

## **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ**

Χ. Αποστολόπουλος<sup>1</sup>  
ΕΜΠ

Γ. Κορρές  
ΕΜΠ

Π. Κάτσικας  
PROTASIS A.E.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται προηγμένες εφαρμογές προστασίας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε) με χρήση της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών. Για την ανάπτυξη των εφαρμογών αυτών χρησιμοποιούνται δύο ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι SEL-421, οι οποίοι λειτουργούν και ως μονάδες μέτρησης φασιθετών, σε συνδυασμό με τον απαιτούμενο εξοπλισμό σε υλικό (hardware) και λογισμικό (software) για την υλοποίηση των συγχρονισμένων μετρήσεων. Η αποτίμηση και αξιολόγηση των εφαρμογών αυτών πραγματοποιείται με τη βοήθεια του ψηφιακού εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (Real-Time Digital Simulator – RTDS). Αναλυτικότερα, εξετάζεται το πρόβλημα της εκτίμησης παραμέτρων γραμμής μεταφοράς και του υπολογισμού της θέσης του σφάλματος, καθώς και το σχήμα εφεδρικής προστασίας γραμμής μεταφοράς έναντι σφαλμάτων γης υψηλής αντίστασης. Για κάθε εφαρμογή παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα, που καταδεικνύουν ότι οι συγχρονισμένες μετρήσεις μπορούν να αποτελέσουν ένα πανίσχυρο εργαλείο για τη βελτίωση της προστασίας των σύγχρονων Σ.Η.Ε.

## **ADVANCED PROTECTION APPLICATIONS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS USING SYNCHRONIZED PHASOR MEASUREMENTS**

C. Apostolopoulos<sup>1</sup>  
NTUA

G. Korres  
NTUA

P. Katsikas  
PROTASIS S.A.

This paper presents advanced protection applications in electric power systems, by using synchronized phasor measurements. These applications have been developed using two SEL-421 relays, which can operate both as protective relays and phasor measurement units, combined with the appropriate hardware and software for implementing the synchronization of measurements. The Real-Time Digital Simulator (RTDS) has been employed for the assessment and evaluation of these applications. Specifically, we examine the transmission line parameter estimation and fault location problem, as well as a backup transmission line protection scheme against high resistance ground faults. Test results are presented for each application, which certify that synchronized phasor measurements can be a valuable tool for enhancing the protection of modern power systems.

<sup>1</sup> Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου, Τηλ: 210 7723561, Fax: 210 7723659, e-mail: [apostolo@power.ece.ntua.gr](mailto:apostolo@power.ece.ntua.gr)

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών (synchronized phasor measurements) έχουν ωριμάσει αρκετά από την εισαγωγή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και χρησιμοποιούνται πλέον ολοένα και περισσότερο στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε) [1]. Μέχρι πρότινος, η χρήση τους αφορούσε κυρίως εφαρμογές απλής εποπτείας και οπτικοποίησης των Σ.Η.Ε, βελτίωσης του μοντέλου κατάστασης - σε σχέση με αυτό που προκύπτει από τους συμβατικούς εκτιμητές (state estimators) - και ανάλυσης διαταραχών (post-mortem analysis) [2]. Με την ενσωμάτωση όμως της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών σε υπάρχουσες ψηφιακές συσκευές προστασίας και ελέγχου, οι οποίες βρίσκονται διάσπαρτες σε κάθε Σ.Η.Ε, και την υιοθέτηση σύγχρονων τεχνικών επικοινωνίας σε υποσταθμούς υψηλής και υπερυψηλής τάσης καθίσταται πλέον δυνατή η ανάπτυξη προηγμένων εφαρμογών προστασίας, ελέγχου και εποπτείας στα Σ.Η.Ε σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο [3].

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναδείξει ορισμένες από αυτές τις εφαρμογές που αφορούν πρωτίστως την προστασία των Σ.Η.Ε. Προκειμένου για την ανάπτυξη των εφαρμογών, χρησιμοποιήθηκαν σε εργαστηριακό περιβάλλον, δύο ψηφιακοί ηλεκτρονόμοι (H/N) SEL-421, οι οποίοι έχουν δυνατότητα συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών [4]. Η συνολική αποτίμηση των εφαρμογών έγινε με τη βοήθεια του ψηφιακού εξομοιωτή πραγματικού χρόνου (RTDS) [5]. Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των κύριων χαρακτηριστικών της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών και δίνεται μια λεπτομερής περιγραφή του υλικού (hardware) και του λογισμικού (software) που απαιτείται ώστε να γίνει εφικτή η υλοποίησή τους σε εργαστηριακό περιβάλλον. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, παρουσιάζονται οι εφαρμογές που αναπτύχθηκαν με βάση τους συγχρονισμένους φασιθέτες:

- **Εκτίμηση παραμέτρων γραμμής μεταφοράς και θέσης σφάλματος:** οι παραδοσιακές τεχνικές υπολογισμού των παραμέτρων μιας γραμμής μεταφοράς μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές, ιδιαίτερα για τη σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας [6]. Οι αποκλίσεις αυτές μεταφράζονται σε λανθασμένες ρυθμίσεις των H/N προστασίας, των ανιχνευτών της θέσης του σφάλματος (fault locators) κτλ. Οι υπολογισμοί των παραμέτρων της γραμμής που βασίζονται σε συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών και στα δύο άκρα της, παρέχουν με σχετικά απλό τρόπο πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα [7]. Ταυτόχρονα, γίνεται εύκολος και ακριβής ο υπολογισμός της θέσης του σφάλματος [8].
- **Σχήμα εφεδρικής προστασίας γραμμής μεταφοράς έναντι σφάλματος γης υψηλής αντίστασης:** το προτεινόμενο σχήμα, που βασίζεται σε ανταλλαγή χρονικά “σφραγισμένων” (time-stamped) ρευμάτων μεταξύ των H/N στο τοπικό και στο απομακρυσμένο άκρο μιας γραμμής μεταφοράς, ξεπερνά τους περιορισμούς σε κάλυψη αντίστασης σφάλματος  $R_f$  των παραδοσιακών σχημάτων προστασίας που χρησιμοποιούν σύγκριση γωνίας (phase comparison schemes) [9]. Το συγκεκριμένο σχήμα προστασίας ανιχνεύει σφάλματα γης με αντίσταση σφάλματος μεγαλύτερη από 300 Ω, μέσα σε 100 ms το αργότερο.

Τα αποτελέσματα των εξομοιώσεων με το RTDS, για κάθε εφαρμογή καταδεικνύουν ότι οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύτιμο εργαλείο για την βελτίωση της προστασίας των σύγχρονων Σ.Η.Ε.

