



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Τίτλος:**

**Τεχνολογίες προσομοίωσης δικτύων μεταφοράς  
ηλεκτρικής ενέργειας**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του**

**Χρυσοβέργης Μάριου**

**Βόλος, 04/07/2014**

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



Εγκρίθηκε από την διμελή εξεταστική επιτροπή την 4<sup>η</sup> Ιουλίου 2014

(Υπογραφή)

.....

Σταμούλης Γεώργιος  
Καθηγητής  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

(Υπογραφή)

.....

Κτενά Αφροδίτη  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια  
ΤΕΙ Στερεάς Ελλάδας

(Υπογραφή)

.....

**Χρυσοβέργης Μάριος**

Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

©2014-All rights reserved

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

## **Ευχαριστίες:**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές που με βοήθησαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, τον κ. Σταμούλη και την κα Κτένα, τόσο για τις συμβουλές τους όσο και για την υπομονή τους.

Επίσης τους γονείς μου που στάθηκαν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησαν στο να τελειώσω αυτήν την σχολή.



## **Περίληψη:**

Η διπλωματική αυτή εργασία ασχολείται με σφάλματα που μπορούν να προκύψουν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και με την μοντελοποίησή τους στο πρόγραμμα προσομοίωσης ATP-Emtp. Ειδικότερα πραγματεύεται με βραχυκυκλώματα που μπορούν να συμβούν σε συγκεκριμένα μέρη του δικτύου, μελετώντας τις επιπτώσεις τους αλλά και εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, περιγράφοντας την δομή ενός τέτοιου συστήματος και τα χαρακτηριστικά του. Επίσης γίνεται αναφορά στα σφάλματα που μπορεί να συμβούν και στις πιθανότητες εμφάνισής τους.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** περιγράφονται αναλυτικά οι τύποι βραχυκυκλωμάτων, δίνοντας τις μαθηματικές εξισώσεις για τον αναλυτικό υπολογισμό του ρεύματος σφάλματος.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** δίνονται πληροφορίες για το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των σεναρίων, το ATP-Emtp, όπου γίνεται παρουσίαση των επιμέρους λειτουργιών και των δυνατοτήτων του.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται η μοντελοποίηση ενός αιολικού πάρκου αλλά και ενός δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που θα αποτελέσει το μοντέλο για να προσομοιώσουμε τα επιμέρους βραχυκυκλώματα.

Στο **πέμπτο** και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται η προσομοίωση των σφαλμάτων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως επίσης και τα τελικά συμπεράσματα.

## **Abstract:**

The purpose of this study is to analyse different types of faults occurring in an electric power network and simulate them using the appropriate software, starting from the basic form of an electric power network and the probabilities of occurring faults and moving on to the mathematical analysis behind the aforementioned. Moreover, the components of the software programme ATP-EMTP, which is used as a means of simulation are presented. Finally, a wind park is modelised and then, single and two phase short circuit faults are simulated, studying the effects associated with them, and reaching useful conclusions.

## Περιεχόμενα:

### Περίληψη

#### Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

- 1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.....12
- 1.2 Σφάλματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....13

#### Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Γενική θεώρηση και Υπολογισμός Βραχυκυκλωμάτων

- 2.1 Είδη βραχυκυκλωμάτων.....15
- 2.2 Μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης.....16
- 2.3 Αναλυτικός υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος
  - 2.3.1 Μετασχηματισμός Συμμετρικών Συνιστωσών.....21
  - 2.3.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη.....22
  - 2.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη.....23
  - 2.3.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη.....25
  - 2.3.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη.....28

#### Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Το πρόγραμμα ATP-EMTP

- 3.1 Γενικά.....31
- 3.2 Ιστορικά στοιχεία για το ATP-EMTP.....32
- 3.3 Περιγραφή του τρόπου επίλυσης ηλεκτρικών δικτύων με το ATP-EMTP
  - 3.3.1 Επίλυση στο πεδίο του χρόνου.....32
  - 3.3.2 Επίλυση στο πεδίο της συχνότητας.....34
- 3.4 Βιβλιοθήκες μοντέλων του ATP-EMTP.....34
- 3.5 Μελέτες με το ATP-EMTP.....35
  - 3.5.1 TACS.....36
  - 3.5.2 Models.....36
- 3.6 Ρουτίνες υποστήριξης στο πρόγραμμα ATP-EMTP.....37
- 3.7 Πρόγραμμα υποστήριξης του ATP-EMTP.....37
  - 3.7.1 Control Center.....38
  - 3.7.2 Το PCPlot.....39
  - 3.7.3 Το PotXY.....40
  - 3.7.4 Το GTPPlot.....40
- 3.8 Το ATPDraw.....41
- 3.9 Το ATP-LCC.....43

#### Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Μοντελοποίηση αιολικού πάρκου

- 4.1 Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας
  - 4.1.1 Το μοντέλο UM1 της σύγχρονης μηχανής και η εξομοίωση της ανεμογεννήτριας.....45
  - 4.1.2 Η διέγερση της μηχανής.....46
  - 4.1.3 Εν κενώ λειτουργία.....48
  - 4.1.4 Με τριφασικό ωμικό φορτίο στα άκρα.....50
  - 4.1.5 Σύνδεση Α/Γ σε απλό δίκτυο.....52
- 4.2 Μοντελοποίηση μετασχηματιστή.....54
- 4.3 Εξομοίωση απλού δικτύου με Μ/Σ.....56
- 4.4 Εξομοίωση γραμμών μέσης τάσης.....61

**Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Εξομοιώσεις-Συμπεράσματα**

5.1 Εξομοίωση βραχυκυκλώματος μιας φάσης με γη.....	63
5.2 Εξομοίωση βραχυκυκλώματος δύο φάσεων με επαφή γης.....	70

<b>Αναφορές.....</b>	<b>79</b>
----------------------	-----------

# Κεφάλαιο 1ο:

## 1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια ένα σύνολο καταναλωτών. Για να φέρει σε πέρας αυτήν την αποστολή, το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει:

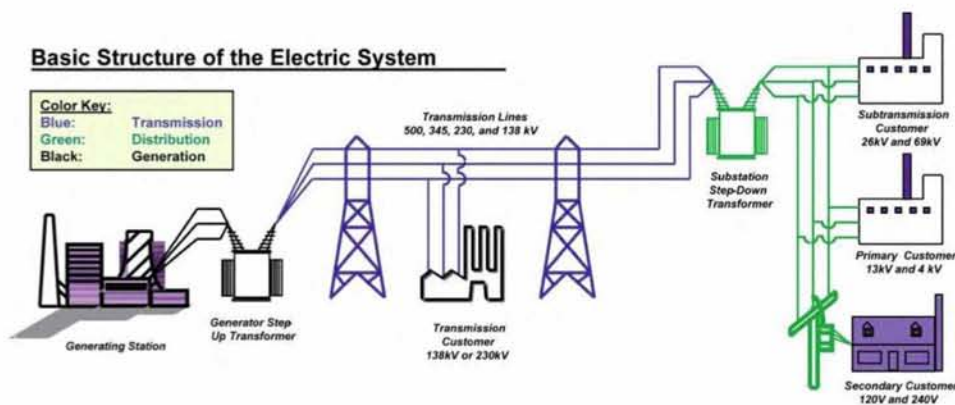
**Σταθμούς παραγωγής**, εγκατεστημένους στις πιο πρόσφορες προ τούτο περιοχές, όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια σε επαρκείς ποσότητες.

**Γραμμές μεταφοράς**, που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης.

**Δίκτυο διανομής**, για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους επιμέρους καταναλωτές, ώστε να χρησιμοποιηθεί από αυτούς μετατρεπόμενη σε άλλες πιο εξυπηρετικές μορφές, όπως φως, θερμότητα, κίνηση, ήχο κτλ.

Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης και χαμηλής τάσης και τους μετασχηματιστές διανομής με τους οποίους η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Το σύστημα διανομής τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής (όπου η τάση υποβιβάζεται στην τιμή της μέσης τάσης διανομής) και παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε μικρούς οικιακούς καταναλωτές (υπό τη χαμηλή τάση διανομής) και σε μεσαίου μεγέθους καταναλωτές (υπό τη μέση τάση διανομής). Τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης στις αστικές πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι υπόγεια, ενώ στις άλλες περιοχές είναι εναέρια.[1]

Την παραπάνω περιγραφή μπορούμε να την κατανοήσουμε ποιο εύκολα βλέποντας την εικόνα παρακάτω (1.1.1). Με μπλε χρώμα διακρίνουμε το δίκτυο μεταφοράς, με πράσινο το δίκτυο διανομής και με μαύρο το σύστημα παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.



(Εικόνας 1.1.1) Δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [2]

Παραδοσιακά τρεις είναι οι βασικές λειτουργίες που συνιστούν την συνολική λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας[1]. Τα ΣΗΕ λειτουργούν σε διάφορα επίπεδα τάσης , ανάλογα με το υποσύστημα που εξυπηρετούν, και «επικοινωνούν» μεταξύ τους με μετασχηματιστές. Είναι κοινή πρακτική να διαιρούμε, με βάση την τάση λειτουργίας, το ΣΗΕ σε τρία (ή τέσσερα) υποσυστήματα:

- Σύστημα διανομής Χαμηλής Τάσης (ΧΤ) και Μέσης Τάσης (ΜΤ)
- Σύστημα υπομεταφοράς
- Σύστημα μεταφοράς
- Σύστημα παραγωγής

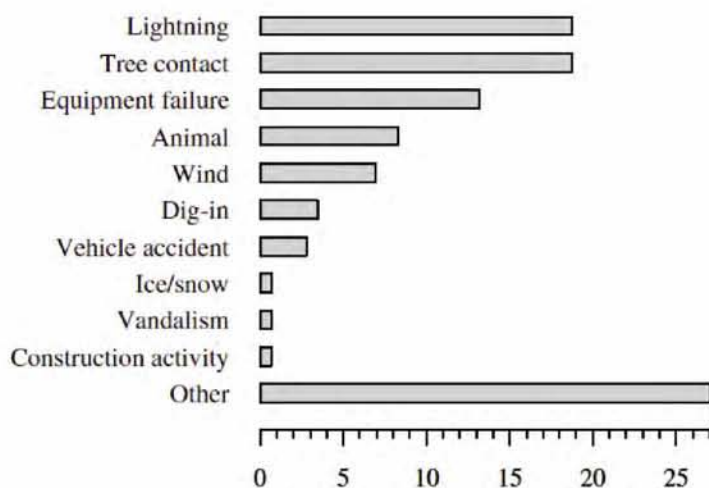
Στο σύστημα διανομή ΧΤ απαιτώνται τα εξής επίπεδα τάσης:

- Η πρωτεύουσα τάση ή τάση τροφοδοσίας (π.χ. 15kV ή 20 kV) που χαρακτηρίζεται και μέση τάση (ΜΤ).
- Η δευτερεύουσα τάση ή τάση κατανάλωσης (π.χ. 230V ή 400V) που χαρακτηρίζεται και χαμηλή τάση (ΧΤ).

## 1.2 Σφάλματα στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Λέμε ότι συμβαίνει βραχυκύκλωμα ή σφάλμα όταν διακοπεί η μόνωση του συστήματος σε κάποιο σημείο ή όταν κάποιο αγωγίμο αντικείμενο έλθει σε επαφή με γυμνό αγωγό. Οι αιτίες που μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα είναι πολλές, όπως κεραυνοί, δυνατοί άνεμοι, πτώσεις δέντρων σε γραμμές, καταστροφές στύλων από συγκρούσεις οχημάτων, διείσδυση μικρών ζώων σε διακοπτικούς μηχανισμούς κτλ. Τα σφάλματα, κατά σειρά συχνότητας στην εμφάνιση, είναι: το μονοφασικό σφάλμα προς γη, το διφασικό, το διφασικό προς φη και το συμμετρικό τριφασικό. Οι τρεις πρώτοι τύποι σφαλμάτων οδηγούν σε έντονα ασύμμετρες καταστάσεις λειτουργίας[1].

Το EPRI(Electrical Power Research Institute) τη δεκαετία του 80 πραγματοποίησε μια μεγάλη έρευνα με στόχο την μελέτη και κατανομή των σφαλμάτων στο σύστημα διανομής 13 υπηρεσιών, αντλώντας στοιχεία από τις εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (Burke and Lawrence, 1984; EPRI 1209-1, 1983). Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής φαίνονται στη παρακάτω εικόνα (1.2.1) και αναφέρονται συγκεκριμένα στα δίκτυα διανομής. Όπως βλέπουμε, περίπου το 40% των σφαλμάτων σε αυτήν την έρευνα έγιναν σε περιόδους δυσμενών καιρικών συνθηκών που παρατηρήθηκαν βροχή, χιόνι και πάγο ή πτώσεις δέντρων ενώ λιγότερο από 15% οφείλεται σε αστοχίες υλικών.



Percent of faults by cause

(Εικόνα 1.2.1) Αιτίες σφαλμάτων που βρέθηκαν από την έρευνα του EPRI[3]

Τα σφάλματα διακρίνονται σε **προσωρινά** και **μόνιμα**. Μόνιμο χαρακτηρίζεται ένα σφάλμα όταν συμβεί μόνιμη βλάβη στο σύστημα, πχ. καταστροφές μονωτήρων, σπασμένα καλώδια ή κατεστραμμένος εξοπλισμός όπως μετασχηματιστές ή πυκνωτές. Πρακτικά όλα τα σφάλματα σε υπόγειο εξοπλισμό είναι μόνιμα.

Ένα προσωρινό σφάλμα δεν προκαλεί μόνιμη καταστροφή σε κανένα εξάρτημα του συστήματος. Αν γίνει διακοπή του κυκλώματος και στη συνέχεια επανασυνδεθεί μετά από κάποια καθυστέρηση, τότε το σύστημα λειτουργεί κανονικά. Τα προσωρινά σφάλματα κυμαίνονται μεταξύ 50% και 90% των σφαλμάτων σε εναέρια συστήματα διανομής. Οι αιτίες των προσωρινών σφαλμάτων περιλαμβάνουν κεραυνούς, αγωγούς που έρχονται σε επαφή λόγω αέρα, κλαδιά δέντρων που πέφτουν κατά μήκος των αγωγών και στην συνέχεια πέφτουν στο έδαφος ή καίγονται, ζώα που προκαλούν σφάλματα και ανάφλεξη μονωτήρων εξαιτίας ρύπων[3].

## Κεφάλαιο 2ο:

### 2.1 Είδη βραχυκυκλωμάτων

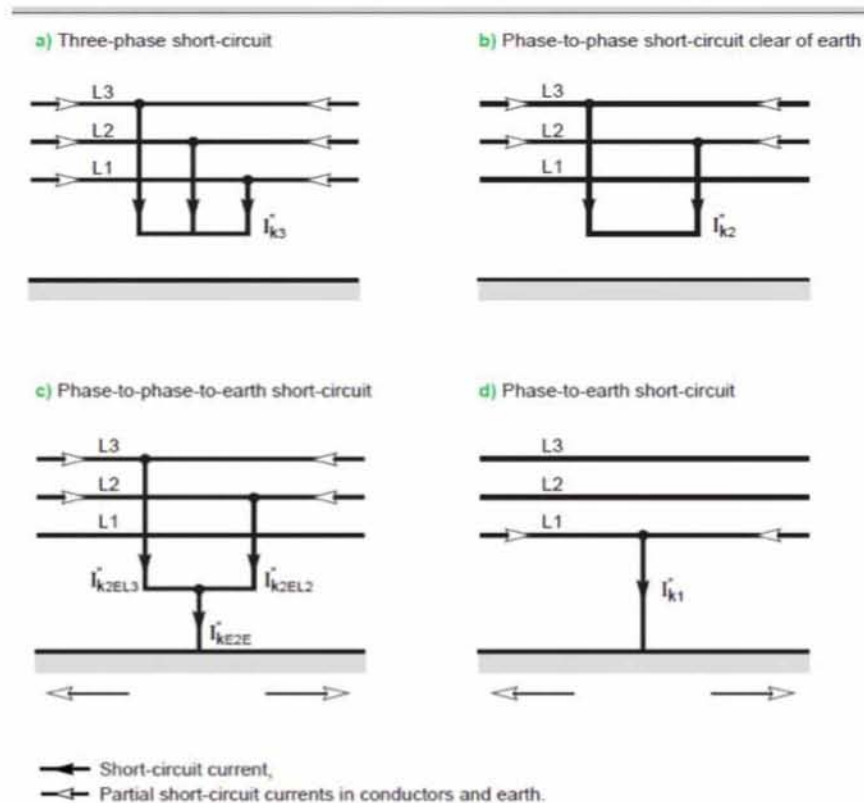
Τα βραχυκυκλώματα (β/κ), με βάση την φόρτιση του δικτύου κατά την εκδήλωση αυτών, διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες :

- α) τα συμμετρικά βραχυκυκλώματα και
- β) τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα.

Με τον όρο συμμετρικά βραχυκυκλώματα χαρακτηρίζονται οι ανώμαλες μεταβατικές καταστάσεις, στις οποίες περιέρχεται το σύστημα όταν λόγω βλάβης σε κάποιο σημείο έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και οι τρεις φάσεις. Τα τριφασικά βραχυκυκλώματα μπορούν να αναλυθούν με την βοήθεια ισοδύναμων μονοφασικών κυκλωμάτων, με την παραδοχή ότι το τριφασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε) είναι συμμετρικό και τροφοδοτείται από συμμετρικό σύστημα τάσεων (ίσα μέτρα /φασική μετάθεση  $120^\circ$ ).

Πλην των συμμετρικών (τριφασικών) βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν και τα ασύμμετρα βραχυκυκλώματα τα οποία παρουσιάζουν μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης και κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες :

- α) Μονοφασικά βραχυκυκλώματα (φάσης - γης)
- β) Διφασικά βραχυκυκλώματα χωρίς γη
- γ) Διφασικά βραχυκυκλώματα με γη



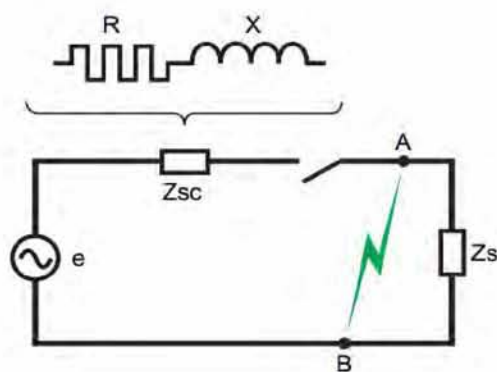
(Σχήμα 2.1.1) Σχηματικό διάγραμμα βασικών τύπων βραχυκυκλωμάτων[4]

Στην παραπάνω σχήμα (2.1.1) διακρίνουμε στην 1<sup>η</sup> περίπτωση τριπολικό βραχυκύκλωμα, όπου και οι 3 φάσεις έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, στην 2<sup>η</sup> περίπτωση βραχυκύκλωμα 2 φάσεων μεταξύ τους, στην 3<sup>η</sup> περίπτωση βραχυκύκλωμα 2 φάσεων με γη και στην 4<sup>η</sup> βραχυκύκλωμα φάσης γης.

Βραχυκύκλωμα μίας ή δύο φάσεων προς τη γη προκαλεί ανύψωση της τάσης των υγιών φάσεων. Οι υψηλότερες τάσεις προκαλούνται στο μονοπολικό βραχυκύκλωμα. Η ανύψωση εξαρτάται, εκτός από τη θέση του βραχυκυκλώματος και τα χαρακτηριστικά της γραμμής, από τον τρόπο γείωσης του ουδετέρου του συστήματος. Σε συστήματα με αγείωτο ουδέτερο η τάση προς την γη των υγιών φάσεων μπορεί να υπερβεί τη μεταξύ φάσεων τάση του δικτύου. Σε συστήματα με άμεση γείωση του ουδετέρου, η τάση των υγιών φάσεων συνήθως δεν ξεπερνά την τάση μεταξύ φάσεων (πολική τάση).

## 2.2 Μεταβατική συμπεριφορά του ρεύματος βραχυκύκλωσης

Για την μελέτη του τρόπου εκδήλωσης και της χρονικής συμπεριφοράς του ρεύματος βραχυκύκλωσης θεωρείται η απλοποιημένη αναπαράσταση δικτύου του παρακάτω σχήματος. Το απλοποιημένο αυτό δίκτυο αποτελείται από μια σταθερή πηγή εναλλασσόμενης τάσης, ένα διακόπτη, την σύνθετη αντίσταση φορτίου  $Z_s$  και την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση β/κ (ισοδύναμη Thevenin)  $Z_{sc}$  για τα ανάντη του διακόπτη. Κατά την ομαλή λειτουργία (κλειστός διακόπτης) στο κύκλωμα ρέει το σχεδιαστικό ρεύμα φορτίου. Αν προκληθεί αγωγήμη σύνδεση μεταξύ των σημείων A και B, βραχυκυκλώνοντας το φορτίο, το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι το ρεύμα σφάλματος  $i_{sc}$  το οποίο είναι υψηλότερο του  $i_s$  και περιορίζεται μόνο από την αντίσταση  $Z_{sc}$ .



(Σχήμα 2.2.1) Απλοποιημένο ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα σφάλματος δικτύου[4]

Το ρεύμα σφάλματος  $I_{sc}$  έχει έντονα μεταβατικό χαρακτήρα που εξαρτάται από την αντίδραση  $X$  και την αντίσταση  $R$  της σύνθετης αντίστασης  $Z_{sc}$  και από την «ηλεκτρική» απόσταση της θέσης σφάλματος ως προς την γεννήτρια. Ανάλογα με την τοπικότητα της θέσης σφάλματος ως προς την πηγή ρεύματος, διακρίνονται οι εξής κατηγορίες σφάλματος :



❖ Σφάλμα «μακριά» από την γεννήτρια

Η περίπτωση αυτή παρατηρείται όταν η σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και της θέσης σφάλματος είναι μεγαλύτερη από αυτήν της γεννήτριας. Ο μεταβατικός χαρακτήρας του ρεύματος σφάλματος οφείλεται στην αιφνίδια επιβολή της εναλλασσόμενης τάσης  $e$  στο κύκλωμα R-L του παραπάνω σχήματος (2.2.1) και περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση :

$$i_{sc}(t)R + L \frac{di_{sc}(t)}{dt} = e(t) \Rightarrow \quad (2.2.2)$$

$$i_{sc}(t)R + L \frac{di_{sc}(t)}{dt} = E\sqrt{2} \sin(\omega t + a) \quad (2.2.3)$$

,όπου E: Ηλεκτρεγερτική δύναμη (rms τιμή) και  
e: Στιγμιαία ηλεκτρεγερτική δύναμη

Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης δίνεται από την σχέση :

$$i_{sc}(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t + a - \varphi) - I\sqrt{2} \sin(a - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2.2.4)$$

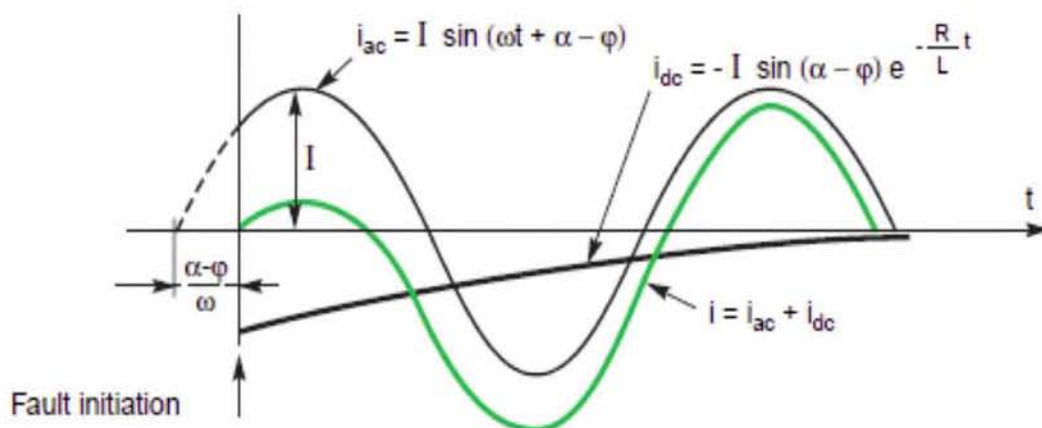
,όπου  $I = E/Z_{sc}$ ,

$\alpha$  : η γωνία που χαρακτηρίζει την διαφορά μεταξύ της εκδήλωσης του σφάλματος και του μηδενισμού της τάσεως

$\varphi$  : η φασική γωνία της  $Z_{sc}$ .

Από την τελευταία εξίσωση προκύπτει ότι για βραχυκύκλωμα «μακριά» από γεννήτρια το ρεύμα σφάλματος  $i_{sc}$  αποτελείται από δύο συνιστώσες (βλ. 2.2.5) :

- Την ac συνιστώσα ρεύματος ( $i_{ac}$ ) η οποία είναι ημιτονοειδούς μορφής
- Την dc συνιστώσα ρεύματος ( $i_{dc}$ ) εκθετικής μορφής.



(Σχήμα 2.2.5) Γραφική απεικόνιση της αποσύνθεσης του ρεύματος σφάλματος στις συνιστώσες του για σφάλμα «μακριά» από γεννήτρια[4]

Ως προς την μορφή του ρεύματος  $i_{sc}$  για σφάλμα «μακριά» από γεννήτρια, διακρίνονται οι εξής δύο ακραίες περιπτώσεις :

1.  $\alpha = \varphi \approx \pi/2$  (symmetrical – balanced)

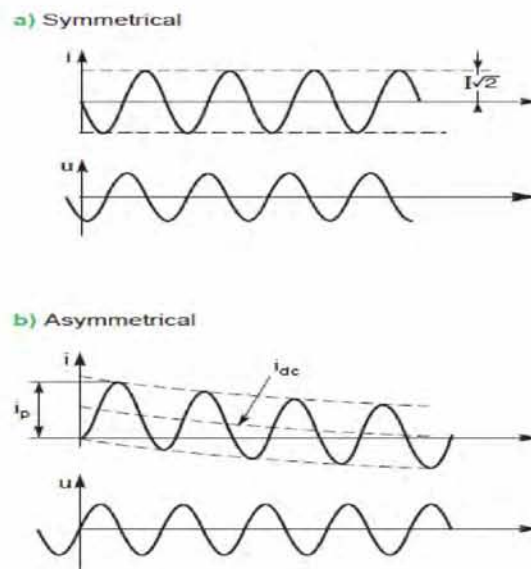
Η μορφή του ρεύματος σφάλματος είναι ημιτονοειδής( συμμετρική), δεν αποσβαίνει ποτέ και δίνεται από την σχέση:

$$i_{sc}(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} \sin(\omega t) \quad (2.2.6)$$

2.  $\alpha = 0$  (asymmetrical – unbalanced)

Η μορφή του ρεύματος σφάλματος είναι φθίνουσα ημιτονοειδής (συμμετρική) και δίνεται από την σχέση:

$$i_{sc}(t) = \frac{E\sqrt{2}}{Z_{sc}} \left[ \sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (2.2.7)$$



(Σχήμα 2.2.8) Ρεύμα σφάλματος  $i_{sc}$  για βραχυκύκλωμα «μακριά» από γεννήτρια  
(α) συμμετρική μορφή, (β) ασύμμετρη μορφή[4]

❖ Σφάλμα «κοντά» σε γεννήτρια

Παρατηρείται όταν η σύνθετη αντίσταση που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και της θέσης σφάλματος είναι μικρότερη από αυτήν της γεννήτριας. Το μεταβατικό περιεχόμενο του ρεύματος σφάλματος οφείλεται σε αυτήν την περίπτωση στην έντονη μεταβολή της αντίδρασης της γεννήτριας (κυρίαρχη αντίδραση). Η μεταβολή (αύξηση) της αντίδρασης της γεννήτριας με το χρόνο αναπτύσσεται σε τρία στάδια :

- Υπομεταβατική περίοδος ( $10 \text{ ms} \leq t \leq 20 \text{ ms}$ )
- Μεταβατική περίοδος ( $20 \text{ ms} < t < 500 \text{ ms}$ )
- Μόνιμης Κατάστασης περίοδος ( $t > 500 \text{ ms}$ )

Ακολουθούν τυπικές τιμές μεταβολής της αντίδρασης για γεννήτριες στην υπομεταβατική, μεταβατική περίοδο και στην μόνιμη κατάσταση.

(Πίνακας 2.2.7) Τυπικές τιμές μεταβολής της αντίδρασης γεννητριών σε κατάσταση σφάλματος

	$X_{d''}$	$X_{d'}$	$X_d$
Γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα	10-20%	15-25%	150-230%
Γεννήτρια Εκτύπων πόλων	15-25%	25-35%	70-120%

Στην περίπτωση αυτή, η γενική αναλυτική έκφραση του ρεύματος σφάλματος, θεωρώντας ότι το σφάλμα εκδηλώνεται κατά τον μηδενισμό της τάσης, έχει ως εξής :

$$i_{sc}(t) = E\sqrt{2} \left[ \left( \frac{1}{X_{d''}} - \frac{1}{X_{d'}} \right) e^{-\frac{t}{T_{d''}}} + \left( \frac{1}{X_{d'}} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_{d'}}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos \omega t - \frac{E\sqrt{2}}{X_{d''}} e^{-\frac{t}{T_d}} \quad (2.2.9)$$

,όπου  $E$  : rms φασική τάση γεννήτριας

$X_{d''}$  : υπομεταβατική αντίδραση

$X_{d'}$  : μεταβατική αντίδραση

$X_d$  : σύγχρονη αντίδραση

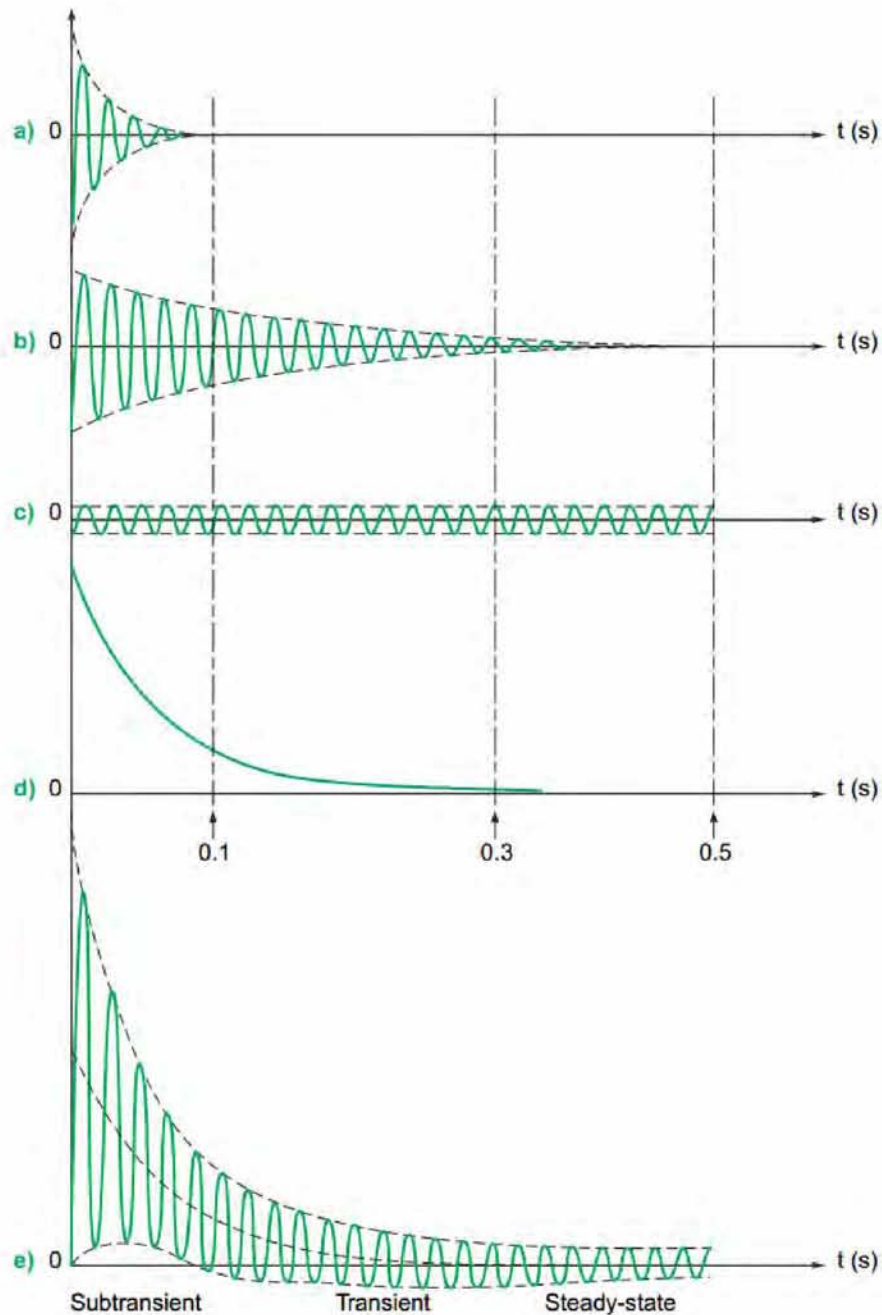
$T_{d''}$  : υπομεταβατική σταθερά χρόνου

$T_{d'}$  : μεταβατική σταθερά χρόνου

$T_d$  : συνεχής (απεριοδική) σταθερά χρόνου

Σύμφωνα με την τελευταία σχέση το ρεύμα σφάλματος  $i_{sc}$  δίνεται ως επαλληλία τεσσάρων συνιστωσών.

