από το άκρο αναφοράς N για σφάλμα στο τμήμα της διπλής γραμμής μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, και  $d$  είναι η α.μ. απόσταση της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης από το άκρο αναφοράς S της διπλής γραμμής.

### 9.2.2.1 Ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F

Οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των γνωστών ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα δύο άκρα μέτρησης, S και R, και της άγνωστης θέσης του σφάλματος. Οι ακολουθιακές τάσεις στο άκρο R είναι άγνωστες μεταβλητές, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν συναρτήσει των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων και της θέσης του σφάλματος, εφαρμόζοντας τις εξισώσεις περιορισμού (network constraint equations) που ισχύουν στο σημείο του σφάλματος, για κάθε τύπο σφάλματος, στη γραμμή διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς.

Με βάση το Σχήμα 9.3(α), τα ακολουθιακά ρεύματα που εισέρχονται στη συστοιχία των SCs/MOVs είναι:

$$I_{nfi\_j} = I_{rfi\_j}(1 + Z_{rnl}(Y_{rnl}/2)) - V_{rfi}(Y_{rnl}/2)(2 + Z_{rnl}(Y_{rnl}/2)) \quad (9.29)$$

$$I_{nf0p} = I_{rf0p}(1 + Z_{rn0p}(Y_{rn0p}/2)) - V_{rn0p}(Y_{rn0p}/2)(2 + Z_{rn0p}(Y_{rn0p}/2)) \quad (9.30)$$

όπου  $i=1, 2$ , συμβολίζει τη συνιστώσα θετικής και αρνητικής ακολουθίας, αντίστοιχα, και  $j = I, II$ , αντιστοιχεί στο κύκλωμα I και II της διπλής γραμμής.

$$I_{mfi\_j} = I_{nfi\_j} \quad (9.31)$$

$$I_{mf0p} = I_{nf0p} \quad (9.32)$$

Οι ακολουθιακές τάσεις στο σημείο του σφάλματος F μπορούν να υπολογιστούν συναρτήσει των ακολουθιακών τάσεων και των εντάσεων στο άκρο S, ως εξής:

$$V_{fi\_j} = V_{sfi}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) - I_{sfi\_j}Z_{sf1} \quad (9.33)$$

$$V_{f0p} = V_{sf0p}(1 + Z_{sf0p}(Y_{sf0p}/2)) - I_{sf0p}Z_{sf0p} \quad (9.34)$$

Αντίστοιχα, οι ακολουθιακές εντάσεις που εκφράζουν τη συνεισφορά του άκρου S της διπλής γραμμής στο ρεύμα σφάλματος, μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στο άκρο S, ως ακολούθως:

$$I_{fsi\_j} = I_{sfi\_j}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) - V_{sfi}(Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) \quad (9.35)$$

$$I_{fs0p} = I_{sf0p}(1 + Z_{sf0p}(Y_{sf0p}/2)) - V_{sf0p}(Y_{sf0p}/2)(2 + Z_{sf0p}(Y_{sf0p}/2)) \quad (9.36)$$

Η συνεισφορά στο ρεύμα σφάλματος του άκρου M της συστοιχίας των SCs/MOVs μπορεί να γραφεί υπό μορφή ιδιοσυνιστωσών ως εξής:

$$I_{fmi\_j} = I_{mfi\_j} / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) - V_{fi\_j}(Y_{mf1}/2)(1 + 1 / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2))) \quad (9.37)$$

$$I_{fm0p} = I_{mf0p} / (1 + Z_{mf0p}(Y_{mf0p}/2)) - V_{f0p}(Y_{mf0p}/2)(1 + 1 / (1 + Z_{mf0p}(Y_{mf0p}/2))) \quad (9.38)$$

Συνδυάζοντας τις (9.35)-(9.36) και (9.37)-(9.38), προκύπτουν τα συνολικά ρεύματα ιδιοσυνιστωσών στο σημείο του σφάλματος F:

$$I_{fi\_j} = I_{fsi\_j} + I_{fmi\_j} \quad (9.39)$$

$$I_{f0p} = I_{fs0p} + I_{fm0p} \quad (9.40)$$

Με συνδυασμό των (9.29) και (9.39), οι εντάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας στο σημείο του σφάλματος F μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των αντίστοιχων τάσεων και εντάσεων στα άκρα S και R της διπλής γραμμής:

$$\begin{aligned} I_{fi\_j} = & I_{sfi\_j}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2) + Z_{sf1}(Y_{mf1}/2)(1 + 1 / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & + I_{rfi\_j}(1 + Z_{rnl}(Y_{rnl}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \\ & - V_{sfi}((Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) + (1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2))(Y_{mf1}/2)(1 + 1 / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & - V_{rfi}(Y_{rnl}/2)(2 + Z_{rnl}(Y_{rnl}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \end{aligned} \quad (9.41)$$

Χρησιμοποιώντας τις (6.12)-(6.13), (9.30) και (9.40), οι τάσεις και οι εντάσεις μηδενικής ακολουθίας για κάθε κύκλωμα της διπλής γραμμής στο σημείο του σφάλματος F, μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των αντίστοιχων τάσεων και εντάσεων στα άκρα S και R:

$$V_{f0\_I} = V_{sf0}(1 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)) - I_{sf0\_I}(Z_{sf0c} + Z_{sf0d})/2 - I_{sf0\_II}(Z_{sf0c} - Z_{sf0d})/2 \quad (9.42)$$

$$V_{f0\_II} = V_{sf0}(1 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)) - I_{sf0\_I}(Z_{sf0c} - Z_{sf0d})/2 - I_{sf0\_II}(Z_{sf0c} + Z_{sf0d})/2 \quad (9.43)$$

$$\begin{aligned} I_{f0\_I} = & I_{sf0}(2 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2) + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2) + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2))) + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2))))/2 \\ & + I_{sf0\_II}(Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2) - Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2) + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2))) - Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2))))/2 \\ & + I_{mf0\_I}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) + (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2))/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)))/2 \\ & + I_{mf0\_II}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) - (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2))/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)))/2 \\ & - I_{sf0}((Y_{sf0c}/2)(2 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)) + (1 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2))(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)))) \\ & - I_{mf0}(Y_{m0c}/2)(2 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) \end{aligned} \quad (9.44)$$

$$\begin{aligned} I_{f0\_II} = & I_{sf0}(Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2) - Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2) + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2))) - Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2))))/2 \\ & + I_{sf0\_II}(2 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2) + Z_{sf0d}(Y_{sf0d}/2) + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2))) + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2))))/2 \\ & + I_{mf0\_I}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) - (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2))/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)))/2 \\ & + I_{mf0\_II}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) + (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2))/(1 + Z_{mf0d}(Y_{mf0d}/2)))/2 \\ & - I_{sf0}((Y_{sf0c}/2)(2 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2)) + (1 + Z_{sf0c}(Y_{sf0c}/2))(Y_{mf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)))) \\ & - I_{mf0}(Y_{m0c}/2)(2 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2))/(1 + Z_{mf0c}(Y_{mf0c}/2)) \end{aligned} \quad (9.45)$$

Αξιοποιώντας το Σχήμα 9.3(β) και ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με παραπάνω, υπολογίζονται οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στο σημείο του σφάλματος F στην περίπτωση σφαλμάτων μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης.

### 9.2.2.2 Αλγόριθμος εκτίμησης της θέσης του σφάλματος

Ανάλογα με τον τύπο του σφάλματος ισχύουν διαφορετικές οριακές συνθήκες στο σημείο του σφάλματος. Οι οριακές συνθήκες για το σφάλμα μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της τάσης  $V_f$  και της έντασης  $I_f$  που επικρατούν στο σημείο του σφάλματος, καθώς και της αντίστασης σφάλματος  $R_f$ .

$$V_f = R_f I_f \quad (9.46)$$

Στην (9.46), η αντίσταση σφάλματος  $R_f$  θεωρείται άγνωστη παράμετρος. Η τάση  $V_f$  μπορεί να υπολογιστεί από τις ακολουθιακές τάσεις  $V_{fk\_j}$ , όπου  $k = 0, 1, 2$  και  $j = I, II$ , όπως προκύπτουν από τις (9.33), (9.42) και (9.43), οι οποίες με τη σειρά τους μπορούν να εκφραστούν αποκλειστικά και μόνο ως συνάρτηση των γνωστών τάσεων  $V_{sfk}$  και εντάσεων  $I_{sfk\_j}$ ,  $I_{rfk\_j}$  στα άκρα S και R της διπλής γραμμής, αντίστοιχα. Συνεπώς, η τάση  $V_f$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$V_f(x) = f(V_{sfk}, I_{sfk\_j}, I_{rfk\_j}, x) \quad (9.47)$$

Στην (9.47), ο μοναδικός άγνωστος είναι η απόσταση της θέσης του σφάλματος  $x$ . Παρόμοια με την (9.47), το ρεύμα σφάλματος  $I_f$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$I_f(x) = g(V_{sfk}, I_{sfk\_j}, I_{rfk\_j}, x) \quad (9.48)$$

Σύμφωνα με τις (9.46)-(9.48), από την εξίσωση  $V_f = R_f I_f$  μπορεί να προκύψει η εξίσωση εντοπισμού της θέσης του σφάλματος:

$$F(x) = \text{Im} \left\{ \frac{V_f(x)}{I_f(x)} \right\} = \text{Im} \left\{ \frac{f(V_{sfk}, I_{sfk\_j}, I_{rfk\_j}, x)}{g(V_{sfk}, I_{sfk\_j}, I_{rfk\_j}, x)} \right\} = 0 \quad (9.49)$$

Από την (9.49), διαπιστώνεται ότι η εξίσωση εντοπισμού της θέσης του σφάλματος είναι μη γραμμική. Για τη λύση της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ευρέως διαδεδομένη μέθοδος Newton-Raphson, η οποία σε κάθε επανάληψη υπολογίζει τη διόρθωση  $\Delta x_\nu$ :

$$\Delta x_\nu = -\frac{F(x_\nu)}{F'(x_\nu)} \quad (9.50)$$

όπου  $\nu = 0, 1, 2, \dots$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων,  $\Delta x_\nu = x_{\nu+1} - x_\nu$  και  $F'(x_\nu) = \frac{dF(x_\nu)}{dx}$  είναι η παράγωγος της  $F(x)$  στην  $\nu$ -οστή επανάληψη. Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται, όταν η διόρθωση  $\Delta x_\nu$  γίνει μικρότερη από μία προκαθορισμένη ανοχή.

### 9.2.2.3 Χαρακτηριστικές εξισώσεις για διαφόρους τύπους σφαλμάτων

Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων μπορεί να αντιμετωπίσει επιτυχώς όλους τους πιθανούς τύπους σφάλματος σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει σφάλματα που εμπλέκουν τις φάσεις ενός μόνο κυκλώματος της διπλής γραμμής, π.χ. IAG, IBC, ΠBCG, ΠABC κτλ. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα σφάλματα που εμπλέκουν φάσεις και των δύο κυκλωμάτων, ή αλλιώς τα ενδοκυκλωματικά ή cross-country σφάλματα, π.χ. ΙΑΠΒG, ΙΑΠΒCG, ΙΒCΠCG, ΙΑΒΠBC, ΙΑΒCΠAB κτλ. Ο αστέρας με τις αντιστάσεις σφάλματος που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.6, επιτρέπει την αναπαράσταση οποιουδήποτε τύπου σφάλματος, εξαλείφοντας κάθε φορά του κλάδους των φάσεων που δεν εμπλέκονται στο σφάλμα [6]. Για παράδειγμα, για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα ΙΑΠΒG, διατηρούνται στον αστέρα μόνο οι αντιστάσεις σφάλματος  $R_{faI}$ ,  $R_{fbII}$  και  $R_g$ , ενώ οι υπόλοιπες αμελούνται.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές εξισώσεις για τα σφάλματα τύπου IAG και ΙΑΠΒG στο τμήμα της διπλής γραμμής πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης. Αντίστοιχες εξισώσεις μπορούν να προκύψουν για οποιονδήποτε τύπο σφάλματος, έχοντας ως αναφορά αυτούς τους δύο.

#### A) Χαρακτηριστικές εξισώσεις για σφάλματα που εμπλέκουν μόνο το ένα κύκλωμα της γραμμής

Η οριακή συνθήκη για ένα μονοφασικό ως προς γη σφάλμα τύπου IAG μπορεί να καθοριστεί από το Σχήμα 6.6, ως ακολούθως:

$$V_{fa\_1} = I_{fa\_1} R_f \quad (9.51)$$

όπου:  $V_{fa\_1} = V_{f1\_1} + V_{f2\_1} + V_{f0\_1}$  και  $I_{fa\_1} = I_{f1\_1} + I_{f2\_1} + I_{f0\_1}$  είναι η τάση και το ρεύμα σφάλματος, και  $R_f = R_{fa\_1} + R_g$  είναι η συνολική αντίσταση σφάλματος. Ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος εμπλέκει μόνο το κύκλωμα I της διπλής γραμμής. Συνεπώς, η ακόλουθη εξίσωση ισχύει στο κύκλωμα II της διπλής γραμμής:

$$I_{fk\_II} = 0 \quad (9.52)$$

όπου  $k = 0, 1, 2$ .

Συνδυάζοντας τις (9.41) και (9.45), οι άγνωστες μεταβλητές  $V_{rf1}$ ,  $V_{rf2}$  και  $V_{rf0}$  μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των ακολουθιακών τάσεων και εντάσεων στα άκρα της γραμμής και τη θέση του σφάλματος, ως ακολούθως:

$$V_{rfi} = (I_{sfi\_II}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2) + Z_{sf1}(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) + I_{rfi\_II}(1 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2))/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) - V_{sfi}((Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) + (1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2))(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) / ((Y_{rn1}/2)(2 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2))/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2))) \quad (9.53)$$

$$V_{rf0} = (I_{sfo\_I}(Z_{sfo}(Y_{sfo}/2) - Z_{sfo}(Y_{sfo}/2) + Z_{sfo}(Y_{mfo}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))) - Z_{sfo}(Y_{mfo}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))))/2 + I_{sfo\_II}(2 + Z_{sfo}(Y_{sfo}/2) + Z_{sfo}(Y_{sfo}/2) + Z_{sfo}(Y_{mfo}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))) + Z_{sfo}(Y_{mfo}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))))/2 + I_{sfo\_I}((1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2)) - (1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2)))/2 + I_{sfo\_II}((1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2)) + (1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2)))/2 - V_{sfo}((Y_{sfo}/2)(2 + Z_{sfo}(Y_{sfo}/2)) + (1 + Z_{sfo}(Y_{sfo}/2))(Y_{mfo}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2)))) / ((Y_{mfo}/2)(2 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))/(1 + Z_{mfo}(Y_{mfo}/2))) \quad (9.54)$$

όπου  $i = 1, 2$ .