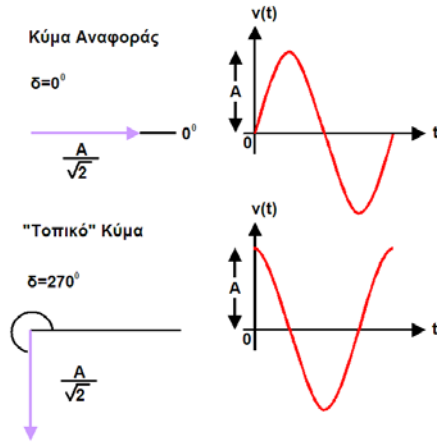
## 2. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών παρέχουν ένα μέσο σύγκρισης των φασιθετών της τάσης και του ρεύματος σε διάφορα σημεία ενός ηλεκτρικού δικτύου ως προς μία απόλυτη χρονική αναφορά. Αυτό γίνεται εφικτό, με τη χρήση χρονομέτρων υψηλής ακρίβειας συγχρονισμένων από GPS (Global Positioning System). Μέσω των χρονομέτρων αυτών, οι μονάδες μέτρησης φασιθετών (PMUs) παράγουν ένα ημιτονοειδές κύμα αναφοράς. Αυτό το κύμα αναφοράς είναι ένα ημιτονοειδές κύμα θεμελιώδους συχνότητας, του οποίου η μέγιστη τιμή προκύπτει ακριβώς στην αρχή κάθε δευτερολέπτου. Οι τοπικά μετρούμενες τάσεις και τα ρεύματα, συγκρίνονται με αυτό το κύμα αναφοράς, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.

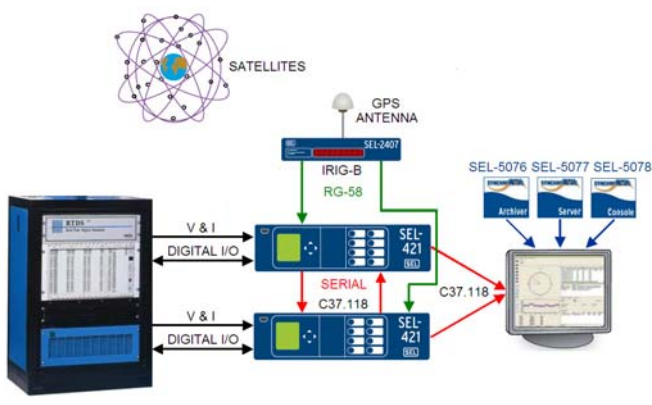
Το κύμα αναφοράς εξαρτάται μόνο από το χρονικό σήμα που παράγεται από το GPS. Συνεπώς, είναι το ίδιο για κάθε PMU, ανεξαρτήτως από το που βρίσκεται τοποθετημένο. Έτσι, ο φασιθέτης στο τοπικό σημείο μέτρησης μπορεί να συγκριθεί με το φασιθέτη σε οποιοδήποτε άλλο σημείο, και η διαφορά γωνίας μεταξύ των δύο φασιθετών αναπαριστά την απόλυτη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών 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.

Για την υλοποίηση και αξιολόγηση αυτών των εφαρμογών, αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Σ.Η.Ε. του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Ε.Μ.Π. μία πρότυπη διάταξη δοκιμών της τεχνολογίας συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 2. Σημειωτέον ότι, το RTDS που φαίνεται στο σχήμα 2 εξομοιώνει σε πραγματικό χρόνο τη λειτουργία ενός ηλεκτρικού δικτύου. Το ηλεκτρικό δίκτυο έχει σχεδιαστεί στο περιβάλλον Draft Mode του RSCAD (σχήμα 3), το οποίο είναι το γραφικό αλληλοδραστικό περιβάλλον του RTDS με το χρήστη, και περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία: 1) μία γραμμή μεταφοράς μεγάλου μήκους με κατανεμημένες παραμέτρους 2) δύο ισοδύναμες πηγές εκατέρωθεν της γραμμής 3) δύο διακόπτες, έναν σε κάθε άκρο της γραμμής 4) δύο μετασχηματιστές έντασης και τάσης, από έναν σε κάθε άκρο της γραμμής 5) στοιχεία της βιβλιοθήκης Control\_Library που χρησιμοποιούνται για ελέγχους των συνθηκών της εξομοίωσης (έλεγχος της λογικής των διακοπών ισχύος, επιλογή του τύπου σφάλματος

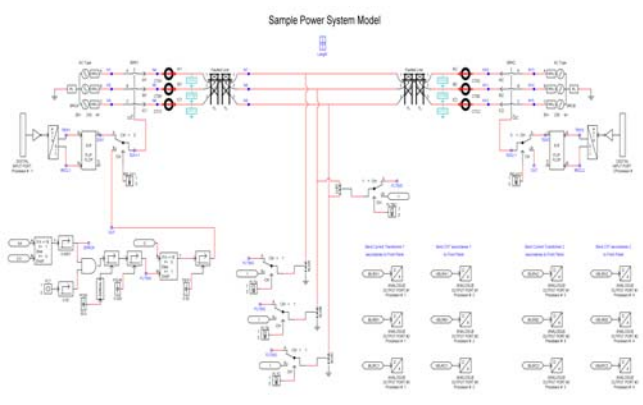
(LL, LG, LLG κτλ.), επιλογή της γωνίας του σφάλματος (fault inception), επιλογή της χρονικής διάρκειας του σφάλματος (fault duration), επιλογή της θέσης του σφάλματος (fault location) κτλ.). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρέμβει δυναμικά στην εξομοίωση μέσω του περιβάλλοντος RunTime Mode του RSCAD, κάνοντας χειρισμούς ελέγχου των διακοπών ισχύος, προκαλώντας βραχυκυκλώματα, αυξομειώνοντας τις γωνίες των δύο ισοδυνάμων πηγών κτλ. Επίσης στο περιβάλλον Run Time, ο χρήστης μπορεί να παρακολουθεί τα μετρούμενα μεγέθη που έχει ορίσει, χρησιμοποιώντας γραφικά εικονίδια μετρητών, γραφήματα με κυματομορφές από διάφορες μεταβλητές της εξομοίωσης κτλ. (σχήμα 4).



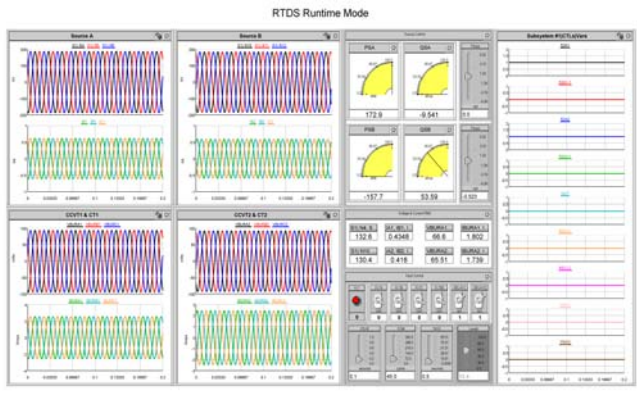
Σχήμα 1. Κύμα αναφοράς και “τοπικό” κύμα με σύγκριση γωνίας.



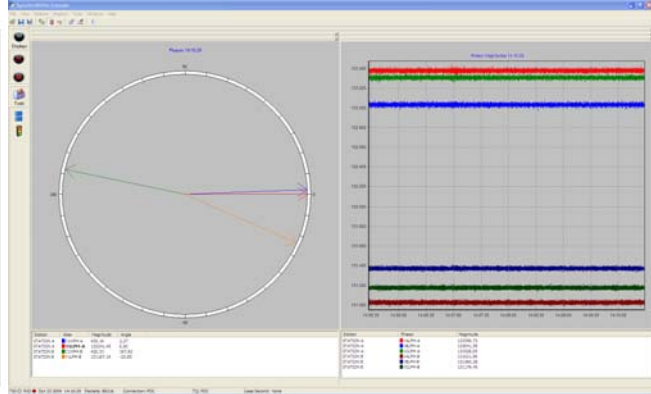
Σχήμα 2. Πρότυπη διάταξη δοκιμών της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών.