- Τρεις εναλλασσόμενες συνιστώσες ρεύματος (υπομεταβατική, μεταβατική και μόνιμης κατάστασης)
- Μια απεριοδική συνεχής συνιστώσα που οφείλεται στον έντονα επαγωγικό χαρακτήρα του κυκλώματος R-L



(Σχήμα 2.2.10) Αποσύνθεση ρεύματος σφάλματος στις συνιστώσες του για βραχυκύκλωμα «κοντά» στην γεννήτρια α) υπομεταβατική συνιστώσα ρεύματος, β) μεταβατική συνιστώσα ρεύματος γ) συνιστώσα μόνιμης κατάστασης, δ) απериοδική (συνεχής) συνιστώσα που προκύπτει από την εμφάνιση του ρεύματος στο κύκλωμα (επαγωγικό), ε) συνολικό ρεύμα σφάλματος  $i_{sc}[4]$

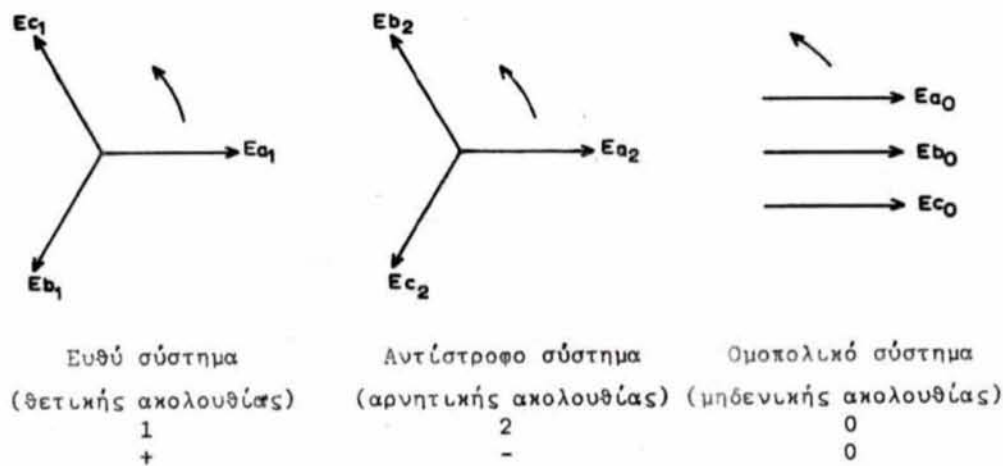
Από το παραπάνω σχήμα είναι εύκολο να γίνει αντιληπτό από την σειρά που παρατίθενται οι γραφικές παραστάσεις, ότι η αντίδραση αποκτά υψηλότερη τιμή σε κάθε στάδιο, για παράδειγμα η υπομεταβατική αντίδραση είναι μικρότερη από την μεταβατική και ακόμη μικρότερη από την σύγχρονη. Αυτό το αποτέλεσμα των τριών αντιδράσεων οδηγεί σε μια σταδιακή μείωση στο ρεύμα σφάλματος, το οποίο είναι το άθροισμα των 4 συνιστωσών(2.2.10) . Ακόμη, το ρεύμα βραχυκύκλωσης γίνεται μέγιστο την στιγμή που η τάση γίνεται μηδενική κατά τη στιγμή του σφάλματος. Τέλος,

παρατηρούμε ότι η μείωση της αντίδρασης της γεννήτριας είναι γρηγορότερη από αυτήν της απεριοδικής συνιστώσας. Αυτή είναι μια σπάνια περίπτωση που μπορεί να προκαλέσει κορεσμό στα μαγνητικά κυκλώματα και προβλήματα, επειδή αρκετές περίοδοι συμβαίνουν πριν το ρεύμα περάσει το μηδέν.[4]

## 2.3 Αναλυτικός υπολογισμός του ρεύματος σφάλματος

### 2.3.1 Μετασχηματισμός Συμμετρικών Συνιστωσών

Για την ανάλυση του ασύμμετρου σφάλματος, το ασύμμετρο τριφασικό σύστημα είναι δυνατόν να αναλυθεί σε τρία ανεξάρτητα μονοφασικά κυκλώματα διασυνδεδεμένα μεταξύ τους στο σημείο της ασυμμετρίας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μια αλλαγή μεταβλητών, δηλαδή ένα μετασχηματισμό συνιστωσών όπως ο μετασχηματισμός των συμμετρικών συνιστωσών. Ιστορικά, πρώτος ο Stokvis το 1912 έδειξε τη δυνατότητα ανάλυσης ενός ασύμμετρου συστήματος ρευμάτων σε συνιστώσες ρεύματος θετικής και αρνητικής ακολουθίας. Το 1918 ο Fortesque εισήγαγε την ομοπολική συνιστώσα ρεύματος και τάσεως, και απέδειξε γενικότερα την δυνατότητα ανάλυσης ενός N-φασικού συστήματος σε συμμετρικές συνιστώσες. Σύμφωνα λοιπόν, με τον μετασχηματισμό συμμετρικών συνιστωσών κάθε τριφασικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί σε τρία συστήματα, το ευθύ (1/+), το αντίστροφο (2/-) και το ομοπολικό (0/0), όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



(Σχήμα 2.3.1.1) Τα τρία 3-φασικά συστήματα του μετασχηματισμού συμμετρικών συνιστωσών [5]

Το τριφασικό σύστημα με το μετασχηματισμό των συμμετρικών συνιστωσών μετασχηματίζεται σε μια ισοδύναμη ομάδα τριών (3) μονοφασικών συστημάτων, με αποτέλεσμα οι τάσεις και τα ρεύματα φάσεως να προκύπτουν με επαλληλία των συμμετρικών συνιστωσών τους :

$$E_a = E_{a0} + E_{a1} + E_{a2} \quad (2.3.1.2)$$

$$E_b = E_{b0} + E_{b1} + E_{b2} \quad (2.3.1.3)$$

$$E_c = E_{c0} + E_{c1} + E_{c2} \quad (2.3.1.4)$$

Συνήθως, για την ανάλυση ενός συστήματος χρησιμοποιούνται συμμετρικές συνιστώσες της φάσεως  $a$ . Οι συνιστώσες των υπόλοιπων 2 φάσεων μπορούν να υπολογιστούν από τις σχέσεις :

$$E_{b0} = E_{c0} = E_{a0} \quad (2.3.1.5)$$

$$E_{b1} = a^2 E_{a1}, \quad E_{c1} = a E_{a1} \quad (2.3.1.6)$$

$$E_{b2} = a E_{a2}, \quad E_{c2} = a^2 E_{a2} \quad (2.3.1.7)$$

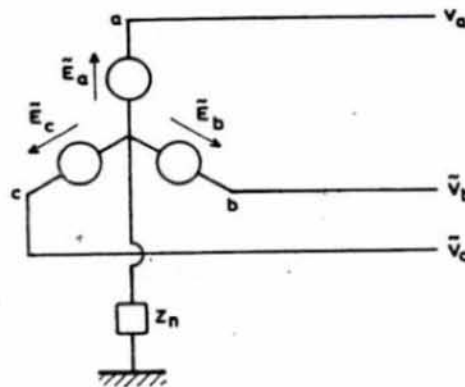
Επομένως ο μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών δίνεται σε μητρική μορφή ως εξής :

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{a0} \\ E_{a1} \\ E_{a2} \end{bmatrix} \Rightarrow [E]_{abc} = [s][E]_{012} \quad (2.3.1.8)$$

,όπου  $E_a, E_b, E_c$  το τριφασικό σύστημα τάσεων και  $E_0, E_1, E_2$  οι συμμετρικές συνιστώσες τάσης της φάσης  $a$ .

### 2.3.2 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Θεωρούμε ένα τριφασικό σύστημα τροφοδοτούμενο από μια συμμετρική τριφασική πηγή ή το τριφασικό ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin (σχήμα 2.3.2.1). Τα ασύμμετρα σφάλματα εάν επηρεάζουν μία μόνο φάση θεωρείται συμβατικά ότι αφορούν την φάση  $a$ , αν οι υπόλοιπες δύο φάσεις είναι οι  $b$  και  $c$ . Επιπλέον αμελούνται τα προ του σφάλματος φορτία κατά την διάρκεια του σφάλματος.



(Σχήμα 2.3.2.1) Τριφασικό σύστημα ή ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin [5]

Οι συνθήκες του συμμετρικού σφάλματος (3-φασικού) περιγράφονται από τις εξής σχέσεις ανυσματικών φασικών μεγεθών τάσης και ρεύματος :

$$V_a = V_b = V_c \quad (2.3.2.2)$$

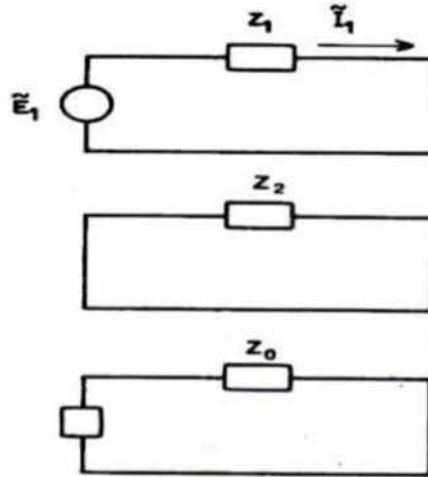
$$\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (2.3.2.3)$$

Από τις οποίες με ανάλυση στον χώρο των συμμετρικών συνιστωσών προκύπτει:

$$V_0 = V_1 = V_2 = 0 \quad (2.3.2.4)$$

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (2.3.2.5)$$

Τα τρία κυκλώματα είναι ανεξάρτητα, όπως θα το περίμενε κανείς λόγω της συμμετρίας, και κλειστά



(Σχήμα 2.3.2.6)Κυκλώματα ακολουθίας κατά το τριφασικό σφάλμα [5]

Το ρεύμα σφάλματος της φάσεως α δίνεται από την σχέση:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = \tilde{I}_1 = \frac{E_1}{z_1} \quad (2.3.2.7)$$

Το ρεύμα σφάλματος των δύο άλλων φάσεων (b,c) έχει ίδιο μέτρο με αυτό της φάσεως α με διαφορά φάσης  $120^\circ$  μεταξύ διαδοχικών φάσεων.

### 2.3.3 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα προς γη

A) Χωρίς αντίσταση σφάλματος

Οι βασικές συνθήκες που επικρατούν κατά το μονοφασικό σφάλμα είναι:

$$V_a = 0 \quad (2.3.3.1)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0 \quad (2.3.3.2)$$

Χρησιμοποιώντας τις συμμετρικές συνιστώσες των φασικών τάσεων και ρευμάτων παίρνουμε:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 = 0 \quad (2.3.3.3)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.3.4)$$

$$\tilde{I}_c = \tilde{I}_0 + a \tilde{I}_1 + a^2 \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.3.5)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις έχουμε:

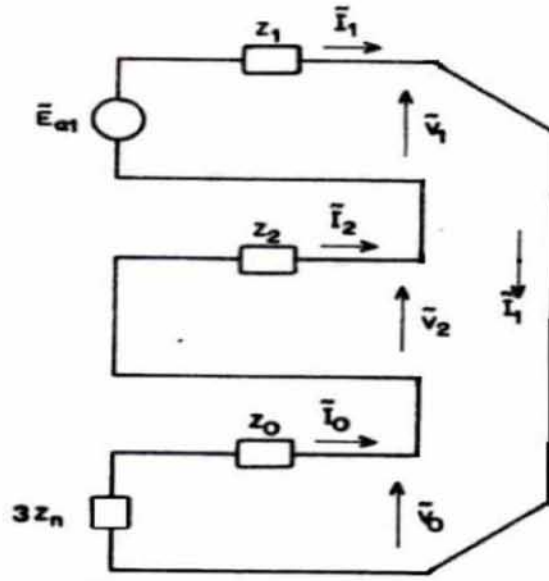
$$(a^2 - a)\tilde{I}_1 = (a^2 - a)\tilde{I}_2 \Rightarrow \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 \quad (2.3.3.6)$$

$$\tilde{I}_0 = \frac{1}{3}(\tilde{I}_a + \tilde{I}_b + \tilde{I}_c) = \frac{1}{3}\tilde{I}_a = \frac{1}{3}(\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) \quad (2.3.3.7)$$

και τελικά:

$$\tilde{I}_0 = \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \frac{1}{3}\tilde{I}_a \quad (2.3.3.8)$$

Με βάση λοιπόν τις προηγούμενες σχέσεις προκύπτει τελικά ο τρόπος σύνδεσης των ακολουθιακών κυκλωμάτων και φαίνεται στο επόμενο σχήμα(2.3.3.9).



(Σχήμα 2.3.3.9) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [5]

Στο παραπάνω σχήμα η αντίσταση γείωσης του ουδετέρου κόμβου της πηγής εμφανίζεται στο ομοπολικό κύκλωμα με τριπλάσια τιμή ( $3Z_n$ ) και αυτό ισχύει για όλες τις αντιστάσεις που διαρρέονται από ομοπολικά ρεύματα.

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως εύκολα βρίσκεται από κυκλωματική επίλυση ίσο με:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = 3\tilde{I}_0 = 3 \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n} \quad (2.3.3.10)$$

B) Με αντίσταση σφάλματος  $Z_F$

Σε αυτήν την περίπτωση οι βασικές συνθήκες του σφάλματος είναι :

$$V_a = \tilde{I}_a Z_F \quad (2.3.3.11)$$

$$\tilde{I}_b = \tilde{I}_c = 0 \quad (2.3.3.12)$$

Μετασχηματίζοντας τις δύο προηγούμενες σχέσεις στον χώρο των συμμετρικών συνιστωσών έχουμε:

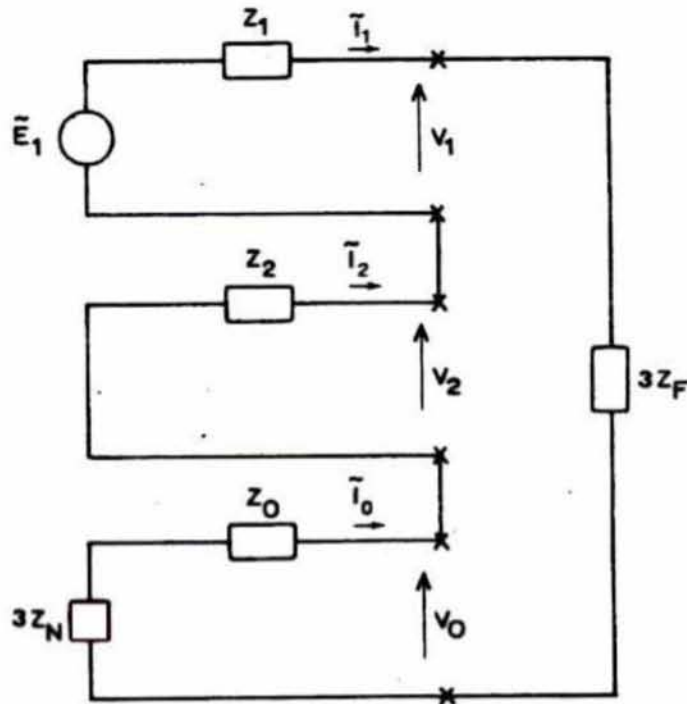
$$V_0 + V_1 + V_2 = \tilde{I}_a Z_F = \tilde{I}_F Z_F \quad (2.3.3.13)$$



$$\tilde{I}_0 = \tilde{I}_1 = \tilde{I}_2 = \frac{1}{3}\tilde{I}_F \quad (2.3.3.14)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3\tilde{I}_0 Z_F \quad (2.3.3.15)$$

Οπότε με βάση τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ο τρόπος σύνδεσης των κυκλωμάτων ακολουθίας για μονοφασικό σφάλμα προς γη.



(Σχήμα 2.3.3.16) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος προς γη με αντίσταση σφάλματος[5]

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης υπολογίζεται με βάση το ισοδύναμο κύκλωμα ίσο με:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_a = 3\tilde{I}_0 = 3 \frac{E_{a1}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_N + 3Z_F} \quad (2.3.3.17)$$

### 2.3.4 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

A) Χωρίς αντίσταση σφάλματος

Οι συνθήκες του διφασικού προς γη σφάλματος είναι :

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (2.3.4.1)$$

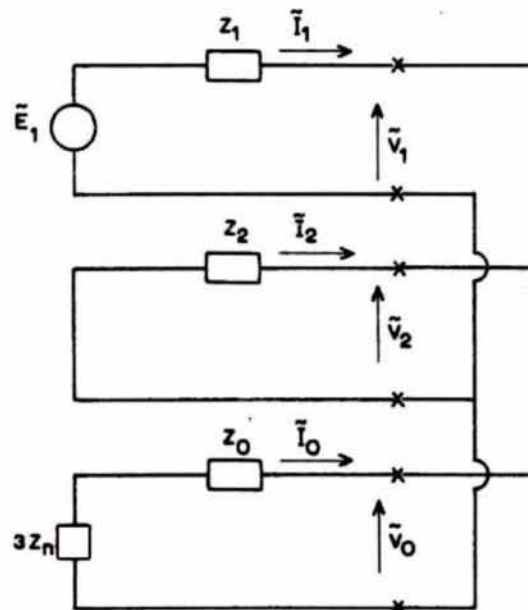
$$V_b = V_c = 0 \quad (2.3.4.2)$$

από τις οποίες προκύπτει:

$$\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.4.3)$$

$$V_0 = V_1 = V_2 \quad (2.3.4.4)$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας στην θέση σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος.



(Σχήμα 2.3.4.5) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [5]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 2\tilde{I}_0 - (\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) = 3\tilde{I}_0 \quad (2.3.4.6)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος της φάσεως α:

$$V_0 = V_1 = V_2 = E_1 \frac{z_2 // (z_0 + 3z_n)}{[z_2 // (z_0 + 3z_n)] + z_1} \quad (2.3.4.7)$$

$$\tilde{I}_0 = -\frac{V_0}{z_0 + 3z_n} \quad (2.3.4.8)$$

Τελικά συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος δίνεται από:

$$\tilde{I}_F = 3\tilde{I}_0 = -3E_1 \frac{z_2}{z_1 z_2 + z_1 z_0 + z_2 z_0 + 3z_n(z_1 + z_2)} \quad (2.3.4.9)$$

B) Με αντίσταση σφάλματος  $Z_F$

Οι συνθήκες του διφασικού προς γη σφάλματος είναι :

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (2.3.4.10)$$

$$V_b = V_c = V_F = (\tilde{I}_b + \tilde{I}_c)Z_F \quad (2.3.4.11)$$

από τις οποίες προκύπτει:

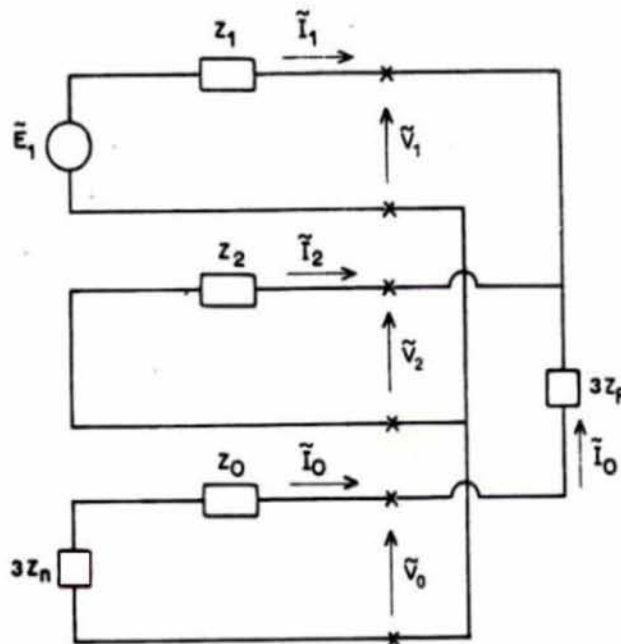
$$\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.4.12)$$

$$V_1 = V_2 \quad (2.3.4.13)$$

$$V_0 - V_2 = 3\tilde{I}_0 Z_F \quad (2.3.4.14)$$

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 3\tilde{I}_0 \quad (2.3.4.15)$$

Από τις σχέσεις προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση σφάλματος.



(Σχήμα 2.3.4.16) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος προς γη με αντίσταση σφάλματος [5]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με:

$$\tilde{I}_F = \tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 3\tilde{I}_0 \quad (2.3.4.17)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες της τάσης και του ρεύματος της φάσεως α:

$$V_1 = V_2 = E_1 \frac{Z_2 // (Z_0 + 3Z_n + 3Z_F)}{[Z_2 // (Z_0 + 3Z_n + 3Z_F)] + Z_1} \quad (2.3.4.18)$$

$$\tilde{I}_0 = -\frac{V_2}{Z_0 + 3Z_n + 3Z_F} \quad (2.3.4.19)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων παίρνουμε το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα προς γη με αντίσταση σφάλματος:

$$\tilde{I}_F = 3\tilde{I}_0 = -3E_1 \frac{Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_0 + Z_2 Z_0 + 3(Z_n + Z_F)(Z_1 + Z_2)} \quad (2.3.4.20)$$

### 2.3.5 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

A) Χωρίς αντίσταση σφάλματος

Οι συνθήκες του διφασικού σφάλματος χωρίς γη είναι:

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (2.3.5.1)$$

$$\tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (2.3.5.2)$$

$$V_b = V_c \quad (2.3.5.3)$$

με χρήση των συμμετρικών συνιστωσών από τις δύο πρώτες προκύπτει:

$$\tilde{I}_0 + \tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \Rightarrow \tilde{I}_0 = -(\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2) \quad (2.3.5.4)$$

$$\tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 + \tilde{I}_0 + a \tilde{I}_1 + a^2 \tilde{I}_2 = 0 \Rightarrow 2\tilde{I}_0 - \tilde{I}_1 - \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.5.5)$$

Εν συνεχεία:

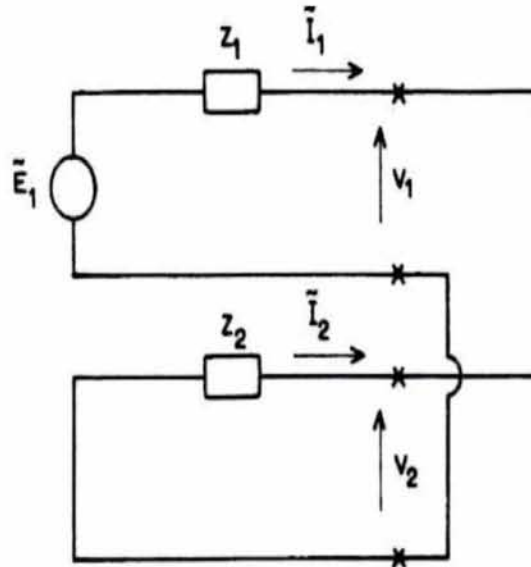
$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (2.3.5.6)$$

$$\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.5.7)$$

και:

$$V_0 + a^2 V_1 + a V_2 = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \Rightarrow V_1 = V_2 \quad (2.3.5.8)$$

Έτσι έχουμε την συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας στην θέση σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος.



(Σχήμα 2.3.5.9) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος [5]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με:

$$I_F = I_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 \quad (2.3.5.10)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος της φάσεως α:

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (2.3.5.11)$$

$$\tilde{I}_1 = -\tilde{I}_2 = \frac{E_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.3.5.12)$$

Με αντικατάσταση παίρνουμε το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη χωρίς αντίσταση σφάλματος:

$$I_F = (a^2 - a) \tilde{I}_1 = -j\sqrt{3} \tilde{I}_1 = -j \frac{\sqrt{3} E_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.3.5.13)$$

B) Με αντίσταση σφάλματος  $Z_F$

Οι συνθήκες του διφασικού σφάλματος χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος έχουν ως εξής:

$$\tilde{I}_a = 0 \quad (2.3.5.14)$$

$$\tilde{I}_b + \tilde{I}_c = 0 \quad (2.3.5.15)$$

$$V_b - V_c = \tilde{I}_b Z_F \quad (2.3.5.16)$$

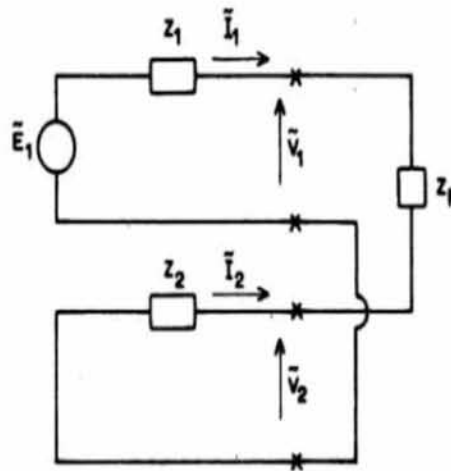
από τις οποίες προκύπτει:

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (2.3.5.17)$$

$$\tilde{I}_1 + \tilde{I}_2 = 0 \quad (2.3.5.18)$$

$$V_1 - V_2 = \tilde{I}_1 Z_F \quad (2.3.5.19)$$

Από τις τρεις τελευταίες σχέσεις προκύπτει η συνδεσμολογία των κυκλωμάτων ακολουθίας για διφασικό σφάλμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος.



(Σχήμα 2.3.5.20) Σύνδεση κυκλωμάτων ακολουθίας στην περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος [5]

Το ρεύμα σφάλματος είναι ίσο με:

$$I_F = I_b = \tilde{I}_0 + a^2 \tilde{I}_1 + a \tilde{I}_2 \quad (2.3.5.21)$$

Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σφάλματος προκύπτουν οι εξής εκφράσεις για τις συμμετρικές συνιστώσες του ρεύματος της φάσεως α:

$$\tilde{I}_0 = 0 \quad (2.3.5.22)$$

$$\tilde{I}_1 = -\tilde{I}_2 = \frac{E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (2.3.5.23)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων παίρνουμε το ρεύμα σφάλματος για διφασικό σφάλμα χωρίς γη με αντίσταση σφάλματος:

$$I_F = (a^2 - a)\tilde{I}_1 = -j\sqrt{3}\tilde{I}_1 = -j\frac{\sqrt{3}E_1}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (2.3.5.24)$$

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:

### 3.1 Γενικά

Το πρόγραμμα εξομοίωσης ATP-EMTP (αρχικά που προέρχονται από τις λέξεις Alternative Transients Program- ElectroMagnetic Transients Program), αποτελεί ένα από τα περισσότερο χρησιμοποιούμενα προγράμματα, αν όχι το πιο δημοφιλές, όσον αφορά στην ψηφιακή εξομοίωση ηλεκτρομαγνητικών καθώς και ηλεκτρομηχανικών συστημάτων και φαινομένων, για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του προγράμματος αποτελεί το γεγονός ότι διαθέτει υψηλές δυνατότητες μοντελοποίησης διάφορων συστημάτων. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε με κύριο σκοπό να γίνει αρωγός στην προσομοίωση ηλεκτρικών κυκλωμάτων, συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και εξοπλισμού.

Ο πυρήνας του προγράμματος αποτελείται από έναν μεταφραστή (compiler), ο οποίος μεταφράζει τα κατάλληλα γραμμένα αρχεία εισόδου σε αρχεία εξόδου-αποτελεσμάτων. Ο μεταφραστής υποστηρίζεται από άλλες εφαρμογές (υποστηρικτικά προγράμματα), τα οποία χρησιμεύουν στη διαδικασία κατασκευής των αρχείων εισόδου ή στην επεξεργασία αρχείων εξόδου.

Πιο αναλυτικά, το ATP-EMTP αναλύει το σύστημα που θα του δοθεί στο πεδίο του χρόνου, επιλύοντας τις διαφορικές εξισώσεις των στοιχείων τα οποία απαρτίζουν το κύκλωμα ή το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι διαφορικές εξισώσεις των στοιχείων αυτών λύνονται από τον πυρήνα του προγράμματος αριθμητικά. Η ανάλυση του κυκλώματος, με επίλυση διαφορικών εξισώσεων, δίνει στο πρόγραμμα τη δυνατότητα να υπολογίζει όλα τα μεταβατικά φαινόμενα που θα εμφανιστούν σε αυτό. Φυσικά, αυτό δε σημαίνει ότι με το ATP-EMTP υπολογίζονται μόνο μεταβατικές καταστάσεις, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση κυκλωμάτων στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.

Επιπρόσθετα, ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό του προγράμματος είναι πως στηρίζεται σε ένα πλήθος ρουτινών, κύριος ρόλος των οποίων είναι να χτίζουν μοντέλα για τη σωστότερη, αποδοτικότερη και πιο αποτελεσματική λειτουργία του ATP-EMTP. Συν τοις άλλοις, το ATP-EMTP παρέχει πολλές επιπλέον λειτουργίες, οι οποίες αφορούν υπολογισμούς σε ηλεκτρικά δίκτυα αλλά και σε συστήματα, προχωρώντας πέρα από τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων. Από όλα τα παραπάνω μπορούμε αβασάνιστα να συμπεράνουμε πως το ATP-EMTP αποτελεί ένα ισχυρότατο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών, το οποίο και μπορούμε να εκμεταλλευτούμε, ούτως ώστε να ωθήσουμε τη μελέτη των ηλεκτρικών μεγεθών ένα βήμα πιο μπροστά.

### **3.2 Ιστορικά στοιχεία για το ATP-EMTP**

Το EMTP έκανε την εμφάνισή του στα δρώμενα της ψηφιακής προσομοίωσης το έτος 1984 από τον Meyer και από την εταιρία Bonneville Power Administration (BPA), η οποία εδρεύει στο Portland της πολιτείας του Oregon στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αργότερα, μία προσπάθεια με στόχο την εμπορικοποίηση του συγκεκριμένου προϊόντος γίνεται από τον οργανισμό EMTP Development Coordination Group, καθώς και από το ινστιτούτο Electric Power Research Institute, το οποίο εδρεύει στο Palo Alto της πολιτείας της Καλιφόρνια των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Ως τροχοπέδη στην προσπάθεια εμπορικοποίησης του προϊόντος, δημιουργήθηκε ένας «κλώνος» του EMTP, το ATP. Η κίνηση αυτή έφερε τα επιθυμητά από τους υποκινητές της αποτελέσματα και από τότε το ATP χρησιμοποιείται ελεύθερα από τους χρήστες και επίσης επιδέχεται συνεχείς αλλαγές από όλη την επιστημονική κοινότητα η οποία ασχολείται με το συγκεκριμένο αντικείμενο μελέτης, καθιστώντας το με αυτό τον τρόπο ανάμεσα στα κορυφαία στο είδος του προγράμματα. Όπως είναι κατανοητό, η χρήση του ATP-EMTP απαιτεί τη χορήγηση ειδικής άδειας από τους υπευθύνους, η οποία όμως δίνεται χωρίς καμία απολύτως χρέωση, με μόνη προϋπόθεση και ταυτόχρονα δέσμευση από το χρήστη για τη μη συμμετοχή του σε οποιαδήποτε μορφής προσπάθεια, που έχει ως απώτερο σκοπό της την εκμετάλλευση του προγράμματος για οικονομικούς λόγους.

### **3.3 Περιγραφή του τρόπου επίλυσης ηλεκτρικών δικτύων με το ATP-EMTP**

Το ATP-EMTP περιλαμβάνει μεθόδους επίλυσης του ηλεκτρικού δικτύου στο πεδίο του χρόνου (time domain) και στο πεδίο της συχνότητας (frequency domain). Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία σύντομη περιγραφή σε αυτές τις μεθόδους επίλυσης.

#### **3.3.1 Επίλυση στο πεδίο του χρόνου**

Ο εξοπλισμός του ηλεκτρικού δικτύου περιγράφεται στο ATP-EMTP χρησιμοποιώντας εξισώσεις κόμβων, έχοντας ως άγνωστες μεταβλητές του προβλήματος τις τάσεις στους κόμβους. Τα ρεύματα στους κλάδους του δικτύου υπολογίζονται ως συναρτήσεις των τάσεων των αντίστοιχων κόμβων.

Με στόχο την επίλυση του προβλήματος στο πεδίο του χρόνου, γίνεται διακριτοποίηση των φυσικών μεγεθών. Αυτό σημαίνει ότι το φυσικό μέγεθος του χρόνου χωρίζεται σε διακριτά  $\Delta t$  διαστήματα, στα οποία πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί. Οι τιμές όλων των μεταβλητών του συστήματος θεωρούνται γνωστές για τη χρονική στιγμή  $t-\Delta t$  και το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός τους τη χρονική στιγμή  $t$ . Το διάστημα διακριτοποίησης  $\Delta t$  θεωρείται τόσο μικρό, ώστε οι διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τα στοιχεία του εξοπλισμού να προσεγγίζονται με την πρέπουσα ακρίβεια χρησιμοποιώντας εξισώσεις διαφορών.



Ας θεωρήσουμε τη διαφορική εξίσωση που περιγράφει τον επαγωγό:

$$U_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3.3.1.1)$$

Η διαφορική εξίσωση αυτή μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά από την ακόλουθη αλγεβρική εξίσωση διαφοράς:

$$\frac{U_L - U_L(t - \Delta t)}{2} = L \frac{i_L - i_L(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.3.1.2)$$

η οποία μπορεί να γραφεί και:

$$i_L(t) = \frac{\Delta t}{2L} * [U_L(t) - U_L(t - \Delta t) + i_L(t - \Delta t)] \quad (3.3.1.3)$$

Εάν θεωρήσουμε την ισοδύναμη αγωγιμότητα, η οποία παραμένει σταθερή κατά το χρονικό διάστημα  $\Delta t$ ,  $G = \frac{\Delta t}{2L}$  και ως γνωστό τον όρο:

$$I_{hist,L} = i_L(t - \Delta t) - \frac{\Delta t}{2L} U_L(t - \Delta t) \quad (3.3.1.4)$$

, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$i_L(t) = G U_L(t) + I_{hist,L}(t - \Delta t) \quad (3.3.1.5)$$

ή αλλιώς:

$$[G][U_L(t)] = [i_L(t)] - [I_{hist,L}] \quad (3.3.1.6)$$

#### Οπού:

[G]: πίνακας αγωγιμοτήτων nxn (συμμετρικός)

[u(t)]: πίνακας nx1 τιμών τάσεων

[i(t)]: πίνακας nx1 τιμών ρευμάτων

[I<sub>hist</sub>]: πίνακας nx1 γνωστών τιμών, με μονάδα το A

Κατά την επίλυση του προβλήματος, επειδή σε μερικούς κόμβους είναι γνωστή η τιμή της τάσης, λόγω πηγών τάσεων ή γείωσης, ο πίνακας των τάσεων [u(t)] διασπάται σε [u<sub>A</sub>(t)], ο οποίος περιέχει το σύνολο A των κόμβων με άγνωστη τιμή της τάσης και σε [u<sub>B</sub>(t)], ο οποίος περιέχει το σύνολο των κόμβων με γνωστή τιμή της τάσης. Έτσι η εξίσωση γίνεται:

$$[G_{AA}][U_A(t)] = [i_A(t)] - [I_{hist,A}] - [G_{AB}][U_B(t)] \quad (3.3.1.7)$$

Οι άγνωστες τάσεις του συνόλου A υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση ως προς [U<sub>A</sub>(t)]. Η ακριβής διαδικασία επίλυσης που ακολουθείται από το EMTP είναι η ακόλουθη:

Δημιουργούνται οι πίνακες [G<sub>AA</sub>] και [G<sub>AB</sub>]. Ο πίνακας [G<sub>AA</sub>] διαγωνοποιείται με απαλοιφή. Σε κάθε χρονικό βήμα, ανανεώνονται οι τιμές του δεξιού σκέλους της παραπάνω σχέσης από γνωστές τιμές τάσεων και εντάσεων των ρευμάτων. Το

σύστημα γραμμικών εξισώσεων το οποίο προκύπτει επιλύεται ως προς το διάνυσμα  $[U_A(t)]$ . Στο τέλος της επίλυσης, ενημερώνεται με τις νέες μεταβλητές που θα προκύψουν ο πίνακας  $[I_{hist}]$ , ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα επίλυσης:

Η μεταβατική προσομοίωση μπορεί να ξεκινήσει από:

1. Μηδενικές αρχικές συνθήκες
2. Συνθήκες μόνιμης κατάστασης λειτουργίας, σε συγκεκριμένη συχνότητα (δηλαδή 1 πηγή), ή σε υπερτιθέμενες συχνότητες (πολλές πηγές με διαφορετικές συχνότητες).

### 3.3.2 Επίλυση στο πεδίο της συχνότητας

Το ATP-EMTP έχει επίσης τη δυνατότητα για επίλυση στο πεδίο της συχνότητας, για μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του δικτύου. Οι εξισώσεις κόμβων γράφονται με τη χρήση φασόρων, ενώ με τον ίδιο τρόπο αναπαρίστανται οι τάσεις και τα ρεύματα που κυκλοφορούν στο δίκτυο. Για ένα δίκτυο με  $n$  κόμβους καταστρώνεται το σύστημα:

$$[Y][V] = [I] \quad (3.3.2.1)$$

οπού:

$[Y]$ : Συμμετρική μήτρα αγωγιμοτήτων, μεγέθους  $n \times n$  (περιέχει μιγαδικά στοιχεία)

$[V]$ : Διάνυσμα  $n \times 1$ , (φάσορες τάσης)

$[I]$ : Διάνυσμα  $n \times 1$ , (φάσορες ρεύματος)

Για την επίλυση του συστήματος, το διάνυσμα  $[V]$  χωρίζεται σε  $[V_A]$  και  $[V_B]$ , όπου  $A$  το υποσύνολο των αγνώστων τιμών των τάσεων και  $B$  το υποσύνολο των γνωστών τιμών. Οι άγνωστες τάσεις υπολογίζονται επιλύοντας το γραμμικό αλγεβρικό σύστημα:

$$[Y_{AA}][V_A] = [I_A] - [Y_{AB}][V_{AB}] \quad (3.3.2.2)$$

### 3.4 Βιβλιοθήκες μοντέλων του ATP-EMTP

Τα παρακάτω περιεχόμενα μπορούν να βρεθούν σε μια οποιαδήποτε βιβλιοθήκη μοντέλων του προγράμματος ATP-EMTP. Αναλυτικά, οι κυριότερες βιβλιοθήκες είναι:

- Συζευγμένα ή μη συζευγμένα γραμμικά στοιχεία  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , συγκεντρωμένων παραμέτρων.
- Γραμμές μεταφοράς καθώς και καλώδια με κατανεμημένες αλλά και εξαρτώμενες από τη συχνότητα παραμέτρους.

- Εξοπλισμός με μη γραμμικά στοιχεία, όπως είναι οι απαγωγείς υπερτάσεων (με κενό αλλά και χωρίς κενό), οι μετασχηματιστές οι οποίοι παρουσιάζουν φαινόμενα κόρου κ.τ.λ.
- Κανονικοί διακόπτες αλλά και χρονικά μεταβαλλόμενοι ή ακόμα και εξαρτώμενοι από την τάση διακόπτες, στατιστικοί διακόπτες (κυρίως για μελέτες με τη μέθοδο Monte Carlo).
- Βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής του ρεύματος όπως είναι οι δίοδοι, τα θυρίστορ, τα τρανζίστορ αλλά και τα triacs όλα ελεγχόμενα από TACS/MODELS.
- Πηγές τάσης αλλά και έντασης πολλών διαφορετικών τύπων, όπως ημιτονοειδούς μορφής, μορφής ράμπας, εκθετικής μορφής, μορφής υπέρτασης και άλλες επιπλέον.
- Στρεφόμενες μηχανές, μονοφασικές, τριφασικές, σύγχρονες αλλά και ασύγχρονες.
- Δυνατότητα κατασκευής ηλεκτρικών μοντέλων από τον κάθε χρήστη του προγράμματος.

### 3.5 Μελέτες με το ATP-EMTP

Ακολουθως, θα παρουσιαστούν κάποιες τυπικές μελέτες ηλεκτρομαγνητικών και ηλεκτρομηχανικών φαινομένων, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν με τη χρήση του προγράμματος ATP-EMTP:

- Μελέτες οι οποίες αφορούν υπερτάσεις που οφείλονται σε κεραυνούς.
- Διακοπτικά, μεταβατικά φαινόμενα αλλά και λάθη, είτε είναι συμμετρικά είτε όχι.
- Συστηματικές αλλά και στατιστικές μελέτες, οι οποίες αφορούν εμφανίσεις υπερτάσεων, οφειλόμενες σε διάφορες αιτίες.
- Ταχύτατα μεταβατικά φαινόμενα σε συστήματα μεταφοράς.
- Μοντελοποίηση μηχανών.
- Διακοπτικά φαινόμενα μετασχηματιστών καθώς και επαγωγών και χωρητικοτήτων, οι οποίες παρουσιάζουν φαινόμενα υστέρησης.
- Διάφορες εφαρμογές ηλεκτρονικών ισχύος, όπως μελέτες με θυρίστορς και τρανζίστορς.
- Διάφορες εφαρμογές της μικροηλεκτρονικής τεχνολογίας.
- Αρμονική ανάλυση.
- Έλεγχος της αξιοπιστίας, καθώς και της αντοχής της μόνωσης των συσκευών προστασίας του ηλεκτρικού συστήματος.

Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι είναι δυνατή η μοντελοποίηση ή ακόμα και ο έλεγχος διαφόρων συστημάτων ή επίσης φαινομένων τα οποία παρουσιάζουν μία μη γραμμική συμπεριφορά, όπως είναι επί παραδείγματι το φαινόμενο Corona, χρησιμοποιώντας μοντέλα του προγράμματος τα οποία ονομάζονται TACS και μιας γλώσσας εξομοίωσης, η οποία έχει επίσης προαναφερθεί και ονομάζεται MODELS. Τα δύο αυτά προαναφερθέντα στοιχεία του ATP-EMTP μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εξομοίωση δυναμικών συστημάτων τα οποία δεν περιέχουν κανένα ηλεκτρικό κύκλωμα ή σύστημα. Τα στοιχεία αυτά αναλύονται περισσότερο παρακάτω.

### 3.5.1 TACS

Το TACS (ακρώνυμο των λέξεων Transient Analysis of Control Systems) είναι ένα στοιχείο το οποίο χρησιμεύει για την εξομοίωση συστημάτων στο πεδίο του χρόνου. Στη διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται ένα μπλοκ διάγραμμα για την αναπαράσταση του συστήματος ελέγχου του υπό μελέτη φαινομένου.

Το TACS αρχικά δημιουργήθηκε έτσι ώστε να είναι σε θέση να προσομοιώσει τους μετατροπείς HVDC, αλλά μπορεί επιπλέον να φανεί χρήσιμο και σε άλλες περιπτώσεις εξομοίωσης όπως είναι επί παραδείγματι τα ακόλουθα προβλήματα:

- Συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και συστήματα έναυσης ηλεκτρονικών ισχύος, όπως για παράδειγμα είναι οι γέφυρες με θυρίστορς.
- Συστήματα διέγερσης σύγχρονων μηχανών.
- Τόξα ηλεκτρικού ρεύματος όπως αυτά τα οποία εμφανίζονται κατά το άνοιγμα ή το κλείσιμο των διακοπών ενός κυκλώματος (τόξα λόγω μεταβατικών φαινομένων), αλλά και τόξα τα οποία εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της διάσπασης της μόνωσης κάποιου διηλεκτρικού υλικού (τόξα υπερπήδησης της μόνωσης).

Για την πρόβλεψη αναπαράσταση του φυσικού προβλήματος μέσω του TACS είναι απαραίτητη η ανταλλαγή κάποιων μεγεθών τα οποία χρειάζονται για την εξομοίωση του συστήματος, ανάμεσα στο TACS και στο ηλεκτρικό κύκλωμα το οποίο αναπαριστά το πραγματικό ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο μελετάται από το ATP-EMTP. Η συνεργασία αυτή αφορά κυρίως την ανταλλαγή διαφόρων τιμών και κυματομορφών όπως είναι αυτές οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

- Τιμές αλλά και μορφές των τάσεων των κόμβων του ηλεκτρικού κυκλώματος. Όχι η τάση του καθενός κόμβου αλλά μόνο η τάση κάποιων προεπιλεγμένων από το χρήστη κόμβων.
- Τιμή αλλά και μορφή της έντασης του ρεύματος των διακοπών του κυκλώματος καθώς και κατάσταση των διακοπών (ανοικτός ή κλειστός).
- Τιμές των χρονικά μεταβαλλόμενων αντιστάσεων του συστήματος (ωμικών και μη).
- Τιμές αλλά και μορφές των πηγών τάσεως ή και έντασης του ρεύματος, οι οποίες υπάρχουν στο κύκλωμα.

### 3.5.2 Models

Το MODELS είναι μία γενικής περιγραφής γλώσσα προσομοίωσης, η οποία υποστηρίζεται από έναν μεγάλο αριθμό εργαλείων προσομοίωσης και χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται δεδομένα και να παράγει τα αντίστοιχα αποτελέσματα, τα οποία αφορούν την εξομοίωση του υπό μελέτη συστήματος, είτε στο πεδίο της συχνότητας είτε στο πεδίο του χρόνου. Επιπρόσθετα, έχει την ικανότητα να επιτρέπει στο χρήστη του ATP-EMTP την εισαγωγή, την περιγραφή αλλά και τον έλεγχο αυθαίρετων

προς το πρόγραμμα δεδομένων, όπως επίσης και διαφορετικών στοιχείων και μεταβλητών, δίνοντας ταυτόχρονα πρόσφορο έδαφος για τη διασύνδεση άλλων προγραμμάτων αλλά και στοιχείων στο περιβάλλον του ATP-EMTP. Τέλος, η περιγραφή του κάθε μοντέλου, επιτρέπεται να γίνεται χρησιμοποιώντας ελεύθερο σχηματισμό, όπως επίσης και σύνταξη με βάση κάποιες λέξεις κλειδιά σε τοπικό επίπεδο, ενώ είναι παράλληλα και αυτοτεκμηριούμενη.

### **3.6 Ρουτίνες υποστήριξης στο πρόγραμμα ATP-EMTP**

Σε πολλές περιπτώσεις είναι αναγκαίο να υπάρξει μία μετατροπή, ούτως ώστε τα στοιχεία του κατασκευαστή να μπορούν να επεξεργαστούν από το πρόγραμμα ATP-EMTP. Οι ενσωματωμένες λειτουργίες μέσα στο πρόγραμμα, οι οποίες επωμίζονται το ρόλο αυτό ονομάζονται ρουτίνες υποστήριξης του ATP-EMTP.

Οι παρακάτω υποενότητες υπάρχουν μέσα στο πρόγραμμα στο οποίο αναφερόμαστε:

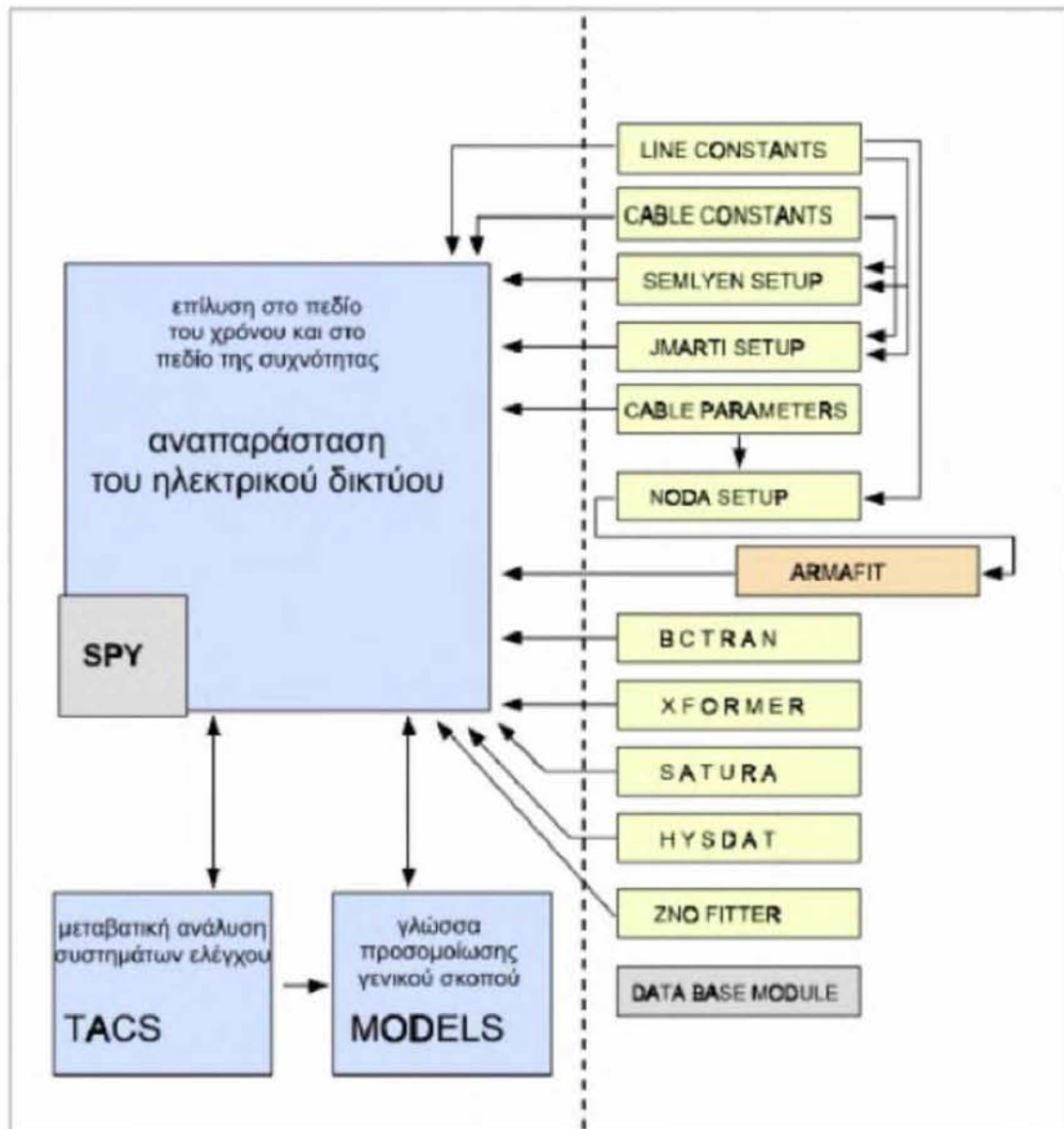
- Υπολογισμός των παραμέτρων των εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και των καλωδίων τα οποία υπάρχουν σε αυτό το εναέριο σύστημα μεταφοράς, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα LINE CONSTANTS, καθώς και CABLE PARAMETERS, τα οποία υπάρχουν ενσωματωμένα στο πρόγραμμα.
- Δημιουργία εξαρτώμενων από το πεδίο συχνότητας δεδομένων των γραμμών μεταφοράς, τα οποία χρειάζονται να περαστούν μέσα στο ATP (όπως για παράδειγμα γίνεται όταν μελετάμε μια γραμμή με το μοντέλο αναπαράστασης της γραμμής μεταφοράς J. Marti).
- Υπολογισμός των δεδομένων των μοντέλων των μετασχηματιστών του συστήματος, το οποίο μελετάται από το χρήστη του προγράμματος (π.χ. XFORMER, BCTRAN).
- Μετατροπή η οποία είναι απαραίτητη στις καμπύλες υστέρησης, καθώς και στις αντίστοιχες καμπύλες για τον κορεσμό.

### **3.7 Πρόγραμμα υποστήριξης του ATP-EMTP**

Το πρόγραμμα αποτελείται από επιμέρους υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται για την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου, όπως για την αναπαράσταση και επεξεργασία των δεδομένων εξόδου. Όσον αφορά την προετοιμασία των δεδομένων εισόδου, ενδεικτικά αναφέρονται ότι υπάρχουν ρουτίνες για την κατασκευή των παραμέτρων μιας γραμμής μεταφοράς με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της, τον υπολογισμό των παραμέτρων συζευγμένων RL, για την αναπαράσταση πολυφασικών, με πολλά τυλίγματα μετασχηματιστών, στο πεδίο του χρόνου κ.ο.κ. Αντίστοιχα, υπάρχουν ρουτίνες για την επεξεργασία δεδομένων εξόδου, όπως επί παραδείγματι για τη

δημιουργία γραφικών παραστάσεων κ.ο.κ. Εκτενής αναφορά στις υποστηρικτικές εφαρμογές θα γίνει στη συνέχεια.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα προγράμματα τα οποία υποστηρίζουν το ATP-EMTP καθώς και την αλληλεπίδραση την οποία έχουν μεταξύ τους αλλά και με το κυρίως πρόγραμμα.



(Σχήμα 3.7.1) Τα υποστηρικτικά προγράμματα του ATP-EMTP[6]

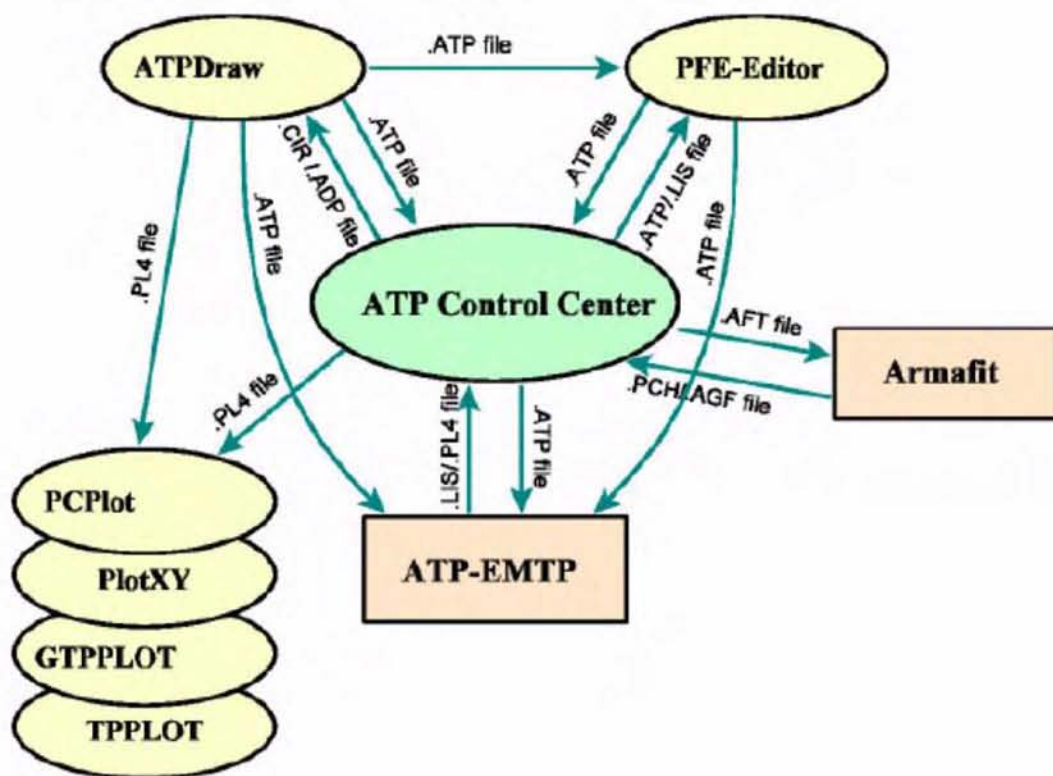
### 3.7.1 Control Center

Το ATP Control Center (ATPCC) είναι ένα εύχρηστο εργαλείο για τη διαχείριση των διάφορων προγραμμάτων του ATP-EMTP. Το ATPCC υποστηρίζει τα προγράμματα ATPDraw, PCPlot και οποιοδήποτε πρόγραμμα σχετικό με το ATP-EMTP, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον των Windows.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του ATPCC είναι:

- Δυνατότητα χρήσης δύο διαφορετικών εκδόσεων του ATP ταυτόχρονα.
- Δυνατότητα χρήσης του επιθυμητού από το χρήστη editor.
- Πάνω από 10 εξωτερικά προγράμματα έχουν τη δυνατότητα να συνδεθούν με το ATP Control Center.
- Event window, το οποίο έχει την ικανότητα να απεικονίζει τις ήδη εκτελεσμένες εντολές.
- Επανεκτέλεση των εντολών από το event window.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει την επικοινωνία του ATP Control Center με τα υπόλοιπα προγράμματα:



(Σχήμα 3.7.1.1) Διάγραμμα επικοινωνίας του ATPCC με τις υπόλοιπες εφαρμογές[6]

### 3.7.2 Το PCPlot

Το PCPlot είναι πρόγραμμα σχεδιασμού κυματομορφών και γραφικών παραστάσεων. Αναλυτικότερα, το PCPlot επεξεργάζεται τα αρχεία εξόδου ATP-EMTP με κατάληξη \*.pl4 και σχεδιάζει αντιστοίχως τις γραφικές παραστάσεις. Τα αρχεία με κατάληξη \*.pl4 προκύπτουν ως έξοδοι από τις εκδόσεις του ATP-EMTP: Salford, Watcom και GNU/Mingw32.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου προγράμματος είναι τα εξής:

- Έχει μέγιστο όριο επεξεργασίας και σχεδιασμού τον αριθμό των έξι μεταβλητών.
- Έχει τη δυνατότητα επιλογής χρωμάτων.
- Υπάρχει η επιλογή της μεγέθυνσης.
- Δυνατότητες αντιγραφής-επικόλλησης, BMP format saving.

### 3.7.3 Το PlotXY

Το PlotXY είναι πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό των απαιτούμενων κυματομορφών και γραφικών παραστάσεων. Πιο διεξοδικά, το PlotXY επεξεργάζεται τα αρχεία εξόδου από το ATP-EMTP τα οποία έχουν κατάληξη \*.p14 και σχεδιάζει αντίστοιχα τις γραφικές παραστάσεις. Τα αρχεία με κατάληξη \*.p14 προκύπτουν ως έξοδοι από τις εκδόσεις του ATP-EMTP: Salford, Watcom και GNU/Mingw32.

Το πρόγραμμα PlotXY δημιουργήθηκε αρχικά για να γίνεται η μεταεπεξεργασία αρχείων του ATP-EMTP. Επιπλέον, υποστηρίζει και αρχεία τύπου ASCII data.

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Το PlotXY διαθέτει εύχρηστο GUI (Graphical User Interface).
- Έχει ως μέγιστο όριο επεξεργασίας και σχεδιασμού έξι μεταβλητές.
- Παρέχεται η δυνατότητα σχεδιασμού από τρία αρχεία στο ίδιο φύλλο.
- Το πρόγραμμα έχει την ικανότητα να παρέχει σχεδιασμό ως προς χρόνο ή ακόμα και με ΧΥ προεπιλεγμένους άξονες.
- Παρέχεται η δυνατότητα στο χρήστη να επιλέξει τα χρώματα της αρεσκείας του μέσα από μία πλούσια ποικιλία χρωμάτων.
- Υπάρχει επιλογή μεγέθυνσης των διαγραμμάτων τα οποία επεξεργάζεται ο χρήστης.
- Υπάρχει πρόβλεψη από τον κατασκευαστή, ώστε να παρέχονται δυνατότητες αντιγραφής-επικόλλησης και BMP format saving.

### 3.7.4 Το GTPPlot

Το GTPPlot είναι πρόγραμμα σχεδιασμού των εξόδων του ATP-EMTP, όπως και τα δύο προηγούμενα. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι ότι λειτουργεί και σε Linux.



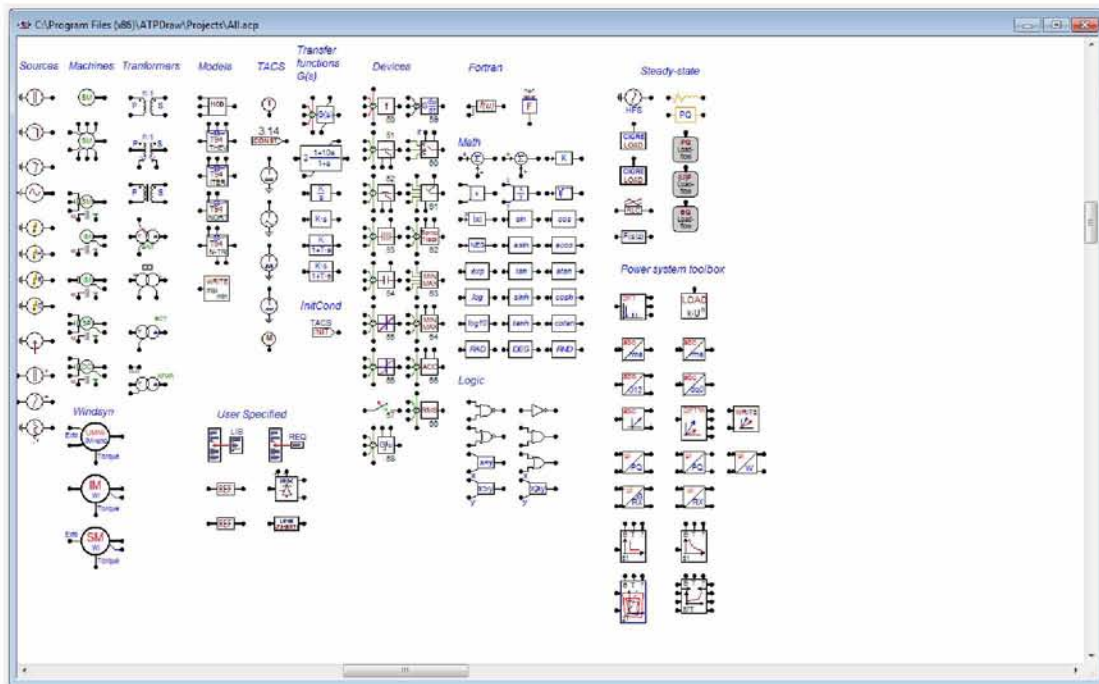
Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του είναι:

- Εύκολο στη χρήση GUI (Graphical User Interface).
- Ως μέγιστο όριο επεξεργασίας και σχεδιασμού έχει τα 100000 σημεία και τις 1000 μεταβλητές.
- Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό το οποίο εισάγεται από το GTPPlot είναι ο σχεδιασμός ανάλυσης FOURIER.
- Αντίθετα από τα προηγούμενα, δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου από το ποντίκι.
- Παρέχεται η δυνατότητα επιλογής χρωμάτων.
- Υφίσταται η επιλογή μεγέθυνσης των εξόδων του συστήματος.
- Υποστηρίζονται οι δυνατότητες αντιγραφής-επικόλλησης και BMP format saving.

### 3.8 Το ATPDraw

Το ATPDraw είναι γραφικός προεπεξεργαστής που δημιουργεί αρχεία \*.atp. Με το ATPDraw ο χρήστης κατασκευάζει με χρήση γραφικών το προς προσομοίωση ηλεκτρικό δίκτυο, επιλέγοντας στοιχεία από μια εκτεταμένη παλέτα. Μέσα από το πρόγραμμα αναπαρίσταται με τη μορφή δομικών στοιχείων το κυκλωματικό σχέδιο του κυκλώματος ή ηλεκτρικού δικτύου, ορίζονται οι απαραίτητες παράμετροι με σχετικά εύκολο και απλό τρόπο προκειμένου να προχωρήσει ο μελετητής στην ανάλυση με το ATP-EMTP. Η έξοδος του προγράμματος είναι τα εισαγόμενα στο ATP-EMTP αρχείο, \*.atp.

Το ATPDraw υποστηρίζει περίπου 100 στοιχεία. Καθώς λειτουργεί με τη λογική των Windows, δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα επιλογής στοιχείων από τις παλέτες που διαθέτει, ενώ μπορούν να σχεδιαστούν μονοφασικά αλλά και τριφασικά κυκλώματα. Άλλες δυνατότητες του ATPDraw είναι: ενσωματωμένος editor για ATP-file, υποστήριξη του Windows clipboard για bitmap/metafile αρχεία κ.



(Σχήμα 3.8.1) Όλα τα στοιχεία του ATP-Draw

Το ATPDraw υποστηρίζει τους παρακάτω τύπους στοιχείων:

- Γραμμικοί κλάδοι καθώς και συγκεντρωμένα στοιχεία περιλαμβάνοντας και τα TACS.
- Μη γραμμικοί κλάδοι στοιχείων
- Διακόπτες
- Πηγές τάσης και έντασης
- Δυνατότητα κατασκευής νέων μοντέλων από το χρήστη (MODELS)
- Δυνατότητα ορισμού στοιχείων από το χρήστη (User Object)

Οι βασικοί τύποι αρχείων που υποστηρίζονται από το ATPDraw είναι:

- .atp – atp αρχείο. Αρχείο που παράγεται από το ATPDraw και μεταφράζεται απευθείας με το ATP-EMTP.
- .adr – project αρχείο. Αρχείο που περιέχει την περιγραφή του κυκλώματος και όλα τα εξωτερικά οριζόμενα στοιχεία αυτού, όπως model, user specified, line/cable data και lib αρχεία. Μαζί με αυτό το αρχείο ανοίγουν και τα υπόλοιπα εξωτερικά αρχεία που αφορούν το συγκεκριμένο κύκλωμα έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του.
- .sup – support αρχείο. Περιλαμβάνει πληροφορίες για κάθε στοιχείο ξεχωριστά όπως αριθμό συνδέσεων, εικονίδιο, κείμενο βοήθειας.
- .mob, .lib – model, user specified αρχείο. Αρχεία που περιέχουν πληροφορίες για τα MODEL ή τα User Specified στοιχεία.

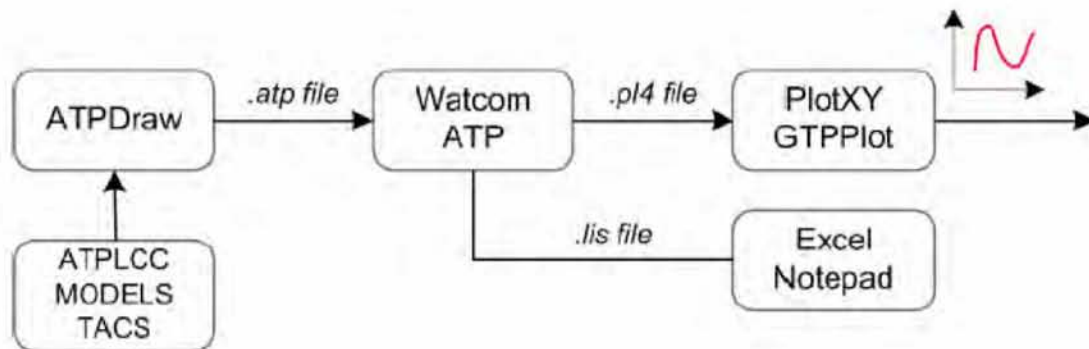
Η διαδικασία ανάλυσης γίνεται ως εξής:

1. Με αρωγό το πρόγραμμα ATPDraw, ο μελετητής σχεδιάζει το κύκλωμα που θέλει να εξομοιώσει, το οποίο μαζί με όλες τις παραμέτρους αποθηκεύεται σε αρχείο με κατάληξη .adr.
2. Κατόπιν, παράγεται το αρχείο κειμένου με την κατάληξη .atp, το οποίο και θα αποτελέσει την είσοδο του ATP-EMTP. Ο χρήστης έχει την

ευχέρεια να ζητήσει από το πρόγραμμα ATP- EMTP το σχεδιασμό των επιθυμητών από τον ίδιο ηλεκτρικών ποσοτήτων τοποθετώντας τους απαιτούμενους μετρητές της τάσης και της έντασης του ρεύματος στους κατάλληλους κόμβους του κυκλωματικού σχεδιαγράμματος, το οποίο έχει κατασκευαστεί από τον ίδιο το χρήστη στο περιβάλλον του ATPDraw.

3. Μετά το πέρας της διαδικασίας της προσομοίωσης, επιστρέφεται ένα αρχείο κειμένου με την κατάληξη .lis καθώς και ένα αρχείο με κατάληξη .pl4, στην περίπτωση που η προσομοίωση ολοκληρωθεί επιτυχώς. Σε αντίθετη περίπτωση, παράγεται το σφάλμα κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Το αρχείο .pl4 περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις, οι οποίες έχουν ζητηθεί από το χρήστη. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ζητήσει τις γραφικές παραστάσεις και τα διαγράμματα των μεγεθών τα οποία έχει ζητήσει από την προσομοίωση και τα οποία περιέχονται στο παραπάνω αρχείο με τη χρήση αρκετών υποπρογραμμάτων του κυρίως προγράμματος, όπως επί παραδείγματι τα GTPPlot και PlotXY.

Η πορεία της εξομοίωσης του επιθυμητού από το χρήστη ηλεκτρικού συστήματος, στην περίπτωση κατά την οποία μελετάται η συμπεριφορά μιας εναέριας γραμμής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



(Σχήμα 3.8.2) Διαδικασία εξομοίωσης ηλεκτρικού συστήματος με χρήση του ATP-EMTP[6]

### 3.9 Το ATP-LCC

Στο ATP-LCC (Line Cable Constants) ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει τα στοιχεία και τα δεδομένα για τη διατομή και το υλικό μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς καθώς και ενός συστήματος εναέριων καλωδίων. Με βάση τα τοποθετούμενα από το χρήστη δεδομένα το πρόγραμμα ATP-LCC δημιουργεί ένα ATP αρχείο το οποίο είναι έτοιμο να διαβαστεί και να επεξεργαστεί από το ATP, έτσι ώστε το τελευταίο να είναι σε θέση να δημιουργήσει ένα αρχείο εξόδου ή ένα αρχείο εξόδου πινάκων (LIS αρχείο).

Το πρόγραμμα ATP-LCC αποτελείται από δύο μέρη, ένα το οποίο αφορά τα στοιχεία για τις σταθερές των γραμμών και ένα άλλο το οποίο αφορά τα αντίστοιχα δεδομένα για τα καλώδια. Αυτά τα δύο στελέχη του προγράμματος χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα και από το χρήστη ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και σε ξεχωριστά παραθυρικά περιβάλλοντα.

Πιο αναλυτικά, το πρόγραμμα υποστηρίζει:

1. Σταθερές γραμμών: συνεχείς παράμετροι
  - Π-ισοδύναμα γραμμών μεταφοράς
  - Έξοδοι μοναδικής απόκρισης
  - Έξοδοι αμοιβαίας σύζευξης
  - Έξοδοι λογαριθμικής συχνότητας
  
2. Σταθερές καλωδίων: εναέριες γραμμές
  - Μονοπολικά καλώδια
  - Καλώδια εσωκλειόμενου σωλήνα
  - Υποστηρίζονται Π-ισοδύναμα καθώς και γραμμές και καλώδια τύπου JMarti.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

### Μοντελοποίηση αιολικού πάρκου

Όπως συμβαίνει σε οποιαδήποτε προσπάθεια εξομοίωσης ενός συστήματος, έτσι και στο παρόν έργο θα χρειαστεί πρώτα να μελετηθούν και τα προσεγγιστούν τα μοντέλα των βασικών παραγόντων. Θα πρέπει βεβαίως να σημειωθεί ότι σκοπός αυτής της εργασίας είναι να μελετηθούν σφάλματα και όχι να γίνει αναλυτική παρουσίαση της μεθοδολογίας κατασκευής των επιμέρους στοιχείων του δικτύου.

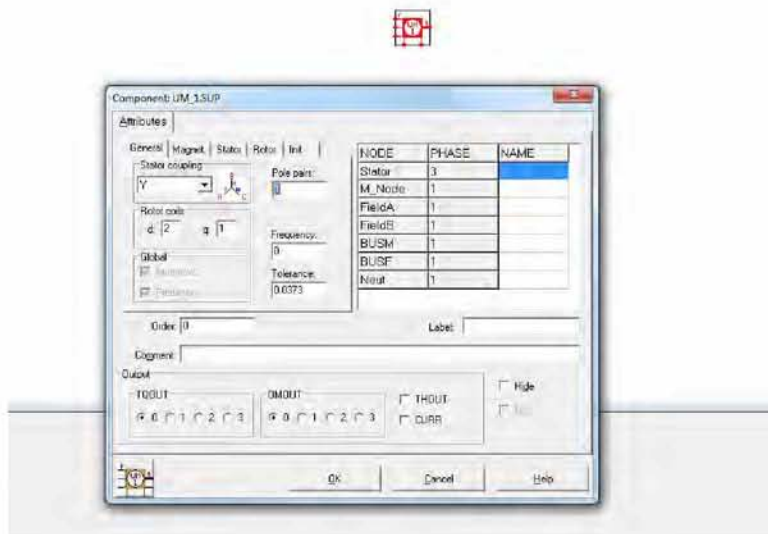
Στο παρόν κεφάλαιο, θα γίνει επεξήγηση του μοντέλου της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούμε στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Εν συνεχεία θα παρουσιαστούν αποτελέσματα που δείχνουν τη συμπεριφορά του σε βασικές περιπτώσεις (π.χ. εν κενώ λειτουργία), ενώ θα παρουσιάσουμε και το μοντέλο του μετασχηματιστή. Ακόμη, θα προταθεί ένα ουσιαστικό, ολικό σύστημα ανεμογεννητριών και Μ/Σ που θα είναι και η βάση των εξομοιώσεων του επόμενου κεφαλαίου. Μέσα από αυτό το δίκτυο θα προσπαθήσουμε να προσομοιώσουμε σφάλματα και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

### 4.1 Το μοντέλο της ανεμογεννήτριας

#### 4.1.1 Το μοντέλο UM1 της σύγχρονης μηχανής και η εξομοίωση της ανεμογεννήτριας

Οι σύγχρονες γεννήτριες με την δυνατότητα ρύθμισης του ρέματος διέγερσης είναι δυνατόν να ελέγξουν την συμπεριφορά της γεννήτριας ως προς την παροχή έργου ισχύος και να ρυθμίσουν τη τάση. Ωστόσο, όταν είναι διασυνδεδεμένες στο δίκτυο διανομής λειτουργούν συνήθως με σταθερό συντελεστή ισχύος. Έτσι αποτρέπεται η ανταγωνιστική δράση με τις άλλες συσκευές που ρυθμίζουν την τάση στο δίκτυο, όπως είναι ο μετασχηματιστής μεταβλητών σχέσεων του υποσταθμού και οι πυκνωτές. Επιπλέον, η προσπάθεια του ρυθμιστή τάσης των μικρών σύγχρονων γεννητριών να ελέγξει την τάση ολόκληρου του συστήματος, πιθανότητα θα τον οδηγούσε σε ακραίες τιμές, με αποτέλεσμα να υπάρχει δυσλειτουργία. Ιδιαίτερης σημασίας είναι η λειτουργία των σύγχρονων γεννητριών κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο. Σε περίπτωση σφαλμάτων συνεισφέρουν στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και τη θέση τους ως προς το σφάλμα. Επομένως έχει αξία η σωστή μοντελοποίηση της λειτουργίας τους κατά την διάρκεια σφαλμάτων.[14]

Για την μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας επιλέχθηκε η μηχανή Universal Machine 1(UM1 synchronous) του EMTP. Η UM1 αναπαριστά ακριβώς τη σύγχρονη μηχανή είτε με κατανεμημένους είτε με έκτυπους πόλους, και είναι η καταλληλότερη γιατί υπάρχει η δυνατότητα αναπαράστασης του μηχανικού μέρους την γεννήτριας.[8][13]



(Εικόνα 4.1.1.1) Το μοντέλο UM1 και η πρώτη καρτέλα δεδομένων

Η σύγχρονη μηχανή που θα παρασταθεί, έχει 2 ζεύγη εκτύπων πόλων, λειτουργεί στην συχνότητα των 50Hz και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

(Πίνακας 4.1.1.1)-Δεδομένα Γεννήτριας

Ονομαστική τάση γεννήτριας	400V
Αριθμός ζευγών πόλων	2
Φαινόμενη ισχύς	250kVA
Αντίσταση στάτη(Rd και Rq)	0.0166Ω
Αντίσταση δρομέα(Rf)	0.004979Ω
Επαγωγή σκέδασης στάτη(Li)	0.0001833 H
M <sub>dm</sub>	0.005602 H
Αυτεπαγωγή τυλίγματος δρομέα(Lf)	0.0006512 H
M <sub>mq</sub>	0.004787 H
Αντίσταση τυλίγματος απόσβεσης(R <sub>D</sub> )	0.187Ω
Επαγωγή τυλίγματος απόσβεσης(L <sub>D</sub> )	0.004037H
Αντίσταση τυλίγματος απόσβεσης q(R <sub>Q</sub> )	0.042Ω
Επαγωγή τυλίγματος απόσβεσης q(L <sub>Q</sub> )	0.0006214H

Το μοντέλο αυτό του ATP-draw, έχει και δύο επιπρόσθετα μέρη όσο αφορά τη διέγερση και την μηχανική ροπή του άξονα του δρομέα. Με βάση το rule book EMTP, τόσο η διέγερση όσο και η ροπή πρέπει να είναι συγκεκριμένης μορφής για να «συνεργαστούν» με το UM1.

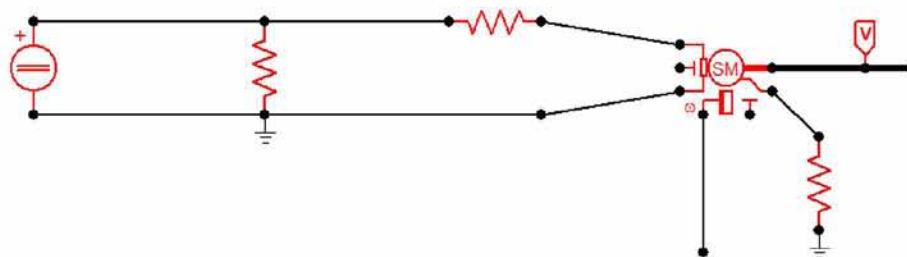
#### 4.1.2 Η διέγερση της μηχανής

Το τύλιγμα του δρομέα τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα, η ροπή εισόδου από το μηχανικό κύκλωμα περιστρέφει τον δρομέα και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που επάγει τάση στα τυλίγματα του στάτη.

Η διέγερση πρέπει να παρασταθεί ως πηγή τάσης συνδεδεμένη με κατάλληλες αντιστάσεις και όχι απευθείας στο μοντέλο της μηχανής(rule book)[8].

Θα πρέπει να τονιστεί ότι ρεύμα διέγερσης εν κενώ ονομάζεται εκείνο το ρεύμα για το οποίο η γεννήτρια αποδίδει ΗΕΔ ίση με την ονομαστική. Αν είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο, τότε το ρεύμα θα είναι πολύ μικρό, από τη στιγμή που τα διανύσματα ΗΕΔ και τάσης δικτύου είναι ίσα μεταξύ τους.

Άρα θα έχει την μορφή της εικόνας(4.1.2.1):



(Εικόνα 4.1.2.1) Διέγερση μηχανής

Τόσο ο πύργος όσο και τα επιμέρους στοιχεία μέχρι το ρότορα της μηχανής θα πρέπει να εξομοιωθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του EMTP. Με βάση το rule book το μοντέλο χρειάζεται το ηλεκτρικό ισοδύναμο του αντίστοιχου μηχανικού μέρους[10], [8].

Αρχικά αναφέρονται οι αντιστοιχίες των μηχανικών στοιχείων με τα ηλεκτρικά:

- Κάθε μάζα που αναπαρίσταται είναι ένας κόμβος του ηλεκτρικού κυκλώματος.
- Η ροπή αδράνειας της μάζας αντιστοιχεί σε μια χωρητικότητα. ( $1 \text{ kg m}^2 \rightarrow 1 \text{ F}$ )
- Η αρχική ταχύτητα περιστροφής της μάζας αντιστοιχεί σε αρχική φόρτιση του πυκνωτή. ( $1 \text{ rad/sec} \rightarrow 1 \text{ V}$ )
- Οι δυνάμεις που εμποδίζουν την περιστροφή των μαζών, οι δυνάμεις τριβής, αντιστοιχούν σε ωμικές αντιστάσεις. ( $1 \text{ Nms / rad} \rightarrow 1 / \text{ohm}$ )
- Η ακαμψία του άξονα αντιστοιχεί σε μια επαγωγή. ( $1 \text{ Nm / rad} \rightarrow 1 / \text{Henry}$ )
- Οι εξωτερικές ροπές αναπαρίστανται με πηγές ρεύματος. ( $1 \text{ Nm} \rightarrow 1 \text{ A}$ )

Στο μοντέλο που παρουσιάζεται, παραλείπεται η ροπή αδράνειας του κιβωτίου ταχυτήτων ως αμελητέα. Έτσι λοιπόν υπάρχουν δύο μάζες προς αναπαράσταση. Η μάζα του δρομέα της ανεμογεννήτριας και η μάζα του δρομέα της γεννήτριας. Γι' αυτό και στο ηλεκτρικό ισοδύναμο του μηχανικού κυκλώματος υπάρχουν δύο κόμβοι.

Οι ροπές αδράνειας των δύο αυτών μαζών αναπαρίστανται σύμφωνα με τα παραπάνω με δύο χωρητικότητες ( $C_T=102.8\text{F}$ ,  $C_G=3.553\text{F}$ ). Όσον αφορά την φόρτιση των χωρητικότητων έχουμε  $157 \text{ V}$ .

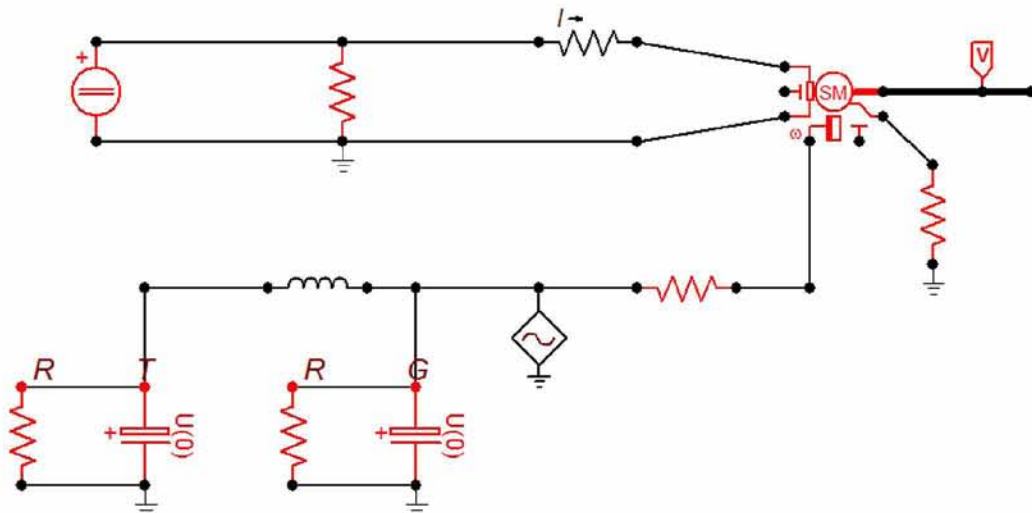
Είναι ακόμα γνωστές οι δυνάμεις τριβής κατά την περιστροφή των δυο μαζών, οι οποίες αναπαρίστανται με δυο ωμικές αντιστάσεις, τοποθετημένες παράλληλα στους πυκνωτές ( $R_T=0.00215\Omega$ ,  $R_G=0.0215\Omega$ ). Η ακαμψία του άξονα

αναπαρίσταται από μια επαγωγή η οποία ενώνει τα δύο RC κυκλώματα( $L=0.4\text{mH}$ ).

Πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι οποιαδήποτε δύναμη τριβής του άξονα μεταφοράς της κίνησης θα αντιστοιχούσε σε μια αντίσταση παράλληλη με την επαγωγή( $R=0.16\Omega$ ).

Τέλος τη ροπή εισόδου του αέρα που αντιπροσωπεύει την αιολική ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανική και περιστρέφει τα πτερύγια αναπαρίσταται με μια πηγή ρεύματος( $I=80.367\text{kA}$ ).

Έτσι το ολικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας όπως εξομοιώθηκε στο πρόγραμμα, συμπεριλαμβανομένου και του ηλεκτρικού ισοδύναμου, έχει την ακόλουθη μορφή:



(Εικόνα 4.1.2.2) Το κυκλωματικό μοντέλο της ανεμογεννήτριας

Στην ανεμογεννήτρια έχουμε μία ροπή εισόδου, η οποία μεταφράζεται σε μία πηγή ρεύματος.

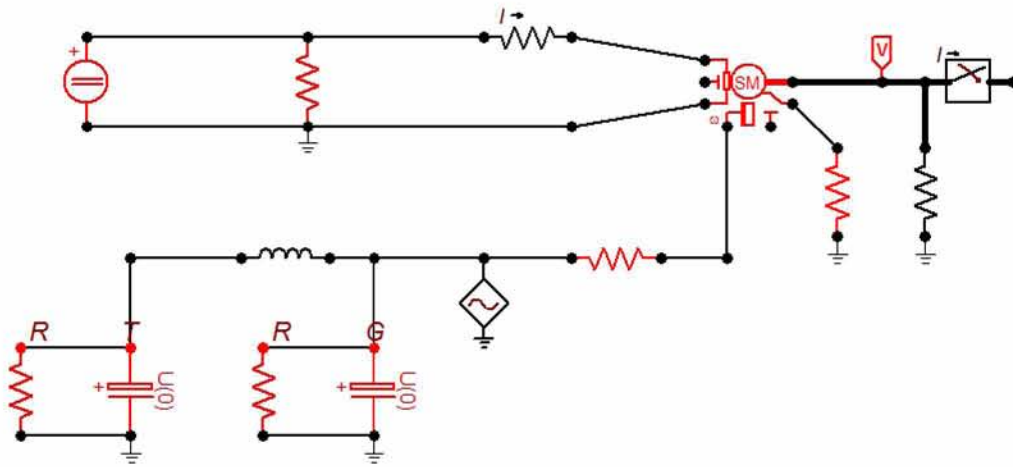
### 4.1.3 Εν κενώ λειτουργία

Το μοντέλο θα μελετηθεί σε εξομοίωση όπου ο προσαρμοσμένος διακόπτης στα άκρα της μηχανής είναι σε όλη τη διάρκεια ανοιχτός.

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να παρατηρηθεί είναι πόσος χρόνος απαιτείται ώστε η γεννήτρια να έλθει σε μόνιμη κατάσταση από τις αρχικές μηδενικές τιμές για  $t=0$ . Αυτό είναι βασικό για τις επόμενες εξομοιώσεις ώστε να υπάρχει η γνώση πότε πρέπει να παρεμβληθούν τα μεταβατικά φαινόμενα για σωστές μετρήσεις.

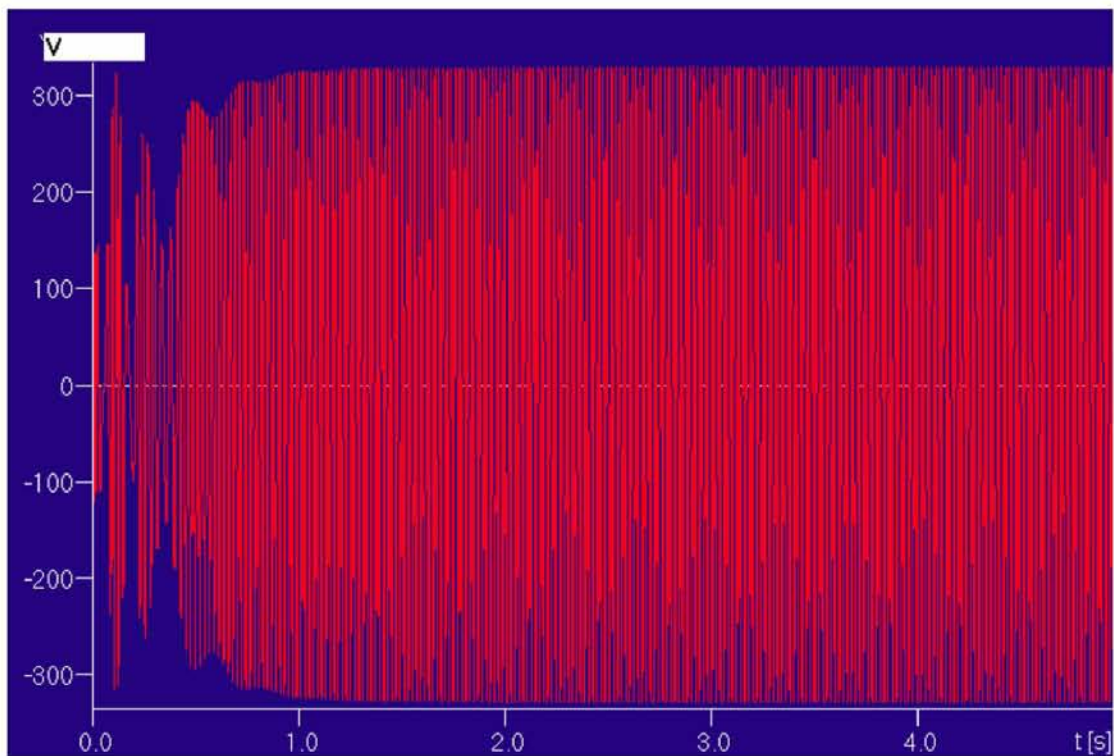


Το ολικό μοντέλο είναι:

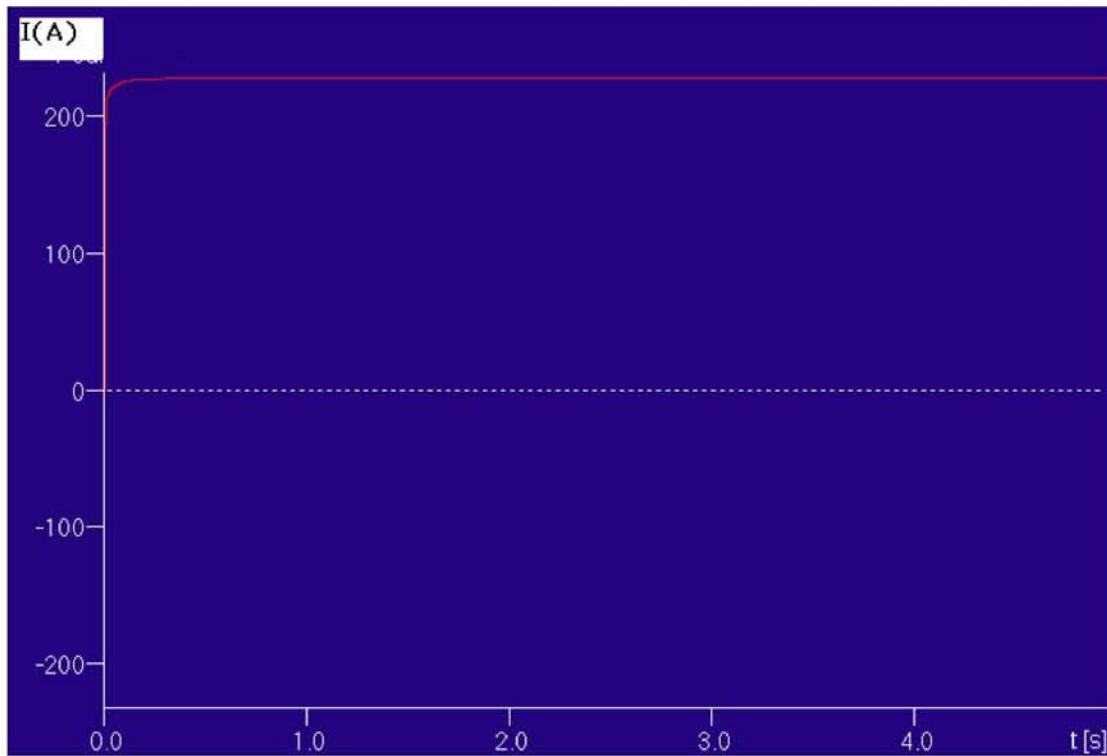


(Σχήμα 4.1.3.1) Εν κενώ μοντέλο εξομοίωσης

Και οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν για τις εισόδους και τις εξόδους της γεννήτριας είναι:



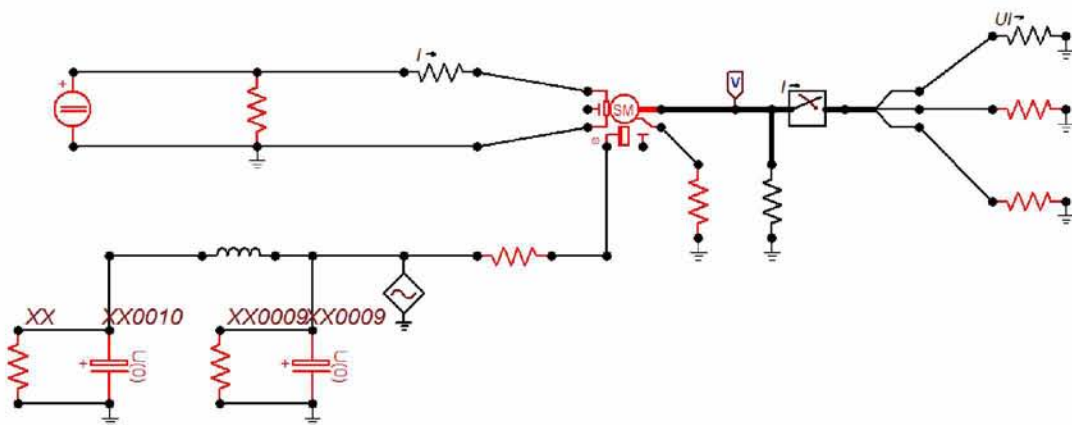
(Σχήμα 4.1.3.2) Τάση στα άκρα της γεννήτριας(φάση A)



(Σχήμα 4.1.3.3) Το ρεύμα της διέγερσης

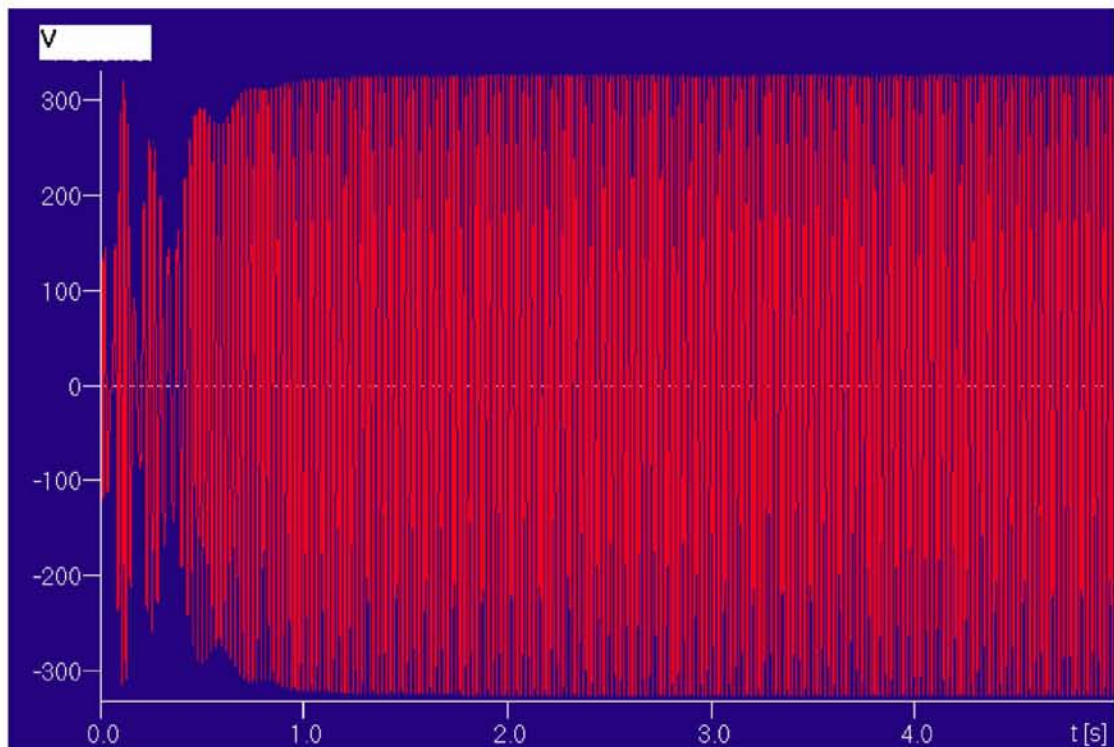
#### 4.1.4 Με τριφασικό ωμικό φορτίο στα άκρα

Ως ένα δεύτερο βήμα θα φορτίσουμε την γεννήτρια με ένα συμμετρικό τριφασικό φορτίο  $150\Omega$ . Το μοντέλο του συστήματος έχει την παρακάτω μορφή[11],[12]:

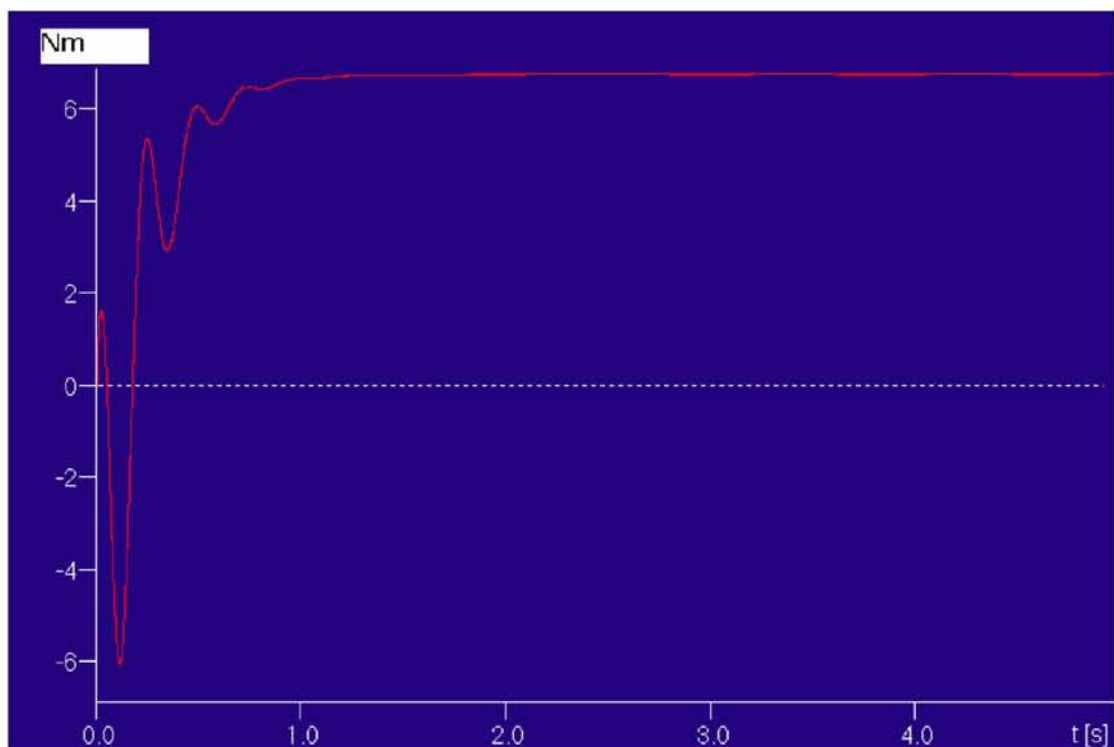


(Σχήμα 4.1.4.1) Το κυκλωματικό μοντέλο της Α/Γ με τριφασική ωμική φόρτιση

Στα επόμενα σχήματα θα παρασταθούν οι έξοδοι της γεννήτριας για ωμική συμμετρική τριφασική φόρτιση.

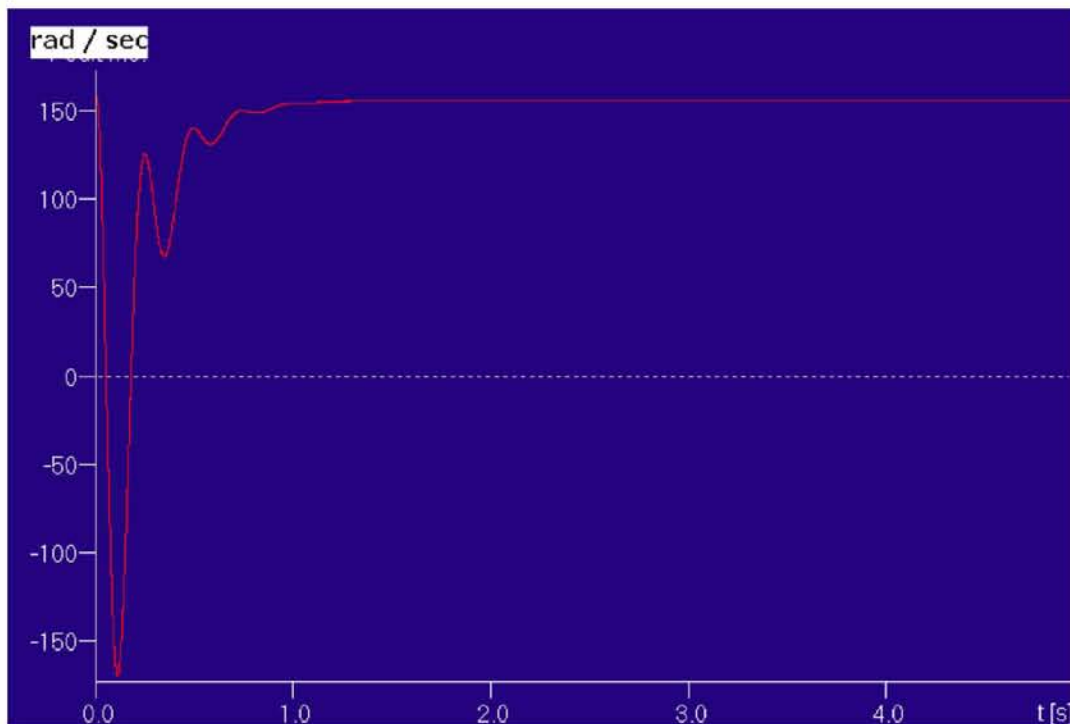


(Σχήμα 4.1.4.2) Τάση στα άκρα φορτίου (φάση A)



(Σχήμα 4.1.4.3) Ηλεκτρομαγνητική ροπή (έξοδου)

Παρατηρείται για την έξοδο της γεννήτριας με συμμετρικό ωμικό φορτίο ότι η τάση παραμένει σταθερή στο ονομαστικό μέγεθος, ενώ η ροπή στην έξοδο λαμβάνει μια σταθερή τιμή λίγο πάνω από τα 6Nm, ώστε να ισορροπήσει τις απαιτήσεις ισχύος του φορτίου.



(Σχήμα 4.1.4.4) Μηχανική ροπή

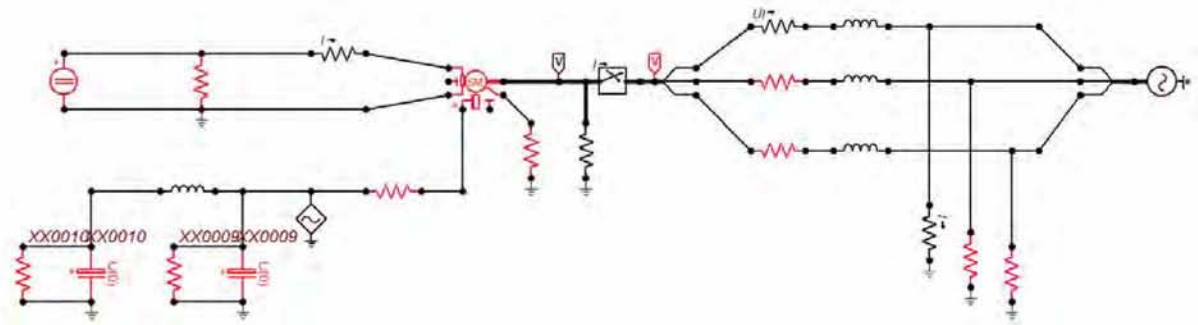
Η μηχανική ισχύς εισόδου φαίνεται ότι αρκεί για να καλύψει τις απαιτήσεις του φορτίου. Άλλωστε το φορτίο είναι ωμικό, έχει απαιτήσεις μόνο ενεργού ισχύος, απαιτήσεις που εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη μηχανική ισχύ εισόδου, δηλαδή από τη δύναμη που περιστρέφει ο άνεμος τον άξονα της ανεμογεννήτριας.

#### 4.1.5 Σύνδεση Α/Γ σε απλό δίκτυο

Για να συνδεθεί μια σύγχρονη γεννήτρια σε ένα μεγάλο δίκτυο στο οποίο θα παράσχει συγκεκριμένη πραγματική και άεργο ισχύς, πρέπει να προηγηθεί η διαδικασία του συγχρονισμού και κατόπιν να γίνουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις των μεταβλητών ελέγχου ώστε αυτή να δώσει την επιθυμητή μιγαδική ισχύ. Αρχικά ο διακόπτης της γεννήτριας είναι ανοικτός, οπότε αυτή λειτουργεί εν κενώ. Για να υπάρχει μια ομαλή μετάβαση πρέπει να ικανοποιούνται οι ακόλουθες συνθήκες συγχρονισμού μεταξύ τάσης γεννήτριας  $E$  (κατά την εν κενώ λειτουργία της) και της ονομαστικής τάσης συστήματος  $V$ :

- Να έχουν την ίδια συχνότητα.
- Να είναι της ίδιας φασικής ακολουθίας.
- Να έχουν το ίδιο μέτρο, δηλαδή  $|E| = |V|$ .
- Να έχουν ίσες φασικές γωνίες.

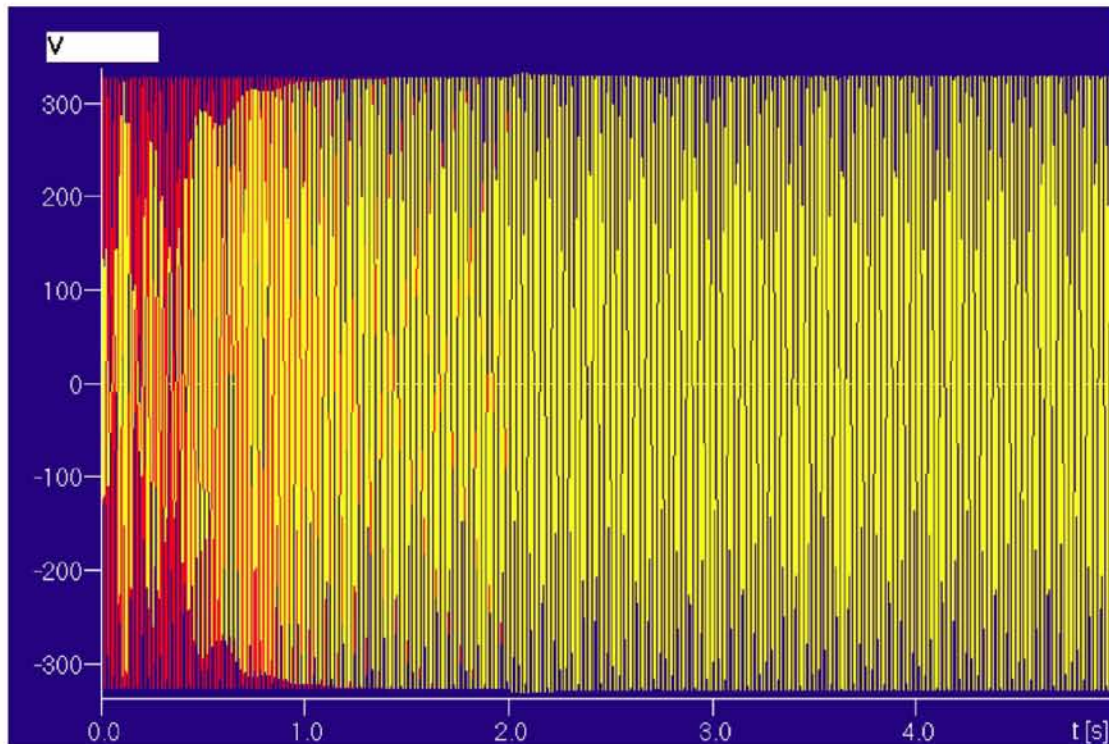
Επομένως έχουμε το εξής μοντέλο:



(Σχήμα 4.1.5.1) Το μοντέλο της σύνδεσης Α/Γ σε δίκτυο

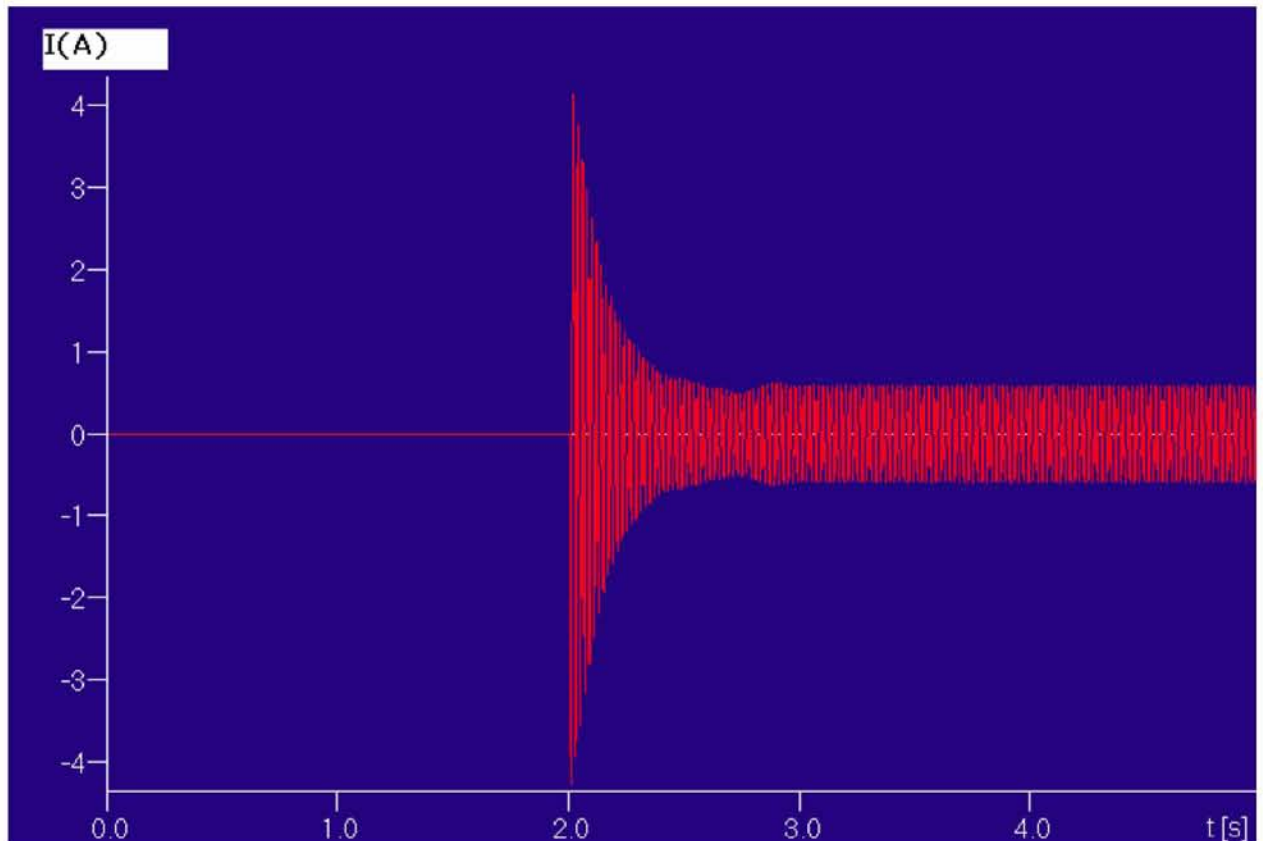
Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η Α/Γ θα συνδεθεί με το δίκτυο με το κλείσιμο του διακόπτη στα 2 sec.

Οι εισοδοι και οι εξοδοι της ανεμογεννήτριας εδώ θα είναι:



(Σχήμα 4.1.5.2) Τάσεις στους ακροδέκτες του διακόπτη(πριν και μετά)

Το ρεύμα που δημιουργείται μετά τη σύνδεση της Α/Γ είναι πολύ μικρό όπως μπορεί να διακρίνει κάποιος από το επόμενο διάγραμμα:



(Σχήμα 4.1.5.3) Ρεύμα στα άκρα της Α/Γ (φάση Α)

Στα 2 sec όπου κλείνει ο διακόπτης επίσης παρατηρείται ένα μεταβατικό ρεύμα, μικρής όμως έντασης.

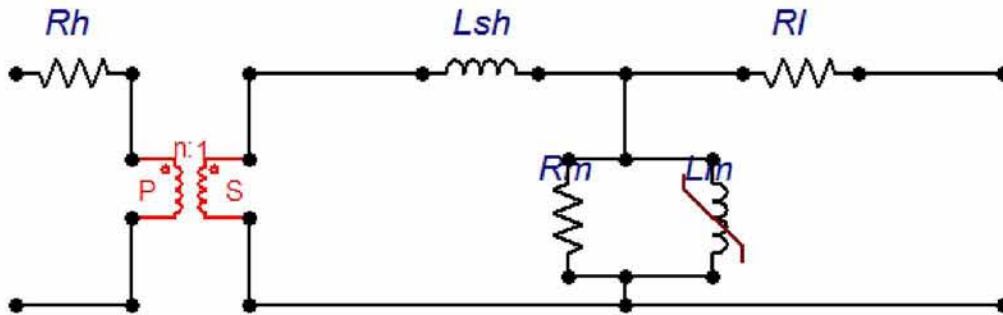
## 4.2 Μοντελοποίηση μετασχηματιστή

Για την μοντελοποίηση του τριφασικού μετασχηματιστή ανύψωσης, ο οποίος συνδέει το αιολικό πάρκο με το δίκτυο μέσης τάσης χρησιμοποιήθηκαν τρεις μονοφασικοί μετασχηματιστές σε συνδεσμολογία αστέρας-αστέρας (Υ-Υ).[11]

(Πίνακας 4.2.1)-Δεδομένα τριφασικού μετασχηματιστή

Ονομαστική τάση $U_{1N}/U_{2N}$	0.4/20-24kV
Ονομαστική ισχύς $S_n$	400kVA
Απώλειες Σιδήρου $P_{Fe}$	640W
Απώλειες Χαλκού $P_{Cu}$	4600W
Ρεύμα εν κενώ $I_0$	0.009In
Τάση βραχυκύκλωσης $u_k$	4%

Οπότε το μοντέλο του μονοφασικού μετασχηματιστή που χρησιμοποιήθηκε στην εξομοίωση είναι[9]:



(Σχήμα 4.2.1) Μοντέλο Μονοφασικού Μετασχηματιστή[9]

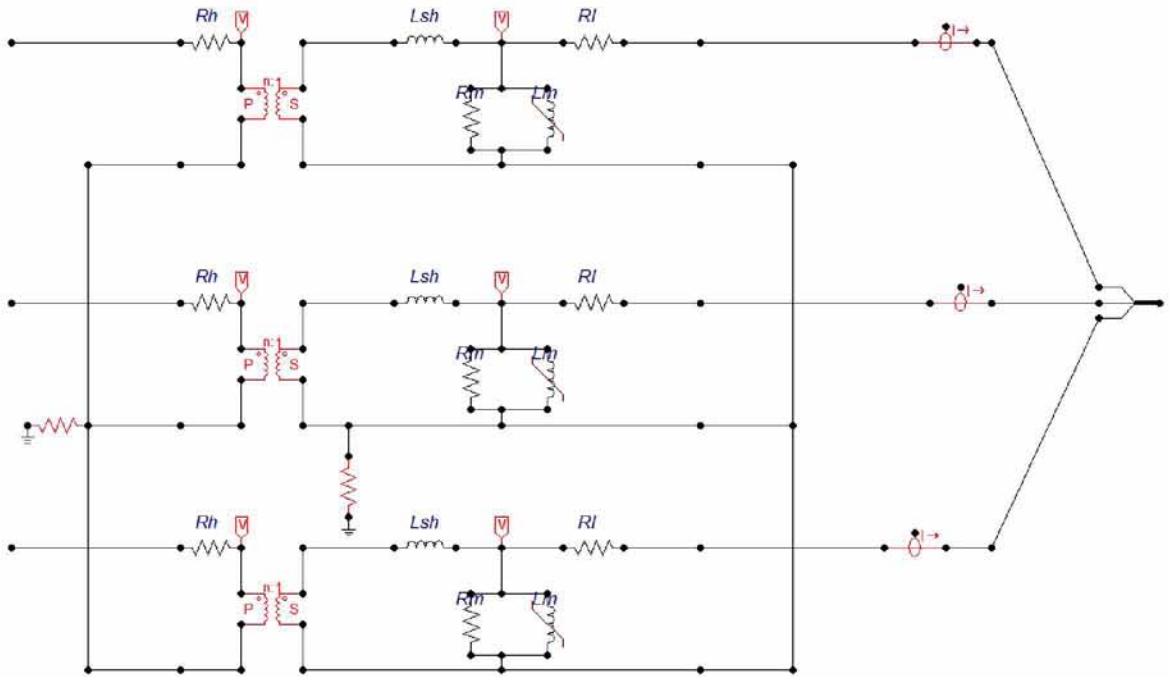
Συνοπτικά τα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος είναι:

- Τα  $R_L$  και  $R_h$  αντιπροσωπεύουν τις ωμικές αντιστάσεις του τυλίγματος χαμηλής (πρωτεύον) και υψηλής (δευτερεύον) τάσης αντίστοιχα.
- Το γραμμικό πηνίο  $L_{sh}$  αντιπροσωπεύει την ροή σκεδάσεως μεταξύ των τυλιγμάτων.
- Η  $R_m$  αντιπροσωπεύει τις απώλειες σιδήρου στον πυρήνα του μετασχηματιστή.
- Το μη γραμμικό πηνίο  $L_m$  αντιπροσωπεύει τον μαγνητικό κορεσμό του πυρήνα.

Οι τιμές των στοιχείων είναι:

$R_L$	2.305mΩ
$R_h$	5.76Ω
$L_{sh}$	0.05mH
$R_m$	250Ω

Με βάση αυτά δημιουργείται το τριφασικό μοντέλο από τη σύζευξη σε αστέρα τριών μονοφασικών μοντέλων μαζί. Στο παρακάτω σχήμα αυτό γίνεται εμφανές:[10]



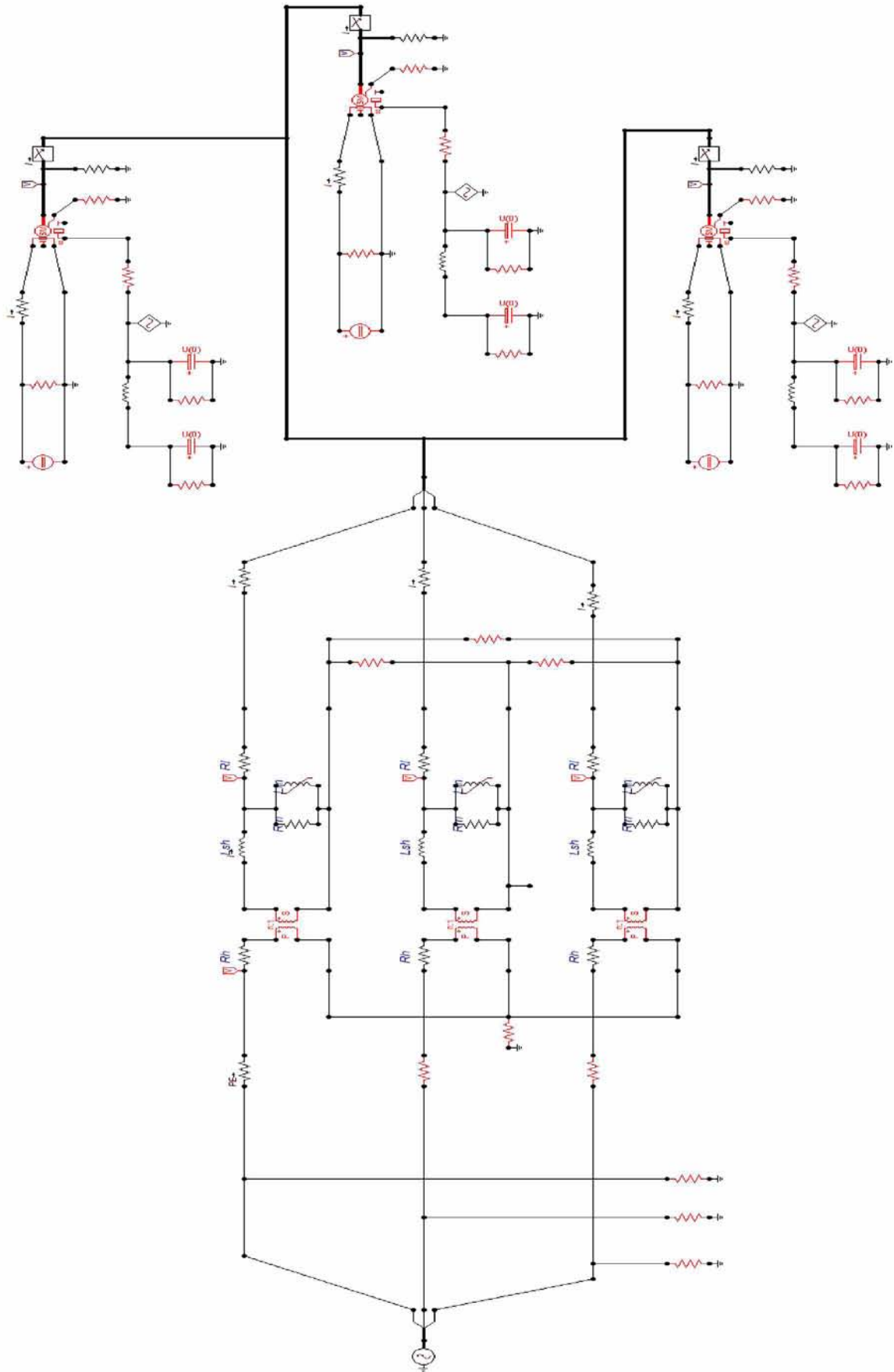
(Σχήμα 4.2.2) Το μοντέλο του Μ/Σ

### 4.3 Εξομοίωση απλού δικτύου με Μ/Σ

Σε αυτή τη φάση το μοντέλο του Μ/Σ πρέπει να συνδεθεί με το μοντέλο της ανεμογεννήτριας. Το «ολικό» αυτό σύστημα που θα προκύψει θα αποτελέσει τη βάση πάνω στην οποία θα στηριχτούν οι εξομοιώσεις σφαλμάτων που θα αναπτυχθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

Θα δημιουργηθεί λοιπόν ένα μικρό αιολικό πάρκο που μέσω του μετασχηματιστή θα συνδέεται με το δίκτυο μέσης τάσης. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη μορφή του συστήματος:

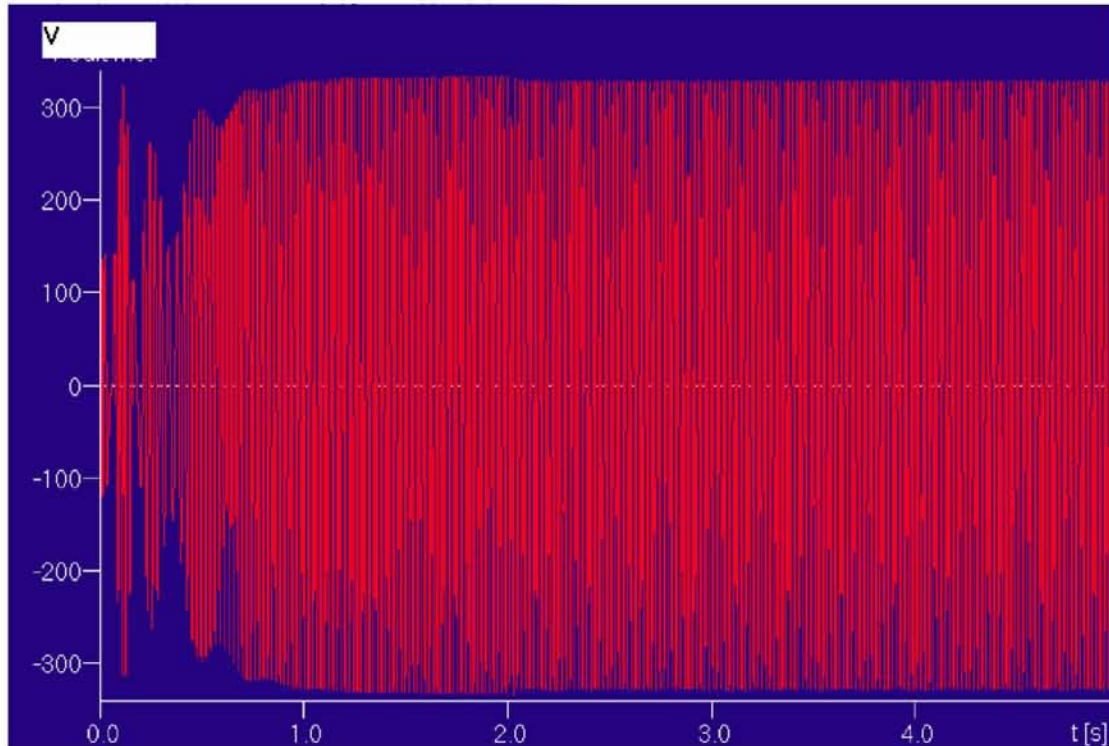




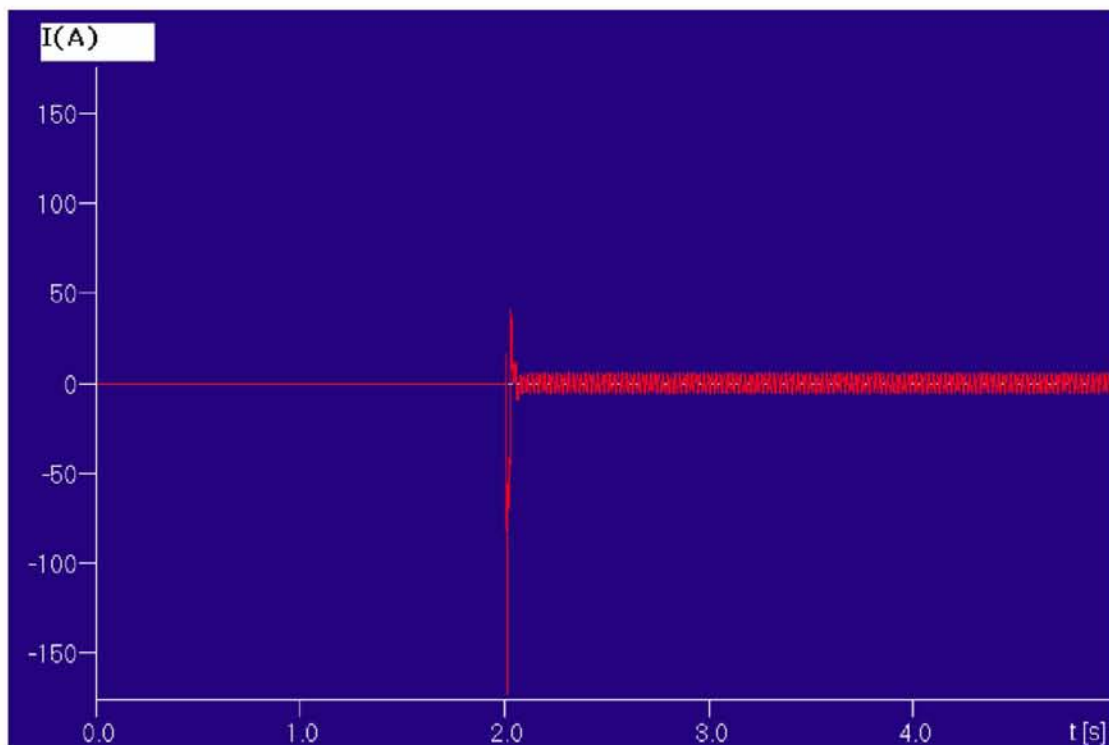
(Σχήμα 4.3.1) Το μοντέλο των 3<sup>ων</sup> Α/Γ και του Μ/Σ

Η γραμμή που συνδέει τις ανεμογεννήτριες με τον μετασχηματιστή είναι πολύ «κοντή» και οι απώλειές της αμελούνται.

Από την εξομοίωση του συστήματος έχουμε στα άκρα μιας εκ των ανεμογεννητριών τα έξης διαγράμματα:



(Σχήμα 4.3.2) Τάση στα άκρα μιας Α/Γ (φάση Α)



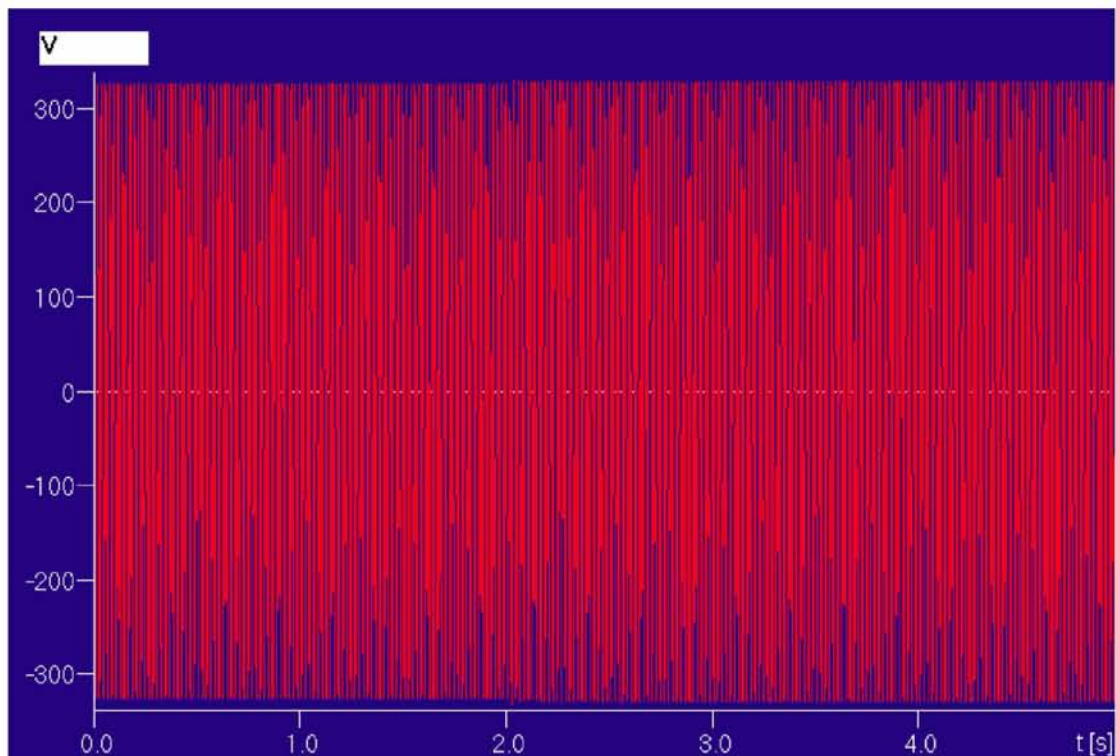
(Σχήμα 4.3.3) Ρεύμα από το διακόπτη μια Α/Γ (φάση Α)

Η τάση μετά από 1 περίπου sec από τη στιγμή εκκίνησης του μοντέλου και της εξομοίωσης έρχεται στα ονομαστικά δεδομένα. Στα 2 sec η Α/Γ συνδέεται με τον μετασχηματιστή και το δίκτυο. Για το λόγο αυτό ,το ρεύμα του διακόπτη είναι μηδενικό πριν.

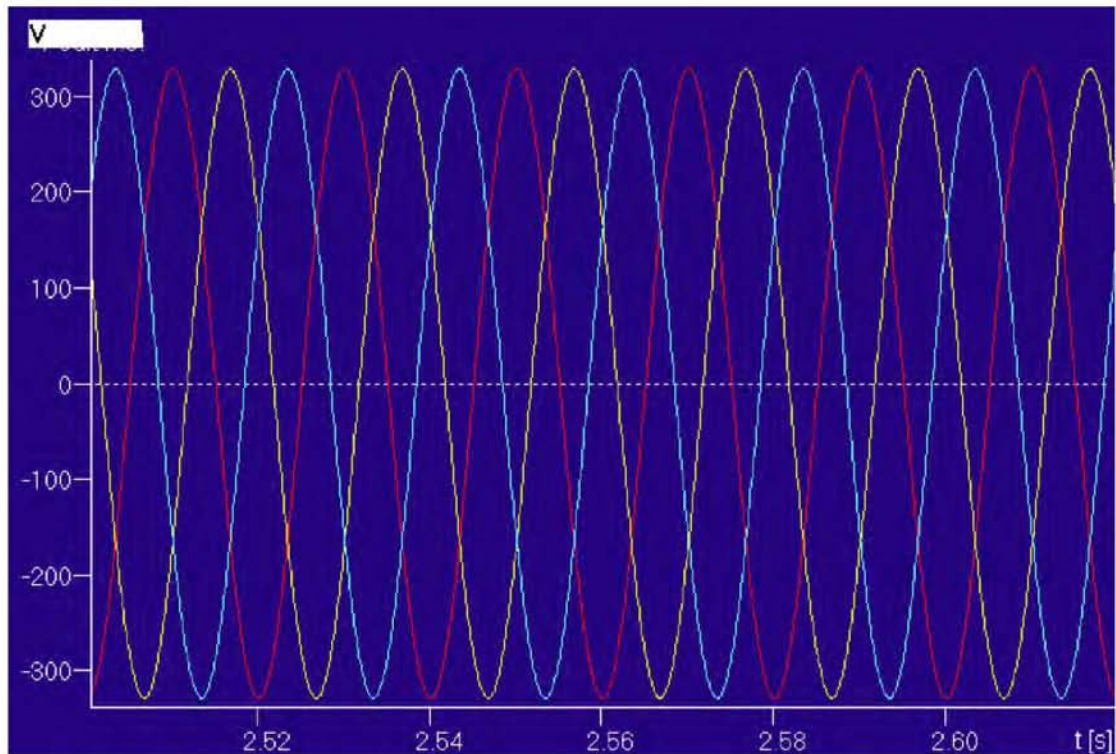
Η τιμή του ρεύματος είναι πολύ μικρή αλλά αυτό είναι αποτέλεσμα του συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο. Το ρεύμα διέγερσης όπως αναμένεται, είναι περίπου ίσο με το ρεύμα διέγερσης εν κενώ (λίγο πιο μεγάλο στη πραγματικότητα) , γι αυτό και η ονομαστική ΗΕΔ πριν τη σύνδεση με το δίκτυο.

Τη στιγμή που κλείνει ο διακόπτης, έχουμε ένα μεταβατικό ρεύμα μικρής διάρκειας αλλά πιο έντονο σε σχέση με τη περίπτωση του τριφασικού ωμικού φορτίου.

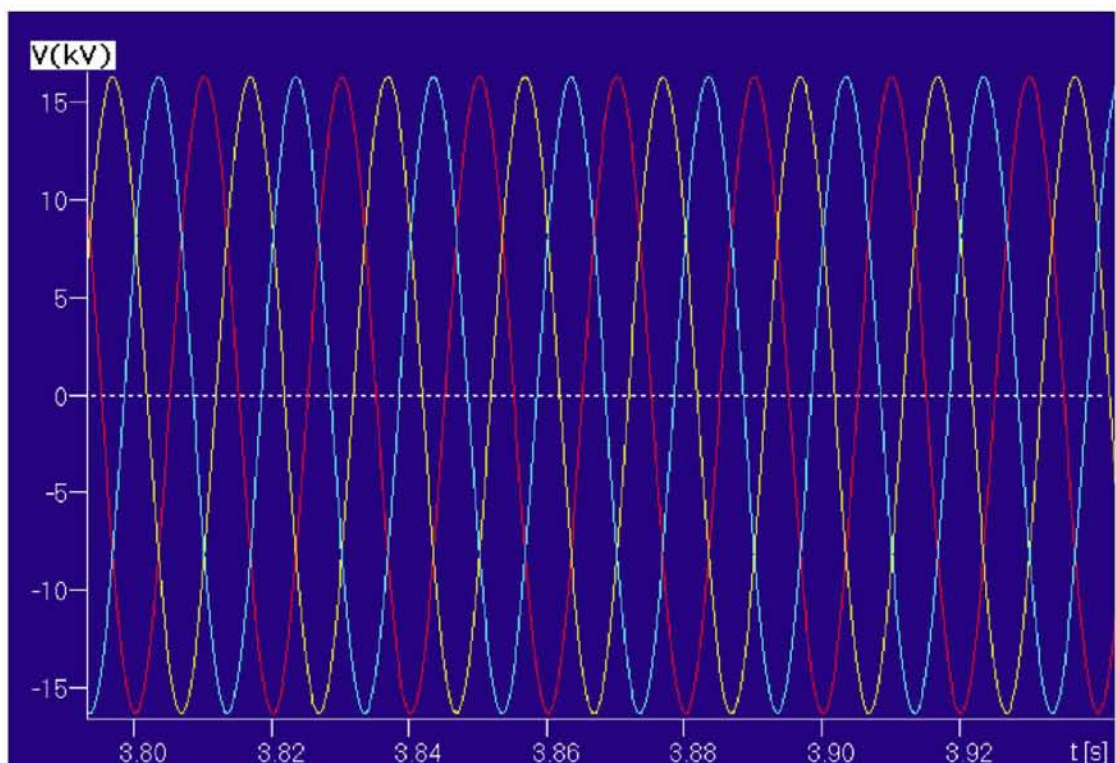
Τέλος , παρουσιάζονται οι τάσεις και τα ρεύματα στα άκρα του μετασχηματιστή τόσο από τη πλευρά χαμηλής ,όσο και από τη πλευρά της μέσης τάσης αφού έχει αποκατασταθεί η μόνιμη λειτουργία (μετά από τα 2 sec) και έχουν προκύψει τα ονομαστικά μεγέθη :



(Σχήμα 4.3.4) Τάση φάσης Α στα άκρα Μ/Σ



(Σχήμα 4.3.5) Οι τρεις φάσεις στα άκρα χαμηλής του Μ/Σ



(Σχήμα 4.3.6) Οι τρεις φάσεις στα άκρα υψηλής του Μ/Σ

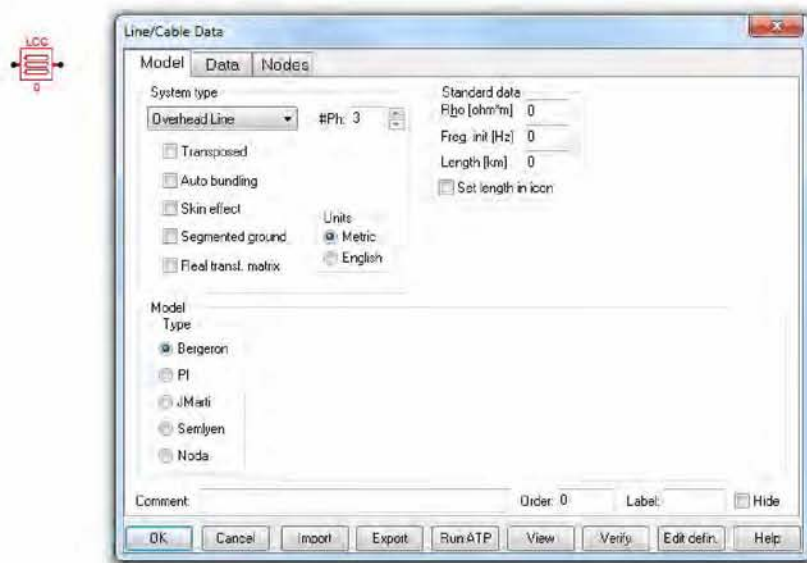
Το ρεύμα στις παραπάνω εικόνες, έχει μια τιμή μόνιμης κατάστασης λίγο μεγαλύτερη από την τιμή που είχε στην περίπτωση συγχρονισμού με απλό δίκτυο χωρίς μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει διότι προς χάριν της εξομοίωσης κατά την αρχικοποίηση ορίστηκε η γωνία μεταξύ δρομέα και στάτη (ως προς τους πόλους) λίγο μεγαλύτερη. Έτσι, προέκυψε ως αποτέλεσμα η αύξηση της

ενεργού ισχύος που προωθούν οι μηχανές και μεταβολή της ΗΕΔ με συνέπεια την αύξηση του ρεύματος. Επειδή όμως η γωνία ήταν πολύ μικρή, θα έχουμε και μικρό ρεύμα.

#### 4.4 Εξομοίωση γραμμών μέσης τάσης

Ως αρχή για την εξομοίωση θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα των τριών Α/Γ με τον μετασχηματιστή που θα αποτελέσει την βασική σταθερά κάθε συστήματος και μοντέλου που θα δημιουργηθεί από εδώ και πέρα. Τα πρώτο στοιχείο που θα προστεθεί είναι το μοντέλο της γραμμής μέσης τάσης που συνδέει τον Μ/Σ με το δίκτυο υψηλής.

Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο LCC του ATP – DRAW. Είναι το πλέον λειτουργικό μοντέλο του προγράμματος με δυνατότητα εξομοίωσης οποιουδήποτε είδους εναέριας γραμμής μεταφοράς. Παρέχει τη δυνατότητα τοποθέτησης γεωμετρικών στοιχείων της γραμμής με σημείο αναφοράς το έδαφος, καθώς και των χαρακτηριστικών στοιχείων των καλωδίων (π.χ. αντίσταση ανά μονάδα μήκους) με αυτόματο υπολογισμό των αντίστοιχων μήτρων των διαφορικών συστημάτων των εξισώσεων της γραμμής.[8]

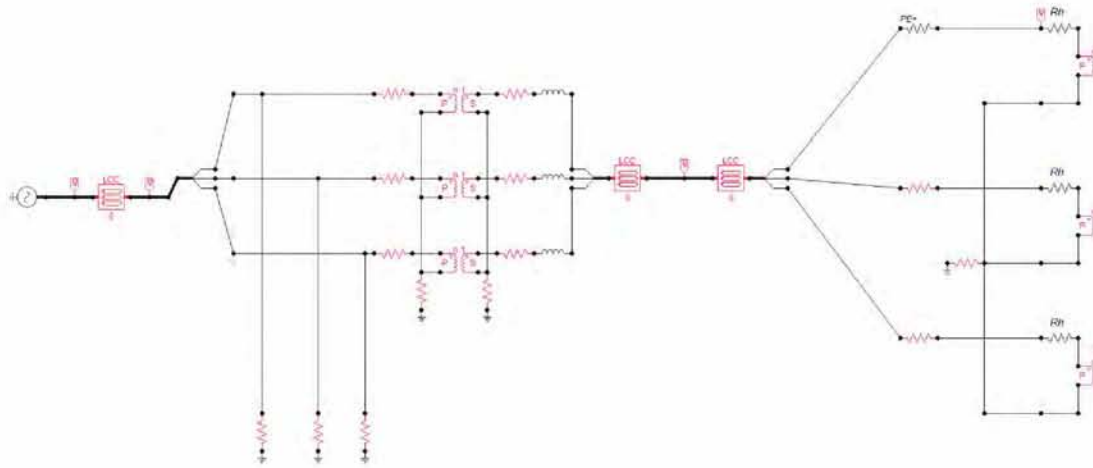


(Σχήμα 4.4.1) Το μοντέλο LCC και η πρώτη καρτέλα δεδομένων.

Δίνει τη δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διάφορες μεθόδους επίλυσης των εξισώσεων της γραμμής (π.χ. Bergeron, JMarti). Αυτοί οι μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί ειδικά για το EMTP από διάφορους ερευνητές κάνοντας εφικτό την αναλυτική μελέτη των φαινομένων γραμμών μεταφοράς. Έτσι το μόνο που χρειάζεται είναι να τοποθετηθούν και να επιλεγθούν κατάλληλα τα στοιχεία της γραμμής.[13]

Τέλος πλαισιώνουμε το σχήμα με γραμμή μέσης τάσης των 20 kV για πιο

ολοκληρωμένη μορφή και γραμμή υψηλής τάσης 400 kV 50 km μέσω Μ/Σ, οπότε έχουμε και το τελικό σύστημα:

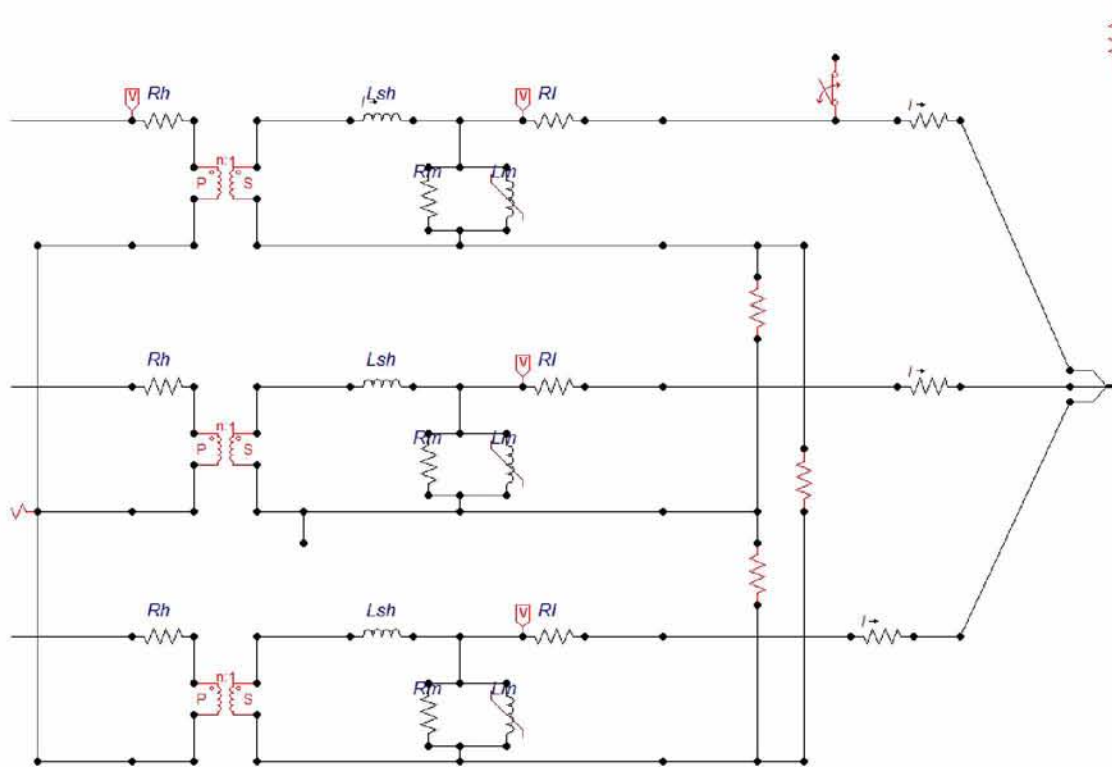


(Σχήμα 4.4.2) Το μοντέλο όπως φαίνεται από την πλευρά του δικτύου μέσης τάσης

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Εξομοίωση βραχυκυκλώματος μιας φάσης με γη

Το βραχυκύκλωμα έχει τοποθετηθεί στην φάση Α χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή και έχει χρησιμοποιηθεί διακόπτης (πάνω δεξιά, σχήμα 5.1.1.1) για να εξομοιώσει την απότομη επαφή γης.



(Σχήμα 5.1.1.1) Το σημείο του βραχυκυκλώματος

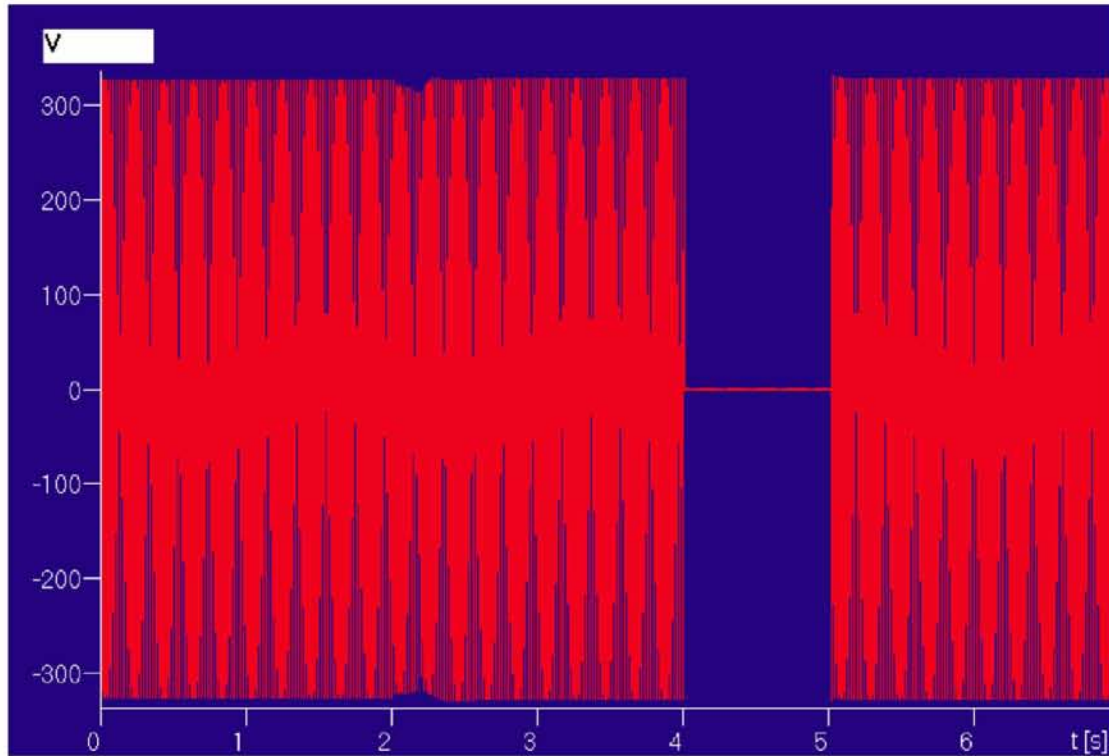
Η εξομοίωση έγινε για ολικό χρόνο 7 sec, ενώ στα 2 sec κλείνουν οι διακόπτες που συνδέουν τις τρεις ανεμογεννήτριες με το μετασχηματιστή. Στη συνέχεια, το βραχυκύκλωμα εισάγεται στη φάση Α στα 4 sec και θα διαρκέσει μέχρι την εκκαθάριση του στα 5 sec.

Αυτό που ενδιαφέρει και έχει νόημα είναι τι γίνεται στη μεριά χαμηλής, μιας και το ισχυρό δίκτυο (που εξομοιώνεται με πηγή τάσης) στην άκρη της γραμμής μέσης τάσης, δεν επιτρέπει σοβαρά προβλήματα στην άλλη μεριά του μετασχηματιστή.

Έτσι λοιπόν, στα 2 sec και αφού έχουν πιάσει οι Α/Γ τα εν κενώ μεγέθη τους συνδέονται στο δίκτυο. Αν και έχουν ίδια συχνότητα και ίδιες φάσεις σύνδεσης με το δίκτυο, στη προκειμένη περίπτωση και για να αναπτυχθούν πιο μεγάλα ρεύματα από ότι στον απλό συγχρονισμό που έγινε στο τέταρτο κεφάλαιο η διέγερση των μηχανών είναι μεγαλύτερη από την εν κενώ και η γωνία ανάμεσα σε δρομέα και στάτη είναι πιο μεγάλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή

μεγαλύτερης άεργου και ενεργού ισχύος αν αναλογιστεί κανείς το πως λειτουργεί η σύγχρονη μηχανή.

Η τάση της στα άκρα του μετασχηματιστή χαμηλής σε όλη τη διάρκεια της εξομοίωσης είναι:

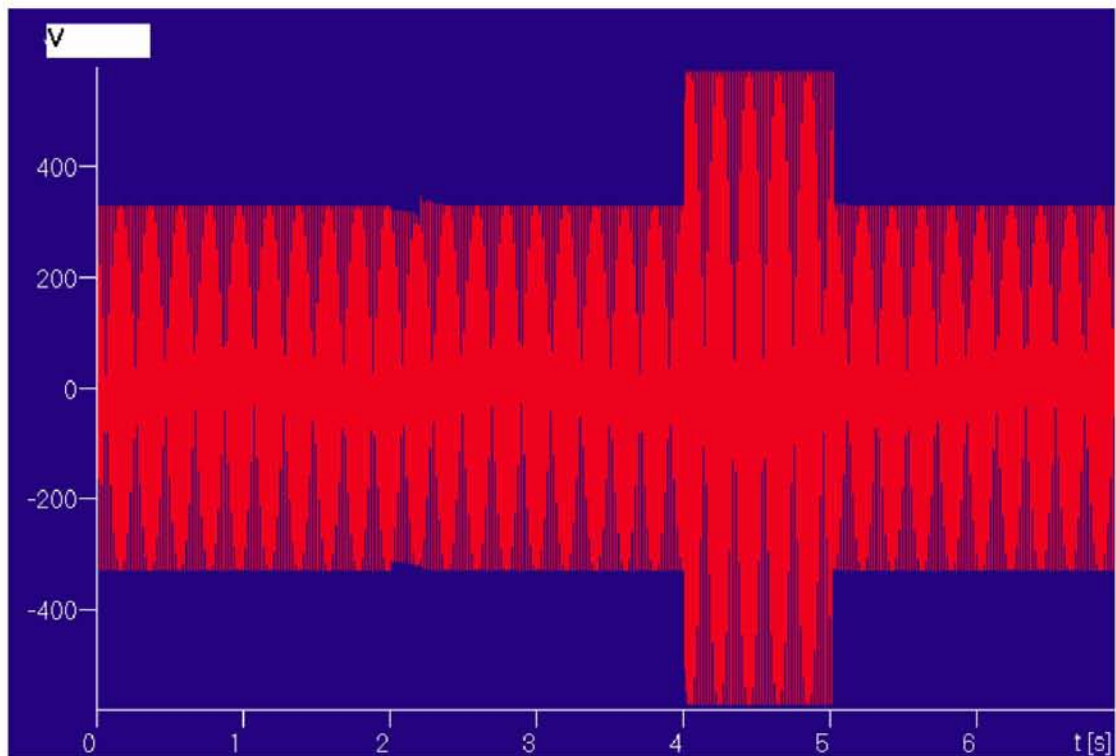


(Σχήμα 5.1.1.2) Τάση φάσης A

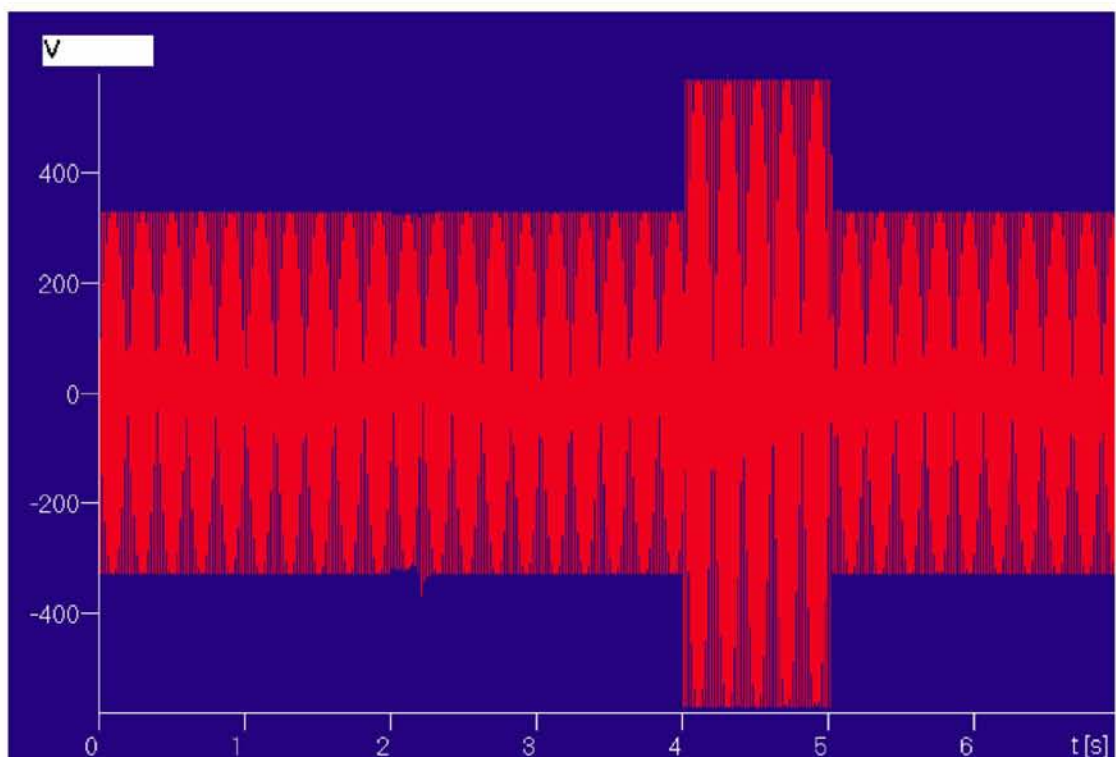
Εδώ σε γενικές γραμμές παρατηρούνται δυο φαινόμενα. Ένα μικρό διακοπτικό φαινόμενο χωρίς καμία ιδιαίτερη σημασία μιας και δεν αποτελεί επικίνδυνο παράγοντα για το δίκτυο στα 2 sec (στιγμή σύνδεσης) και η βύθιση τάσης εξαιτίας του βραχυκυκλώματος στα 4 sec.

Στις άλλες δύο φάσεις έχουμε:





(Σχήμα 5.1.1.3) Τάση φάσης Β



(Σχήμα 5.1.1.4) Τάση φάσης C

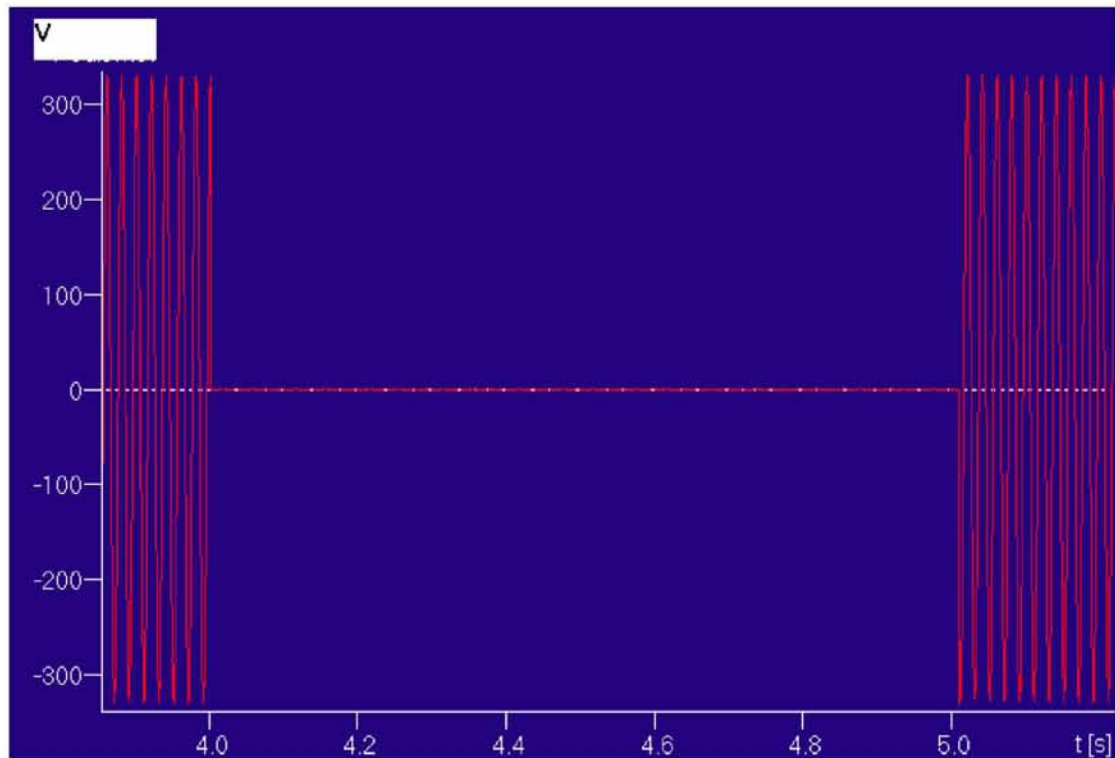
Στις άλλες δυο φάσεις παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά. Μικρά διακοπτικά φαινόμενα στα 2 sec και η αναμενόμενη υπέρταση χειρισμών στα 4 sec (τη στιγμή του βραχυκυκλώματος).

Για τα φαινόμενα στα 2 sec μπορεί να ειπωθεί ότι είναι το αποτέλεσμα της αλλαγής της κατάστασης στα άκρα των μηχανών από την απότομη σύνδεση

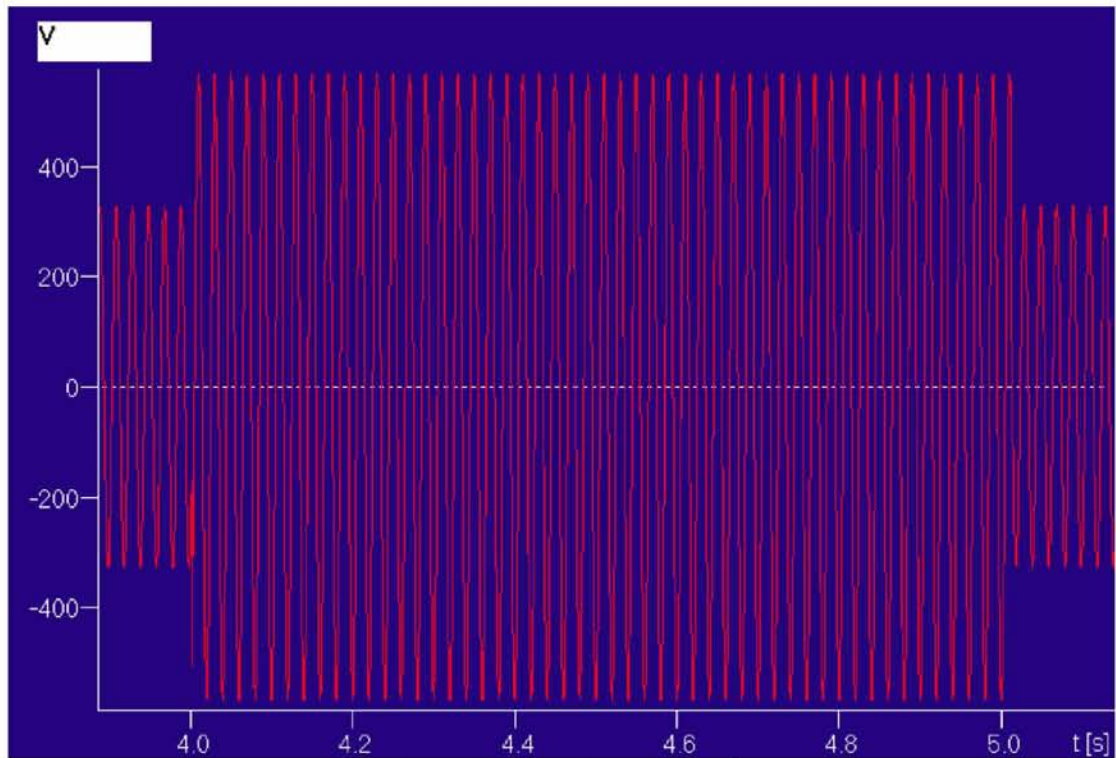
τους στο δίκτυο. Το πέρασμα από την εν κενώ λειτουργία στην λειτουργία υπό τάση δικτύου κάνει τα εσωτερικά δεδομένα της μηχανής να αντιδράσουν καθώς αλληλεπιδρούν με τις χωρητικότητες και τις επαγωγές του δικτύου.

Αντίθετα με το τι γίνεται στα 2 sec, η αντίδραση του συστήματος στο βραχυκύκλωμα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη. Όπως θα παρατηρηθεί καλύτερα από τα διαγράμματα που ακολουθούν θα παρουσιαστεί υπέρταση στη συχνότητα του δικτύου με σημαντική τιμή στις δύο υγιείς φάσεις του μετασχηματιστή.

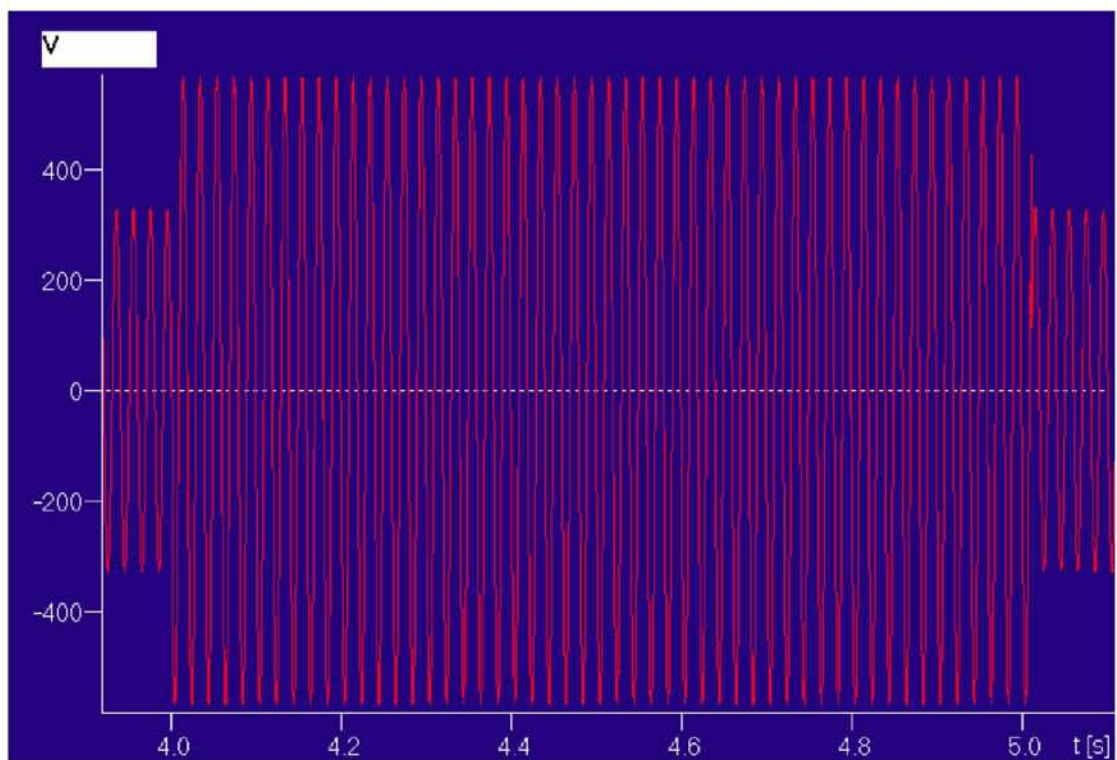
Έτσι έχουμε:



(Σχήμα 5.1.1.5) Η τάση A στο βραχυκύκλωμα

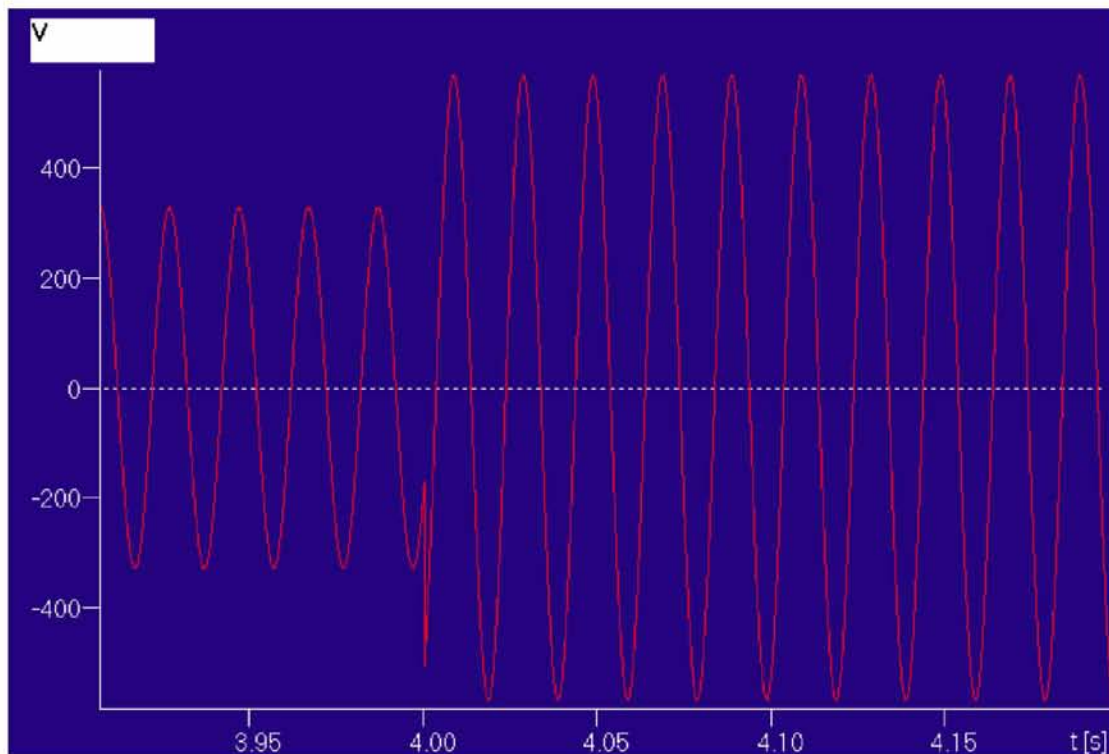


(Σχήμα 5.1.1.6) Η τάση B στο βραχυκύκλωμα



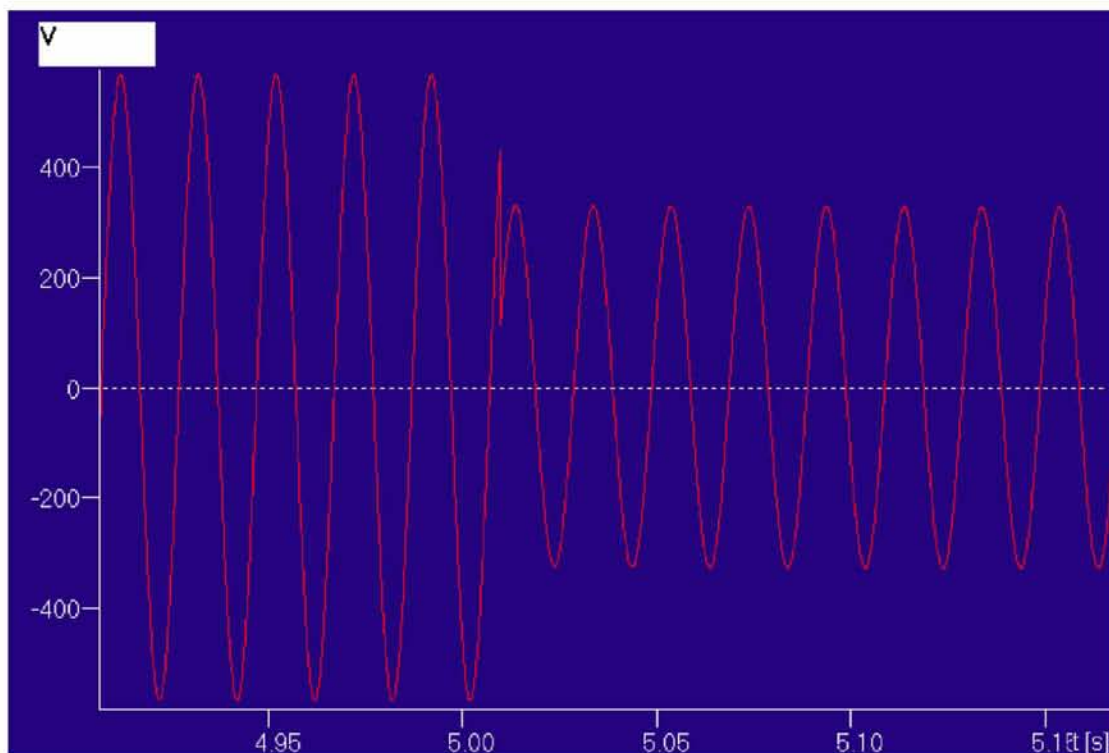
(Σχήμα 5.1.1.6) Η τάση C στο βραχυκύκλωμα

Μικρής σημασίας μεταβατικά φαινόμενα παρατηρούνται στη φάση B που τη στιγμή του βραχυκυκλώματος είχε μη μηδενική τιμή τάσης.

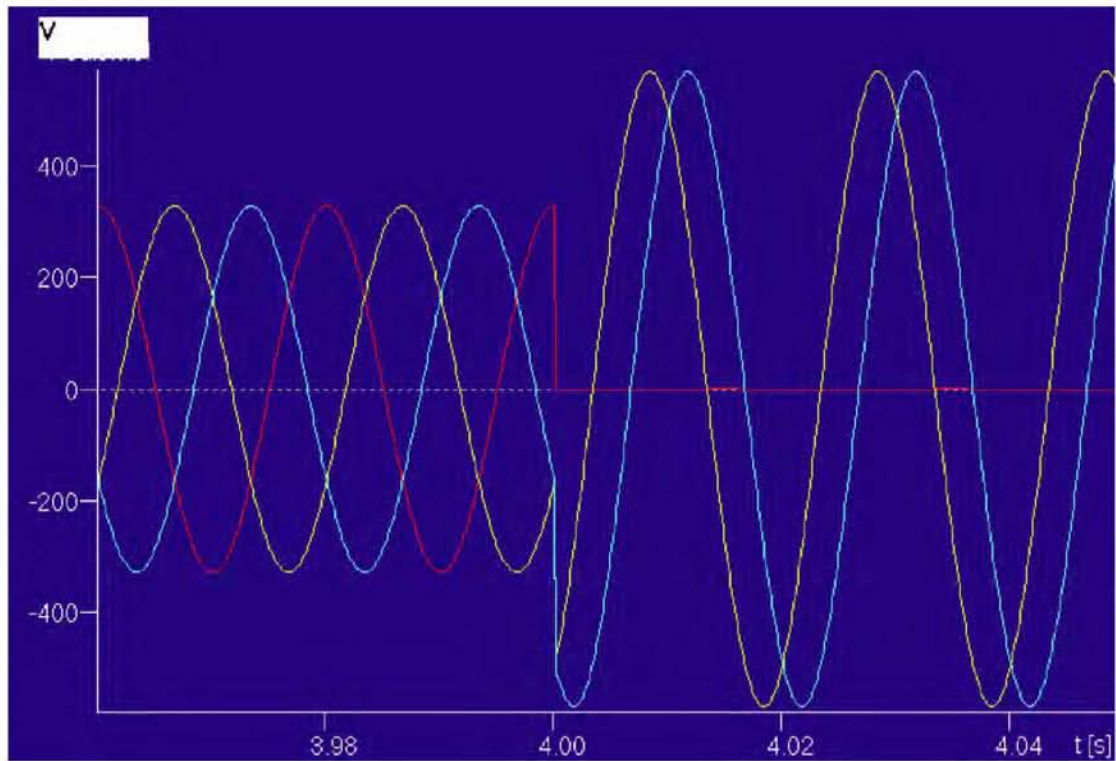


(Σχήμα 5.1.1.7) Λεπτομέρειες τάσης Β τη στιγμή του βραχυκυκλώματος

Στη φάση C παρατηρείται ένα αντίστοιχο φαινόμενο, αλλά τη στιγμή της εκκαθάρισης του βραχυκυκλώματος:

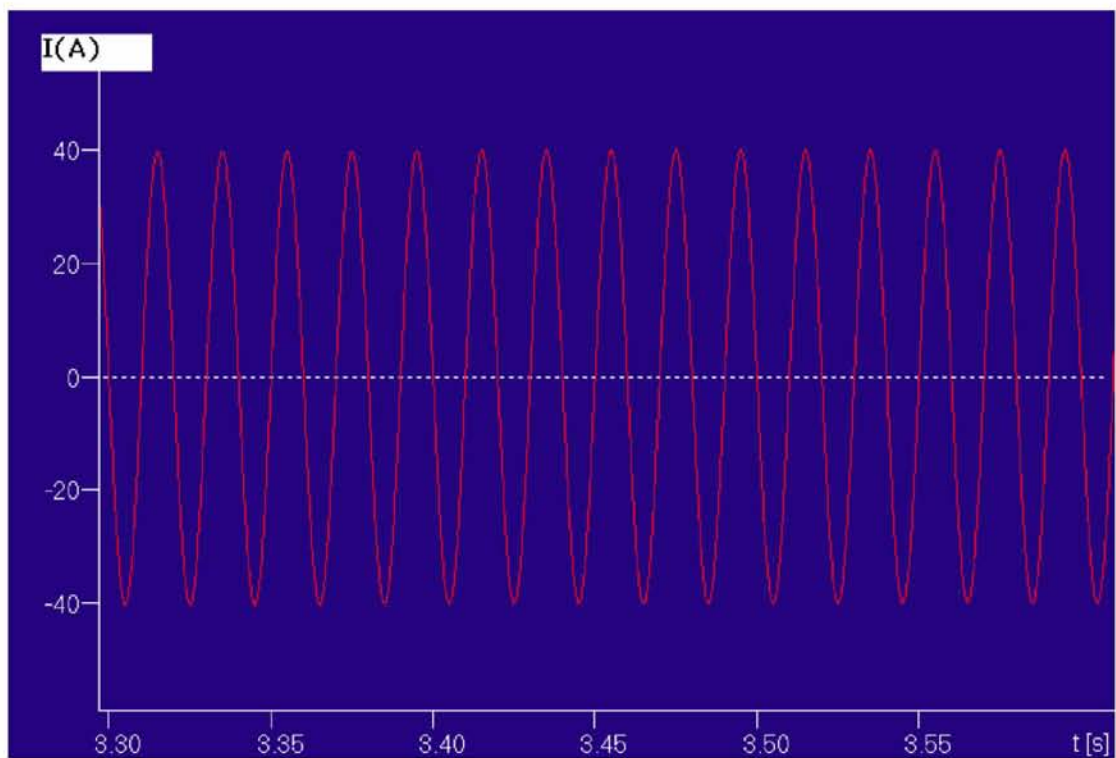


(Σχήμα 5.1.1.8) Λεπτομέρειες τάσης C τη στιγμή του βραχυκυκλώματος



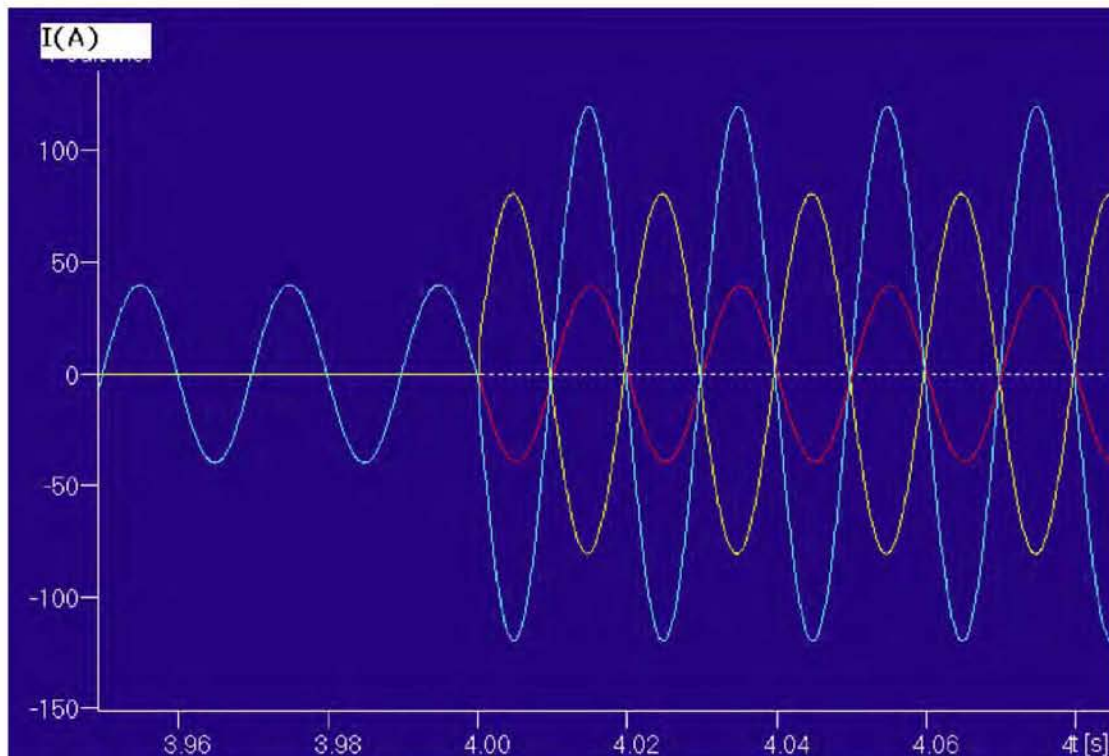
(Σχήμα 5.1.1.9) Οι τρεις φάσεις μαζί τη στιγμή του βραχυκυκλώματος

Όσον αναφορά το ρεύμα στο M/Σ, πριν το βραχυκύκλωμα χαμηλής:



(Σχήμα 5.1.1.10) Το ρεύμα της φάσης A πριν το βραχυκύκλωμα

Σημασία σε αυτό το σημείο έχει το τι γίνεται στον κόμβο του βραχυκυκλώματος και ποια είναι η ροή ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα:



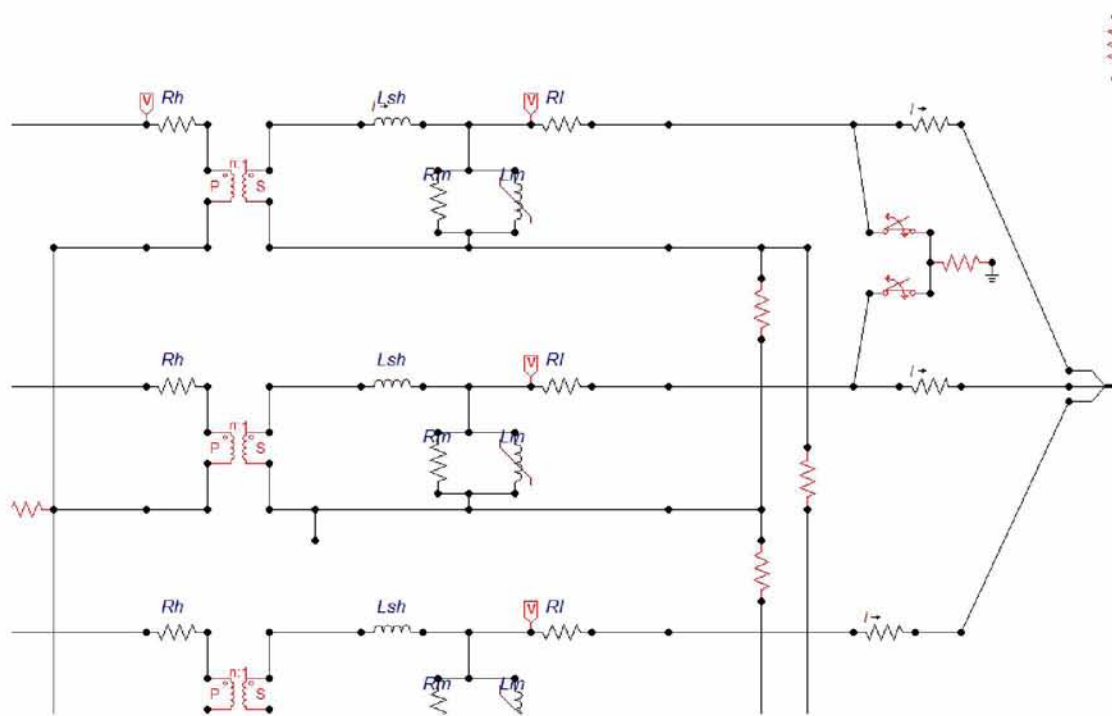
(Σχήμα 5.1.1.11) Τα ρεύματα του κόμβου βραχυκύκλωσης

Με το κόκκινο φαίνεται το ρεύμα που έρχεται από το δίκτυο και την μεριά μέσης του Μ/Σ. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι με κίτρινο. Φαίνεται η μηδενική τιμή του πριν τα 4 sec όπου δεν υπήρχε επαφή γης. Με γαλάζιο είναι το ρεύμα από τις Α/Γ. Παρατηρείται ότι σχεδόν όλη η τιμή του ρεύματος βραχυκύκλωσης δίνεται από τις σύγχρονες μηχανές.

## 5.2 Εξομοίωση βραχυκυκλώματος δύο φάσεων με επαφή γης

Το φαινόμενο αυτό αν και αποτελεί μόλις το 5% των βραχυκυκλωμάτων που συμβαίνουν στατιστικά σε μια γραμμή μεταφοράς έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που σε αρκετά σημεία διαφέρουν από το μονοπολικό βραχυκύκλωμα. Σε αυτή τη περίπτωση, μόνο μια φάση του δικτύου θα μείνει υγιής και σε αυτή θα παρουσιαστεί υπέρταση.

Το διάγραμμα του συστήματος είναι ίδιο με αυτό της προηγούμενης περίπτωσης με την αλλαγή να είναι στο κλάδο που θα προκαλέσει το βραχυκύκλωμα:

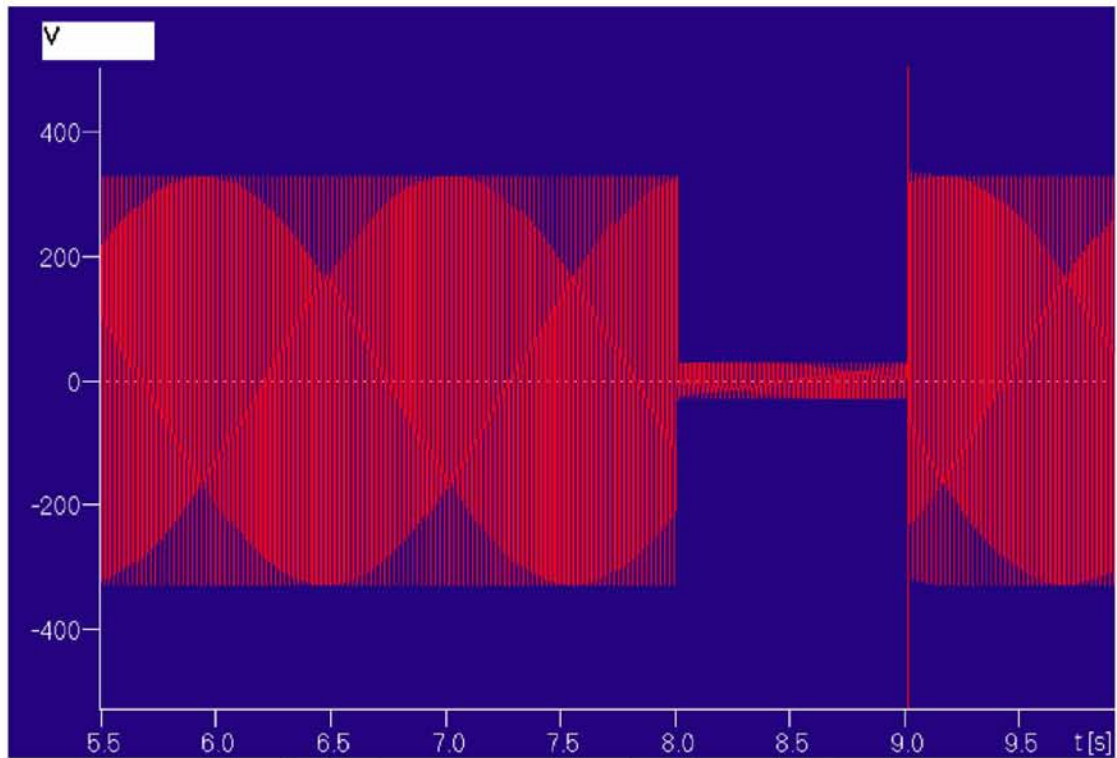


(Σχήμα 5.1.2.1) Ο κλάδος του διπολικού βραχυκυκλώματος

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι υπάρχει σύνδεση τόσο μεταξύ των φάσεων A και B όσο και ταυτόχρονη επαφή με τη γη μέσω αντίστασης.

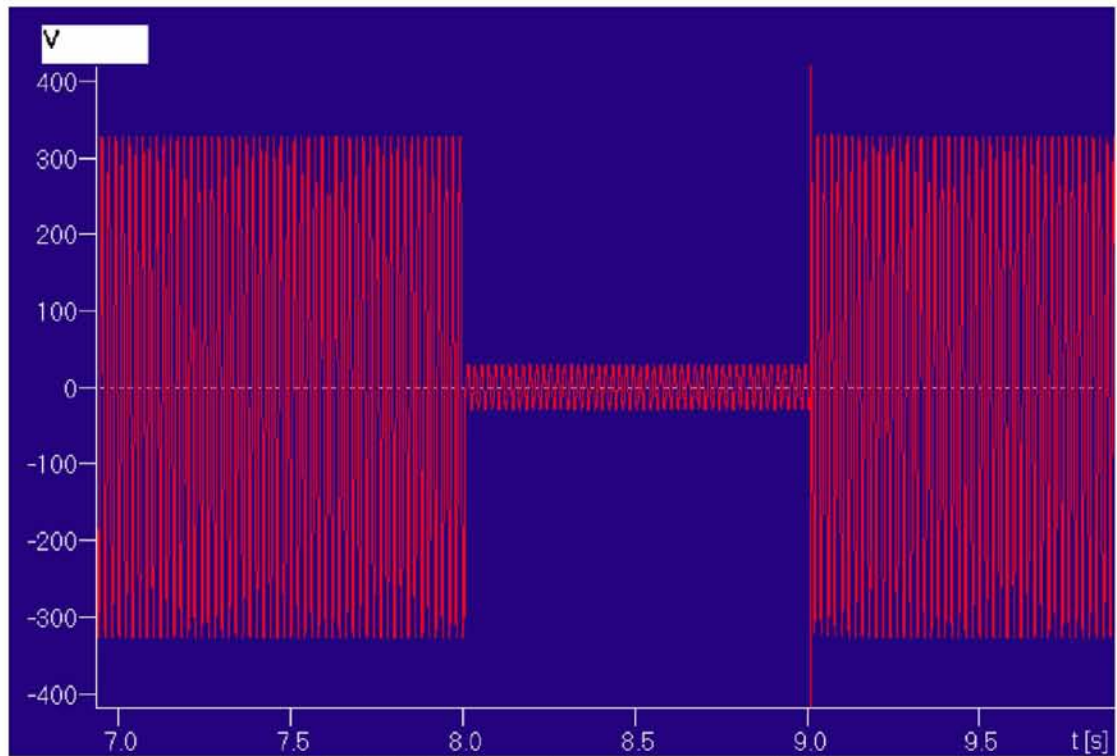
Η εξομοίωση έγινε σε χρόνο 10 sec. Οι γεννήτριες εισήλθαν στο σύστημα σε χρόνο 2 sec με κλείσιμο των διακοπών στα άκρα τους ,ενώ το βραχυκύκλωμα έγινε στα 8 sec. Η εκκαθάριση του πραγματοποιήθηκε μετά από ένα sec (στα 9 sec).

Κατά την είσοδο των A/Γ στα 2 sec έγινε ακριβώς το ίδιο διακοπτικό φαινόμενο που παρατηρήθηκε και στη περίπτωση του μονοπολικού βραχυκυκλώματος και δεν θα παρουσιαστεί εδώ. Οι τάσεις στα άκρα χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή σε χρόνους κοντά στο βραχυκύκλωμα είναι οι παρακάτω.



(Σχήμα 5.1.2.2) Λεπτομέρεια τάσης (στη φάση A)

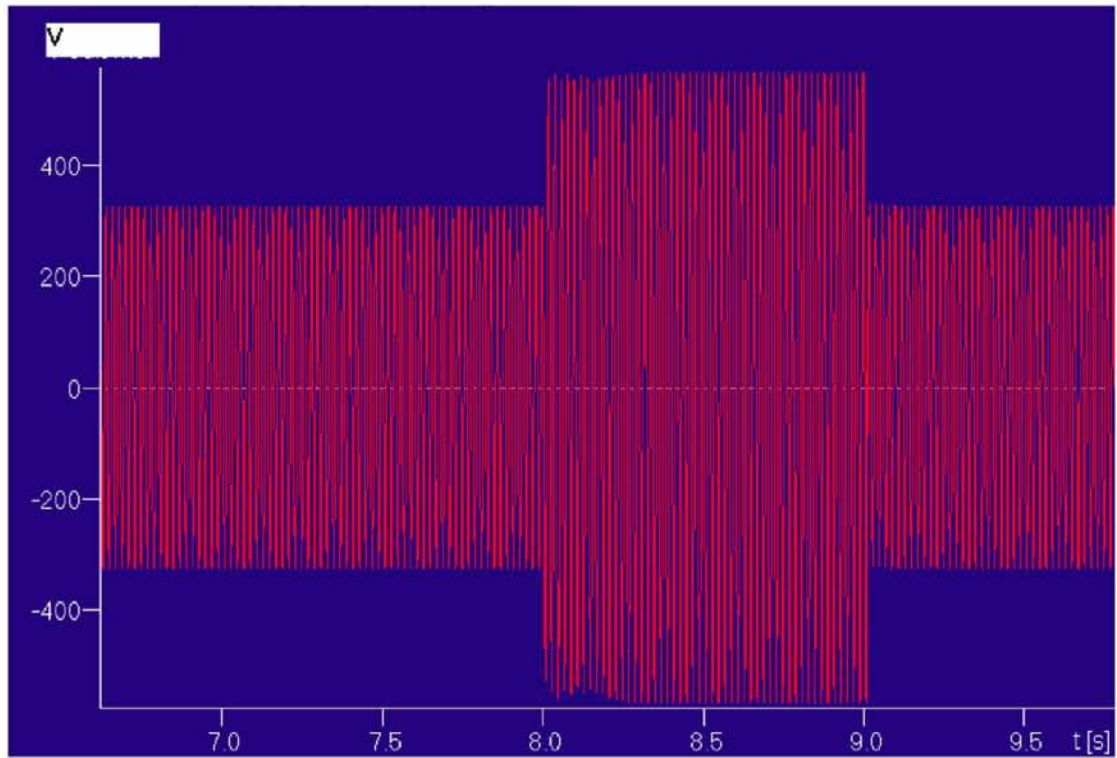
Όπως θα παρουσιαστεί και στο επόμενο διάγραμμα για τη φάση B, κατά τη βύθιση της τάσης στα 8 με 9 sec η τάση δεν μηδενίζεται πλήρως αλλά διατηρεί μια μικρή τιμή σε πλάτος. Αυτό συμβαίνει γιατί η επαφή με τη γη δεν γίνεται απευθείας αλλά μέσω μιας μικρής αντίστασης (λιγότερο από 1 Ω).



(Σχήμα 5.1.2.3) Λεπτομέρεια τάσης (στη φάση B)

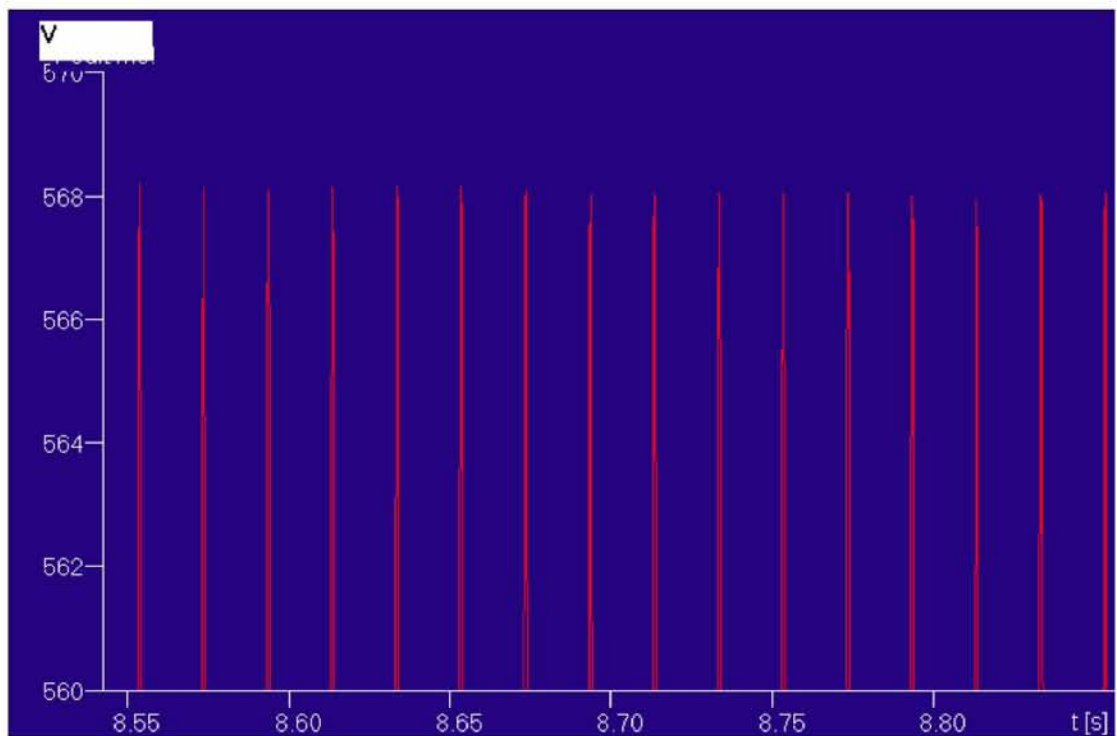


Ενώ στην υγιή φάση παρατηρείται:



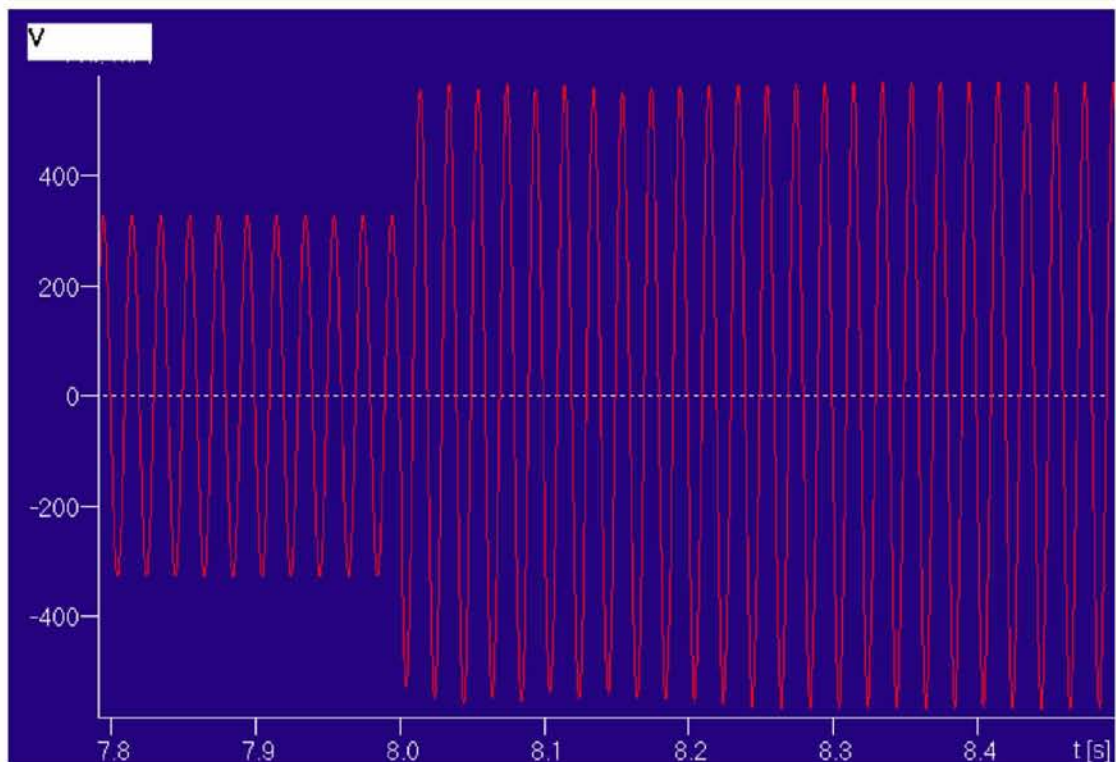
(Σχήμα 5.1.2.4) Λεπτομέρεια τάσης (στη φάση C)

καθώς και υπέρταση:



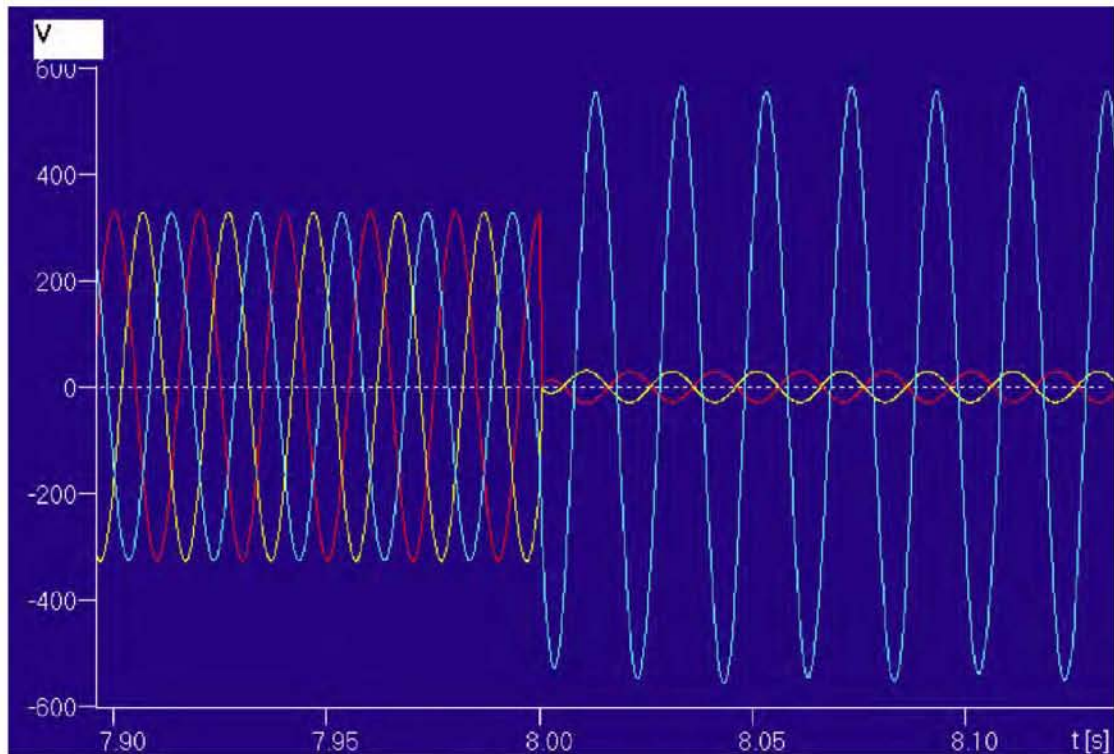
(Σχήμα 5.1.2.5) Το εύρος υπέρτασης στην υγιή φάση

Στη υγιή φάση ακόμη, παρατηρείται μια μικρή ταλάντωση κατά την αρχή του βραχυκυκλώματος, μέχρι να πάρει την τελική μορφή της μετά από περίπου 0.3 sec.



(Σχήμα 5.1.2.6) Υπέρταση φάσης C

Στις φάσεις A και B τη χρονική στιγμή των 8 sec οπότε και γίνεται το βραχυκύκλωμα δεν παρατηρείται κάτι αλλά πέρα από τη βύθιση των τάσεων. Και οι τρεις τάσεις μαζί σε αντιπαραβολή φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:



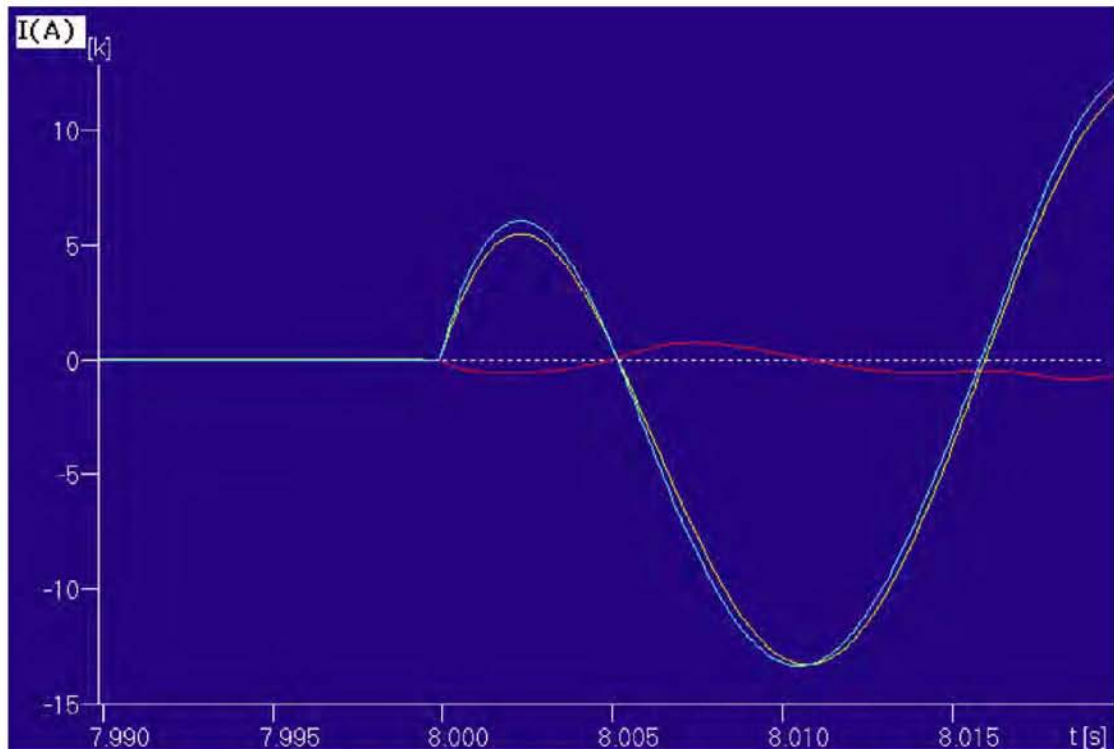
(Σχήμα 5.1.2.7) Και οι τρεις φάσεις μαζί τη στιγμή του βραχυκυκλώματος

Γίνεται αισθητή η διαφορά μετά τα 8 sec. Τα ρεύματα που αναπτύσσονται σε αυτού του είδους την υπέρταση είναι σημαντικά πιο ισχυρά από ότι στο μονοπολικό φαινόμενο και επομένως θα παρουσιάσουν πιο πολλά προβλήματα στον εξοπλισμό εάν δεν επέμβουν εγκαίρως τα συστήματα προστασίας.

Στις φάσεις που έχουν πληγεί, το ρεύμα είναι πολύ μεγαλύτερο από ότι στην υγιή φάση και είναι σχεδόν διπλάσια κατά το μόνιμο ρεύμα βραχυκυκλώματος (παρά την υπέρταση της C).

Στον κόμβο της βάσης A με τον κλάδο του βραχυκυκλώματος έχει ενδιαφέρον να δειχτούν και τα υπόλοιπα ρεύματα που τον διατρέχουν τη στιγμή που λαμβάνει χώρα το φαινόμενο.

Με αυτό τον τρόπο θα φανεί και πως κατανέμεται η τροφοδότηση του σφάλματος από το δίκτυο και τις γεννήτριες.



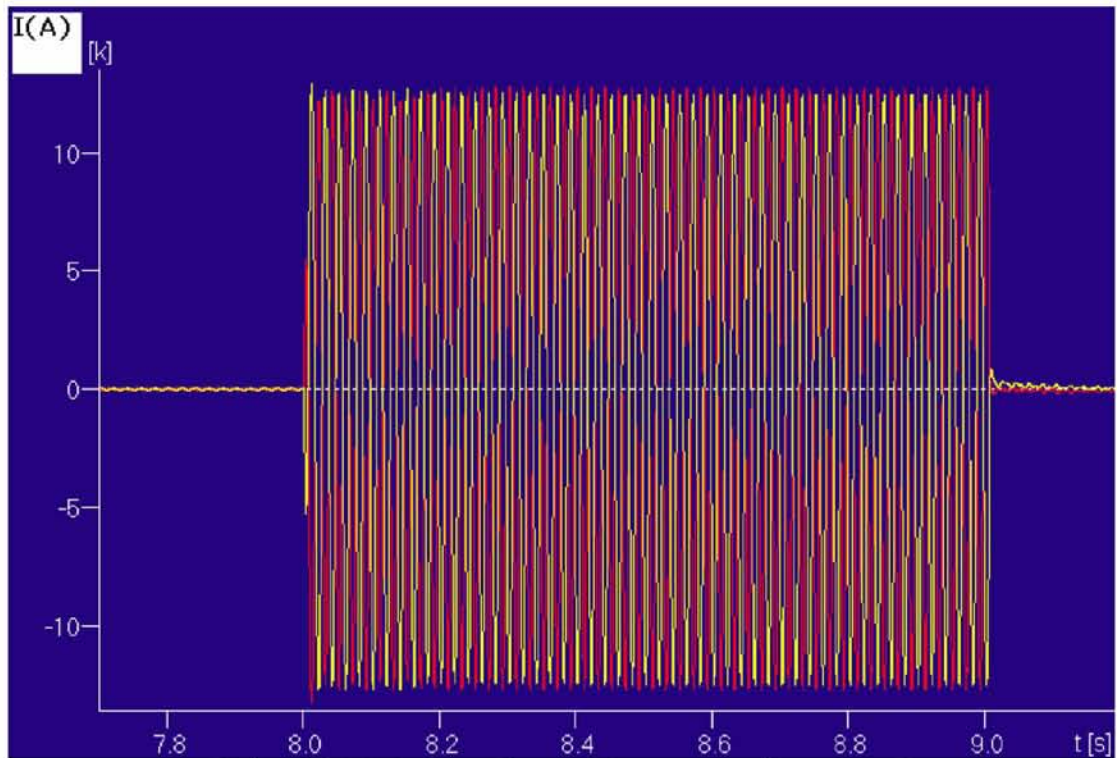
(Σχήμα 5.1.2.8) Λεπτομέρεια ρευμάτων από τον κόμβο του βραχυκυκλώματος στην φάση Α

Παρατηρείται, ότι τα δημιουργούμενα ρεύματα είναι εξαιρετικά μεγάλα και μάλιστα η καμπύλη που είναι με κίτρινο χρώμα και αναπαριστά το ρεύμα από τη πλευρά του δικτύου μέσης και υψηλής τάσης συνεισφέρει περισσότερο. Με γαλάζιο είναι το ρεύμα που διοχετεύεται στο κλάδο του βραχυκυκλώματος.

Ίδιας μορφής διάγραμμα μπορεί να εξαχθεί και για τη φάση Β χωρίς να έχει σημαντικές διαφορές. Εν τούτοις αξίζει να τονιστούν κάποια πράγματα για τα ρεύματα των αγωγών.

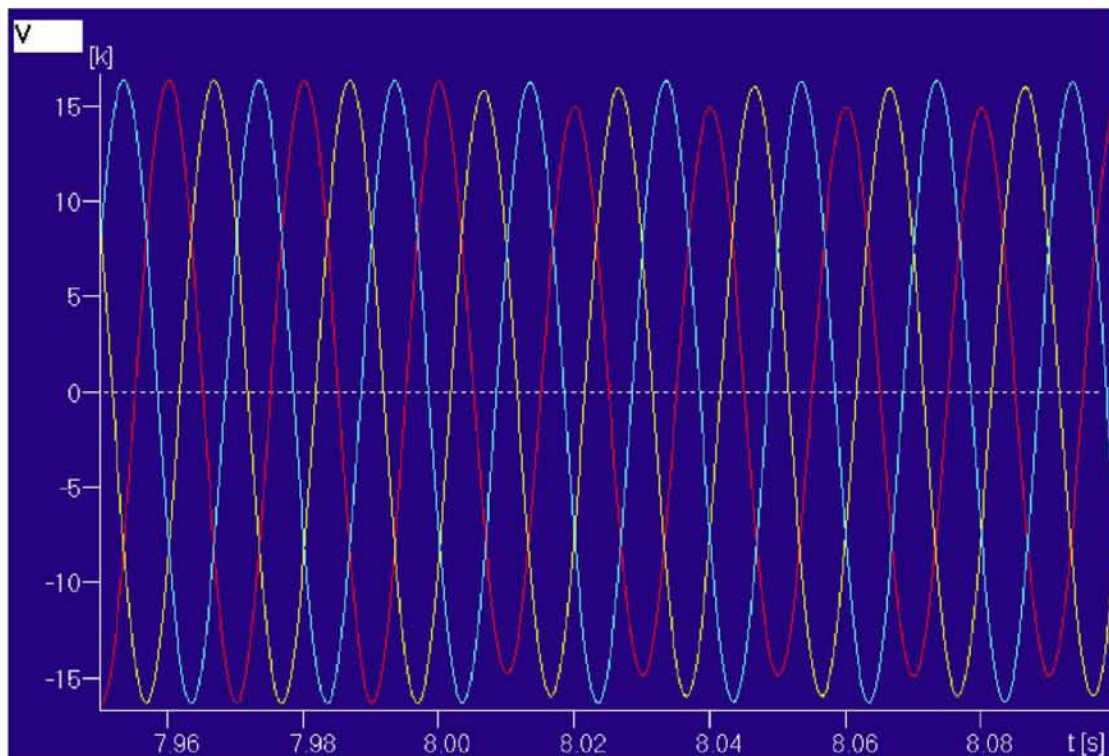
Οι τιμές των ρευμάτων των δύο φάσεων ,που δέχθηκαν τα πλήγματα, είναι μεγάλες και η σημασία αυτού του γεγονότος θα αποδειχθεί στη συνέχεια της ανάλυσης.

Το μέγεθός τους γίνεται ευδιάκριτο στο διάγραμμα που ακολουθεί:



(Σχήμα 5.1.2.9) Ρεύματα βραχυκύκλωσης στις φάσεις A και B

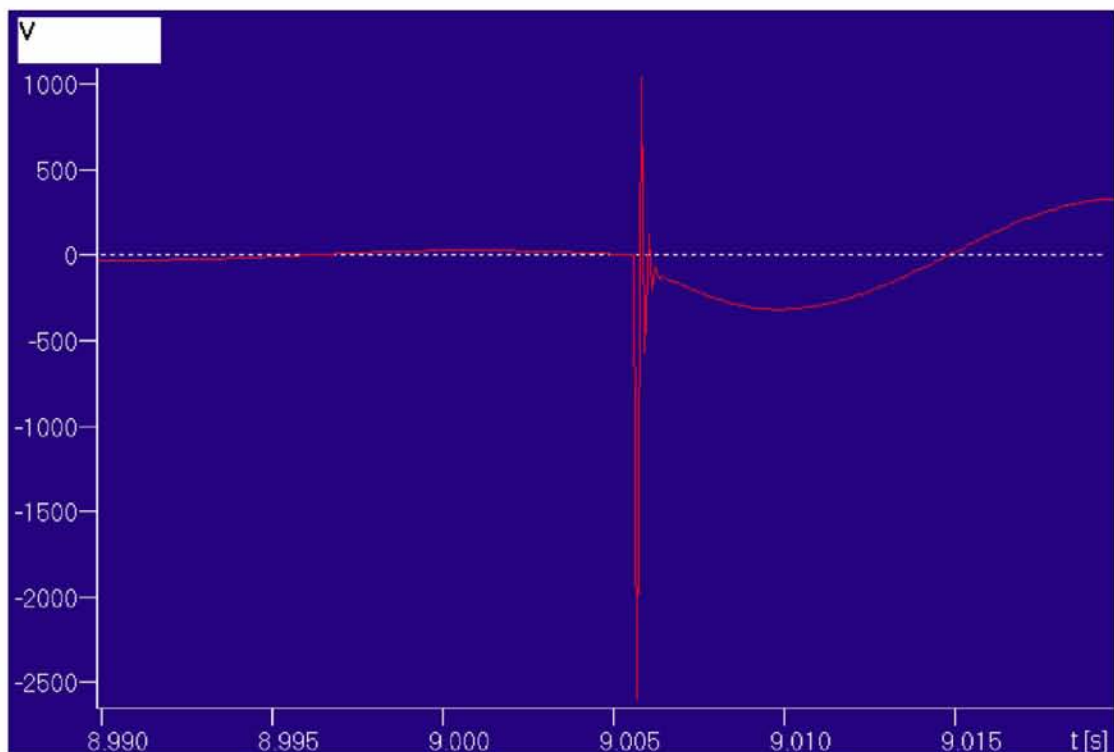
Αυτά περίπου αποκτούν εύρος 12.8 kA. Είναι μια μεγάλη τιμή που στη συνέχεια θα δημιουργήσει πρόβλημα κατά την εκκαθάρισή της. Πριν φτάσει εκεί η ανάλυση θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα της πλευράς μέσης τάσης.



(Σχήμα 5.1.2.10) Οι τρεις φάσεις στη μεριά μέσης τάσης του μετασχηματιστή

Η βύθιση στη μεριά της μέσης τάσης είναι σημαντικά μικρότερη. Αυτό έχει να κάνει με την ύπαρξη ισχυρού δικτύου από εκείνη τη πλευρά.

Κατά την χρονική στιγμή των 9 sec, πραγματοποιείται η εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος. Αυτό στο κύκλωμα αντιπροσωπεύεται από το άνοιγμα των δύο διακοπών. Εκείνη τη στιγμή όμως, δημιουργείται στη προσπάθεια επαναφοράς του συστήματος στην μόνιμη συμμετρική ονομαστική λειτουργία μια διακοπτική υπέρταση χειρισμών μεγάλου εύρους.



(Σχήμα 5.1.2.11) Υπέρταση χειρισμών στη φάση A κατά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος

Τα 2500 V (κατά απόλυτη τιμή) της peak τιμής που φτάνει θέτουν σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα του εξοπλισμού και των γραμμών, Κανονικά με την ανίχνευση του βραχυκυκλώματος αναλαμβάνουν δράση τα μέσα προστασίας και απομονώνουν το κομμάτι της γραμμής που έχει το πρόβλημα έτσι ώστε να διορθωθεί πριν ξαναμπει στο υπόλοιπο σύστημα ,οπότε δεν θα παρουσιαστεί η υπέρταση του διαγράμματος. Όμως εάν δεν υπάρξει σωστή αντιμετώπιση και είναι ο εξοπλισμός σε λειτουργία ολόκληρο το χρονικό διάστημα τότε θα φτάσει στα όρια της ολόκληρη η γραμμή χαμηλής τάσης.

Επομένως είναι βασικό να τονιστεί ότι ένα βραχυκύκλωμα που αποτελεί σοβαρό σφάλμα δικτύου, είναι κάτι παραπάνω από μια απλή υπέρταση με εύρος ίσο με τη πολική τάση. **Είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο που έχει επιπτώσεις πολλών ειδών σε μια γραμμή μεταφοράς αλλά και στον παράπλευρο εξοπλισμό.**

## **Αναφορές:**

- [1] Βοβός Ν., Γιαννακόπουλος Γ., (2008). Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη 326
- [2][http://www.ee.teihal.gr/lessons/she2/private/uploads/eisacoch\\_cenika\\_cia\\_to\\_ercasthrio\\_she.pdf](http://www.ee.teihal.gr/lessons/she2/private/uploads/eisacoch_cenika_cia_to_ercasthrio_she.pdf)
- [3] Short T.A (2004). Electric Distribution Handbook. CRC Press LCC
- [4] B. De Metz-Noblat, F. Dumas, G. Thomasset «Calculation of short-circuit currents», Schneider Electric, Cahier Technique no. 158, 2002
- [5] Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τόμος II, «Ασύμμετρες και Μεταβατικές Καταστάσεις», Β.Κ Παπαδιά, Αθήνα 1993
- [6] EMTP for students, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2004
- [7] <http://www.ece.mtu.edu/atp/ATPDraw/ATPDraw.html>
- [8] ATP –Rule Book
- [9] Βοβός Ν., Γιαννακόπουλος Γ., Γαβριήλ Β.. Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εκδόσεις Παν. Πατρών
- [10] Ανάλυση καταπόνησης μετασχηματιστή αιολικού πάρκου με χρήση του ATP-Emtp, Σκουρας Βαγγέλης, Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, ΗΛ/ΜΗΧ, Παν. Πατρών
- [11] Ηλεκτρικές μηχανές Α, Αθανασίου Σαφάκα, Εκδόσεις Παν. Πατρών
- [12] Analysis of electric machinery, Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Sudhoff, IEEE press
- [13] ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista, Users' Manual, Laszlo Prikler, Hans Kristian Hoidalén, November 2009
- [14] Clean Energy Technologies, 'Protection Coordination Planning with Distributed Generation', Natural Resources Canada, June 2007