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τις (9.33), (9.41)-(9.45) η εξίσωση εύρεσης της θέσης του σφάλματος στην (9.49) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\text{Im}\left(\frac{V_f(x_A)}{I_f(x_A)}\right) = \text{Im}\left(\frac{V_{fa\_I}}{I_{fa\_I}}\right) = \text{Im}\left(\frac{f(V_{sf1}, I_{sf1\_I}, V_{sf2}, I_{sf2\_I}, V_{sfo}, I_{sfo\_I}, I_{sfo\_II}, x_A)}{g(V_{sf1}, I_{sf1\_I}, I_{sf1\_II}, V_{sf2}, I_{sf2\_I}, I_{sf2\_II}, V_{sfo\_I}, I_{sfo\_II}, I_{sfo\_II}, I_{sf1\_I}, I_{sf1\_II}, I_{sf2\_I}, I_{sf2\_II}, I_{sfo\_I}, I_{sfo\_II}, x_A)}\right) = 0 \quad (9.55)$$

Από την (9.55), μπορεί να υπολογιστεί απευθείας η θέση του σφάλματος, καθώς είναι η μοναδική άγνωστη παράμετρος της εξίσωσης. Με αντίστοιχο τρόπο, μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις εύρεσης της θέσης του σφάλματος, που αντιστοιχούν και στους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων, και εμπλέκουν το ένα μόνο κύκλωμα της διπλής γραμμής.

### **B) Χαρακτηριστικές εξισώσεις για σφάλματα που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της γραμμής**

Οι οριακές συνθήκες για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα τύπου ΙΑΙΒΓ, μπορεί να καθοριστούν εύκολα από το Σχήμα 6.6, ως ακολούθως:

$$V_{fa\_I} - I_{fa\_I}R_{fa\_I} = (I_{fa\_I} + I_{fb\_II})R_g \quad (9.56)$$

$$V_{fa\_I} - I_{fa\_I}R_{fa\_I} = V_{fb\_II} - I_{fb\_II}R_{fb\_II} \quad (9.57)$$

όπου:  $V_{fb\_II} = a^2V_{f1\_II} + aV_{f2\_II} + V_{f0\_II}$  και  $I_{fb\_II} = a^2I_{f1\_II} + aI_{f2\_II} + I_{f0\_II}$  είναι η τάση και το ρεύμα σφάλματος στο κύκλωμα ΙΙ της διπλής γραμμής. Λαμβάνοντας το πραγματικό και το φανταστικό μέρος της (9.57) αντίστοιχα, η άγνωστη αντίσταση σφάλματος  $R_{fa\_I}$  μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των τάσεων και εντάσεων σφάλματος στα δύο κυκλώματα της γραμμής, ως εξής:

$$R_{fa\_I} = \frac{\text{Re}\{I_{fb\_II}\} \text{Im}\{V_{fa\_I} - V_{fb\_II}\} - \text{Im}\{I_{fb\_II}\} \text{Re}\{V_{fa\_I} - V_{fb\_II}\}}{\text{Re}\{I_{fb\_II}\} \text{Im}\{I_{fa\_I}\} - \text{Im}\{I_{fb\_II}\} \text{Re}\{I_{fa\_I}\}} \quad (9.58)$$

Επιπλέον, επειδή ο συγκεκριμένος τύπος σφάλματος εμπλέκει και τα δύο κυκλώματα της γραμμής, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι ακόλουθες εξισώσεις περιορισμού για τον προσδιορισμό των αγνώστων μεταβλητών  $V_{rf1}$ ,  $V_{rf2}$  και  $V_{rf0}$ :

$$\begin{cases} I_{fb\_I} = a^2 I_{f1\_I} + a I_{f2\_I} + I_{f0\_I} = 0 \\ I_{fc\_I} = a I_{f1\_I} + a^2 I_{f2\_I} + I_{f0\_I} = 0 \end{cases} \Rightarrow I_{f1\_I} = I_{f2\_I} = I_{f0\_I} \quad (9.59)$$

$$\begin{cases} I_{fa\_II} = I_{f1\_II} + I_{f2\_II} + I_{f0\_II} = 0 \\ I_{fc\_II} = a I_{f1\_II} + a^2 I_{f2\_II} + I_{f0\_II} = 0 \end{cases} \Rightarrow I_{f1\_II} = a^2 I_{f2\_II} = a I_{f0\_II} \quad (9.60)$$

Συνδυάζοντας τις (9.41), (9.45) και (9.59)-(9.60), προκύπτει:

$$\begin{aligned} V_{rf1} = & ((a^2 I_{sf1\_I} - a^2 I_{sf2\_I} - I_{sf1\_II} + a^2 I_{sf2\_II})(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2) + Z_{sf1}(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & + (a^2 I_{rf1\_I} - a^2 I_{rf2\_I} - I_{rf1\_II} + a^2 I_{rf2\_II})(1 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \\ & - (a^2 - 1)V_{sf1}((Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) + (1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2))(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & / ((a^2 - 1)(Y_{rn1}/2)(2 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2))) \end{aligned} \quad (9.61)$$

$$\begin{aligned} V_{rf2} = & ((I_{sf1\_I} - I_{sf2\_I} - I_{sf1\_II} + a^2 I_{sf2\_II})(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2) + Z_{sf1}(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & + (I_{rf1\_I} - I_{rf2\_I} - I_{rf1\_II} + a^2 I_{rf2\_II})(1 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \\ & - (a^2 - 1)V_{sf2}((Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) + (1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2))(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & / ((a^2 - 1)(Y_{rn1}/2)(2 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2))) \end{aligned} \quad (9.62)$$

$$\begin{aligned} V_{f0} = & (I_{f0\_I}(2 + Z_{f0c}(Y_{f0c}/2) + Z_{f0d}(Y_{f0d}/2) + Z_{f0e}(Y_{f0e}/2)(1 + 1/(1 + Z_{f0e}(Y_{f0e}/2))) + Z_{f0d}(Y_{f0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{f0d}(Y_{f0d}/2))))/2 \\ & + I_{f0\_II}(Z_{f0c}(Y_{f0c}/2) - Z_{f0d}(Y_{f0d}/2) + Z_{f0e}(Y_{f0e}/2)(1 + 1/(1 + Z_{f0e}(Y_{f0e}/2))) - Z_{f0d}(Y_{f0d}/2)(1 + 1/(1 + Z_{f0d}(Y_{f0d}/2))))/2 \\ & + I_{f0\_I}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2)) / (1 + Z_{nf0c}(Y_{nf0c}/2)) + (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2)) / (1 + Z_{nf0d}(Y_{nf0d}/2))) / 2 \\ & + I_{f0\_II}((1 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2)) / (1 + Z_{nf0c}(Y_{nf0c}/2)) - (1 + Z_{m0d}(Y_{m0d}/2)) / (1 + Z_{nf0d}(Y_{nf0d}/2))) / 2 \\ & - V_{f0}((Y_{f0c}/2)(2 + Z_{f0c}(Y_{f0c}/2)) + (1 + Z_{f0c}(Y_{f0c}/2))(Y_{nf0c}/2)(1 + 1/(1 + Z_{nf0c}(Y_{nf0c}/2)))) \\ & - I_{sf1\_I}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2) + Z_{sf1}(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & - I_{rf1\_I}(1 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \\ & + V_{sf1}((Y_{sf1}/2)(2 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) + (1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2))(Y_{mf1}/2)(1 + 1/(1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)))) \\ & + V_{rf1}(Y_{rn1}/2)(2 + Z_{rn1}(Y_{rn1}/2)) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \\ & / ((Y_{m0c}/2)(2 + Z_{m0c}(Y_{m0c}/2)) / (1 + Z_{nf0c}(Y_{nf0c}/2))) \end{aligned} \quad (9.63)$$

Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τις (9.33), (9.41)-(9.45), η εξίσωση εύρεσης της θέσης του σφάλματος στην (9.49) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} \operatorname{Im} \left( \frac{V_f(x)}{I_f(x)} \right) &= \operatorname{Im} \left( \frac{V_{fa\_I} - I_{fa\_I} R_{fa\_I}}{I_{fa\_I} + I_{fb\_II}} \right) = \\ \operatorname{Im} \left( \frac{f(V_{sf1}, I_{sf1\_I}, I_{sf1\_II}, V_{sf2}, I_{sf2\_I}, I_{sf2\_II}, V_{sf0\_I}, I_{sf0\_I}, I_{sf0\_II}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_II}, I_{rf1\_I}, I_{rf1\_II}, I_{rf2\_I}, I_{rf2\_II}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_II}, x_A)}{g(V_{sf1}, I_{sf1\_I}, I_{sf1\_II}, V_{sf2}, I_{sf2\_I}, I_{sf2\_II}, V_{sf0\_I}, I_{sf0\_I}, I_{sf0\_II}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_II}, I_{rf1\_I}, I_{rf1\_II}, I_{rf2\_I}, I_{rf2\_II}, I_{rf0\_I}, I_{rf0\_II}, x_A)} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (9.64)$$

Από την (9.64), μπορεί να υπολογιστεί απευθείας η θέση του σφάλματος, καθώς είναι η μοναδική άγνωστη παράμετρος της εξίσωσης. Με αντίστοιχο τρόπο, μπορούν να προσδιοριστούν οι χαρακτηριστικές εξισώσεις εύρεσης της θέσης του σφάλματος, που αντιστοιχούν και στους υπόλοιπους τύπους σφαλμάτων, που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα της διπλής γραμμής.

### 9.2.2.4 Επιλογή του εσφαλμένου τμήματος της διπλής γραμμής με αντιστάθμιση σειράς

Με βάση το Σχήμα 9.3(α)-(β) και τις παραγράφους 9.2.1 και 9.2.2, υπολογίζονται δύο διαφορετικές λύσεις,  $x_A$  και  $x_B$ , για τη θέση του σφάλματος στα τμήματα της διπλής γραμμής πριν και μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, αντίστοιχα. Όμως, μόνο μία λύση αντιπροσωπεύει την πραγματική θέση του σφάλματος, και για το λόγο αυτό απαιτείται η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου αλγορίθμου επιλογής του εσφαλμένου τμήματος της γραμμής. Σε κάθε περίπτωση, αν μία εκ των δύο λύσεων για τη θέση του σφάλματος είναι εκτός του πεδίου τιμών της, απορρίπτεται ως μη ρεαλιστική. Σε αντίθετη περίπτωση, για τις πιθανές λύσεις  $x_A$  και  $x_B$ , υπολογίζονται οι εκτιμώμενες σύνθετες αντιστάσεις της συστοιχίας των SCs/MOVs για τις φάσεις των κυκλωμάτων της διπλής γραμμής που εμπλέκονται στο σφάλμα ([216], [255]). Για συντομία, παρουσιάζεται παρακάτω μόνο η διαδικασία για σφάλματα στο τμήμα της γραμμής πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, SM. Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και για σφάλματα στο τμήμα της διπλής γραμμής μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης, NR.

Αν θεωρηθεί ότι το σφάλμα στο τμήμα SM\_I της διπλής γραμμής εμπλέκει τη φάση A, τότε για την εκτιμώμενη θέση του σφάλματος  $x_A$ , που προκύπτει από την υπορουτίνα SUB\_1 του αλγορίθμου, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση της συστοιχίας των SCs/MOVs στην εσφαλμένη φάση είναι:

$$Z_{SE_A}(x_A) = \frac{V_{nm1\_1}(x_A) + V_{nm2\_1}(x_A) + V_{nm0\_1}(x_A)}{I_{nf1\_1}(x_A) + I_{nf2\_1}(x_A) + I_{nf0\_1}(x_A)} \quad (9.65)$$

όπου  $V_{nm1\_1}$ ,  $V_{nm2\_1}$ ,  $V_{nm0\_1}$  είναι οι ακολουθιακές πτώσεις τάσεις στα άκρα της συστοιχίας των SCs/MOVs στο κύκλωμα I της γραμμής, οι οποίες μπορούν να υπολογιστούν αξιοποιώντας τις (6.12)-(6.13) και τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$V_{nfi\_1} = V_{rfi\_1}(1 + Z_{rm1}(Y_{rm1}/2)) - I_{rfi\_1}Z_{rm1} \quad (9.66)$$

$$V_{nfp0} = V_{rfp0}(1 + Z_{rm0p}(Y_{rm0p}/2)) - I_{rfp0}Z_{rm0p} \quad (9.67)$$

$$V_{mfi\_1} = (V_{sfi\_1}(1 + Z_{sf1}(Y_{sf1}/2)) - I_{sfi\_1}Z_{sf1} + I_{mfi\_1}Z_{mf1}) / (1 + Z_{mf1}(Y_{mf1}/2)) \quad (9.68)$$

$$V_{mfp0} = (V_{sfp0}(1 + Z_{sf0p}(Y_{sf0p}/2)) - I_{sfp0}Z_{sf0p} + I_{mfp0}Z_{mf0}) / (1 + Z_{mf0p}(Y_{mf0p}/2)) \quad (9.69)$$

όπου:  $i = 1, 2$  και  $p = d, c$ .

Κατόπιν, προκύπτει:

$$V_{nmk\_1} = V_{nfk\_1} - V_{mfk\_1} \quad (9.70)$$

όπου:  $k = 0, 1, 2$ .

Τα ακολουθιακά ρεύματα  $I_{nf1\_1}$ ,  $I_{nf2\_1}$ ,  $I_{nf0\_1}$  που εισρέουν στη συστοιχία των SCs/MOVs από το άκρο R της γραμμής, μπορούν να υπολογιστούν από τις (6.12)-(6.13) και (9.29)-(9.30). Με βάση τους νόμους της φυσικής, το πραγματικό μέρος της  $Z_{SE_A}(x_A)$  πρέπει να είναι θετικό, αφού η ωμική αντίσταση δε μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές. Λόγω της χωρητικής συμπεριφοράς της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης, το φανταστικό μέρος της  $Z_{SE_A}(x_A)$  πρέπει να είναι αρνητικό. Αν δεν ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες, η  $x_A$  δε θα είναι η πραγματική θέση του σφάλματος. Με αντίστοιχο τρόπο, προσδιορίζεται και αποτιμάται η σύνθετη αντίσταση  $Z_{SE_A}(x_B)$ .

