



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Διερεύνηση δυνατότητας προστασίας από αποκοπή ουδετέρου σε  
δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω τηλεπικοινωνιών ηλεκτρικών αγωγών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Αρτυματάς Αντώνης

Κούννος Πέτρος

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ  
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Διερεύνηση δυνατότητας προστασίας από αποκοπή ουδετέρου σε  
δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω τηλεπικοινωνιών ηλεκτρικών αγωγών**

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρτυματάς Αντώνης

Κούννος Πέτρος

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2011

.....  
Κωνσταντίνος Γ. Καραγιαννόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Νικόλαος Ι. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Περικλής Δ. Μπούρκας  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

.....  
Αρτυματάς Αντώνης

.....  
Κούννος Πέτρος

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αρτυματάς Αντώνης, 2011

Copyright © Κούννος Πέτρος, 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.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την διερεύνηση της δυνατότητας προστασίας έναντι αποκοπής ουδετέρου σε δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω τηλεπικοινωνιών ηλεκτρικών αγωγών. Γίνεται διερεύνηση τόσο σε ουδετερογειωμένο ουδέτερο όσο και σε σύστημα με άμεση γείωση της αντίστασης εισόδου σήματος ελέγχου και της δυνατότητας ανίχνευσης του σε διάφορες περιπτώσεις αποκοπής με αντιστάσεις γείωσης και διαφορετικές θέσεις αποκοπής. Επίσης γίνεται υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς του ουδετέρου αγωγού και των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτόν για διάφορες περιπτώσεις ασυμμετρίας φορτίου.

Τέλος, γίνεται παρουσίαση μιας συσκευής επιτήρησης του ουδετέρου, η χρήση της οποίας μπορεί να αποτρέψει τους κινδύνους πυρκαγιάς και ηλεκτροπληξίας λόγω αποκοπής του.

Λέξεις κλειδιά: χαμηλή τάση, ουδετερογειωμένος ουδέτερος, άμεση γείωση, αποκοπή ουδετέρου, σήμα ελέγχου σε ουδέτερο, ανίχνευση σήματος σε ουδέτερο, αποστολή σήματος σε ουδέτερο

## **ABSTRACT**

The objective of this diploma thesis is to determine the feasibility of protection from the open neutral condition in low voltage distribution networks using power line communications. The input resistance of a control signal on TN-C-S Protective Multiple Earthing (PME) and TT earthed neutral conductors is investigated, as well as the possibility of the signal's detection at the other end of the line in numerous cases of ground rod resistance and abruption points. Moreover, the transfer function of the neutral and the voltage for different load unbalances are calculated.

Lastly, an apparatus is presented, the use of which can avert the dangers of a neutral conductor abruption.

Keywords: low voltage, multigrounded neutral, TT earthing, neutral system abruption, control signal, control signal detection in the neutral conductor

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον ομότιμο καθηγητή κ. Περικλή Μπούρκα για την ευκαιρία που μας έδωσε για τη συγγραφή αυτής της διπλωματικής καθώς και για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθεια κατά την διάρκεια της φοιτήσεως μας στην σχολή ΗΜΜΥ του Ε.Μ.Π. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Χαλεβίδη για την τεράστια συνεισφορά του στην συγγραφή αυτής της διπλωματικής.

Αρτυματάς Αντώνης, Κούννος Πέτρος

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....	13
1.2 Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
1.2.1 Εναέριο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	19
1.2.2 Παροχές χαμηλής τάσης.....	20
1.2.3 Η συντήρηση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
1.2.4 Γενικά μέτρα προστασίας.....	20
1.2.5 Συστήματα γείωσης σε γραμμές διανομής χαμηλής τάσης.....	20
1.3 Αποκοπή ουδετέρου.....	22
1.3.1 Θεωρητική ανάλυση σε περίπτωση ανοικτού ουδετέρου.....	23
1.4 Power line communication (PLC).....	26
1.4.1 Ιστορική αναδρομή.....	27
1.4.2 Λειτουργία PLC.....	28
1.4.3 Μέθοδοι σύζευξης PLC.....	30
1.4.3.1 Χωρητική μέθοδος σύζευξης.....	30
1.4.3.2 Επαγωγική μέθοδος σύζευξης.....	33
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	35
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....	37
3.1.1 Υπολογισμός αντίστασης εισόδου σήματος σε πολυγυωμένο ουδέτερο.....	38
3.1.2 Υπολογισμός αντίστασης εισόδου σήματος σε κομμένο ουδέτερο.....	41
3.2.1 Μελέτη ανάγνωσης σήματος ελέγχου ουδετερογειομένου ουδετέρου (TN PME-C-S).....	47



3.2.2 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου κομμένου ουδετερογειομένου ουδέτερου (TN PME-C-S) με αντίσταση γης.....	55
3.3.1 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου ουδέτερου σε σύστημα άμεσης γείωσης (TT).....	66
3.3.2 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου κομμένου ουδέτερου άμεσης γείωσης (TT) με αντίσταση γης.....	68
3.4 Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς ουδετερογειομένου ουδετέρου.....	72
3.5 Επαναληπτική μέθοδος υπολογισμού τάσεων φορτίου και ουδετέρου.....	74
4. ΣΧΟΛΙΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	81
4.1. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.1.....	82
4.2. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2.....	82
4.3. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.3.....	83
4.4. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.5.....	84
4.5 Μια προτεινόμενη προσαρτία σε περίπτωση αποκοπής του ουδετέρου αγωγού.....	84
5. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	86
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	88
Βιβλιογραφία.....	91



**Κεφάλαιο**

**1**

**Εισαγωγή**

## 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Τα σύγχρονα ΣΗΕ μπορούν να διακριθούν γενικά στα ακόλουθα τμήματα:

α) Σταθμό Παραγωγής

β) Δίκτυα Μεταφοράς (ΔΜ), που διασυνδέουν τους σταθμούς παραγωγής και μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια κοντά στα μεγάλα κέντρα καταναλώσεως.

γ) Δίκτυα Διανομής (ΔΔ), με τα οποία η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές.

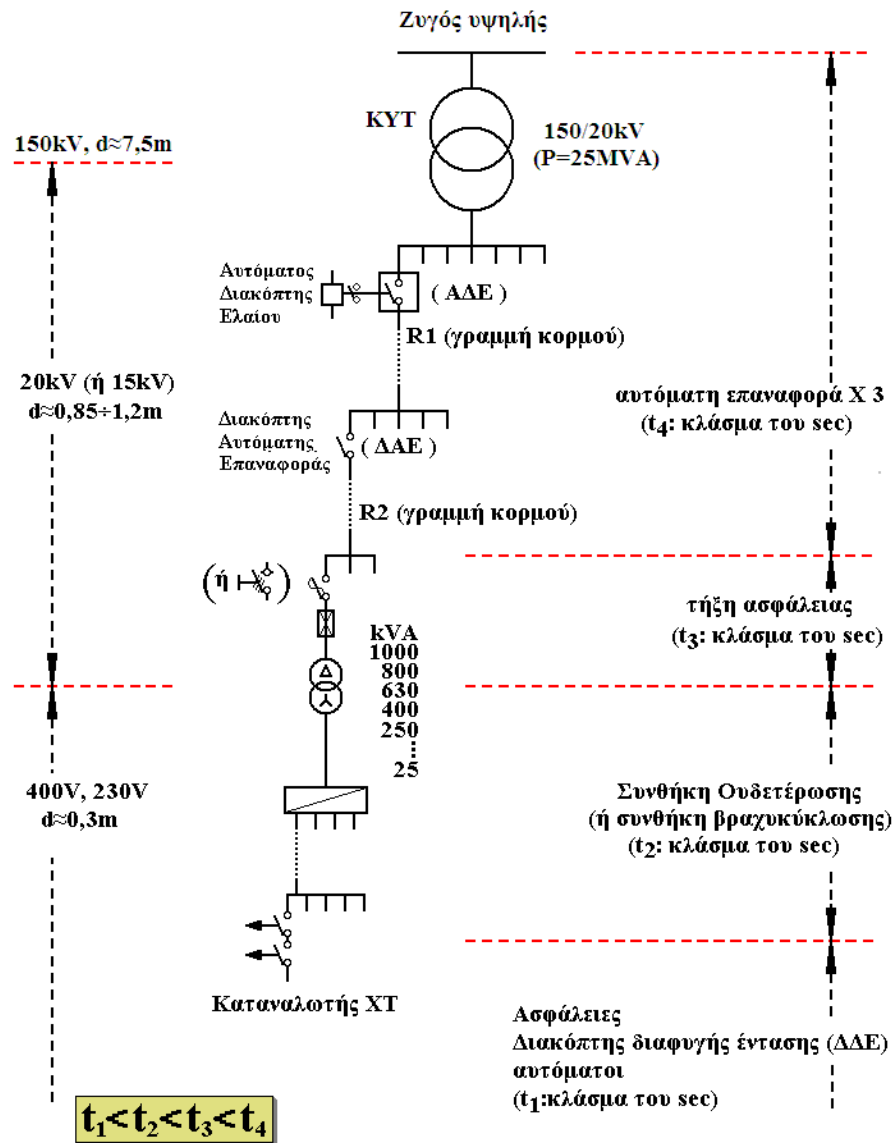
Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός Σ.Η.Ε. είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ανήκουν στο σύνολο ή κατά τμήματα σε δημόσιες-κρατικές ή ιδιωτικές επιχειρήσεις ηλεκτρισμού. Στη χώρα μας μέχρι και πριν λίγα χρόνια το σύνολο των εγκαταστάσεων άνηκε στη Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (ΔΕΗ), η οποία κατείχε το μονοπώλιο. Τα τελευταία χρόνια με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας όλο και περισσότεροι ιδιώτες επενδύουν κεφάλαια στην περιοχή της ενέργειας.

## 1.2 Μεταφορά και Διανομή Ηλεκτρικής ενέργειας

Στο σχήμα 1.2-1 δίνεται απλοποιημένα ένα παράδειγμα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με αυτό, από το μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150 kV/20 kV, 25 MVA) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (KYT) αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20 kV), που η καθεμία αφορά τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μία ευρύτερη περιοχή. Οι γραμμές αυτές ονομάζονται «γραμμές κορμού» και κατασκευάζονται με αγωγούς μεγάλης διατομής, συνήθως 95 mm<sup>2</sup> ισοδύναμου χαλκού, ενώ συμβολίζονται στα σχέδια με το γράμμα R και ένα αριθμό (π.χ. R 23). Καθεμία από τις παραπάνω γραμμές διακλαδίζεται σε ορισμένες γραμμές, που αφορούν την ηλεκτροδότηση (τμημάτων της ευρύτερης περιοχής) μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ), οι οποίες ονομάζονται επίσης γραμμές κορμού.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.2-1, οι γραμμές κορμού μέσω των ΔΑΕ διακλαδίζονται με την σειρά τους σε διάφορες γραμμές που καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (20 kV/400V, 230 V). Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους επί στύλων ισχύος μέχρι 400 kVA και σε εσωτερικού χώρου (συνήθως σε υπόγεια πολυκατοικιών) ισχύος μεγαλύτερης από 400 kVA. Στους υπαίθριους υποσταθμούς η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποζευκτών ή τριπολικών αποζευκτών (βλ. Σχήμα 1.2-1), ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Σημειώνεται ότι για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών (σε περιπτώσεις π.χ. πυρκαγιών, εργασιών συντήρησης και εργασιών αποκατάστασης βλαβών) υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποζεύκτες και τριπολικοί αποζεύκτες μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.



Σχήμα 1.2-1: Απλοποιημένο παράδειγμα δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δίκτυα διανομής διακρίνονται κατασκευαστικά σε δυο βασικές κατηγορίες:

- τα εναέρια και
- τα υπόγεια δίκτυα.

Το πλεονέκτημα των εναερίων δικτύων έναντι των υπόγειων είναι ότι λιγότερο δαπανηρά και η αποκατάσταση των βλαβών ταχύτερη, καταλαμβάνουν όμως σημαντικό χώρο. Υπόγεια κατασκευάζονται τα δίκτυα (τόσο ΜΤ όσο και ΧΤ) στα κέντρα των πόλεων, για λόγους αισθητικής αλλά και για λόγους δυσκολίας διαθέσεως του αναγκαίου χώρου όπου οι μετασχηματιστές είναι μεγαλύτεροι από 400kVA. Οποσδήποτε το θέμα της επιλογής του κατάλληλου τύπου δικτύου για μια περιοχή αποτελεί σύνθετο τεχνοοικονομικό πρόβλημα δεδομένου ότι στην αρχική σχεδίαση αυτού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η μελλοντική του εξέλιξη.

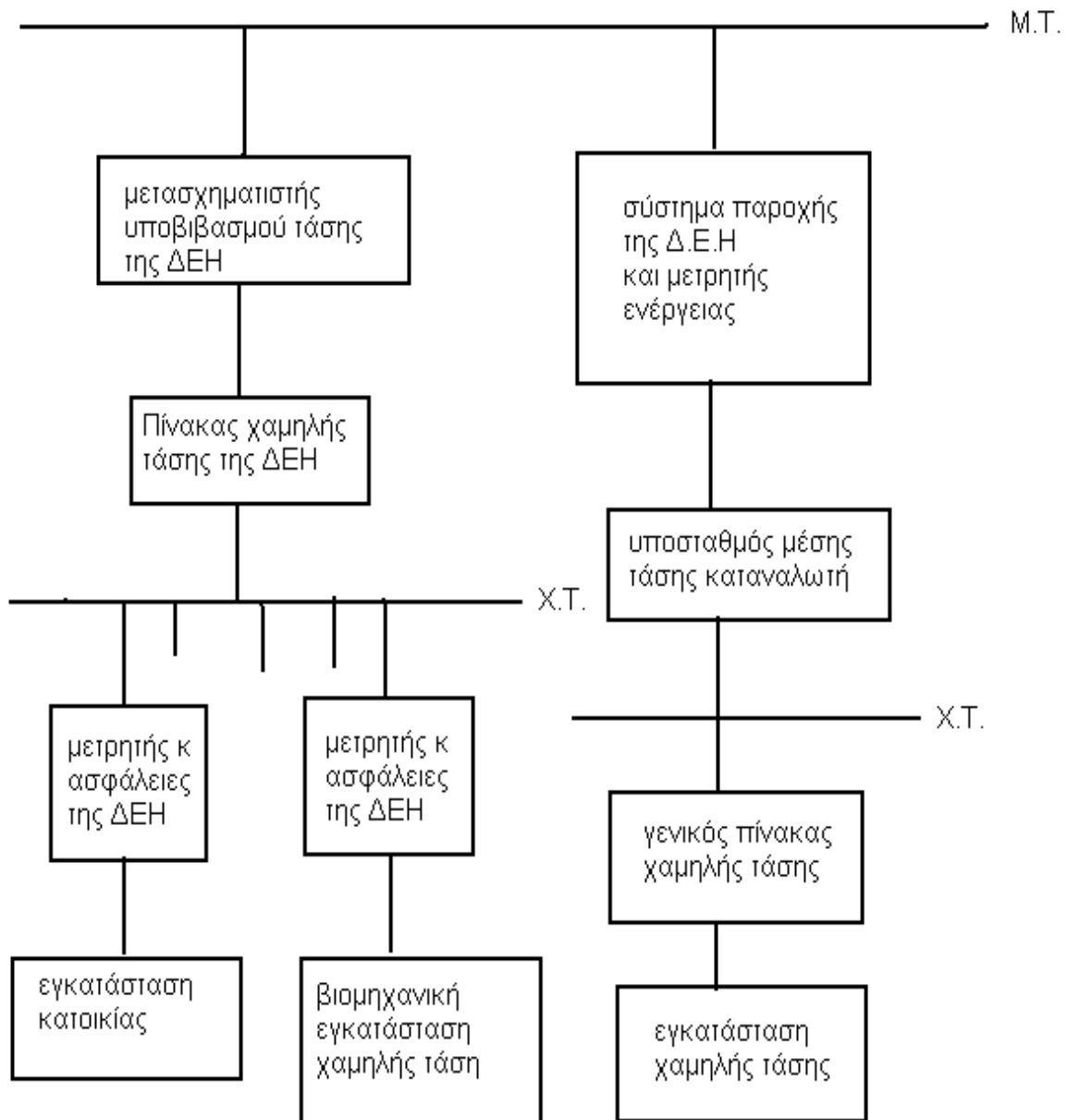
### **1.2.1 Εναέριο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας**

Τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης έχουν δενδροειδή μορφή (σχήμα 1.2.1-1). Αποτελούνται δηλαδή από τον ‘κορμό’ που κατασκευάζεται με αγωγούς μεγάλης διατομής (στη ΔΕΗ συνήθως 95 mm<sup>2</sup>) και τις διακλαδώσεις (στη ΔΕΗ συνήθως 35 ή 16 mm<sup>2</sup>) πάνω στις οποίες συνδέονται συνήθως οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ.

Οι γραμμές των εναερίων δικτύων ΜΤ και ΧΤ μέχρι πριν μερικά χρόνια είχαν γυμνούς αγωγούς. Τα τελευταία όμως χρόνια σε ολοένα αυξανόμενο ποσοστό κατασκευάζονται με μονωμένους αγωγούς. Κατά αυτό τον τρόπο αυξάνεται η ασφάλεια λειτουργίας και μειώνεται η ενόχληση στο περιβάλλον. Οι εναέρια γραμμές των συστημάτων μεταφοράς υψηλής και μέσης τάσης κατασκευάζονται από γυμνούς αγωγούς που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα), αγωγοί ACSR. Οι αγωγοί αυτοί αναρτώνται σε πυλώνες μέσω αλυσίδων μονωτήρων από πορσελάνη ή γυαλί.

Στις ευρωπαϊκές χώρες, γενικά οι γραμμές των εναερίων δικτύων μέσης τάσης περιλαμβάνουν μόνο τους τρεις αγωγούς των φάσεων, δηλαδή δεν ακολουθεί ο ουδέτερος. Αντίθετα στις Η.Π.Α, τον Καναδά κλπ ο ουδέτερος των εναερίων δικτύων μέσης τάσης κατά κανόνα διανέμεται μαζί με τις φάσεις και γειώνεται κατά διαστήματα όπως γίνεται και στην Ευρώπη μόνο για τις γραμμές χαμηλής τάσης. Έτσι κατά κανόνα ο κορμός του δικτύου περιλαμβάνει τέσσερις αγωγούς (τρεις φάσεις και ουδέτερος), ενώ οι διακλαδώσεις, όταν δεν

απαιτείται η παροχή τριφασικής φάσεως από τους καταναλωτές, περιλαμβάνουν δυο μόνο αγωγούς (μια φάση και τον ουδέτερο).



**Σχήμα 1.2.1-1** : Ένα απλοποιημένο διάγραμμα για τις παροχές χαμηλής και μέσης τάσης



## 1.2.2 Παροχές Χαμηλής Τάσης και Μέσης Τάσης

Στην περίπτωση των καταναλωτών χαμηλής τάσης η μέση τάση μετασχηματίζεται σε χαμηλή τάση, η οποία και τροφοδοτεί ένα πίνακα χαμηλής τάσης της Δ.Ε.Η (ασφαλειοκιβώτιο). Από τον πίνακα αυτό ξεκινούν οι διάφορες γραμμές χαμηλής τάσης του δικτύου, από όπου και δίνονται οι παροχές προς τους διάφορους καταναλωτές (κατοικίες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης). Σε κάθε τριφασική παροχή χαμηλής τάσης προβλέπεται από τη Δ.Ε.Η μετρητής και τρεις ασφάλειες (μια ασφάλεια για κάθε φάση). Όταν η παροχή είναι μονοφασική, τότε τοποθετείται από τη Δ.Ε.Η. μια μόνο ασφάλεια στον αγωγό φάσης.

Οι καταναλωτές μέσης τάσης έχουν δικό τους υποσταθμό, ο οποίος περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους μετασχηματιστές υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση (400V, 230V, 50Hz) και τα ανάλογα μέσα χειρισμού στη μέση τάση (πίνακες μέσης τάσης). Ο παραπάνω υποσταθμός ρευματοδοτείται από τη ΔΕΗ μέσω ειδικού συστήματος παροχής ανάλογα με το δίκτυό της (συγκροτήματα πινάκων ή παροχές επί στύλου). Στο σύστημα αυτό της ΔΕΗ υπάρχει και ο μετρητής ενέργειας.

## 1.2.3 Η συντήρηση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι εναέριες γραμμές χαμηλής και μέσης τάσης μελετώνται και κατασκευάζονται με αυστηρούς κανονισμούς τόσο στην Ελλάδα όσο και στις άλλες χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε να μην αναιρούνται η μηχανική, η ηλεκτρική και η διηλεκτρική αντοχή από ετήσια σε ετήσια επιθεώρηση. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Κανονισμού Εγκατάστασης και Συντήρησης Υπαιθρίων Γραμμών Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΚΕΣΥΓΗΕ, άρθρο 281), διενεργείται σε ετήσια βάση κλάδεμα των δέντρων που έρχονται σε επαφή ή γειτνιάζουν με εναέριες γραμμές χαμηλής τάσης και μέσης τάσης. Με το κλάδεμα αποφεύγονται επαφές των κλάδων των δέντρων με τις εναέριες εγκαταστάσεις, που θα είχαν ως αποτέλεσμα βλάβες στο δίκτυο και όχληση των καταναλωτών. Σύμφωνα με τον ΚΕΣΥΓΗΕ οι αποστάσεις ασφαλείας που πρέπει να

τηρούνται αφορούν αποστάσεις από τους ηλεκτροφόρους αγωγούς και όχι από τους στύλους πάνω στους οποίους είναι εγκατεστημένη η γραμμή μέσης τάσης. Η ετήσια επιθεώρηση που διενεργείται (κατά τις οδηγίες Νο 9 και Νο 22 της ΔΕΗ) είναι ένας οπτικός έλεγχος με κιάλια που αφορά την κατάσταση των αγωγών, των μονωτήρων (καθαλατώσεις, σκόνη, κτλ.) και των λοιπών στοιχείων του δικτύου (διακόπτες, συσφίξεις επαφών, κτλ.). Εκτός από τον οπτικό έλεγχο γίνονται μετρήσεις με τη θερμοκάμερα σε σημεία σύνδεσης των αγωγών και γενικά σε στατικές επαφές, από όπου διαπιστώνεται αν υπάρχει πρόβλημα μεγάλων αντιστάσεων διάβασης. Όταν η θερμοκρασία είναι αυξημένη, τότε ο λυόμενος ηλεκτρικός σύνδεσμος έχει μεγάλη αντίσταση και ενδέχεται να προκαλέσει σφάλματα λειτουργίας λόγω κακών επαφών ή λιώσιμο των επαφών.

#### **1.2.4 Γενικά μέτρα προστασίας δικτύων**

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενεργείας πρέπει να προστατεύεται από τις ανωμαλίες και κυρίως από κάθε είδος βραχυκύκλωμα από ειδικό σύστημα προστασίας το οποίο είναι το κυριότερο από τα βοηθητικά συστήματα με τα οποία είναι εφοδιασμένες οι εγκαταστάσεις του. Το σύστημα προστασίας διεγείρεται αυτόματα κατά την εμφάνιση ενός βραχυκυκλώματος και προκαλεί άνοιγμα των πλησιέστερων προς αυτών διακόπτων ισχύος οι όποιοι απομονώνουν το στοιχείο που υπέστη βλάβη (γραμμή, Μ/Σ, κλπ) εξουδετερώνοντας το βραχυκύκλωμα με διακοπή της τροφοδότησης του. Λόγω του ότι τα εναέρια δίκτυα μέσης τάσης είναι εκτεθειμένα, η συχνότητα εμφάνισης σφαλμάτων είναι αυξημένη. Αξιοσημείωτο είναι ότι σε ποσοστό που υπερβαίνει το 80% του συνόλου, τα σφάλματα είναι παροδικά. Τα κυριότερα μέσα προστασίας είναι:

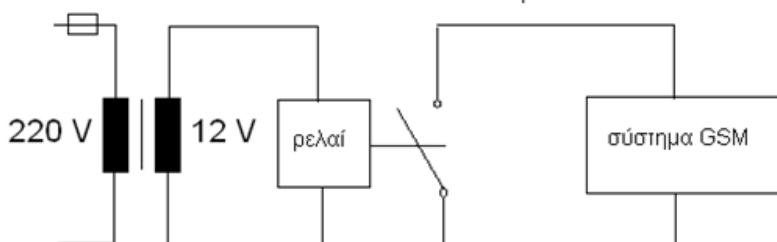
α) Οι διακόπτες ισχύος ( $\Delta/I$ ), οι οποίοι δέχονται εντολές από τους ηλεκτρονόμους προστασίας και

β) Οι ασφάλειες (ΑΣΦ)

Η όλη κατασκευαστική διαμόρφωση των μέσων ζεύξεων και προστασίας διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το αν προορίζονται για εγκατάσταση σε εξωτερικό ή εσωτερικό χώρο και φυσικά ανάλογα με την τάση του δικτύου στο οποίο θα εγκατασταθούν. Λόγω της εξάρτησης

της αντίστασης διάβασης από το είδος του εδάφους καθίσταται αναγκαία η χαρτογράφηση του στις περιοχές των γραμμών χαμηλής τάσης και η λήψη μέτρων όπου υπάρχει κίνδυνος. Ειδικά σε περιοχές κοντά σε υποσταθμούς όπου υπάρχει αυξημένος κίνδυνος, απαιτείται συχνός καθαρισμός της περιοχής.

Μια μέθοδος προστασίας που έχει προταθεί είναι η χρησιμοποίηση συστημάτων GSM. Μεταξύ φάσης και ουδετέρου τοποθετούνται μετασχηματιστές υποβιβασμού τάσης στο πιο μακρινό σημείο του αγωγού έτσι ώστε να ανιχνεύουν τα σφάλματα σε οποιοδήποτε σημείο του αγωγού. Το δευτερεύον του μετασχηματιστή τροφοδοτεί ρελέ, το οποίο σε περίπτωση διακοπής της τάσης κλείνει μια επαφή ενεργοποιώντας το σύστημα GSM. Αυτό με τη σειρά του ειδοποιεί μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας δεύτερο σύστημα GSM το οποίο ενεργοποιεί ένα αυτόματο διακόπτη για την άμεση διακοπή της ροής του ρεύματος. Τα συστήματα GSM βρίσκουν ήδη εφαρμογές όπως για παράδειγμα στα “έξυπνα” σπίτια και είναι διαθέσιμα σε σχετικά χαμηλές τιμές στην αγορά.



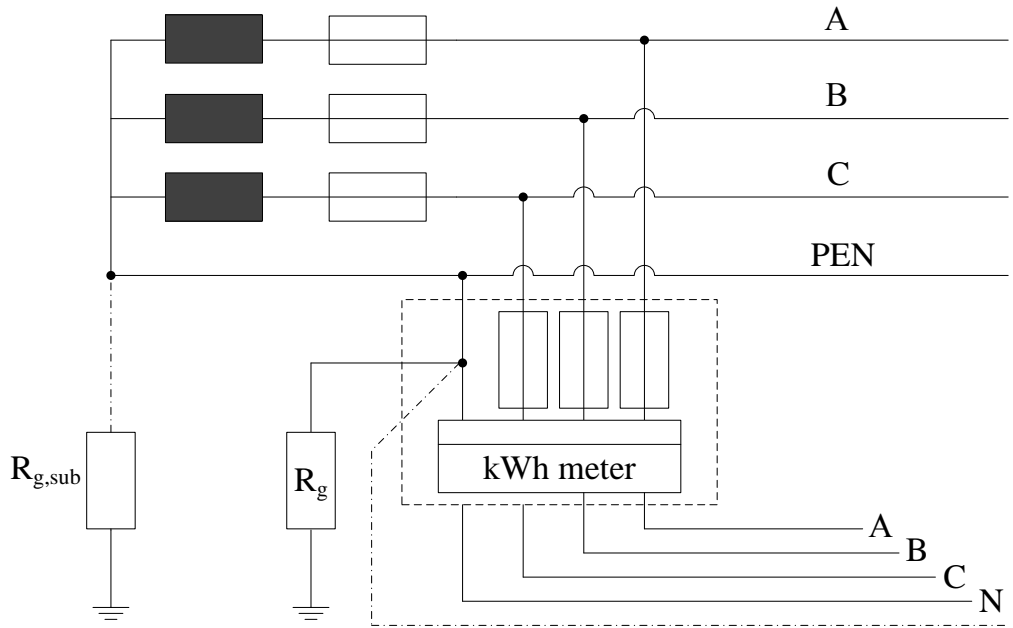
**Σχήμα 1.2.4-1** : Μέθοδος προστασίας με χρησιμοποίηση συστήματος GSM

Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα με βασικότερο τη χρονική καθυστέρηση του GSM. Από τη στιγμή της εκδήλωσης του σφάλματος μέχρι την άφιξη του σήματος στον αυτόματο διακόπτη μεσολαβούν μερικά κρίσιμα δευτερόλεπτα τα οποία σε μερικές περιπτώσεις είναι αρκετά για την πρόκληση πυρκαγιάς ή ηλεκτροπληξίας. Μειονέκτημα επίσης μπορεί να αποτελέσει το γεγονός ότι ο αριθμός τον οποίο το σύστημα χρησιμοποιεί για επικοινωνία μπορεί να υποκλαπεί από τον οποιοδήποτε και να χρησιμοποιηθεί κακόβουλα.

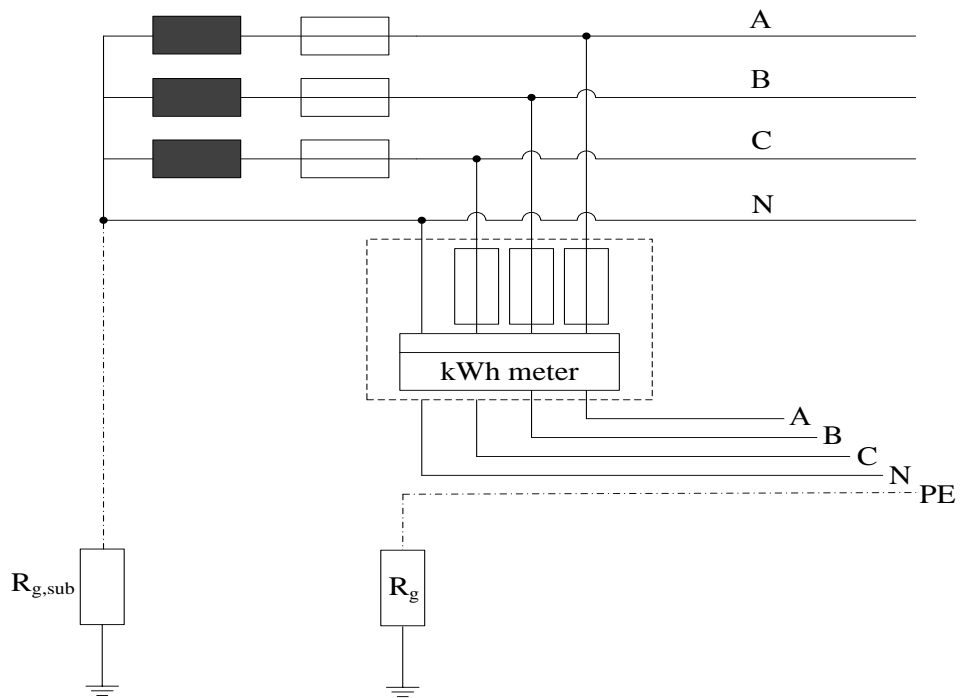
### 1.2.5 Συστήματα Γειώσεως σε Γραμμές Διανομής Χαμηλής Τάσης

Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης του συστήματος διανομής ηλεκτροδοτούνται από υποσταθμούς μέσης προς χαμηλή τάσης. Το διεθνές πρότυπο IEC 60364-1 διαχωρίζει τα διάφορα συστήματα γειώσεως στον μετασχηματιστή του υποσταθμού και στους καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι στην γραμμή. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα συστήματα γειώσεως σε γραμμές διανομής προς οικιακούς καταναλωτές είναι τα TN-C-S Protective Multiple Earthing (PME) (πολυγειωμένου ουδετέρου) και TT (άμεσης γείωσης).