Σχήμα 3. Απεικόνιση του ηλεκτρικού δικτύου στο περιβάλλον Draft Mode του RSCAD.



Σχήμα 4. Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος RunTime Mode του RSCAD.



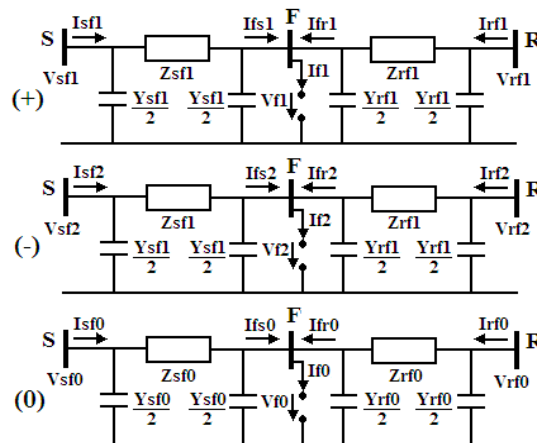
Σχήμα 5. Οπτικοποίηση συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών στο πρόγραμμα SynchroWave Console.

Το RTDS τροφοδοτεί μέσω των αναλογικών εξόδων του, που αντιστοιχούν στα δευτερεύοντα των Μ/Σ τάσης και έντασης στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς, τους ψηφιακούς Η/Ν SEL-421, που είναι ταυτόχρονα και μοναδές μέτρησης φασιθετών, [10]. Ταυτόχρονα, οι καταστάσεις των διακοπών και οι εντολές “πτώσης” (trip) και σήμανσης (alarm) μεταφέρονται εκατέρωθεν, μεταξύ του RTDS και των SEL-421, μέσω των μονάδων εισόδων/εξόδων τους, δημιουργώντας έτσι ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου [11]. Οι συγχρονισμένες μετρήσεις επιτυγχάνονται μέσω

του συγχρονισμένου από δέκτη GPS χρονομέτρου SEL-2407. Το SEL-2407 στέλνει τον κώδικα χρόνου IRIG-B (Inter-Range Instrumentation Group Time Transmission Formats) στα δύο SEL-421, τα οποία συγχρονίζουν με το χρονικό σήμα αναφοράς με ακρίβεια της τάξης του  $\pm 1\mu\text{sec}$ . Τα δύο SEL-421 ανταλλάσσουν μεταξύ τους, μέσω σειριακής σύνδεσης, δεδομένα συγχρονισμένων φασιθέτων στη μορφή που ορίζει το πρότυπο IEEE C37.118, με ρυθμό μετάδοσης 25 μηνυμάτων ανά δευτερόλεπτο. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να αναπτυχθούν σε πραγματικό χρόνο εφαρμογές προστασίας και ελέγχου βασισμένες στους συγχρονισμένους φασιθέτες. Επιπλέον, τα δύο SEL-421 αποστέλλουν με τον ίδιο ρυθμό, μέσω σειριακής επικοινωνίας, συγχρονισμένες μετρήσεις σε μία κεντρική υπολογιστική μονάδα, όπου βρίσκεται εγκατεστημένο εξειδικευμένο λογισμικό συλλογής, οπτικοποίησης και αρχειοποίησης των συγχρονισμένων φασιθετών. Το πρόγραμμα SEL-5077 (SynchroWave Server) συλλέγει τα δεδομένα των συγχρονισμένων φασιθετών, στη μορφή που ορίζει το πρωτόκολλο C37.118 [12], και τα μεταβιβάζει στην ίδια μορφή στα προγράμματα SEL-5078 (SynchroWave Console) και SEL-5076 (SynchroWave Archiver). Μέσω του SEL-5078, καθίσταται δυνατή η οπτικοποίηση των συγχρονισμένων φασιθετών (μέτρα και γωνίες φασιθετών τάσης και έντασης και παράγωγα αυτών, συχνότητα και ρυθμός μεταβολής της, ταυτοχρονισμένα ψηφιακά σήματα κτλ.) επιλύοντας έτσι το πρόβλημα του ετεροχρονισμού των μετρήσεων στην εποπτεία των Σ.Η.Ε (σχήμα 4). Μέσω του SEL-5076, μπορούν να δημιουργηθούν αρχεία των συγχρονισμένων μετρήσεων για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση.

### 3. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΕΝΩΝ ΦΑΣΙΘΕΤΩΝ

Οι συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη μιας ενοποιημένης μεθόδου εκτίμησης παραμέτρων γραμμής μεταφοράς και θέσης σφάλματος. Η μέθοδος χρησιμοποιεί αποκλειστικά συγχρονισμένους φασιθέτες των τάσεων και εντάσεων στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς, κατά τη διάρκεια του σφάλματος, και δεν εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο ηλεκτρικό δίκτυο πριν και κατά την εκδήλωση του σφάλματος (σύνθετη αντίσταση ισοδύναμων πηγών στα άκρα της γραμμής, φόρτιση της γραμμής πριν το σφάλμα, γωνία έναυσης του σφάλματος, αντίσταση σφάλματος) [13]. Επιπλέον, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και σε πιο σύνθετους σχηματισμούς γραμμών μεταφοράς π.χ γραμμές διπλού κυκλώματος, γραμμές τριών σημείων κτλ. Η ανάλυση της μεθόδου γίνεται με βάση το σχήμα 6.



**Σχήμα 6.** Κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς κατά τη διάρκεια του σφάλματος.

Στο σχήμα 6 απεικονίζονται τα ακολουθιακά ισοδύναμα  $\Pi$  κυκλώματα γραμμής μεταφοράς μεγάλου μήκους, όπως έχει μοντελοποιηθεί στο RSCAD (σχήμα 2). Για την ανάλυση χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συμβολισμοί:

$Z_{sf1}, Z_{rf1}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του τμήματος SF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sf1}, Y_{rf1}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας του τμήματος SF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Z_{sf0}, Z_{rf0}$ : ισοδύναμη εν σειρά σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του τμήματος SF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$Y_{sf0}, Y_{rf0}$ : ισοδύναμη εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα μηδενικής ακολουθίας του τμήματος SF και RF της γραμμής αντίστοιχα,

$V_{sf1}, V_{sf2}, V_{sf0}$ : συγχρονισμένος φασιθέτης τάσεως θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στο άκρο S της γραμμής κατά το σφάλμα,

$I_{sf1}, I_{sf2}, I_{sf0}$  : συγχρονισμένος φασιθέτης ρεύματος θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στο άκρο S της γραμμής κατά το σφάλμα,

$V_{rf1}, V_{rf2}, V_{rf0}$  : συγχρονισμένος φασιθέτης τάσεως θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στο άκρο R της γραμμής κατά το σφάλμα,

$I_{rf1}, I_{rf2}, I_{rf0}$  : συγχρονισμένος φασιθέτης ρεύματος θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στο άκρο R της γραμμής κατά το σφάλμα,

$Z_{ci}, Z_{c0}$  : χαρακτηριστική σύνθετη 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 σε km,

$d$  : απόσταση σε km μεταξύ της θέσης του σφάλματος και του άκρου αναφοράς S.

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

$$Z_{sfi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i d) \quad (1)$$

$$Z_{rfi} = Z_{ci} \sinh(\gamma_i (l-d)) \quad (2)$$

$$Y_{sfi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i d/2) \quad (3)$$

$$Y_{rfi} = (2/Z_{ci}) \tanh(\gamma_i (l-d)/2) \quad (4)$$

$$Z_{ci} = \sqrt{z_i/y_i} \quad (5)$$

$$\gamma_i = \sqrt{z_i y_i} \quad (6)$$

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, σε ohm ανά μονάδα μήκους,  $r_i$  και  $x_i$  είναι η εν σειρά ωμική και επαγωγική αντίδραση αντίστοιχα, και  $b_i$  η εγκάρσια χωρητική αντίσταση της γραμμής.

Για τις τάσεις και τις εντάσεις θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αντίστοιχα στο σημείο του σφάλματος F, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{fi,s} = V_{sfi} (1 + (Y_{sfi}/2)Z_{sfi}) - I_{sfi} Z_{sfi}, \dots i = 1, 2 \quad (7)$$

$$V_{f0,s} = V_{sf0} (1 + (Y_{sf0}/2)Z_{sf0}) - I_{sf0} Z_{sf0} \quad (8)$$

$$I_{fsi} = (I_{sfi} - V_{sfi} (Y_{sfi}/2)) - (V_{sfi} - (I_{sfi} - V_{sfi} (Y_{sfi}/2))Z_{sfi}) (Y_{sfi}/2), \dots i = 1, 2 \quad (9)$$

$$I_{f0s} = (I_{sf0} - V_{sf0} (Y_{sf0}/2)) - (V_{sf0} - (I_{sf0} - V_{sf0} (Y_{sf0}/2))Z_{sf0}) (Y_{sf0}/2) \quad (10)$$

$$V_{fi,r} = V_{rfi} (1 + (Y_{rfi}/2)Z_{rfi}) - I_{rfi} Z_{rfi}, \dots i = 1, 2 \quad (11)$$

$$V_{f0,r} = V_{rf0} (1 + (Y_{rf0}/2)Z_{rf0}) - I_{rf0} Z_{rf0} \quad (12)$$

$$I_{fri} = (I_{rfi} - V_{rfi} (Y_{rfi}/2)) - (V_{rfi} - (I_{rfi} - V_{rfi} (Y_{rfi}/2))Z_{rfi}) (Y_{rfi}/2), \dots i = 1, 2 \quad (13)$$

$$I_{f0r} = (I_{rf0} - V_{rf0} (Y_{rf0}/2)) - (V_{rf0} - (I_{rf0} - V_{rf0} (Y_{rf0}/2))Z_{rf0}) (Y_{rf0}/2) \quad (14)$$

$$I_{fi} = I_{fsi} + I_{fri}, \dots i = 0, 1, 2 \quad (15)$$

Η εκτίμηση των παραμέτρων της γραμμής και της θέσης του σφάλματος μπορεί να πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες που αντιστοιχούν σε κάθε τύπο σφάλματος στο σημείο F και αξιοποιώντας τις (7)-(15). Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός διαφασικού σφάλματος μεταξύ των φάσεων  $b$  και  $c$  της γραμμής, ισχύουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$f_1(X) = V_{f1,s} - V_{f1,r} = 0 \quad (16)$$

$$f_2(X) = V_{f2,s} - V_{f2,r} = 0 \quad (17)$$

$$f_3(X) = I_{f1} + I_{f2} = 0 \quad (18)$$

όπου  $X = [d, r_1, x_1, b_1]^T$  είναι το διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων. Ας θεωρήσουμε το διάνυσμα συναρτήσεων  $F(X)$ , το οποίο αποτελείται από τις εξής 6 συναρτήσεις:

$$F_{2i-1}(X) = \text{Re}(f_i(X)), \dots i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

$$F_{2i}(X) = \text{Im}(f_i(X)), \dots i = 1, 2, 3 \quad (20)$$

όπου  $\text{Re}(\cdot)$  και  $\text{Im}(\cdot)$  το πραγματικό και φανταστικό μέρος αντίστοιχα. Η εύρεση των 4 αγνώστων μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων [14], η οποία σε κάθε επανάληψη υπολογίζει τη διόρθωση  $\Delta X_k$ , ως εξής:

$$\Delta X_k = X_{k+1} - X_k \quad (21)$$

$$\Delta X_k = -(H^T H)^{-1} [H^T F(X_k)] \quad (22)$$

$$H = \frac{\partial F(X_k)}{\partial X} \quad (23)$$

όπου  $k = 0, 1, 2, \dots$  είναι ο αριθμός των επαναλήψεων,  $\Delta X_k$  το διάνυσμα διόρθωσης, και  $H$  ο ιακωβιανός πίνακας. Η επαναληπτική μέθοδος τερματίζεται όταν η νόρμα του διανύσματος διόρθωσης γίνει μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή (ανοχή)  $\epsilon$ . Οι μερικές παράγωγοι του  $F(X)$  ως προς τις άγνωστες παραμέτρους προσδιορίζονται ως εξής:

$$\frac{\partial f_1(X)}{\partial r_1} = \left[ \left( d \cosh(\gamma_1 d) \tanh(\gamma_1 d/2) + \frac{d \sinh(\gamma_1 d)}{2 \cosh^2(\gamma_1 d/2)} \right) \frac{\partial \gamma_1}{\partial r_1} \right] V_{sf1} - \left[ \sinh(\gamma_1 d) \frac{\partial Z_{c1}}{\partial r_1} + Z_{c1} d \cosh(\gamma_1 d) \frac{\partial \gamma_1}{\partial r_1} \right] I_{sf1} - \left[ \left( (l-d) \cosh(\gamma_1(l-d)) \tanh(\gamma_1(l-d)/2) + \frac{(l-d) \sinh(\gamma_1(l-d))}{2 \cosh^2(\gamma_1(l-d)/2)} \right) \frac{\partial \gamma_1}{\partial r_1} \right] V_{sf1} + \left[ \sinh(\gamma_1(l-d)) \frac{\partial Z_{c1}}{\partial r_1} + Z_{c1} (l-d) \cosh(\gamma_1(l-d)) \frac{\partial \gamma_1}{\partial r_1} \right] I_{sf1} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \gamma_1}{\partial r_1} = \frac{\sqrt{jb_1}}{2\sqrt{r_1 + jx_1}}, \quad \frac{\partial Z_{c1}}{\partial r_1} = \frac{1}{2\sqrt{r_1 + jx_1} \sqrt{jb_1}}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial F_1(X)}{\partial r_1} = \text{Re} \left( \frac{\partial f_1(X)}{\partial r_1} \right), \quad (26)$$

Οι μερικές παράγωγοι των υπολοίπων συναρτήσεων του  $F(X)$  ως προς τις άγνωστες παραμέτρους υπολογίζονται με ανάλογο τρόπο. Αντίστοιχες εξισώσεις μπορούν να εξαχθούν και για τους υπόλοιπους τύπους σφάλματων. Για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος μεταξύ φάσης  $a$  και γης, ισχύουν, εκτός των (16)-(17), και οι ακόλουθες σχέσεις:

$$f_4(X) = V_{f0,s} - V_{f0,r} = 0 \quad (27)$$

$$f_5(X) = I_{f1} - I_{f2} = 0 \quad (28)$$

$$f_6(X) = I_{f2} - I_{f0} = 0 \quad (29)$$

Λαμβάνοντας τα πραγματικά και φανταστικά μέρη των (16)-(17) και (27)-(29), σχηματίζεται το διάνυσμα συναρτήσεων  $F(X)$  που αποτελείται από 10 πραγματικές εξισώσεις. Στο διάνυσμα των αγνώστων παραμέτρων  $X$  μπορούν επιπλέον να συμπεριληφθούν και οι παράμετροι  $r_0$ ,  $x_0$ ,  $b_0$  του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας της γραμμής. Οι άγνωστες παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν και στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιώντας το ανακυκλωτικό σχήμα (21)-(23). Με παρόμοιο τρόπο, μπορούν να υπολογιστούν οι παράμετροι της γραμμής μεταφοράς και η θέση του σφάλματος και για ένα διφασικό ως προς γη σφάλμα, π.χ μεταξύ φάσεων  $b$ ,  $c$  και γης. Μόνο στην περίπτωση συμμετρικού βραχυκυκλώματος, δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη εκτίμηση των παραμέτρων της γραμμής και της θέσης του σφάλματος, με χρήση αποκλειστικά συγχρονισμένων φασιθετών κατά τη διάρκεια του σφάλματος. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η εκτίμηση των παραμέτρων της γραμμής με συγχρονισμένες μετρήσεις φασιθετών τάσης και έντασης στα δύο άκρα της γραμμής, πριν την εκδήλωση του σφάλματος. Στη συνέχεια, η θέση του σφάλματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση (16).

### 3.1. Προσομοίωση στο RTDS και αποτελέσματα της μεθόδου

Στον πίνακα 1 απεικονίζονται τα δεδομένα του ηλεκτρικού δικτύου και της γραμμής μεταφοράς που εξομοιώθηκαν στο RTDS. Για την επαλήθευση της μεθόδου, πραγματοποιήθηκαν δεκάδες προσομοιώσεις με το RTDS, μεταβάλλοντας κάθε φορά τις συνθήκες του σφάλματος (τύπος, θέση, γωνία έναυσης, αντίσταση του σφάλματος). Η συλλογή των συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών από τα SEL-421 στα δύο άκρα της γραμμής μεταφοράς έγινε μέσω του προγράμματος SEL-5076 SynchroWave Archiver. Το πρόγραμμα αυτό δημιουργεί αρχεία των χρονικά "σφραγισμένων" τάσεων και εντάσεων στα δύο άκρα της γραμμής είτε σε μορφή .CSV είτε σε μορφή Comtrade, ώστε να είναι εύκολη η ανάγνωση και η περαιτέρω επεξεργασία τους. Σε κάθε περίπτωση, η διάρκεια του σφάλματος στην εξομοίωση με το RTDS διήρκεσε τουλάχιστον δύο sec, χωρίς να εκκαθαριστεί, ώστε να υπάρξει επάρκεια συγχρονισμένων μετρήσεων φασιθετών κατά το σφάλμα (ο ρυθμός συλλογής των συγχρονισμένων μετρήσεων είναι 25 μηνύματα σε IEEE C37.118 format ανά sec, ίδιος με το ρυθμό μετάδοσης τους από τα δύο SEL-421).

Η ανάπτυξη της μεθόδου έγινε αποκλειστικά στο υπολογιστικό περιβάλλον MATLAB [15]. Για να επιταχυνθεί ο ρυθμός σύγκλισης της μεθόδου, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένοι ανισοτικοί περιορισμοί για τις άγνωστες παραμέτρους. Έτσι σε κάθε επανάληψη, η θέση του σφάλματος μπορεί να λάβει τιμές μόνο μεταξύ του μηδενός και του συνολικού μήκους της γραμμής ενώ οι παράμετροι της γραμμής μπορούν να λάβουν μόνο θετικές τιμές. Σε περίπτωση που η μέθοδος δώσει μη αποδεκτή τιμή για μία παράμετρο, τότε αυτή τίθεται αυτόματα ίση με την αρχική της τιμή στην επόμενη επανάληψη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται τυχόν ανεξέλεγκτες ταλαντώσεις στη σύγκλιση της μεθόδου. Επιπλέον, η ακρίβεια εκτίμησης της θέσης του σφάλματος εκφράζεται ως ποσοστιαίο σφάλμα από την εξίσωση (30), ενώ των υπολοίπων παραμέτρων από την εξίσωση (31), ως εξής:

$$\frac{|\text{Πραγματική θέση σφάλματος}-\text{Εκτιμώμενη θέση σφάλματος}|}{\text{Συνολικό μήκος γραμμής}} \quad (30)$$

$$\frac{|\text{Πραγματική τιμή παραμέτρου}-\text{Εκτιμώμενη τιμή παραμέτρου}|}{\text{Πραγματική τιμή παραμέτρου}} \quad (31)$$

Η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν η νόρμα του διανύσματος διόρθωσης γίνει μικρότερη από  $10^{-6}$ . Οι αρχικές τιμές των αγνώστων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση είναι οι ακόλουθες:  $d^{(0)} = l/2$ ,  $r_1^{(0)} = 0.1 \text{ ohm/km}$ ,  $x_1^{(0)} = 0.5 \text{ ohm/km}$ ,  $b_1^{(0)} = 3 \text{ }\mu\text{S/km}$ . Για τις περιπτώσεις μονοφασικών και διφασικών ως προς γη σφαλμάτων, στις οποίες μπορούν ως παράγωγα της μεθόδου να υπολογιστούν και οι παράμετροι του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες τιμές:  $r_0^{(0)} = 0.5 \text{ ohm/km}$ ,  $x_0^{(0)} = 1.5 \text{ ohm/km}$ ,  $b_0^{(0)} = 2 \text{ }\mu\text{S/km}$ . Για μια πραγματική γραμμή μεταφοράς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές τιμές, οι τιμές που έχουν προκύψει από τον κλασικό υπολογισμό παραμέτρων. Για όλες τις δοκιμές που εκτελέστηκαν, η μέθοδος συνέκλινε το πολύ σε 8 επαναλήψεις.

Στον πίνακα 2, παρουσιάζονται ορισμένα αποτελέσματα της μεθόδου για τον εντοπισμό της θέσης του σφάλματος. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η εκτίμηση της θέσης του σφάλματος είναι πολύ ακριβής και δεν εξαρτάται από την αντίσταση του σφάλματος. Επιπλέον, είναι ανεξάρτητη και από τις παραμέτρους της γραμμής μεταφοράς. Στον πίνακα 3, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μεθόδου για τις παραμέτρους του κυκλώματος θετικής ακολουθίας, για διαφόρους τύπους και θέσεις σφαλμάτων. Αντίστοιχα αποτελέσματα απεικονίζονται στον πίνακα 4 και για τις παραμέτρους του κυκλώματος μηδενικής ακολουθίας. Όπως γίνεται εμφανές από τους πίνακες 3 και 4, οι εκτιμήσεις των παραμέτρων της γραμμής είναι αρκετά ακριβείς. Συγκεκριμένα, το σφάλμα εκτίμησης της εν σειρά επαγωγικής αντίδρασης, που είναι και το σημαντικότερο στην κλασική μέθοδο υπολογισμού, είναι μικρότερο του 2% σε κάθε περίπτωση.