## 9.3 Αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αξιολόγησης της προτεινόμενης μεθόδου με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP [44]. Για το σκοπό αυτό, έχει χρησιμοποιηθεί ένα πρότυπο δίκτυο δοκιμών 400 kV που

περιλαμβάνει μια γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος, μήκους 300 km, με αντιστάθμιση σειράς στο μέσον της ( $d = 0.5$  p.u.). Οι παράμετροι του δικτύου και της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης δίνονται στον Πίνακα 9.1. Η γραμμή διπλού κυκλώματος αναπαρίσταται στο ATP/EMTP με το μοντέλο γραμμής του Clarke με κατανεμημένες παραμέτρους. Το κύκλωμα των MOVs

εξομοιώνεται με χρήση της γνωστής χαρακτηριστικής v-i:  $i = P \left( \frac{v}{V_{REF}} \right)^q$ . Το μοντέλο του δικτύου

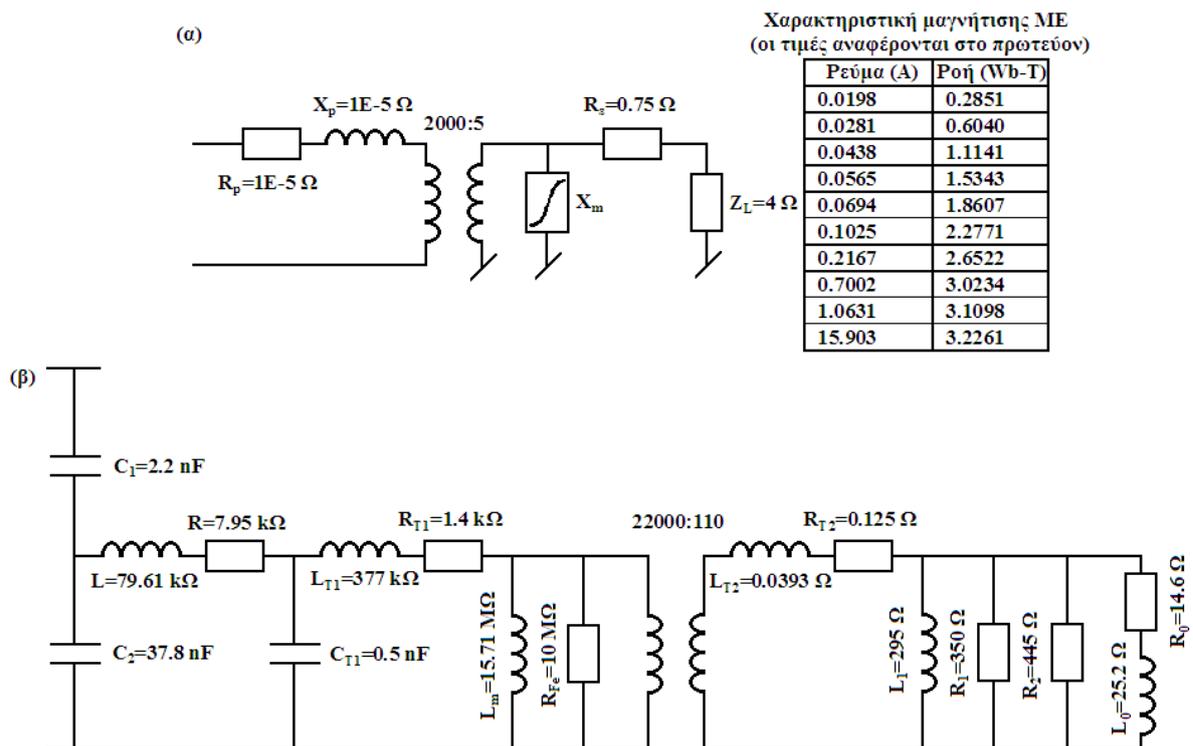
περιλαμβάνει επιπλέον τους μετασχηματιστές τάσεις και εντάσεις (VTs και CTs) στα δύο άκρα μέτρησης της διπλής γραμμής. Τα μοντέλα που έχουν υιοθετηθεί για τους μετασχηματιστές μέτρησης και οι παράμετροί τους φαίνονται στο Σχήμα 9.4(α)-(β) ([94], [206]).

**Πίνακας 9.1 Παράμετροι δικτύου δοκιμών 400 kV, 50 Hz στο ATP/EMTP**

Στοιχεία	Παράμετροι	
Δεδομένα γραμμής μεταφοράς	$l$	300 km
	$Z_1$	$0.0276+j0.3151 \Omega/\text{km}$
	$B_1$	$4.0841 \mu\text{S}/\text{km}$
	$Z_0$	$0.2680+j1.0371 \Omega/\text{km}$
	$B_0$	$2.7018 \mu\text{S}/\text{km}$
	$Z_{0M}$	$0.2300+j0.6308 \Omega/\text{km}$
	$B_{0M}$	$1.6242 \mu\text{S}/\text{km}$
SCs/MOVs	βαθμός αντιστάθμισης	70%
	θέση SCs/MOVs	150 km
	ρεύμα αναφοράς ( $P$ )	1 kA
	τάση αναφοράς ( $V_{REF}$ )	150 kV
	εκθέτης ( $q$ )	23
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο S της γραμμής	$Z_{S1}$	$1.312+j15.0 \Omega$
	$Z_{S0}$	$2.334+j26.6 \Omega$
	μέτρο της $E_S$	1.00 (p.u.)
	γωνία της $E_S$	$0^0$
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο R της γραμμής	$Z_{R1}$	$2Z_{S1}$
	$Z_{R0}$	$2Z_{S0}$
	μέτρο της $E_R$	0.99 (p.u.)
	γωνία της $E_R$	$-30^0$

Η προτεινόμενη μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων έχει αναπτυχθεί στο υπολογιστικό περιβάλλον της MATLAB [159]. Τα αναλογικά φίλτρα, που απαιτούνται προκειμένου να απομακρυνθεί ο θόρυβος και οι υψηλές αρμονικές από τα σήματα των τάσεων και εντάσεων που λαμβάνονται από το ATP/EMTP, υλοποιούνται με χρήση ενός βαθυπερατού φίλτρου Butterworth 2<sup>ης</sup> τάξης με συχνότητα αποκοπής ίση με 350 Hz. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι φασιθέτες των φασικών τάσεων και εντάσεων, με χρήση του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, ο οποίος χρησιμοποιεί 20 δείγματα ανά κύκλο. Από τα διαδοχικά δεδομένα φασιθετών που προκύπτουν από το διακριτό μετασχηματισμό Fourier, εξάγεται ο μέσος όρος για το χρονικό διάστημα 2-4 κύκλων, ακριβώς μετά την εκδήλωση του σφάλματος. Τέλος, υπολογίζονται οι ακολουθιακές τάσεις και εντάσεις στα δύο σημεία μέτρησης της γραμμής, κάνοντας χρήση του μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών.

Μετά το στάδιο εκτίμησης των φασιθετών των μετρούμενων σημάτων, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος ανίχνευσης του τύπου σφάλματος, προκειμένου να προσδιοριστούν οι φάσεις των κυκλωμάτων της διπλής γραμμής που εμπλέκονται στο σφάλμα. Στη συνέχεια, εκτελούνται οι υπορουτίνες SUB\_1 και SUB\_2, ώστε να υπολογιστούν οι πιθανές θέσεις του σφάλματος, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα της διπλής γραμμής, πριν και μετά τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης αντίστοιχα. Τέλος, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος επιλογής του εσφαλμένου τμήματος της γραμμής, που αποφαίνεται για την πραγματική θέση του σφάλματος.



Σχήμα 9.4 Μοντέλα μετασχηματιστών μέτρησης στο πρόγραμμα ATP/EMTP (α) ΜΕ, (β) χωρητικός ΜΤ

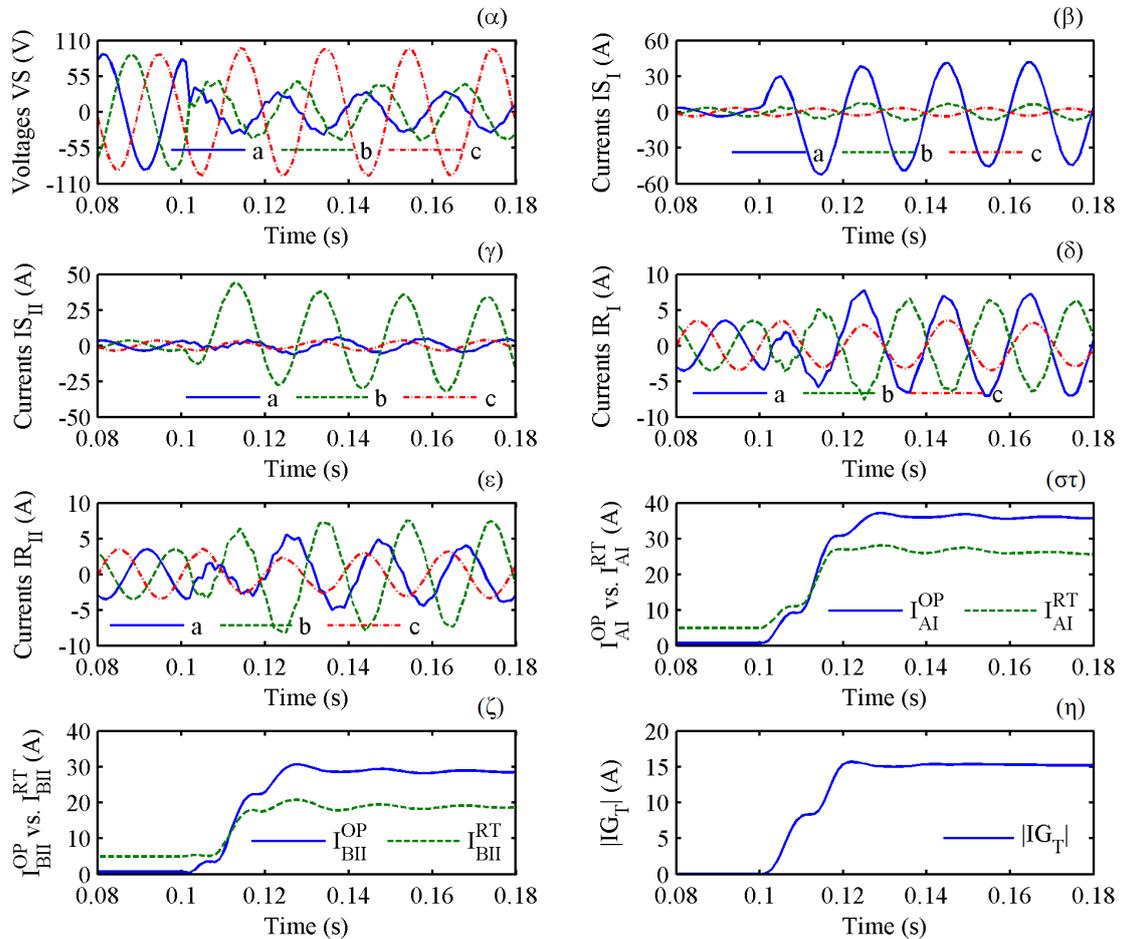
Στο Σχήμα 9.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα ΙΑΙΒΓ σε απόσταση 0.1 α.μ. (p.u.) από το άκρο αναφοράς S στο τμήμα της γραμμής πριν τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης. Στα Σχήματα 9.5(α)-(ε) απεικονίζονται οι κυματομορφές των σημάτων εισόδου στον εντοπιστή σφαλμάτων. Στα Σχήματα 9.5(στ)-(η) φαίνονται τα ρεύματα λειτουργίας και αναστολής των εμπλεκόμενων στο σφάλμα φάσεων της διπλής γραμμής, καθώς και το συνολικό ομοπολικό ρεύμα που προκαλείται από τη συμμετοχή της γης σε αυτό. Με βάση τα στοιχεία αυτά, αναγνωρίζεται ο τύπος του σφάλματος και χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες οριακές συνθήκες για την κατασκευή της χαρακτηριστικής εξίσωσης εύρεσης της θέσης του. Οι πιθανές θέσεις του σφάλματος,  $x_A$  and  $x_B$ , σε κάθε τμήμα της διπλής γραμμής, καθώς και οι αντίστοιχες ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις της συστοιχίας των SCs/MOVs,  $Z_{SE}(x_A)$  και  $Z_{SE}(x_B)$ , που υπολογίζονται από κάθε υπορουτίνα, είναι:

- $x_A = 0.0994$  p.u. (ως προς το άκρο αναφοράς S) -  $Z_{SE_{A_I}}(x_A) = 16.7255 - j55.5810 \Omega$ ,  
 $Z_{SE_{B_{II}}}(x_A) = 18.3497 - 49.8817i \Omega$ .
- $x_B = 0.0586$  p.u. (ως προς το άκρο αναφοράς N) -  $Z_{SE_{A_I}}(x_B) = -27.9316 - j52.5595 \Omega$ ,  
 $Z_{SE_{B_{II}}}(x_B) = 15.8254 - j54.2789 \Omega$ .

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι η εκτιμώμενη ισοδύναμη ωμική αντίσταση της συστοιχίας των SCs/MOVs, που αντιστοιχεί στη φάση A του κυκλώματος I της διπλής γραμμής και σχετίζεται με τη θέση του σφάλματος  $x_B$ , είναι αρνητική, γεγονός που αντιβαίνει στους νόμους της φυσικής. Συνεπώς, η πιθανή λύση  $x_B$  απορρίπτεται ως μη ρεαλιστική. Από την άλλη, η λύση  $x_A$ , που αποτυπώνει την πραγματική θέση του σφάλματος, επιτυγχάνει πολύ μεγάλη ακρίβεια.

Προκειμένου να διερευνηθεί η ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου, έχει εκτελεστεί ένας μεγάλος αριθμός προσομοιώσεων, για διάφορους τύπους σφαλμάτων, με διαφορετικές αντιστάσεις σφάλματος, και διαφορετικές γωνίες έναυσης και θέσεις για το σφάλμα. Για να εκτιμηθούν οι πιθανές θέσεις του σφάλματος,  $x_A$  και  $x_B$ , η επαναληπτική μέθοδος της παραγράφου 9.2.2.2 τερματίζεται, όταν η διόρθωση γίνει μικρότερη από  $10^{-6}$ . Οι αρχικές τιμές για τις θέσεις του

σφάλματος,  $x_{0_A}$  και  $x_{0_B}$ , που χρησιμοποιούνται για κάθε τμήμα της διπλής γραμμής ως προς τη διάταξη αντιστάθμισης, είναι ίσες με: 0.5 α.μ. (p.u.).



**Σχήμα 9.5** Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα ενδοκυκλωματικό σφάλμα ΙΑΠΒΓ: (α)-(ε) καταγραφές κυματομορφών των μετρούμενων σημάτων εισόδου στον εντοπιστή σφαλμάτων, (στ)-(η) στοιχεία της λογικής ανίχνευσης του τύπου σφάλματος

Για κάθε περίπτωση σφάλματος, η προτεινόμενη μέθοδος επιδεικνύει εξαιρετική συμπεριφορά, οδηγώντας σε σωστές αποφάσεις για τον τύπο του σφάλματος και το εσφαλμένο τμήμα της διπλής γραμμής, και σε εκτιμήσεις υψηλής ακριβείας για τη θέση του σφάλματος. Επιπλέον, για κάθε περίπτωση, ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που απαιτείται για τη σύγκλιση της αριθμητικής μεθόδου δεν ξεπερνά τις έξι.