Το δίκτυο XT τροφοδοτείται συνήθως από μετασχηματιστές Dyn, με αγείωτη τη μέση τάση και γειωμένο ουδέτερο στη XT. Στο σύστημα TN-C-S PME (Σχήμα 1.2.5-1) ο αγωγός του ουδετέρου είναι γειωμένος στον μετασχηματιστή MT/XT και δρα ως αγωγός ουδετέρου και (protective earth) αγωγός προστασίας (combined protective earth-neutral PEN). Στην συνέχεια, στο ρολόι του καταναλωτή ο αγωγός PEN διαχωρίζεται σε αγωγό προστασίας PE και αγωγό ουδετέρου N. Για την προστασία από αποκοπή του αγωγού και κατ' επέκταση απώλεια της γης προστασίας, συνδέεται με την γη μέσω ηλεκτροδίου στα σημεία διαχωρισμού του (PME). Στο σύστημα TT (Σχήμα 1.2.5-2) ο αγωγός του ουδετέρου, ομοίως, είναι γειωμένος στον μετασχηματιστή MT/XT. Ωστόσο, δρα αποκλειστικά ως αγωγός ουδετέρου. Η σύνδεση με την γη προστασίας (protective earth connection) επιτυγχάνεται μέσω ξεχωριστών ηλεκτροδίων (ground electrodes) σε κάθε εγκατάσταση.



Σχήμα 1.2.5-1 : Σύστημα γείωσης γραμμής διανομής χαμηλής τάσης TN-C-S PME



Σχήμα 1.2.5-2: Σύστημα γείωσης γραμμής διανομής χαμηλής τάσης TT

### 1.3 Αποκοπή αγωγών

Η προστασία των γραμμών ΧΤ και ΜΤ έναντι βραχυκυκλώματος επιτυγχάνεται ακαριαία μέσω των μέσων προστασίας (ασφάλειες ή αυτόματοι διακόπτες). Ωστόσο, ο εντοπισμός σφαλμάτων υψηλής αντίστασης και ανοικτών αγωγών σε δίκτυα διανομής δεν είναι εγγυημένος.

Σε κατάσταση ανοικτού ουδετέρου, τα φορτία των φάσεων μπορούν να υποβληθούν σε υπερτάσεις ή υποτάσεις. Οι υπερτάσεις μπορούν να προκαλέσουν καταστροφή σε φορτία όπως λαμπτήρες, ενώ οι υποτάσεις μπορούν να υπερθερμάνουν φορτία σταθερής ισχύος όπως κινητήρες. Ακόμα, η τάση του ουδετέρου προς γη (και επομένως των μεταλλικών σε δίκτυα TN-C-S PME) μπορεί να πάρει επικίνδυνες τιμές. Συνεπώς υπάρχει πολύ σοβαρός κίνδυνος για πρόκληση ηλεκτροπληξίας στον άνθρωπο από άμεση ή έμμεση επαφή. Στην περίπτωση πτώσης του αγωγού φάσης σε έδαφος με μεγάλες περιοχές αντιστάσεων διαβάσεως και μικρά μήκη σφαλμάτων μπορούν να αναπτυχθούν θερμοκρασίες ικανές για την ανάφλεξη πολλών υλικών και εκδήλωση πυρκαγιάς (χαρακτηριστικά παραδείγματα στον πιο κάτω πίνακα).

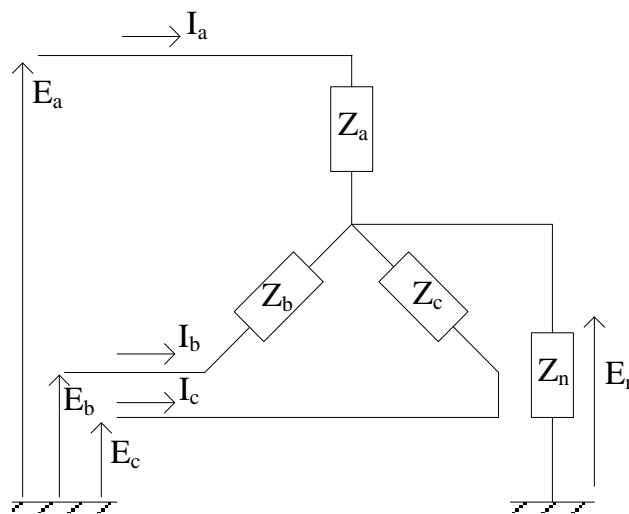
Υλικό	Θερμοκρασία ανάφλεξης (°C)
<i>Εφημερίδα</i>	185
<i>Μαλλί</i>	200
<i>PVC</i>	391
<i>Χαρτί</i>	230
<i>Πευκόξυλο</i>	228 έως 264
<i>Άχυρα</i>	175
<i>Βαμβάκι</i>	230 έως 266

**Πίνακας 1.3-1:** Θερμοκρασίες ανάφλεξης υλικών

Για αντιστάσεις διαβάσεως μεγαλύτερες των 2 Ohm δεν έχουμε τήξη της ασφάλειας και για αυτό υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας για τον άνθρωπο αν ακουμπήσει τον αγωγό.

### 1.3.1 Θεωρητική Ανάλυση Σε Περίπτωση Ανοικτού Ουδετέρου

Στο σχήμα 1.3.1-1 φαίνεται η αναπαράσταση του συνολικού φορτίου μιας γραμμής ΧΤ. Η φόρτιση των τριών φάσεων αναπαρίσταται μέσω μιας σύνθετης αντιστάσεως  $Z_a$ ,  $Z_b$ , και  $Z_c$  αντίστοιχα. Η σύνθετη αντίσταση  $Z_n$  αντιπροσωπεύει την αντίσταση του δρόμου επιστροφής του ρεύματος  $I_n$  προς τον μετασχηματιστή ανεξαρτήτως συστήματος γειώσεως.



Σχήμα 1.3.1-1: Τριφασικό φορτίο γραμμής ΧΤ

Όταν το φορτίο είναι συμμετρικό (δηλαδή  $Z_a = Z_b = Z_c$ ) το ρεύμα επιστροφής  $I_n$  είναι μηδέν και κατ' επέκταση η τάση  $E_n$  είναι ομοίως μηδέν. Ωστόσο όταν η φόρτιση είναι ασύμμετρη, το ρεύμα επιστροφής  $I_n$  είναι διάφορο του μηδενός. Συγκεκριμένα, καθώς:

$$E_n = I_n Z_n = (I_a + I_b + I_c) Z_n$$
$$I_i = (E_i - E_n) / Z_i$$

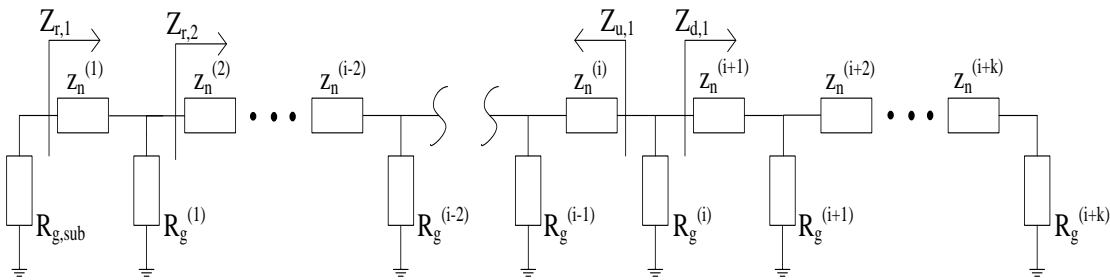
όπου  $i = a, b, c$ . Μετά από πράξεις προκύπτει:

$$E_n = \frac{E_a Z_b Z_c + E_b Z_a Z_c + E_c Z_a Z_b}{\frac{Z_a Z_b Z_c}{Z_n} + Z_a Z_b + Z_b Z_c + Z_a Z_c} = \frac{E_a + E_b \frac{Z_a}{Z_b} + E_c \frac{Z_a}{Z_c}}{\frac{Z_a}{Z_n} + 1 + \frac{Z_a}{Z_b} + \frac{Z_a}{Z_c}}$$

**Υπολογισμός της αντίστασης του δρόμου επιστροφής σε περίπτωση ανοικτού ουδέτερου**

**α) Σύστημα ουδετερογείωσης (TN-C-S PME)**

Από τη βιβλιογραφία, παρουσιάζεται πιο κάτω μια μέθοδος αναλυτικού υπολογισμού της αντίστασης γείωσης σε δίκτυα TN-C-S PME.



**Σχήμα 1.3.1-2:** Πολλαπλά γειωμένος ουδέτερος γραμμής διανομής XT

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3.1-2, ο ουδέτερος είναι ανοικτός ανάμεσα στον καταναλωτή  $i-2$  και  $i-1$ . Το ρεύμα επιστροφής  $I_n$  εγγέεται από τον καταναλωτή  $i$ . Η αντίσταση του δρόμου επιστροφής  $Z_n$  μπορεί να δοθεί ως:

$$Z_n = Z_1 + Z_2$$

όπου  $Z_1$  και  $Z_2$  οι αντιστάσεις του δρόμου επιστροφής προς τα κατάντη και προς τα ανάντη του σημείου αποκοπής του ουδέτερου αντίστοιχα. Οι δυο αυτές αντιστάσεις μπορούν να δοθούν ως:

$$Z_1 = R_g^{(i+k)} // Z_{u,1} // Z_{d,1}$$



$$Z_2 = R_{g,sub} // Z_{r,1}$$

όπου  $Z_{u,1}$  η αντίσταση του δικτύου γειώσεως προς τα κατάντη του σημείου εγχύσεως του ρεύματος επιστροφής, και  $Z_{r,1}$  η αντίσταση του δικτύου γειώσεως παράλληλα της γειώσεως του υποσταθμού,  $R_{g,sub}$  ως το σημείο αποκοπής του ουδετέρου. Η  $Z_{r,1}$  δίνεται ως:

$$Z_{r,1} = z_n^{(1)} + R_g^{(1)} // Z_{r,2}$$

$$Z_{r,i-3} = R_g^{(i-3)} // (Z_n^{(i-2)} + R_g^{(i-2)})$$

όπου  $Z_{r,i-3}$  ο τελευταίος κλάδος του δικτύου που σχηματίζεται από το δίκτυο γειώσεως. Η αντίσταση  $Z_{u,1}$  υπολογίζεται ομοίως προς την  $Z_{r,1}$ .

### β) Σύστημα άμεσης γείωσης (TT)

Το άνοιγμα του ουδετέρου σε γραμμή διανομής XT με σύστημα άμεσης γειώσεως (TT) σημαίνει πως για τους καταναλωτές κατάντη του σημείου αποκοπής δεν υπάρχει δρόμος επιστροφής και επομένως η  $Z_n = \infty$ . Ωστόσο, σε όλα τα δίκτυα υπάρχει κατανεμημένη ωμική και χωρητική αντίσταση διαρροής προς γη, η οποία όμως μπορεί να αμεληθεί εξ' αιτίας της πολύ μεγάλης τιμής της.

## 1.4 Power Line Communication (PLC)

Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα εχθρικό περιβάλλον για τη μετάδοση δεδομένων μεγάλης ταχύτητας, αλλά έπειτα από χρόνια ανάπτυξης, υπάρχει πλέον μια τεχνολογία, η οποία βρίσκεται προς το παρόν σε πειραματικό στάδιο και είναι ικανή να μεταφέρει δεδομένα υψηλών ταχυτήτων χρησιμοποιώντας το υπάρχον ηλεκτρικό πλέγμα. Η τεχνολογία αυτή, που αναφέρεται ως PLC (Power Line Communication), χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης για να προσφέρει στους οικιακούς χρήστες και στις επιχειρήσεις ευρυζωνική πρόσβαση στο διαδίκτυο. Πρόσφατες μελέτες, εντούτοις, δείχνουν ότι το ενδιαφέρον για την PLC τεχνολογία μετατοπίζεται από την παροχή ευρυζωνικής σύνδεσης στη χρήση «έξυπνων» μετρητών που θα επιτρέψουν στα νοικοκυριά να μειώσουν το ενεργειακό κόστος και στις εταιρείες ενέργειας να διαχειριστούν πιο αποτελεσματικά το ηλεκτρικό δίκτυο που εκμεταλλεύονται με την ανάπτυξη του «έξυπνου δικτύου».

Η PLC τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλά ζητήματα κοινής ωφέλειας όπως για παράδειγμα για μετρήσεις κατανάλωσης, κοστολόγηση, διαχείριση του φορτίου, και ανίχνευση σφαλμάτων που οδηγούν στη διακοπή της λειτουργίας. Επιπλέον, παρέχει σημαντική βοήθεια σε περιβαλλοντικά προβλήματα μέσω της διατήρησης και της διαχείρισης της ενέργειας και σε ζητήματα εθνικής ασφάλειας μέσω των πολυάριθμων δικτύων και εφαρμογών βίντεο παρακολούθησης τα οποία χρησιμοποιούνται για την ασφάλεια του κοινού και την προστασία της υποδομής του δικτύου.

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους το PLC παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Όσον αφορά τις εταιρίες ηλεκτρισμού η βασική υποδομή για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής προϋπάρχει, δηλαδή δεν υπάρχουν απαιτήσεις για τον εκ νέου σχεδιασμό του δικτύου ή την κατασκευή επιπρόσθετων αγωγών, ούτε υπάρχει ανάγκη για επιπρόσθετη καλωδίωση των επιχειρήσεων και των νοικοκυριών. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι το ηλεκτρικό δίκτυο είναι πανταχού παρόν στις περισσότερες χώρες προσφέροντας ένα ήδη υπάρχον δίκτυο που καλύπτει τόσο τους ατομικούς χρήστες όσο και τις επιχειρήσεις.

Παρόλα τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία αυτή αντιμετωπίζει και προβλήματα. Η τεχνολογία αυτή δημιουργεί παρεμβολή στη συχνότητα των ερασιτεχνικών εκπομπών και των συχνοτήτων ανάγκης.

### **1.4.1 Ιστορική αναδρομή**

Η τεχνολογία Power Line Communication ή Carrier (PLC), επίσης γνωστή και ως Power Line Telecommunication (PLT) ή Broadband over Power Lines (BPL) ή Broadband over Power Lines Communications (BPLC) είναι μια τεχνολογία η οποία επιτρέπει τη μεταφορά φωνής, δεδομένων, και internet μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία PLC μεταφέρει δεδομένα υψηλών συχνοτήτων μέσω των ίδιων των ηλεκτρικών γραμμών που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος στις οικίες και στις επιχειρήσεις. Η αξιοποίηση της τεχνολογίας αυτής πραγματοποιείται με την εγκατάσταση ενός μόντεμ σε μία συνηθισμένη ηλεκτρική πρίζα και της πληρωμής ενός μηνιαίου αντίτιμου όπως και για κάθε άλλη τεχνολογία.

Το PLC αναπτύχθηκε το 1928 από τα εργαστήρια AT&t Bell Telephone και αρχικά χρησιμοποιήθηκε για εσωτερική και χαμηλής ταχύτητας μετάδοση δεδομένων αφού μέχρι τότε δεν υπήρχαν εγκαταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ευρώπη, το ηλεκτρικό δίκτυο επιτρέπει τη μετάδοση των δεδομένων σε τάση από 220-240V και σε συχνότητες από 30kHz-150kHz. Στην Αμερική η τάση είναι 120V και οι συχνότητες πάνω από 150kHz. Οι εταιρίες ηλεκτρισμού χρησιμοποιούν συχνότητες κάτω από 490kHz για εσωτερικές εφαρμογές όπως η τηλεμετρία, η παρακολούθηση και ο έλεγχος απομακρυσμένων υποσταθμών. Από τη δεκαετία του 1990, υπάρχει σταδιακή ανάπτυξη της PLC τεχνολογίας.

Ιστορικά, η τεχνολογία αυτή δεν ήταν μόνο ένας μηχανισμός ελέγχου των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, αλλά αρχικά είχε σχεδιασθεί για την αποστολή απλών εντολών μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας σε πολύ χαμηλές συχνότητες από 100Hz έως 180Hz. Ένας τέτοιος μηχανισμός καθιστά εφικτά την απομακρυσμένη διάγνωση σφάλματος και τον έλεγχο ακόμα και για μεγάλες αποστάσεις.

Η πρώτη τεχνική η οποία χρησιμοποιήθηκε για να καταστήσει εφικτή τη μετάδοση και τον έλεγχο μηνυμάτων μέσω των γραμμών είναι η τεχνική Ripple Control. Η τεχνική αυτή αναφέρεται στα συστήματα τα οποία εφαρμόζονται στα ηλεκτρικά δίκτυα για σκοπούς διαχείρισης. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν έναν τρόπο επικοινωνίας από ένα κεντρικό σημείο σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου χαμηλής τάσης. Η τεχνική Ripple Control αναφέρεται κυρίως στις μαζικές εφαρμογές. Το σύστημα αυτό δεν προσφέρει μόνο υπηρεσίες επικοινωνιών, οι οποίες είναι προς μία κατεύθυνση, αλλά μπορεί επιπλέον να υποστηρίξει εφαρμογές όπως διαχείριση του δημοτικού φωτισμού και έλεγχο φορτίου.

### **1.4.2 Λειτουργία PLC**

Με σκοπό την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών, τα αρχικά PLC συστήματα συζεύγνυαν σήματα ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency-RF) στις υπάρχουσες ηλεκτρικές γραμμές. Τα σήματα υψηλών συχνοτήτων μεταδίδονται μέσω των ίδιων ηλεκτρικών γραμμών που μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής συχνότητας στις οικίες ή στις επιχειρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο η μεταφορά των δεδομένων και ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται από την ίδια καλωδίωση.

Όσον αφορά την τεχνολογία, η βασική ιδέα της τεχνολογίας PLC είναι η διαμόρφωση των ραδιοσημάτων με δεδομένα και η μετάδοση αυτών μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση μια μπάντας συχνοτήτων η οποία δεν χρησιμοποιείται για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συχνότητες οι οποίες χρησιμοποιούνται και το σύστημα κωδικοποίησης επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση και την ταχύτητα της PLC τεχνολογίας.

Το σύστημα κωδικοποίησης το οποίο χρησιμοποιείται από τους περισσότερους προμηθευτές της τεχνολογίας αυτής είναι η πολυπλεξία με ορθογώνια διαίρεση συχνότητας (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Η OFDM είναι μία τεχνική η οποία χρησιμοποιείται για τη μετάδοση ψηφιακών δεδομένων μέσω ενός ραδιοκύματος. Η OFDM χωρίζει τα ραδιοσήματα σε πολυάριθμα μικρότερα «υπό-σήματα» τα οποία στη συνέχεια μεταδίδονται με διαφορετικές συχνότητες στο δέκτη. Η μετάδοση των δεδομένων με τη χρήση

της τεχνικής OFDM μέσω πολλών φορέων συχνοτήτων αυξάνει ταυτόχρονα και την ταχύτητα και την αξιοπιστία. Απώλεια δεδομένων πραγματοποιείται όταν η ηλεκτρική διανομή διακόπτεται από την λειτουργία ή την απενεργοποίηση ηλεκτρικών συσκευών. Η μέθοδος OFDM επιλύει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα διασποράς καθυστέρησης πολλαπλών διαδρομών, διότι ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης που επικρατεί σε κάθε δευτερεύον κανάλι στενής ζώνης συνεπάγεται μήκος συμβόλου σημαντικά μεγαλύτερο από την μέγιστη καθυστέρηση (λόγω πολλαπλών διαδρομών στην πλειοψηφία των περιπτώσεων). Η επιλεκτική χρησιμοποίηση των υποφερόντων υπο-σημάτων επιτρέπει την αποφυγή περιοχών συχνοτήτων, όπου η συμπεριφορά του διαύλου είναι ιδιαίτερα εχθρική ή αστάθμητη, καθώς και τη δυναμική συμμόρφωση με πιθανούς περιορισμούς ως προς τη χρήση του φάσματος.

Από πλευράς μηχανικού σχεδιασμού, το PLC παρέχει αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων στην οικία ή την επιχείρηση μέσω του ηλεκτρικού δικτύου (το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής), ενώ το δίκτυο κορμού (backbone network) μεταφέρει τα δεδομένα από τον παροχέα του internet (ISP- Internet Service Provider) στο δίκτυο διανομής.

Τέλος πρέπει να τονιστεί ότι τα δίκτυα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος δεν έχουν σχεδιαστεί για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς και δεν αποτελούν ιδανικό μέσο μετάδοσης. Κατά συνέπεια, το κανάλι μετάδοσης PLC χαρακτηρίζεται από μια μεγάλη και εξαρτώμενη από τη συχνότητα εξασθένηση, μια μεταβαλλόμενη σύνθετη αντίσταση, μεταβαλλόμενες διαλείψεις και ανεπιθύμητες καταστάσεις θορύβου. Διάφορες πηγές θορύβου, που οφείλονται στο ηλεκτρικό δίκτυο, εξαιτίας των διαφορετικών ηλεκτρικών συσκευών που συνδέονται σε αυτό, και στο περιβάλλον του δικτύου, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά ένα PLC σύστημα, προκαλώντας διαταραχές σε μια χωρίς λάθη μετάδοση δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, για την παροχή υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, τα δίκτυα PLC πρέπει να λειτουργήσουν σε ένα φάσμα συχνότητας μέχρι 30 MHz, το οποίο χρησιμοποιείται επίσης από τις διάφορες ράδιο υπηρεσίες (radio services). Δυστυχώς, ένα δίκτυο PLC ενεργεί ως κεραία παράγοντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ίδιο του το περιβάλλον και προκαλεί παρεμβολές σε άλλες υπηρεσίες οι οποίες λειτουργούν στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων. Επομένως, οι ρυθμιστικοί οργανισμοί θέτουν πολύ αυστηρά όρια σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική εκπομπή από τα δίκτυα PLC, που έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία τους με περιορισμένη ισχύ σήματος. Αυτό προκαλεί μείωση της

έκτασης των δικτύων και των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, ενώ αυξάνεται η ευαισθησία στις διαταραχές.

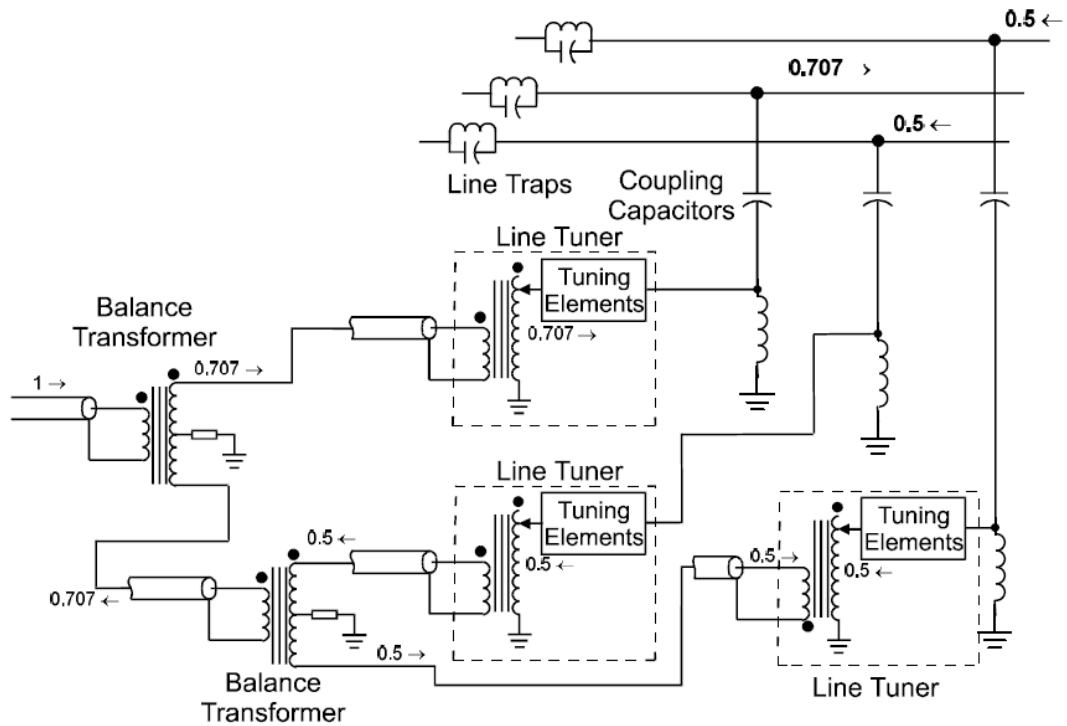
### **1.4.3 Μέθοδοι Σύζευξης PLC**

Οι μέθοδοι σύζευξης χρησιμοποιούνται για την αποστολή και τη λήψη δεδομένων πάνω σε γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες βρίσκονται σε υψηλά επίπεδα τάσης και αποτελούν κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή. Για την προστασία του χρήστη συνηθίζεται η γαλβανική απομόνωση με τη χρήσης μετασχηματιστών για τη σύζευξη του σήματος πάνω στις γραμμές. Οι μετασχηματιστές αυτοί πρέπει να είναι σε θέση να συζεύξουν ένα μεγάλο σήμα έντασης μέσα στη ζώνη διέλευσής επικοινωνίας.

#### **1.4.3.1 Χωρητική μέθοδος σύζευξης**

##### Πρώτη μέθοδος σύζευξης

Η πρώτη μέθοδος αποτελεί την πιο αποτελεσματική και με τις χαμηλότερες απώλειες από όλες τις μεθόδους σύζευξης PLC. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση παγίδων κύματος (wave traps), χωρητικοτήτων σύζευξης και συντονιστών γραμμής (line tuners) και στις τρεις φάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.3.1-1.

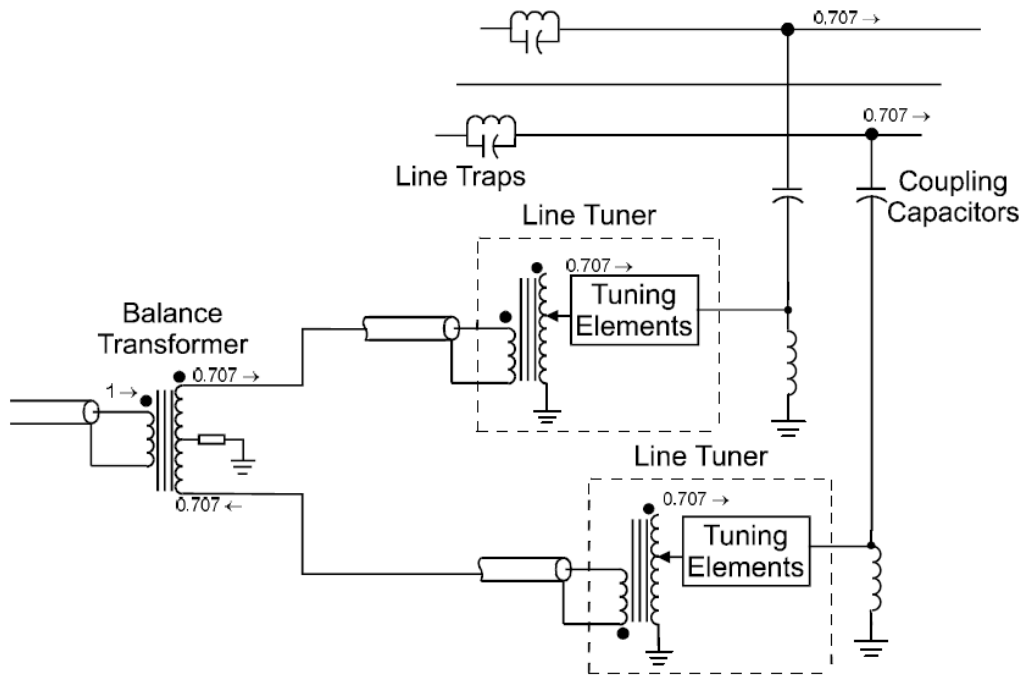


**Σχήμα 1.4.3.1-1** : Πρώτη μέθοδος χωρητικής σύζευξης

Είναι πιο ακριβή από όλες τις μεθόδους σύζευξης αλλά προσφέρει τις χαμηλότερες απώλειες σύζευξης και το καλύτερο δυνατό σήμα από τις υπόλοιπες μεθόδους. Υπάρχουν δυο εφεδρικά επίπεδα σε περίπτωση αστοχίας υλικού. Με την απώλεια μιας φάσης το σύστημα θα μετατραπεί σε φάση-φάση μέθοδο σύζευξης ενώ σε περίπτωση απώλειας δυο φάσεων στη μέθοδο φάση-γη.

#### Μέθοδος σύζευξης Φάσης-Φάσης

Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση παγίδων κύματος (wave traps), χωρητικοτήτων σύζευξης και συντονιστών γραμμής (line tuners) στις δυο φάσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.3.1-2.



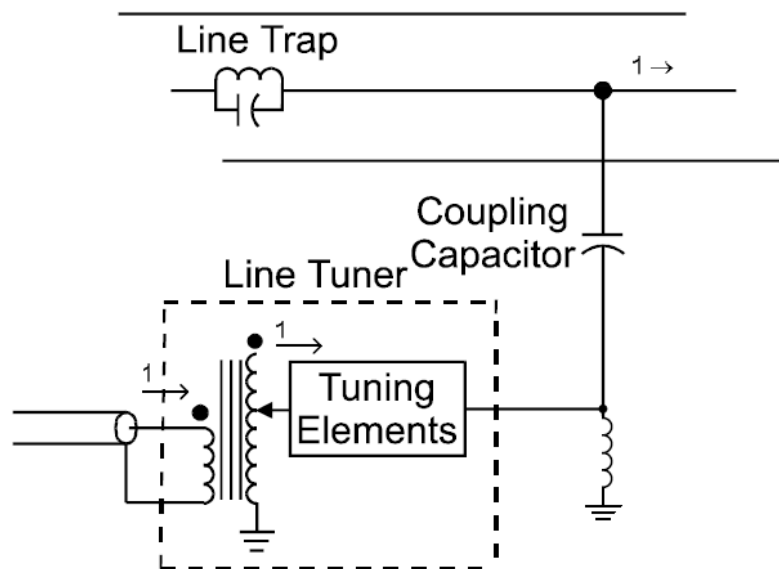
**Σχήμα 1.4.3.1-2** : Δεύτερη μέθοδος χωρητικής σύζευξης

Η μέθοδος προσφέρει ένα αξιόπιστο και ασφαλές κανάλι για μεταφορά του σήματος μέχρι το άκρο της γραμμής. Αφού τα περισσότερα σφάλματα είναι φάσης-γης, οι πιθανότητες για το σήμα να φτάσει, παρόλο το σφάλμα, είναι πολύ μεγάλες. Η σύζευξη φάσης-φάσης επίσης προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία σε περίπτωσης αστοχίας υλικού αφού έχουμε μείωση του σήματος και όχι απώλειά του. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο έχουμε ένα καλό συνδυασμό αξιοπιστίας και πολυπλοκότητας. Επίσης υπάρχει απώλεια περίπου 2dB σε σχέση με τη πρώτη μέθοδο αλλά είναι οικονομικότερη επειδή χρησιμοποιείται 1/3 λιγότερος εξοπλισμός.

### Μέθοδος σύζευξης Φάσης-Γης

Η μέθοδος αυτή είναι η απλούστερη και η οικονομικότερη μέθοδος σύζευξης και απαιτεί το λιγότερο εξοπλισμό. Απαιτεί τη χρήση μιας παγίδας κύματος (wave trap), μιας χωρητικότητας σύζευξης και ενός συντονιστή γραμμής (line tuner) όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.3.1-3.





**Σχήμα 1.4.3.1-3** : Τρίτη μέθοδος χωρητικής σύζευξης

Η σύζευξη κεντρικής φάσης-γης προσθέτει περίπου 3dB απώλειας σε σχέση με τη πρώτη μέθοδο. Η σύζευξη εξωτερικής φάσης-γης προσθέτει σημαντικά μεγαλύτερες απώλειες. Αυτή είναι η λιγότερο αξιόπιστη μέθοδος σύζευξης και χρησιμοποιείται συνήθως σε συστήματα προστασίας. Αστοχία ενός συστατικού στοιχείου οδηγεί σε απώλεια του καναλιού και του σήματος.

### 1.4.3.2 Επαγωγική μέθοδος σύζευξης

Η επαγωγική μέθοδος σύζευξης στηρίζεται στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από το εναλλασσόμενο ρεύμα που περνά από το πρωτεύον ενός μετασχηματιστή έντασης και που έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ρεύματος και στο δευτερεύον.

Οι μετασχηματιστές έντασης χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για μέτρηση έντασης ρεύματος και την παρακολούθηση δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περιπτώσεις μεγάλων εντάσεων το

πρωτεύον αποτελείται μόνο από ένα αγωγό που φέρει το προς μέτρηση ρεύμα και το δευτερεύον έχει τη μορφή κυλινδρικού δακτυλίου (βλ. Σχήμα 1.4.3.2-1)



**Σχήμα 1.4.3.2-1** : Μετασχηματιστής έντασης

Στη περίπτωση που ο μετασχηματιστής έντασης χρησιμοποιείται για την έγχυση ρευμάτων σε αγωγό, ως πρωτεύον χρησιμοποιείται ο κυλινδρικός δακτύλιος και ως δευτερεύον ο ίδιος ο αγωγός.

**Κεφάλαιο**

# **2**

**Σκοπός της διπλωματικής εργασίας**

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας προστασίας έναντι αποκοπής ουδετέρου σε δίκτυο χαμηλής τάσης μέσω τηλεπικοινωνιών ηλεκτρικών αγωγών. Η προτεινόμενη μέθοδος που θα διερευνηθεί στηρίζεται στην έγχυση σήματος στον ουδέτερο αγωγό στον τελευταίο στύλο της γραμμής χαμηλής τάσης και ανίχνευση αυτού στον υποσταθμό μέσης προς χαμηλής τάσης.

Η μελέτη της αποκοπής του ουδετέρου χωρίζεται σε δυο περιπτώσεις: αποκοπή αγωγού ουδετέρου και πτώση του στο έδαφος (ροή ρεύματος μέσω γης) και αποκοπή αγωγού ουδετέρου στον αέρα.

Κατά την αποκοπή ουδετέρου στον αέρα μελετάται η αντίσταση στη συχνότητα των 50 Hz καθώς και η αντίσταση που παρουσιάζει ο ουδέτερος για αποκοπή σε διάφορα σημεία του. Κατά την αποκοπή αγωγού ουδετέρου και πτώση του στο έδαφος θεωρείται αντίσταση επαφής αγωγού-εδάφους μεταξύ 20–400 Ohm. Στην περίπτωση αυτή μελετάται η συνολική αντίσταση που παρουσιάζει ο ουδέτερος στη συχνότητα των 50 Hz καθώς και σε συχνότητες από 1000–15000 Hz. Επίσης μελετάται η αλλοίωση στο σήμα ελέγχου (για την αποκοπή ουδετέρου) που εγχέεται στον ουδέτερο για τις δυο ακραίες περιπτώσεις αντιστάσεων εδάφους.

Στόχος αυτού είναι η διαπίστωση ή όχι του κατά πόσο είναι εφικτή η δημιουργία τρόπου προστασίας με την προαναφερθείσα μέθοδο.

Κεφάλαιο

# 3

**Μεθοδολογία και αποτελέσματα  
υπολογισμών**

### 3.1.1 Υπολογισμός αντίστασης εισόδου σήματος σε πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο

Για τον υπολογισμό της αντίστασης μοντελοποιήθηκε ο πολλαπλά γειωμένος ουδέτερος στο MATLAB και μετρήθηκε η αντίσταση σε συχνότητες 50 Hz (κανονικής λειτουργίας δικτύου) και σε συχνότητες 1000-15000 Hz (συχνότητες σήματος ελέγχου).

Ως αγωγός ουδετέρου επιλέχθηκε γυμνός αγωγός αλουμινίου 50 mm<sup>2</sup> με χαρακτηριστικά:  $R_{\Gamma}/\text{km} = 381 \text{ m}\Omega/\text{km}$  και  $X_{\Gamma}/\text{km} = 294 \text{ m}\Omega/\text{km}$ . Ως αντιπροσωπευτικό μήκος ουδετέρου σε δίκτυο χαμηλής τάσης σε αστική περιοχή επιλέχθηκε το 1 km με γείωση του αγωγού ανά 100 m.

Για τις γραμμές δικτύου χαμηλής τάσης ισχύει:

$$R_{\Gamma} = (r_{\Gamma}/\text{km}) \cdot L \quad (3.1.1-1)$$

$$X_{\Gamma} = (x_{\Gamma}/\text{km}) \cdot L \quad (3.1.1-2)$$

όπου :  $R_{\Gamma}$  : η ωμική αντίσταση της γραμμής XT (σε mΩ)

$X_{\Gamma}$  : η επαγωγική αντίσταση της γραμμής XT (σε mΩ)

$L$  : το μήκος της γραμμής XT (σε km)

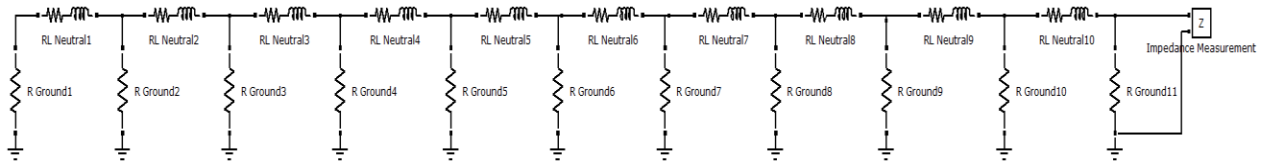
$r_{\Gamma}/\text{km}$  : η ωμική αντίσταση της γραμμής XT ανά km (σε mΩ/km)

$x_{\Gamma}/\text{km}$  : η επαγωγική αντίσταση της γραμμής XT ανά km (σε mΩ/km)

Η αντίστατη του ουδετέρου αγωγού υπολογίστηκε ανάμεσα σε δυο διαδοχικά σημεία γείωσης:  $Z_n = 0.0381 + i0.0294 \Omega$

$$R_{\Gamma}/100\text{m} = 0.0381 \Omega$$

$$X_{\Gamma}/100\text{m} = 0.0294 \Omega$$



**Σχήμα 3.1.1-1:** Μοντελοποιημένος πολλαπλά γειωμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

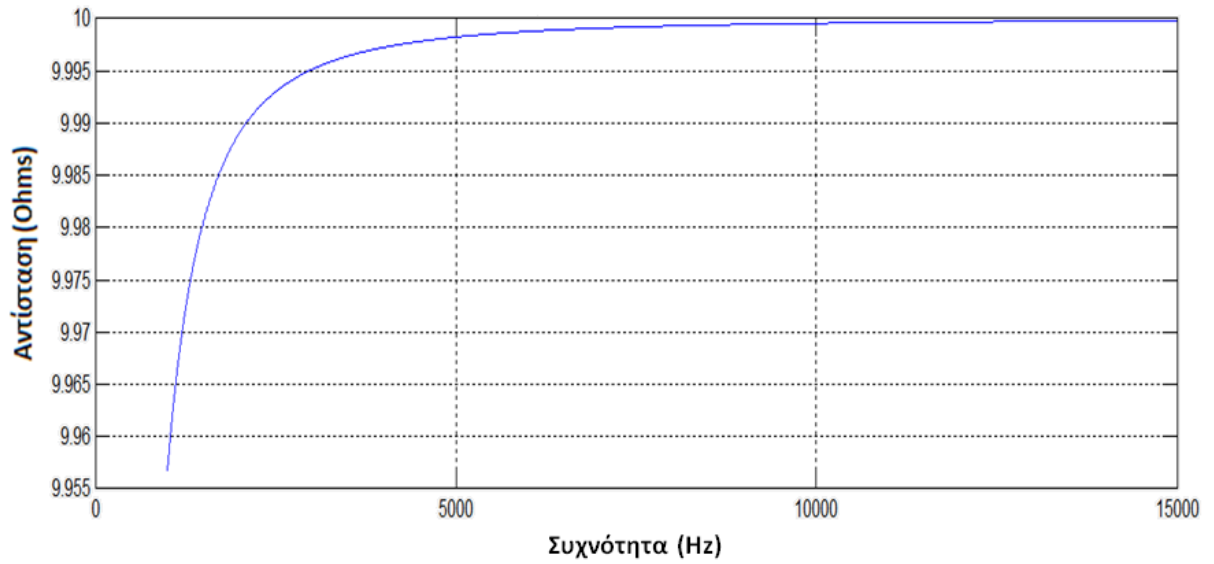
Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

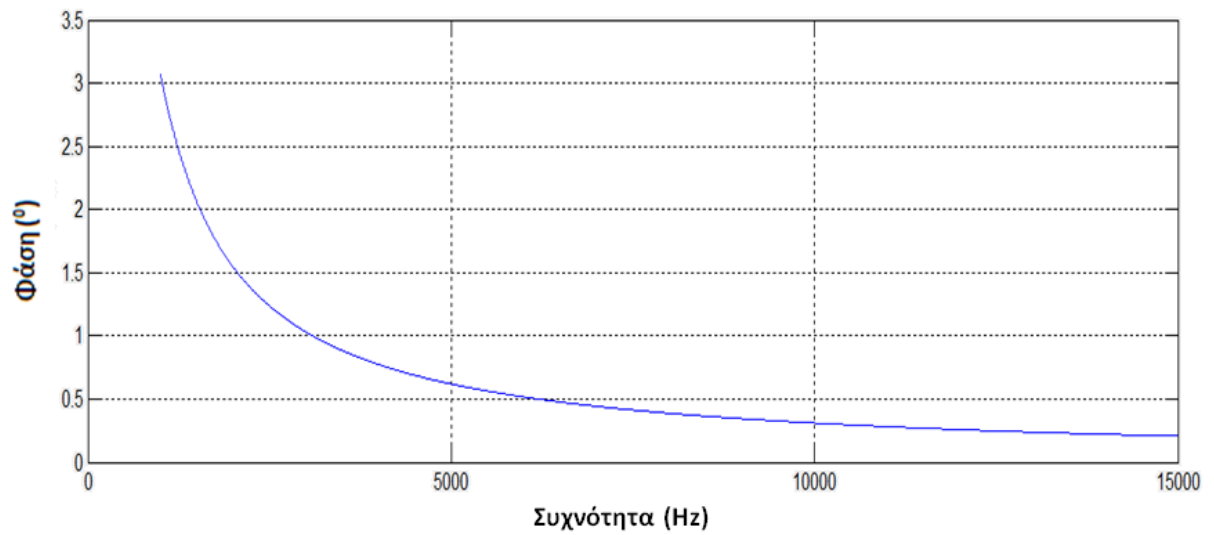
$Z_{ουδετέρου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Συχνότητα (Hz)	Αντίσταση Ουδετέρου (Ohm)	Φάση ( $^{\circ}$ )
50	6,759	26,27
1000	9,957	3,072
2000	9,989	1,547
3000	9,995	1,033
4000	9,997	0,775
5000	9,998	0,620
6000	9,999	0,517
7000	9,999	0,443
8000	9,999	0,388
9000	9,999	0,345
10000	10	0,310
11000	10	0,282
12000	10	0,259
13000	10	0,239
14000	10	0,222
15000	10	0,207

**Πίνακας 3.1.1-1 :** Συνολική αντίσταση (Ohm) και φάση ( $^{\circ}$ ) πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου ανάλογα με τη συχνότητα



**Σχήμα 3.1.1-2:** Γραφική παράσταση αντίστασης του ουδετέρου συναρτήσει της συχνότητας



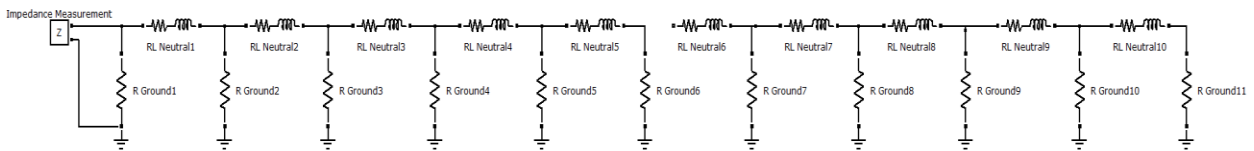
**Σχήμα 3.1.1-3:** Γραφική παράσταση φάσης της αντίστασης ουδετέρου συναρτήσει της συχνότητας



### 3.1.2 Υπολογισμός αντίστασης εισόδου σήματος σε κομμένο ουδέτερο

Για τον υπολογισμό της αντίστασης μοντελοποιήθηκε στο MATLAB πολλαπλά γειωμένος ουδέτερος κομμένος σε δυο διαφορετικές τυχαίες θέσεις και μετρήθηκε η αντίσταση του από την αρχή και το τέλος της γραμμής ως προς γη, σε συχνότητες 50 Hz (κανονικής λειτουργίας δικτύου) και σε συχνότητες 1000-15000 Hz (συχνότητες σήματος ελέγχου).

#### 1η Περίπτωση

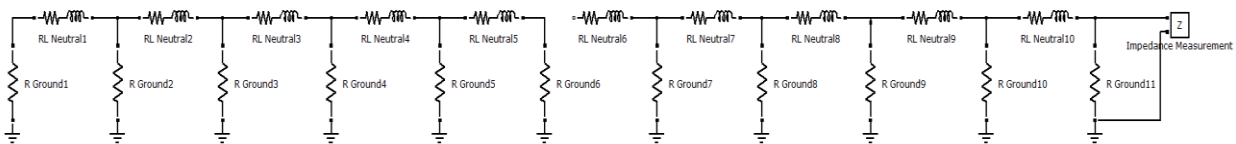


**Σχήμα 3.1.2-1:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

$Z_{ουδέτερου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m



**Σχήμα 3.1.2-2:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

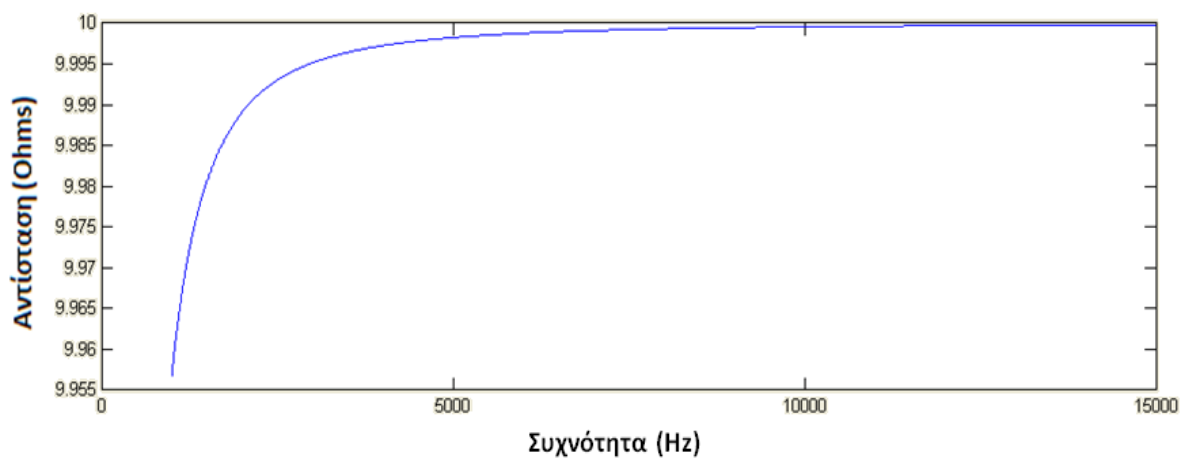
Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

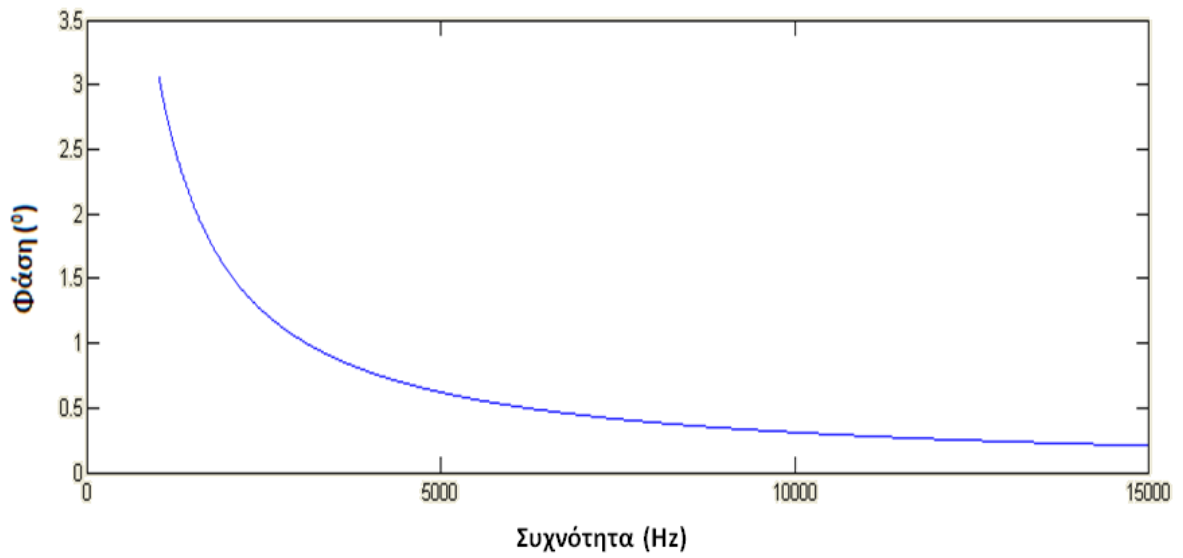
$Z_{ουδέτερου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Συχνότητα (Hz)	Αντίσταση από αρχή (Ohm)	Φάση ( <sup>ο</sup> )	Αντίσταση από τέλος (Ohm)	Φάση ( <sup>ο</sup> )
50	6,761	26,241	6,776	26,305
1000	9,957	3,072	9,957	3,072
2000	9,989	1,547	9,989	1,547
3000	9,995	1,033	9,995	1,033
4000	9,997	0,775	9,997	0,775
5000	9,998	0,620	9,998	0,620
6000	9,999	0,517	9,999	0,517
7000	9,999	0,443	9,999	0,443
8000	9,999	0,388	9,999	0,388
9000	9,999	0,345	9,999	0,345
10000	10	0,310	10	0,310
11000	10	0,282	10	0,282
12000	10	0,259	10	0,259
13000	10	0,239	10	0,239
14000	10	0,222	10	0,222
15000	10	0,206	10	0,206

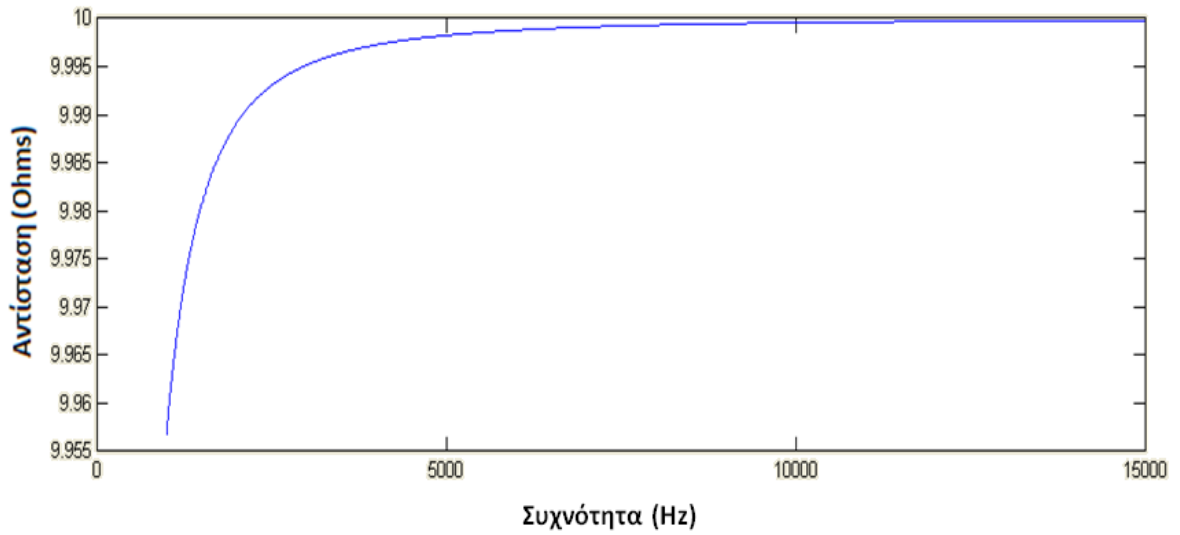
**Πίνακας 3.1.2-1 :** Συνολική αντίσταση (Ohm) και φάση (<sup>ο</sup>) από την αρχή και το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου ανάλογα με τη συχνότητα



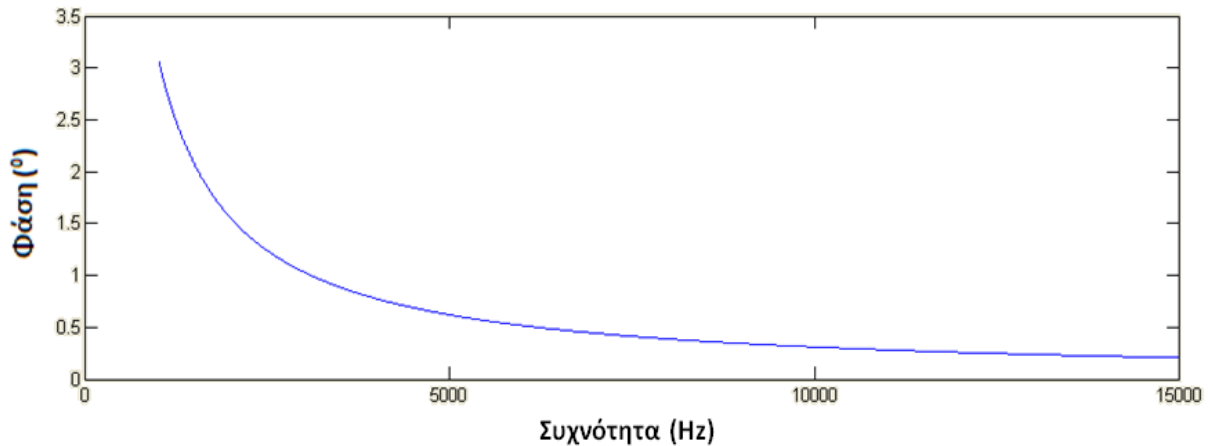
**Σχήμα 3.1.2-3:** Γραφική παράσταση αντίστασης από την αρχή της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συνάρτησει της συχνότητας



**Σχήμα 3.1.2-4:** Γραφική παράσταση φάσης της αντίστασης από την αρχή της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συναρτήσει της συχνότητας

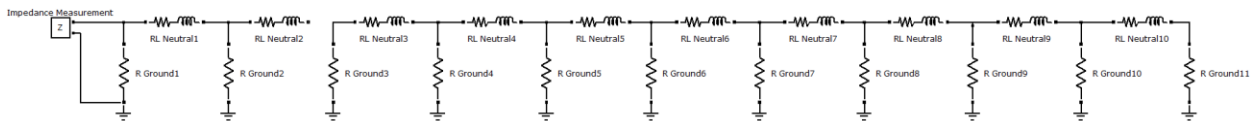


**Σχήμα 3.1.2-5:** Γραφική παράσταση αντίστασης από το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συνάρτησε της συχνότητας



**Σχήμα 3.1.2-6:** Γραφική παράσταση φάσης της αντίστασης από το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδέτερου συναρτήσει της συχνότητας

### 2η Περίπτωση

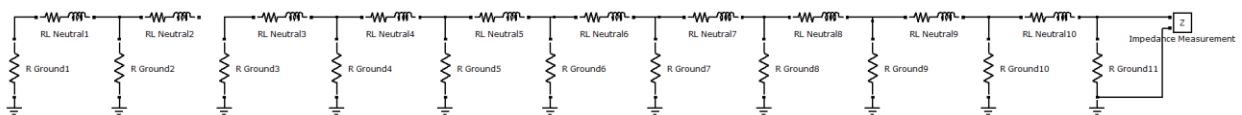


**Σχήμα 3.1.2-7:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

$Z_{ουδέτερου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m



**Σχήμα 3.1.2-8:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

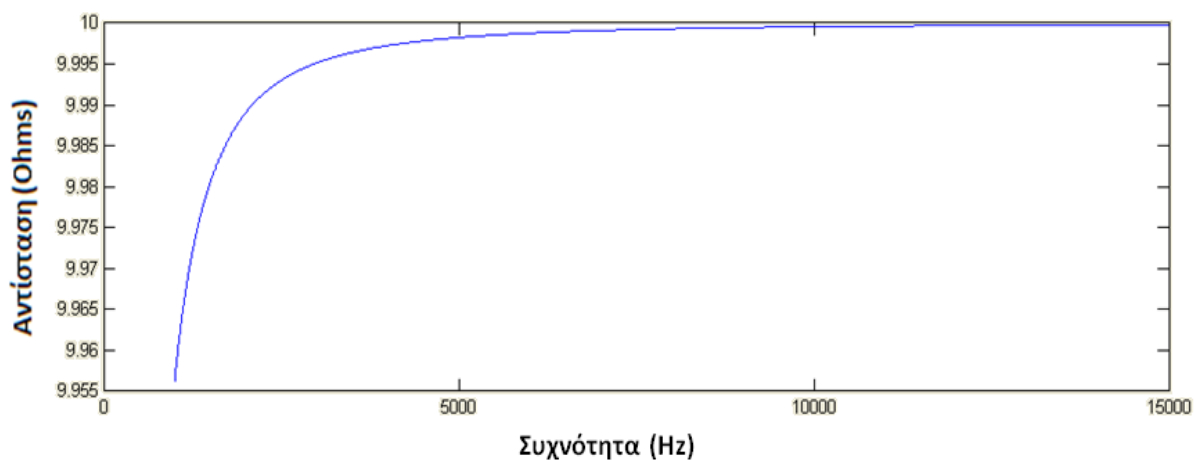
Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

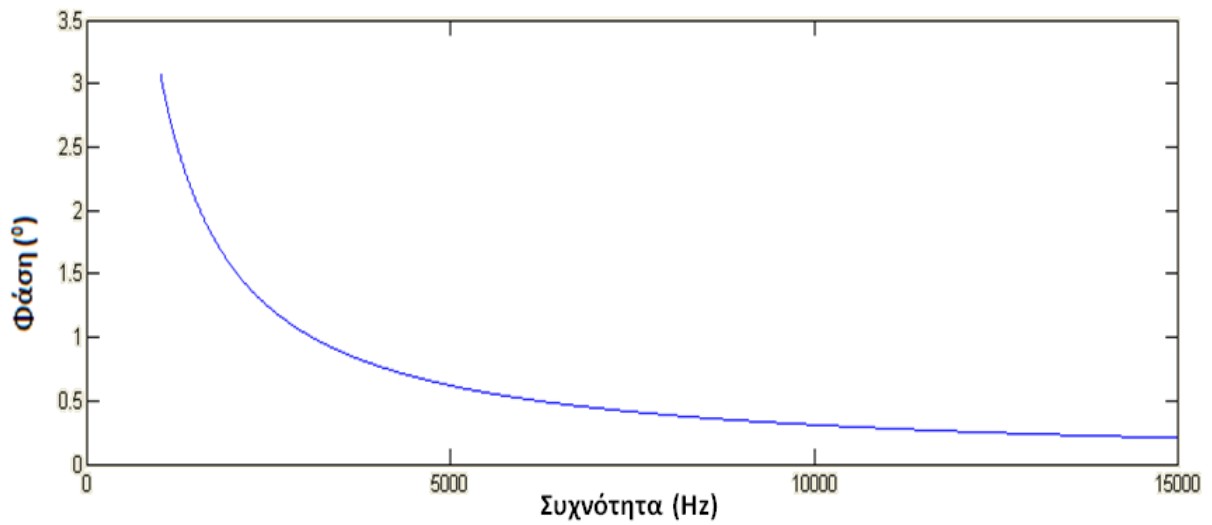
$Z_{ουδέτερου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Συχνότητα (Hz)	Αντίσταση από αρχή (Ohm)	Φάση ( <sup>ο</sup> )	Αντίσταση από τέλος (Ohm)	Φάση ( <sup>ο</sup> )
50	6,182	17,871	6,759	26,273
1000	9,956	3,081	9,957	3,072
2000	9,989	1,548	9,989	1,547
3000	9,995	1,033	9,995	1,033
4000	9,997	0,775	9,997	0,775
5000	9,998	0,620	9,998	0,620
6000	9,999	0,517	9,999	0,517
7000	9,999	0,443	9,999	0,443
8000	9,999	0,388	9,999	0,388
9000	9,999	0,345	9,999	0,345
10000	10	0,310	10	0,310
11000	10	0,282	10	0,282
12000	10	0,259	10	0,259
13000	10	0,239	10	0,239
14000	10	0,222	10	0,222
15000	10	0,206	10	0,206

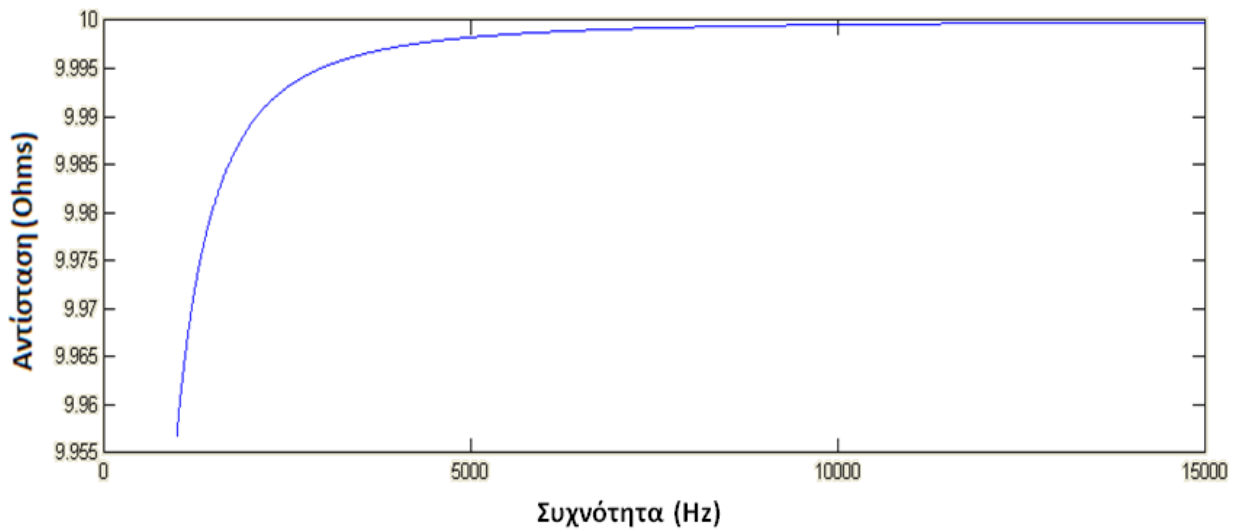
**Πίνακας 3.1.2-2 :** Συνολική αντίσταση (Ohm) και φάση (<sup>ο</sup>) από την αρχή και το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου ανάλογα με τη συχνότητα



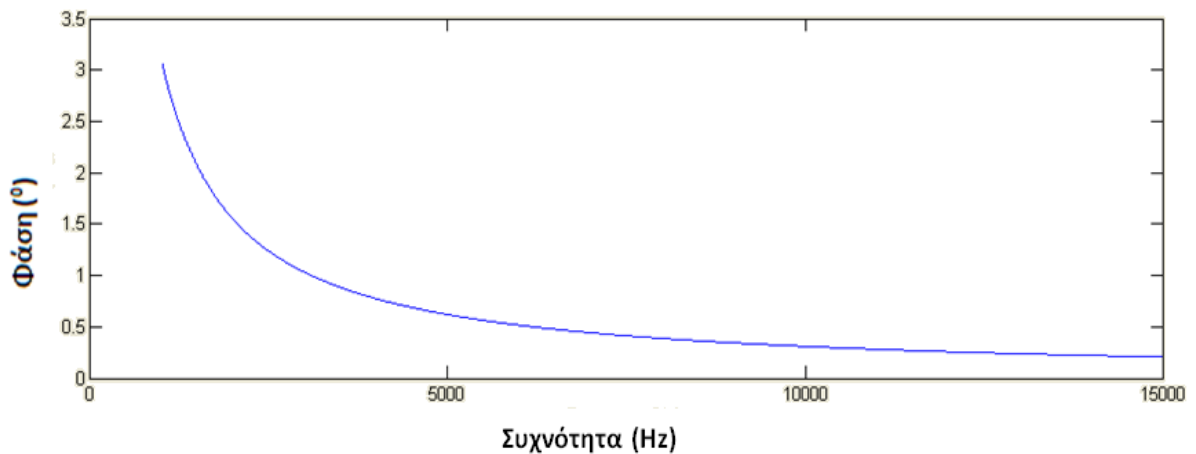
**Σχήμα 3.1.2-9:** Γραφική παράσταση αντίστασης από την αρχή της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συνάρτησε της συχνότητας



**Σχήμα 3.1.2-10:** Γραφική παράσταση φάσης της αντίστασης από την αρχή της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συναρτήσει της συχνότητας



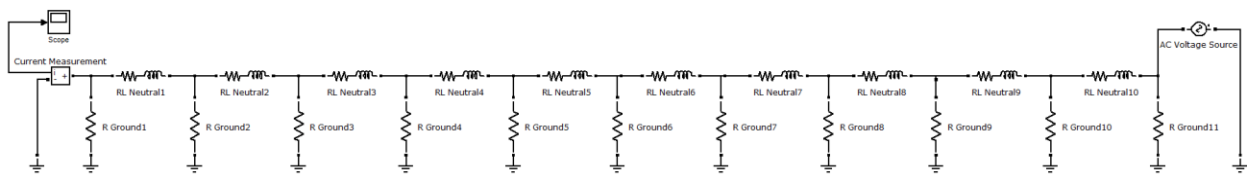
**Σχήμα 3.1.2-11:** Γραφική παράσταση αντίστασης από το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδετέρου συναρτήσει της συχνότητας



**Σχήμα 3.1.2-12:** Γραφική παράσταση φάσης της αντίστασης από το τέλος της γραμμής χαμηλής τάσης κομμένου ουδέτερου συναρτήσει της συχνότητας

### 3.2.1 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου πολλαπλά γειωμένου ουδέτερου (PME TN-C-S)

Για την ανίχνευση σήματος ελέγχου εγχύθηκε στο ένα άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδέτερου σήμα πλάτους 50V σε συχνότητες 1000-15000 Hz και μελετήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης του στο άλλο άκρο αυτού.



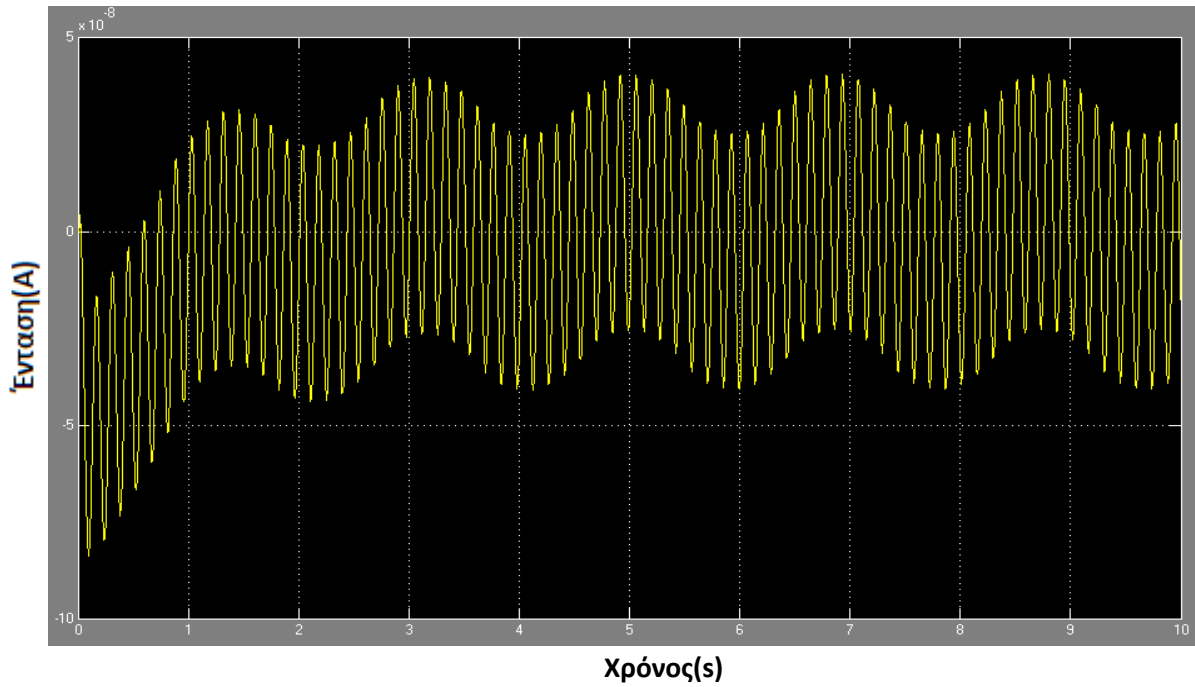
**Σχήμα 3.2.1-1:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

Μήκος αγωγού: 1km

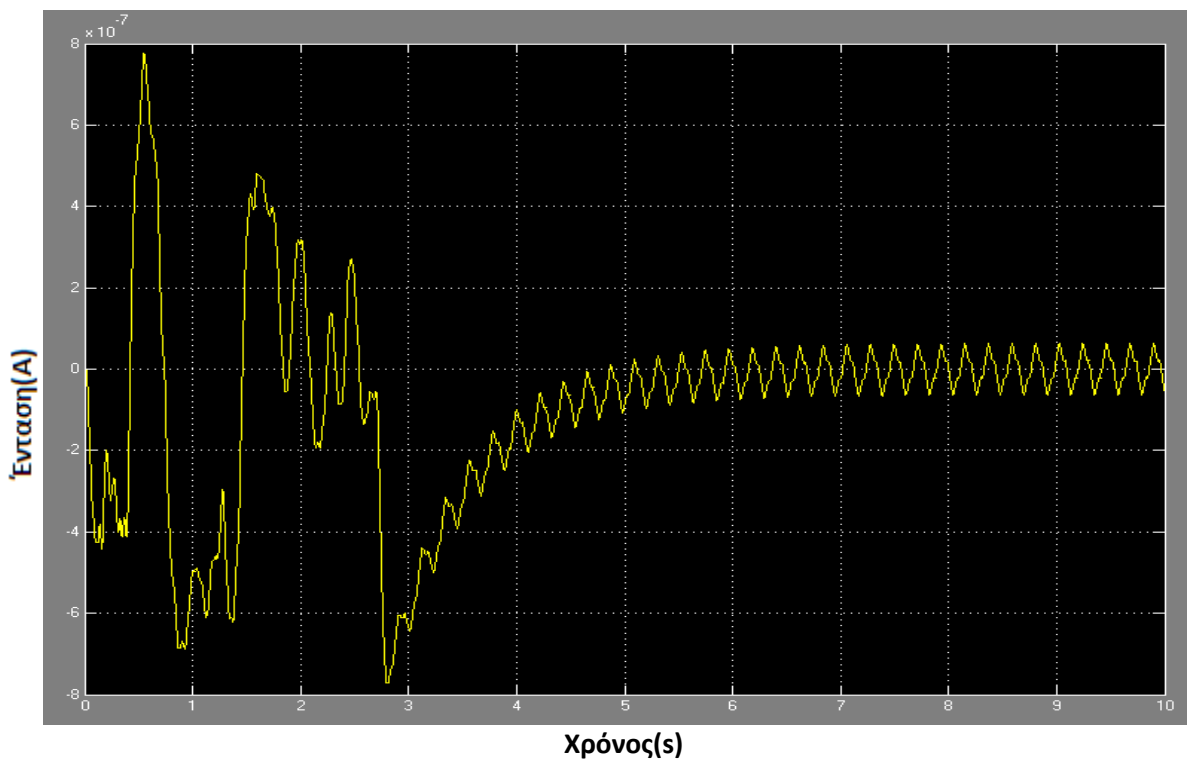
Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm

$Z_{ουδέτερου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Πηγή τάσης 50V

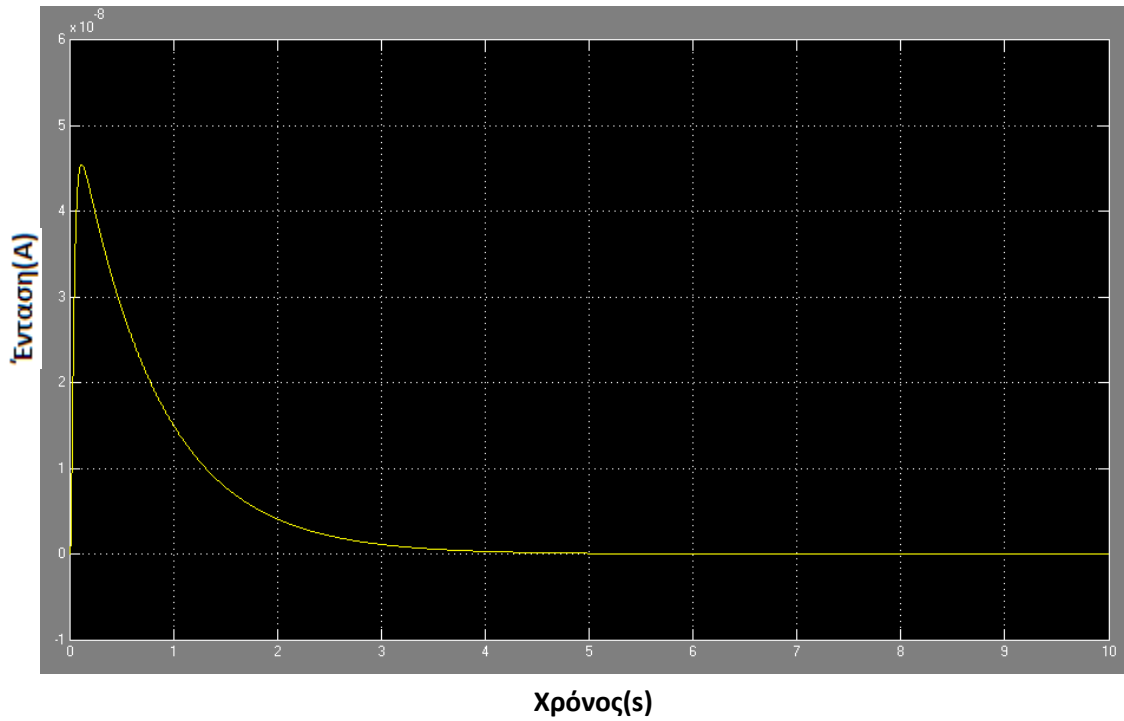


**Σχήμα 3.2.1-2:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 1000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

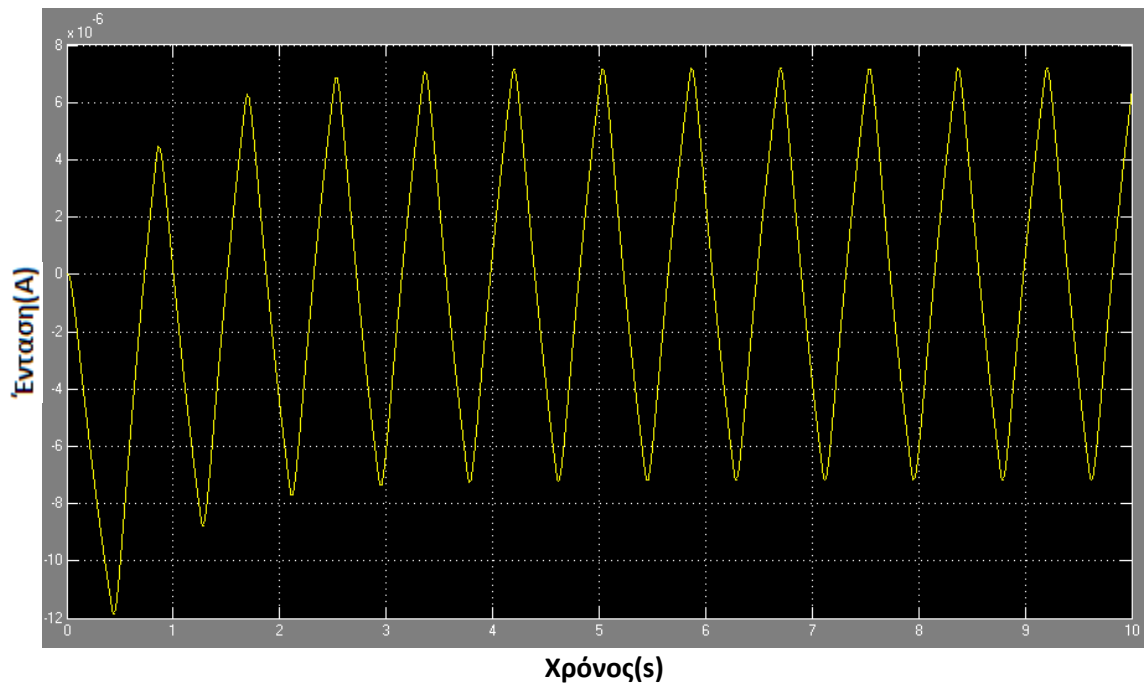


**Σχήμα 3.2.1-3:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 2000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

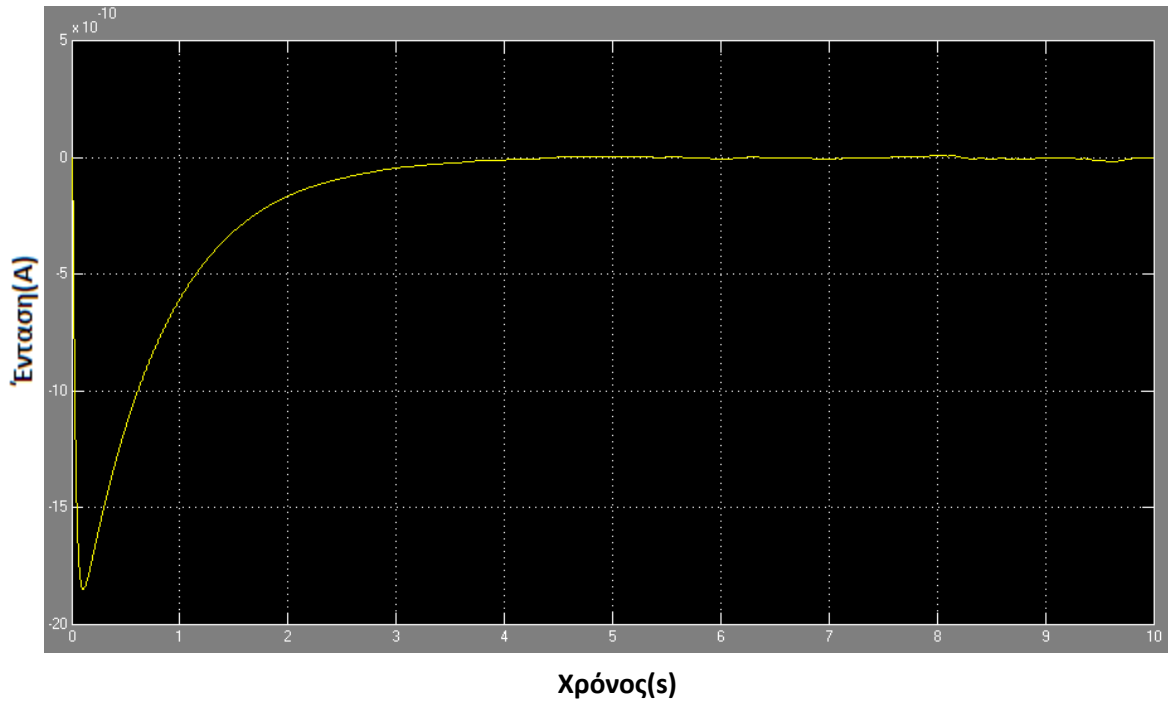




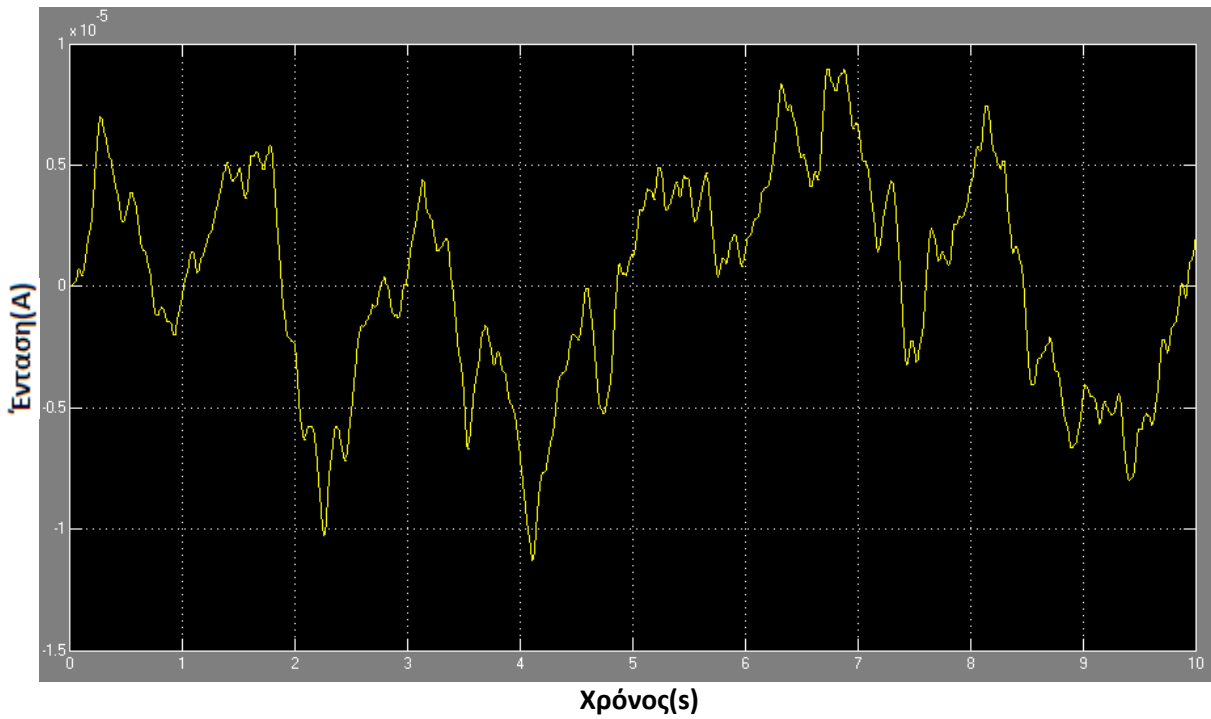
**Σχήμα 3.2.1-4:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 3000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



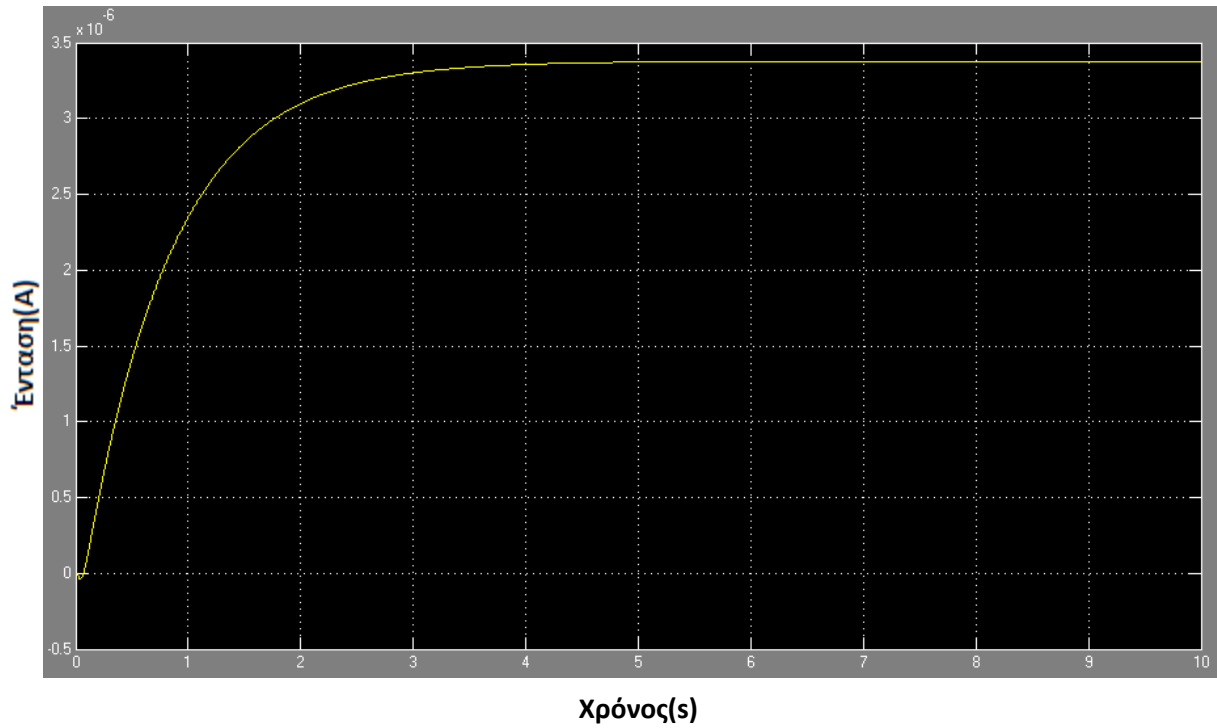
**Σχήμα 3.2.1-5:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 4000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



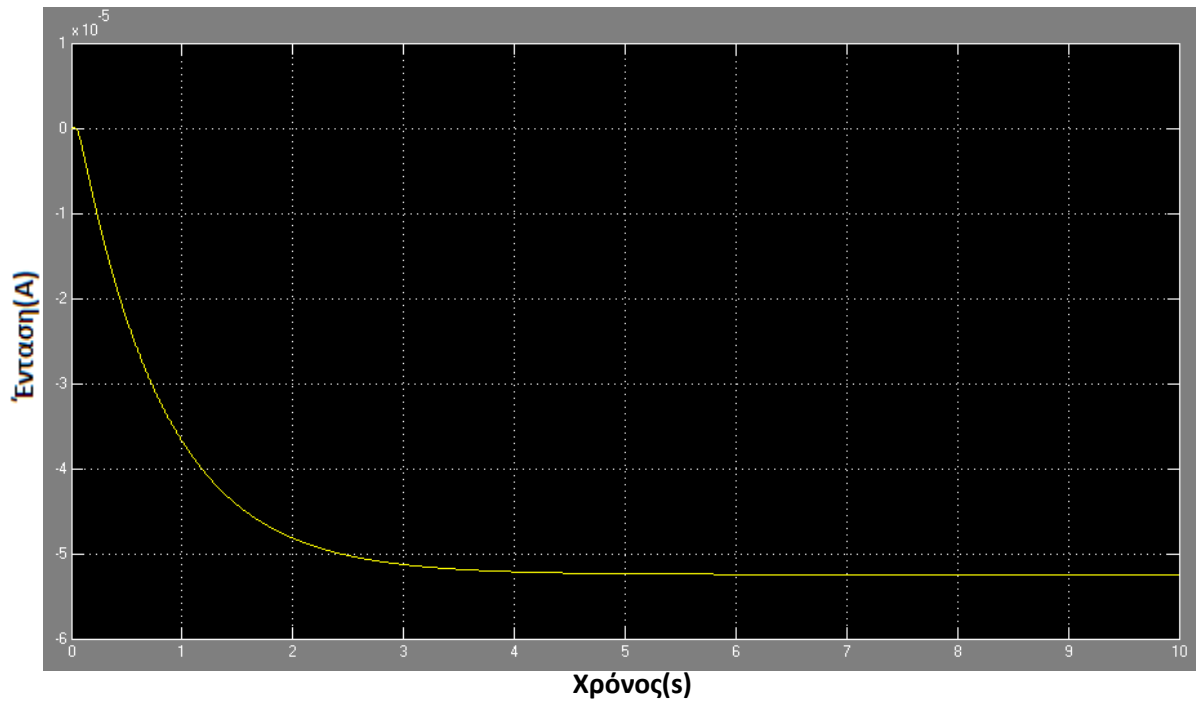
**Σχήμα 3.2.1-6:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 5000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



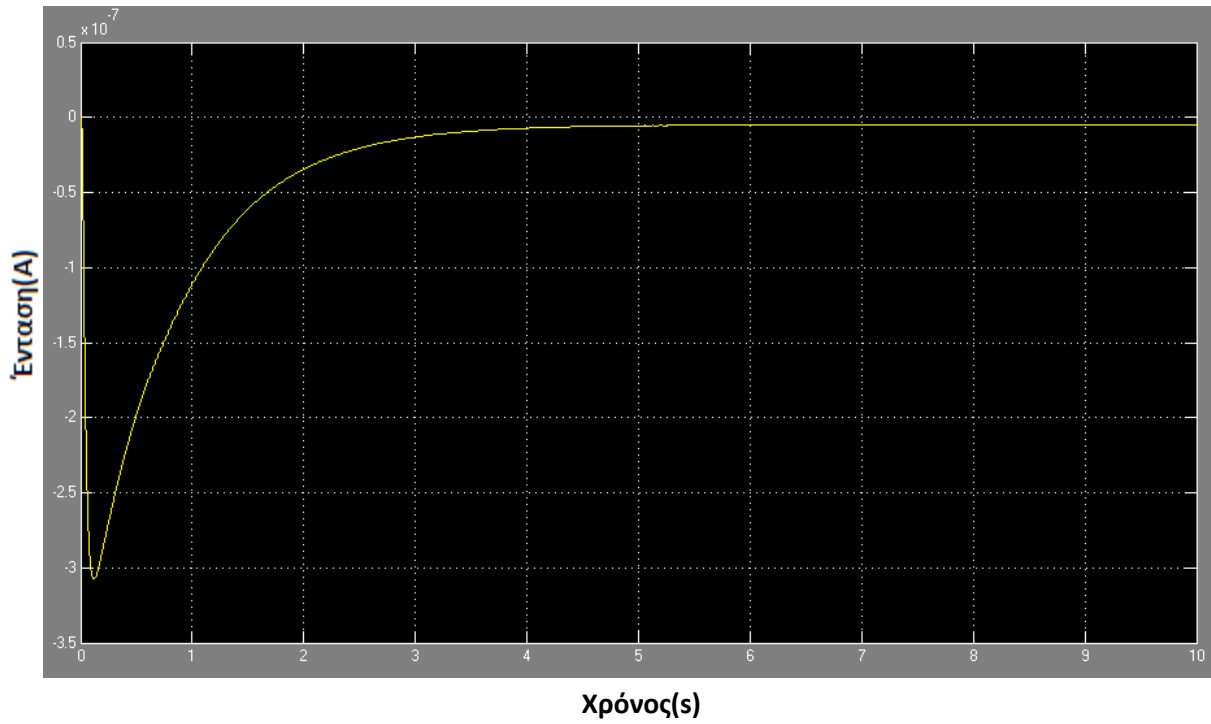
**Σχήμα 3.2.1-7:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 6000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



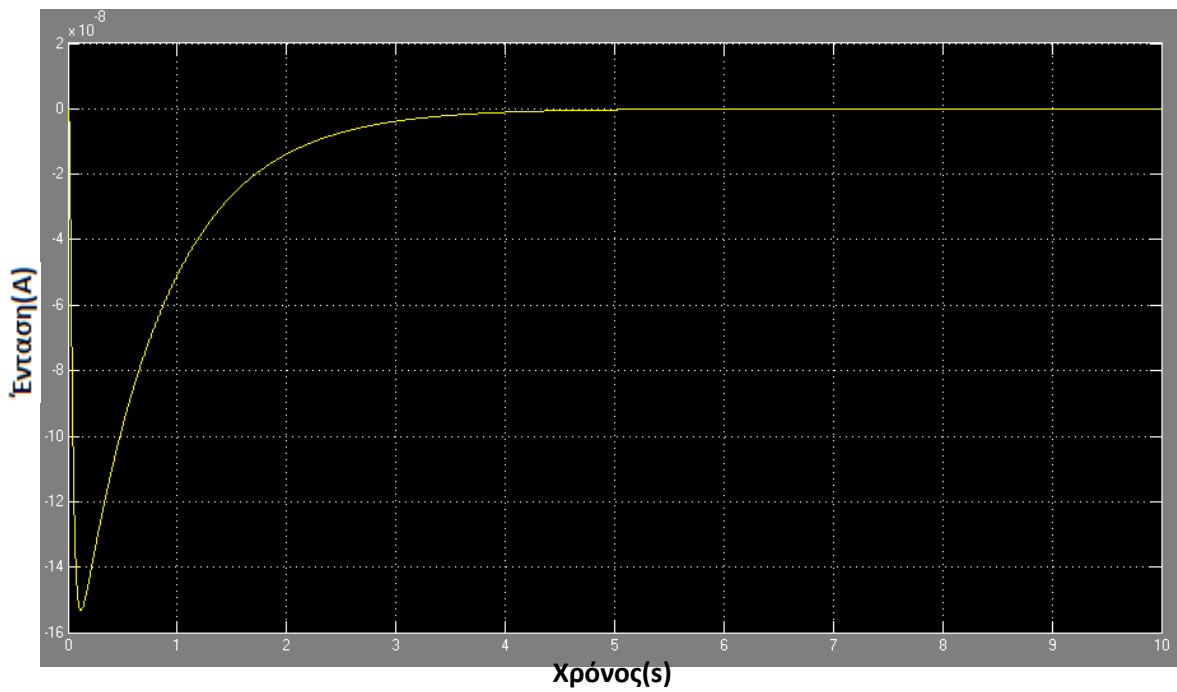
**Σχήμα 3.2.1-8:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 7000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



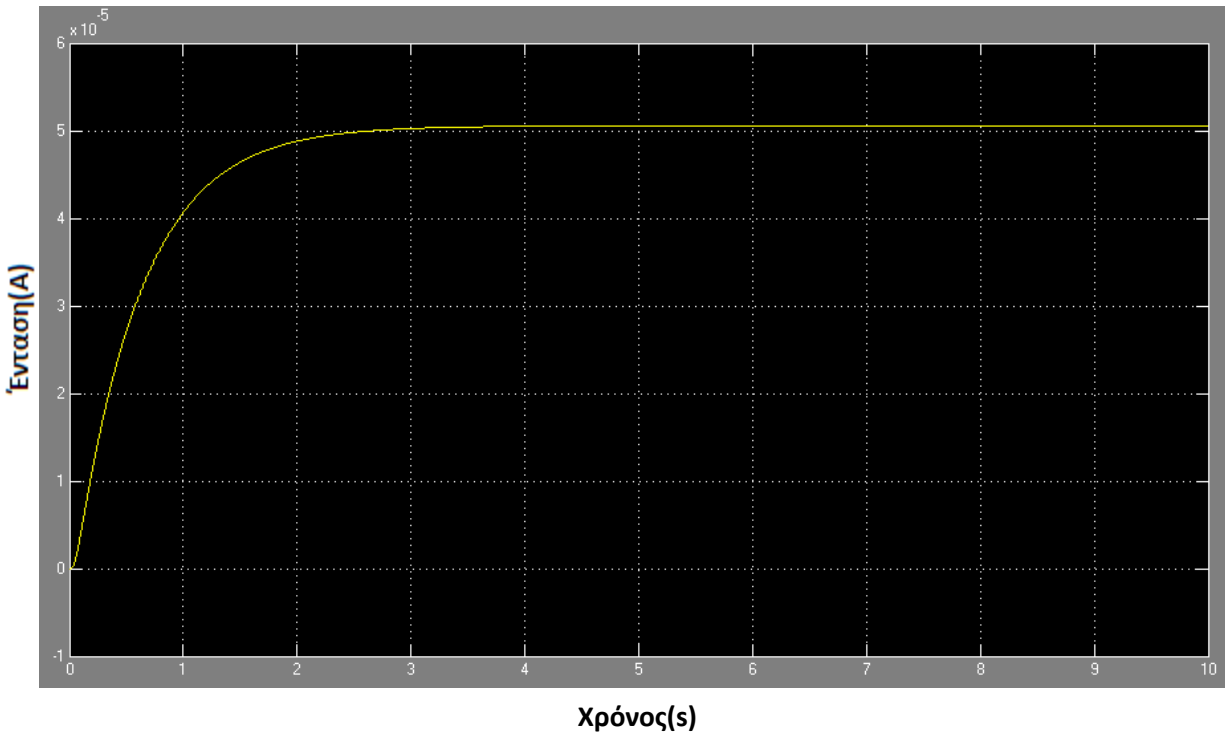
**Σχήμα 3.2.1-9:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 8000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



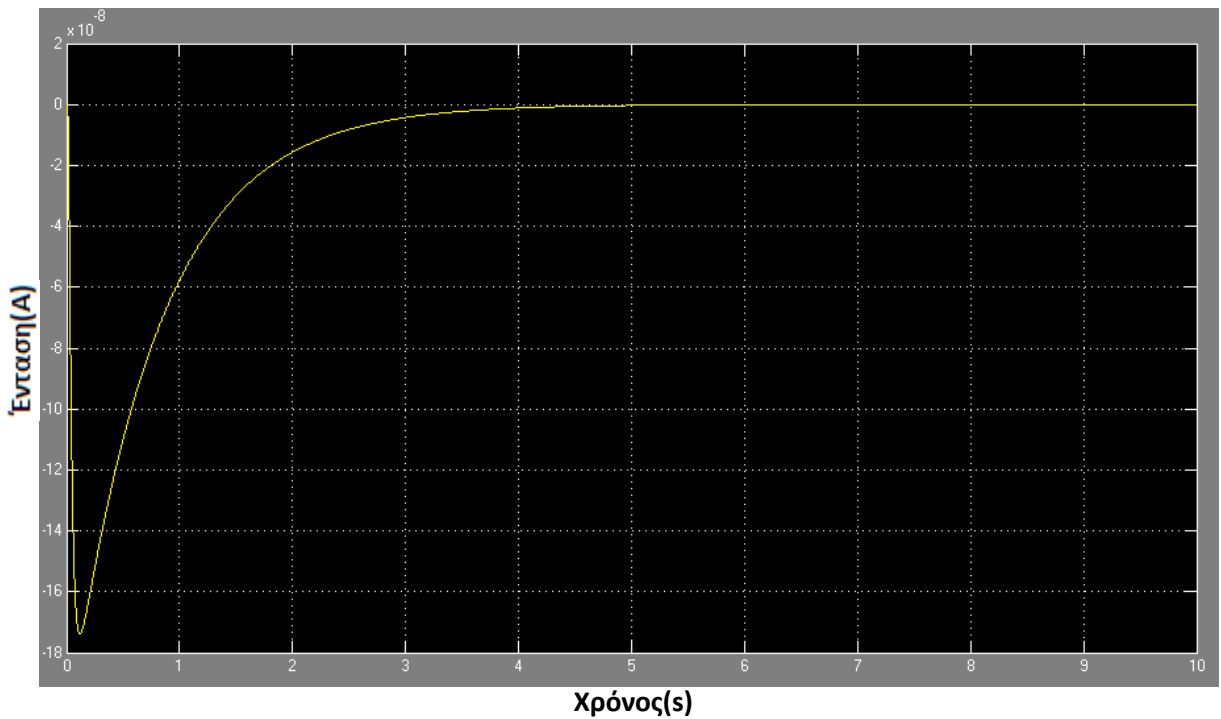
**Σχήμα 3.2.1-10:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 9000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετερού



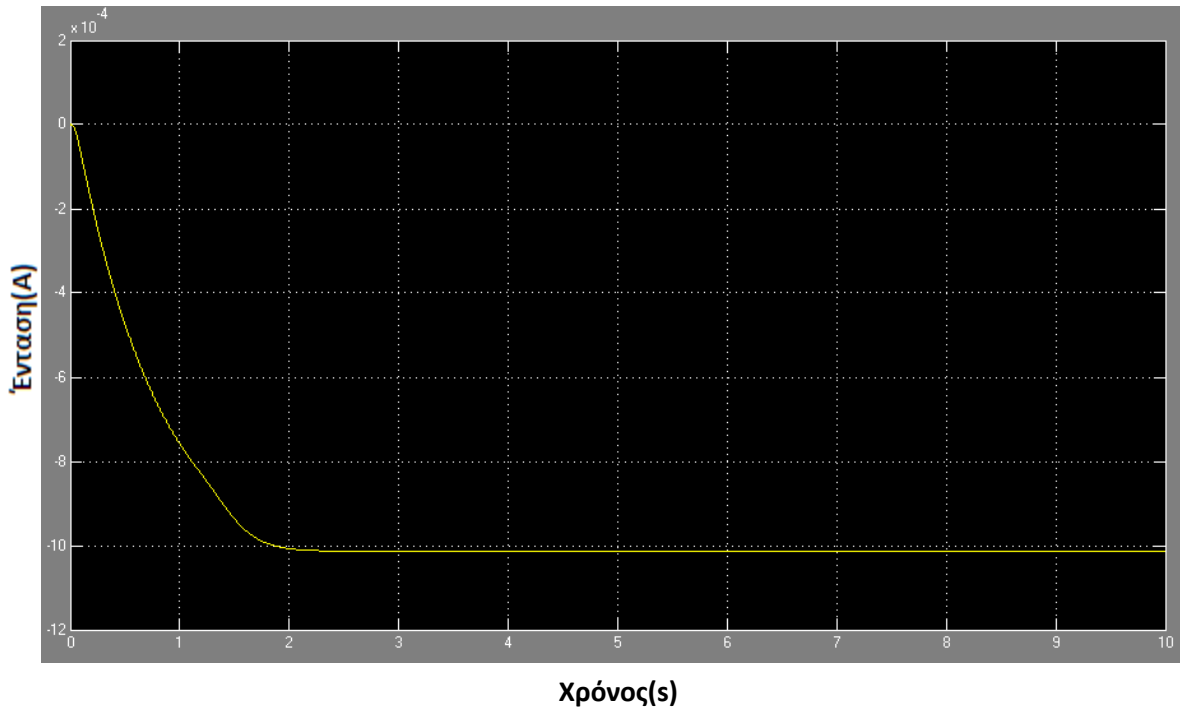
**Σχήμα 3.2.1-11:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 10000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετερού



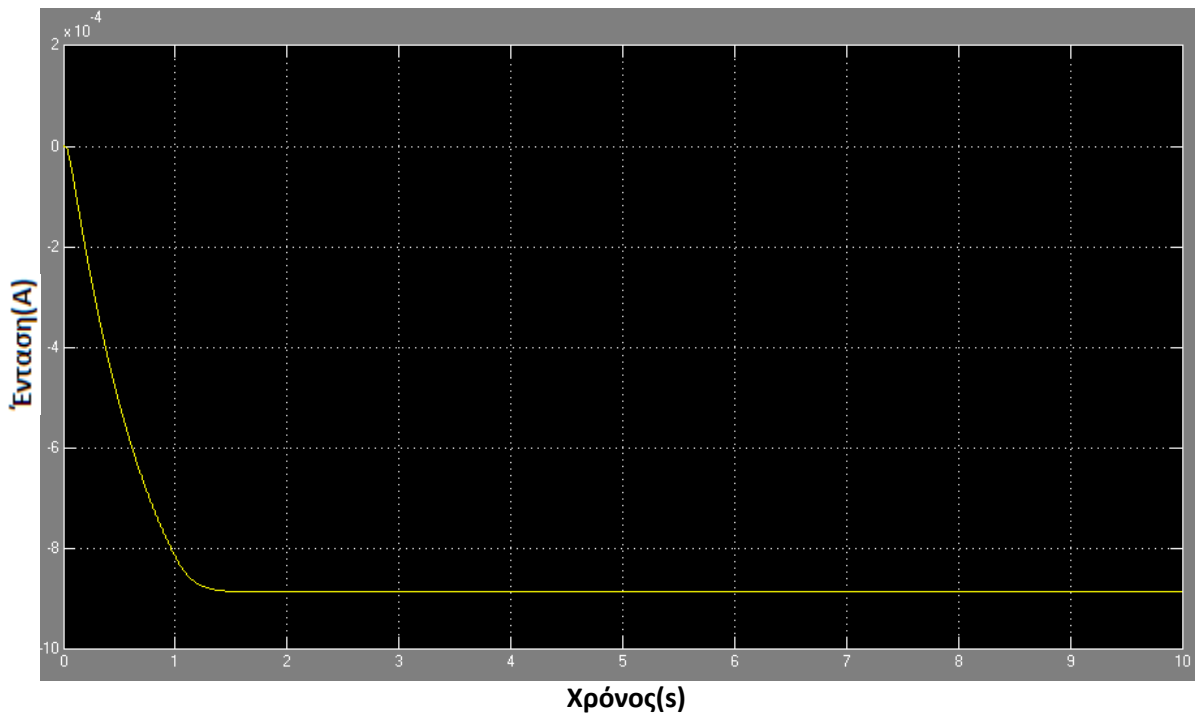
**Σχήμα 3.2.1-12:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 11000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



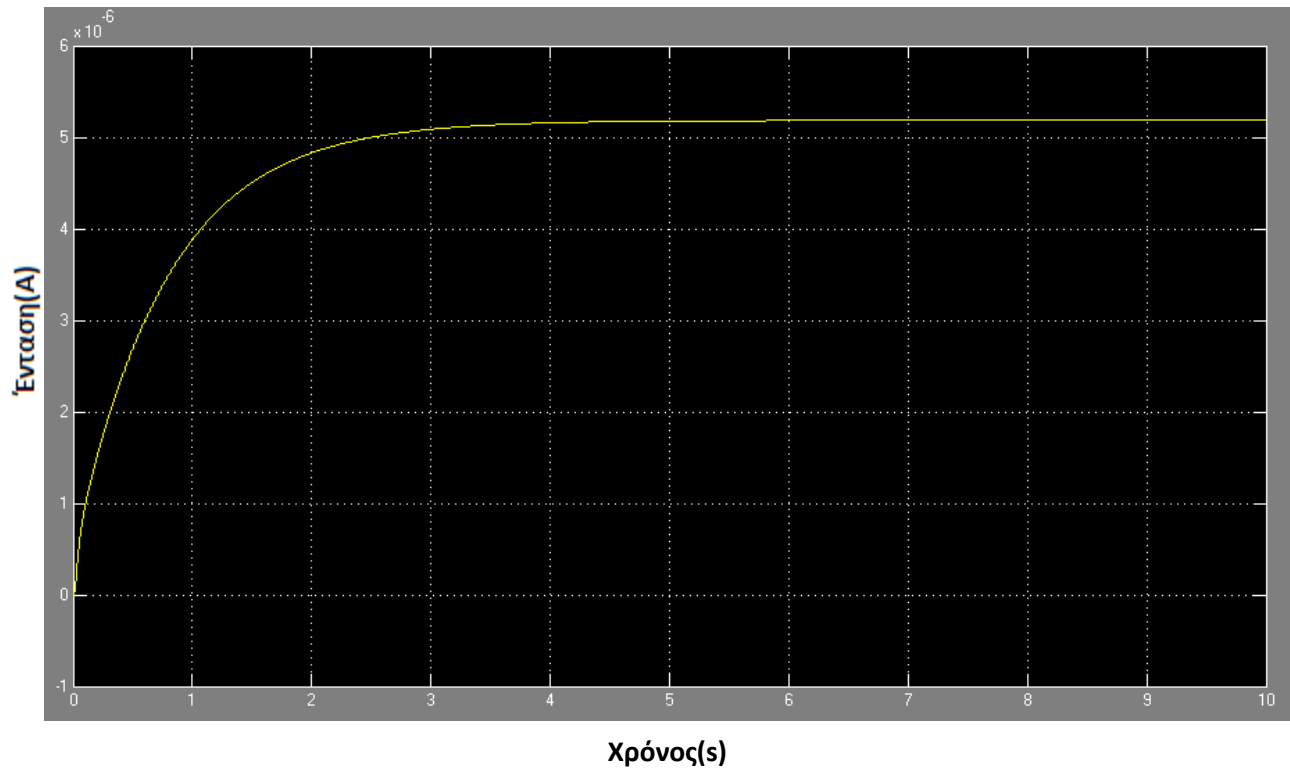
**Σχήμα 3.2.1-13:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 12000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



**Σχήμα 3.2.1-14:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 13000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



**Σχήμα 3.2.1-15:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 14000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

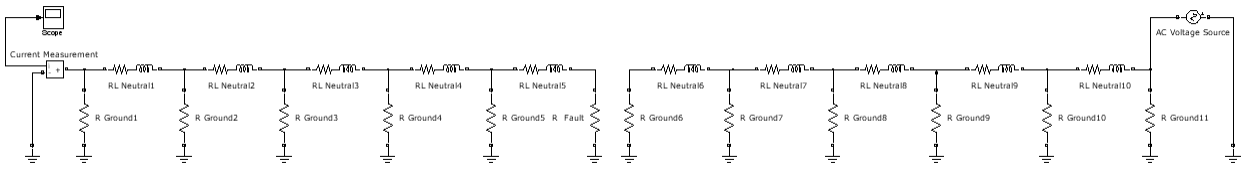


**Σχήμα 3.2.1-16:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 15000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

### 3.2.2 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου κομμένου πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου (PME TN-C-S) με επαφή ουδετέρου-γης

Για την ανίχνευση σήματος ελέγχου εγχύθηκε στο ένα άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου κομμένου σε δυο τυχαίες θέσεις και για δυο περιπτώσεις αποκοπής, με επαφή ουδετέρου-γης, σε συχνότητες 1000-15000 Hz και μελετήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης του στο άλλο άκρο αυτού. Θεωρήθηκαν δυο ακραίες αντίστασης γης: 20 και 400 Ohm.

## 1η Περίπτωση



**Σχήμα 3.2.2-1:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{\text{ground}}$ ) = 10 Ohm

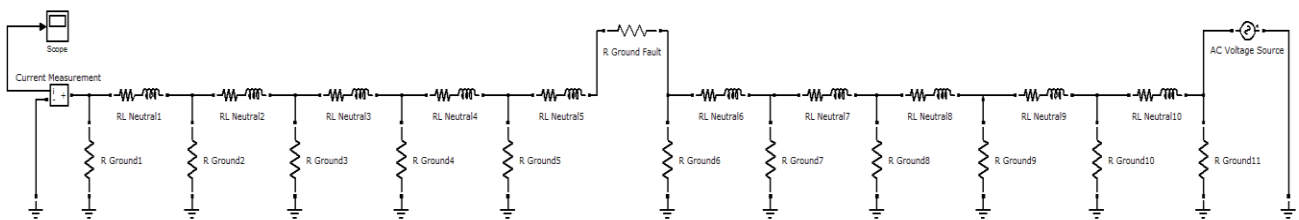
Αντίσταση γης ( $R_{\text{fault}}$ ) = 20 Ohm , 400 Ohm

$Z_{\text{ουδέτερου}}$  ( $RL_{\text{neutral}}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Πηγή τάσης 50V

Σ' αυτή τη περίπτωση μοντελοποιήθηκε ουδέτερος κομμένος κοντά στον ένα στύλο με το ένα του άκρο στη γη και το άλλο στον αέρα. Αυτό έγινε για τις δυο ακραίες περιπτώσεις αντίστασης γης 20 Ohm και 400 Ohm και σε διαφορετικά σημεία αποκοπής. Σε όλες τις περιπτώσεις το σήμα ελέγχου στο άκρο της γραμμής ήταν μη ανιχνεύσιμο (πλάτος μηδενικό).

## 2η Περίπτωση



**Σχήμα 3.2.2-2:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m.

Μήκος αγωγού: 1km

Αντίσταση γείωσης ( $R_{\text{ground}}$ ) = 10 Ohm

Αντίσταση γης ( $R_{\text{fault}}$ ) = 20 Ohm , 400 Ohm

$Z_{\text{ουδέτερου}}$  ( $RL_{\text{neutral}}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m

Πηγή τάσης 50V

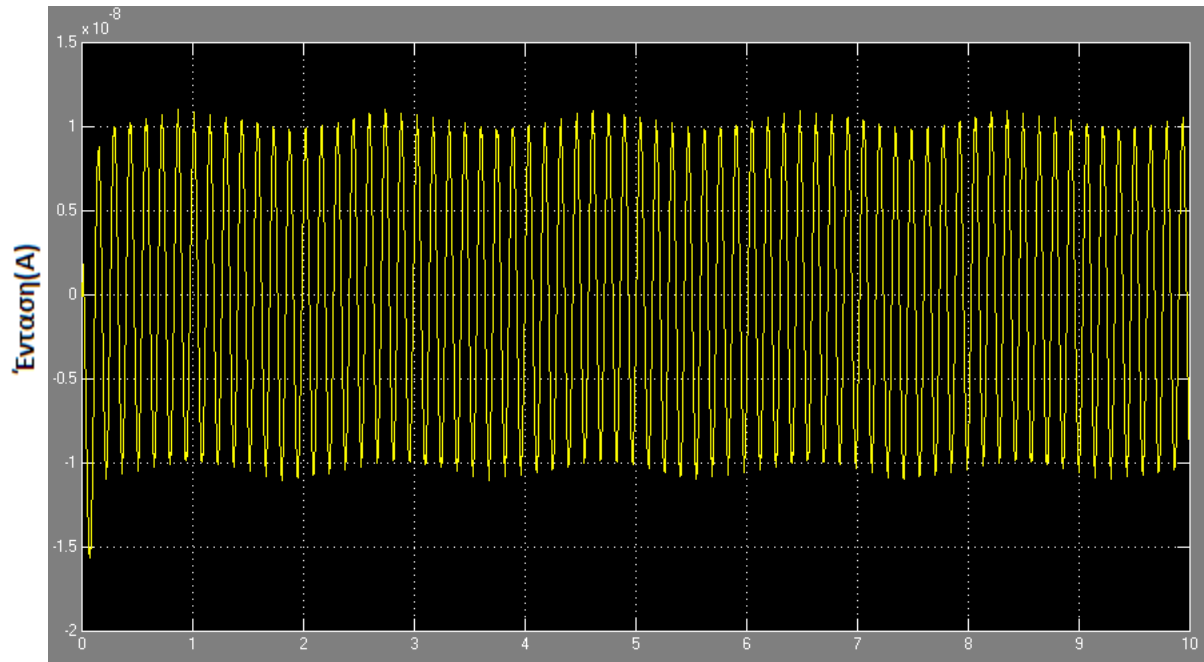


Σ' αυτή τη περίπτωση μοντελοποιήθηκε ουδέτερος κομμένος περίπου στη μέση δυο στύλων με τις δυο του άκρες να ακουμπούν στη γη. Αυτό έγινε για τις δυο ακραίες περιπτώσεις αντίστασης γης 20 Ohm και 400 Ohm.

<i>Συχνότητα (Hz)</i>	<i>Μέγιστες τιμές σήματος ελέγχου</i>	
	<i>Αντίσταση Γης R=20 Ohm</i>	<i>Αντίσταση Γης R=400 Ohm</i>
1000	$11.0 \cdot 10^{-9}$	$7.0 \cdot 10^{-10}$
2000	$4.5 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$
3000	$7.5 \cdot 10^{-9}$	$4.5 \cdot 10^{-10}$
4000	$5.5 \cdot 10^{-7}$	$2.8 \cdot 10^{-8}$
5000	$-3.2 \cdot 10^{-10}$	$-2.0 \cdot 10^{-11}$
6000	$7.9 \cdot 10^{-7}$	$5.7 \cdot 10^{-8}$
7000	$6.1 \cdot 10^{-8}$	$3.1 \cdot 10^{-9}$
8000	$-9.5 \cdot 10^{-7}$	$-4.8 \cdot 10^{-8}$
9000	$-5.1 \cdot 10^{-8}$	$-3.0 \cdot 10^{-9}$
10000	$-2.5 \cdot 10^{-8}$	$-1.5 \cdot 10^{-9}$
11000	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$5.9 \cdot 10^{-8}$
12000	$-2.9 \cdot 10^{-8}$	$-1.7 \cdot 10^{-9}$
13000	$-1.9 \cdot 10^{-5}$	$-9.8 \cdot 10^{-7}$
14000	$-2.1 \cdot 10^{-5}$	$-1.1 \cdot 10^{-6}$
15000	$1.3 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-9}$

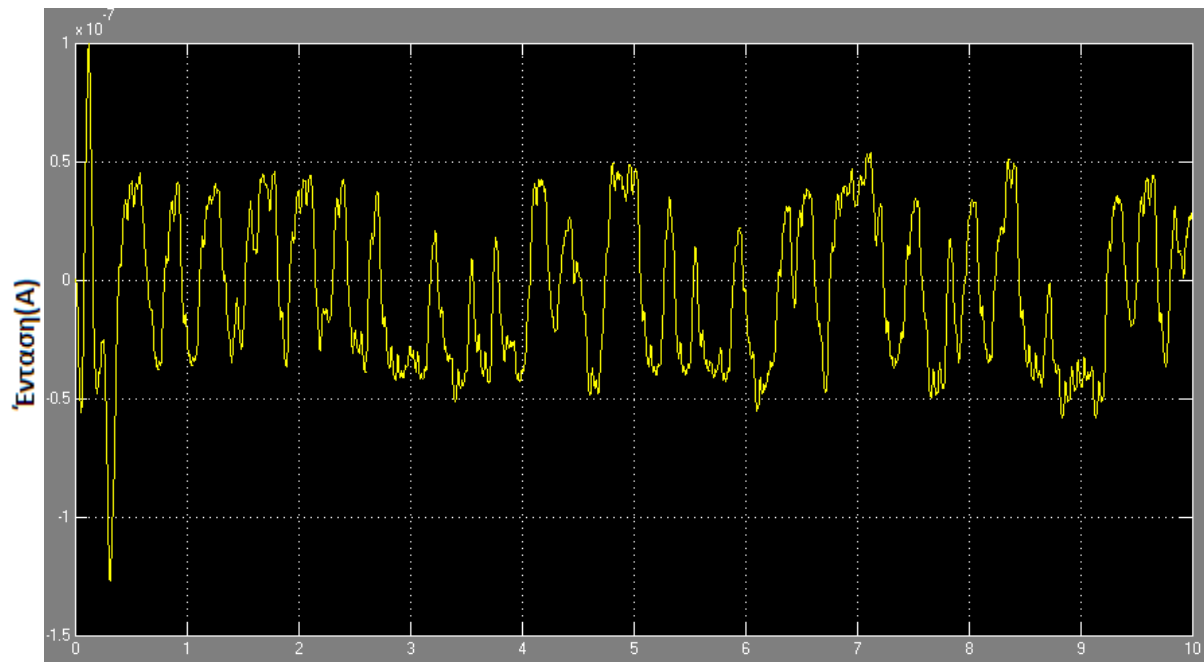
**Πίνακας 3.2.2-1 :** Μέγιστες τιμές σήματος ανάλογα με τη συχνότητα για αντιστάσεις γης R=20 Ohm και R=400 Ohm

Οι μορφές των γραφικών παραστάσεων και στις δυο περιπτώσεις αντίστασης γης (R=20 Ohm και R=400 Ohm) είναι οι ίδιες για κάθε αντίστοιχη συχνότητα.



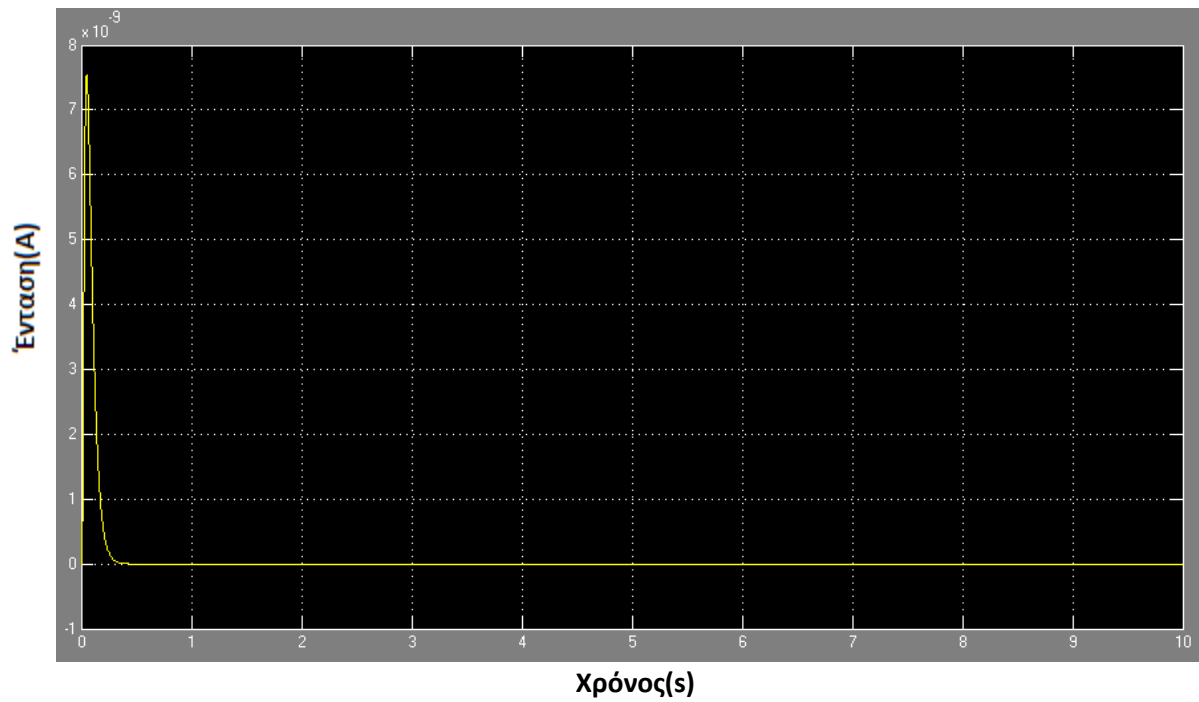
Χρόνος(s)

**Σχήμα 3.2.2-3:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 1000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

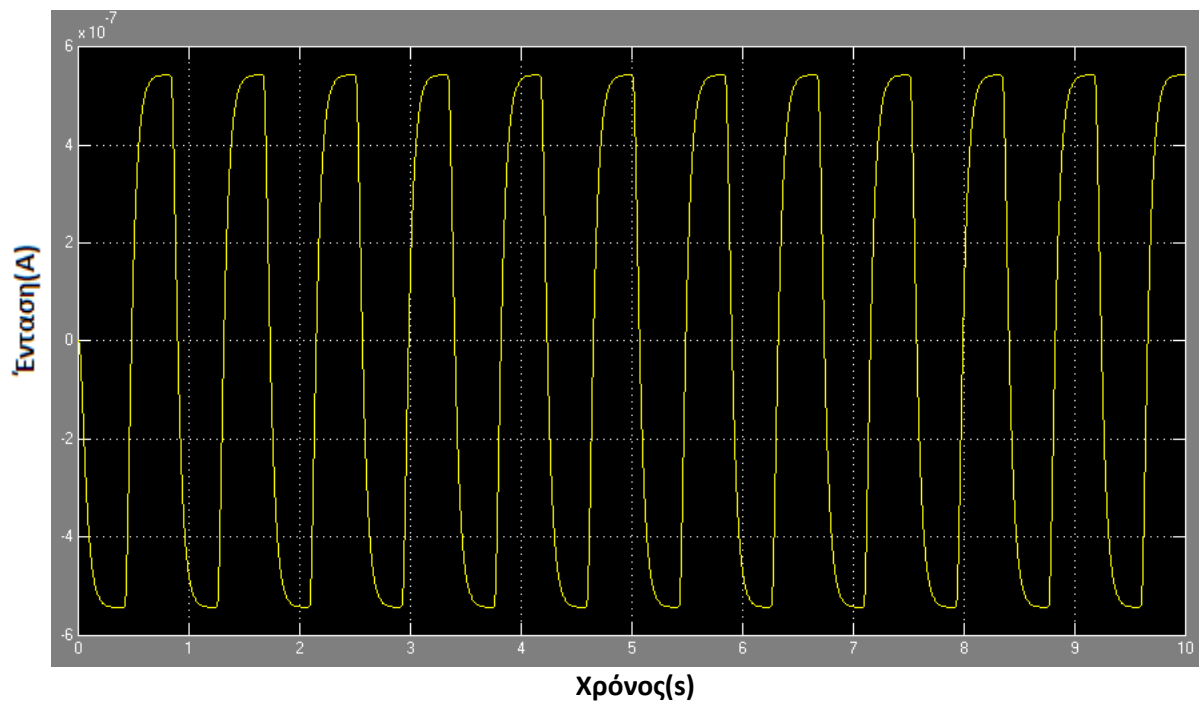


Χρόνος(s)

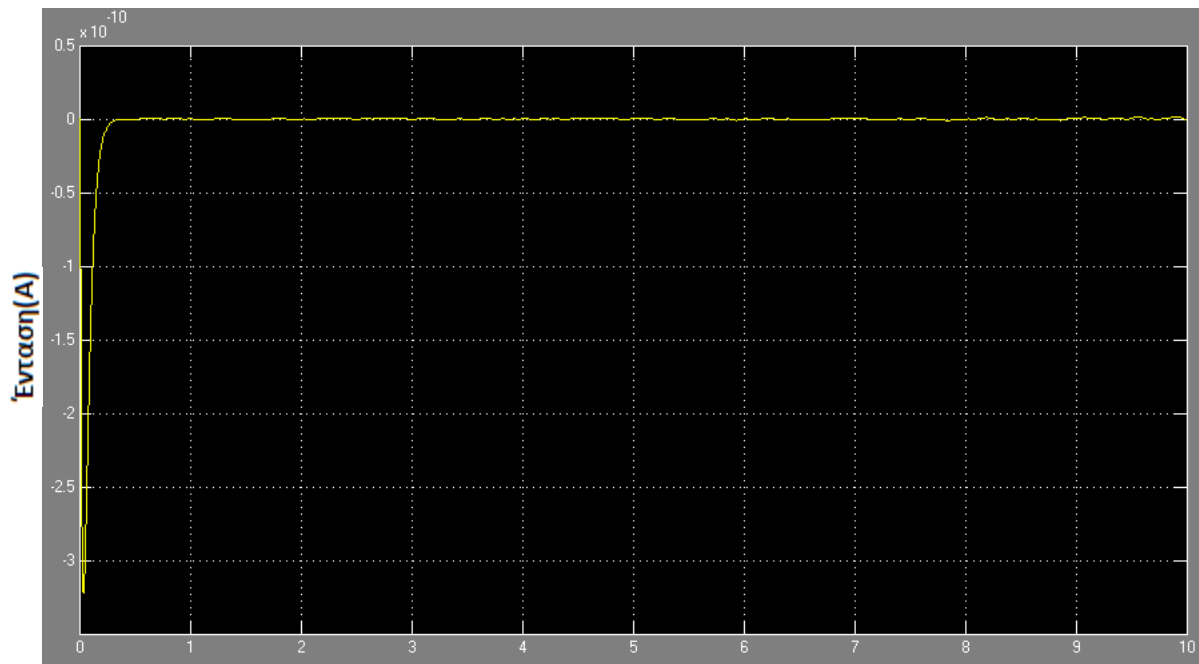
**Σχήμα 3.2.2-4:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 2000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



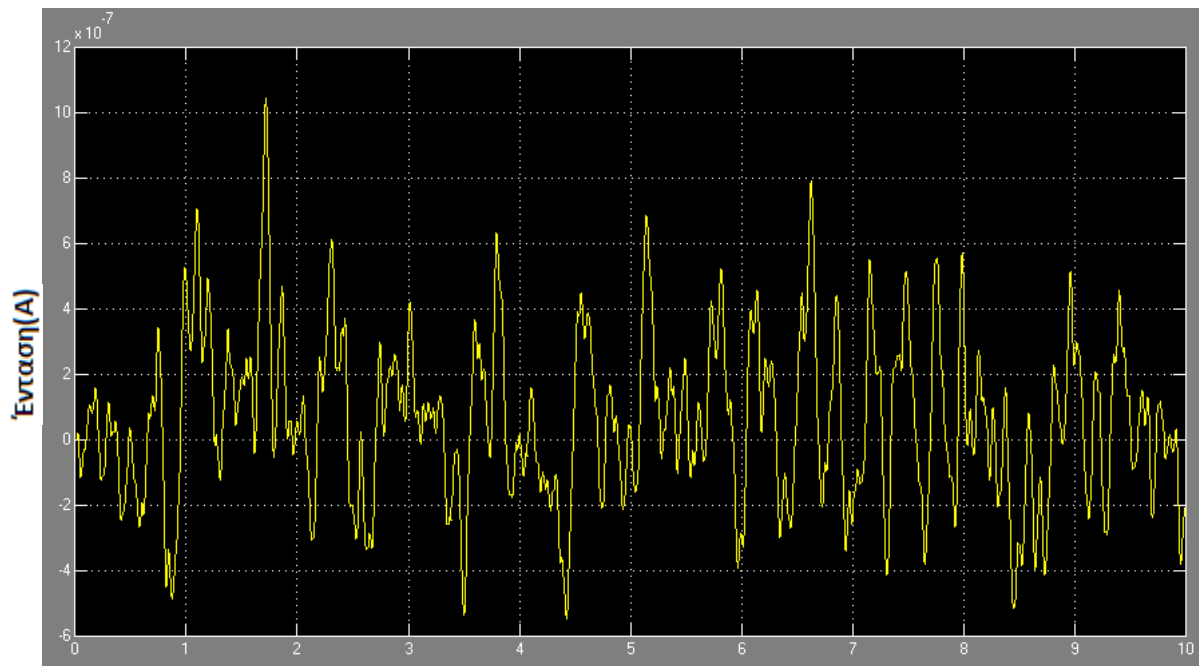
**Σχήμα 3.2.2-5:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 3000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



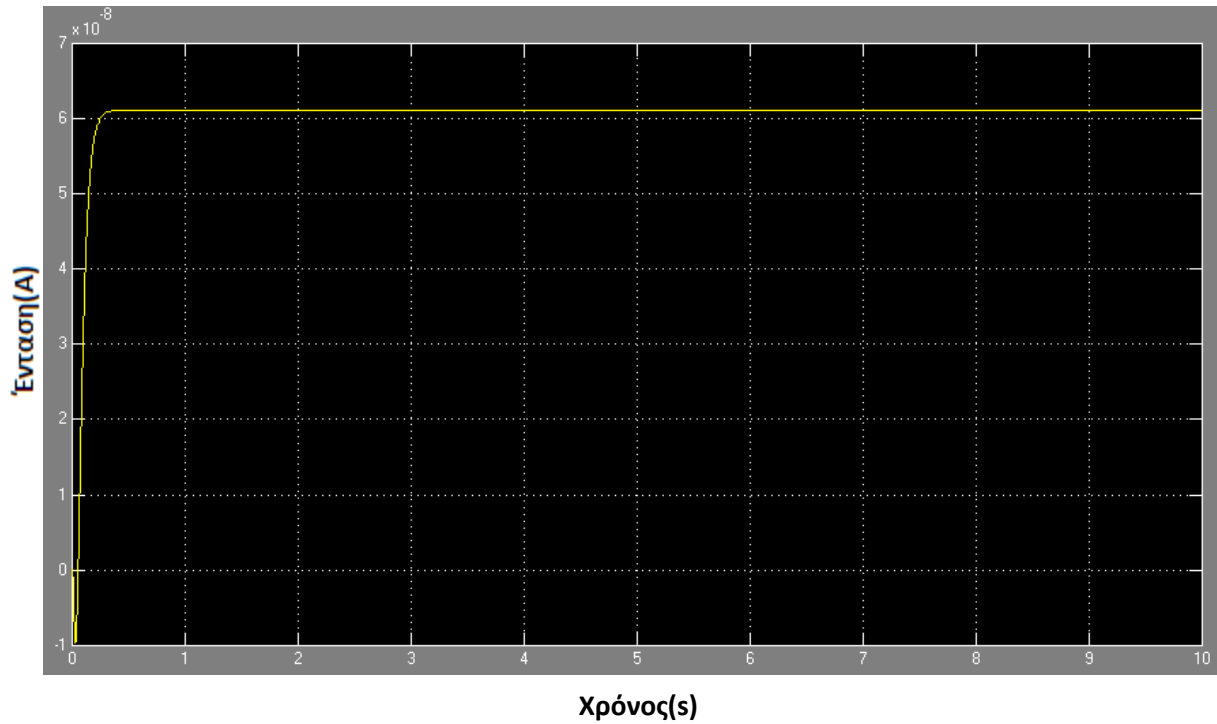
**Σχήμα 3.2.2-6:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 4000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



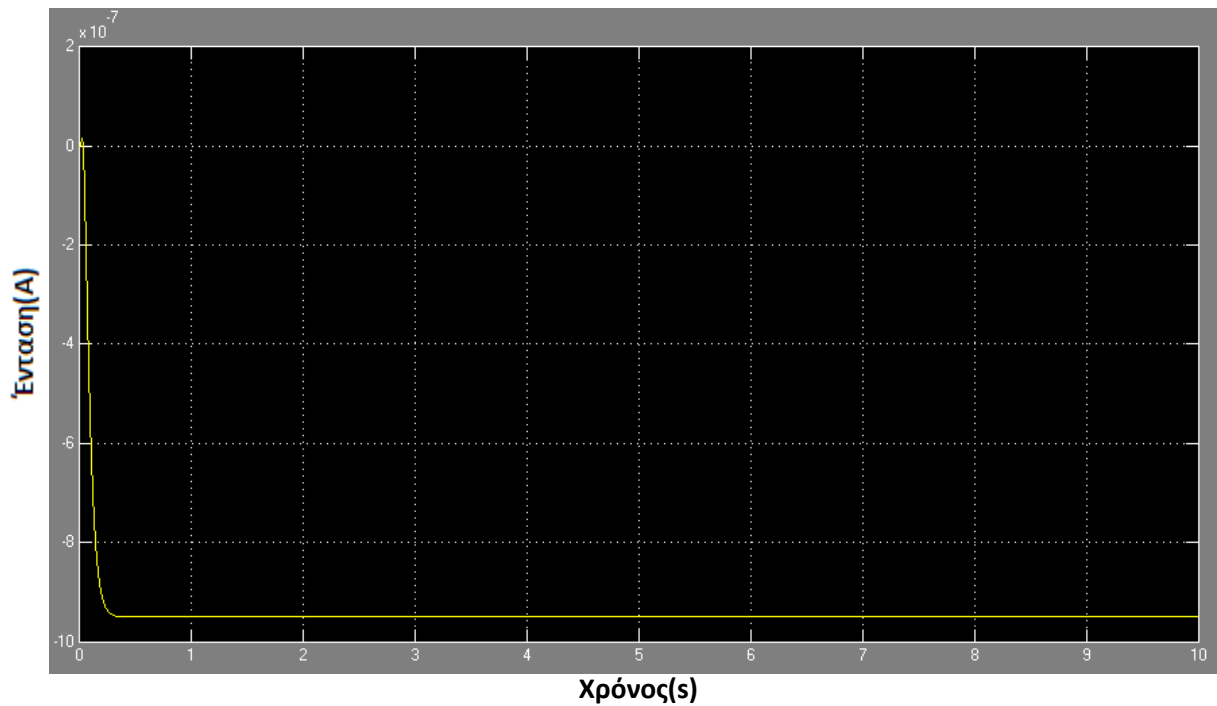
**Σχήμα 3.2.2-7:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 5000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



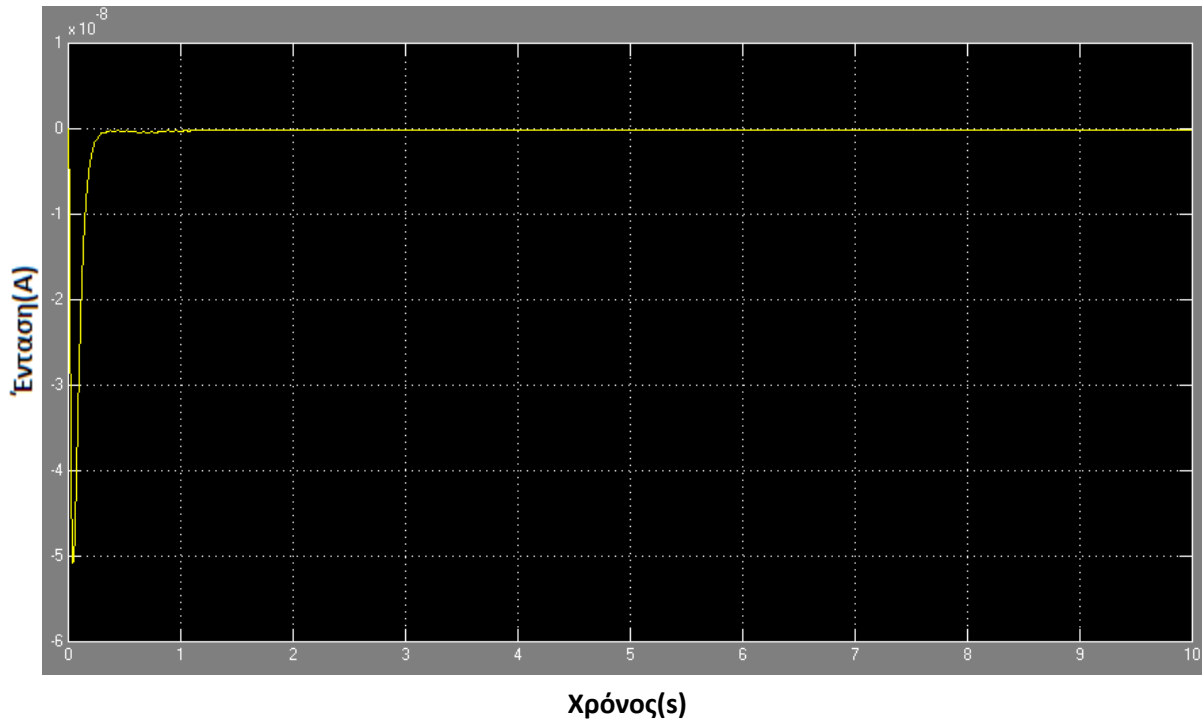
**Σχήμα 3.2.2-8:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 6000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



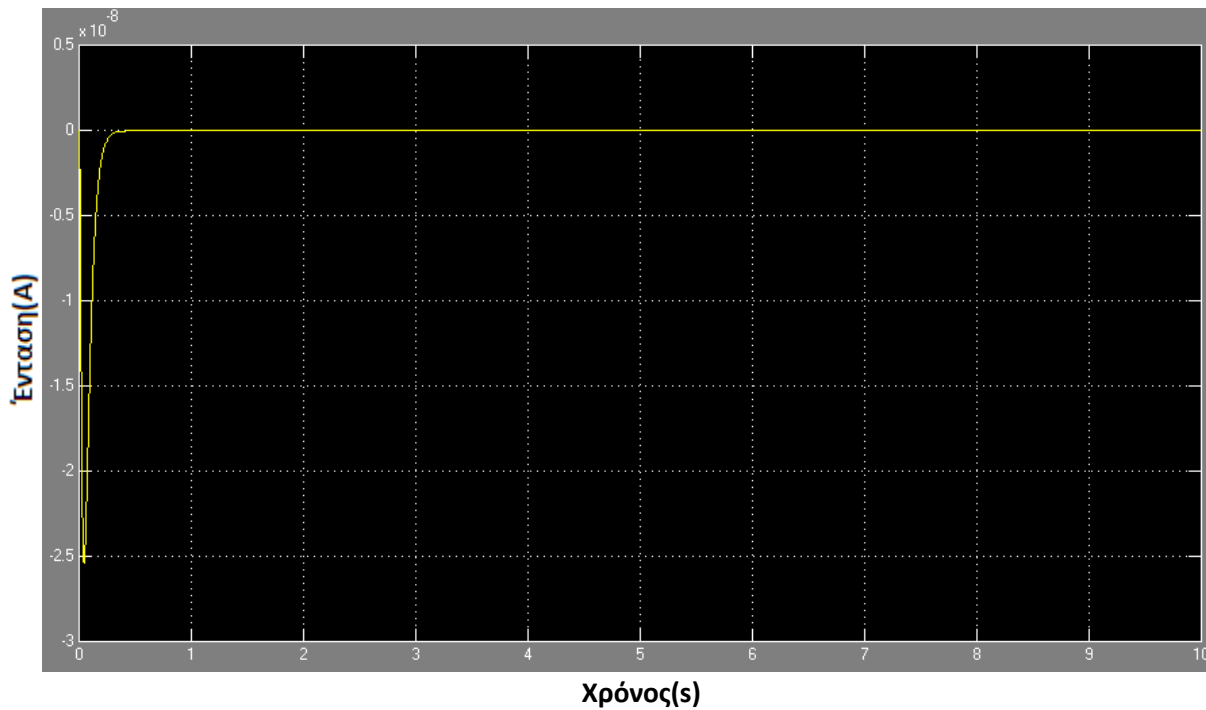
**Σχήμα 3.2.2-9:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 7000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



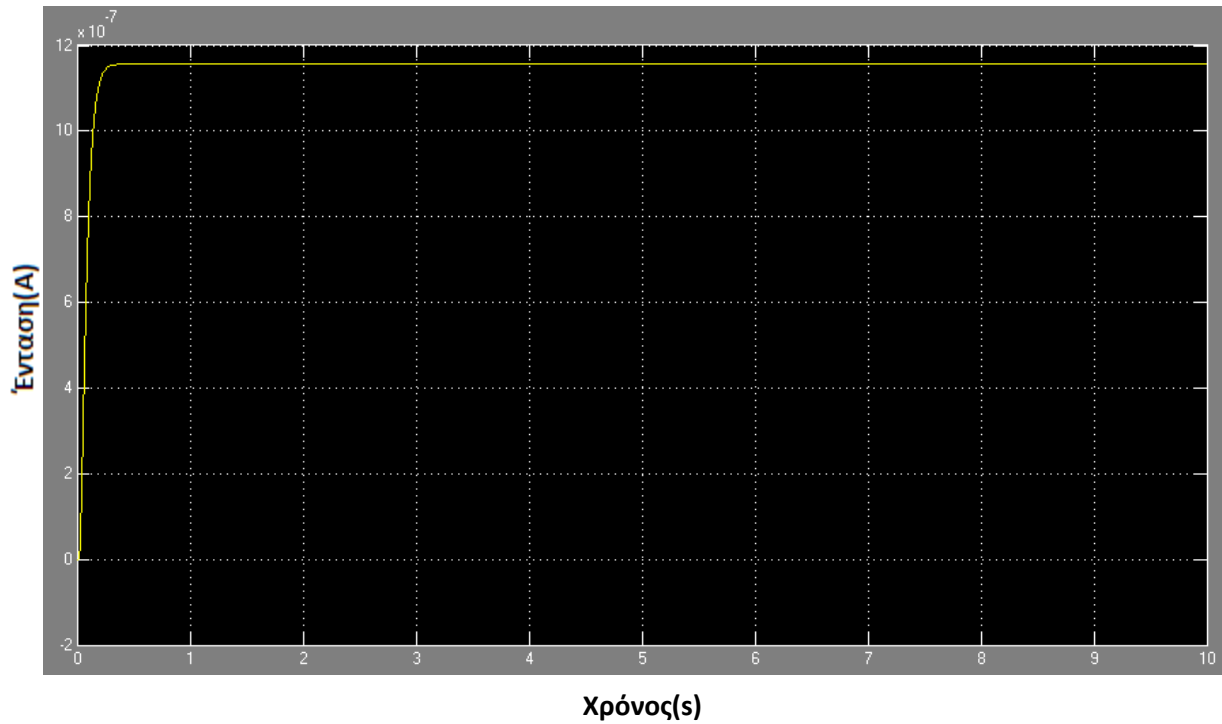
**Σχήμα 3.2.2-10:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 8000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



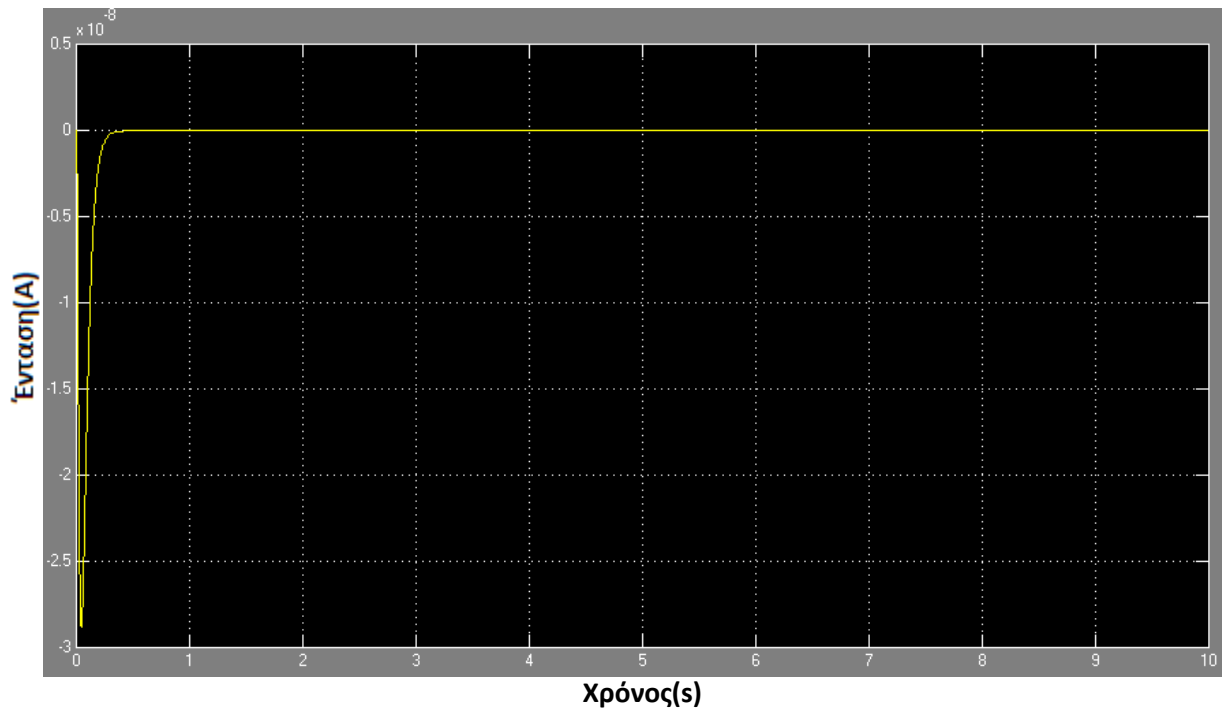
**Σχήμα 3.2.2-11:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 9000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



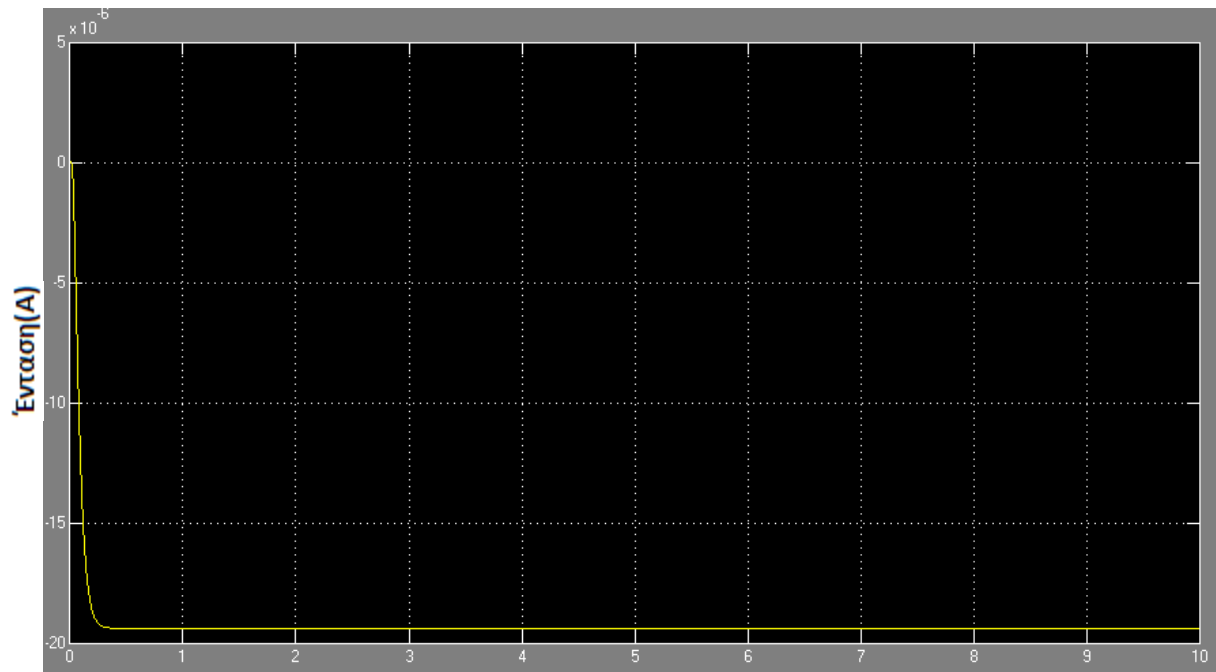
**Σχήμα 3.2.2-12:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 10000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



**Σχήμα 3.2.2-13:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 11000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

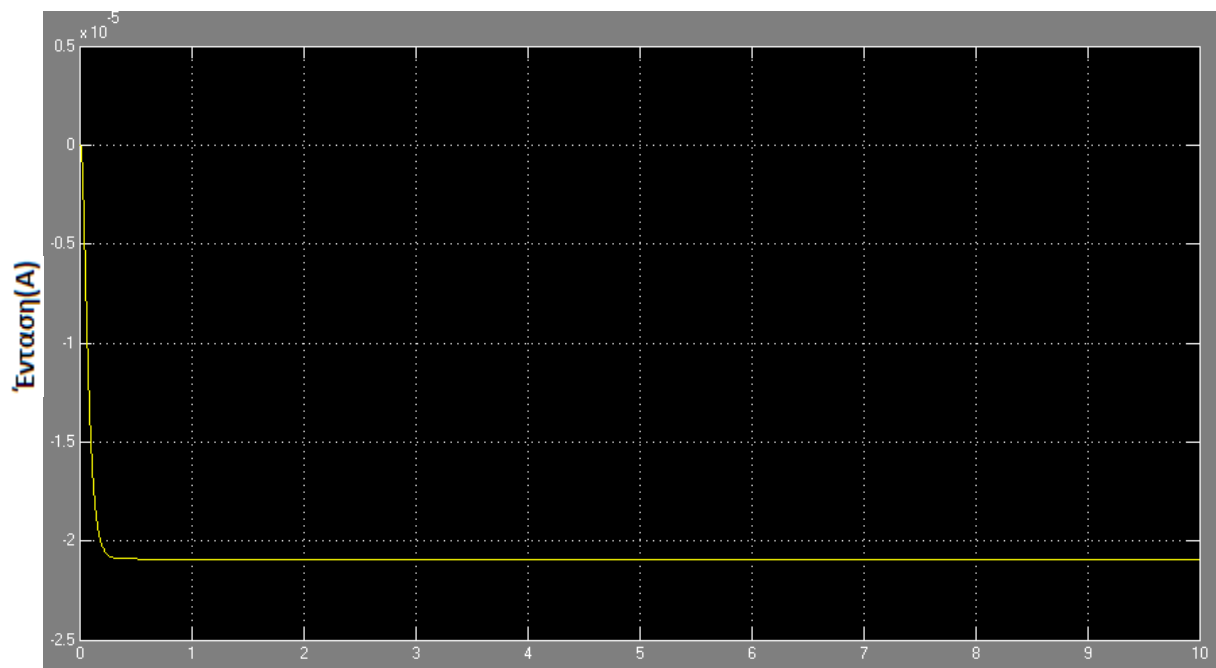


**Σχήμα 3.2.2-14:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 12000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



Χρόνος(s)

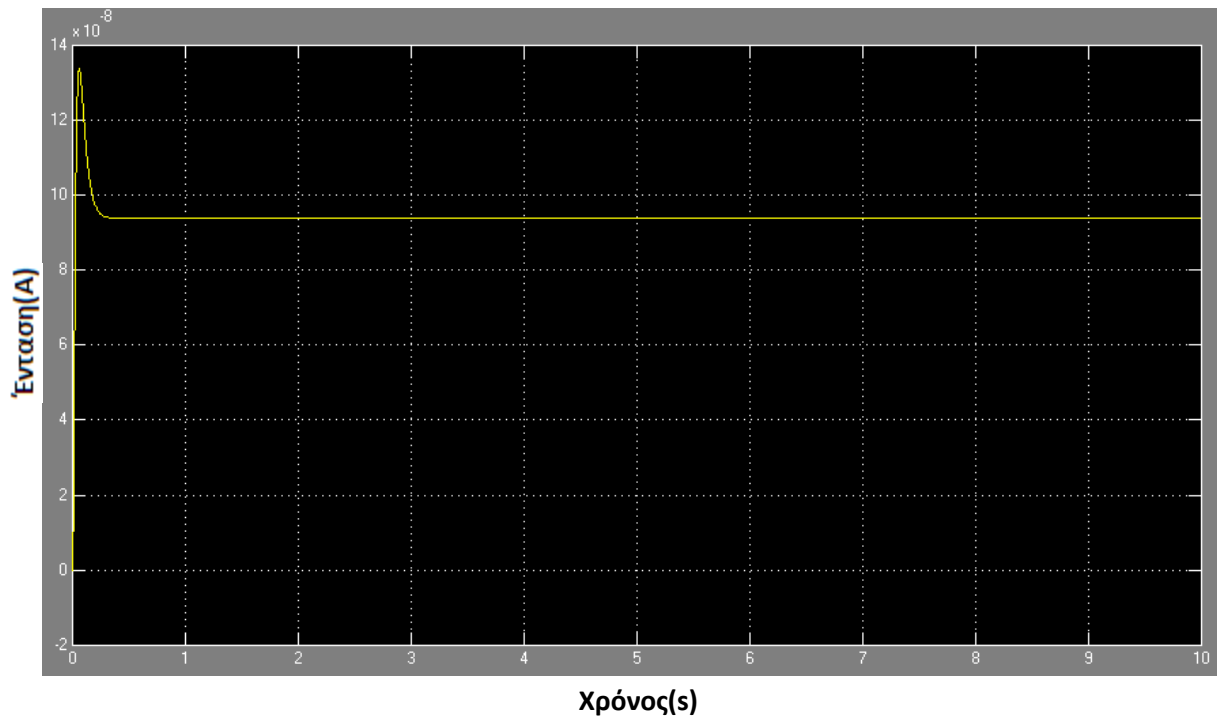
**Σχήμα 3.2.2-15:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 13000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



Χρόνος(s)

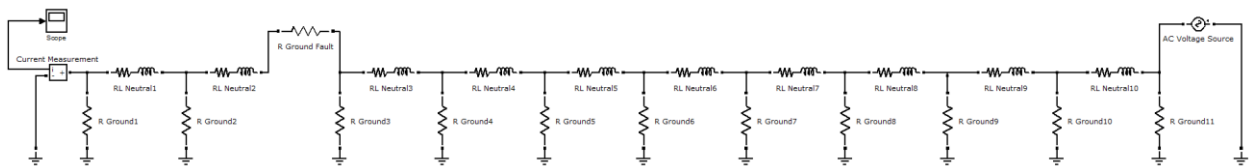
**Σχήμα 3.2.2-16:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 14000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου





**Σχήμα 3.2.2-17:** Γραφική παράσταση σήματος ελέγχου 15000Hz στο άκρο πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου

### Σημείωση

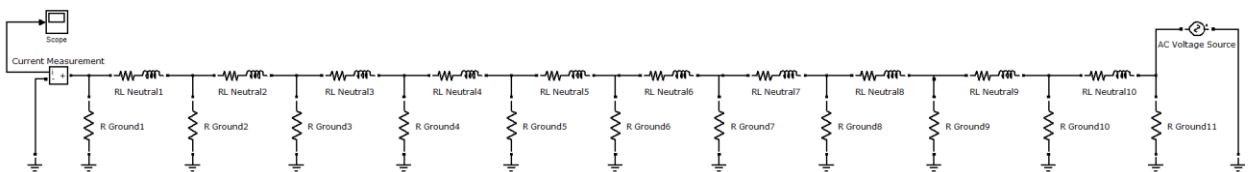


**Σχήμα 3.2.2-18:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100m  
 Μήκος αγωγού: 1km  
 Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 10 Ohm  
 $Z_{ουδετέρου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m  
 Πηγή τάσης 50V

Οι μετρήσεις και οι γραφικές παραστάσεις σε περίπτωση αποκοπής του ουδετέρου σε οποιοδήποτε άλλο σημείο είναι οι ίδιες με τις προηγούμενες.

### 3.3.1 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου ουδετέρου με άμεση γείωση (TT)

Για την ανίχνευση του σήματος ελέγχου εγχύθηκε στο ένα άκρο του ουδετέρου με άμεση γείωση σήμα πλάτους 50V σε συχνότητες 1000-15000 Hz και μελετήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης του στο άλλο άκρο αυτού. Ο αγωγός θεωρήθηκε με αντίσταση γείωσης 3000 Ohm ανά 100m ώστε να ληφθεί υπόψη ότι όλοι οι αγωγοί έχουν κάποια αγωγιμότητα προς γη.



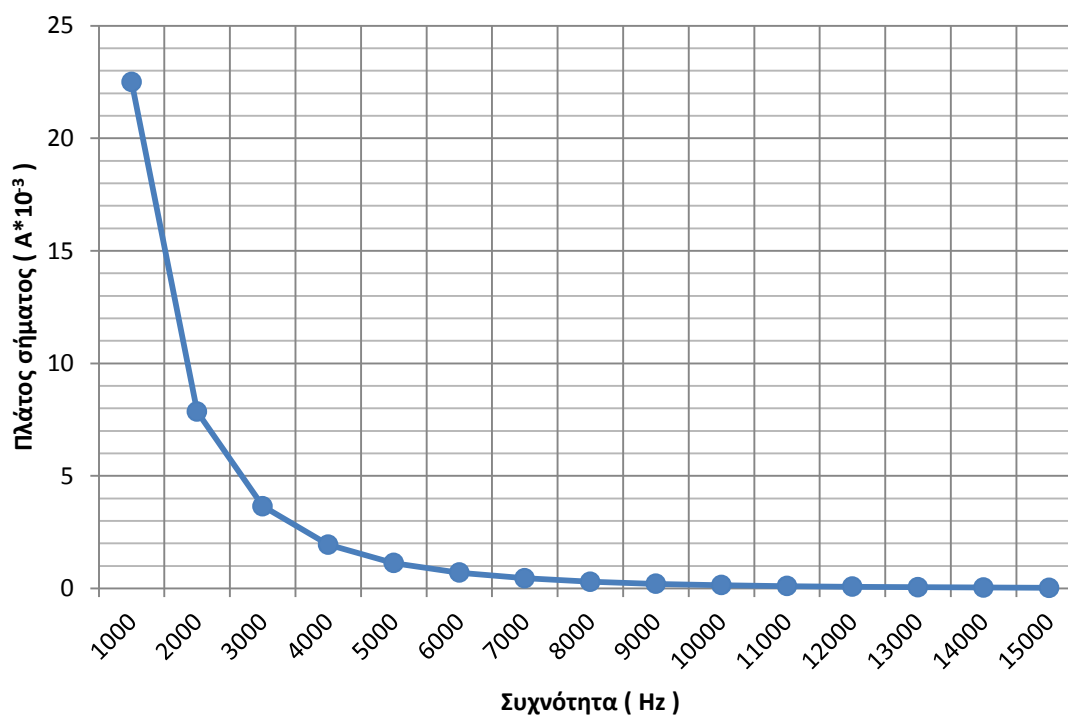
**Σχήμα 3.3.1-1:** Μοντελοποιημένος κομμένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με αντίσταση γείωσης ανά 100m  
 Μήκος αγωγού: 1km  
 Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 3000 Ohm  
 $Z_{ουδετέρου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m  
 Πηγή τάσης 50V

Σε όλες τις συχνότητες το σήμα που ανιχνεύθηκε ήταν ημιτονοειδές με διαφορετικό πλάτος για κάθε συχνότητα, όπως παρουσιάζεται στον πιο κάτω πίνακα.

Συχνότητα (Hz)	Πλάτος σήματος ελέγχου ( $A * 10^{-3}$ )
1000	22.5000
2000	7.8500
3000	3.6500
4000	1.9500
5000	1.1300

6000	0.7000
7000	0.4540
8000	0.3000
9000	0.2080
10000	0.1460
11000	0.1040
12000	0.0753
13000	0.0555
14000	0.0411
15000	0.0311

**Πίνακας 3.3.1-1 :** Πλάτος σήματος ελέγχου στο άκρο του ουδέτερου με άμεση γείωση

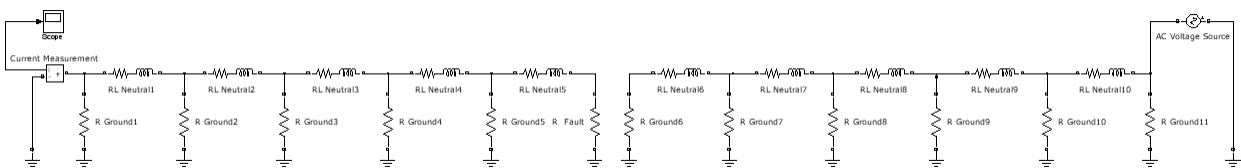


**Σχήμα 3.3.1-2 :** Γραφική παράσταση πλάτους σήματος ελέγχου σε ουδέτερο με άμεση γείωση

### 3.3.2 Μελέτη ανίχνευσης σήματος ελέγχου κομμένου ουδετέρου άμεσης γείωσης (TT) με αντίσταση γης

#### 1η Περίπτωση

Σ' αυτή τη περίπτωση μοντελοποιήθηκε ουδέτερος άμεσης γείωσης κομμένος κοντά στον ένα στύλο με το ένα του άκρο στη γη και το άλλο στον αέρα. Σήμα ελέγχου εγχύθηκε στο ένα άκρο του ουδετέρου και μελετήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης του στο άλλο άκρο αυτού. Αυτό έγινε για τις δυο ακραίες περιπτώσεις αντίστασης γης 20 Ohm και 400 Ohm και σε διαφορετικά σημεία αποκοπής.

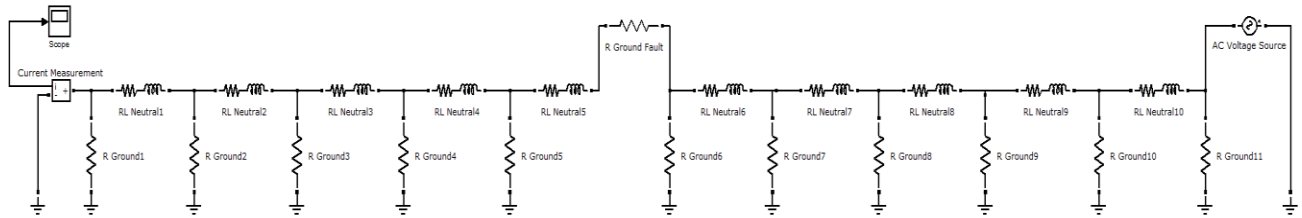


**Σχήμα 3.3.2-1:** Μοντελοποιημένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100 m κομμένος κοντά στον ένα στύλο με το ένα του άκρο στη γη και το άλλο στον αέρα  
Μήκος αγωγού: 1km  
Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 3000 Ohm  
Αντίσταση γης ( $R_{fault}$ ) = 20 Ohm, 400 Ohm  
 $Z_{ουδετέρου}$  ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100 m  
Πηγή τάσης 50V

Σε όλες τις περιπτώσεις το σήμα ελέγχου στο άκρο της γραμμής ήταν μη ανιχνεύσιμο (πλάτος μηδενικό).

#### 2η Περίπτωση

Σ' αυτή τη περίπτωση μοντελοποιήθηκε ουδέτερος κομμένος περίπου στη μέση δυο στύλων με τις δυο του άκρες να ακουμπούν στη γη. Σήμα ελέγχου εγχύθηκε στο ένα άκρο του ουδετέρου και μελετήθηκε η δυνατότητα ανίχνευσης του στο άλλο άκρο αυτού. Θεωρήθηκαν δυο ακραίες αντίστασης γης: 20 και 400 Ohm.



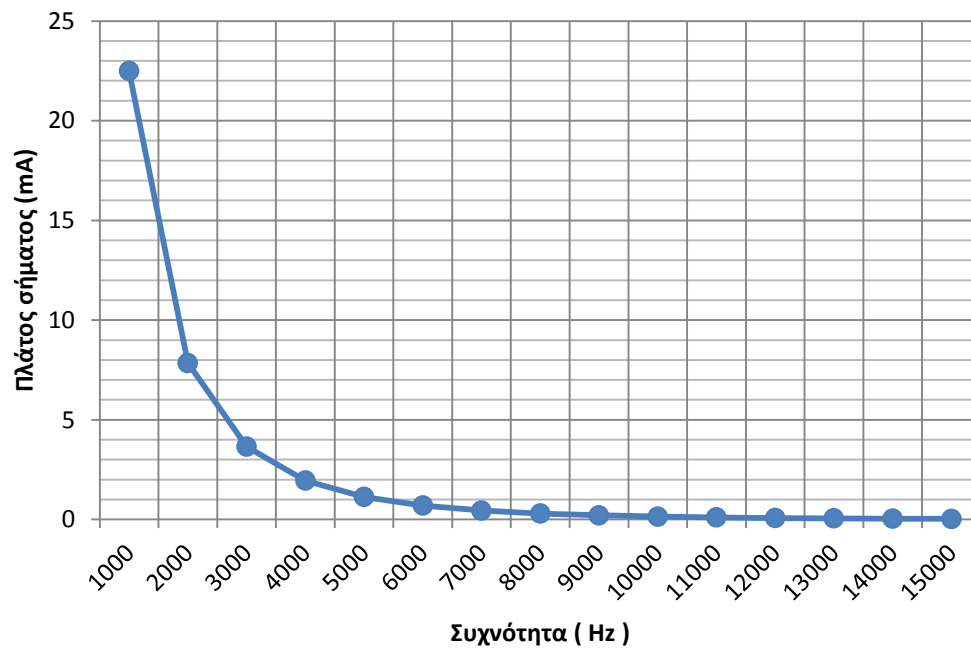
**Σχήμα 3.3.2-2:** Μοντελοποιημένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100 m κομμένος κομμένος περίπου στη μέση δυο στύλων με τις δυο του άκρες να ακουμπούν στη γη  
 Μήκος αγωγού: 1km  
 Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 3000 Ohm  
 Αντίσταση γης ( $R_{fault}$ ) = 20 Ohm, 400 Ohm  
 Ζουδετέρου ( $RL_{neutral}$ ) =  $0.0381+0.0294i$  ανά 100m  
 Πηγή τάσης 50V

Σε όλες τις συχνότητες το σήμα που ανιχνεύθηκε ήταν ημιτονοειδές με διαφορετικό πλάτος για κάθε συχνότητα, όπως παρουσιάζεται στον πιο κάτω πίνακα.

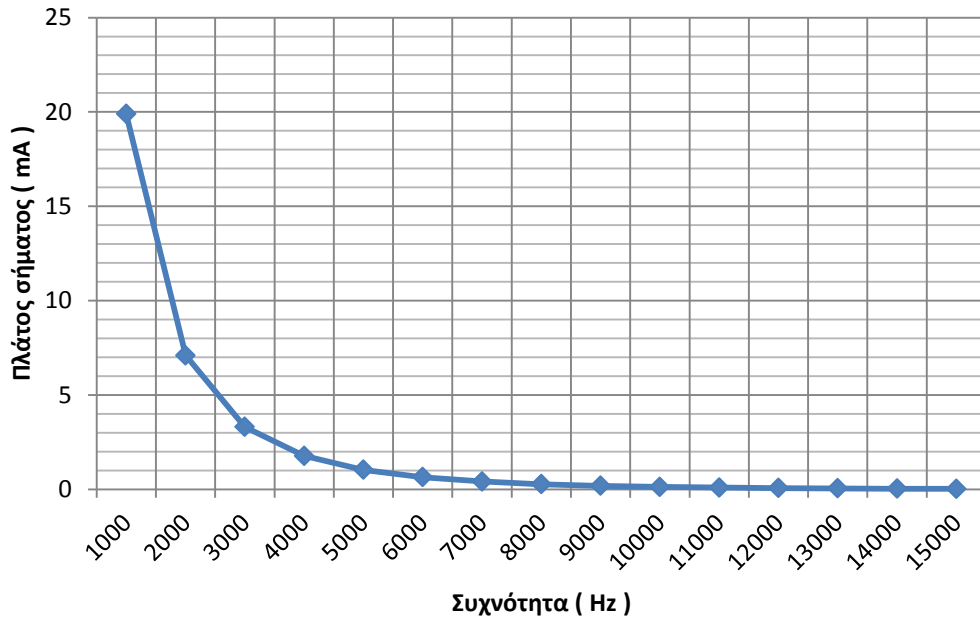
Συχνότητα (Hz)	Πλάτος σήματος ελέγχου (mA)	
	Αντίσταση Γης R=20 Ohm	Αντίσταση Γης R=400 Ohm
1000	22.5000	19.900
2000	7.8500	7.1000
3000	3.6500	3.3100
4000	1.9500	1.7800
5000	1.1300	1.0400
6000	0.7000	0.6500
7000	0.4540	0.4200
8000	0.3000	0.2800
9000	0.2080	0.1950
10000	0.1460	0.1350
11000	0.1040	0.0980
12000	0.0753	0.0712

13000	0.0555	0.0533
14000	0.0411	0.0395
15000	0.0311	0.0301

**Πίνακας 3.3.2-1 :** Μέγιστες τιμές σήματος ανάλογα με τη συχνότητα για αντιστάσεις γης R=20 Ohm και R=400 Ohm

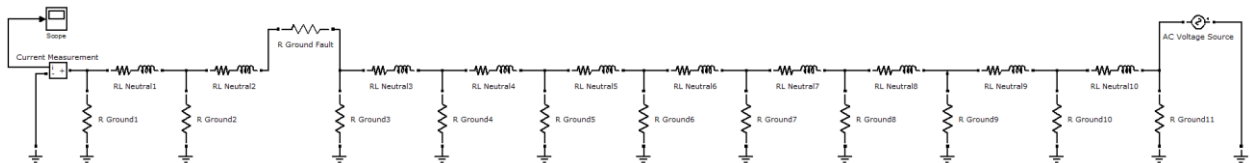


**Σχήμα 3.3.2-3 :** Γραφική παράσταση πλάτους σήματος ελέγχου σε ουδέτερο με σύστημα άμεσης γείωσης για R=20 Ohm



**Σχήμα 3.3.2-4 :** Γραφική παράσταση πλάτους σήματος ελέγχου σε ουδέτερο με σύστημα άμεσης γείωσης για  $R=400 \text{ Ohm}$

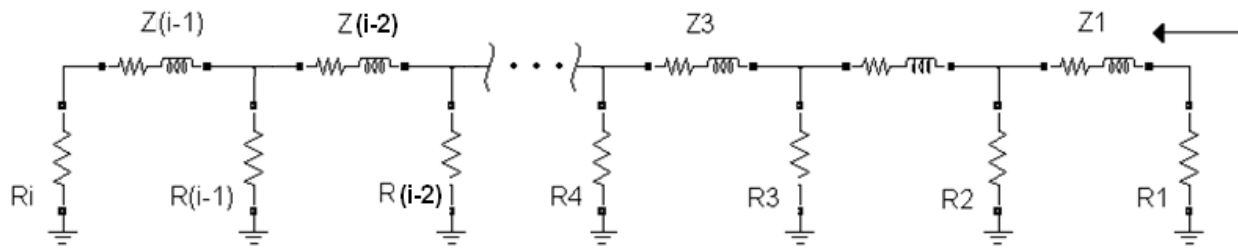
Σημείωση



**Σχήμα 3.2.2-5:** Μοντελοποιημένος ουδέτερος σε Simulink (Matlab) με ηλεκτρόδιο γείωσης ανά 100 m κομμένος κομμένος περίπου στη μέση δυο στύλων με τις δυο του άκρες να ακουμπούν στη γη  
 Μήκος αγωγού: 1km  
 Αντίσταση γείωσης ( $R_{ground}$ ) = 3000 Ohm  
 $Z_{ουδέτερου} (RL_{neutral}) = 0.0381+0.0294i$  ανά 100m  
 Πηγή τάσης 50V

Οι μετρήσεις και οι γραφικές παραστάσεις σε περίπτωση αποκοπής του ουδέτερου σε οποιοδήποτε άλλο σημείο είναι οι ίδιες με τις προηγούμενες.

### 3.4 Υπολογισμός συνάρτησης μεταφοράς πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου



Σχήμα 3.4-1: Πολλαπλά γειωμένος ουδέτερος

Ο υπολογισμός της συνάρτησης μεταφοράς πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου πραγματοποιείται θεωρώντας αρχικά την γείωση του υποσταθμού ( $R_i$ ) και την πρώτη αντίσταση γείωσης ( $R_{i-1}$ ) σε σειρά και παράλληλες με την τελευταία σύνθετη αντίσταση του αγωγού ( $Z_{i-1}$ ).

$$Z_{u,i-1} = (R_i + R_{i-1}) // Z_{i-1}$$

Η  $Z_{u,i}$  είναι σε σειρά με τη  $Z_{i-1}$ . Η νέα αυτή σύνθετη αντίσταση είναι παράλληλη με τις σε σειρά αντιστάσεις  $R_{i-2}$  και  $R_i$ .

$$Z_{u,i-2} = (Z_{u,i-1} + Z_{i-2}) // (R_i + R_{i-2})$$

Η πιο πάνω διαδικασία ακολουθείται μέχρι και την τελευταία σύνθετη αντίσταση του αγωγού ( $Z_1$ ) η οποία είναι σε σειρά με όλο το προηγούμενο και παράλληλα με τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_i$  που είναι σε σειρά.

Έτσι η συνάρτηση μεταφοράς μπορεί να δοθεί αναλυτικά ως:

$$H = Z_{u,1} = [\dots [ [(R_i + R_{i-1}) // Z_{i-1}] + Z_{i-2} ] // (R_i + R_{i-2}) ] + \dots + Z_1 ] // (R_i + R_1)$$



Πιο κάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αναλυτικού υπολογισμού της συνάρτησης μεταφοράς πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου μήκους 200m.

$$\begin{aligned}
 H &= [(R_3 + R_2) // Z_2] + Z_1 // (R_3 + R_1) \\
 &= \left[ \frac{R_3 Z_2 + R_2 Z_2}{R_3 + R_2 + Z_2} + Z_1 \right] // (R_3 + R_1) \\
 &= \left[ \frac{R_3 Z_2 + R_2 Z_2 + R_3 Z_1 + R_2 Z_1 + Z_1 Z_2}{R_3 + R_2 + Z_2} \right] // (R_3 + R_1) \\
 &= \frac{Z_2 (R_3^2 + R_3 R_2 + R_1 R_3 + R_1 R_2) + Z_1 (R_3^2 + R_3 R_2 + R_1 R_3 + R_1 R_2) + Z_1 Z_2 (R_1 + R_3)}{Z_2 (2R_3 + R_2 + R_1) + Z_1 (R_3 + R_2) + Z_1 Z_2 + R_3^2 + R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}
 \end{aligned}$$

Για  $R_1 = R_2 = R_3 = R$

$$H = \frac{4R^2 Z_2 + 4R^2 Z_1 + 2R Z_1 Z_2}{4R Z_2 + 2R Z_1 + 4R^2 + Z_1 Z_2}$$

Για  $Z_1 = Z_2 = R_\Gamma + j\omega L$

$$H = \frac{j\omega L (8R^2 + 4RR_\Gamma - 2R\omega L) + 8R^2 R_\Gamma + 2RR_\Gamma}{j\omega L (6R + 2R_\Gamma - \omega L) + 6RR_\Gamma + 4R^2 + R_\Gamma^2}$$

Για  $A = 8R^2 R_\Gamma + 2RR_\Gamma$ ,

$$B = 6RR_\Gamma + 4R^2 + R_\Gamma^2$$

$$H = \frac{A + (8R^2 + 4RR_\Gamma - 2R\omega L)j\omega L}{B + (6R + 2R_\Gamma - \omega L)j\omega L}$$

### 3.5 Επαναληπτική μέθοδος υπολογισμού τάσεων των φορτίων και ουδετέρου-γης σε κατάσταση ανοικτού ουδετέρου

Η επαναληπτική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των τάσεων του φορτίου και του ουδετέρου παρουσιάζεται πιο κάτω.

#### Αρχικές τιμές

Πριν να αρχίσει η πρώτη επανάληψη αρχικοποιούνται οι τιμές όλων των τάσεων που εμφανίζονται στο σύστημα (πηγής, φορτίου και ουδετέρου) σύμφωνα με τα δεδομένα που εισάγονται στην επαναληπτική μέθοδο .

$$E_a = 1 \text{ pu} \quad , \quad E_b = 1 \text{ pu} \angle -120^\circ \quad , \quad E_c = 1 \text{ pu} \angle 120^\circ$$

$$V_{an}^{(0)} = 1 \text{ pu} \quad , \quad V_{bn}^{(0)} = 1 \text{ pu} \angle -120^\circ \quad , \quad V_{cn}^{(0)} = 1 \text{ pu} \angle 120^\circ \quad , \quad V_{ng} = 0 \text{ pu}$$

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι αντιστάσεις των φορτίων των τριών φάσεων για τρεις περιπτώσεις:

#### ➤ Φορτίο σταθερής ισχύος

$$Z_{cp,a}^{(0)} = \frac{S_{q,a} \cdot \cos\varphi}{V_{an}^2} \quad , \quad Z_{cp,b}^{(0)} = \frac{S_{q,b} \cdot \cos\varphi}{V_{bn}^2} \quad , \quad Z_{cp,c}^{(0)} = \frac{S_{q,c} \cdot \cos\varphi}{V_{cn}^2}$$

#### ➤ Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας

$$Z_{ci,a}^{(0)} = \frac{1}{S_{q,a} \cdot \cos\varphi} \quad , \quad Z_{ci,b}^{(0)} = \frac{1}{S_{q,b} \cdot \cos\varphi} \quad , \quad Z_{ci,c}^{(0)} = \frac{1}{S_{q,c} \cdot \cos\varphi}$$

#### ➤ Μικτό φορτίο

$$Z_a^{(0)} = \frac{Z_{cp,a}^{(0)} \cdot Z_{ci,a}^{(0)}}{Z_{cp,a}^{(0)} + Z_{ci,a}^{(0)}} \quad , \quad Z_b^{(0)} = \frac{Z_{cp,b}^{(0)} \cdot Z_{ci,b}^{(0)}}{Z_{cp,b}^{(0)} + Z_{ci,b}^{(0)}} \quad , \quad Z_c^{(0)} = \frac{Z_{cp,c}^{(0)} \cdot Z_{ci,c}^{(0)}}{Z_{cp,c}^{(0)} + Z_{ci,c}^{(0)}}$$

### 1η επανάληψη

Υπολογίζεται η τάση του ουδετέρου-γης σύμφωνα με τον τύπο της παραγράφου 1.3.1 για ασύμμετρη φόρτιση.

$$V_{ng}^{(1)} = \frac{E_a + E_b \frac{Z_a}{Z_b} + E_c \frac{Z_a}{Z_c}}{\frac{Z_a}{Z_n} + 1 + \frac{Z_a}{Z_b} + \frac{Z_a}{Z_c}}$$

Η τάση αυτή αφαιρείται από κάθε τάση πηγής και υπολογίζονται οι νέες τάσεις φορτίου όπως και οι νέες αντιστάσεις φάσεων.

$$V_{an}^{(1)} = E_a - V_{ng}^{(1)}$$

$$V_{bn}^{(1)} = E_b - V_{ng}^{(1)}$$

$$V_{cn}^{(1)} = E_c - V_{ng}^{(1)}$$

$$\begin{array}{ccc} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{array}$$

Ακολουθεί η επόμενη επανάληψη μετά από έλεγχο της συνθήκης τερματισμού στην οποία ελέγχεται η σύγκλιση των τάσεων.

Συνθήκη τερματισμού:  $|V_{an}^{(i)} - V_{an}^{(i-1)}| < 0.00001$

$$|V_{bn}^{(i)} - V_{bn}^{(i-1)}| < 0.00001$$

$$|V_{cn}^{(i)} - V_{cn}^{(i-1)}| < 0.00001$$

$$|V_{ng}^{(i)} - V_{ng}^{(i-1)}| < 0.00001$$

Η παραπάνω μέθοδος υλοποιήθηκε σε συνάρτηση (function) στη Matlab (βλ. Παράρτημα Α). Ο συντελεστής ισχύος θεωρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις σταθερός και ίσος με 0.9 ενώ η αντίσταση του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου (1 km) ίση με 1.43 α.μ.. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

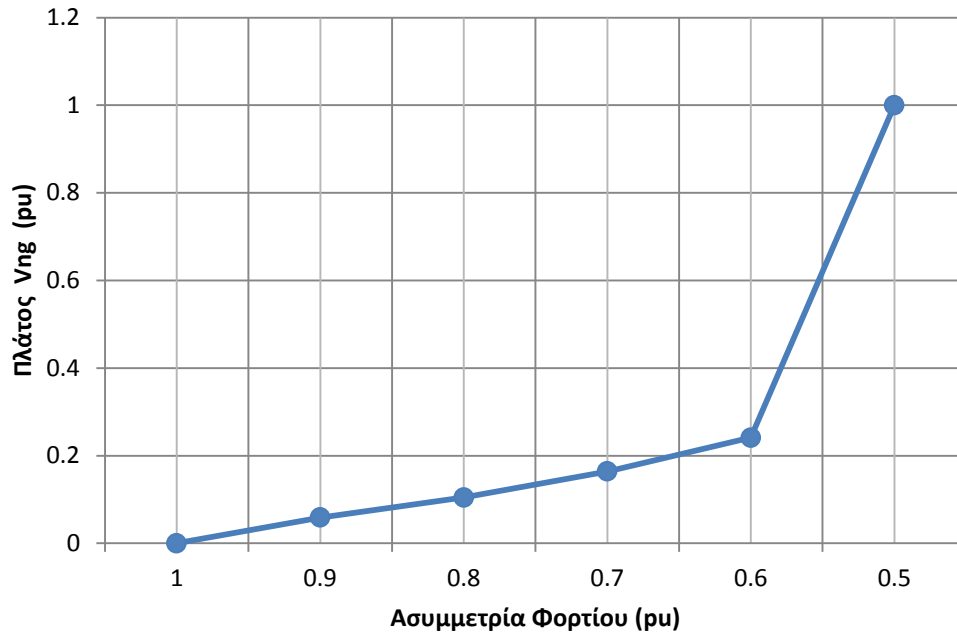
1<sup>η</sup> Περίπτωση: Φορτίο σταθερής ισχύος

Στη περίπτωση που το φορτίο είναι σταθερής ισχύος η τάση ουδετέρου  $V_{ng}$  συγκλίνει στο μηδέν για συμμετρικό φορτίο και στο 1 pu σε όλες τις περιπτώσεις ασυμμετρίας φορτίου. Η μια τάση φορτίου ουδετέρου ( $V_{bn}$ ) συγκλίνει στο μηδέν ενώ οι άλλες δυο ( $V_{an}$ ,  $V_{cn}$ ) σε πλάτος περίπου 1.73 pu.

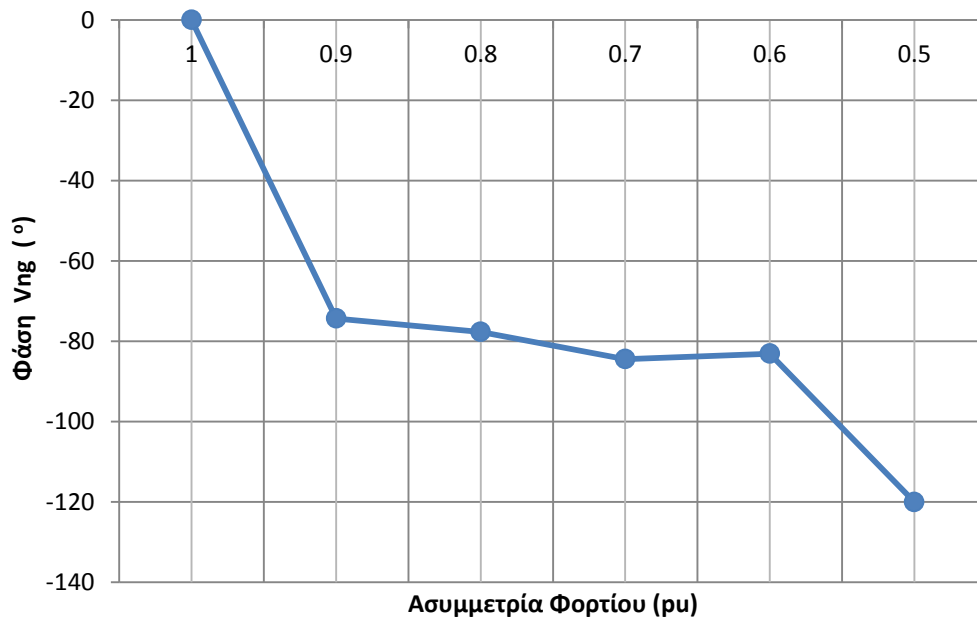
2<sup>η</sup> Περίπτωση: Μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 70% της συνολικής φόρτισης)

<i>Ασυμμετρία φορτίου (α.μ)</i>	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ng}$
1-1-1	1 + 0i	-0.5 - 0.866i	-0.5 + 0.866i	0
1-1-0.9	0.9141 + 0.0566i	-0.5159 - 0.8094i	-0.5159 + 0.9226i	0.0159 - 0.0566i
1-1-0.8	0.9777 + 0.109i	-0.5223 - 0.7571i	-0.5223 + 0.975i	0.0223 - 0.102i
1-1-0.7	0.9852 + 0.1634i	-0.5148 - 0.7026i	-0.5148 + 1.0295i	0.0148 - 0.1634i
1-1-0.6	1.0291 + 0.2393i	-0.4709 - 0.6267i	-0.4709 + 1.1053i	0.0291 - 0.2393i
1-1-0.5	1.5 + 0.866i	0	0 + 1.7321i	-0.5 - 0.866i

**Πίνακας 3.5-1** : Τάσης φορτίου ουδετέρου και ουδετέρου γης για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 70% της συνολικής φόρτισης)



**Σχήμα 3.5-2 :** Πλάτος τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 70% της συνολικής φόρτισης)

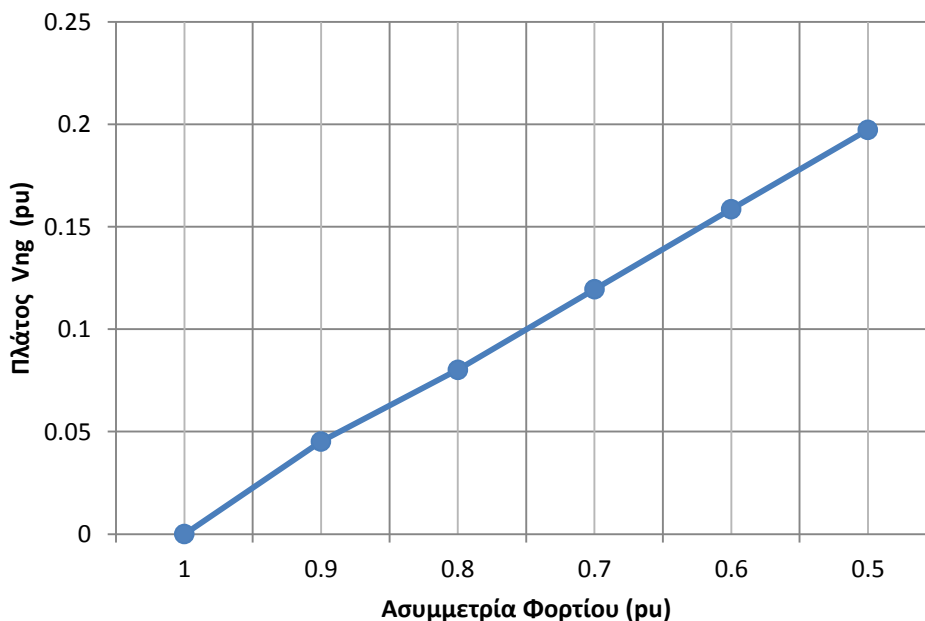


**Σχήμα 3.5-3 :** Φάση τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 70% της συνολικής φόρτισης)

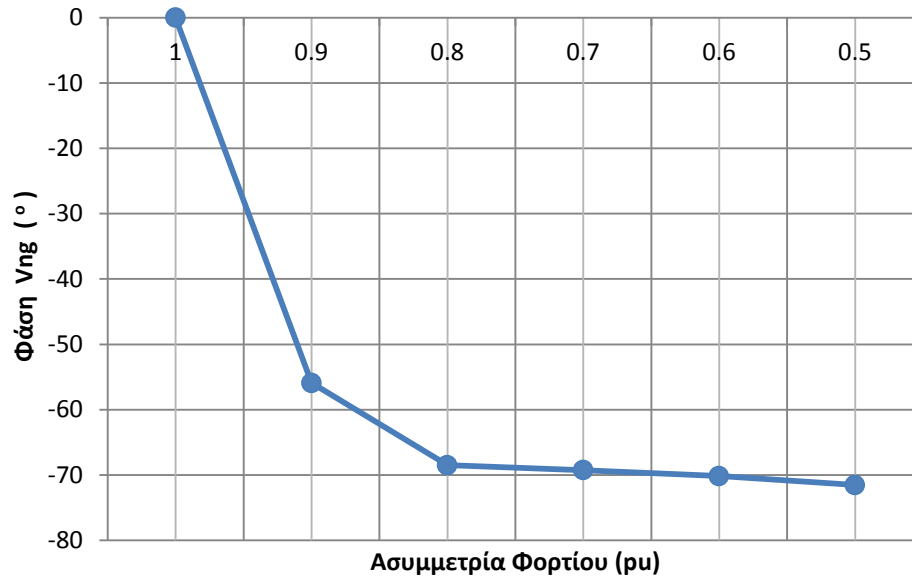
3<sup>η</sup> Περίπτωση : Μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 40% της συνολικής φόρτισης)

Ασυμμετρία φορτίου (α.μ)	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ng}$
1-1-1	1 + 0i	-0.5 - 0.866	-0.5 + 0.866i	0
1-1-0.9	0.9847 + 0.0374	-0.5153 - 0.8286	-0.5153 + 0.9034	0.0253 - 0.0374
1-1-0.8	0.9706 + 0.0746	-0.5294 - 0.7915	-0.5294 + 0.9406	0.0294 - 0.0746
1-1-0.7	0.9577 + 0.1117	-0.5423 - 0.7543	-0.5423 + 0.9777	0.0423 - 0.1117
1-1-0.6	0.9462 + 0.1491	-0.5538 - 0.7169	-0.5538 + 1.0151	0.0538 - 0.1491
1-1-0.5	0.9365 + 0.1871	-0.5635 - 0.679	-0.5635 + 1.0531	0.0625 - 0.1871

**Πίνακας 3.5-2 :** Τάσης φορτίου ουδετέρου και ουδετέρου γης για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 40% της συνολικής φόρτισης)



**Σχήμα 3.5-4 :** Πλάτος τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 40% της συνολικής φόρτισης)

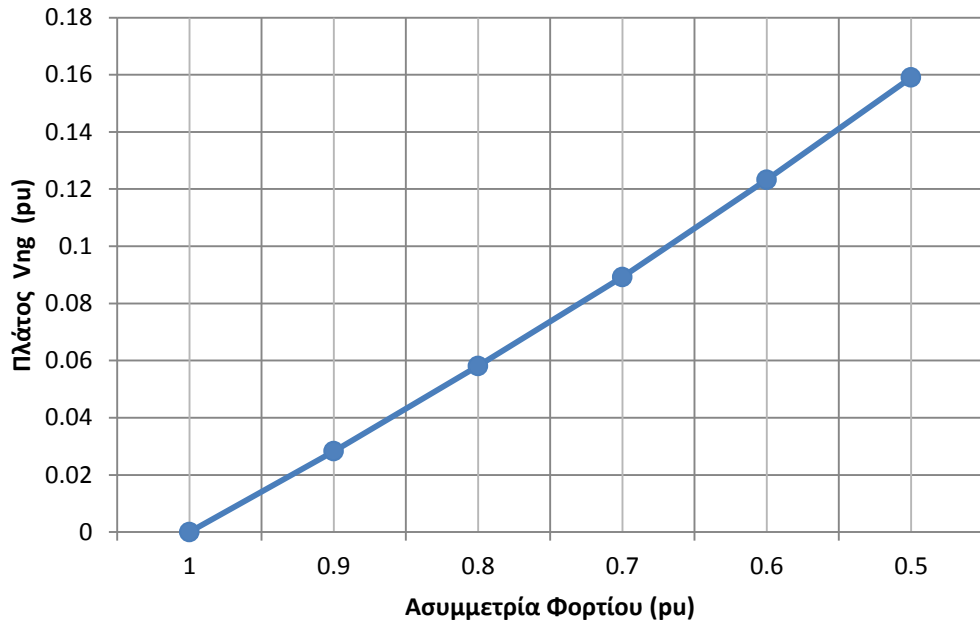


**Σχήμα 3.5-5 :** Φάση τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για μικτό φορτίο (φορτία σταθερής ισχύος ίσα προς το 40% της συνολικής φόρτισης)

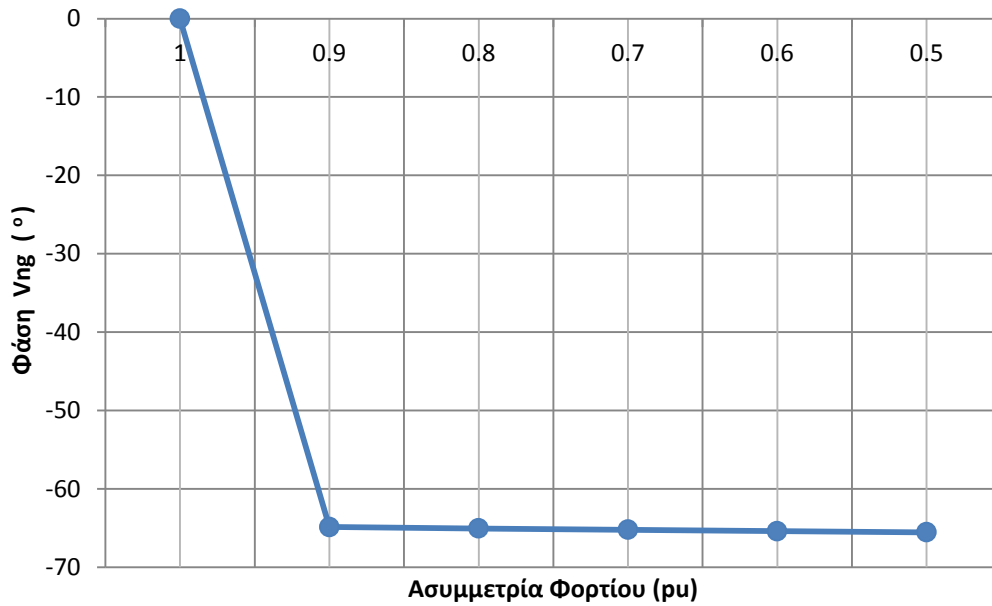
4<sup>η</sup> Περίπτωση : Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας

<i>Ασυμμετρία φορτίου (α.μ)</i>	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ng}$
1-1-1	$1 + 0i$	$-0.5 - 0.866j$	$-0.5 + 0.866j$	0
1-1-0.9	$0.988 + 0.0256j$	$-0.512 - 0.8405j$	$-0.512 + 0.8916j$	$0.012 - 0.0256j$
1-1-0.8	$0.9755 + 0.0527j$	$-0.5245 - 0.8133j$	$-0.5245 + 0.9187j$	$0.0245 - 0.0527j$
1-1-0.7	$0.9624 + 0.0515j$	$-0.5376 - 0.7845j$	$-0.5376 + 0.9475j$	$0.0374 - 0.081j$
1-1-0.6	$0.9487 + 0.1121j$	$-0.5513 - 0.7539j$	$-0.5513 + 0.9781j$	$0.0513 - 0.1121j$
1-1-0.5	$0.9342 + 0.1448j$	$-0.5658 - 0.7212j$	$-0.5658 + 0.108j$	$0.0658 - 0.1448j$

**Πίνακας 3.5-3 :** Τάσεις φάσεων ουδετέρου και ουδετέρου γης για φορτία σταθερής αγωγιμότητας



**Σχήμα 3.5-6 :** Πλάτος τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για φορτία σταθερής αγωγιμότητας



**Σχήμα 3.5-7 :** Φάση τάσης ουδετέρου γής ( $V_{ng}$ ) για φορτία σταθερής αγωγιμότητας



**Κεφάλαιο**

**4**

**Σχόλια επί των αποτελεσμάτων**

#### **4.1 Παρατηρήσεις – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.1**

Στη παράγραφο 3.1.1 μετρήθηκε η αντίσταση εισόδου σήματος ελέγχου του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου σε συχνότητα 50 Hz κανονικής λειτουργίας δικτύου και σε συχνότητες 1000-15000 Hz (συχνότητες σήματος ελέγχου).

Με βάση τους πίνακες των υπολογισμών παρατηρείται ότι καθώς η συχνότητα αυξάνεται η αντίσταση εισόδου αυξάνεται και τείνει σε μια σταθερή τιμή ίση περίπου με την αντίσταση γείωσης. Αυτό εξηγείται από τη συνάρτηση μεταφοράς η οποία υπολογίζεται στη παράγραφο 3.4 και οφείλεται στην ύπαρξη επαγωγής στον αγωγό του ουδετέρου η οποία αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας ( $X = 2\pi fL$ ).

Στη παράγραφο 3.1.2 και 3.1.3 μετρήθηκε η αντίσταση εισόδου σήματος ελέγχου του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου κομμένου σε απόσταση περίπου 400 και 800 μέτρων αντίστοιχα. Σύμφωνα με τους πίνακες των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι στις μεγάλες συχνότητες η αντίσταση εισόδου αυξάνεται και τείνει προς μια σταθερή τιμή ίση περίπου με την αντίσταση γείωσης (όπως και στην παράγραφο 3.1.1) ανεξαρτήτως του μήκους του αγωγού. Στα 50 Hz (κανονική λειτουργία δικτύου) παρουσιάστηκε μια μικρή μείωση της αντίστασης εισόδου ανάλογη του μήκους του αγωγού ουδετέρου.

#### **4.2 Παρατηρήσεις – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.2**

Στη παράγραφο 3.2.1 το πλάτος του σήματος ελέγχου που ανιχνεύθηκε σε όλο το εύρος των συχνοτήτων που μελετήθηκε (1000 – 15000 Hz) ήταν πολύ μικρό σε τάξεις μεγέθους από  $10^{-4}$ - $10^{-10}$ . Παρά το γεγονός ότι το σήμα ελέγχου που εγχύθηκε στον πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο ήταν ημιτονοειδές πλάτους 50V ανιχνεύθηκε ποικιλία μη ημιτονοειδών κυματομορφών και στις περισσότερες περιπτώσεις μη περιοδικών.

Στη 1<sup>η</sup> περίπτωση της παραγράφου 3.2.2 με κομμένο πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο δεν υπήρχε ανίχνευση σήματος σε καμία συχνότητα, θέση ή αντίσταση γης.

Στην 2<sup>η</sup> περίπτωση ανίχνευσης σήματος ελέγχου με αντίσταση γης 20 Ohm παρατηρήθηκαν μεγέθη και ποικιλία κυματομορφών όπως στην παράγραφο 3.2.1. Η μοναδική διαφορά ήταν ότι, σε όποια συχνότητα εμφανιζόταν παλμός, η διάρκεια του ήταν πολύ μικρότερη της διάρκειας του παλμού που ανιχνεύθηκε χωρίς αντίσταση γης. Στα 400 Ohm οι κυματομορφές ήταν πανομοιότυπες με αυτές των 20 Ohm με διαφορά ότι το μέγιστο πλάτος του σήματος που ανιχνεύθηκε ήταν μια ή δυο τάξεις μεγέθους μικρότερο. Και στις δυο ακραίες περιπτώσεις με αντίσταση γης το σημείο αποκοπής του ουδέτερου δεν επηρέασε καθόλου τις μετρήσεις και τις κυματομορφές, αποτέλεσμα το οποίο ήταν αναμενόμενο αφού στις μεγάλες συχνότητες η αντίσταση του πολλαπλά γειωμένου ουδέτερου είναι ανεξάρτητη του μήκους του.

### **4.3 Παρατηρήσεις – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.3**

Σε ουδέτερο αγωγό με σύστημα άμεσης γείωσης (TT) το σήμα που ανιχνεύτηκε ήταν πάντα ημιτονοειδές λόγω της απουσίας πολλαπλών γειώσεων που αλλάζουν τη συνάρτηση μεταφοράς και προκαλούν αλλοιώσεις στο σήμα εισόδου. Το πλάτος του ανιχνευθέντος σήματος μειωνόταν καθώς αυξανόταν η συχνότητα του σήματος ελέγχου που εγχύθηκε στον αγωγό. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς με την αύξηση της συχνότητας αυξάνεται η σύνθετη αντίσταση του αγωγού.

Στη 1<sup>η</sup> περίπτωση της παραγράφου 3.2.2 με κομμένο ουδέτερο άμεσης γείωσης δεν υπήρχε ανίχνευση σήματος σε καμία συχνότητα, θέση αποκοπής ή αντίσταση γης.

Στη 2<sup>η</sup> περίπτωση της παραγράφου 3.2.2 με κομμένο ουδέτερο άμεσης γείωσης το σήμα ελέγχου που ανιχνεύθηκε ήταν και πάλι ημιτονοειδές σε κάθε συχνότητα ή θέση αποκοπής. Με αντίσταση γης 20 Ohm το σήμα δεν παρουσίασε σχεδόν καμία διαφορά με την περίπτωση χωρίς αποκοπή ενώ με αντίσταση γης 400 Ohm το σήμα ανιχνεύθηκε με ελάχιστα μικρότερο πλάτος.

#### **4.4 Παρατηρήσεις – Σχόλια επί των αποτελεσμάτων της παραγράφου 3.5**

Σε όλες τις περιπτώσεις, με συμμετρικό φορτίο η τάση ουδετέρου ( $V_{ng}$ ) είναι μηδενική καθώς τα ρεύματα και στις τρεις φάσεις είναι συμμετρικά. Στην περίπτωση που υπάρχει φορτίο σταθερής ισχύος (1<sup>η</sup> ακραία περίπτωση) η τάση ουδετέρου-γης συγκλίνει σε μια οριακή τιμή η οποία εξαρτάται από την ασυμμετρία. Η τάση φάσης-ουδετέρου της πιο φορτισμένης φάσης συγκλίνει στο μηδέν. Αυτό συμβαίνει επειδή όσο περισσότερο φορτισμένη είναι η φάση, τόσο περισσότερο η φάση ουδετέρου-γης μετακινείται προς αυτή. Αυτό μειώνει την τάση φάσης-ουδετέρου και καθώς το φορτίο είναι σταθερής ισχύος αυξάνεται το ρεύμα της φάσης αυτής. Τελικά δημιουργείται ένας κύκλος ανάδρασης.

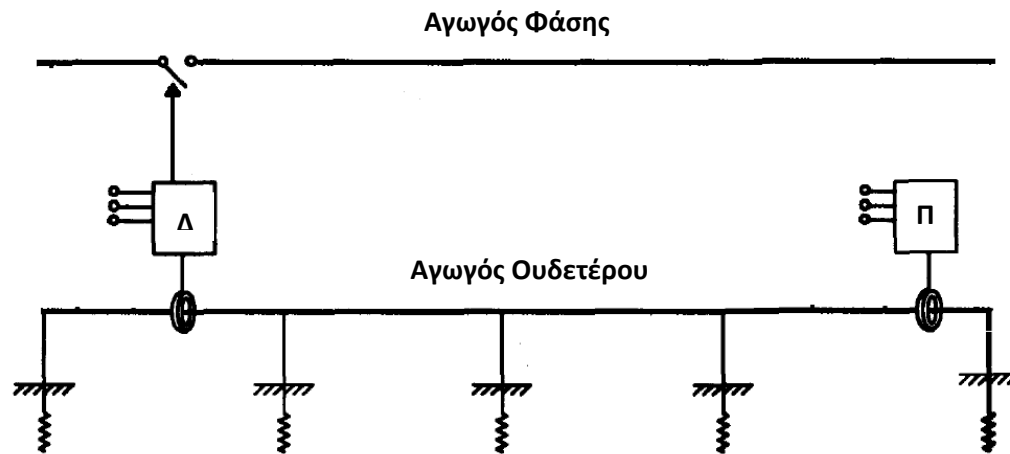
Καθώς το φορτίο μεταβάλλεται από σταθερής ισχύος προς σταθερής αγωγιμότητας (μικτό φορτίο) παρατηρήθηκε ότι σε μια τιμή του λόγου των φορτίων σταθερής ισχύος και σταθερής αγωγιμότητας (η οποία είναι ανάλογη της αντίστασης γείωσης) ο κύκλος ανάδρασης παύει και οι τιμές της τάσης φάσης ουδετέρου δεν συγκλίνουν στο μηδέν.

Στη περίπτωση που υπάρχει φορτίο σταθερής αγωγιμότητας (2<sup>η</sup> ακραία περίπτωση) η αύξηση της ασυμμετρίας του φορτίου προκαλεί ανάλογη αύξηση του πλάτους της τάσης του ουδετέρου.

#### **4.5 Μια προτεινόμενη μέθοδος προστασία σε περίπτωση αποκοπής ουδετέρου αγωγού**

Η προστασία από τις συνέπειες της αποκοπής του ουδετέρου σε γραμμή χαμηλής τάσης θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω έγχυσης σήματος ελέγχου μεγάλων συχνοτήτων στον τελευταίο στύλο της γραμμής. Το σήμα αυτό μπορεί να εγχυθεί στον ουδέτερο χρησιμοποιώντας επαγωγικούς ή χωρητικούς μετασχηματιστές σύζευξης και μπορεί να έχει τη μορφή παλμού ή συνεχούς σήματος. Μέσω του ίδιου συστήματος (με επαγωγικούς ή χωρητικούς μετασχηματιστές) το σήμα θα ανιχνεύεται στην αρχή της γραμμής, μετά τον μετασχηματιστή MT/XT. Σε περίπτωση παλμού το σήμα θα πρέπει να ανιχνεύεται σε τακτά χρονικά διαστήματα

ενώ στη περίπτωση συνεχούς σήματος θα πρέπει να ανιχνεύεται καθ'όλη τη διάρκεια λειτουργίας της γραμμής. Όταν το σήμα ελέγχου δεν ανιχνευθεί το σύστημα θεωρεί ότι υπάρχει αποκοπή ουδετέρου και με τη βοήθεια ενός ρελέ και ενός αυτόματου διακόπτη θέτει εκτός τη γραμμή.



Σχήμα 4.5-1 : Σύστημα προστασίας σε περίπτωση αποκοπής ουδετέρου αγωγού

Δ : Δέκτης και ρελαί διακοπής αγωγού φάσης

Π: Πομπός έγχυσης σήματος ελέγχου

**Κεφάλαιο**

# **5**

**Γενικά συμπεράσματα**

## 5 Γενικά συμπεράσματα

Στη εργασία αυτή μελετήθηκε η αντίσταση εισόδου σε πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο για μεγάλες συχνότητες και παρατηρήθηκε ότι τείνει σε μια σταθερή τιμή ίση περίπου με την αντίσταση γείωσης. Ακολούθως εγχύθηκε σήμα ελέγχου σε πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο αγωγό και ουδέτερο αγωγό με σύστημα άμεσης γείωσης. Το σήμα ελέγχου που ανιχνεύθηκε για κανονική λειτουργία του πολλαπλά γειωμένου ουδετέρου ήταν πολύ μικρών τάξεων μεγέθους και ποικίλων κυματομορφών. Στην περίπτωση αποκοπής του το σήμα ήταν μη ανιχνεύσιμο ενώ στην ειδική περίπτωση αποκοπής του με αντίσταση γης παρουσιάστηκε μείωση του πλάτους και της διάρκειας. Σε ουδέτερο αγωγό με σύστημα άμεσης γείωσης το σήμα που ανιχνεύθηκε ήταν πάντα ημιτονοειδές. Στην περίπτωση αποκοπής του το σήμα ήταν και πάλι μη ανιχνεύσιμο ενώ στην ειδική περίπτωση αποκοπής του με αντίσταση γης παρουσιάστηκε πολύ μικρή μείωση του πλάτους. Και με τα δύο είδη γειώσεων ουδετέρου η θέση αποκοπής δεν επηρέασε τα αποτελέσματα.

Μελετήθηκε επίσης η τάση ουδετέρου-γης σε κατάσταση ανοικτού ουδετέρου η οποία είναι μηδενική σε περίπτωση συμμετρικού φορτίου. Για φορτίο σταθερής ισχύος η τάση αυτή συγκλίνει σε μια οριακή τιμή ενώ για φορτίο σταθερής αγωγιμότητας το πλάτος της είναι ανάλογο της ασυμμετρίας του φορτίου.

Με βάση τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής, η υλοποίηση του συστήματος που περιγράφεται στην παράγραφο 4.5 συναντά πολλές δυσκολίες. Αυτό οφείλεται στην δυσκολία ανίχνευσης του σήματος ελέγχου, ιδιαίτερα στον πολλαπλά γειωμένο ουδέτερο καθώς η τάξη μεγέθους του είναι πολύ μικρή και οι αλλαγές του σε περίπτωση σφάλματος μέσω γης είναι αμελητέες με αποτέλεσμα να γίνεται πολύ δύσκολη η αξιοποίηση του στην πράξη.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Κώδικας συνάρτησης (function) επαναληπτικής μεθόδου υπολογισμού τάσεων φορτίου και ουδετέρου σε MATLAB.

```
function [ van, vbn, vcn, vng] = approx_cp( ...
    load_a, load_b, load_c, pf, cp_ci_ratio, zn, ea, eb, ec)

% Αρχικοποίηση του πλάτους και της γωνιάς όλων των τάσεων που εμφανίζονται στο σύστημα
(πηγής, φορτίου και ουδετέρου) σύμφωνα με τα δεδομένα που εισάγονται στη συνάρτηση.

a = -0.5 + 1i*sqrt(3)/2;

if nargin<7
    ea = 1;
    eb = a^2;
    ec = a;
end

convergence = 0;

van(1) = 1;
vbn(1) = a^2;
vcn(1) = a;
vng(1) = 0;

% Διακρίνονται οι περιπτώσεις φορτίου σταθερής ισχύος, σταθερής αγωγιμότητας και μικτού
φορτίου και υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση οι αντιστάσεις των φάσεων.

load_a = load_a * (pf + 1i * sin(acos(pf)));
load_b = load_b * (pf + 1i * sin(acos(pf)));
load_c = load_c * (pf + 1i * sin(acos(pf)));

imp_a_ci = 1/conj(load_a*(1-cp_ci_ratio));
imp_b_ci = 1/conj(load_b*(1-cp_ci_ratio));
imp_c_ci = 1/conj(load_c*(1-cp_ci_ratio));

imp_a_cp(1) = abs(van(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_a);
imp_b_cp(1) = abs(vbn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_b);
imp_c_cp(1) = abs(vcn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_c);

if (isinf(imp_a_ci) == 1) || (isinf(imp_b_ci) == 1) || (isinf(imp_c_ci) == 1)
    imp_a(1) = imp_a_cp(1);
    imp_b(1) = imp_b_cp(1);
    imp_c(1) = imp_c_cp(1);
elseif (isinf(imp_a_cp(1)) == 1) || (isinf(imp_b_cp(1)) == 1) ||
(isinf(imp_c_cp(1)) == 1)
    imp_a(1) = imp_a_ci;
    imp_b(1) = imp_b_ci;
```



```

imp_c(1) = imp_c_ci;
else
imp_a(1) = (imp_a_ci * abs(van(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_a))...
/ (imp_a_ci + abs(van(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_a));
imp_b(1) = (imp_b_ci * abs(vbn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_b))...
/ (imp_b_ci + abs(vbn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_b));
imp_c(1) = (imp_c_ci * abs(vcn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_c))...
/ (imp_c_ci + abs(vcn(1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_c));
end

```

‡ Υπολογισμός της τάσης ουδετέρου-γης και τάσεων φορτίου-ουδετέρου για εισαγωγή τους στον επαναληπτικό βρόγχο.

```

vng(1) = (ea + eb*imp_a(1)/imp_b(1) + ec*imp_a(1)/imp_c(1))...
/ (imp_a(1)/zn + 1 + imp_a(1)/imp_b(1) + imp_a(1)/imp_c(1));

van(1) = ea - vng(1);
vbn(1) = eb - vng(1);
vcn(1) = ec - vng(1);

```

```

ep = 0.00001;
i = 1;
while convergence == 0
i = i + 1;

```

‡ Επαναληπτικός βρόγχος όπου διακρίνονται οι περιπτώσεις φορτίου σταθερής ισχύος, σταθερής αγωγιμότητας και μικτού φορτίου και υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση οι αντιστάσεις των φάσεων.

```

imp_a_cp(i) = abs(van(i-1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_a);
imp_b_cp(i) = abs(vbn(i-1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_b);
imp_c_cp(i) = abs(vcn(i-1))^2/conj(cp_ci_ratio * load_c);

if (isinf(imp_a_ci) == 1) || (isinf(imp_b_ci) == 1) || (isinf(imp_c_ci)
== 1)
imp_a(i) = imp_a_cp(i);
imp_b(i) = imp_b_cp(i);
imp_c(i) = imp_c_cp(i);
elseif (isinf(imp_a_cp(i)) == 1) || (isinf(imp_b_cp(i)) == 1) ||
(isinf(imp_c_cp(i)) == 1)
imp_a(i) = imp_a_ci;
imp_b(i) = imp_b_ci;
imp_c(i) = imp_c_ci;
else
imp_a(i) = (imp_a_ci * imp_a_cp(i)) / (imp_a_ci + imp_a_cp(i));
imp_b(i) = (imp_b_ci * imp_b_cp(i)) / (imp_b_ci + imp_b_cp(i));
imp_c(i) = (imp_c_ci * imp_c_cp(i)) / (imp_c_ci + imp_c_cp(i));
end

vng(i) = (ea + eb*imp_a(i)/imp_b(i) + ec*imp_a(i)/imp_c(i))...
/ (imp_a(i)/zn + 1 + imp_a(i)/imp_b(i) + imp_a(i)/imp_c(i));

van(i) = ea - vng(i);
vbn(i) = eb - vng(i);

```

```
vcn(i) = ec - vng(i);
```

% Συνθήκη ελέγχου σύγκλισης για τερματισμό επαναληπτικού βρόγχου

```
if (abs(van(i)-van(i-1))<ep) && (abs(vbn(i)-vbn(i-1))<ep) && ...  
    (abs(vcn(i)-vcn(i-1))<ep) && (abs(vng(i)-vng(i-1))<ep)  
    convergence = 1;  
end  
iter = i;  
if iter == 10000  
    convergence = 1;  
end  
end
```

# Βιβλιογραφία

- [1] Μπούρκας Π.Δ., Καραγιαννόπουλος Κ.Γ., Βιομηχανικές Ηλεκτρικές Διατάξεις και Υλικά, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2003.
- [2] ΜΙΧ. Π. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ , Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας , Τόμος Ι. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1994
- [3] Κ. ΒΟΥΡΝΑΣ , Γ. ΚΟΝΤΑΞΗ , Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 2001
- [4] Μπούρκας Π.Δ., Εφαρμογές Κτιριακών και Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1998
- [5] ΔΕΗ, 'Κανονισμός ΟΔ-22/ΔΕΔ-ΤΤΕ Δ-4/4-7-88', 1988
- [6] ΔΕΗ, 'Προγραμματισμός και παρακολούθηση των εργασιών συντήρησης των εγκαταστάσεων διανομής', Οδηγία διανομής Νο 9, Διεύθυνση Κατασκευών και Συντηρήσεων Δικτύων (ΔΚΣΔ-ΤΕΣΔ) Έκδοση 3η, 1-7-2003, 2003
- [7] Broadband over Power Lines (BPL), Developments and Policy Issues, Directorate for science, technology and industry committee for information, computer and communications policy. Byung-Wook Kwon, 4/06/2009
- [8] Broadband Powerline Communications Networks, Network Design, Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralf Lehnert, 2004