Στοιχείο	Παράμετροι	
Γραμμή μεταφοράς	$r_1$	0.0806 Ω/km
	$x_1$	0.4175 Ω/km
	$b_1$	2.7715 μS/km
	$r_0$	0.3969 Ω/km
	$x_0$	1.3759 Ω/km
	$b_0$	1.9541 μS/km
Μήκος γραμμής	$l$	300 km
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο S	$Z_{S1}$	0.5768+j3.7256 Ω
	$Z_{S0}$	3.6140+j12.279 Ω
	$E_S$	230 kV $\angle 0^\circ$
Ισοδύναμο δίκτυο στο άκρο R	$Z_{R1}$	2.6246+j29.999 Ω
	$Z_{R0}$	4.6412+j52.836 Ω
	$E_R$	230 kV $\angle -30^\circ$

Πίνακας 1. Παράμετροι του ηλεκτρικού δικτύου στο RTDS.

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος	Θέση σφάλματος	Ακρίβεια εκτίμησης
LG	10 ohm	0.3 (p.u.)	0.15 (%)
		0.6 (p.u.)	0.18 (%)
	40 ohm	0.2 (p.u.)	0.20 (%)
LL	1 ohm	0.3 (p.u.)	0.06 (%)
		0.6 (p.u.)	0.09 (%)
	5 ohm	0.2 (p.u.)	0.08 (%)
LLG	5 ohm	0.3 (p.u.)	0.05 (%)
		0.6 (p.u.)	0.09 (%)
	10 ohm	0.2 (p.u.)	0.10 (%)
		0.8 (p.u.)	0.13 (%)

Πίνακας 2. Αποτελέσματα εκτίμησης θέσης του σφάλματος.

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (ohm)	Θέση σφάλματος (p.u.)	Ακρίβεια εκτίμησης $r_1$ (%)	Ακρίβεια εκτίμησης $x_1$ (%)	Ακρίβεια εκτίμησης $b_1$ (%)
LG	10	0.3	0.58	0.84	0.38
LG	40	0.8	0.92	1.26	0.61
LL	1	0.3	0.34	0.31	0.44
LL	5	0.8	0.58	0.67	0.71
LLG	5	0.3	0.78	0.63	0.81
LLG	10	0.8	0.92	1.26	1.35

Πίνακας 3. Αποτελέσματα εκτίμησης παραμέτρων κυκλώματος θετικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς.

Τύπος σφάλματος	Αντίσταση σφάλματος (Ohm)	Θέση σφάλματος (p.u.)	Ακρίβεια εκτίμησης $r_0$ (%)	Ακρίβεια εκτίμησης $x_0$ (%)	Ακρίβεια εκτίμησης $b_0$ (%)
LG	10	0.3	1.08	1.33	0.92
LG	40	0.8	1.25	1.58	1.33
LLG	5	0.3	1.39	1.45	1.58
LLG	10	0.8	1.83	1.92	2.11

Πίνακας 4. Αποτελέσματα εκτίμησης παραμέτρων κυκλώματος αρνητικής ακολουθίας γραμμής μεταφοράς.

#### 4. ΣΧΗΜΑ ΕΦΕΔΡΙΚΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ ΓΗΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ

Στο σχήμα 2, οι ψηφιακοί Η/Ν αποστάσεως SEL-421 υπολογίζουν τους συγχρονισμένους φασιθέτες τάσης και έντασης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (25 φορές ανά sec). Οι δύο Η/Ν επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω δύο ανεξάρτητων σειριακών καναλιών, και μέσω του πρωτοκόλλου IEEE C37.118 καθίσταται δυνατή η μεταφορά συγχρονισμένων φασιθετών από τον Η/Ν του απομακρυσμένου άκρου της γραμμής στον Η/Ν του τοπικού άκρου και αντίστροφα. Οι δύο Η/Ν SEL-421 “ευθυγραμμίζουν” χρονικά τους αντίστοιχους συγχρονισμένους φασιθέτες τάσης και έντασης από το τοπικό και το απομακρυσμένο άκρο της γραμμής, μέσω των χρονικών “σφραγίδων” (time stamps) που αυτοί φέρουν. Επιπλέον, οι Η/Ν SEL-421 παρέχουν τη δυνατότητα μαθηματικής επεξεργασίας αναλογικών και ψηφιακών μεγεθών, μέσω των αριθμητικών και λογικών πράξεων που διαθέτουν. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να αναπτυχθούν νέα σχήματα προστασίας βασισμένα σε συγχρονισμένους φασιθέτες.

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζεται ένα τέτοιο σχήμα, το οποίο επιλύει το πρόβλημα ανίχνευσης σφαλμάτων γης υψηλής αντίστασης στις γραμμές μεταφοράς [16]. Το προτεινόμενο σχήμα ξεπερνά τους περιορισμούς, σε κάλυψη αντίστασης σφάλματος  $R_f$ , των παραδοσιακών σχημάτων προστασίας με σύγκριση γωνίας (phase comparison schemes) λόγω ασυμμετρίας του καναλιού επικοινωνίας. Αυτό γίνεται, δημιουργώντας δύο νέα στοιχεία προστασίας, με τη βοήθεια των συγχρονισμένων φασιθετών έντασης στα δύο άκρα της γραμμής: α) του στοιχείου κατεύθυνσης ρεύματος ομοπολικής συνιστώσας (32IG) και β) του στοιχείου διαφορικής προστασίας ρεύματος ομοπολικής συνιστώσας (87LG).

Το στοιχείο 32IG συγκρίνει τη γωνία του τοπικού συγχρονισμένου φασιθέτη έντασης μηδενικής ακολουθίας  $I_G^L$  με τη γωνία του αντίστοιχου φασιθέτη στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής  $I_G^R$ , και δίνει εντολή “πτώσης” (trip) όταν ικανοποιείται η σχέση (32). Το στοιχείο αυτό ανιχνεύει σφάλματα γης υψηλής αντίστασης όταν τα ρεύματα ομοπολικής συνιστώσας εισρέουν στη γραμμή και από τα δύο άκρα της.

$$\text{Re} \left[ I_G^L \cdot (I_G^R)^* \right] > 0 \quad (32)$$

Η χαρακτηριστική του στοιχείου 87LG χρησιμοποιεί το ρεύμα λειτουργίας  $I_G^{OP}$  και το ρεύμα συγκράτησης  $I_G^{RT}$  [17], σύμφωνα με τις σχέσεις (33) και (34):

$$I_G^{OP} = \left| I_G^L + I_G^R \right| \quad (33)$$

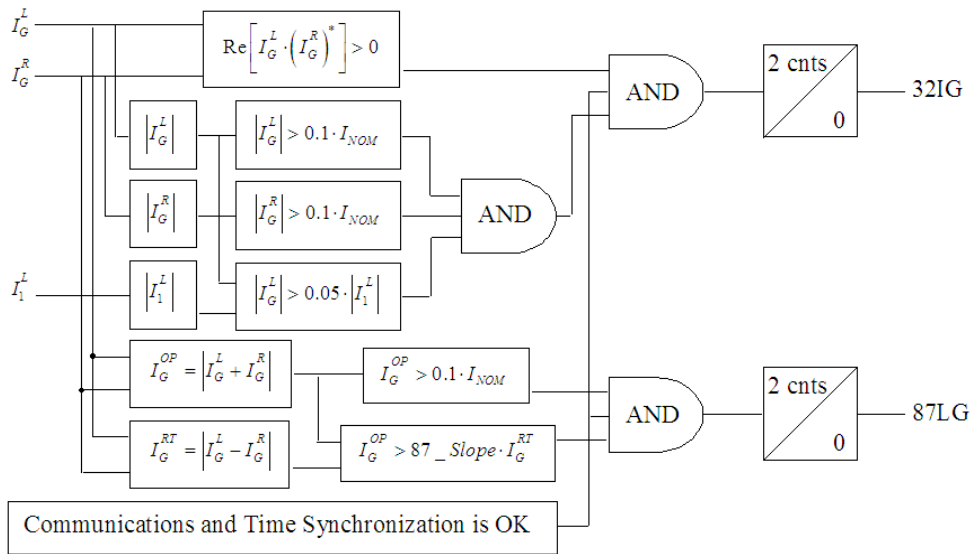
$$I_G^{RT} = \left| I_G^L - I_G^R \right| \quad (34)$$

Το στοιχείο (87LG) λειτουργεί όταν ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

$$I_G^{OP} > 87\_Slope \cdot I_G^{RT} \quad (35)$$

$$I_G^{OP} > 0.1 \cdot I_{NOM} \quad (36)$$

όπου  $87\_Slope$  είναι η κλίση της χαρακτηριστικής λειτουργίας του στοιχείου 87LG (ίση με 0.20 στη συγκεκριμένη εφαρμογή) και  $I_{NOM}$  είναι το ονομαστικό ρεύμα των δύο Η/Ν.



Σχήμα 7. Λογική στοιχείων προστασίας 32IG και 87LG.

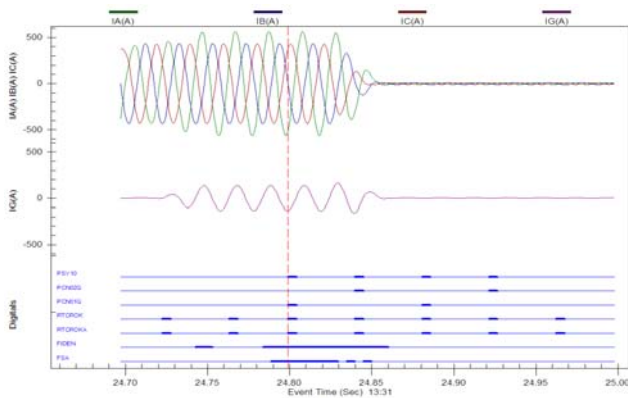
Στο σχήμα 7 απεικονίζεται η βασική λογική για τα στοιχεία 32IG και 87LG. Το στοιχείο 32IG γίνεται λογικό “1” όταν, εκτός από την (32), τα  $|I_G^L|$  και  $|I_G^R|$  ξεπεράσουν ένα κατώτατο κατώφλι ευαισθησίας, π.χ.  $0.1 \cdot I_{NOM}$ , και όταν το  $|I_G^L|$  γίνει μεγαλύτερο από  $0.05 \cdot I_1^L$ , όπου  $I_1^L$  είναι ο τοπικός φασιθέτης του ρεύματος θετικής ακολουθίας. Επιπλέον, οι λογικές και των δύο στοιχείων επιτηρούνται από επιμέρους στοιχεία που σχετίζονται με την κατάσταση των καναλιών επικοινωνίας, την ακεραιότητα των δεδομένων και την ποιότητα της ώρας συγχρονισμού.

#### 4.1. Αξιολόγηση επίδοσης σχήματος προστασίας με το RTDS

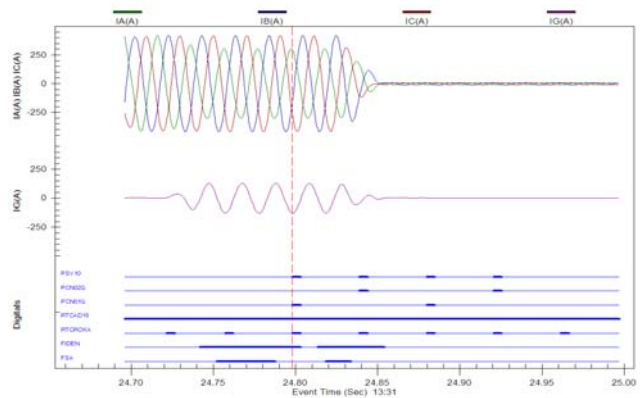
Στον πίνακα 5 απεικονίζεται η υλοποίηση της λογικής των δύο νέων στοιχείων 32IG και 87LG στο SEL-5030 AcSELErator QuickSet Software, που είναι το πρόγραμμα ρύθμισης των H/N SEL-421. Οι ορισμένες από το χρήστη μεταβλητές PMV01...11 είναι αριθμητικές μεταβλητές, ενώ οι PSV01...10 είναι λογικές μεταβλητές. Οι εσωτερικές μεταβλητές I(A,B,C)WPMMD και I(A,B,C)WPMMD αντιπροσωπεύουν τα μέτρα και τις γωνίες αντίστοιχα των τοπικών φασιθετών ρεύματος κάθε φάσης. Οι εσωτερικές μεταβλητές RTCAP(11,12,13) και RTCAP(12,14,16) αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα χρονικά “σφραγισμένα” μεγέθη του H/N στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής, τα οποία μεταφέρονται σειριακά μέσω του πρωτοκόλλου IEEE C37.118 στον τοπικό H/N. Οι μεταβλητές TSOK και PMDOK είναι δείκτες της ποιότητας του συγχρονισμού που επιτυγχάνεται στον τοπικό H/N, ενώ οι RTCROKA και RTCAD16 είναι οι αντίστοιχες μεταβλητές για τον H/N στο απομακρυσμένο άκρο της γραμμής. Επιπλέον, οι μεταβλητές PCN01...02(IN,PV,R,Q) αναφέρονται στους καταμετρητές (counters) της λογικής κάθε στοιχείου του σχήματος 7. Τέλος, η λογική μεταβλητή PSV10 είναι η λογική σύζευξη (OR) των δύο στοιχείων 32IG και 87LG αντίστοιχα.

1: PSV64 := TSOK AND PMDOK 2: PMV01 := IAWPMMD * COS(IAWPMAD) + IBWPMMD * COS(IBWPMAD) + ICWPMMD * \ COS(ICWPMAD) 3: PMV02 := IAWPMMD * SIN(IAWPMAD) + IBWPMMD * SIN(IBWPMAD) + ICWPMMD * \ SIN(ICWPMAD) 4: PMV03 := RTCAP11 * COS(RTCAP12) + RTCAP13 * COS(RTCAP14) + RTCAP15 * COS(RTCAP16) 5: PMV04 := RTCAP11 * SIN(RTCAP12) + RTCAP13 * SIN(RTCAP14) + RTCAP15 * SIN(RTCAP16) 6: PMV05 := PMV01 * PMV03 + PMV02 * PMV04 7: PMV06 := SQRT(PMV01 * PMV01 + PMV02 * PMV02) 8: PMV07 := SQRT(PMV03 * PMV03 + PMV04 * PMV04) 9: PMV08 := 0.050000 * I1WPMMD 10: PSV01 := PMV06 > 24.000000 11: PSV02 := PMV07 > 24.000000 12: PSV03 := PMV06 > PMV08	13: PSV04 := RTCROKA AND RTCAD16 14: PSV05 := PMV05 > 0.000000 15: PSV06 := PSV01 AND PSV02 AND PSV03 AND PSV04 AND PSV05 16: PCN01IN := PSV06 17: PCN01PV := 2.000000 18: PCN01R := PCN01Q 19: PMV09 := SQRT((PMV01 + PMV03) * (PMV01 + PMV03) + (PMV02 + PMV04) * (PMV02 + PMV04)) 20: PMV10 := SQRT((PMV01 - PMV03) * (PMV01 - PMV03) + (PMV02 - PMV04) * (PMV02 - PMV04)) 21: PMV11 := 0.200000 * PMV10 22: PSV07 := PMV09 > PMV11 23: PSV08 := PMV09 > 24.000000 24: PSV09 := PSV04 AND PSV07 AND PSV08 25: PCN02IN := PSV09 26: PCN02PV := 2.000000 27: PCN02R := PCN02Q 28: PSV10 := PCN01Q OR PCN02Q
<b>Πίνακας 5.</b> Υλοποίηση της λογικής των στοιχείων 32IG και 87LG στο AcSELErator QuickSet.	

Για την αξιολόγηση της επίδοσης του προτεινόμενου σχήματος προστασίας, προσομοιώθηκαν σφάλματα γης υψηλής αντίστασης (100 έως 500 ohm) κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς που εξομοιώθηκε στο RTDS. Στα σχήματα 9 και 10 παρουσιάζονται οι χρόνοι λειτουργίας των στοιχείων 32IG και 87LG σε κάθε H/N, για ένα μονοφασικό σφάλμα μεταξύ φάσης a και γης, με αντίσταση σφάλματος  $R_f=400$  ohm σε θέση που αντιστοιχεί στο 53% του συνολικού μήκους της γραμμής από το άκρο αναφοράς S. Όπως γίνεται αντιληπτό από τα σχήματα 8 και 9, η μεταβλητή PSV10, που εκφράζει τη λογική σύζευξη των δύο στοιχείων, γίνεται λογικό “1” μετά από 77 ms από την εκδήλωση του σφάλματος, για τον H/N στο τοπικό άκρο της γραμμής S, και μετά από παρέλευση 79 ms, για τον H/N στο απομακρυσμένο άκρο R. Τελικά, η εκκαθάριση του σφάλματος γίνεται μετά από 50 ms, που έχει θεωρηθεί ο χρόνος ανοίγματος των δύο διακοπών. Οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από το ρυθμό μετάδοσης των συγχρονισμένων φασιθετών μεταξύ των δύο H/N, και σε κάθε περίπτωση κρίνονται αποδεκτοί από τη στιγμή που το προτεινόμενο σχήμα προορίζεται για εφεδρική (back-up) προστασία. Πρέπει να σημειωθεί, ότι κανένα από τα υπόλοιπα στοιχεία προστασίας που είχαν ενσωματωθεί στη λογική πτώσης του H/N (αποστάσεως, υπερεντάσεως φάσης-γης), δεν κατόρθωσε να ανιχνεύσει σε αποδεκτούς χρόνους και ζώνες τα συγκεκριμένα σφάλματα.



**Σχήμα 8.** Καταγραφή σφάλματος από τον H/N στο άκρο S, για σφάλμα A-G με  $R_f=400$  ohm στο 53% της γραμμής.



**Σχήμα 9.** Καταγραφή σφάλματος από τον H/N στο άκρο R, για σφάλμα A-G με  $R_f=400$  ohm στο 53% της γραμμής.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν εφαρμογές της τεχνολογίας των συγχρονισμένων μετρήσεων για την προστασία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα είναι πολύ ενθαρρυντικά και καταδεικνύουν ότι η τεχνολογία αυτή θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τα επόμενα χρόνια. Πέρα από τις εφαρμογές που παρουσιάστηκαν, πλήθος εφαρμογών βασισμένες σε συγχρονισμένους φασιθέτες μπορούν να αναπτυχθούν, σε πραγματικό και μη πραγματικό χρόνο, για τη βελτίωση της εποπτείας, της συντήρησης, του ελέγχου, της προστασίας και της αποκατάστασης των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] A.G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," IEEE Comput. Appl. Power, vol. 6, no. 2, pp. 10–15, April 1993.
- [2] A. G. Phadke, J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Springer, New York, 2008.
- [3] G. Benmouyal, E.O. Schweitzer III, A.Guzman, "Synchronized phasor measurement in protective relays for protection, control, and analysis of electrical power systems," Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 22-24, 2002.
- [4] M. Bryson, S. Satishami, "SEL-421 performance as both a protective relay and a phasor measurement unit," White Paper, Schweitzer Engineering Laboratories, 2005.
- [5] R. Kuffel et al, "RTDS – A Fully Digital Power System Simulator Operating in Real Time", ICDS-95 Conference, College Station, USA, April 1995.
- [6] P. M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems, IEEE Press, New York, 1995.
- [7] S. Lopez, J. Gomez, R. Cimadevilla, "Synchrophasor applications of the National Electric System Operator of Spain", 61<sup>st</sup> Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station, Tx, April 1-3, 2008.
- [8] Y. Liao, N. Kang, "Fault-location algorithms without utilizing line parameters based on the distributed parameter line model", IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 2, pp. 579-584, April 2009.
- [9] F. Calero, W.A. Elmore, "Current Differential and Phase Comparison Relaying Schemes, Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 20-22, 1992.
- [10] SEL-421, Instruction Manual, Schweitzer Engineering Laboratories.
- [11] Γ. Κορρές, Χ. Αποστολόπουλος, Π. Κατσίκας, Δ. Τσακίρης, «Έλεγχος λειτουργίας ψηφιακών ηλεκτρονόμων με τον ψηφιακό εξομοιωτή πραγματικού χρόνου και υπολογιστικά μοντέλα», Πρακτικά Συνόδου Ελληνικής Επιτροπής Διεθνούς Συμβουλίου Μεγάλων Ηλεκτρικών Δικτύων (CIGRE), Αθήνα, Δεκέμβριος 2005.
- [12] IEEE Synchrophasors for Power Systems, IEEE Standard C37.118-2005.
- [13] Y. Liao, M. Kezunovic, "Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors", IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 3, pp. 1355-1341, Jul. 2007.
- [14] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, Numerical recipes: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, 2007.
- [15] The Mathworks, Inc., Using MATLAB, Natick, MA., July 2002.
- [16] A. Guzman, V. Mynam, G. Zweigle, "Backup transmission line protection for ground faults and power swing detection using synchrophasors," Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 16-18, 2007.
- [17] A. R. Van C. Warrington, Protective Relays: Their theory and Practice, vol. 1, London, Chapman and Hall, 1974.