Στον Πίνακα 9.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για τέσσερις διαφορετικούς τύπους σφαλμάτων, που εμπλέκουν μόνο το ένα κύκλωμα της διπλής γραμμής, και έξι τύπους σφαλμάτων, που εμπλέκουν και τα δύο κυκλώματα. Το σφάλμα εκτίμησης για τη θέση του σφάλματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\% \text{Σφάλμα} = \frac{|\text{πραγματική θέση σφάλματος} - \text{εκτιμώμενη θέση σφάλματος}|}{\text{συνολικό μήκος γραμμής μεταφοράς}} \times 100\% \quad (9.71)$$

Τα σφάλματα εκτίμησης της προτεινόμενης μεθόδου υπολογίζονται δύο φορές: το σφάλμα Er1 αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου στο μοντέλο της διπλής γραμμής στο πρόγραμμα ATP/EMTP, δε συμπεριλαμβάνονται τα μοντέλα των μετασχηματιστών μέτρησης, ενώ το σφάλμα Er2 αντιστοιχεί στην αντίθετη περίπτωση. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 9.2, τα σφάλματα Er1 και Er2 δεν ξεπερνούν το 0.38% και 3.29% αντίστοιχα, γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη ακρίβεια της μεθόδου. Επιπλέον, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το σφάλμα εκτίμησης μεγαλώνει όσο η

θέση του σφάλματος πλησιάζει προς τη διάταξη σειριακής αντιστάθμισης. Στον Πίνακα 9.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου σε σχέση με την αντίσταση σφάλματος. Ο Πίνακας 9.4 συνοψίζει τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου για μεταβολές της γωνίας έναυσης του σφάλματος. Ο Πίνακας 9.5 αποτυπώνει την επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής, στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου. Τέλος, στον Πίνακα 9.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου για διάφορους βαθμούς αντιστάθμισης στη γραμμή διπλού κυκλώματος.

**Πίνακας 9.2 Επίδραση της θέσης του σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							15 (km)		60 (km)		135 (km)		165 (km)		240 (km)		285 (km)	
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)	Er1 (%)	Er2 (%)	Er1 (%)	Er2 (%)	Er1 (%)	Er2 (%)	Er1 (%)	Er2 (%)		
IAG							10	0.005	0.033	0.013	0.195	0.006	0.490	0.057	1.472	0.023	1.876	0.046	1.563
IBC		0.5	0.5					0.032	0.199	0.118	0.507	0.263	0.974	0.303	1.146	0.128	1.117	0.015	0.933
IBCG							10	0.018	1.056	0.051	1.600	0.022	1.364	0.098	2.917	0.045	3.285	0.000	2.800
IABC	1	1	1					0.020	0.072	0.069	0.438	0.144	0.871	0.182	1.377	0.067	1.255	0.029	0.939
IAIBG	1				0.5		10	0.008	0.059	0.001	0.326	0.016	0.740	0.382	1.110	0.044	1.264	0.043	0.947
IAIBCG	0.5				1	1	10	0.011	0.671	0.020	0.003	0.081	0.691	0.201	1.943	0.379	0.962	0.351	0.874
IBCIAB		0.5	0.5	1	1			0.036	0.789	0.122	1.044	0.289	1.107	0.266	1.753	0.068	1.525	0.227	0.936
IAIABC	1			0.5	0.5	0.5		0.033	0.376	0.129	1.455	0.278	1.017	0.358	1.308	0.108	1.238	0.006	0.958

**Πίνακας 9.3 Επίδραση της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							165 (km)		Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							165 (km)	
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)		Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)
IAG							1	0.122	1.714	IAIBG	0.5				0.5		1	0.360	1.181
							10	0.057	1.472		1				0.5		10	0.382	1.110
							50	0.034	0.335		0.5				1		50	0.439	0.949
							100	0.018	3.467		1				1		100	0.441	0.919
IBC		0.25	0.25					0.293	1.164	IAIBCG	0.5				0.5	0.5	0.034	1.598	
		0.5	0.5					0.303	1.146		1				1	1	0.004	1.631	
		2.5	2.5					0.347	1.016		1				0.5	0.5	5	0.468	2.152
		5	5					0.347	0.889		0.5				1	1	10	0.201	1.943
IBCG							1	0.097	3.170	IBCIAB		0.5	0.5	1	1			0.266	1.753
							10	0.098	2.917			1	1	1	1			0.289	1.649
							50	0.151	2.310			1	1	5	5			0.326	1.614
							100	0.202	2.003			5	5	10	10			0.463	1.053
IABC	0.5	0.5	0.5					0.176	1.340	IAIABC	1			0.5	0.5	0.5		0.358	1.308
	1	1	1					0.182	1.377		1			1	1	1		0.369	1.282
	5	5	5					0.203	1.206		1			5	5	5		0.358	1.154
	10	10	10					0.204	0.977		5			10	10	10		0.318	0.997

**Πίνακας 9.4 Επίδραση της γωνίας έναυσης του σφάλματος στην ακρίβεια της μεθόδου**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							0°		45°		90°		135°		180°	
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)								
IAG							10	0.057	1.472	0.180	1.596	0.177	1.834	0.355	2.030	0.166	1.619
IBC		0.5	0.5					0.303	1.146	0.382	1.066	0.384	1.064	0.355	1.094	0.372	1.076
IBCG							10	0.098	2.917	0.200	2.818	0.196	2.826	0.299	2.714	0.310	2.702
IABC	1	1	1					0.182	1.377	0.184	1.380	0.185	1.384	0.199	1.374	0.173	1.391
IAIBG	1				0.5		10	0.382	1.110	0.021	1.345	0.152	1.396	0.127	1.208	0.344	1.119
IAIBCG	0.5				1	1	10	0.201	1.943	0.299	2.151	0.344	2.278	0.211	2.076	0.274	2.037
IBCIAB		0.5	0.5	1	1			0.266	1.753	0.313	1.605	0.276	1.612	0.379	1.450	0.379	1.278
IAIABC	1			0.5	0.5	0.5		0.358	1.308	0.374	1.298	0.381	1.292	0.314	1.362	0.336	1.340

Από τους Πίνακες 9.3-9.6 προκύπτει ότι η προτεινόμενη μέθοδος δεν εξαρτάται από την αντίσταση και τη γωνία έναυσης του σφάλματος, τα ισοδύναμα δίκτυα στα άκρα της γραμμής και το βαθμό σειριακής αντιστάθμισης. Τα σφάλματα εκτίμησης για τη θέση του σφάλματος δεν ξεπερνούν το 0.7%, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα σφάλματα μέτρησης, και το 3.5% όταν τα μοντέλα των μετασχηματιστών μέτρησης συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο της διπλής γραμμής στο ATP/EMTP.

Παρόλα αυτά, πρέπει να επισημανθεί ότι η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερη ακρίβεια, αν εφαρμοστούν εξειδικευμένοι αλγόριθμοι ψηφιακού φιλτραρίσματος των σημάτων εισόδου στον εντοπιστή σφαλμάτων ([72], [254]), σε σχέση με τον κλασικό μετασχηματισμό Fourier.

**Πίνακας 9.5 Επίδραση της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης στο άκρο S της γραμμής στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							20 (%)		50 (%)		100 (%)		200 (%)		500 (%)	
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)								
IAG							10	0.010	2.448	0.089	2.050	0.057	1.472	0.153	1.153	0.313	0.220
IBC		0.5	0.5					0.491	2.023	0.403	1.665	0.303	1.146	0.224	0.538	0.367	0.037
IBCG							10	0.015	3.428	0.038	3.047	0.098	2.917	0.018	1.812	0.137	0.002
IABC	1	1	1					0.307	2.315	0.244	1.947	0.182	1.377	0.059	0.920	0.129	0.062
IAIBG	1				0.5		10	0.139	2.289	0.035	1.932	0.382	1.110	0.117	0.575	0.204	0.370
IAIBCG	0.5				1	1	10	0.440	3.082	0.444	2.723	0.201	1.943	0.594	1.993	0.529	1.160
IBCIAB		0.5	0.5	1	1			0.132	3.324	0.408	2.559	0.266	1.753	0.633	0.497	0.132	0.031
IAIABC	1			0.5	0.5	0.5		0.404	2.222	0.371	1.876	0.358	1.308	0.238	0.824	0.100	0.073

**Πίνακας 9.6 Επίδραση του βαθμού αντιστάθμισης στην ακρίβεια της προτεινόμενης μεθόδου**

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ω)							50 (%)		60 (%)		70 (%)		80 (%)	
	Rfa <sub>I</sub>	Rfb <sub>I</sub>	Rfc <sub>I</sub>	Rfa <sub>II</sub>	Rfb <sub>II</sub>	Rfc <sub>II</sub>	Rg	Er1 (%)	Er2 (%)						
IAG							10	0.178	1.658	0.128	1.549	0.057	1.472	0.074	1.453
IBC		0.5	0.5					0.109	1.273	0.178	1.196	0.303	1.146	0.320	1.370
IBCG							10	0.147	2.458	0.089	2.691	0.098	2.917	0.002	3.217
IABC	1	1	1					0.011	1.494	0.085	1.424	0.182	1.377	0.271	1.538
IAIBG	1				0.5		10	0.208	1.323	0.300	1.147	0.382	1.110	0.432	1.361
IAIBCG	0.5				1	1	10	0.228	1.927	0.207	1.902	0.201	1.943	0.194	2.036
IBCIAB		0.5	0.5	1	1			0.074	1.595	0.216	1.569	0.266	1.753	0.284	2.066
IAIABC	1			0.5	0.5	0.5		0.129	1.429	0.211	1.380	0.358	1.308	0.408	1.485

## 9.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος εντοπισμού σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς, η οποία χρησιμοποιεί περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων από κάθε άκρο των γραμμών και δεν εξαρτάται από το μοντέλο της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης. Η προτεινόμενη μέθοδος βασίζεται στο μοντέλο γραμμής με κατανομημένες παραμέτρους, κάνοντας χρήση ενός πίνακα διαγωνιοποίησης, ο οποίος αποξενώνει τα αμοιβαία συζευγμένα κυκλώματα μηδενικής ακολουθίας των διπλών γραμμών. Κατά συνέπεια, η μέθοδος επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια κυρίως για γραμμές μεγάλου μήκους. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά κάθε τύπο σφάλματος, που μπορεί να εκδηλωθεί σε μια γραμμή διπλού κυκλώματος. Επιπλέον, δεν επηρεάζεται από την αντίσταση και τη γωνία έναυσης του σφάλματος, τα ισοδύναμα δίκτυα σε κάθε άκρο των γραμμών και το βαθμό σειριακής αντιστάθμισης. Η τεκμηρίωση της μεθόδου έχει πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια εκτεταμένου αριθμού σφαλμάτων, τα οποία εξομοιώθηκαν στο ATP/EMTP. Για κάθε περίπτωση, η μέθοδος επιδεικνύει μεγάλη ακρίβεια και πολύ καλή συμπεριφορά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η λεπτομερής και σε βάθος προσέγγιση θεμάτων που σχετίζονται με τον εντοπισμό σφαλμάτων σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έγινε σαφές στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4, οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που χρησιμοποιούν δεδομένα μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς υπερτερούν κατά πολύ αυτών που αξιοποιούν τις μετρήσεις των τάσεων και εντάσεων από ένα μόνο άκρο. Συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα των αλγορίθμων με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο είναι:

- 1) Δεν εξαρτώνται από την αντίσταση σφάλματος και το ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές πριν από το σφάλμα.
- 2) Δεν εξαρτώνται από τις παραμέτρους των ισοδυνάμων δικτύων στα άκρα των γραμμών.
- 3) Στις περισσότερες περιπτώσεις δεν απαιτείται εξειδικευμένος αλγόριθμος ανίχνευσης του τύπου σφάλματος.
- 4) Γενικά δεν χρησιμοποιούνται δεδομένα μέτρησης πριν από την εκδήλωση του σφάλματος (εκτός από την περίπτωση που με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται η γωνία συγχρονισμού, αν πρόκειται για μη συγχρονισμένες μετρήσεις).

Παρόλα αυτά, και οι αλγόριθμοι αυτοί επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως είναι:

- 1) Η ακρίβεια των δεδομένων μέτρησης που χρησιμοποιούνται.
- 2) Η ακρίβεια των παραμέτρων των γραμμών μεταφοράς, ως δεδομένων εισόδου στους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων από το χρήστη (π.χ. μηχανικός προστασίας, προσωπικό αποκατάστασης βλαβών σε γραμμές μεταφοράς κτλ.).
- 3) Η ασυμμετρία των τριφασικών γραμμών, όταν δεν εφαρμόζεται πλήρης αντιμετάθεση των αγωγών φάσεων κατά μήκος τους. Όπως αναλύθηκε στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2, στην περίπτωση αυτή, η χρήση των συμμετρικών συνιστωσών δεν αποξενώνει πλήρως τις ηλεκτροστατικές ζεύξεις μεταξύ των φάσεων και πρέπει να αναζητηθούν άλλοι μετασχηματισμοί ρυθμών, προκειμένου να γίνει εφικτή η αναπαράσταση των τριφασικών γραμμών σε ανεξάρτητα μεταξύ τους μονοφασικά κυκλώματα. Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή, δεν ισχύουν οι ηλεκτρικές παράμετροι των κυκλωμάτων θετικής και μηδενικής ακολουθίας που θεωρούνται στην περίπτωση πλήρους αντιμετάθεσης φάσεων.
- 4) Τα σφάλματα μικρής διάρκειας και τα σφάλματα χρονικά μεταβαλλόμενης αντίστασης τόξου.
- 5) Ο όγκος των μεταφερόμενων δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς, ο οποίος μπορεί να προκαλέσει συμφόρηση στα χρησιμοποιούμενα κανάλια επικοινωνίας, καθυστερώντας το χρόνο εντοπισμού του σφάλματος.
- 6) Το μοντέλο της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης στην περίπτωση γραμμών με αντιστάθμιση σειράς.

Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή, αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της επίδρασης των παραπάνω παραγόντων στην ακρίβεια υπολογισμού της θέσης του σφάλματος, η οποία επιτυγχάνεται από τους αλγορίθμους με χρήση δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των γραμμών μεταφοράς. Αναλυτικότερα:

- ✓ Οι αλγόριθμοι [13], [15] απαλείφουν πλήρως τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών από το πρόβλημα προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος, σε γραμμές μεταφοράς απλού και διπλού κυκλώματος αντίστοιχα. Μπορούν να εφαρμοστούν τόσο για γραμμές με, όσο και χωρίς αντιμετάθεση φάσεων. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν μη συγχρονισμένες μετρήσεις στα άκρα των γραμμών, γεγονός που τις καθιστά πολύ πιο οικονομικές σε σχέση με αυτές που επιστρατεύουν συγχρονισμένες μετρήσεις και προϋποθέτουν την ύπαρξη δεκτών GPS υψηλής ακριβείας για την επίτευξη συγχρονισμού. Ειδικότερα για τις γραμμές διπλού κυκλώματος, η προτεινόμενη μέθοδος [15] αξιοποιεί για τον υπολογισμό της θέσης του σφάλματος και της αντίστοιχης γωνίας συγχρονισμού, μόνο τους φασιθέτες των

εντάσεων θετικής ακολουθίας σε κάθε τερματικό σημείο τους κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται στο ελάχιστο ο αριθμός των μεταφερόμενων δεδομένων μέτρησης από κάθε άκρο των διπλών γραμμών. Ο προσδιορισμός της θέσης του σφάλματος, δε, πραγματοποιείται χωρίς τη χρήση επαναληπτικής μεθόδου – σε αντίθεση με την [13] - γεγονός που μειώνει δραστικά το χρόνο υπολογισμού και καθιστά δυνατή την online εφαρμογή της μεθόδου. Σε κάθε περίπτωση, επιτυγχάνεται εξαιρετική ακρίβεια εντοπισμού των σφαλμάτων, χωρίς οι παράμετροι του σφάλματος (π.χ. τύπος, αντίσταση, γωνία έναυσης του σφάλματος) και του συστήματος των γραμμών (π.χ. εξωτερικά δίκτυα, γραμμές μικρού, μεσαίου ή μεγάλου μήκους κτλ.), καθώς και η ακρίβεια των δεδομένων μέτρησης, να επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Ως μοναδικό μειονέκτημα των μεθόδων χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι δε μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τα σφάλματα μικρής διάρκειας.

- ✓ Οι αλγόριθμοι [12], [138] χρησιμοποιούν περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων και μη μετρήσεων για τον εντοπισμό σφαλμάτων σε γραμμές διπλού κυκλώματος με και χωρίς αντιστάθμιση σειράς, αντίστοιχα. Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία μόνο σε γραμμές με πλήρη αντιμετάθεση φάσεων, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να αναζητηθεί κατάλληλος μετασχηματισμός ρυθμών για την αποσύζευξη των κυκλωμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Η μέθοδος [12] απαλείφει πλήρως τις παραμέτρους του μοντέλου της διάταξης σειριακής αντιστάθμισης από το πρόβλημα προσδιορισμού της θέσης του σφάλματος σε γραμμές διπλού κυκλώματος με αντιστάθμιση σειράς. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα που προκύπτουν από τυχόν ανακρίβειες του μοντέλου ή από αβεβαιότητα σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του. Ο αλγόριθμος [138] χρησιμοποιεί δεδομένα μέτρησης πριν από σφάλμα, για τον υπολογισμό της γωνίας συγχρονισμού, ενώ αυτός της [12] μόνο συγχρονισμένους φασιθέτες κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται για κάθε περίπτωση είναι εξαιρετικά. Και οι δύο αλγόριθμοι δε μπορούν να αντιμετωπίσουν ικανοποιητικά τα σφάλματα μικρής διάρκειας.
- ✓ Ο αλγόριθμος [16] εντάσσεται στην κατηγορία των αλγορίθμων που αποσκοπούν στη βελτίωση της ακρίβειας/ποιότητας των μετρήσεων που χρησιμοποιούνται από τους εντοπιστές σφαλμάτων και τους H/N προστασίας. Όπως έγινε σαφές στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3, οι φασιθέτες των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων υπολογίζονται, συνήθως, από ένα ζεύγος ορθογωνίων φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR), όπως αυτά που προσδιορίζουν το πραγματικό και το φανταστικό μέρος του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (DFT). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το ζεύγος των ορθογωνίων FIR φίλτρων είναι πολύ ικανοποιητικά, όταν η συχνότητα δειγματοληψίας που εφαρμόζεται στα σήματα εισόδου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας των σημάτων. Όταν δεν ικανοποιείται αυτή η συνθήκη, στα αποτελέσματα που λαμβάνονται για τους φασιθέτες των σημάτων εισόδου υπεισέρχονται σφάλματα, τόσο στο μέτρο όσο και στη γωνία τους. Η προτεινόμενη μέθοδος αντισταθμίζει πλήρως τα σφάλματα αυτά, ενώ παράλληλα παρέχει και μια ασφαλή εκτίμηση για την τοπικά στιγμιαία συχνότητα. Η μέθοδος μπορεί να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά και την περίπτωση όπου στα σήματα εισόδου παρεμβάλλονται ανώτερες αρμονικές συνιστώσες. Τα μοναδικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ο αυξημένος υπολογιστικός της φόρτος σε περίπτωση θεώρησης πολλών αρμονικών.

Μελλοντικές προοπτικές επέκτασης της παρούσας διατριβής μπορούν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Η αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων ([12], [13], [15], [138]) για σφάλματα με χρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση τόξου ([55]). Η διερεύνηση της επίδρασης της αντίστασης σφάλματος στην ακρίβεια των προτεινόμενων μεθόδων έγινε θεωρώντας ότι η αντίσταση τόξου είναι γραμμική και για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε σταθερή ωμική αντίσταση για την αντίσταση σφάλματος. Στην πράξη, η αντίσταση τόξου είναι μη γραμμική και χρονικά μεταβαλλόμενη και αυτό μπορεί να επηρεάσει τα σήματα των τάσεων και των εντάσεων στους εντοπιστές σφαλμάτων. Για να μελετηθεί η επίδραση της αντίστασης τόξου στους προτεινόμενους αλγορίθμους εντοπισμού σφαλμάτων, θα

πρέπει να αναπτυχθούν κατάλληλα μοντέλα εξομοίωσης της μη γραμμικής χαρακτηριστικής της αντίστασης τόξου, στο πρόγραμμα υπολογισμού ταχέων μεταβατικών φαινομένων ATP/EMTP ([135], [136]).

- Για σφάλματα μικρής διάρκειας (μικρότερης των 2 κύκλων), οι μέθοδοι εντοπισμού σφαλμάτων που χρησιμοποιούν ως δεδομένα εισόδου τους φασιθέτες των μετρούμενων τάσεων και εντάσεων στα άκρα των γραμμών μεταφοράς ([12], [13], [15], [138]), δε μπορούν να δώσουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για τη θέση του σφάλματος. Αυτό οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στο χρόνο απόκρισης των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των εν λόγω φασιθετών (ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3). Στην περίπτωση αυτή, θα ήταν προτιμότερη η χρησιμοποίηση μη επεξεργασμένων δεδομένων μέτρησης (raw data) από τα άκρα των γραμμών, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.5 [69]. Κρίσιμη παράμετρος στην περίπτωση αυτή είναι ο χρόνος δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται για τη διακριτοποίηση της γραμμής μεταφοράς. Επιπλέον, θα έχει πολύ ενδιαφέρον να μελετηθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν, απαλείφοντας τις ηλεκτρικές παραμέτρους των γραμμών στην περίπτωση αυτή (π.χ.  $R'_L$ ,  $Z_c$ ), εάν αυτό βέβαια είναι εφικτό, για κάθε τύπο γραμμής και κάθε τύπο σφάλματος, και να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των μεθόδων [13], [15].
- Διερεύνηση της δυνατότητας εφαρμογής των μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων χωρίς τη χρήση των παραμέτρων των γραμμών και σε πιο σύνθετους τύπους γραμμών μεταφοράς, π.χ. γραμμές τριών σημείων και γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις. Τα πρώτα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και διαφαίνεται ότι μπορούν να αναπτυχθούν πολύ ακριβείς αλγόριθμοι με χρήση μη συγχρονισμένων μετρήσεων από κάθε άκρο των γραμμών.
- Περαιτέρω αξιοποίηση του εργαστηριακού ψηφιακού εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (Real-Time Digital Simulator) ([14], [263], [264]) για την αξιολόγηση των προτεινόμενων μεθόδων εντοπισμού σφαλμάτων, σε συνεργασία με εμπορικές μονάδες μέτρησης φασιθετών, PMUs (π.χ. SEL-421 [263], GE D60). Οι αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων στην παρούσα εργασία έχουν αξιολογηθεί αποκλειστικά με χρήση δεδομένων προσομοίωσης από το πρόγραμμα ATP/EMTP, ενώ η ανάπτυξή τους έχει γίνει σε περιβάλλον MATLAB. Η επαλήθευσή τους με χρήση προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με μονάδες μέτρησης φασιθετών, που εκτελούν όλα τα στάδια επεξεργασίας των διενεργούμενων μετρήσεων, θα μπορούσε να αναδείξει τα κρίσιμα σημεία που πρέπει να προσεχθούν προκειμένου για την εμπορική αξιοποίηση των προτεινόμενων μεθόδων ή την ενσωμάτωσή τους σε ήδη υπάρχουσες εφαρμογές. Θα έχει πολύ ενδιαφέρον να μελετηθούν: α) οι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους κάθε πλατφόρμα PMU υπολογίζει τους φασιθέτες των σημάτων εισόδου στους προτεινόμενους αλγορίθμους και η επίδραση που μπορούν να έχουν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, β) η απώλεια του συγχρονισμού κατά τη διάρκεια του σφάλματος, σε περίπτωση συγχρονισμένων μετρήσεων [12] ή μη συγχρονισμένων μετρήσεων που χρησιμοποιούν και δεδομένα μέτρησης πριν από το σφάλμα ([13], [138]), γ) οι πραγματικές απαιτήσεις των προτεινόμενων μεθόδων, σε ότι αφορά τους ρυθμούς μετάδοσης των μετρούμενων φασιθετών από τα PMUs και τη συμφόρηση που μπορεί να προκληθεί στα κανάλια επικοινωνίας, ανά περίπτωση [75]. Επόμενο στάδιο θα μπορούσε να αποτελέσει η αξιολόγηση των προτεινόμενων αλγορίθμων με πραγματικές καταγραφές σφαλμάτων στο Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα.
- Οι αλγόριθμοι ([12], [138]) χρησιμοποιούν περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων ή μη μετρήσεων για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος σε γραμμές διπλού κυκλώματος με ή χωρίς αντιστάθμιση σειράς, αντίστοιχα. Στην εργασία [152], προτείνεται η χρήση μονάδων μέτρησης φασιθετών PMUs για την επίτευξη παρατηρησιμότητας της θέσης του σφάλματος στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος είναι, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των PMUs, η χρησιμοποίηση ελαχίστου αριθμού PMUs για την ανίχνευση των σφαλμάτων στα συστήματα μεταφοράς και τον ακριβή εντοπισμό της θέσης τους. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται κατά κανόνα αλγόριθμοι που επεξεργάζονται περιορισμένο αριθμό συγχρονισμένων μετρήσεων από τους ίδιους ή γειτονικούς ζυγούς σύνδεσης των γραμμών που υπόκεινται στο σφάλμα. Ο αριθμός των PMUs και η επιλογή των ζυγών σύνδεσής τους στο σύστημα μεταφοράς διατυπώνεται ως ένα πρόβλημα

βελτιστοποίησης και κατόπιν επιλύεται. Στην εργασία [152] μελετώνται αποκλειστικά αλγόριθμοι εντοπισμού σφαλμάτων για γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος. Θα μπορούσε να διερευνηθεί και η ενσωμάτωση των προτεινόμενων αλγορίθμων ([12], [138]), καθώς και άλλων που αφορούν πιο δύσκολες διαμορφώσεις γραμμών, στο συγκεκριμένο πρόβλημα, ώστε να προκύψει μια πιο γενικευμένη λύση.

- Σε ότι αφορά τους αλγορίθμους εκτίμησης των φασιθετών των σημάτων εισόδου στους εντοπιστές σφαλμάτων, και γενικότερα την ακρίβεια των δεδομένων μέτρησης που χρησιμοποιούνται από τους εντοπιστές σφαλμάτων και τους H/N προστάσιες, η έρευνα που διεξάγεται είναι διαρκής και αντανακλά σε κάθε χρονική περίοδο την κατανόηση των φαινομένων που εκδηλώνονται στα ΣΗΕ. Μέχρι πρότινος, η χρήση των φασιθετών για μη στάσιμα σήματα (non-stationary signals), όπως αυτά που αναπτύσσονται στα ΣΗΕ κατά την εκδήλωση μικρών ή μεγάλων διαταραχών, ήταν αρκετά συγκεχυμένη, γεγονός που αποτυπώνεται και στο σχετικό πρότυπο της IEEE (IEEE Std. C37.118 [90]) για τους συγχρονισμένες φασιθέτες, όπου δεν καθορίζονται σαφείς απαιτήσεις μέτρησης των φασιθετών για δυναμικές καταστάσεις [180]. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια νέα μέθοδος υπολογισμού των φασιθετών, με διόρθωση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από ένα ζεύγος ορθογωνίων φίλτρων πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης, όταν μεταβάλλεται η συχνότητα του συστήματος [16]. Οι μεταβολές της συχνότητας είναι πολύ συνηθισμένες στα ΣΗΕ όταν εκδηλώνονται ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, και είναι απόρροια της διαμόρφωσης πλάτους, συχνότητας ή φάσης που συντελείται στα ηλεκτρικά σήματα (τάσεις και εντάσεις) κατά τη διάρκεια των διαταραχών. Η προτεινόμενη μέθοδος καλύπτει επαρκώς μόνο τη διαμόρφωση συχνότητας και φάσης των σημάτων τάσης και έντασης. Θα μπορούσαν να διερευνηθούν και οι υπόλοιπες περιπτώσεις διαμόρφωσης (πλάτους ή ταυτόχρονης διαμόρφωσης πλάτους-γωνίας) ως επέκταση της μεθόδου. Αντί αυτής, θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν άλλες οικογένειες ψηφιακών φίλτρων και τεχνικές ανάλυσης μη στάσιμων σημάτων, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε άλλες επιστημονικές περιοχές, π.χ. τηλεπικοινωνίες (π.χ. φίλτρο ανυψωμένου συνημιτόνου – Raised Cosine Filter, μετασχηματισμός Hilbert κτλ.). Βέβαια, όλα αυτά πρέπει να γίνουν κατανοώντας τις αυξημένες απαιτήσεις ασφαλούς λειτουργίας των ΣΗΕ.

---

---

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11**

---

---

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Abe M, Otsuzuki N, Emura T et al. (1995) Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 10(1):159–168
- [2] Abur A, Magnago FH (2000) Use of time delays between modal components in wavelet based fault location. *Int J Electr Power and Energy Syst* 22(6):397–403
- [3] Aggarwal RK, Coury DV, Johns AT et al. (1993) Computer-aided design and testing of an accurate fault location for EHV teed feeders. In: *Proc of 5th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP368* pp 60–64
- [4] Aggarwal RK, Joorabian M, Song YH (1997) Fuzzy neural network approach to accurate transmission line fault location. *Int J of Eng Intell Syst for Electr Eng and Commun* 5(4):251–258
- [5] Aggarwal RK, Xuan QY, Dunn RW et al. (1999) A novel fault classification technique for double-circuit lines based on a combined unsupervised/supervised neural network. *IEEE Trans on Power Deliv* 14(4):1250–1256
- [6] Agrasar M, Uriondo F, Hernadez JR et al. (1997) A useful methodology for analyzing distance relays performance during simple and inter-circuit in multi-circuit lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 12(4):1465-1471
- [7] Ahn Y-J, Choi M-S, Kang S-H et al. (2000) An accurate fault location algorithm for double-circuit transmission systems. In: *Proc of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle*, pp 1344-1349
- [8] Al-Dabbagh M, Kapuduwage SK (2005) Using instantaneous values for estimating fault locations on series compensated transmission lines. *Electr Power Syst Res* 76(1–3):25–32
- [9] Ancell GB, Pahalawaththa NC (1992) Effects of frequency dependence and line parameters on single ended travelling wave based fault location schemes. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 139(4):332-342
- [10] Apostolopoulos CA, Korres GN (2008) A secure zone 2 accelerated trip scheme for non-pilot distance protection. In: *Proc. of 6th Mediterranean Conference & Exhibition - MedPower, Thessaloniki*, 6 p
- [11] Apostolopoulos CA, Korres GN (2009) ATP-EMTP evaluation of a new fault location algorithm for three-terminal transmission lines without knowing line parameters. In: *Proc of EEUG Meeting 2009 & European ATP-EMTP Conference, Delft*, pp 170-182
- [12] Apostolopoulos CA, Korres GN (2010 - under review) Accurate fault location algorithm for double-circuit series compensated lines using a limited number of two-end synchronized measurements. *Int J Electr Power and Energy Syst*
- [13] Apostolopoulos CA, Korres GN (2010) A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters. *IEEE Trans on Power Deliv* 25(4):2328-2338
- [14] Apostolopoulos CA, Korres GN (2010) Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS. *Eur Trans on Electr Power* 20(3):290-305
- [15] Apostolopoulos CA, Korres GN (2011 - to appear) A novel fault location algorithm for double-circuit transmission lines without utilizing line parameters. *IEEE Trans on Power Deliv*
- [16] Apostolopoulos CA, Korres GN (2011 - to appear) Method for exact compensation of voltage and current phasors computed by orthogonal finite impulse response filters during frequency variatios. *Electr Power Comp and Syst*
- [17] Begovic M, Novosel D, Djokic B (2008) Issues related to the implementation of synchrophasor measurements. In: *Proc of 41st Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, pp 160–164
- [18] Begovic MM, Djuric PM, Dunlap S et al. (1993) Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics *IEEE Trans on Power Deliv* 8(2):480-486
- [19] Benmouyal G (1989) An adaptive sampling-interval generator for digital relaying *IEEE Trans on Power Deliv* 4(3):1602-1609
- [20] Benmouyal G (1995) Removal of DC-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Trans Power Deliv* 10(2):621–630
- [21] Benmouyal G (2005) System and method for exact compensation of fundamental phasors. US Patent number 6,934,654

- [22] Benmouyal G, Schweitzer EO III, Guzman A (2004) Synchronized phasor measurement in protective relays for protection, control, and analysis of electric power systems. In: Proc of 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Austin TX, pp 419 – 450
- [23] Bewley LV (1963) Travelling Waves on Transmission Systems. John Wiley & Sons, Inc., New York
- [24] Blackburn JL (1993) Symmetrical Components for Power System Engineering. Marcel Dekker, New York, pp 98-99
- [25] Bo Z et al. (1998) Application of GPS based fault location scheme for distribution system. In: Proc of International Conference on Power System Technology – POWERCON, Beijing, pp. 53 – 57
- [26] Boashash B (1992) Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal: Part I: Fundamentals, Part II: Algorithms and applications. Proc IEEE 80(4): 520-568
- [27] Bockarjova M, Andersson G, Sauhats A (2006) Statistical algorithm for power transmission line distance protection. In: Proc of International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS),
- [28] Brahma SM (2005) Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements. IEEE Trans on Power Deliv 20(2):1325–1331
- [29] Brahma SM, Girgis AA (2004) Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. IEEE Trans on Power Deliv 19(4):1619–1622
- [30] Chen C-S, Liu C-W, Jiang J-A (2002) A new adaptive PMU based protection scheme for transposed/untransposed parallel transmission lines. IEEE Trans on Power Deliv 17(2):395–404
- [31] Chen W-K (2003) The Circuits and Filters Handbook. CRC Press LLC, Boca Raton
- [32] Cheong WJ, Aggarwal RK (2004) A novel fault location technique based on current signals only for thyristor controlled series compensated transmission lines using wavelet analysis and self organising map neural networks. In: Proc of 8th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP500 vol 1 pp 224–227
- [33] Cho Y-S, Lee C-K, Jang G et al. (2009) An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying. IEEE Trans on Power Deliv 24(1):73–78
- [34] Chunju F, Li KK, Chan WL (2007) Application of wavelet fuzzy neural network in locating single line to ground fault (SLG) in distribution lines. Int J Electr Power and Energy Syst 29(6):497–503
- [35] Chunju F, Xiuhua D, Shengfang L et al. (2007) An adaptive fault location technique based on PMU for transmission line. In: Proc of IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, 6 p
- [36] Cimadevilla R, Quintanilla R, Ward S (2005) Adapting protection to frequency changes. In: Proc of 32nd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 20 p
- [37] Collatz L (1960) Numerical Treatment of Differential Equations. Springer Verlag, New York
- [38] Cunnigham EP (1992) Digital Filtering, an Introduction. Houghton Mifflin Co., Boston MA
- [39] Dalcastagne AL, Filho SN, Zurn HH et al. (2008) An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors. IEEE Trans on Power Deliv 23(4):2318–2329
- [40] Das R, Novosel D (2000) Review of fault location techniques for transmission and subtransmission lines. In: Proc of 54th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, 20 p
- [41] de la O Serna JA (2007) Dynamic phasor estimates for power system oscillations. IEEE Trans on Instrum Meas 56(5):1648-1657
- [42] Director SW, Rohrer RA (1972) Introduction to System Theory. McGraw-Hill, New York
- [43] Dommel HW (1969) Digital computer solution of electromagnetic transients in single- and multi-phase networks. IEEE Trans on PAS, 88(4):338–396
- [44] Dommel HW (1986) Electro-Magnetic Transients Program (EMTP), BPA, Portland, Oregon, USA
- [45] Dommel HW (1992) EMTP Theory Book. Microtran Power System Analysis Corp, Vancouver
- [46] El-Naggar K (2001) A genetic based fault location algorithm for transmission lines In: Proc of 16th International Conference and Exhibitions on Electricity Distribution – CIRED, Amsterdam, 5 p
- [47] Erezzaghi MEL, Crossley PA, Elferes R (2004) Design and evaluation of an adaptive distance protection scheme suitable for series compensated transmission feeders. In: Proc of 8th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP500 vol 2 pp 453–456
- [48] Eriksson L, Saha MM, Rockefeller GD (1985) An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. IEEE Trans on PAS 104(2):424–436
- [49] Evrenosoglu CY, Abur A (2003) Fault location for teed circuits with mutually coupled lines and series capacitors. In: Proc of IEEE Bologna Power Tech Conference, paper IEEE 03EX719C
- [50] Fardanesh B, Zelingher S, Meliopoulos APS et al. (1998) Multifunctional synchronized measurement network. IEEE Comput Appl in Power 11(1):26–30

- [51] Fecteau C (2006) Accurate fault location algorithm for series compensated lines using two-terminal unsynchronized measurements and Hydro-Quebec's field experience. In: Proc of 33rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane
- [52] Fishman GS (1995) Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications. Stanford CA:Springer-Verlag, New York
- [53] Folkers R (1999) Determine current transformer suitability using EMTP models. In: Proc of 26th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, 46 p
- [54] Funabashi T, Otoguro H, Mizuma Y et al. (2000) Digital fault location for parallel doublecircuit multi-terminal transmission lines. IEEE Trans on Power Deliv 15(2):531–537
- [55] Funabashi T, Otoguro H, Mizuma Y et al. (2001) Influence of fault arc characteristics on the accuracy of digital fault locators. IEEE Trans on Power Deliv 16(2):195–199
- [56] Gale PF, Crossley PA (1998) Fault location on overhead power lines using travelling waves. In: Proc of 11th Int Conf on Power System Protection – PSP'98, Bled, pp 89–94
- [57] Gangadharan PK, Sidhu TS, Finlayson GJ (2007) Current transformer dimensioning for numerical protection relays. IEEE Trans on Power Deliv 22(1):108–115
- [58] Ghassemi F, Goddarzi J, Johns AT (1998) Method to improve digital distance relay impedance measurement when used in SC lines protected by a metal oxide varistor. IEE Proc – Gener Transm Distrib 145(4):403–408
- [59] Ghassemi F, Johns AT, Goddarzi J (1997) A method for eliminating the effect of MOV operation on digital distance relays when used in series compensated lines. In: Proc of 32nd Universities Power Engineering Conference – UPEC, Manchester, pp 113–116
- [60] Gilany MI, Malik OP, Hope GS (1992) A digital protection technique for parallel transmission lines using a single relay at each end. IEEE Trans on Power Deliv 7(1):118–123
- [61] Girgis AA (1982) A new kalman filtering based digital distance relay. IEEE Transactions on PAS, 101(9):3471–3480
- [62] Girgis AA, Brown RG (1981) Application of Kalman filtering in computer relaying. IEEE Trans on PAS, 100(7):3387–3397
- [63] Girgis AA, Fallon CM, Lubkeman DL (1993) A fault location technique for rural distribution feeders. IEEE Trans on Ind Appl, 29(6):1170–1175
- [64] Girgis AA, Hart DG, Peterson WL (1992) A new fault location technique for two- and three-terminal lines. IEEE Trans on Power Deliv 7(1):98–107
- [65] Girgis AA, Hwang TLD (1984) Optimal estimation of voltage phasors and frequency deviation using linear and nonlinear kalman filter: theory and limitations. IEEE Trans on PAS 103(10):2943–2949
- [66] Girgis AA, Makram EB (1988) Application of adaptive Kalman filtering in fault classification distance protection and fault location using microprocessors. IEEE Trans on Power Syst 3(1):301–309
- [67] Girgis AA, Sallam AA, El-din AK (1998) An adaptive protection scheme for advanced series compensated (ASC) transmission lines. IEEE Trans on Power Deliv 13(2):414–420
- [68] Glover JD, Sarma M (1994) Power System Analysis and Design. PWS Publishing Company, Boston
- [69] Gopalakrishnan A, Kezunovic M, McKenna SM et al. (2000) Fault location using the distributed parameter transmission line model. IEEE Trans on Power Deliv 15(4):1169–1174
- [70] Gracia J, Mazon A, Zamora I (2005) Best ANN structures for fault location in single- and double-circuit transmission lines. IEEE Trans on Power Deliv 20(4):2389–2395
- [71] Grainger J, Stevenson W (1994) Power System Analysis. McGraw-Hill Inc, New York
- [72] Gu JC, Shen KY, Yu SL et al. (2006) Removal of dc offset and subsynchronous resonance in current signals for series compensated transmission lines using a novel Fourier filter algorithm. Electr Power Syst Res 76(5):327–335
- [73] Gu J-S, Yu S-L (2000) Removal of dc offset in current and voltage signals using a novel fourier filter algorithm. IEEE Trans on Power Deliv 15(1):73–79
- [74] Guo Y, Kezunovic M, Chen D (2003) Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm. IEEE Trans on Power Deliv 18(3):711–717
- [75] Guzman A, Mynam V, Zweigle G (2007) Backup transmission line protection for ground faults and power swing detection using synchrophasors. In: Proc of 34th Western Protective Relay Conference, Spokane WA, 11 p
- [76] Guzman A, Zocholl S, Benmouyal G et al. (2002) A current-based solution for transformer differential protection. II. Relay description and evaluation. IEEE Trans on Power Deliv 17(4):886–893

- [77] Hänninen S, Lehtonen M, Hakola T et al. (1999) Comparison of wavelet and differential equation algorithms in earth fault distance computation. In: Proc of 13th Power Systems Computations Conference, Trondheim, vol 2, pp 801–807
- [78] Harmeet SK, Raghuveer T (1998) A new design distance to fault locator for power transmission lines. In: Proc of Int Conf on Modern Trends in the Protection Schemes of Electric Power Apparatus and Systems, New Delhi, paper VI-7–11
- [79] Hart D, Novosel D, Hu Y et al. (1997) A new frequency tracking and phasor estimation algorithm for generator. IEEE Trans on Power Deliv 12(3):1064–1073
- [80] Hesse MH (1996) Circulating currents in parallel untransposed multicircuit lines: I – Numerical evaluations. IEEE Trans on PAS 85(7):802–811
- [81] Hesse MH (1996) Circulating currents in parallel untransposed multicircuit lines: II – Methods for estimating current unbalance. IEEE Trans on PAS 85(7):812–820
- [82] Hesse MH, Sabath J (1971) EHV double-circuit untransposed transmission line – Analysis and tests. IEEE Trans on PAS 90(3):984–992
- [83] Hess-Nielsen N, Wickerhauser MV (1996) Wavelets and time-frequency analysis. Proc of the IEEE, 84(4):523–540
- [84] Hou D (2008) Relay element performance during power system frequency excursions. In: Proc of 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station TX, pp 105 - 117
- [85] Hou D, Roberts J (1996) Capacitive voltage transformers: Transient overreach concerns and solutions for distance protection. In: Proc of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Calgary, pp 119-125
- [86] Hupfauer H, Schegner P, Simon R (1996) Distance protection of unsymmetrical lines. Eur Trans on Electr Power 6(2):91–96
- [87] IEC 60044-1 (2003) Instrument transformers – Part 1: current transformers
- [88] IEEE Power System Relaying Committee Working Group Report (1994) Synchronized sampling and phasor measurements for relaying and control. IEEE Trans on Power Deliv 9(1):442–449
- [89] IEEE Std C37.114 (2005) IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines. IEEE Power Engineering Society Publ., New York
- [90] IEEE Std. C37.118 (2006) IEEE standard for synchrophasors for power systems. IEEE Power Engineering Society Publ., New York
- [91] IEEE Std. C57.13 (1993) IEEE standard requirements for instrument transformers. IEEE Power Engineering Society Publ., New York
- [92] Izykowski J (2008) Fault location on power transmission lines, The Technical University of Wrocław Press, Wrocław, Poland
- [93] Izykowski J, Kasztenny B, Rosolowski E et al. (1998) Fundamental frequency equivalent of series capacitors equipped with MOVs under fault conditions of a series compensated line. In: Proc of 8th Int Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, Brussels, pp 13–18
- [94] Izykowski J, Kasztenny B, Rosolowski E et al. (1998) Dynamic compensation of capacitive voltage transformers. IEEE Trans on Power Deliv 13(1):116–122
- [95] Izykowski J, Kawecki R (2001) Location of faults in partially parallel transmission networks. In: Proc of IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, vol III, paper EDT4-230
- [96] Izykowski J, Kawecki R, Rosolowski E (2002) Accurate location of faults in parallel transmission lines under availability of measurements from one circuit only. In: Proc of Power Systems Computation Conference –PSCC’02, Sevilla, paper 6
- [97] Izykowski J, Molag R, Rosolowski E (2006) Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements. IEEE Trans on Power Deliv 21(2):627–633
- [98] Izykowski J, Rosolowski E, Balcerek P et al. (2010) Accurate noniterative fault-location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements. IEEE Trans on Power Deliv 25(1):72-80
- [99] Izykowski J, Rosolowski E, Saha MM (2003) Adaptive digital distance algorithm for parallel transmission lines. In: Proc of IEEE Power Tech, Bologna,
- [100] Izykowski J, Rosolowski E, Saha MM (2004) Locating faults in parallel transmission lines under availability of complete measurements at one end. IEE Proc – Gener Transm Distrib 151(2):268–273
- [101] Izykowski J, Rosolowski E, Saha MM et al. (2005) Accurate algorithm for locating faults in power transmission lines under saturation of current transformers. In: Proc of Power Systems Computation Conference – PSCC, Liege
- [102] Jackson LB (1989) Digital Filters and Signal Processing. Kwulter Academic Publishers, Boston MA
- [103] Jayasinghe JASB, Aggarwal RK, Johns AT et al. (1998) A novel non-unit protection for series compensated EHV transmission lines based on fault generated high frequency voltage signals. IEEE Trans on Power Deliv 13(2):405–413

- [104] Jiale S, Song GB, Xu QQ et al. (2006) Time-domain fault location algorithm for parallel transmission lines using unsynchronized currents. *Int J Electr Power and Energy Syst* 28(4):253–260
- [105] Jiang J-A, Lin Y-H, Yang J-Z et al. (2000) An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines - Part II: PMU implementation and performance evaluation. *IEEE Trans on Power Deliv* 15(4):1136–1146
- [106] Jiang J-A, Yang J-Z, Lin Y-H et al. (2000) An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines - Part I: Theory and algorithms. *IEEE Trans on Power Deliv* 15(2):486–493
- [107] Johns AT, Jamali S (1990) Accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proc C* 137(6):395–402
- [108] Johns AT, Salman SK (1995) *Digital Protection for Power Systems*. IEE Power Series 15, Peter Peregrinus Ltd., London
- [109] Joorabian M, Taleghani ASL, SMA, Aggarwal RK (2004) Accurate fault locator for EHV transmission lines based on radial basis function neural networks. *Electr Power Syst Res* 71(3):195–202
- [110] Jung CK, Kim KH, Lee JB et al. (2007) Wavelet and neuro-fuzzy based fault location for combined transmission systems. *Int J Electr Power and Energy Syst* 29(6):445–454
- [111] Kamwa I, Grondin R (1992) Fast adaptive schemes for tracking voltage phasor and local frequency in power transmission and distribution systems. *IEEE Trans on Power Deliv* 7(2):789–795
- [112] Kang N, Liao Y (2009) Fault location for double-circuit lines utilizing sparse voltage measurements. In: *Proc of IEEE Power and Energy Society General Meeting Calgary, Alberta*, 6 p
- [113] Kang S-H, Ahn Y-J, Kang Y-C et al. (2009) A fault location algorithm based on circuit analysis for untransposed parallel transmission lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 24(4): 1850–1856
- [114] Kang S-H, Lee D-G, Nam S-R et al. (2009) Fourier transform-based modified phasor estimation method immune to the effect of DC offsets. *IEEE Trans on Power Deliv* 24(3):1104–1111
- [115] Kang S-H, Lee S-J, Kwon Y-J (2001) A fault location algorithm for parallel transmission line with a teed circuit. In: *Proc of IEEE PES Summer Meeting*, pp 921–926
- [116] Kang Y-C, Kang S-H, Park J-K et al. (1996) Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers. *IEE Proc – Electr Power Appl*, 43(1):41–49
- [117] Kang Y-C, Lim U-J, Kang S-H et al. (2004) Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT. *IEEE Trans on Power Deliv* 19(4):1642–1649
- [118] Kang Y-C, Park J-K, Kang S-H et al. (1997) An algorithm for compensating secondary currents of current transformers. *IEEE Trans on Power Deliv* 12(1):116–124
- [119] Kasztenny B (2001) Distance protection of series compensated lines – problems and solutions. In: *Proc of 28th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane*, 18 p
- [120] Kasztenny B, Campbell B, Mazereeuw J (2000) Phase selection for single-pole tripping: weak infeed conditions and cross-country faults. In: *Proc of 27th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane WA*, 20 p
- [121] Kasztenny B, Izykowski J, Rosolowski E et al. (1997) Algorithms for protection of series compensated lines – the comparative analysis. In: *Proc of 32nd Universities Power Engineering Conference – UPEC, Manchester*, vol 1, pp 299–302
- [122] Kasztenny B, Premerlani W, Adamiak M (2008) Synchrophasor Algorithm Allowing Seamless Integration with Today's Relays. In: *Proc of 9th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IET CP536* pp 724–729
- [123] Kasztenny B, Rosolowski E, Lukowicz M et al. (1997) Current related relaying algorithms immune to saturation of current transformers. In: *Proc of 6th Int Conf on Developments in Power System Protection, – DPSP, IEE CP434* pp 365–369
- [124] Kasztenny B, Sharples D, Asaro V (2001) Distance relays and capacitive voltage transformers - balancing speed and transient overreach. In: *Proc of 55th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta*, 22 p
- [125] Kawady T, Stenzel J (2003) A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data. *IEEE Trans on Power Deliv* 18(4):1166–1173
- [126] Kezunovic M (1999) Fault location. In: *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Terminology*, vol 7, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp 276–285
- [127] Kezunovic M, Aganagic M, Mckernns S et al. (1995) Computing responses of series compensation capacitors with MOV protection in real time. *IEEE Trans on Power Deliv* 10(1):244–251
- [128] Kezunovic M, Kojovic LA, Skendzic V et al. (1992) Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies. *IEEE Trans on Power Deliv* 7(4):1927–1935

- [129] Kezunovic M, Liao Y (2001) Fault location estimation based on matching the simulated and recorded waveforms using genetic algorithms. In: Proc of 7th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, Amsterdam, IEE CP482 pp 399–402
- [130] Kezunovic M, Luo S, Sevcik DR (2002) A novel method for transmission network fault location using genetic algorithms and sparse field recordings. In: Proc of PES IEEE Summer Meeting
- [131] Kezunovic M, Mrkic J, Perunicic B (1994) An accurate fault location algorithm using synchronized sampling. *Electr Power Syst Res* 29(3):161–169
- [132] Kezunovic M, Perunicic B (1996) Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends. *IEEE Trans on Power Syst* 11(1):441–447
- [133] Kim CH, Aggarwal RK (2000) Wavelet transforms in power systems, Part 1 Tutorial: Wavelet transforms. *Power Eng J* 14(2):81–87
- [134] Kim CH, Aggarwal RK (2001) Wavelet transforms in power systems, Part 2 Examples of application to actual power system transients. Tutorial: Wavelet transforms. *Power Eng J* 15(4):193–202
- [135] Kizilcay M, Koch K-H (1994) Numerical fault arc simulation based on power arc test. *Eur Trans on Electr Power* 4(3):177–185
- [136] Kizilcay M, Pniok T (1991) Digital simulation of fault arcs in power systems. *Eur Trans on Electr Power* 1(1):55–60
- [137] Kizilcay M, Seta PL (2005) A new unsynchronized two-terminals fault location method on series compensated lines. In: Proc of IEEE Power Tech Conference, St. Petersburg
- [138] Korres GN, Apostolopoulos CA (2010) Precise fault location algorithm for double-circuit transmission lines using unsynchronized measurements from two anti-parallel ends. *IET – Gener Transm Distrib* 4(7):824–835
- [139] Lawrence DJ, Cabeza L, Hochberg L (1992) Development of an advanced transmission line fault location system Part II – Algorithm development and simulation. *IEEE Trans on Power Deliv* 7(4):1972–1983
- [140] Lewis LJ (1951) Travelling wave relations applicable to power system fault locators. *AIEE Trans* 70(2):1671–1680
- [141] Li F, Li Y, Aggarwal RK (2002) Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 149(4):497–503
- [142] Li HX., Chen PCL, Huang HP (2001) Fuzzy Neural Intelligent Systems. Mathematical Foundation and the Applications in Engineering. CRC Press, Boca Raton
- [143] Liao Y (2006) Fault location utilizing unsynchronized voltage measurements during fault. *Electr Power Comp and Syst* 34(12):1283–1293
- [144] Liao Y (2007) Unsynchronized fault location based on distributed parameter line model. *Electr Power Comp and Syst* 35(9):1061–1077
- [145] Liao Y (2008) Fault location for single-circuit line based on bus-impedance matrix utilizing voltage measurements. *IEEE Trans Power Deliv* 23(2):609–617
- [146] Liao Y (2008) Transmission line fault location algorithms without requiring line parameters. *Electr Power Comp and Syst* 36(11):1218–1225
- [147] Liao Y (2009) Equivalent PI circuit for zero-sequence networks of parallel transmission lines. *Electr Power Comp and Syst* 37(7):787–797
- [148] Liao Y, Elangovan S (1998) Digital distance relaying algorithm for first-zone protection for parallel transmission lines. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 145(6): 531–536
- [149] Liao Y, Elangovan S (2006) Unsynchronised two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 153(6):639–643
- [150] Liao Y, Kang N (2009) Fault-location algorithms without utilizing line parameters based on the distributed parameter line model. *IEEE Trans Power Deliv* 24(2):579–584
- [151] Liao Y, Kezunovic M (2007) Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors. *IEEE Trans Power Deliv* 22(3):1335–1341
- [152] Lien K-P, Liu C-W, Yu C-S et al. (2006) Transmission network fault location observability with minimal pmu placement. *IEEE Trans on Power Deliv* 21(3):1128–1136
- [153] Lin Y-H, Liu C-W, Chen C-S (2004) A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination-part I: theory and algorithms. *IEEE Trans on Power Deliv* 19(4):1587–1593
- [154] Lin Y-H, Liu C-W, Chen C-S (2004) A new PMU-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination-Part II: Performance Evaluation. *IEEE Trans on Power Deliv* 19(4):1594–1601

- [155] Lucas JR, McLaren PG (1991) A computationally efficient MOV model for series compensation studies. *IEEE Trans on Power Deliv* 6(4):1491–1497
- [156] Lukowicz M (2004) New fault location method based on artificial neural networks. In: *Proc of 14th Int Conf on Power System Protection – PSP, Bled*, pp 290–295
- [157] Magnago FH, Abur A (1998) Fault location using wavelets. *IEEE Trans on Power Deliv* 13(4):1475–1480
- [158] Marusic A, Cavlovic M (1998) Application of fuzzy logic to digital fault locator algorithm. In: *Proc of 11th Int Conf on Power System Protection – PSP, Bled*, pp 71–76
- [159] MATLAB 7.1 user's guide (2006) The Math Works Inc., Natick
- [160] Mazon AJ, Minambres JF, Zorroza MB et al. (1995) New method of fault location on double-circuit two-terminal transmission lines. *Electr Power Syst Res* 35(3):213–219
- [161] Mazon AJ, Zamora I, Gracia J et al. (2001) Fault location system on double circuit twoterminal transmission lines based on ANNs, In: *Proc of IEEE Porto Power Tech Conference, Porto*, paper 0-7803-7139-9/01
- [162] Mazon AJ, Zamora I, Minambres JF et al. (2000) A new approach to fault location in two terminal transmission lines using artificial neural networks. *Electr Power Syst Res* 56(3):261–266
- [163] Megahed AI, Moussa AM, Bayoumy AE (2006) Usage of wavelet transform in the protection of series-compensated transmission lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 21(3):1213–1221
- [164] Moore PJ, Bo ZQ, Aggarwal R (2005) Digital distance protection for composite circuit applications. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 152(2):283–290
- [165] Moreto M, Rolim JG (2008) Automated analysis of digital fault recorder data in power generating plants. In: *Proc of Power Systems Computation Conference –PSCC'08, Glasgow*, 8 p
- [166] Nagasawa T, Abe M, Otsuzuki N et al. (1992) Development of a new fault location algorithm for multi-terminal two parallel transmission lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 7(3):1516–1529
- [167] Nam SR, Kang SH, Park JK (2002) An analytic method for measuring accurate fundamental frequency components. *IEEE Trans on Power Deliv* 17(2):405–411
- [168] Novosel D, Bachmann B, Hart DG et al. (1996) Algorithms for locating faults on series compensated lines using neural network and deterministic methods. *IEEE Trans on Power Deliv* 11(4):1728–1736
- [169] Novosel D, Hart DG, Saha MM et al. (1994) Optimal fault location for transmission systems. *ABB Rev* (8):20–27
- [170] Novosel D, Hart DG, Udren E et al. (1995) Fault location using digital relay data. *IEEE Comp Appl in Power* 8(3):45–50
- [171] Novosel D, Hart DG, Udren E et al. (1996) Unsynchronized two-terminal fault location estimation. *IEEE Trans on Power Deliv* 11(1):130–138
- [172] Novosel D, Phadke A, Saha MM et al. (1997) Problems and solutions for microprocessor protection of series compensated lines In: *Proc of 6th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP434* pp 18–23
- [173] Novosel D, Saha MM (1997) Locating faults on series compensated lines using intelligent methods. *Int J of Eng Intell Syst for Electr Eng and Commun* 5(4):259–264
- [174] Oppenheim AV, Schafer R., Buck JR (1999) *Discrete-time Signal Processing*. Prentice-Hall, New Jersey
- [175] Pereira CEM, Zanetta LC Jr (2004) Fault location in transmission lines using one-terminal post-fault voltage data. *IEEE Trans on Power Deliv* 19(2):570–575
- [176] Pereira CEM, Zanetta LC Jr (2005) Optimization algorithm for fault location in transmission lines considering current transformers saturation. *IEEE Trans on Power Deliv* 20(2):603–608
- [177] Phadke A, Kasztenny B (2009) Synchronized phasor and frequency measurement under transient conditions. *IEEE Trans on Power Deliv* 24(1):89–95
- [178] Phadke AG (1998) Synchronized phasor measurements for protection and local control. In: *Proc of CIGRE Session, Paris*, paper 34–106
- [179] Phadke AG, Thorp JS (1988) *Computer Relaying for Power Systems*. Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons, Inc., New York
- [180] Phadke AG, Thorp JS (2008) *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. Springer, New York
- [181] Phadke AG, Thorp JS, Adamiak M (1983) A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. *IEEE Trans on PAS* 102(5):1025–1038
- [182] Pollock DSG (1999) *A Handbook of Time-series Analysis. Signal Processing and Dynamics*. Academic Press, London

- [183] Pradhan AK, Routray A, Pati S et al. (2004) Wavelet fuzzy combined approach for fault classification of a series-compensated transmission line. *IEEE Trans on Power Deliv* 19(4):1–7
- [184] Premerlani W, Kasztenny B, Adamiak M (2008) Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions. *IEEE Trans on Power Deliv* 23(1):109–123
- [185] Premerlani W, Kasztenny B, Adamiak M (2008) Development and implementation of a synchrophasor estimator capable of measurements under dynamic conditions. *IEEE Trans on Power Deliv* 23(1):109–123
- [186] Press WH, Teukolsky SA, Vetterling WT et al. (2007) *Numerical recipes: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, New York
- [187] Qingchao Z, Yao Z, Wennan S et al (1999) Fault location of two-parallel transmission line for non-earth fault using one-terminal data. *IEEE Trans on Power Deliv* 14(3): 863–867
- [188] Radojevic ZM, Kim CH, Popov M et al. (2009) New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. *Proc of Int Conf on Power System Transients - IPST, Kyoto*, paper 46, 6 p
- [189] Richards GG, Tan OT (1983) Fault location for transmission lines with current-transformer saturation. *IEE Proc C* 130(1):22–27
- [190] Rioul O, Vetterli M (1991) Wavelets and signal processing. *IEEE Signal Process Mag* 8(4):14–38
- [191] Rohrig J (1931) Location of faulty places by measuring with cathode ray oscilloscope. *Elektricität Zeitschrift*: 241–242
- [192] Rosolowski E (2002) *Digital signal processing for power system protection and control*. Academic Publisher EXIT, Warsaw
- [193] Rosolowski E, Izykowski J, Kasztenny B (2001) Adaptive measuring algorithm suppressing a decaying DC component for digital protective relays. *Electr Power Syst Res.* 60(2):99–105
- [194] Rosolowski E, Izykowski J, Kasztenny B et al. (1998) Fault loop impedance analysis for a transmission line with series capacitors and their overvoltage protection. In: *Proc of 10th Int Conf on Power System Protection – PSP, Bled*, pp 21–26
- [195] Rosolowski E, Izykowski J, Kasztenny B et al. (1999) Differential equation based impedance measurement for series-compensated lines. In: *Proc of IEEE Power Tech Conference, Budapest*, paper BPT99–316–16
- [196] Rosolowski E, Izykowski J, Saha MM (2009) Fault location algorithm for use with current differential protective relays of double-circuit line. In: *Proc of IEEE Power Tech Conference, Budapest*, paper BPT97, 6 p
- [197] Rosolowski E, Izykowski J, Saha MM (2005) Differential equation based fault location algorithm for series-compensated transmission line. In: *Proc of Power Systems Computation Conference – PSCC, Liege*
- [198] Rosolowski E, Izykowski J, Saha MM (2000) Effects of transmission line modeling on fault location. In: *Proc of EMTP/ATP Users Group Meeting - EEUG2000, Wroclaw*, 8 p
- [199] Sachdev MS (1997) *Advancement in microprocessor based protection and communication*. IEEE Tutorial Course, IEEE PES, IEEE Catalog Number: 97TP120-0
- [200] Sachdev MS, Das R, Sidhu TS (1997) Determining locations of faults in distribution systems. In: *Proc of 6th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP434* pp 188–191
- [201] Sachdev MS, Baribeu (1979) A new algorithm for digital impedance relays. *IEEE Transactions on PAS*, 98(6):2232–2240
- [202] Sadeh J, Adinehzadeh A (2010) Accurate fault location algorithm for transmission line in the presence of series connected FACTS devices. *Int J Electr Power and Energy Syst* 32(4): 323–328
- [203] Sadeh J, Hadjsaid N, Ranjbar AM et al. (2000) Accurate fault location algorithm for series compensated transmission lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 15(3):1027–1033
- [204] Saha MM, Izykowski J, Kasztenny B et al. (1997) Modeling fault conditions for protection of series compensated lines. In: *Proc of Int Conf on Power Systems Transients – IPST, Seattle*, pp 383–388
- [205] Saha MM, Izykowski J, Kasztenny B et al. (1998) Relaying algorithms for protection of series-compensated lines. In: *Proc of Int Conf on Modern Trends in the Protection Schemes of Electric Power Apparatus and Systems, New Delhi*, paper V-50–61
- [206] Saha MM, Izykowski J, Lukowicz M et al. (2001) Application of ANN methods for instrument transformer correction in transmission line protection. In: *Proc of 7th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP479* pp 303–306
- [207] Saha MM, Izykowski J, Rosolowski E (2004) A two-end method of fault location immune to saturation of current transformers. In: *Proc of 8th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP500* pp 172–175

- [208] Saha MM, Izykowski J, Rosolowski E (2010) *Fault location on Power Networks*. Springer-Verlag, London
- [209] Saha MM, Izykowski J, Rosolowski E et al. (1999) A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 14(3):789–797
- [210] Saha MM, Izykowski J, Rosolowski E et al. (2004) Fault location technique for a transmission line compensated with series capacitors at both ends. In: *Proc of 3rd Int Conf on Power System Protection and Automation*, New Delhi, pp I/92 I/101
- [211] Saha MM, Kasztenny B, Izykowski J et al. (1999) A novel fault locating technique for transmission lines with series-compensation. In: *Proc of Power Systems Computations Conference – PSCC*, Trondheim, pp 679–685
- [212] Saha MM, Kasztenny B, Rosolowski E et al. (2001) First zone algorithm for protection of series compensated lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 16(2):200–207
- [213] Saha MM, Rosolowski E, Izykowski J (2003) ATP-EMTP investigation of a new distance protection principle for series compensated lines. In: *Proc of Int Conf on Power Systems Transients–IPST*, New Orleans, paper 5b-1
- [214] Saha MM, Rosolowski E, Izykowski J (2006) Differential equation algorithm for locating faults on parallel series-compensated lines. In: *Proc of 3rd Int Symposium: Modern Electric Power Systems – MEPS*, Wroclaw pp 289–295
- [215] Saha MM, Wikstrom K, Izykowski J et al. (2000) Fault location in uncompensated and series-compensated parallel lines. In: *Proc of 2000 IEEE PES Winter Meeting*, Singapore
- [216] Saha MM, Wikstrom K, Izykowski J et al. (2001) New concept for fault location in series-compensated parallel lines. In: *Proc of 2001 IEEE PES Winter Meeting*, Columbus
- [217] Saha MM, Wikstrom K, Izykowski J et al. (2001) New fault location algorithm for parallel lines. In: *Proc of 7th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP*, IEE CP476 pp 407–410
- [218] Saha MM, Wikstrom K, Lindahl S (1997) A new approach to fast distance protection with adaptive features. In: *Proc of 6th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP*, IEE CP434 pp 32–35
- [219] Sant MT, Paithankar YG (1979) Online digital fault locator for overhead transmission line. *IEE Proc C* 126(11):1181–1185
- [220] Sauhats A, Danilova M (2003) Fault location algorithms for super high voltage transmission lines. In: *Proc of IEEE Bologna Power Tech Conference*, BPT03-122, 6 p
- [221] Schweitzer EO III, Hou D (1993) Filtering for protective relays. In: *Proc of 47th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference*, Atlanta, 24 p
- [222] Sheng LB, Elangovan S (1999) A fault location method for parallel transmission lines. *Int J Electr Power and Energy Syst* 21(4):253–259
- [223] Shengfang L, Chunju F, Weiyong Y et al. (2004) A new phase measurement unit (PMU) based fault location algorithm for double circuit lines. In: *Proc of 8th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP*, IEE CP500 vol 1 pp 188–191
- [224] Sidhu T (1999) Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique. *IEEE Trans on Instrum Meas* 48(1):75–81
- [225] Silva M, Oleskovicz M, Coury DV (2004) A fault locator for transmission lines using travelling waves and wavelet transform theory. In: *Proc of 8th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP*, IEE CP500 pp 212–215
- [226] Silveira EG, Pereira C (2007) Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization. *IEEE Trans on Power Syst* 22(1):498–499
- [227] Sitton GA, Burrus CS, Fox JW et al. (2003) Factoring very-high-degree polynomials. *IEEE Signal Process Mag* 20(6):27–42
- [228] Smith SW (1999) *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, San Diego
- [229] Song G, Suonan J, Ge Y (2009) An accurate fault location algorithm for parallel transmission lines using one-terminal data. *Int J Electr Power and Energy Syst* 31(2-3):124–129
- [230] Song GB, Suonan J, Xu QQ et al. (2005) Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net. *IEEE Trans on Power Deliv* 20(4):2396–2406
- [231] Suonan J, Song G, Xu Q et al. (2006) Time-domain fault location for parallel transmission lines using unsynchronized currents. *Int J Electr Power and Energy Syst* 28(4):253–260
- [232] Suonan JL, Song GB, Zhang JK et al. (2005) A novel short-window algorithm of phasor computation for EHV line protection. *Electr Power Syst Res* 73(1):1–7
- [233] Tag Eldin EM, Gilany MI, Abdelaziz MM et al. (2006) An accurate fault location scheme for connected aged cable lines in double-fed systems. *Electr Eng* 88(5):431–439

- [234] Takagi T, Yamakosi Y, Baba J et al. (1981) A new algorithm for EHV/UHV transmission lines: Part I-Fourier transform method. *IEEE Trans on PAS* 100(3):1316–1323
- [235] Takagi T, Yamakosi Y, Baba J et al. (1982) A new algorithm for EHV/UHV transmission lines: Part-II Laplace transform method. *IEEE Trans on PAS* 101(3):564–573
- [236] Takagi T, Yamakosi Y, Yamura M et al. (1981) Development of new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. *IEEE Trans on PAS*, 101(8):2892–2898
- [237] Tawfik MM, Morcos MM (2001) ANN-based techniques for estimating fault location on transmission lines using Prony method. *IEEE Trans on Power Deliv* 16(2):219–224
- [238] Terzija VV, Djuric MB, Kovacevic BD (1994) Voltage phasor and local system frequency estimation using Newton-type algorithm. *IEEE Trans on Power Deliv* 9(3):1368-1374
- [239] Tziouvaras DA, Roberts J, Benmouyal G (1999) New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. In: *Proc of CIGRE – Study Committee 34 Colloquium and Meeting, Florence*, paper 213
- [240] Tziouvaras DA, Roberts J, Benmouyal G (2001) New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. In: *Proc of 7th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP476* pp 395–398
- [241] User Manual (2005) *PowerXplorer PX5*. Dranetz-BMI, Technical Documentation, Rev G
- [242] Wang C, Dou CX, Li XB et al. (2007) A WAMS/PMU-based fault location technique. *Electr Power Syst Res* 77(8):936–945
- [243] Wedepohl LM (1963) Application of matrix methods to the solution of travelling-wave phenomena in polyphase systems. *Proc Inst Elect* 110(112):2200–2212
- [244] Wiszniewski A (1983) Accurate fault impedance locating algorithm. *IEE Proc - Part C* 130(6):311–315
- [245] Wiszniewski A (1985) Fault location correction of errors due to current transformers. In: *Proc of 3rd Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, CP249* pp 185–187
- [246] Wiszniewski A, Izykowski J (1975) Influence of ferroresonance suppression circuits upon the transient response of capacitive voltage transformers. In: *Proc of Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, IEE CP125* pp 182–188
- [247] Wiszniewski A, Szafran J (1989) Distance algorithm immune to saturation of current transformers. In: *Proc of 4th Int Conf on Developments in Power System Protection – DPSP, London, IEE CP302* pp 196–199
- [248] Working Group I16 of the Relaying Practices Subcommittee of the IEEE Power System Relaying Committee (2004) *Understanding Microprocessor-Based Technology Applied to Relaying*. Technical Report, Available: <http://www.pes-psrc.org/i116/>
- [249] Yang JZ, Liu CW (2000) A precise calculation of power system frequency and phasor. *IEEE Trans on Power Deliv* 15(2):494-499
- [250] Young P (1984) *Recursive Estimation and Time-series Analysis*. Springer-Verlag, Berlin
- [251] Youssef OAS (2004) Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying, *IEEE Trans on Power Deliv* 19(2):582–589
- [252] Yu C-S (2006) A discrete Fourier transform-based adaptive mimic phasor estimator for distance relaying applications. *IEEE Trans on Power Deliv* 21(4):1836 – 1846
- [253] Yu C-S (2010) An unsynchronized measurements correction method for two-terminal fault-location problems. *IEEE Trans on Power Deliv* 25(3):1325 – 1333
- [254] Yu C-S, Liu C-W, Yang J-Z et al. (2002) New Fourier filter algorithm for series compensated lines. In: *Proc of International Conference on Power System Technology – POWERCON, Kunming*, pp 2556-2560
- [255] Yu C-S, Liu C-W, Yu S-L et al. (2002) A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines. *IEEE Trans on Power Deliv* 17(1):33–46
- [256] Zamora I, Minambres JF, Mazon AJ et al. (1996) Fault location on two-terminal transmission lines based on voltages. *IEE Proc – Gener Transm Distrib* 143(1):1–6
- [257] Zhang Q, Zhang Y, Song W et al. (1999) Fault location of two-parallel transmission line for nonearth fault using one-terminal data. *IEEE Trans on Power Deliv* 14(3):863–867
- [258] Zhao W, Song Y-H, Chen W-R (2001) Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis. *Int J Electr Power and Energy Syst* 23(5):403–411
- [259] Zhenyu H, Kasztenny B, Madani V et al. (2008) Performance evaluation of phasor measurement systems. In: *Proc of IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 7 p
- [260] Ziegler G (1990) Application guide on protection of complex transmission network configuration. In: *CIGRE SC34-WG04, Paris*, 137 p

- 
- [261] Ziegler G (2006) Numerical Distance Protection. Principles and Applications. Siemens AG, Publicis MCD Verlag, Erlangen
- [262] Zocholl SE, Smaha DW (1993) Current transformer concepts. In: Proc of 46th Annual Georgia Tech Protective Relay Conference, Atlanta, pp 7-9
- [263] Αποστολόπουλος Χ, Κορρές Γ, Κατσίκας Π (2009) Ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών προστασίας σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Πρακτικά Συνόδου Ελληνικής Επιτροπής Διεθνούς Συμβουλίου Μεγάλων Ηλεκτρικών Δικτύων - CIGRE, Αθήνα, 10 σ
- [264] Κορρές Γ, Αποστολόπουλος Χ, Κατσίκας Π, Τσακίρης Δ (2005) Έλεγχος λειτουργίας ψηφιακών ηλεκτρονόμων με τον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου και υπολογιστικά μοντέλα. Πρακτικά Συνόδου Ελληνικής Επιτροπής Διεθνούς Συμβουλίου Μεγάλων Ηλεκτρικών Δικτύων - CIGRE, Αθήνα, 10 σ
- [265] Παπαδόπουλος ΜΠ (1997) Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα