



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Διερεύνηση Μεθόδου Προστασίας Απώλειας Διέγερσης Σύγχρονης Γεννήτριας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Φ. Μπαμπάνης

Επιβλέπων : Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Διερεύνηση Μεθόδου Προστασίας Απώλειας Διέγερσης Σύγχρονης Γεννήτριας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανδρέας Φ. Μπαμπάνης

Επιβλέπων : Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ, ΣΗΜΜΥ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 23^η Οκτωβρίου 2025.

.....
Βασίλειος Νικολαΐδης
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Γεώργιος Κορρές
Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος, 2025

.....
Ανδρέας Φ. Μπαμπάνης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © **Ανδρέας Φ. Μπαμπάνης, 2025.**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της απώλειας διέγερσης σε σύγχρονες γεννήτριες. Η μελέτη περιλαμβάνει την ανάλυση του συμβατικού σχήματος προστασίας και την ανάπτυξη ενός καινοτόμου ηλεκτρονόμου, με στόχο τη βελτίωση της ταχύτητας απόκρισης και της αξιοπιστίας του συστήματος προστασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία των σύγχρονων μηχανών και οι διατάξεις ελέγχου που συσχετίζονται με τα φαινόμενα της απώλειας διέγερσης και του αποσυγχρονισμού και ακολουθεί εκτενής ανάλυση των βασικών μεθόδων προστασίας, εστιάζοντας στις αρχές λειτουργίας και στα χαρακτηριστικά ρύθμισης των ηλεκτρονόμων. Αναπτύσσεται ένας νέος ηλεκτρονόμος προστασίας, ο οποίος υιοθετεί χρονική καθυστέρηση βάσει της υπολογιζόμενης ηλεκτρομηχανικής συχνότητας ταλάντωσης. Η ενεργοποίηση του ηλεκτρονόμου (trip) προκύπτει από τον συνδυαστικό έλεγχο της πεπλεγμένης ροής του στάτη, της άεργου ισχύος και της γωνίας του δρομέα. Διενεργήθηκαν προσομοιώσεις σε μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όπου ο προτεινόμενος ηλεκτρονόμος επιτυγχάνει σημαντικά ταχύτερους χρόνους συγκριτικά με τον συμβατικό και αποφεύγει εσφαλμένες εντολές trip κατά τη διάρκεια ταλαντώσεων ισχύος. Η πρακτική εφαρμογή επεκτείνεται σε ένα πιο σύνθετο σύστημα, επιβεβαιώνοντας την υπεροχή του προτεινόμενου σχήματος έναντι της κλασικής μεθόδου. Τέλος, συνοψίζονται τα ευρήματα και τα συμπεράσματα της έρευνας και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

Λέξεις Κλειδιά:

Σύγχρονη γεννήτρια, απώλεια διέγερσης, αποσυγχρονισμός, ηλεκτρονόμος προστασίας, χαρακτηριστική mho

Abstract

The subject of the present diploma thesis is the investigation of loss of excitation in synchronous generators. The study includes the analysis of the conventional protection scheme and the development of an innovative relay, aiming to improve the response speed and reliability of the protection scheme. Initially, the fundamental aspects of synchronous machines and associated control arrangements related to loss of excitation and loss of synchronism phenomena are presented. This is followed by an extensive analysis of the main protection methods, focusing on the operating principles and setting characteristics of the protective relays. A new protection relay is developed, which applies a time delay based on the calculated electromechanical oscillation frequency. The relay tripping is initiated through a combined evaluation of the stator's coupled flux, the reactive power, and the rotor angle. Simulations were performed on a small power system, where the proposed relay achieved significantly faster response times compared to the conventional one and successfully avoided false tripping commands during power oscillations. The practical application is further extended to a more complex system, confirming the superiority of the proposed scheme over the classical method. Finally, the findings and conclusions of the research are summarized, and suggestions for future work are presented.

Keywords:

Synchronous generator, loss of excitation, loss of synchronism, protection relay, mho characteristic.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Νικολαΐδη Βασίλειο, Επ. Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, καθώς και για την ιδανική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της. Η επιστημονική καθοδήγηση του και οι εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια ήταν καταλυτικές για την επιτυχή ολοκλήρωση της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.

Κλείνοντας, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την υπομονή τους και την πολύτιμη υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	13
1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	13
2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ	
2.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.....	15
2.2 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας.....	16
2.3 Σύστημα διέγερσης.....	19
2.4 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης.....	21
2.5 Περιοριστές συστήματος διέγερσης.....	21
2.6 Διάγραμμα ικανότητας φόρτισης.....	23
3. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ	
3.1 Σφάλμα απώλειας διέγερσης.....	25
3.2 Επίδραση της προσφαλματικής φόρτισης γεννήτριας.....	26
3.3 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	27
3.4 Προστασία έναντι απώλειας διέγερσης.....	27
3.4.1 Ηλεκτρονόμοι απώλειας διέγερσης.....	27
3.4.2 Ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης offset mho.....	28
3.4.3 Ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης offset mho με στοιχείο κατεύθυνσης και υπότασης.....	30
3.5 Προστασία σύγχρονων γεννητριών έναντι αποσυγχρονισμού.....	31
3.5.1 Θεώρηση συστήματος γεννήτριας – άπειρου ζυγού.....	31
3.5.2 Ανίχνευση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.....	32
4. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ	
4.1 Εισαγωγή.....	34
4.2 Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου προστασίας απώλειας διέγερσης.....	34
4.3 Εφαρμογή σε μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	37
4.3.1 Περιγραφή.....	37
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων προτεινόμενης μεθόδου.....	39
4.3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση συμβατικού ηλεκτρονόμου offset mho.....	44
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ	
5.1 Περιγραφή.....	48
5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	49
5.3 Εφαρμογή προτεινόμενου σχήματος προστασίας στο σύστημα.....	64
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	93

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Παρά την αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από σύγχρονες μηχανές που είναι εγκατεστημένες σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής (κυρίως σε θερμικούς και υδροηλεκτρικούς). Σύγχρονες γεννήτριες συναντώνται επίσης σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις για ιδιοπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα εσωτερικά σφάλματα των σύγχρονων γεννητριών είναι ιδιαίτερα σπάνια, όταν όμως συμβούν μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφικά εφόσον δεν εκκαθαριστούν γρήγορα. Σε αυτή την περίπτωση, τα σφάλματα έχουν σημαντικό αντίκτυπο τόσο στο κόστος αποκατάστασης της μηχανής, όσο και στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Για τους προαναφερόμενους λόγους, τα συστήματα προστασίας μίας σύγχρονης μηχανής πρέπει να αποσυνδέουν τάχιστα τη μηχανή από το δίκτυο σε περίπτωση σφάλματος. Κατά συνέπεια, η ρύθμιση των συστημάτων προστασίας μιας γεννήτριας είναι πάρα πολύ σημαντική διαδικασία.

Η παρούσα εργασία εστιάζει στα σφάλματα απώλειας διέγερσης στις σύγχρονες γεννήτριες. Εξετάζεται επίσης η επίδραση της λειτουργίας της προστασίας των γεννητριών στη μεταβατική ευστάθεια του συστήματος.

1.2 Δομή διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια.

Στο 2^ο Κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά στοιχεία της θεωρίας των σύγχρονων μηχανών, ιδιαίτερα αυτά που σχετίζονται με την προστασία απώλειας διέγερσης και αποσυγχρονισμού.

Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται τα σφάλματα απώλειας διέγερσης στις σύγχρονες γεννήτριες και η επίδρασή τους στη μηχανή, αλλά και στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας γενικότερα. Περιγράφονται, επίσης, οι βασικές μέθοδοι προστασίας των σύγχρονων γεννητριών έναντι του σφάλματος απώλειας διέγερσης. Επιπλέον διερευνάται ο κίνδυνος αποσυγχρονισμού των σύγχρονων γεννητριών. Αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μεταβατικής ευστάθειας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και περιγράφονται οι βασικές μέθοδοι προστασίας των σύγχρονων γεννητριών έναντι αποσυγχρονισμού.

Στο 4^ο Κεφάλαιο προτείνεται μία μέθοδος ανίχνευσης απώλειας διέγερσης με βάση μετρήσεις που λαμβάνονται από τη γεννήτρια και συγκρίνεται η απόδοσή της με αυτή του συμβατικού ηλεκτρονόμου απώλειας διέγερσης τύπου mho.

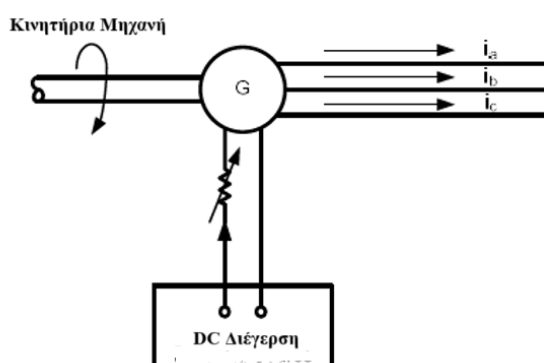
Στο 5^ο *Κεφάλαιο* εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος σε ένα πιο μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, στο 6^ο *Κεφάλαιο* παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των προηγούμενων κεφαλαίων.

ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

2.1 Χαρακτηριστικά λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας

Η σύγχρονη γεννήτρια μετατρέπει τη μηχανική ισχύ εισόδου σε ηλεκτρική ισχύ στους ακροδέκτες εξόδου. Η μηχανική ισχύς αναπτύσσεται με τη βοήθεια μίας κινητήριας μηχανής η οποία περιστρέφει τον δρομέα, εκμεταλλευόμενη μία άλλα μορφή ενέργειας. Για παράδειγμα, στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής, η μηχανική ενέργεια προέρχεται πρωτογενώς από την καύση ορυκτών καυσίμων ή τη σχάση ουρανίου, ενώ στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής προέρχεται από τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του ύδατος. Στο Σχ. 2.1 φαίνεται μια απλοποιημένη αναπαράσταση της σύγχρονης γεννήτριας.

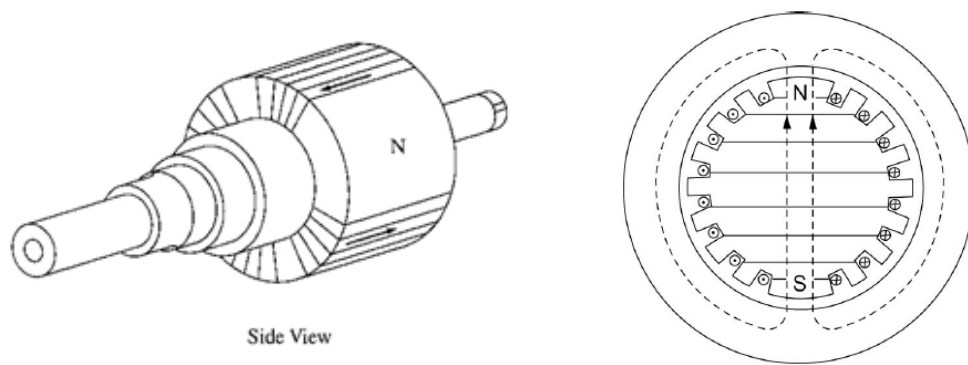


Σχήμα 2.1 Απλοποιημένη αναπαράσταση σύγχρονης γεννήτριας[2]

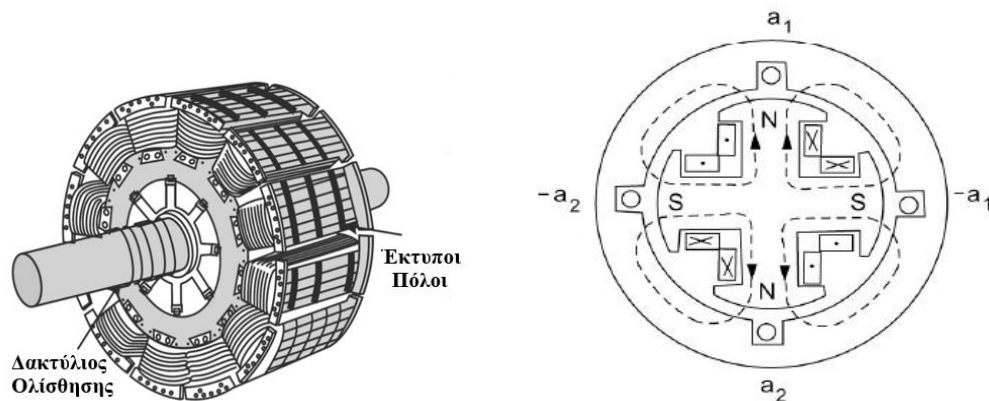
Το τύλιγμα διέγερσης (τύλιγμα συνεχούς ρεύματος) είναι κατά κανόνα εγκατεστημένο στον δρομέα της σύγχρονης μηχανής. Οι δρομείς ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: α) στους κυλινδρικούς και β) στους δρομείς με έκτυπους πόλους. Η επιλογή εξαρτάται κυρίως από τις στροφές της κινητήριας μηχανής.

Μηχανές κυλινδρικού δρομέα

Οι γεννήτριες των θερμικών σταθμών παραγωγής διαθέτουν κυλινδρικούς δρομείς (Σχ. 2.2), διότι περιστρέφονται σε υψηλή ταχύτητα, τυπικά 1500 ή 3000 στροφές ανά λεπτό (αριθμός πόλων 4 ή 2 αντίστοιχα). Με τέτοια ταχύτητα περιστροφής αναπτύσσονται στους δρομείς τεράστιες φυγόκεντρες δυνάμεις. Για παράδειγμα, σε ένα δρομέα με διάμετρο $d = 1273 \text{ mm}$ που περιστρέφεται με 3000 ΣΑΛ, η ταχύτητα στην περιφέρεια ανέρχεται σε $v = d\omega_m/2 = 720 \text{ km/h}$. Η αντίστοιχη επιτάχυνση είναι ίση με $a = d\omega_m^2/2 = 6,28 \times 10^4 \text{ m/s}^2 = g \times 6,40 \times 10^3$, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε κιλό υλικού ασκούνται 6,4 τόνοι φυγόκεντρης δύναμης.



Σχήμα 2.2 Κυλινδρικός δρομέας[5]



Σχήμα 2.3 Δρομέας έκτυπων πόλων[5]

Οι κυλινδρικοί δρομείς κατασκευάζονται συνήθως από συμπαγή σφυρήλατο χάλυβα για μεγαλύτερη μηχανική ακαμψία και ευκολία στην απαγωγή θερμότητας.

Μηχανές έκτυπων πόλων

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής, οι μηχανές διαθέτουν δρομείς με πολυστρωματικούς έκτυπους πόλους (Σχ. 2.3), διότι η ταχύτητα περιστροφής είναι μικρότερη (τυπικά από 93,75 έως 1000 ΣΑΛ) και δεν αναπτύσσονται τόσο μεγάλες φυγόκεντρες δυνάμεις. Κατά μήκος της επιφάνειας των πόλων υπάρχουν τα τυλίγματα απόσβεσης, δηλαδή βραχυκυκλωμένες ράβδοι χαλκού με σκοπό την απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων του δρομέα.

Λόγω των απωλειών που δημιουργούνται στο χαλκό και στο σίδηρο μιας μηχανής απαιτείται φυσική ή βεβιασμένη ψύξη με αέρα ή άλλα ψυκτικά μέσα. Η ισχύς που παράγει μια γεννήτρια επηρεάζεται από τη θερμοκρασία άρα και από τον τρόπο ψύξης της. Σε γεννήτριες έκτυπων πόλων το πρόβλημα της ψύξης λύνεται εύκολα χρησιμοποιώντας βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα, γιατί η πυκνότητα παραγωγής θερμότητας είναι μικρή. Σε γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα, η αντίστοιχη πυκνότητα είναι μεγάλη και η προσφερόμενη επιφάνεια προς ψύξη μικρή. Σε ισχείς μέχρι 230 MVA οι δρομείς ψύχονται με αέρα και υδρογόνο. Σε μεγαλύτερες ισχείς εφαρμόζεται και ψύξη με νερό [4][5][6].

2.2 Μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας

Η μοντελοποίηση της σύγχρονης γεννήτριας είναι απαραίτητη για τη μελέτη της λειτουργικής συμπεριφοράς της, καθώς και για την ορθή σχεδίαση και εφαρμογή προστασιών, όπως η

απώλεια διέγερσης και η απώλεια συγχρονισμού. Η συνήθης αναπαράσταση γίνεται με τη βοήθεια του μετασχηματισμού Park.

Διαφορικές εξισώσεις στάτη

Ο στάτης φιλοξενεί το τριφασικό τύλιγμα της μηχανής, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4. Οι διαφορικές εξισώσεις στάτη είναι:

$$v_d = r_s i_d + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_d}{dt} - n\psi_q \quad (2.1)$$

$$v_q = r_s i_q + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_q}{dt} - n\psi_d \quad (2.2)$$

όπου:

v_d, v_q : οι συνιστώσες τάσης στον άξονα d και q αντίστοιχα

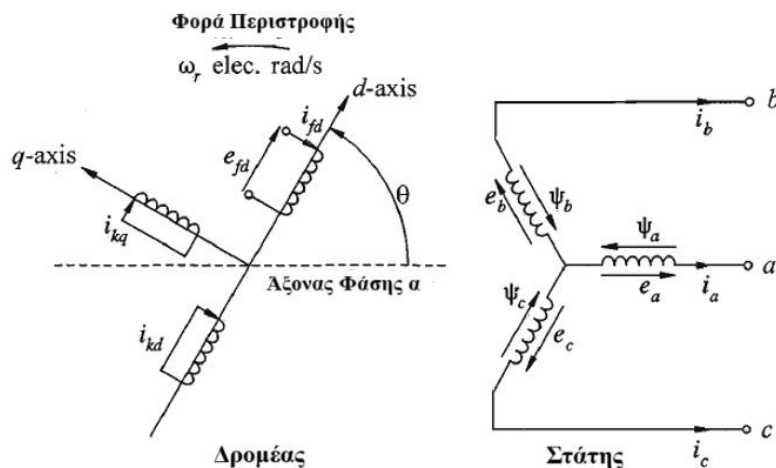
i_d, i_q : οι συνιστώσες ρεύματος στάτη στον άξονα d και q αντίστοιχα

ψ_d, ψ_q : η πεπλεγμένη μαγνητική ροή στάτη ανά δευτερόλεπτο στον άξονα d και q αντίστοιχα

r_s : η ωμική αντίσταση στάτη

n : η ανηγμένη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής (ω_r/ω_n)

ω_n : η ονομαστική γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα



Σχήμα 2.4 Κύκλωμα στάτη και δρομέα[9]

Διαφορικές εξισώσεις δρομέα

Ο δρομέας φέρει το τύλιγμα διέγερσης στον άξονα d και στην απλούστερη περίπτωση από ένα τύλιγμα απόσβεσης στους άξονες d και q. Οι διαφορικές εξισώσεις δρομέα είναι:

$$v_f = r_f i_f + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_f}{dt} \quad (2.3)$$

$$0 = r_d i_d + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_d}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = r_q i_q + \frac{1}{\omega_n} \frac{d\psi_q}{dt} \quad (2.5)$$

όπου:

v_f, i_f : η τάση και το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης αντίστοιχα

i_d, i_q : η συνιστώσα του ρεύματος δρομέα στον άξονα d και q αντίστοιχα

ψ_f : η ανά δευτερόλεπτο πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το τύλιγμα διέγερσης
 ψ_d : η ανά δευτερόλεπτο πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το τύλιγμα απόσβεσης στον άξονα d
 ψ_q : η ανά δευτερόλεπτο πεπλεγμένη μαγνητική ροή με το τύλιγμα απόσβεσης στον άξονα q
 r_f : η ωμική αντίσταση του τυλίγματος διέγερσης
 r_d, r_q : η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων απόσβεσης στον άξονα d και q αντίστοιχα

Διαφορικές εξισώσεις κίνησης

Τέλος, οι εξισώσεις κίνησης είναι:

$$\frac{J_{tot} \omega_n^2}{p_z^2 P_r} \frac{dn}{dt} = T_{a,tot} \frac{dn}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_n n \quad (2.7)$$

όπου:

J_{tot} : η συνολική ροπή αδράνειας του συστήματος στροβίλου-γεννήτριας
 p_z : ο αριθμός των ζευγών πόλων της μηχανής
 P_r : η ονομαστική ισχύς εξόδου της μηχανής
 T_m : η μηχανική ροπή εισόδου στη γεννήτρια
 T_e : η ηλεκτρομαγνητική ροπή εξόδου της γεννήτριας
 $T_{a,tot}$: ο μηχανικός χρόνος εκκίνησης της μηχανής
 θ : η γωνία που σχηματίζει ο μαγνητικός άξονας d με το μαγνητικό άξονα της φάσης α

Αλγεβρικές εξισώσεις

Στο σημείο αυτό πρέπει να εισαχθούν οι αλγεβρικές εξισώσεις των πεπλεγμένων μαγνητικών ροών:

$$\psi_d = (x_l + x_{md})i_d + x_{md}i_e + x_{md}i_D \quad (2.8)$$

$$\psi_D = x_{md}i_d + (x_{md} + x_{rl})i_e + (x_{md} + x_{rl} + x_{lD})i_D \quad (2.9)$$

$$\psi_q = (x_l + x_{mq})i_q + x_{mq}i_Q \quad (2.10)$$

$$\psi_Q = x_{mq}i_q + (x_{mq} + x_{rl} + x_{lQ})i_Q \quad (2.11)$$

$$\psi_e = x_{md}i_d + (x_{md} + x_{rl} + x_{le})i_e + (x_{md} + x_{rl})i_D \quad (2.12)$$

όπου:

x_l : η επαγωγική αντίδραση σκέδασης στάτη
 x_{rl} : η επαγωγική αντίδραση σκέδασης δρομέα
 x_{le} : η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος διέγερσης
 x_{lD} : η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος απόσβεσης στον άξονα d
 x_{lQ} : η επαγωγική αντίδραση σκέδασης του τυλίγματος απόσβεσης στον άξονα q
 x_{md} : η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης στον άξονα d
 x_{mq} : η επαγωγική αντίδραση μαγνήτισης στον άξονα q

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τη στιγμιαία παραγόμενη ανά μονάδα ενεργό (P_e) και άεργο ισχύ (Q_e) και την αντίστοιχη ηλεκτρομαγνητική ροπή (T_e):

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.13)$$

$$Q_e = v_q i_d - v_d i_q \quad (2.14)$$

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2.15)$$

2.3 Σύστημα διέγερσης

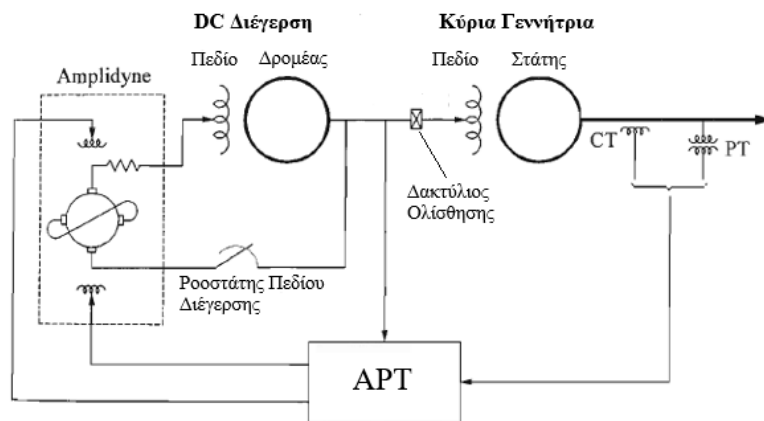
Το σύστημα διέγερσης αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα στη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας, καθώς παρέχει το απαραίτητο ρεύμα στο τύλιγμα του δρομέα, δημιουργώντας έτσι το μαγνητικό πεδίο που είναι αναγκαίο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο στάτη.

Τα συστήματα διέγερσης διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες που περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Συστήματα διέγερσης συνεχούς ρεύματος

Τα συστήματα διέγερσης αυτού του τύπου χρησιμοποιούν διεγέρτριες συνεχούς ρεύματος και παρέχουν ρεύμα στον δρομέα της κύριας μηχανής μέσω δακτυλίων ολίσθησης (ψηκτρες). Στο Σχ. 2.5 βλέπουμε μια απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος διέγερσης συνεχούς ρεύματος με ρυθμιστή τύπου amplidyne.

Το πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων διέγερσης είναι η απλότητα των κυκλωμάτων ελέγχου. Όμως λόγω της σχετικά αργής τους απόκρισης και της ανάγκης για συντήρηση λόγω κυρίως των ψηκτρών, προτιμώνται πιο σύγχρονες τεχνολογίες [2][8].

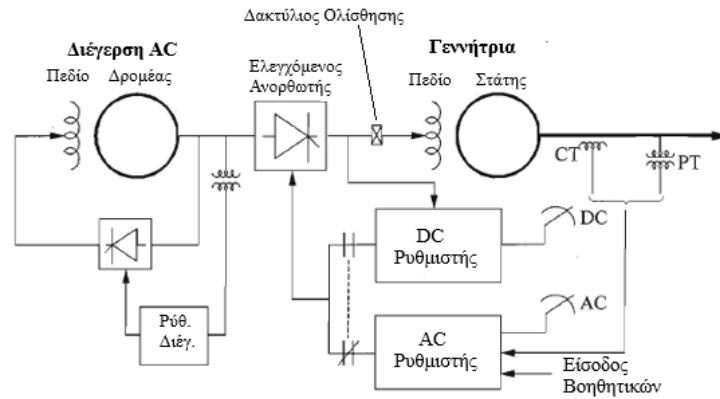


Σχήμα 2.5 Σύστημα διέγερσης συνεχούς ρεύματος με amplidyne[9]

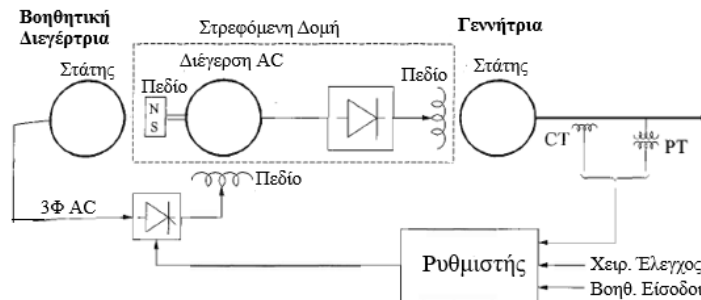
Συστήματα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος

Τα συστήματα διέγερσης αυτού του τύπου χρησιμοποιούν διεγέρτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Η έξοδος της διεγέρτριας ανορθώνεται συνήθως με ελεγχόμενους ανορθωτές για την παραγωγή του απαιτούμενου συνεχούς ρεύματος διέγερσης της κύριας μηχανής. Τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν καλή μεταβατική απόκριση.

Οι ανορθωτές μπορεί να είναι είτε στατοί είτε στρεφόμενοι (Σχ. 2.6). Στα συστήματα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς ψήκτρες (brushless) εξαλείφεται η ανάγκη συντήρησης των ψηκτρών και έτσι λύνονται κάποια προβλήματα που δημιουργούνται κατά την παροχή υψηλών ρευμάτων διέγερσης [9].



(α) Στατικό σύστημα διέγερσης

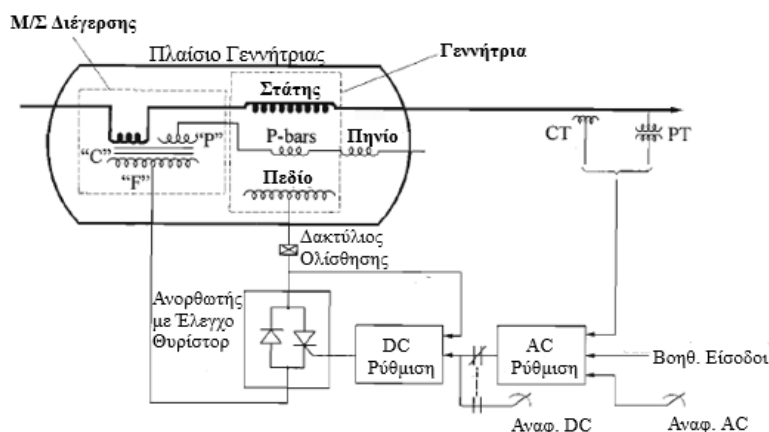


(β) Στρεφόμενο σύστημα διέγερσης (brushless)

Σχήμα 2.6 Σύστημα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος[9]

Στατά συστήματα διέγερσης

Στα συστήματα διέγερσης αυτής της κατηγορίας, στατοί ανορθωτές τροφοδοτούν με ρεύμα διέγερσης την κύρια μηχανή μέσω δακτυλίων ολίσθησης. Η παροχή ισχύος γίνεται από την κύρια γεννήτρια μέσω ενός μετασχηματιστή που υποβιβάζει την τάση στο κατάλληλο επίπεδο. Το κύριο πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών είναι η υψηλή ταχύτητα απόκρισης [9].



Σχήμα 2.7 Στατό σύστημα διέγερσης τύπου IEEE GENEREX[9]

2.4 Αυτόματος ρυθμιστής τάσης

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης (APT) είναι μία διάταξη ελέγχου που ρυθμίζει το ρεύμα διέγερσης. Η ένταση του ρεύματος διέγερσης είναι ανάλογη της παραγόμενης εσωτερικής τάσης ή ηλεκτρεγερτικής δύναμης διέγερσης (E_f) της μηχανής.

Η βασική λειτουργία του APT σε μία διασυνδεδεμένη σύγχρονη μηχανή είναι ο έλεγχος της τερματικής τάσης. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη διέγερσης καθορίζει την άεργο ισχύ που παράγει (ή καταναλώνει) η γεννήτρια. Η ρύθμιση διέγερσης από τον APT επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το μέτρο (ενεργό τιμή) της τερματικής τάσης V_t της γεννήτριας με την τάση αναφοράς V_r και αναπροσαρμόζοντας ανάλογα την ηλεκτρεγερτική δύναμη διέγερσης προκειμένου να εξαλειφθεί το σφάλμα [1][2].

Το γενικό διάγραμμα ενός συστήματος διέγερσης, το οποίο αποτελείται από τον APT και την κύρια διεγέρτρια φαίνεται στο Σχ. 2.8.



Σχήμα 2.8 Δομικό διάγραμμα συστήματος διέγερσης γεννήτριας

2.5 Περιοριστές συστήματος διέγερσης

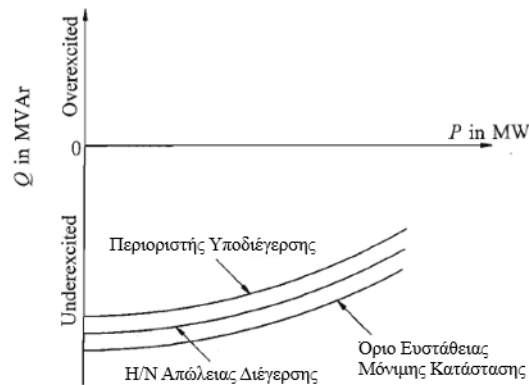
Οι περιοριστές αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του συστήματος διέγερσης μιας σύγχρονης γεννήτριας και έχουν ως στόχο την προστασία της κύριας μηχανής και του συστήματος διέγερσης.

Περιοριστής ρεύματος στάτη

Το σύστημα αυτό προστατεύει το τυλίγμα στάτη από μη αποδεκτή υπερθέρμανση λόγω υπερεντάσεων στο στάτη.

Περιοριστής υποδιέγερσης

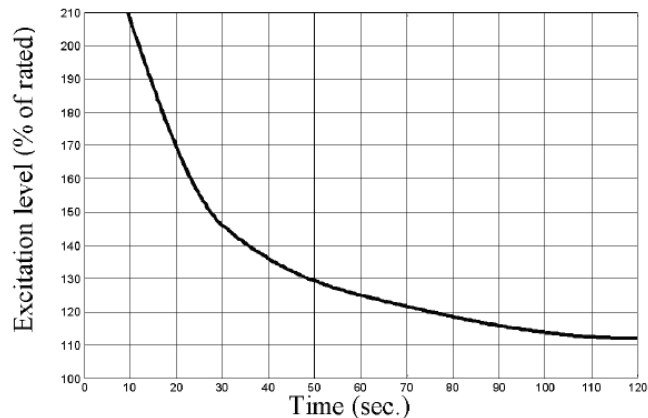
Ο περιοριστής υποδιέγερσης έχει ως στόχο την αποτροπή μείωσης της διέγερσης σε επίπεδα που προσεγγίζουν το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης ή το θερμικό όριο στα άκρα του τυλίγματος του στάτη. Ο περιοριστής υποδιέγερσης πρέπει να ρυθμίζεται σε συνεργασία με τον ηλεκτρονόμο απώλειας διέγερσης όπως φαίνεται στο Σχ. 2.9.



Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική περιοριστή υποδιέγερσης[9]

Περιοριστής υπερδιέγερσης

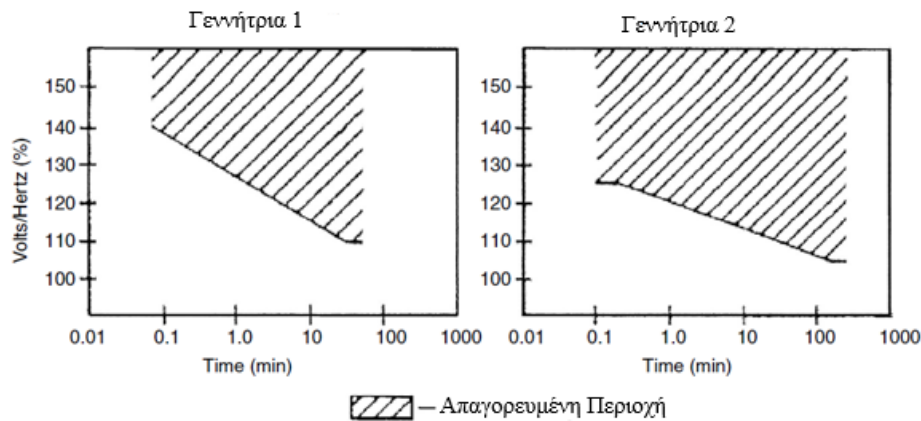
Ο στόχος του περιοριστή υπερδιέγερσης είναι η προστασία του τυλίγματος διέγερσης από υπερθέρμανση λόγω μίας παρατεταμένης υπερέντασης. Το τυλίγμα διέγερσης είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργεί συνεχώς σε μία μέγιστη τιμή ρεύματος διέγερσης. Ο περιοριστής υπερδιέγερσης ανιχνεύει παραβίαση του ορίου αυτού και μετά από μία χρονική καθυστέρηση, περιορίζει το ρεύμα διέγερσης στην προκαθορισμένη τιμή (συνήθως 105% - 110% της ονομαστικής έντασης διέγερσης). Ο χρόνος καθυστέρησης καθορίζεται από μία χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου όπως αυτή του Σχ. 2.10.[8]



Σχήμα 2.10 Χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου περιοριστή υπερδιέγερσης [8]

Περιοριστής V/Hz

Οι περιοριστές V/Hz περιλαμβάνονται στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα διέγερσης και χρησιμοποιούνται για την προστασία της γεννήτριας και του μετασχηματιστή ανύψωσης από βλάβη που οφείλεται σε υπερβολική μαγνητική ροή ως αποτέλεσμα υποσυχνότητας ή/και υπέρτασης. Ο περιοριστής V/Hz είναι ενσωματωμένος στον APT και παρακολουθεί την τάση και τη συχνότητα στους ακροδέκτες της γεννήτριας, προσαρμόζοντας το ρεύμα διέγερσης όταν παραβιάζονται τα επιτρεπόμενα όρια του λόγου V/Hz. Στο Σχ. 2.11 απεικονίζονται τυπικά όρια V/Hz [9].

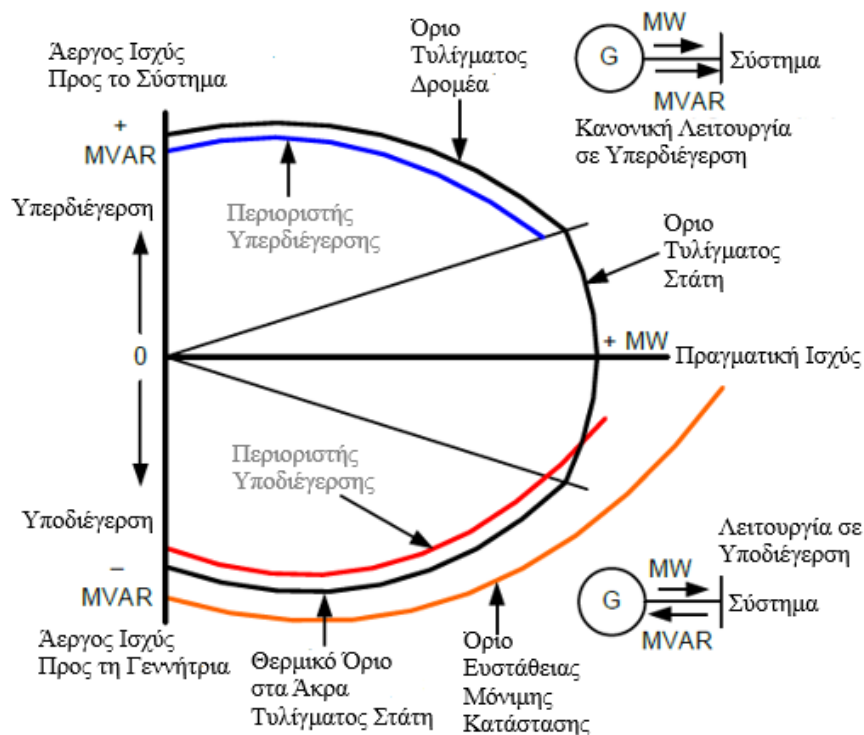


Σχήμα 2.11 Τυπικά επιτρεπόμενα όρια λόγου V/Hz [7]

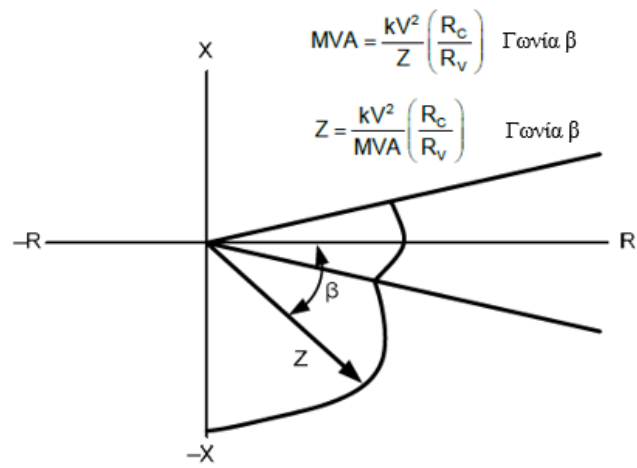
2.6 Διάγραμμα ικανότητας φόρτισης

Το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης μιας σύγχρονης γεννήτριας καθορίζει τις επιτρεπτές περιοχές λειτουργίας της γεννήτριας στο επίπεδο PQ για δεδομένη τερματική τάση της μηχανής. Στο διάγραμμα αυτό αποτυπώνονται επίσης τα προαναφερόμενα όρια λειτουργίας του συστήματος διέγερσης της μηχανής (Σχ. 2.12).

Το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης μιας γεννήτριας παρέχεται από τους κατασκευαστές και εκτός από τη βασική πληροφορία των επιτρεπόμενων περιοχών λειτουργίας της γεννήτριας χρησιμεύει στην αρχική ρύθμιση του ηλεκτρονόμου προστασίας από απώλεια διέγερσης. Ειδικά για τη ρύθμιση του ηλεκτρονόμου, εξυπηρετεί να απεικονίζεται το διάγραμμα ικανότητας φόρτισης μιας σύγχρονης γεννήτριας και τα αντίστοιχα όρια στο επίπεδο RX (Σχ. 2.13).



Σχήμα 2.12 Τυπικό διάγραμμα ικανότητας φόρτισης[2]



Σχήμα 2.13 Μετασχηματισμός από το επίπεδο PQ στο επίπεδο RX [2]

ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΥ

3.1 Σφάλμα απώλειας διέγερσης

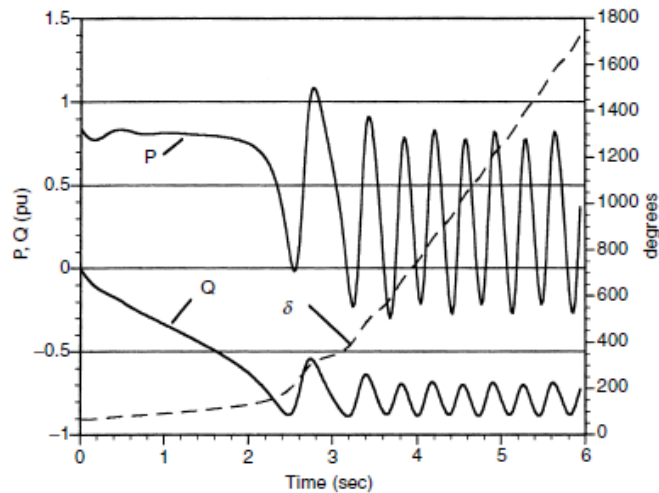
Το σφάλμα απώλειας διέγερσης αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο ποσοστό βλαβών στις σύγχρονες γεννήτριες και πρέπει να εντοπίζεται γρήγορα για να μην καταστεί επιζήμιο τόσο για τις ίδιες τις γεννήτριες όσο και για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο είναι συνδεδεμένες.

Σφάλμα απώλειας διέγερσης σε μια σύγχρονη γεννήτρια προκύπτει όταν διακοπεί η ροή ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης. Η διακοπή αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορους λόγους, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι βραχυκύκλωμα ή ανοικτοκύκλωμα στο τύλιγμα διέγερσης, αστοχία του διακόπτη στο τύλιγμα διέγερσης, κακή επαφή ψηκτρών, βλάβη στο σύστημα διέγερσης.

Στην κατάσταση αυτή η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί απορροφώντας άεργο ισχύ από το δίκτυο. Αμέσως μετά την απώλεια διέγερσης, ο δρομέας της μηχανής ταλαντώνεται, η γωνία δρομέα αυξάνεται και η μηχανή συνήθως αποσυγχρονίζεται.

Μια τέτοια περίπτωση απεικονίζεται στο Σχ. 3.1. Πιο συγκεκριμένα στο σχήμα αυτό αποτυπώνεται η ενεργός και άεργος ισχύς, καθώς και η γωνία δρομέα μίας σύγχρονης γεννήτριας που λειτουργεί στο ονομαστικό φορτίο. Η απώλεια διέγερσης συμβαίνει τη χρονική στιγμή $t = 0$. Παρατηρείται ότι μετά από περίπου 2 s, η γεννήτρια αποσυγχρονίζεται. Στο σημείο αυτό αρχίζουν οι ταλαντώσεις της ενεργού και άεργου ισχύος που υποδηλώνουν την ολίσθηση πόλων.

Γενικότερα, οι επιπτώσεις από ένα σφάλμα απώλειας διέγερσης είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του δρομέα λόγω των δινορευμάτων που επάγονται στο τύλιγμα διέγερσης από το στάτη, η αύξηση της θερμοκρασίας του τυλίγματος στάτη, η εμφάνιση μεγάλων ρευμάτων στο στάτη και οι διακυμάνσεις στην ηλεκτρομαγνητική ροπή [1].



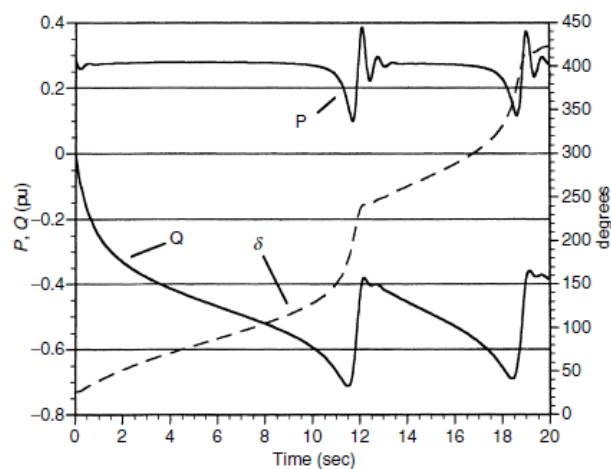
Σχήμα 3.1 Χαρακτηριστικά μεγέθη γεννήτριας μετά από σφάλμα απώλειας διέγερσης [1]

3.2 Επίδραση της προσφαλματικής φόρτισης γεννήτριας

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τις επιπτώσεις του σφάλματος απώλειας διέγερσης είναι η προσφαλματική φόρτιση της γεννήτριας και το πόσο ισχυρό είναι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο συνδέεται η γεννήτρια.

Θεωρητικά, για μικρή αρχική φόρτιση, η γεννήτρια θα μπορούσε να λειτουργεί διαρκώς απορροφώντας άεργο ισχύ. Όσο μεγαλύτερη είναι η προσφαλματική φόρτιση, τόσο πιο πιθανό είναι να εμφανιστεί ο αποσυγχρονισμός της γεννήτριας και μάλιστα σε μικρότερο χρόνο.

Στο Σχ. 3.2 απεικονίζεται η απόκριση της γεννήτριας που εξετάστηκε στην προηγούμενη ενότητα σε ένα σφάλμα απώλειας διέγερσης. Η διαφορά τώρα έγκειται στην αρχική φόρτιση της γεννήτριας που θεωρείται στο 30% του ονομαστικής. Σε αυτήν την περίπτωση, ο αποσυγχρονισμός εμφανίζεται μετά από περίπου 12 s [1].



Σχήμα 3.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη γεννήτριας μετά από σφάλμα απώλειας διέγερσης και μικρότερη φόρτιση [1]

3.3 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Αν μια σύγχρονη γεννήτρια δεν αποσυνδεθεί τάχιστα μετά από ένα σφάλμα απώλειας διέγερσης, εκτός από τις επιπτώσεις που θα έχει η ίδια η μηχανή, θα δημιουργηθούν προβλήματα στο σύστημα στο οποίο είναι συνδεδεμένη. Όπως ήδη αναφέρθηκε, όταν η γεννήτρια χάσει τη διέγερσή της, μεταπίπτει σε ασύγχρονη λειτουργία και αντί να παρέχει άεργο ισχύ, απορροφά μεγάλες ποσότητες άεργου ισχύος που κυμαίνονται από 0,4 έως 1,9 φορές την ονομαστική της ισχύ.

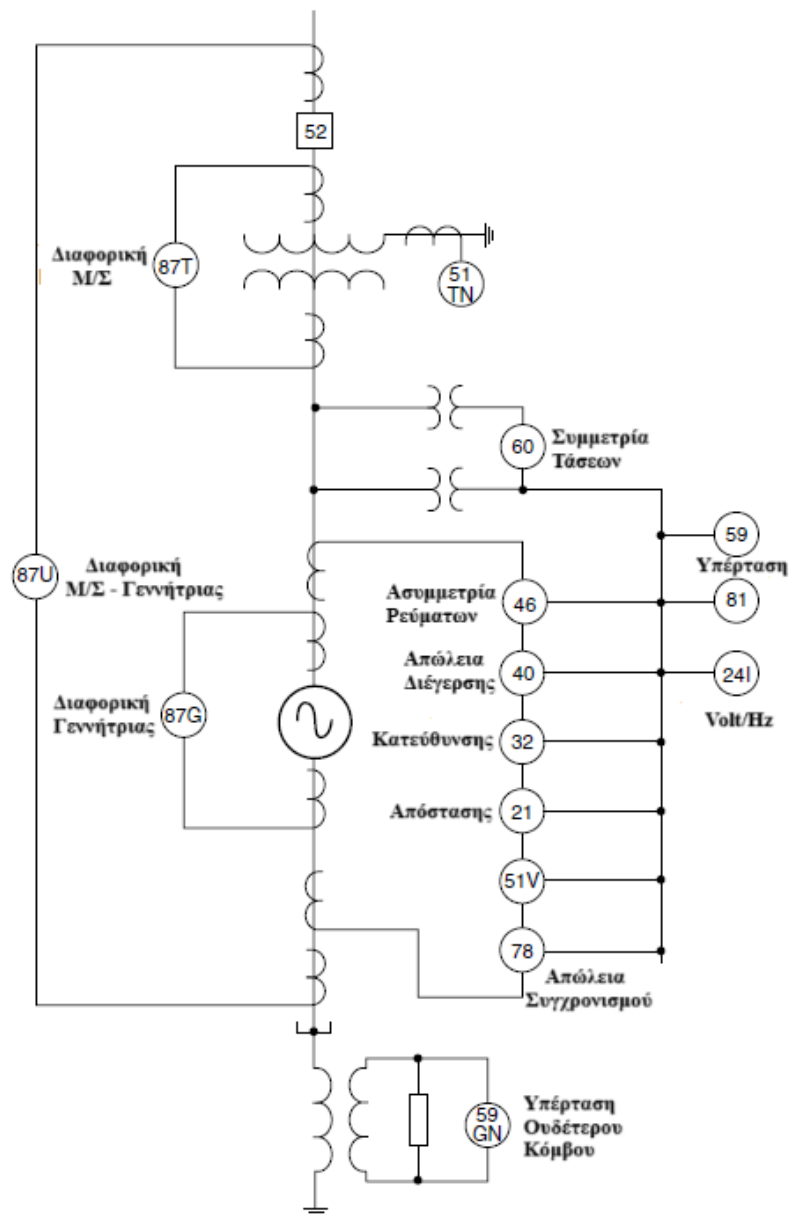
Σε ισχυρά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι επιπτώσεις από την απώλεια διέγερσης σε μία μηχανή είναι περιορισμένες. Σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όμως που δεν μπορούν να υποστηρίξουν τη μεγάλη ζήτηση άεργου ισχύος της εσφαλμένης μονάδας, μια τέτοια διαταραχή μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη διακοπή λειτουργίας του συστήματος. Η εξέλιξη του φαινομένου αυτού γίνεται ως εξής: Αρχικά η διέγερση των γειτονικών γεννητριών αυξάνεται για να μπορέσουν να παράξουν την άεργο ισχύ που απαιτείται από την εσφαλμένη μονάδα, ώστε να κρατήσουν την τάση της περιοχής σε κανονικά επίπεδα. Η απότομη αύξηση ροής άεργου ισχύος μπορεί να ωθήσει τις γειτονικές γεννήτριες να λειτουργήσουν με μεγάλο ρεύμα διέγερσης. Αυτό ενδεχομένως, μπορεί να προκαλέσει τη λειτουργία των περιοριστών υπερδιέγερσης των γεννητριών σε αυτές που παρατηρούνται υπερβάσεις, ώστε να μειωθεί άμεσα το ρεύμα διέγερσης. Ως αποτέλεσμα, ενδέχεται να εμφανιστεί σοβαρή πτώση τάσης στο δίκτυο. Επίσης η αυξημένη ροή άεργου ισχύος στις γραμμές μεταφοράς επιφέρει τον κίνδυνο ανεπιθύμητης αποσύνδεσής τους λόγω προστασίας υπερφόρτισης. Ως αποτέλεσμα, το ενδεχόμενο αστάθειας τάσης ή κατάρρευσης του συστήματος είναι πιθανό [1].

3.4 Προστασία έναντι απώλειας διέγερσης

3.4.1 Ηλεκτρονόμοι απώλειας διέγερσης

Η απλούστερη διαμόρφωση ηλεκτρονόμου προστασίας γεννήτριας έναντι απώλειας διέγερσης χρησιμοποιεί μόνο ένα στοιχείο υπότασης ή ένα στοιχείο υποέντασης, που τροφοδοτείται από το κύκλωμα του τυλίγματος διέγερσης. Τα στοιχεία αυτά ρυθμίζονται έτσι ώστε να ανοίγουν τον διακόπτη ισχύος της γεννήτριας όταν η τάση ή το ρεύμα διέγερσης αντίστοιχα πέσει κάτω από ένα κατώφλι, έχοντας πάντα μια χρονική καθυστέρηση για την αποφυγή λανθασμένων εντολών. Οι ηλεκτρονόμοι αυτοί παρέχουν καλή προστασία και είναι αρκετά φτηνοί, αλλά πολλές φορές ενεργοποιούνται από άλλα σφάλματα, παρά τη χρονική καθυστέρηση που τίθεται. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται κυρίως σε γεννήτριες μικρής ισχύος.

Ο πιο δημοφιλής ηλεκτρονόμος προστασίας γεννήτριας από απώλεια διέγερσης είναι αυτός που χρησιμοποιεί δύο στοιχεία σύνθετης αγωγιμότητας (offset mho). Ο ηλεκτρονόμος αυτός (συμβολίζεται με τον αριθμό 40 κατά ANSI/IEEE) τροφοδοτείται από έναν μετασχηματιστή έντασης και έναν μετασχηματιστή τάσης, αμφότεροι εγκατεστημένοι στην πλευρά της γεννήτριας, πριν από τον μετασχηματιστή ανύψωσης (Σχ. 3.3). Από τις μετρήσεις έντασης και τάσης, ο ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης τύπου offset mho υπολογίζει την σύνθετη αντίσταση που «βλέπει» η γεννήτρια από τους ακροδέκτες της ή αλλιώς την φαινόμενη σύνθετη αντίσταση. Μόλις η τροχιά της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης βρεθεί για ορισμένο χρόνο εντός της χαρακτηριστικής του κύκλου mho, ο ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται. Μια διαφορετική διαμόρφωση του ηλεκτρονόμου offset mho χρησιμοποιεί συνδυαστικά με τη χαρακτηριστική offset mho ένα στοιχείο κατεύθυνσης και ένα υπότασης.



Σχήμα 3.3 Πλήρες σύστημα προστασίας μονάδας[7]

Άλλη διάταξη προστασίας που μπορεί να εντοπίσει την απώλεια διέγερσης είναι ο ηλεκτρονόμος αναστροφής ισχύος (reverse power relay) ο οποίος δίνει εντολή ανοίγματος του διακόπτη της γεννήτριας όταν αυτή απορροφά άεργο ισχύ πάνω από ένα κατώφλι[1].

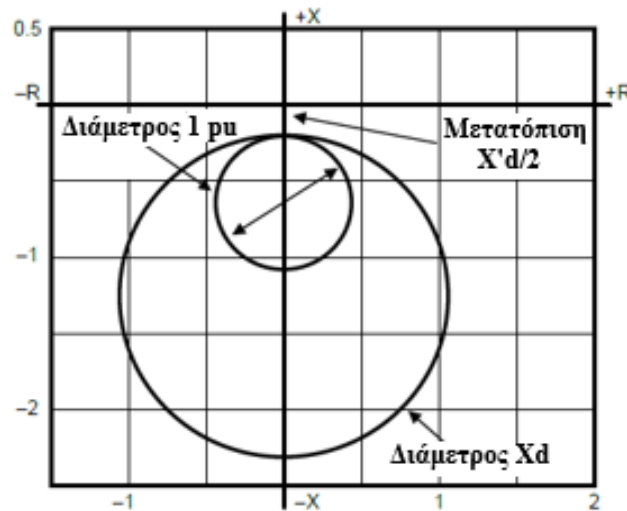
3.4.2 Ηλεκτρονόμος απώλεια διέγερσης offset mho

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο ηλεκτρονόμος προστασίας γεννήτριας έναντι απώλεια διέγερσης τύπου offset mho είναι ο πιο δημοφιλής. Διαθέτει δύο στοιχεία και αντίστοιχα δύο ζώνες προστασίας.

Το στοιχείο offset mho δεν μπορεί να ανιχνεύσει απευθείας την απώλεια διέγερσης. Αντιθέτως, ανιχνεύει την απώλεια διέγερσης έμμεσα, από τον υπολογισμό της φαινόμενης αντίστασης που αντιστοιχεί σε κατάσταση που η γεννήτρια απορροφά άεργο ισχύ. Η κατάσταση απορρόφησης άεργου ισχύος ισοδυναμεί με την τροχιά της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης να βρίσκεται

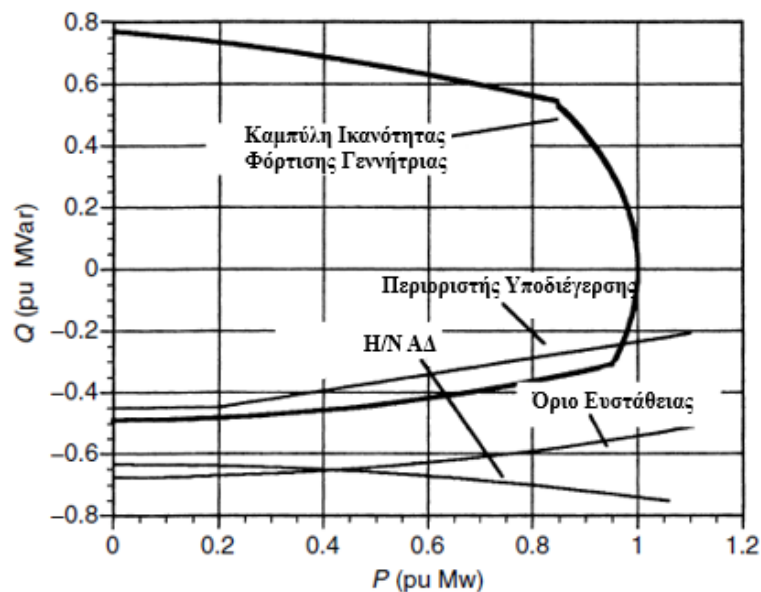
στο αρνητικό ημιεπίπεδο των αντιδράσεων ($-X$) στο μιγαδικό επίπεδο RX . Για το λόγο αυτό, οι δύο ζώνες του ηλεκτρονόμου βρίσκονται στο αρνητικό ημιεπίπεδο των αντιδράσεων.

Η συνήθης ρύθμιση του ηλεκτρονόμου offset mho είναι η εξωτερική ζώνη να έχει διάμετρο ίση με X_d και αρνητική μετατόπιση ίση με $0,5X'_d$, ενώ η εσωτερική ζώνη να έχει διάμετρο 1 pu (Σχ. 3.4) και την ίδια αρνητική μετατόπιση.



Σχήμα 3.4 Χαρακτηριστικές ηλεκτρονόμου απώλειας διέγερσης offset mho[2]

Οι χαρακτηριστικές του ηλεκτρονόμου απώλειας διέγερσης τύπου offset mho θα πρέπει να διαβαθμιστούν σε σχέση με την χαρακτηριστική του περιοριστή υποδιέγερσης της γεννήτριας. Η επιλογική ρύθμιση των χαρακτηριστικών αυτών φαίνεται στο διάγραμμα ικανότητας φόρτισης της γεννήτριας του Σχ. 3.5.

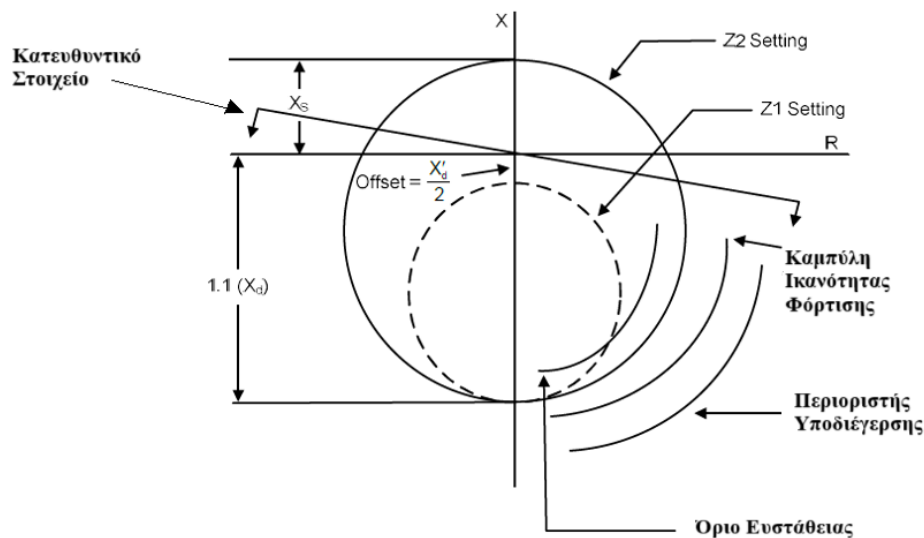


Σχήμα 3.5 Επιλογική συνεργασία ηλεκτρονόμου με περιοριστή υποδιέγερσης[2]

Η ρύθμιση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη τη δυναμική απόκριση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν ένας περιοριστής υποδιέγερσης ταχείας δράσης είναι μέρος ενός συστήματος διέγερσης υψηλής ταχύτητας απόκρισης, μπορεί να ενεργήσει γρήγορα αυξάνοντας τη διέγερση, ώστε να αποτρέψει την τροχιά να εισέλθει στη ζώνη του ηλεκτρονόμου κατά τη διάρκεια ταλαντώσεων ισχύος. Καθώς η διέγερση αυξάνεται, η τροχιά απομακρύνεται από τη ζώνη. Αντίθετα, πιο αργά συστήματα διέγερσης με στρεφόμενες διεγέρτριες και σχετικά αργούς περιοριστές, απομακρύνουν βραδύτερα την τροχιά και συχνά δεν μπορούν να αποτρέψουν την αποσύνδεση της γεννήτριας κατά τη εξέλιξη ταλαντώσεων ισχύος [1].

3.4.3 Ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης offset mho με στοιχείο κατεύθυνσης και υπότασης

Η εφαρμογή ηλεκτρονόμου απώλειας διέγερσης offset mho αφήνει μια περιοχή χωρίς επαρκή προστασία σε σχέση με το όριο ευστάθειας μόνιμης κατάστασης και το θερμικό όριο στα άκρα των τυλιγμάτων του στάτη. Για τη βελτίωση της προστασίας κατά τη λειτουργία της γεννήτριας σε συνθήκες υποδιέγερσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης offset mho με στοιχείο κατεύθυνσης και υπότασης.



Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστική offset mho με στοιχείο κατεύθυνσης και υπότασης[2]

Η χαρακτηριστική του ηλεκτρονόμου αυτού απεικονίζεται στο Σχ. 3.6. Το στοιχείο mho της δεύτερης ζώνης παρουσιάζει θετική μετατόπιση ίση με τη σύγχρονη αντίδραση της γεννήτριας X_s , δηλαδή εκτείνεται στα δύο ημιεπίπεδα αντιδράσεων.

Σε περίπτωση απώλειας διέγερσης, αν η γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ισχυρό δίκτυο, οι απαιτήσεις άεργου ισχύος μπορεί να καλυφθούν από τις υπόλοιπες γεννήτριες χωρίς καμία επίδραση στο επίπεδο τάσης. Αν όμως το δίκτυο είναι ασθενές, τότε ενδεχομένως να εμφανιστεί σημαντική πτώση τάσης με κίνδυνο κατάρρευσης. Για αυτό το λόγο υπάρχει επιπρόσθετα το στοιχείο υπότασης, ώστε να διακρίνεται ένα ισχυρό από ένα ασθενές δίκτυο. Στην περίπτωση που η τάση πέσει κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο για ορισμένο χρόνο, το στοιχείο υπότασης αποσυνδέει τη γεννήτρια που έχει το σφάλμα. Αν η πτώση τάσης δεν είναι

σημαντική και το στοιχείο υπότασης δεν έχει ενεργοποιηθεί, το σύστημα καλύπτει την άεργο ισχύ που χρειάζεται η γεννήτρια με το σφάλμα.

Ο ηλεκτρονόμος αναγνωρίζει ένα σφάλμα απώλειας διέγερσης όταν η τροχιά της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης περάσει κάτω από την χαρακτηριστική του στοιχείου κατεύθυνσης. Αν ταυτόχρονα η τροχιά της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης δεν έχει περάσει κάτω από το κατώφλι του στοιχείου κατεύθυνσης, αλλά βρεθεί εντός της χαρακτηριστικής του στοιχείου mho, ενεργοποιείται σήμανση alarm [1][2].

3.5 Προστασία σύγχρονων γεννητριών έναντι αποσυγχρονισμού

3.5.1 Θεώρηση συστήματος γεννήτριας – άπειρου ζυγού

Καθώς τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται κατά κύριο λόγο σε σύγχρονες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μια αναγκαία συνθήκη για την ομαλή λειτουργία του συστήματος είναι να παραμένουν όλες οι μηχανές σε συγχρονισμό. Αυτή η διάσταση της ευστάθειας επηρεάζεται από τη δυναμική συμπεριφορά των γωνιών των δρομέων.

Η κατανόηση του προβλήματος ευστάθειας γωνίας των σύγχρονων γεννητριών βασίζεται στο απλό ισοζύγιο ισχύος μεταξύ μίας σύγχρονης γεννήτριας και του «άπειρου ζυγού» (Σχ. 3.7). Η ισχύς που μεταφέρεται από τη γεννήτρια στον άπειρο ζυγό δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = \frac{E' E_B}{X_T} \sin \delta \quad (3.1)$$

όπου:

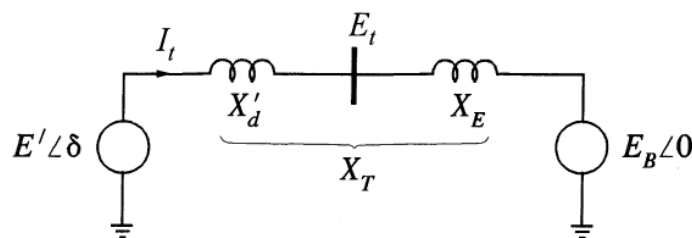
P_e : ηλεκτρική ισχύς που παράγει η γεννήτρια

E' : η τάση της γεννήτριας πίσω από την μεταβατική αντίδραση X'_d

E_B : η τάση του άπειρου ζυγού

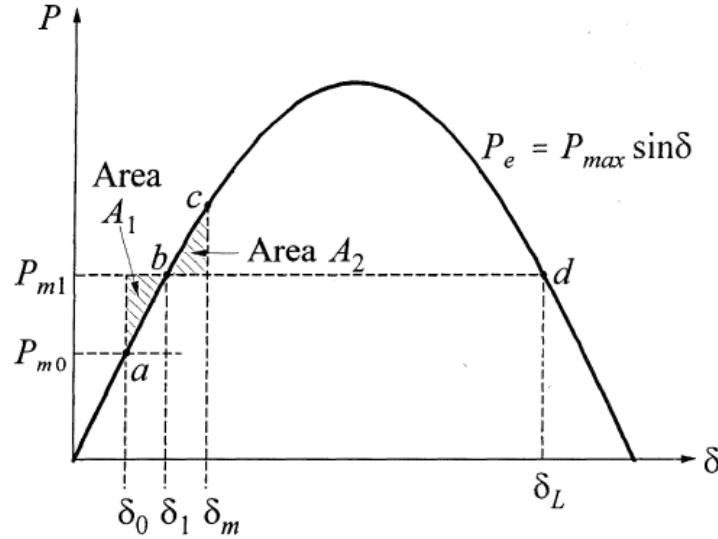
X_T : η ισοδύναμη σύνθετη αντίδραση μεταξύ των δύο πηγών τάσης

δ : η γωνία μεταξύ των δύο τάσεων.



Σχήμα 3.7 Μηχανή συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό[9]

Τα σημεία ισορροπίας του συστήματος καθορίζονται από την τομή της οριζόντιας γραμμής που αντιπροσωπεύει την μηχανική ισχύ εισόδου (P_m) της γεννήτριας και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (Σχ. 3.8). Έστω ότι η γεννήτρια λειτουργεί αρχικά στο ευσταθές σημείο ισορροπίας b . Μια διαταραχή στο σύστημα θα προκαλέσει μεταβολή της γωνίας δρομέα κατά μήκος της καμπύλης της ηλεκτρικής ισχύος. Το σημείο ισορροπίας είναι ευσταθές αν τα εμβαδά επιτάχυνσης (A_1) και επιβράδυνσης (A_2) είναι ίσα. Αν η γωνία δρομέα ξεπεράσει την τιμή του σημείου d , δεν υπάρχει μηχανισμός επιβράδυνσης και η γεννήτρια θα χάσει τον συγχρονισμό της [9][10].



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα γωνία δρομέα – ηλεκτρικής ισχύος[9]

3.5.2 Ανίχνευση ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων

Η ανίχνευση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων βασίζεται στην παρακολούθηση της σύνθετης αντίστασης που «βλέπει» η μηχανή από τους ακροδέκτες της. Έστω το σύστημα δύο μηχανών του Σχ. 3.9, στο οποίο εστιάζουμε στη μηχανή που συνδέεται στο αριστερό άκρο της γραμμής μεταφοράς.

Το ρεύμα που ρέει στη γραμμή μεταφοράς δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{I} = \frac{E_A \angle \delta - E_B \angle 0}{Z_T} \quad (3.2)$$

Η τάση που μετρά ο ηλεκτρονόμος στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας είναι ίση με:

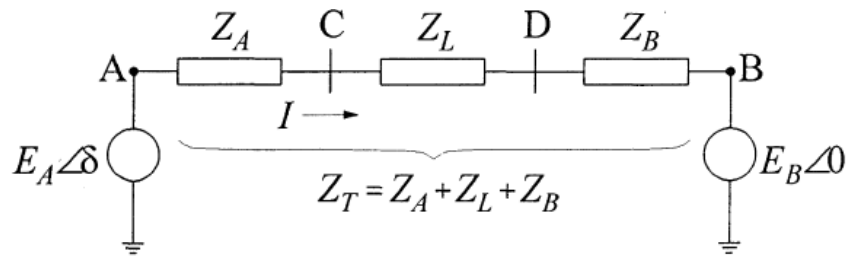
$$\hat{E}_C = \hat{E}_A - \hat{I} Z_A = E_A \angle \delta - \frac{E_A \angle \delta - E_B \angle 0}{Z_T} Z_A \quad (3.3)$$

Θέτοντας $n = E_A/E_B$ και $1 \angle \delta = \cos \delta + j \sin \delta$, η σύνθετη αντίσταση που υπολογίζει ο ηλεκτρονόμος είναι ίση με:

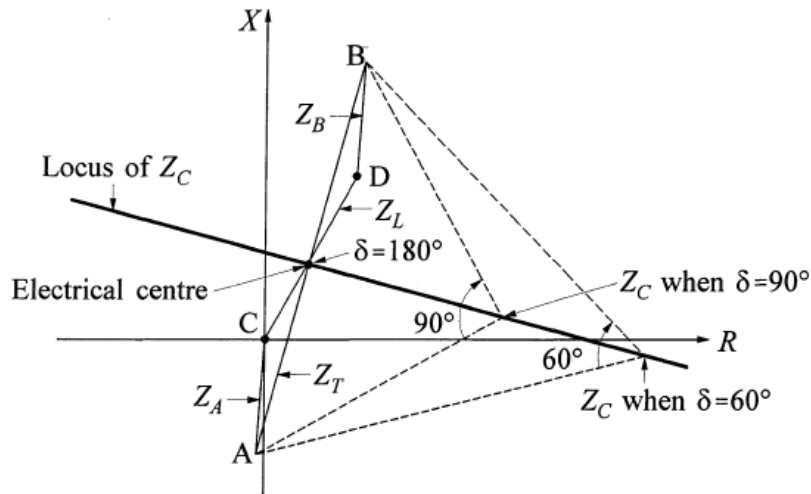
$$Z_C = \frac{\hat{E}_C}{\hat{I}} = -Z_A + Z_T \frac{E_A \angle \delta}{E_A \angle \delta - E_B \angle 0} \quad (3.4)$$

Στην ειδική περίπτωση που $E_A = E_B = 1 \text{ pu}$, η (3.4) γίνεται:

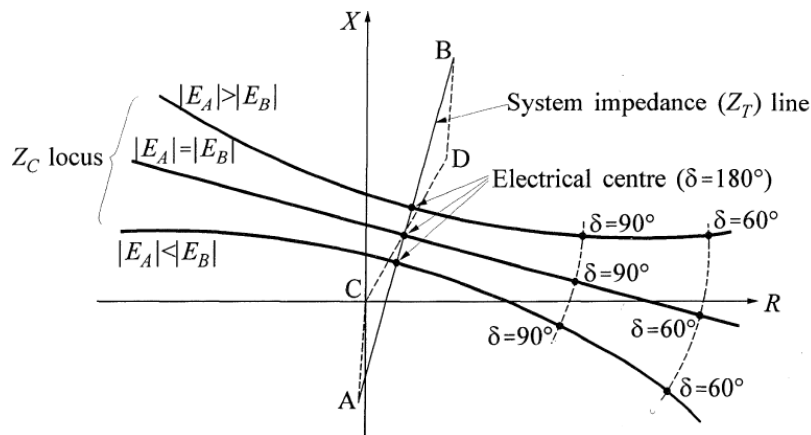
$$Z_C = -Z_A + \frac{Z_T}{1 \angle 0 - 1 \angle -\delta} = \left(\frac{Z_T}{2} - Z_A \right) - j \left(\frac{Z_T}{2} \cot \frac{\delta}{2} \right) \quad (3.5)$$



Σχήμα 3.9 Σύστημα δύο μηχανών[9]



Σχήμα 3.10 Γεωμετρικός τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης Z_C για $E_A = E_B$ [9]



Σχήμα 3.11 Γεωμετρικός τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης Z_C για $E_A \neq E_B$ [9]

Στο Σχ. 3.10 απεικονίζεται ο γεωμετρικός τόπος της φαινόμενης σύνθετης αντίστασης Z_C ως συνάρτηση της γωνίας δ για $E_A = E_B$. Ο γεωμετρικός τόπος είναι μια ευθεία γραμμή που διχοτομεί κάθετα το τμήμα AB. Το τμήμα αυτό αντιπροσωπεύει τη συνολική σύνθετη αντίσταση Z_T μεταξύ των δύο γεννητριών. Η αρχή των αξόνων του διαγράμματος τοποθετείται στη θέση του ηλεκτρονόμου αποσυγχρονισμού (σημείο C). Για γωνία $\delta = 0$, το ρεύμα I είναι μηδενικό και η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση Z_C απειρίζεται. Για γωνία $\delta = 180^\circ$, η τάση στο ηλεκτρικό κέντρο είναι μηδενική. Αν η τάση E_A διαφέρει της E_B , η φαινόμενη σύνθετη αντίσταση σχηματίζει κύκλους με το κέντρο τους πάνω στο τμήμα AB (Σχ. 3.11).

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΑΠΩΛΕΙΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Η απώλεια διέγερσης αποτελεί μια από τις πιο κρίσιμες διαταραχές λειτουργίας στις σύγχρονες γεννήτριες, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3. Η ανάγκη για ταχεία και αξιόπιστη ανίχνευση τέτοιων καταστάσεων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη αρκετών μεθόδων. Στην παρούσα εργασία προτείνεται μια μέθοδος, η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση τριών ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της μηχανής [3]. Η μέθοδος δοκιμάζεται με τη βοήθεια προσομοιώσεων στο EMTP σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνει μία σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό. Γίνεται επίσης σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μεθόδου και αυτών της επικρατέστερης σήμερα μεθόδου που χρησιμοποιεί τον ηλεκτρονόμο απώλειας διέγερσης offset mho.

4.2 Περιγραφή προτεινόμενης μεθόδου προστασίας απώλειας διέγερσης

Μετά από την εμφάνιση ενός σφάλματος απώλειας διέγερσης σε μια σύγχρονη γεννήτρια, τα κύρια ηλεκτρικά μεγέθη της αποκλίνουν από τις αντίστοιχες τιμές στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Η τάση ακροδεκτών, η άεργος ισχύς και η μαγνητική ροή μειώνονται, το παραγόμενο ρεύμα και η ενεργός ισχύς μεταβάλλονται, ενώ η γωνία δρομέα αυξάνεται.

Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία αυτή για την ανίχνευση του σφάλματος απώλειας διέγερσης παρακολουθεί ταυτόχρονα τρία από τα χαρακτηριστικά μεγέθη της μηχανής:

- Την άεργο ισχύ (Q)
- Τη μαγνητική ροή ανά δευτερόλεπτο του στάτη (ψ)
- Τη γωνία δρομέα (δ)

Κατά τη διάρκεια της απώλειας διέγερσης, η άεργος ισχύς της μηχανής και η ροή διακένου ψ μειώνονται συνεχώς. Αντίθετα, η γωνία δρομέα δ αυξάνεται. Η λογική της μεθόδου είναι να παρακολουθούνται τα τρία αυτά μεγέθη και αν παρατηρηθεί ότι πληρούνται ταυτόχρονα τα τρία προαναφερόμενα κριτήρια για χρόνο που καθορίζεται από τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις της γεννήτριας, δηλαδή ταυτόχρονα υπάρχει μείωση της άεργου ισχύος και της ροής διακένου στη μηχανή, ενώ παράλληλα συμβαίνει αύξηση της γωνίας δρομέα, να ανιχνεύεται το σφάλμα απώλειας διέγερσης.

Δεδομένου ότι απαιτείται η παρακολούθηση της μεταβολής των μεταβλητών Q , ψ , δ σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, αυτό γίνεται από διαδοχικά δείγματα που λαμβάνονται από το μέγεθος ενδιαφέροντος $X(Q, \psi, \delta)$ όπως φαίνεται παρακάτω:

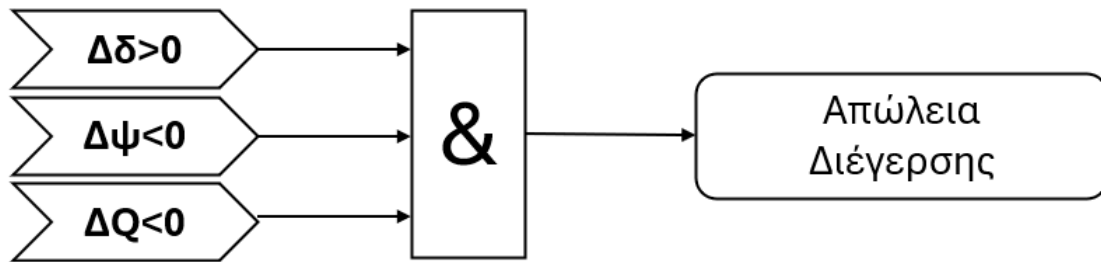
$$\Delta X^{(t)} = \frac{X^{(t)} - X^{(t-\Delta t)}}{X_b} \quad (4.1)$$

όπου X_b είναι η βασική τιμή της μεταβλητής X για κανονικοποίηση.

Σημειώνεται ότι η άεργος ισχύς της μηχανής μπορεί εύκολα να μετρηθεί από την τάση και το ρεύμα στην έξοδο. Η ροή διακένου δεν μετριέται εύκολα. Για τη μέτρησή της πρέπει να χρησιμοποιηθούν αισθητήρια όργανα που εγκαθίστανται στο στάτη της μηχανής. Η κανονικοποιημένη γωνία δ μετριέται έμμεσα από τη μέτρηση της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ω της μηχανής:

$$\Delta\delta^{(t)} = \left(\frac{\omega^{(t)} - \omega_o}{\delta_o}\right)\Delta t \quad (4.2)$$

όπου ω_o η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και δ_o η γωνία δρομέα στο αρχικό σημείο λειτουργίας της μηχανής.



Σχήμα 4.1 Λογική ανίχνευσης απώλειας διέγερσης

Για την αποφυγή λανθασμένων ανιχνεύσεων απώλειας διέγερσης, ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη χρονική καθυστέρηση T_{set} που θα οριστεί. Η σκόπιμη χρονική καθυστέρηση T_{set} είναι αναγκαία διότι σε συνθήκες άλλων διαταραχών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως για παράδειγμα στις ευσταθείς ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις, οι μεταβολές στην άεργο ισχύ Q , στην ροή διακένου ψ και στη γωνία δ μίας σύγχρονης μηχανής, ενδέχεται να οδηγήσουν σε εσφαλμένη ανίχνευση απώλειας διέγερσης.

Η χρήση καθυστέρησης επιτρέπει στην προτεινόμενη μέθοδο να διακρίνει φαινόμενα ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο σύστημα, αφού ορίζεται σε χρόνο που ξεπερνά το χρόνο εμφάνισης τέτοιων ταλαντώσεων. Η ελάχιστη απαιτούμενη καθυστέρηση προκύπτει από την ανάλυση ρυθμών του εκάστοτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην απλούστερη περίπτωση που μία σύγχρονη γεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε άπειρο ζυγό τάσης $\hat{E}_B = E_B \angle 0$ (Σχ. 4.2), ο χρόνος αυτός προσδιορίζεται ως εξής. Υποθέτουμε ότι το μέτρο της εσωτερικής τάσης E' της γεννήτριας παραμένει σταθερό. Με την παραδοχή αυτή, η ενεργός ισχύς που η γεννήτρια παρέχει στο σύστημα δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_T} \sin\delta \quad (4.3)$$

όπου δ η γωνία δρομέα της γεννήτριας.

Η γραμμικοποίηση της παραπάνω εξίσωσης δίνει τον συντελεστή συγχρονισμού K του συστήματος γεννήτριας – άπειρου ζυγού:

$$\Delta P_e = K\Delta\delta \quad (4.4)$$

$$K = \frac{E'E_B}{X_T} \cos \delta_0 \quad (4.5)$$

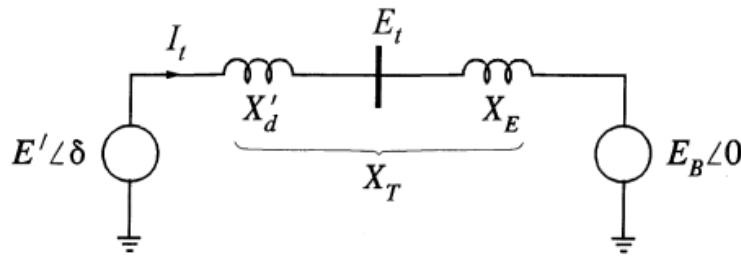
όπου δ_0 η γωνία δρομέα προ της διαταραχής.

Αν αμεληθούν οι απώλειες και θεωρώντας ότι η γεννήτρια δεν απομακρύνεται σημαντικά από τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής, η ενεργός ηλεκτρική ισχύς P_e που αποδίδει η γεννήτρια ισούται με την αναπτυσσόμενη ηλεκτρομαγνητική ροπή T_e στο ανά μονάδα σύστημα.

Αν ΔP_e είναι η μεταβολή της ισχύος γύρω από ένα σημείο λειτουργίας και ΔP_m μια μεταβολή της μηχανικής ισχύος την οποία παρέχει η κινητήρια μηχανή, η εξίσωση επιτάχυνσης του δρομέα είναι:

$$2H \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e \quad (4.6)$$

όπου H η ανηγμένη χρονική σταθερά αδράνειας της γεννήτριας και $\Delta\omega$ η ποσοστιαία ανά μονάδα απόκλιση από τη σύγχρονη γωνιακή ταχύτητα.



Σχήμα 4.2 Μονογραμμικό γεννήτριας – άπειρου ζυγού[9]

Σύμφωνα λοιπόν με την εξίσωση επιτάχυνσης του δρομέα, όταν διαταράσσεται το ισοζύγιο ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος, η μηχανή είτε επιταχύνεται είτε επιβραδύνεται με συνέπεια να αποκλίνει από τη σύγχρονη ταχύτητα κατά $\Delta\omega$. Η μεταβολή της γωνίας του δρομέα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega \quad (4.7)$$

όπου ω_0 η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής του δρομέα.

Το σύστημα διαφορικών εξισώσεων (4.6) και (4.7) είναι δεύτερης τάξης με μεταβλητές κατάστασης τη μεταβολή της γωνίας δρομέα $\Delta\delta$ και τη μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής $\Delta\omega$.

Συνθέτοντας τις παραπάνω εξισώσεις, προκύπτει η διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού που ονομάζεται εξίσωση ταλάντωσης σύγχρονης μηχανής χωρίς απόσβεση:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \Delta P_e = \Delta P_m \quad (4.8)$$

Αν υποθεθεί ότι η ισχύς που παρέχεται από το στρόβιλο στη γεννήτρια παραμένει σταθερή ($\Delta P_m = 0$) και αντικαταστήσουμε την ηλεκτρική ισχύ ΔP_e συναρτήσεως του συντελεστή συγχρονισμού K στην εξίσωση ταλάντωσης, παίρνουμε τη διαφορική εξίσωση ενός αρμονικού ταλαντωτή ως προς τη γωνία $\Delta\delta$:

$$2H \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \omega_0 K \Delta \delta = 0 \quad (4.9)$$

Η συχνότητα ταλάντωσης δίνεται από την:

$$f_{sw} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_0 K}{2H}} \quad (4.10)$$

Από την (4.10) βρίσκουμε την περίοδο των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων:

$$T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}} \quad (4.11)$$

Ο χρόνος ρύθμισης T_{set} προκύπτει από το μισό της περιόδου των αναμενόμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων συνυπολογίζοντας μία προσαύξηση ασφαλείας 10%:

$$T_{set} = 1,1 \times \frac{1}{2} \times T_{sw} \quad (4.12)$$

Λαμβάνεται υπόψη το μισό της περιόδου γιατί αυτός είναι ο μέγιστος χρόνος που η γωνία δρομέα μεταβάλλεται μονότονα στη διάρκεια μίας περιόδου.

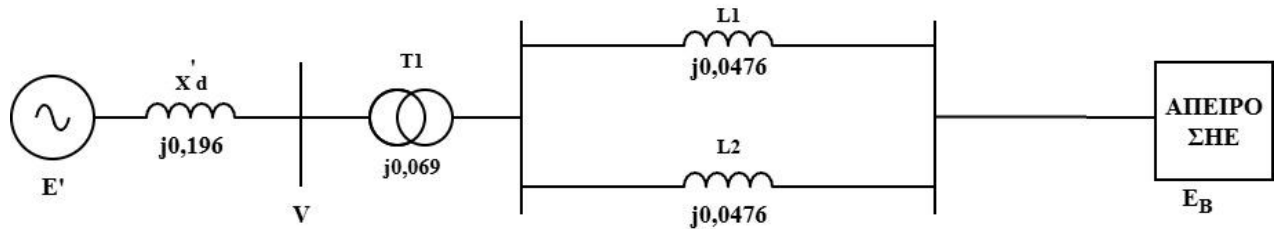
Σε ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετικές αναμενόμενες συχνότητες ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων, ο χρόνος T_{set}^{max} προσδιορίζεται βάσει της ελάχιστης αναμενόμενης συχνότητας ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (f_{sw}^{min}):

$$T_{set}^{max} = 1,1 \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{f_{sw}^{min}} \quad (4.13)$$

4.3 Εφαρμογή σε μικρό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

4.3.1 Περιγραφή

Το υπό εξέταση σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται στο Σχ. 4.1. Αποτελείται από μια σύγχρονη γεννήτρια (G), η οποία συνδέεται μέσω μετασχηματιστή ανύψωσης (T1) και δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς (L1 και L2) μήκους 100 χιλιομέτρων η κάθε μία, σε άπειρο ζυγό. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρατίθενται στο Παράρτημα Α.



Σχήμα 4.3 Εξεταζόμενο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου προστασίας έναντι απώλειας διέγερσης, εξετάζεται η περίπτωση βραχυκυκλώματος στο κύκλωμα του συστήματος διέγερσης της γεννήτριας που μηδενίζει πλήρως την τάση διέγερσης. Το σενάριο αυτό προσομοιώνεται θεωρώντας τις επτά διαφορετικές προστατευτικές φορτίσεις της μονάδας που απεικονίζονται στον Πίν. 4.1. Η απώλεια διέγερσης συμβαίνει πάντα τη χρονική στιγμή $t = 1$ s.

Πίνακας 4.1 Προσφαλματική φόρτιση της γεννήτριας

Σενάριο		1	2	3	4	5	6	7
Φόρτιση	P (pu)	0,90	0,550	0,23	0,41	0,47	0,49	0,52
	Q (pu)	0,25	0,187	0,10	0	-0,22	-0,32	-0,44

Η συχνότητα ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων f_{sw} για το σύστημα αυτό (αμελώντας την επίδραση του αυτόματου ρυθμιστή τάση και στροφών) και για την προσφαλματική φόρτιση 1 προκύπτει σύμφωνα με τους παρακάτω υπολογισμούς (βάση ισχύος $S_B = 104,4$ MVA):

$$\text{Μετασχηματιστής Ανύψωσης: } X_{M\Sigma} = X_{M\Sigma,old} \times \frac{S_B}{S_{M\Sigma}} = 0,065 \times \frac{104,4}{97} = 0,069 \text{ pu}$$

$$\text{Άπειρο ΣΗΕ: } Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(67kV)^2}{104,4MVA} = 42,99 \Omega$$

$$X_{\Sigma HE} = \frac{0,081}{42,99} = 0,001885 \text{ pu}$$

$$\text{Γραμμή μεταφοράς: } X = 0,041 \frac{\Omega}{km} = 0,041 \times 100 = 4,1 \Omega$$

Επειδή έχουμε 2 γραμμές ίδιες και παράλληλες $4,1/2 = 2,05 \Omega$

$$X_{GM} = \frac{X}{Z_B} = \frac{2,05}{42,99} = 0,0476 \text{ pu}$$

$$X_{ΟΛΙΚΟ} = X'_d + X_{M\Sigma} + X_{\Sigma HE} + X_{GM} = 1,59 \text{ pu}$$

$$\text{Ρεύμα Στάτη: } \hat{I} = \frac{P - jQ}{\hat{V}^*} = \frac{0,9 - j0,25}{1 \angle 26,6} = 0,6928 - j0,6265 \text{ pu}$$

$$\text{ΗΕΔ πίσω από } X'_d: \hat{E}' = \hat{V} + jX'_d \hat{I} = (1 \angle -26,6) + j(0,196)(0,6928 - j0,6265) \Leftrightarrow \hat{E}' = 1,0168 - j0,3122 = 1,0637 \angle -17,05 \text{ pu}$$

$$\text{Γωνία δρομέα: } \delta_o = \angle \hat{E}' - \angle \hat{E}_B = -17,05^\circ$$

$$\text{Συντελεστής συγχρονισμού: } K_s = \frac{E' E_B}{X_{ΟΛΙΚΟ}} \cos \delta_o = 3,25 \text{ pu}$$

$$\text{Φυσική συχνότητα ταλάντωσης: } \omega_n = \sqrt{\frac{K_s \omega_o}{2H}} = \sqrt{\frac{3,25 \times 2\pi f}{6,18}} = 14,064 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$f_{sw} = \frac{\omega_n}{2\pi} = 2,238 \text{ Hz} \quad \text{και} \quad T_{sw} = \frac{1}{f_{sw}} = 0,4468 \text{ s}$$

Πίνακας 4.2 Συχνότητα και περίοδος ανά φόρτιση

P(pu)	Q(pu)	f_{sw} (Hz)	T_{sw} (s)
0,9	0,25	2,238	0,446
0,55	0,187	3,573	0,279
0,23	0,1	3,494	0,286
0,41	0	3,481	0,287
0,47	-0,22	3,423	0,292
0,49	-0,32	3,393	0,294
0,52	-0,44	3,365	0,297

Σύμφωνα με την (4.12), ο χρόνος καθυστέρησης της προτεινόμενης μεθόδου προστασίας απώλειας διέγερσης προκύπτει ίσος με:

$$T_{set} \geq 1,1 \times 0,5 \times T_{sw} = 0,246 \text{ s}$$

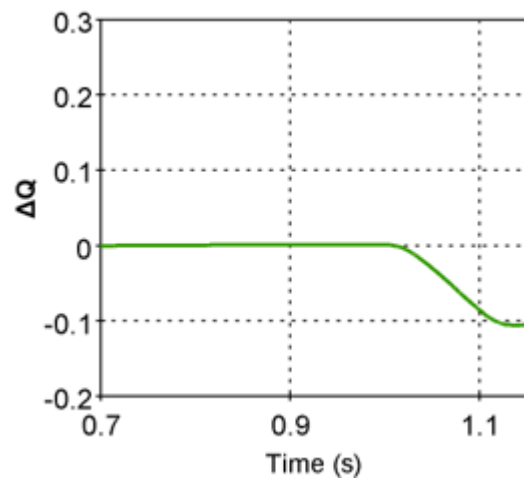
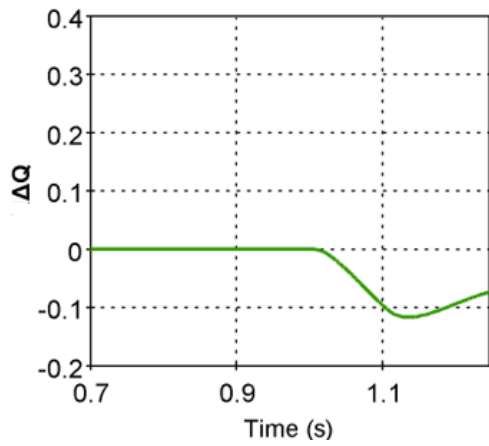
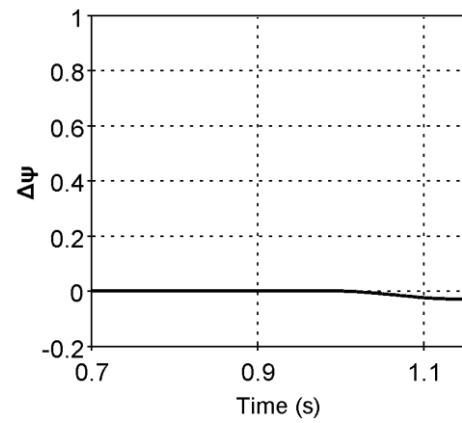
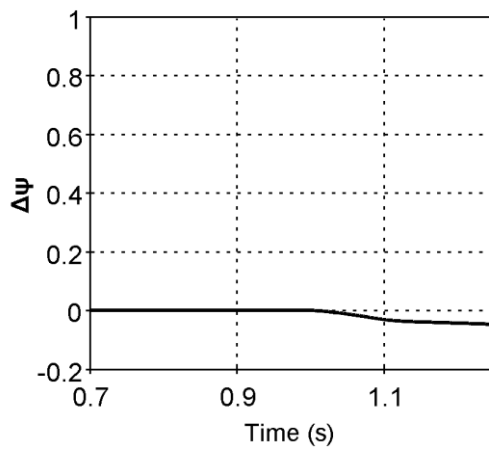
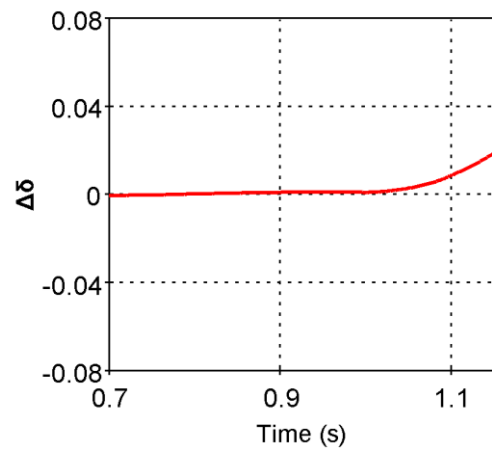
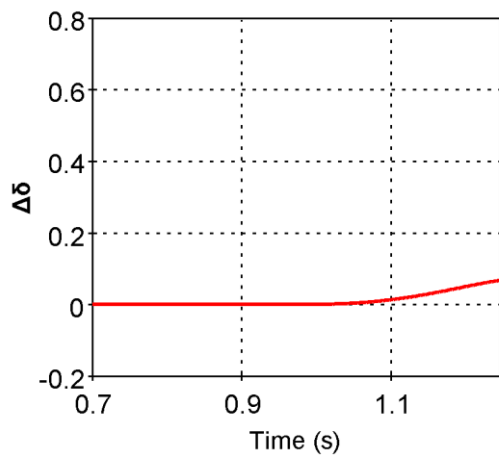
4.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων προτεινόμενης μεθόδου

Στον Πίνακα 4.2 φαίνεται συγκεντρωτικά ο χρόνος ανίχνευσης του σφάλματος απώλειας διέγερσης. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται αποκλειστικά από το χρόνο T_{set} δεδομένου ότι τα κριτήρια απώλειας διέγερσης ήδη πληρούνται στη λήξη αυτού του χρόνου. Παρακάτω δείχνονται αναλυτικά οι γραφικές παραστάσεις όλων των σεναρίων.

Πίνακας 4.3 Συνολικά αποτελέσματα

Σενάριο	Φόρτιση		T_{set}
	P(pu)	Q(pu)	
1	0,9	0,25	0,246
2	0,55	0,187	0,153
3	0,23	0,1	0,157
4	0,41	0	0,157
5	0,47	-0,22	0,160
6	0,49	-0,32	0,161
7	0,52	-0,44	0,163

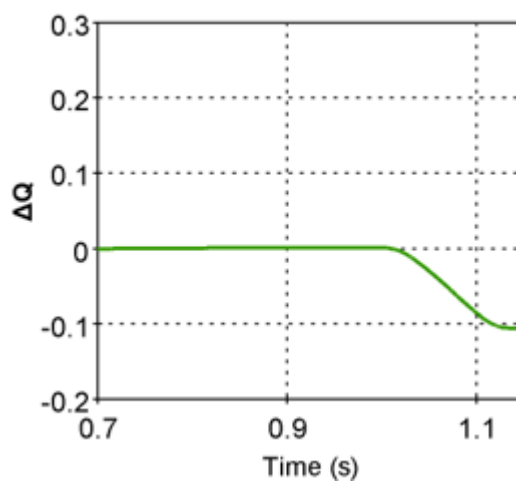
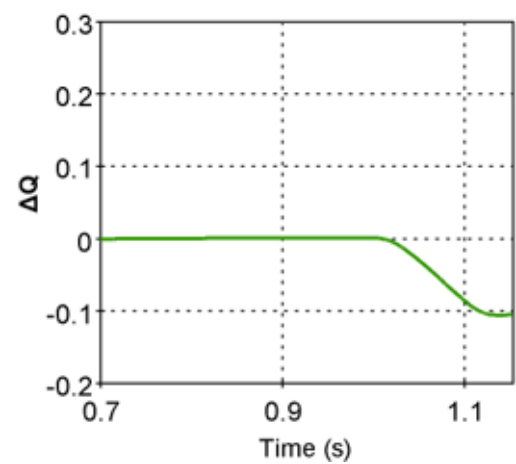
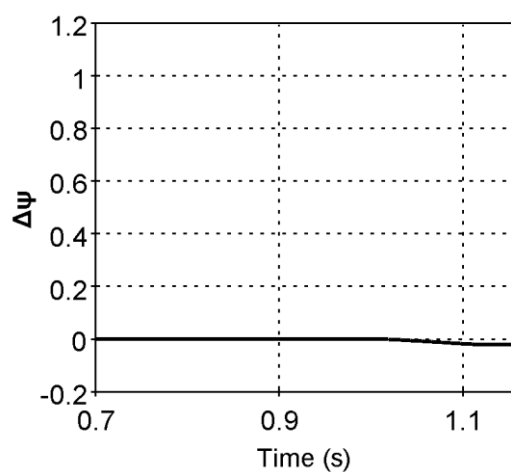
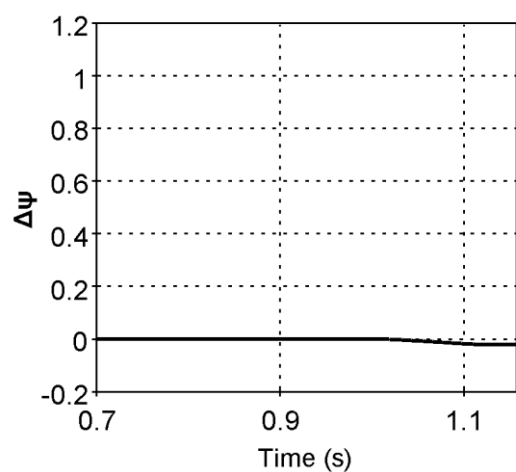
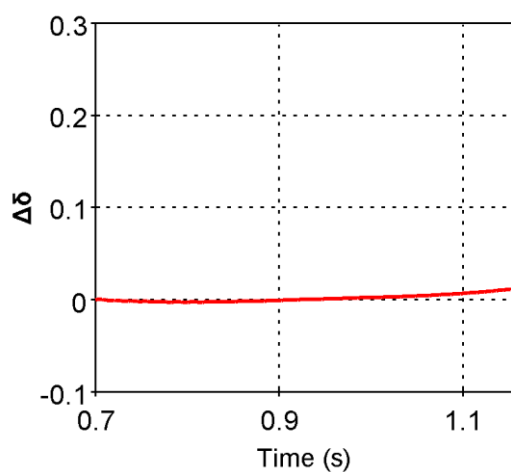
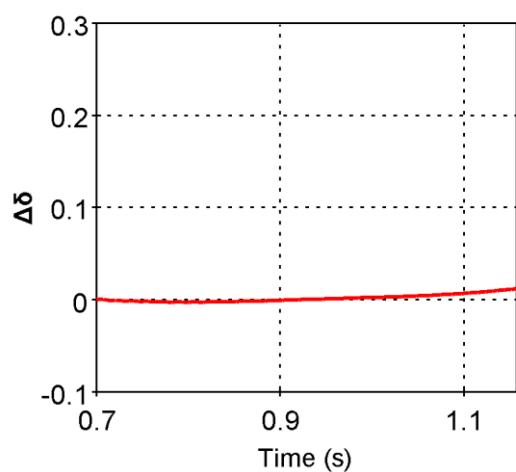
Στο Σχ. 4.4 απεικονίζονται οι μεταβολές των μεγεθών που παρακολουθεί η προτεινόμενη μέθοδος σε κάθε σενάριο προσφαλματική φόρτισης για την ανίχνευση της απώλειας διέγερσης, δηλαδή οι μεταβολές $\Delta\delta$, $\Delta\psi$ και ΔQ μέχρι τη στιγμή ανίχνευσης της απώλειας διέγερσης.



(α) Σενάριο 1 ($0,9 + j0,25 pu$)

(β) Σενάριο 2 ($0,55 + j0,187 pu$)

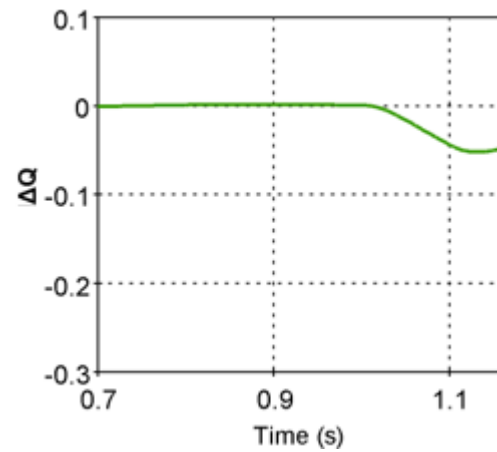
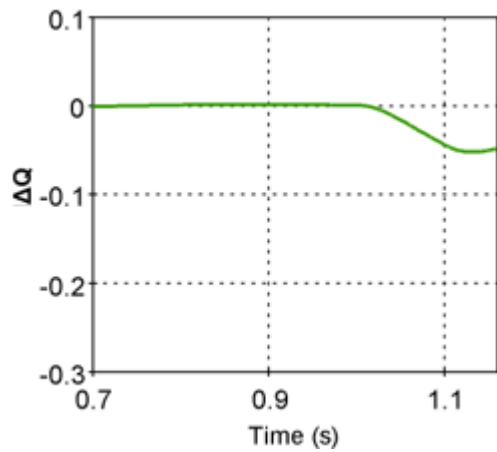
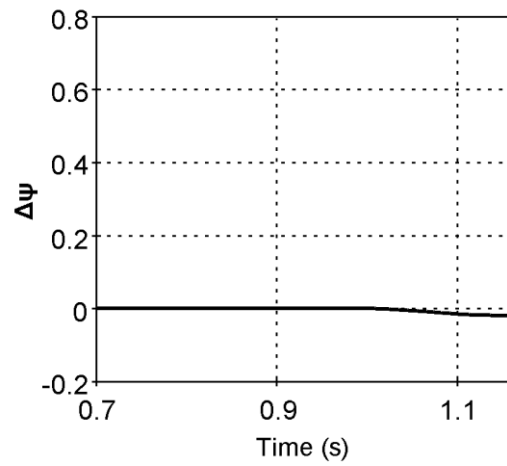
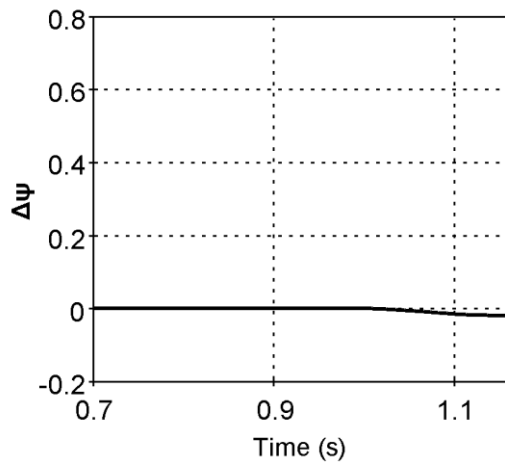
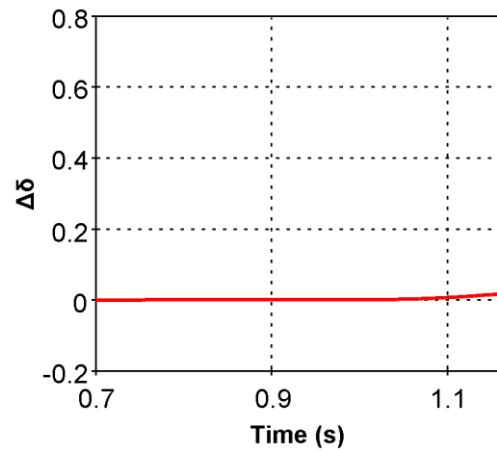
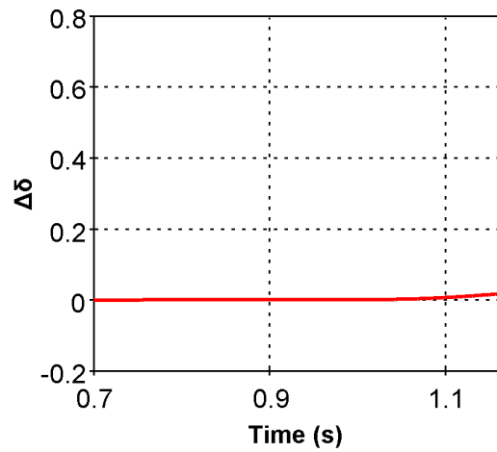
Σχήμα 4.4.ι Μεταβολές παρακολουθούμενων μεγεθών της προτεινόμενης μεθόδου
(Σενάρια προσφαλματικής φόρτισης γεννήτριας 1 και 2)



(γ) Σενάριο 3 ($0,23 + j0,1 pu$)

(δ) Σενάριο 4 ($0,41 pu$)

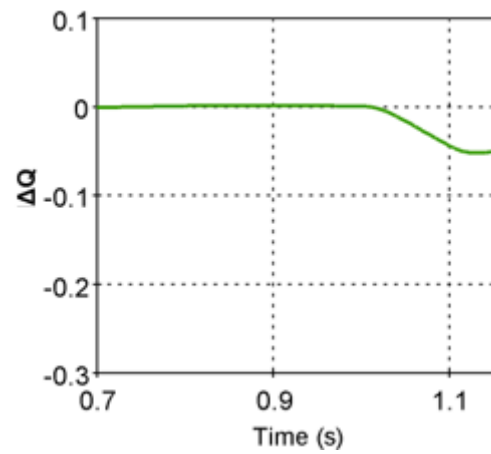
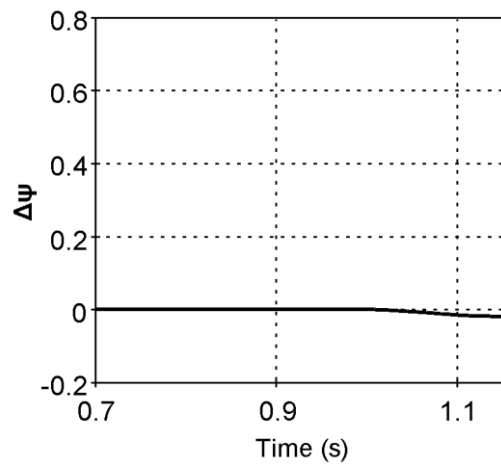
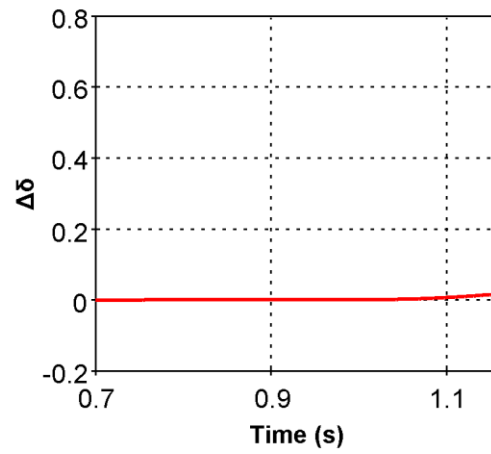
Σχήμα 4.4.ii Μεταβολές παρακολουθούμενων μεγεθών της προτεινόμενης μεθόδου
(Σενάρια προστατευτικής φόρτισης γεννήτριας 3 και 4)



(ε) Σενάριο 5 ($0,47 - j0,22 pu$)

(στ) Σενάριο 6 ($0,49 - j0,32 pu$)

Σχήμα 4.4.iii Μεταβολές παρακολουθούμενων μεγεθών της προτεινόμενης μεθόδου
(Σενάρια προσφαλματικής φόρτισης γεννήτριας 5 και 6)



(ζ) Σενάριο 7 ($0,52 - j0,44$ pu)

Σχήμα 4.4.iv Μεταβολές παρακολουθούμενων μεγεθών της προτεινόμενης μεθόδου
(Σενάριο προσφαλματικής φόρτισης γεννήτριας 7)

4.3.3 Αποτελέσματα προσομοιώσεων με χρήση συμβατικού ηλεκτρονόμου offset mho

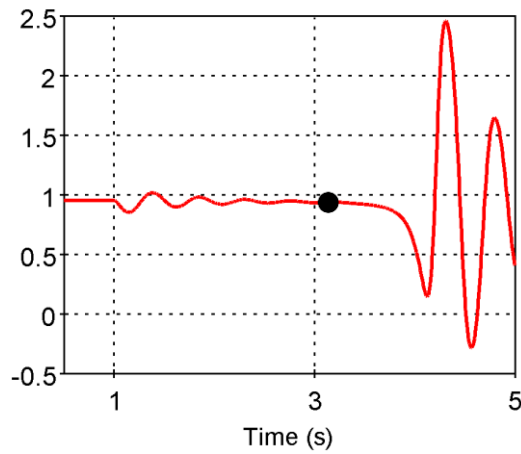
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του ίδιου σφάλματος απώλειας διέγερσης στη γεννήτρια του συστήματος του Σχ. 4.3, θεωρώντας ότι η γεννήτρια προστατεύεται έναντι αυτού του σφάλματος από τον συμβατικό ηλεκτρονόμο τύπου offset mho δύο ζωνών. Οι ρυθμίσεις των ζωνών ελήφθησαν ίσες με τις τυπικές ρυθμίσεις που περιγράφονται στην Ενότητα 3.4.2.

Για λόγους σύγκρισης με την προτεινόμενη μέθοδο προστασίας έναντι απώλειας διέγερσης, εξετάστηκαν πάλι τα ίδια (επτά) σενάρια προσφαλματικής φόρτισης της γεννήτριας που φαίνονται στον Πίν. 4.1. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα από δύο μόνο σενάρια από τα επτά:

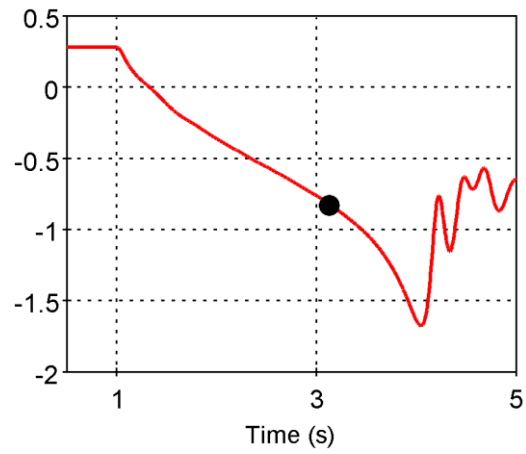
- Για το Σενάριο 1, που αντιστοιχεί σε υψηλή αρχική επαγωγική φόρτιση της γεννήτριας
- Για το Σενάριο 3, που αντιστοιχεί σε χαμηλή αρχική επαγωγική φόρτιση της γεννήτριας

Τα αποτελέσματα από τα υπόλοιπα πέντε σενάρια προσφαλματικής φόρτισης της μονάδας παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

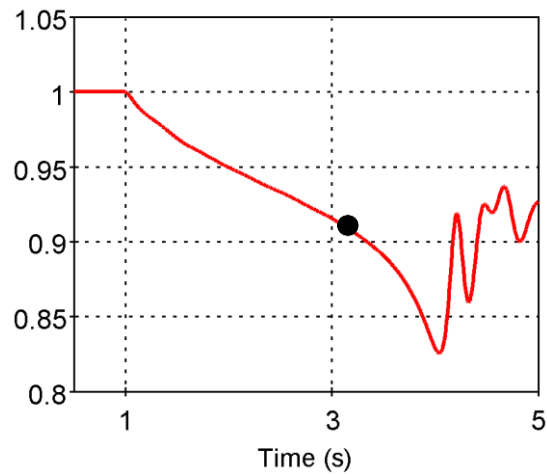
Για κάθε προσομοίωση παρατίθενται στα Σχ. 4.5 και 4.6, οι χρονικές διακυμάνσεις της ενεργού και άεργου ισχύος, της τερματικής τάσης, του ρεύματος, της ροής διακένου και της γωνίας δρομέα της γεννήτριας για το Σενάριο 1 και 3 αντίστοιχα. Η προσομοίωση δεν σταματά τη χρονική στιγμή που ο ηλεκτρονόμος δίνει εντολή ανοίγματος του διακόπτη ισχύος προκειμένου να φανεί η εξέλιξη του φαινομένου που συνήθως είναι ο αποσυγχρονισμός. Ο χρόνος trip ωστόσο σημειώνεται με «τελεία» στα σχήματα.



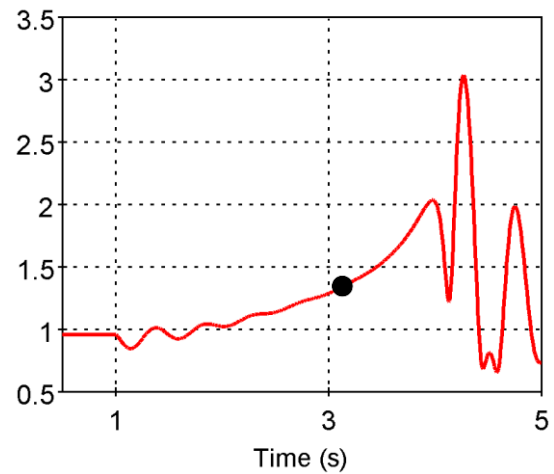
(α) Εννεργός ισχύς P



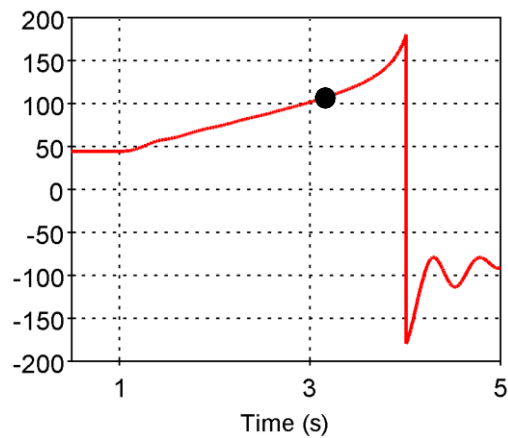
(β) Άεργος ισχύς Q



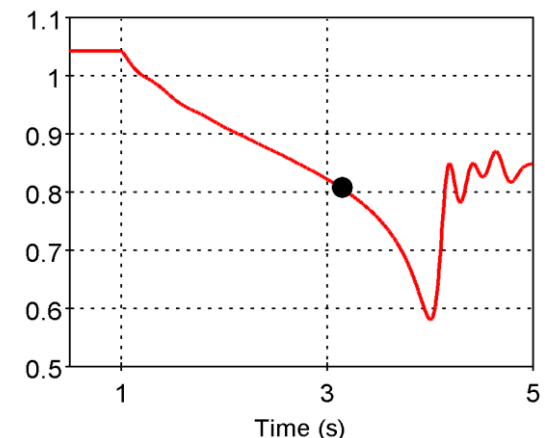
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

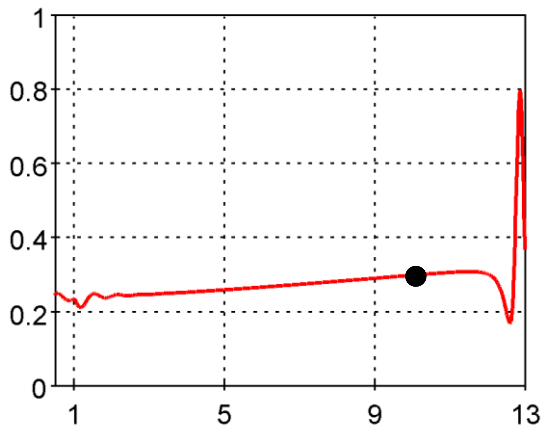


(ε) Γωνία δρομέα δ

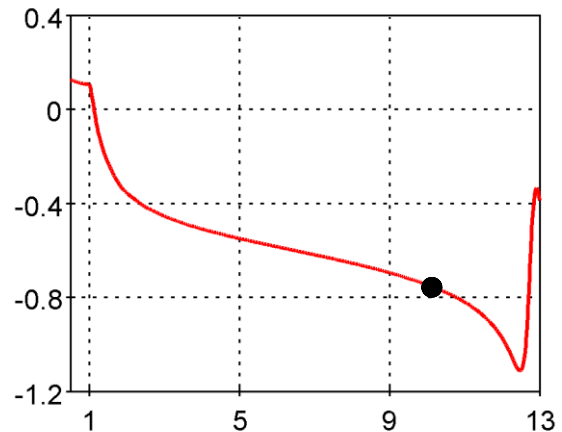


(στ) Ροή διακένου ψ

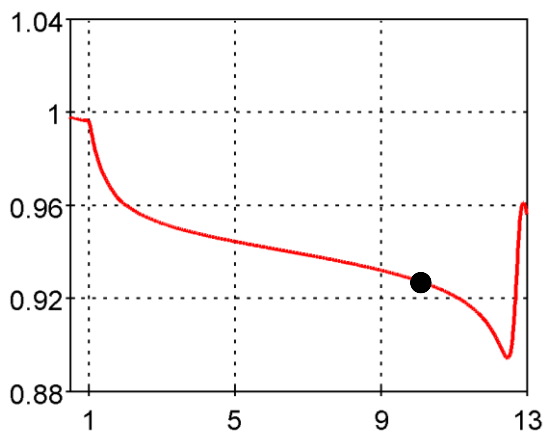
Σχήμα 4.5 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απόλεια διέγερσης (Σενάριο 1: $0.9 + j0.25 pu$)



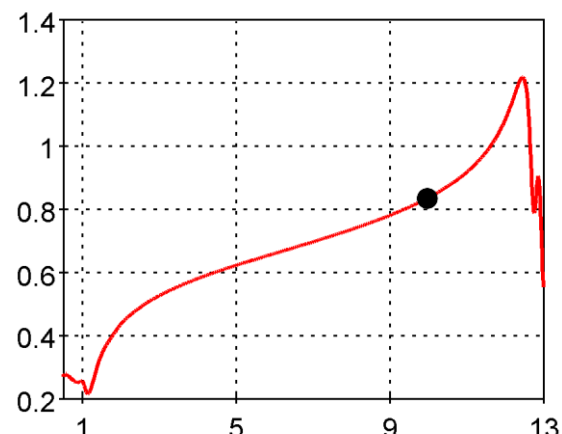
(α) Ενεργός ισχύς P



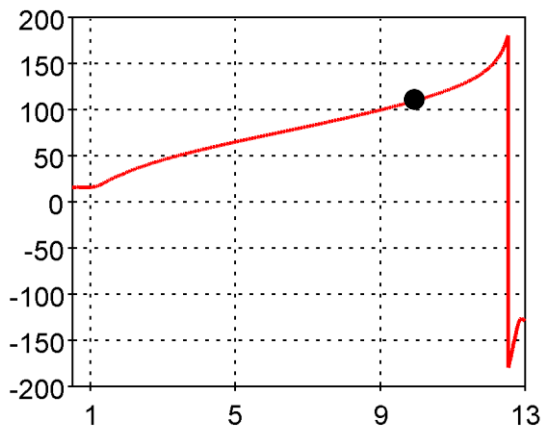
(β) Λεργός ισχύς Q



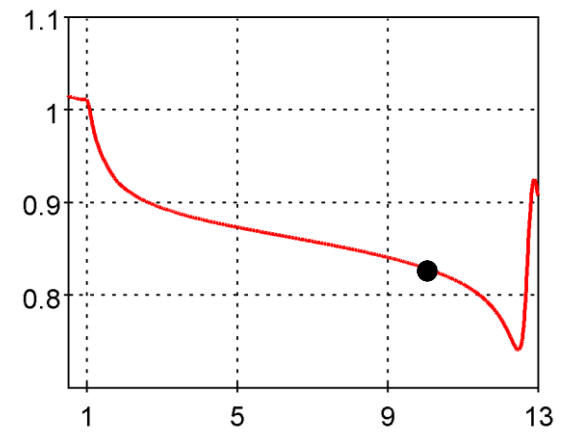
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I



(ε) Γωνία δρομέα δ

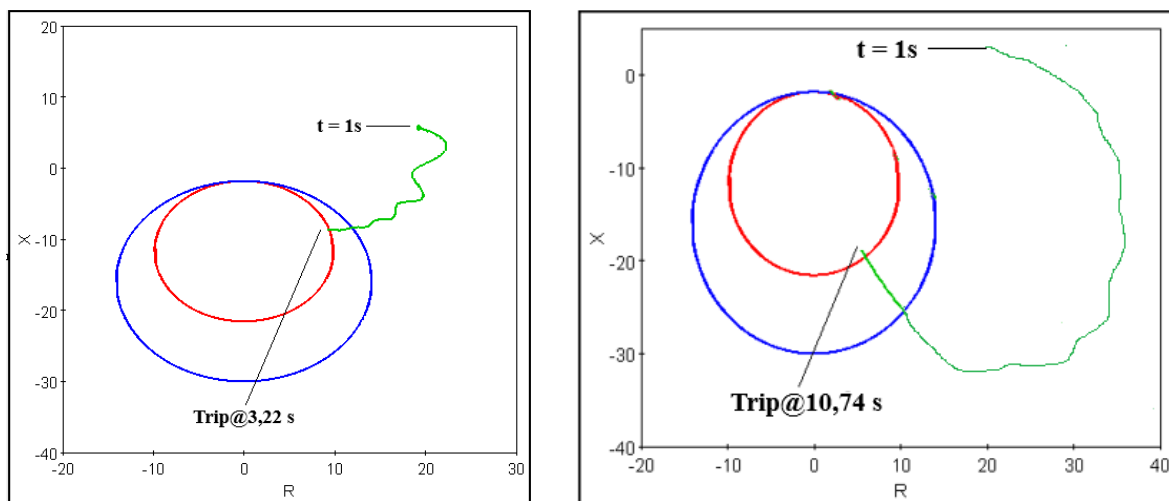


(στ) Ροή διακένου ψ

Σχήμα 4.6 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 3: $0,23 + j0,10$)

Στο σενάριο 1, λόγω της υψηλής φόρτισης της γεννήτριας, η τροχιά της σύνθετης αντίστασης που βλέπει ο ηλεκτρονόμος εισέρχεται εντός των ζωνών προστασίας γρηγορότερα από ότι στην περίπτωση του σεναρίου 3. Στο σενάριο 1, ο ηλεκτρονόμος απώλειας διέγερσης δίνει εντολή ανοίγματος διακόπτη (trip) μετά από 2,22 s από τη διαταραχή (Σχ. 4.7i), ενώ στο σενάριο 3 η εντολή δίνεται μετά από 9,74 s.

Οι χρόνοι πτώσης (trip) του διακόπτη ισχύος, που εξαρτώνται από την αρχική φόρτιση της γεννήτριας είναι αρκετά μεγάλοι, τόσο για την γεννήτρια όσο και για το υπόλοιπο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στον Πίν. 4.3 φαίνονται οι χρόνοι trip για όλα τα σενάρια (1-7). Σε σχέση με τον χρόνο που δίνεται η εντολή trip του διακόπτη ισχύος από την προτεινόμενη μέθοδος προστασίας απώλειας διέγερσης (Πίν. 4.2), οι χρόνοι του συμβατικού ηλεκτρονόμου είναι πολύ μεγαλύτεροι.



Σχήμα 4.7 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 1: $0,9 + j0,25$, Σενάριο 3: $0,23 + j0,10$)

Πίνακας 4.4 Συνολικά αποτελέσματα με χρήση ηλεκτρονόμου offset mho

Σενάριο	Φόρτιση		Χρόνος Trip
	P(pu)	Q(pu)	Συμβατική Μέθοδος
1	0,9	0,25	2,22
2	0,55	0,187	4,12
3	0,23	0,1	9,74
4	0,41	0	5,99
5	0,47	-0,22	4,65
6	0,49	-0,32	3,87
7	0,52	-0,44	3

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΥΟ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

5.1 Περιγραφή

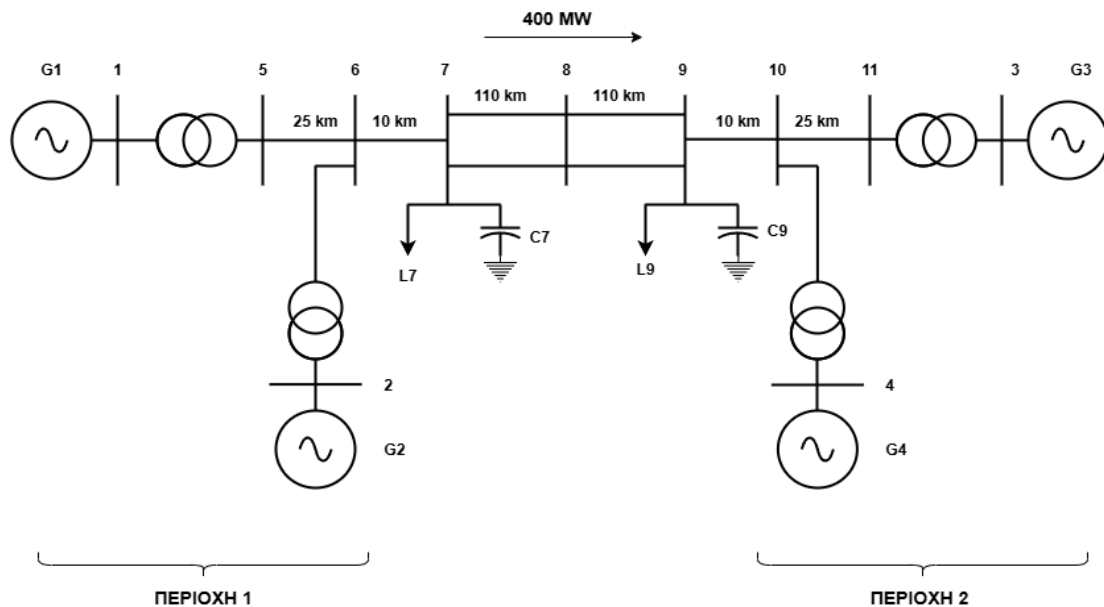
Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου προστασίας έναντι απώλειας διέγερσης στο ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δύο περιοχών [11] (Σχ. 5.1). Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει τέσσερις πανομοιότυπες γεννήτριες κυλινδρικού δρομέα με διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος, αυτόματο ρυθμιστή τάσης και σταθεροποιητή. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Γ.

Η ανάλυση επικεντρώνεται στην περίπτωση απώλειας διέγερσης στη γεννήτρια G1 διερευνώντας τις επιπτώσεις που έχει το σφάλμα αυτό στη συνολική λειτουργία του συστήματος. Η απώλεια διέγερσης γίνεται την χρονική στιγμή $t = 1$ s.

Μελετώνται τα παρακάτω σενάρια:

- *Σενάριο Α:* Απώλεια διέγερσης στη γεννήτρια G1 με πλήρη αρχική φόρτιση.
- *Σενάριο Β:* Απώλεια διέγερσης στη γεννήτρια G1 με μικρή αρχική φόρτιση.
- *Σενάριο Γ:* Απώλεια διέγερσης στη γεννήτρια G1 με υψηλή αρχική φόρτιση και τη γεννήτρια G2 εκτός λειτουργίας.
- *Σενάριο Δ:* Απώλεια διέγερσης στη γεννήτρια G1 με χαμηλό φορτίο με τη γεννήτρια G2 εκτός λειτουργίας.

Εκτός από την επίδραση του φορτίου στο σύστημα, εξετάζεται και η επίδραση του ορίου υπερδιέγερσης E_f^{max} του αυτόματου ρυθμιστή τάσης. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η περίπτωση το όριο υπερδιέγερσης σε όλες τις γεννήτριες να είναι πρακτικά ελεύθερο ($E_f^{max} = 10$ pu) και εναλλακτικά να τεθεί σε ένα αυστηρό όριο ($E_f^{max} = 3$ pu).



Σχήμα 5.1 Σύστημα δύο περιοχών[11]

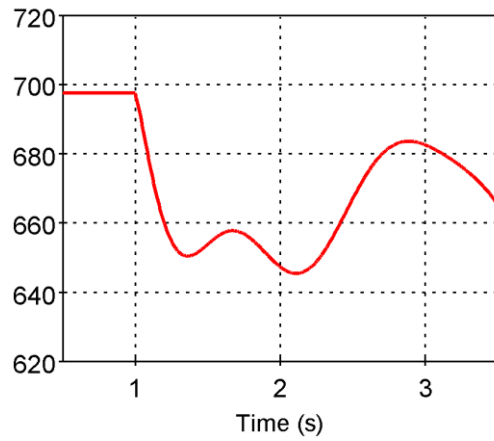
5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα δύο περιοχών σύμφωνα με τα τέσσερα σενάρια Α-Δ. Η ανάλυση αφορά την απώλεια διέγερση στη γεννήτρια G1 και την εξέταση της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος.

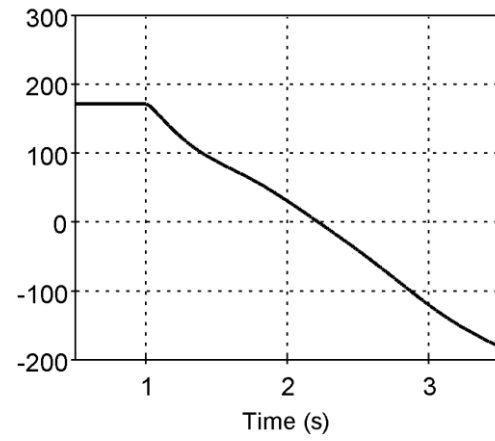
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι χρονικές μεταβολές της ενεργού ισχύος (P), της άεργου ισχύος (Q), της γωνίας δρομέα (δ) και της τάσης διέγερσης (E_f) των γεννητριών του συστήματος πριν και μετά από την εμφάνιση του σφάλματος απώλειας διέγερσης στη γεννήτρια G1.

Οι υπόλοιπες καμπύλες περιλαμβάνονται στο Παράρτημα Δ.

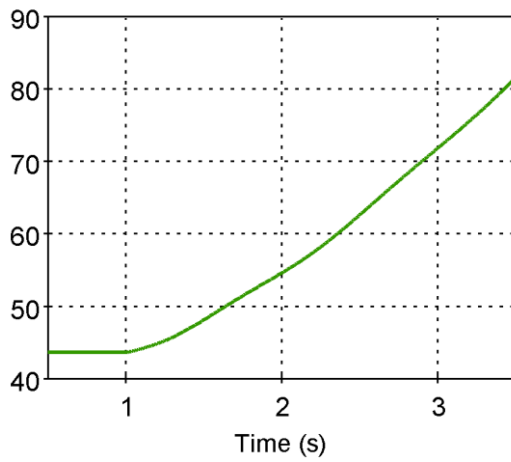
Οι καμπύλες αυτές δείχνουν τη δυναμική συμπεριφορά των γεννητριών, τόσο σε υψηλή και ελαφριά φόρτιση, όσο και με την G2 εκτός λειτουργίας. Σημαντικό στοιχείο της μελέτης, είναι η μεταβολή της μέγιστης τάσης διέγερσης η οποία καθορίζει το όριο της απόκρισης του αυτόματου ρυθμιστή τάσης (APT). Για υψηλές τιμές του E_{max} (10 pu) ο APT παρέχει μεγαλύτερο περιθώριο σταθεροποίησης, με κόστος όμως τη μεγαλύτερη θερμική καταπόνηση του δρομέα. Αντίθετα η μείωση της E_{max} (3pu), οδηγεί σε μικρότερη δυνατότητα ενίσχυσης της διέγερσης κατά τη διάρκεια της διαταραχής με αποτέλεσμα πιο έντονες αποκλίσεις στην άεργο ισχύ και διαφοροποιημένη απόκριση στην τάση και τη γωνία.



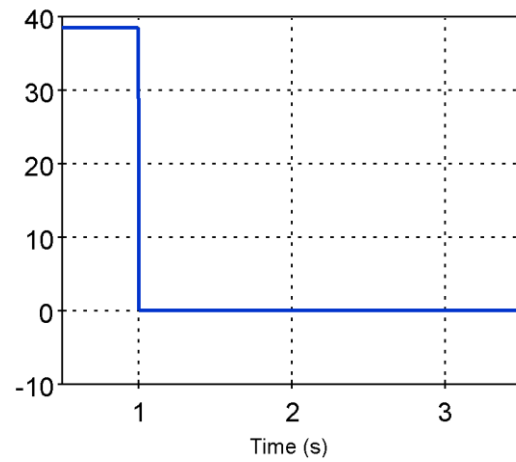
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

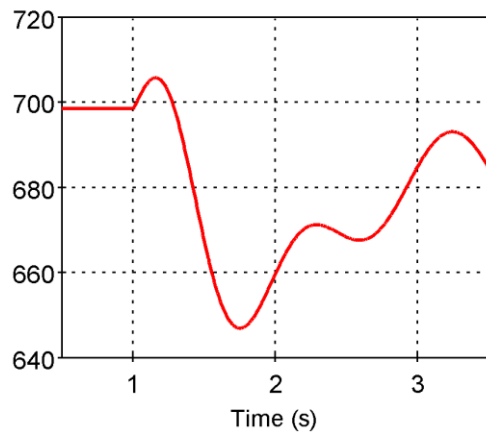


(γ) Γωνία δρομέα δ (μίρες)

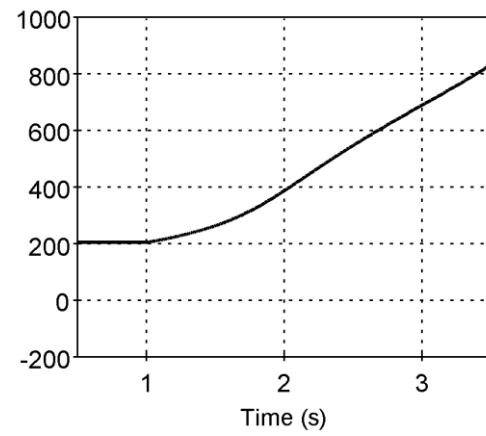


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

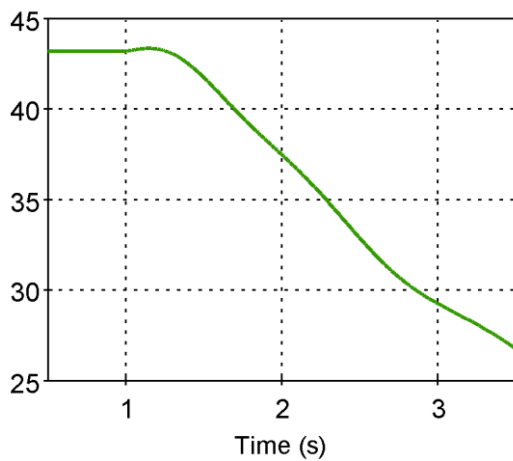
Σχήμα 5.2 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο A με $E_f^{max} = 10 pu$



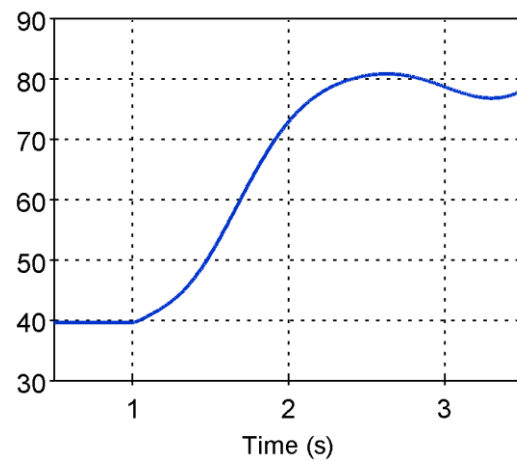
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

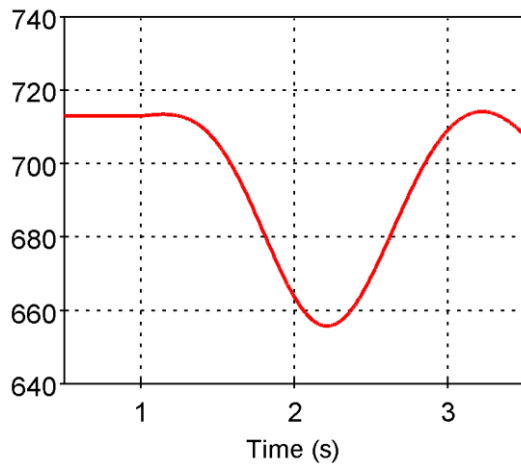


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

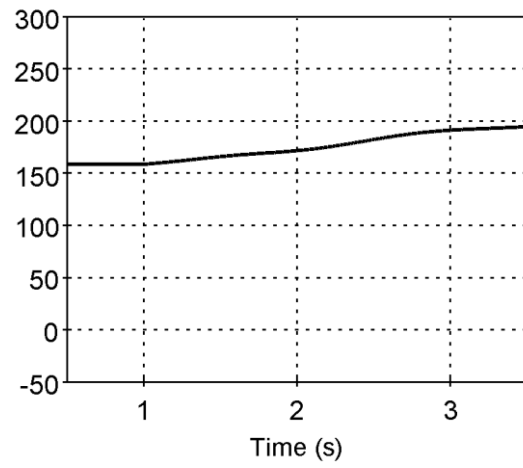


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

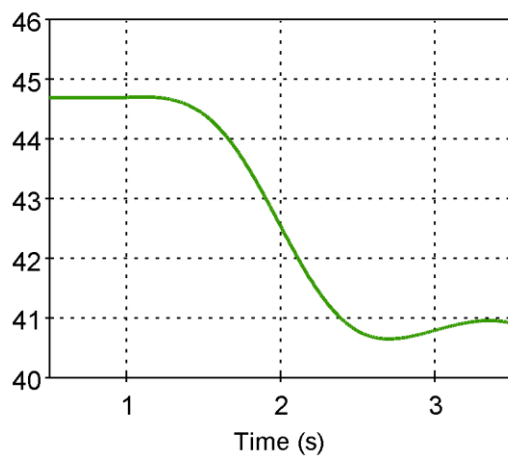
Σχήμα 5.3 Απόκριση γεννήτριας G2 στο σενάριο A με $E_f^{max} = 10 pu$



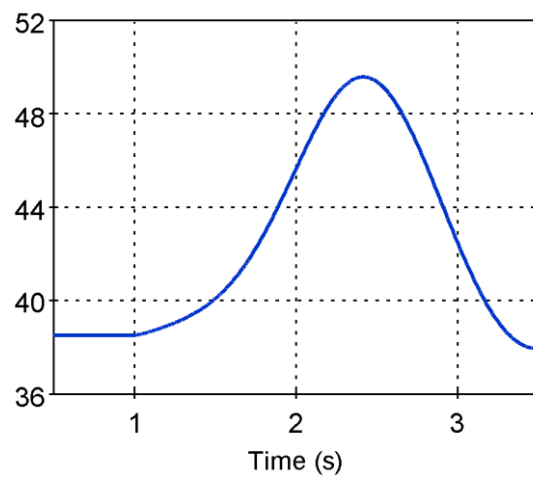
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

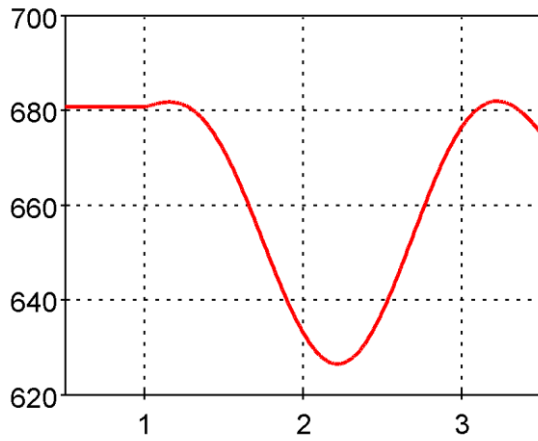


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

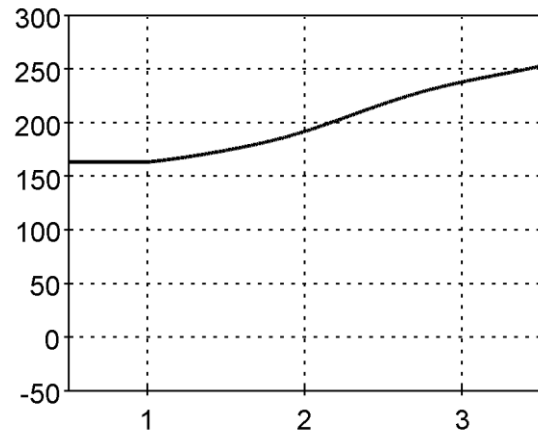


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

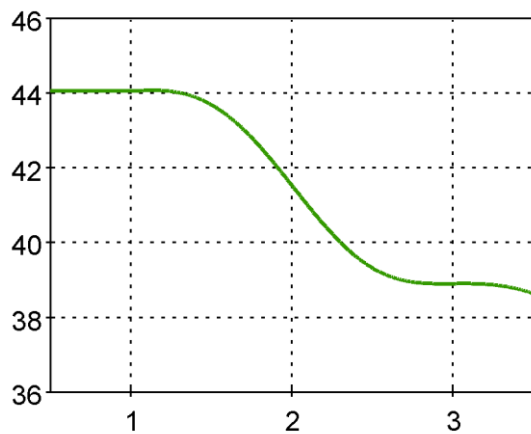
Σχήμα 5.4 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο A με $E_f^{max} = 10 pu$



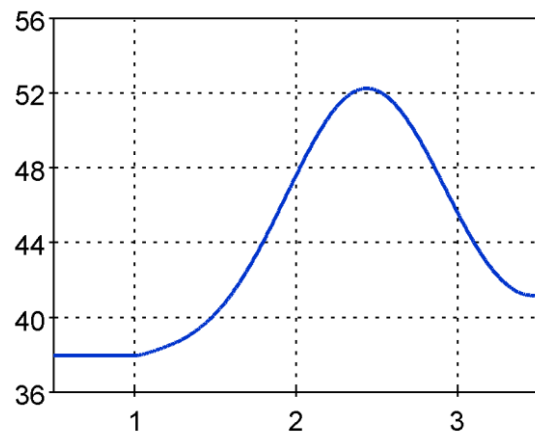
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

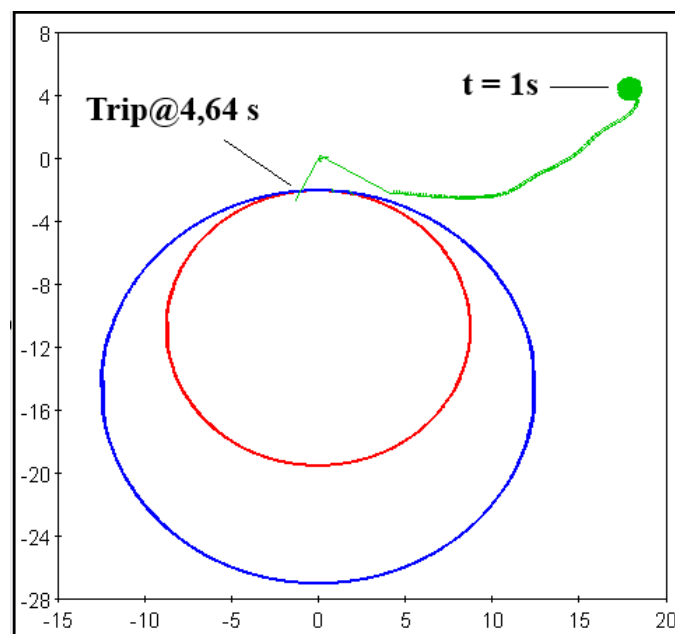


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

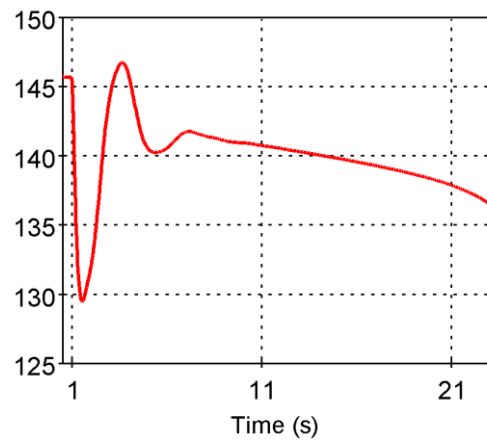


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

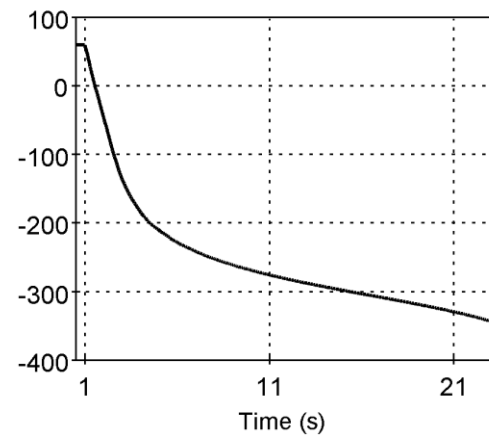
Σχήμα 5.5 Απόκριση γεννήτριας $G4$ στο σενάριο A με $E_f^{max} = 10 pu$



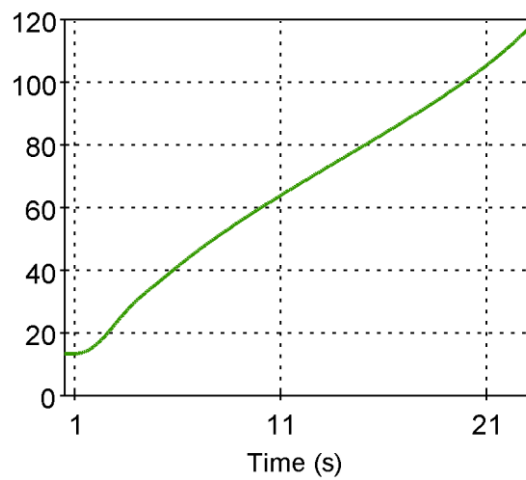
Σχήμα 5.6 H/N mho offset γεννήτριας $G1$ στο σενάριο A με $E_f^{max} = 10 pu$



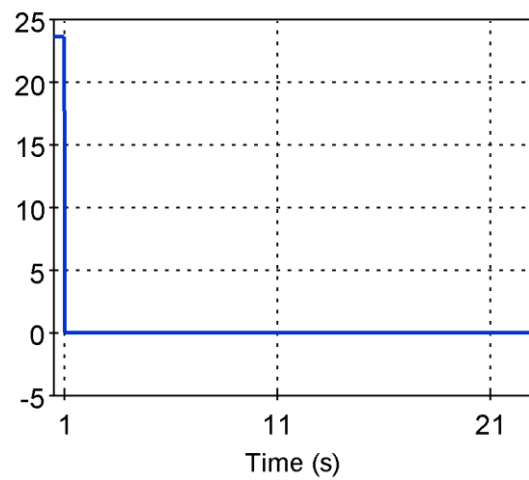
(α) Ενερργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

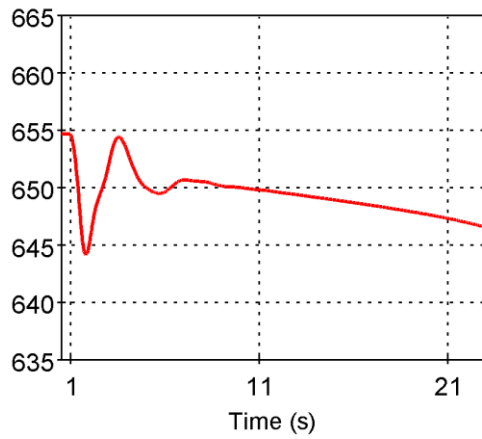


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

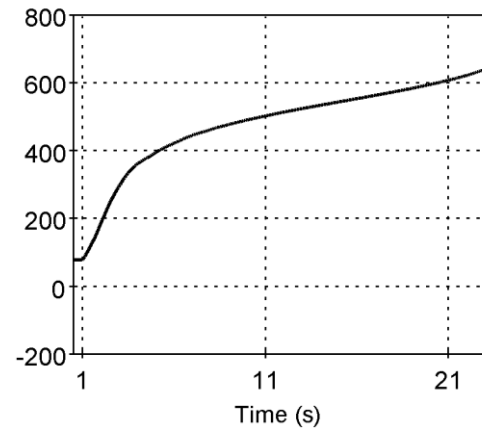


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

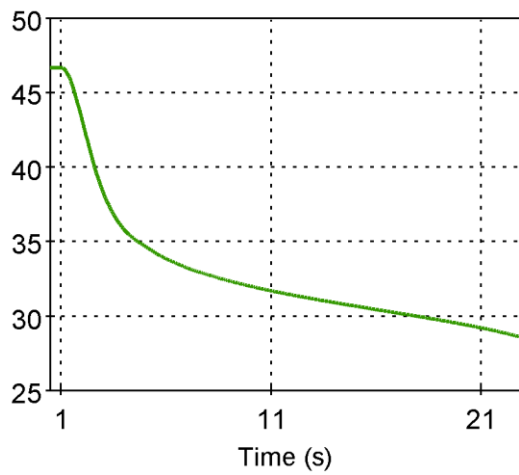
Σχήμα 5.7 Απόκριση γεννήτριας $G1$ στο σενάριο B με $E_f^{max} = 10$ pu



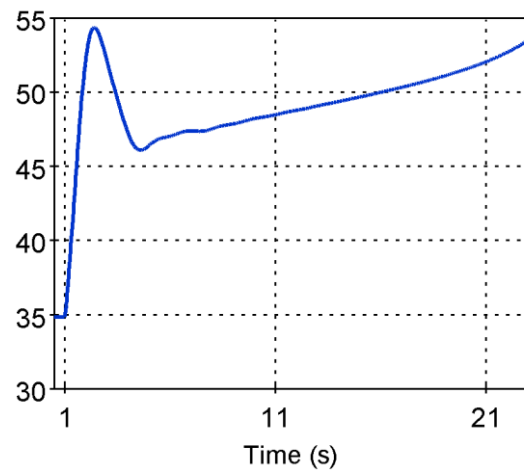
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

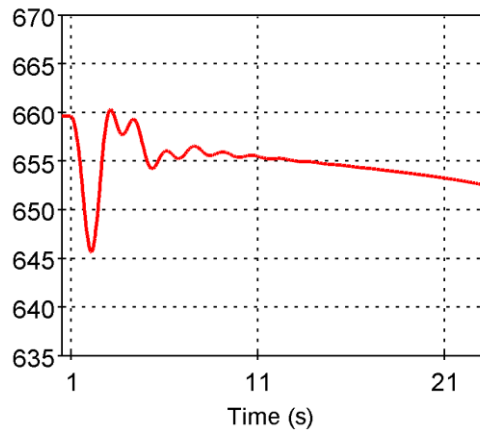


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

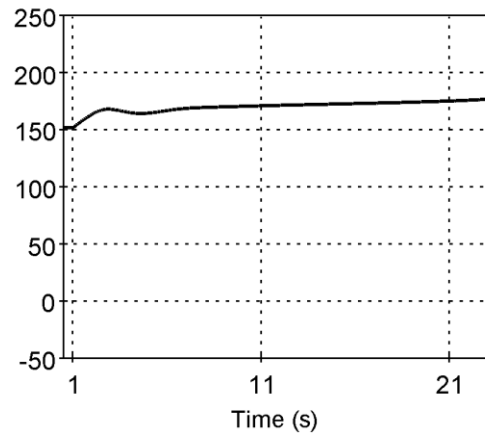


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

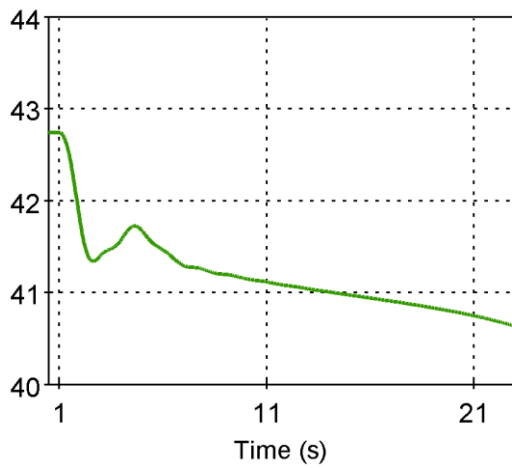
Σχήμα 5.8 Απόκριση γεννήτριας G2 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 10 pu$



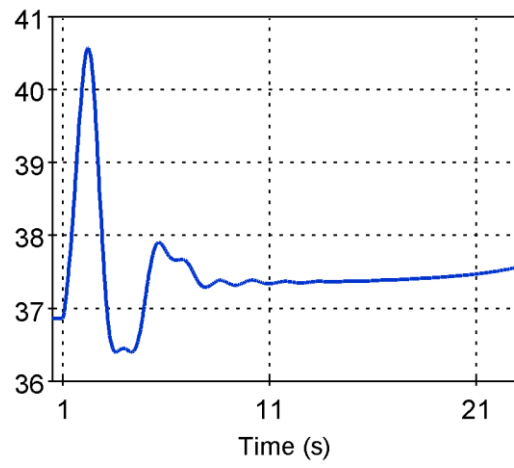
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

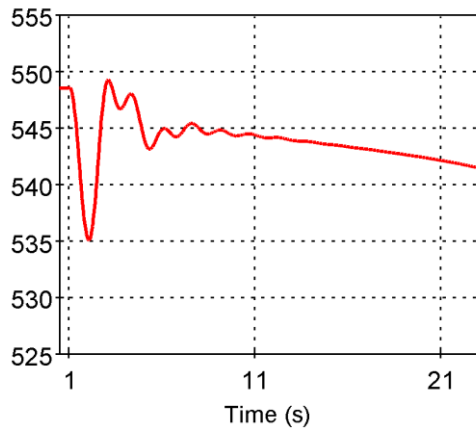


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

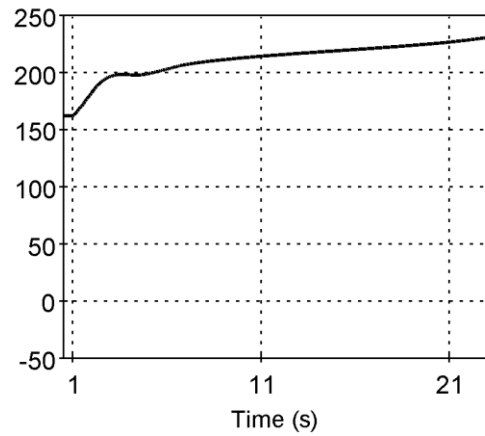


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

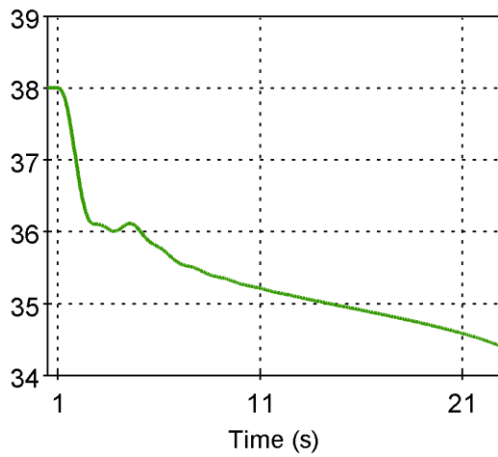
Σχήμα 5.9 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 10 pu$



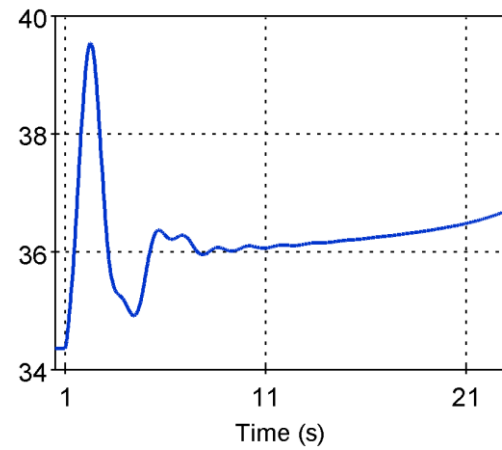
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

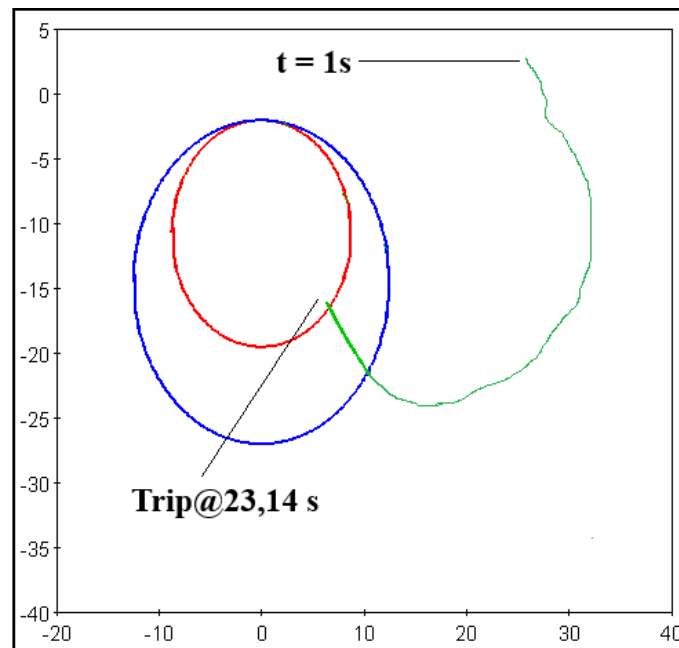


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

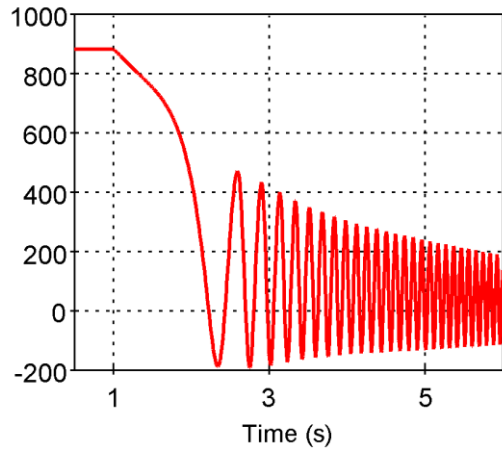


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

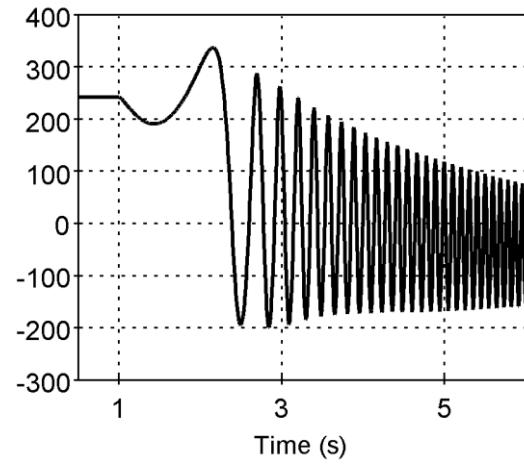
Σχήμα 5.10 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 10$ pu



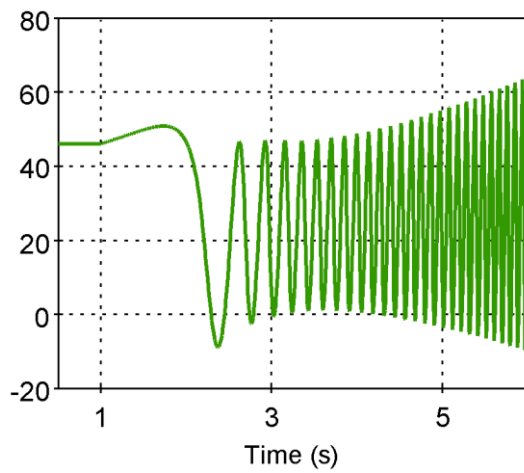
Σχήμα 5.11 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 10$ pu



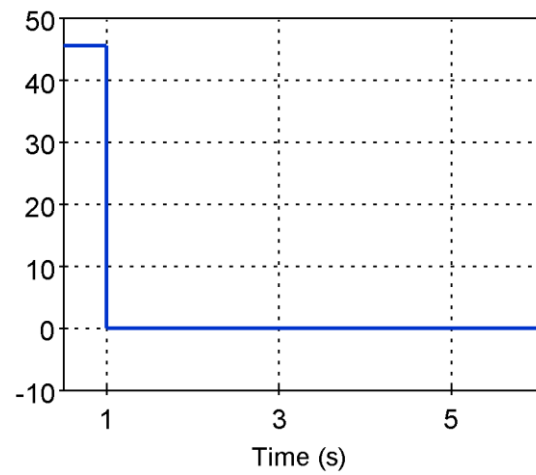
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

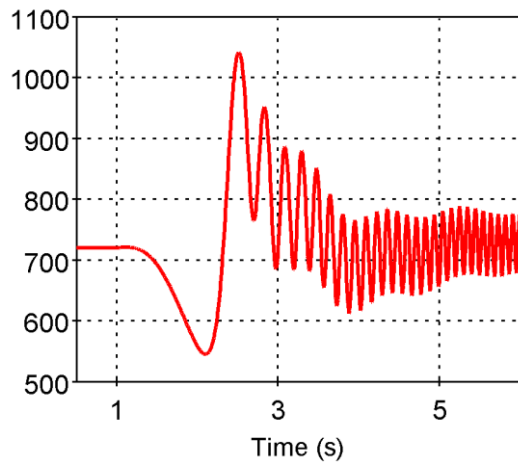


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

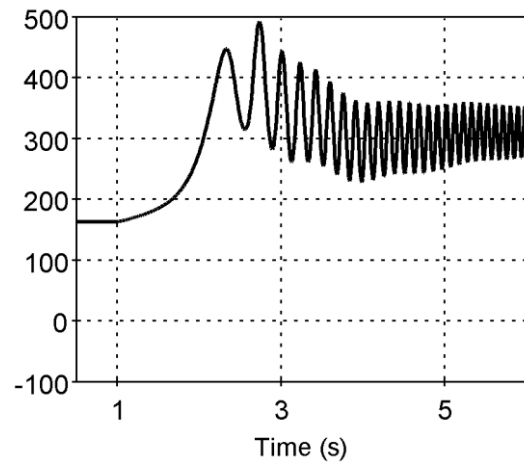


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

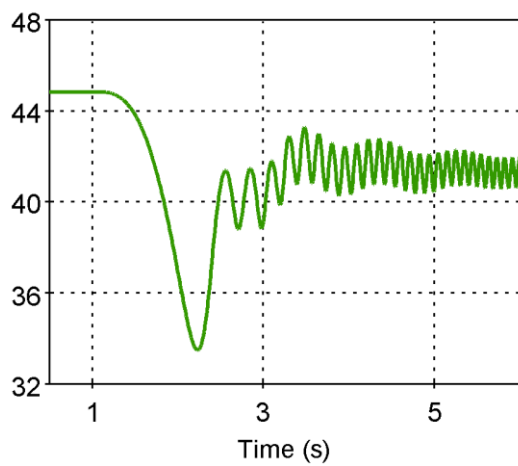
Σχήμα 5.12 Απόκριση γεννήτριας $G1$ στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 10 pu$



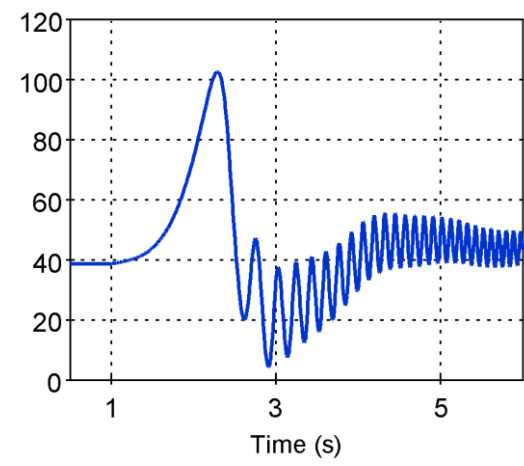
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

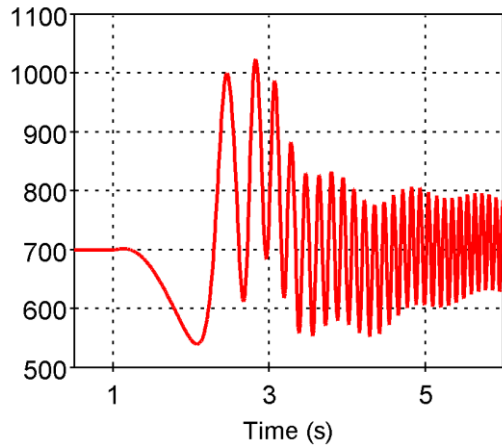


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

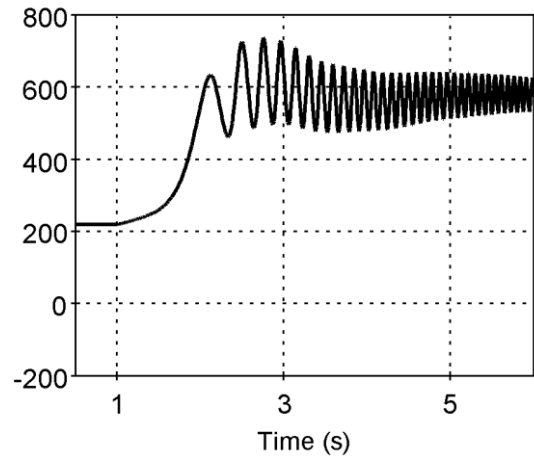


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

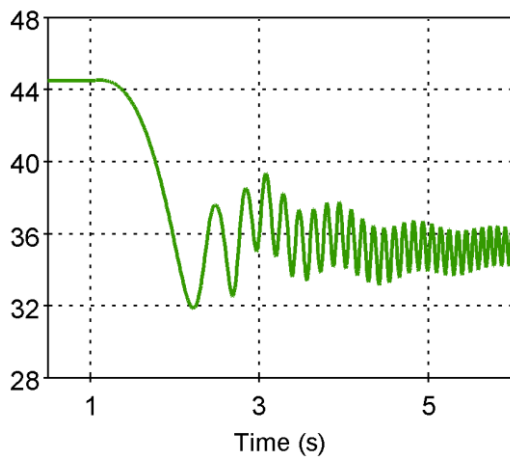
Σχήμα 5.13 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 10 pu$



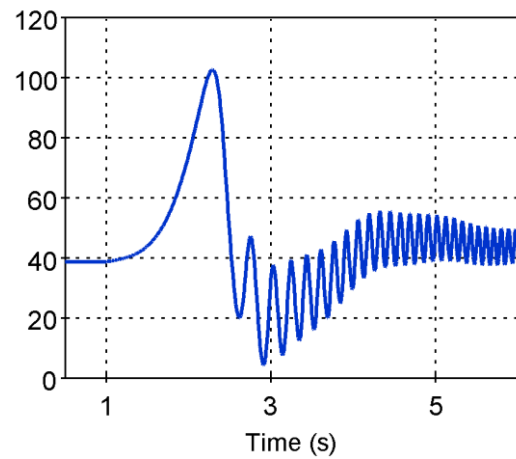
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

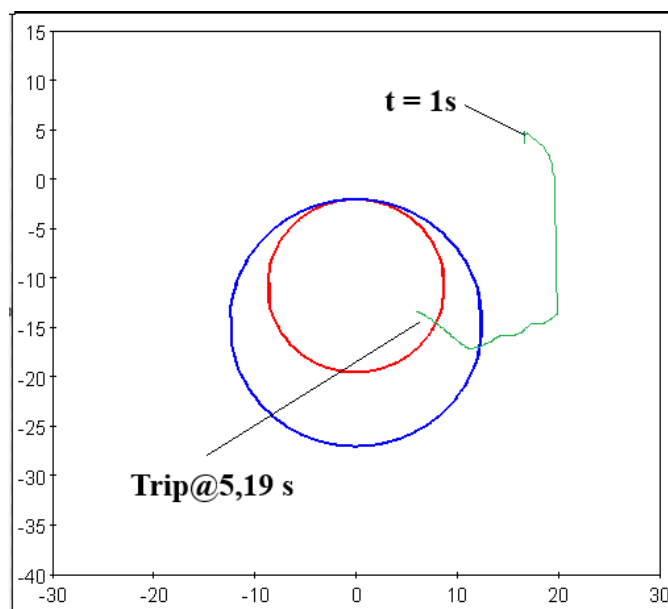


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

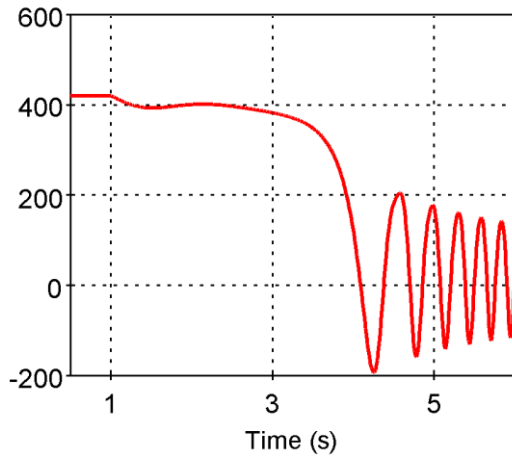


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

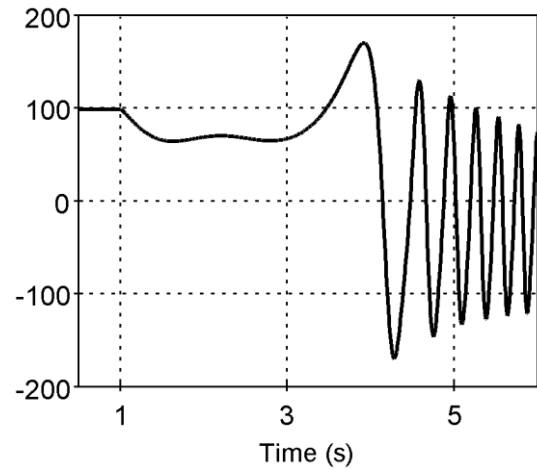
Σχήμα 5.14 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 10 pu$



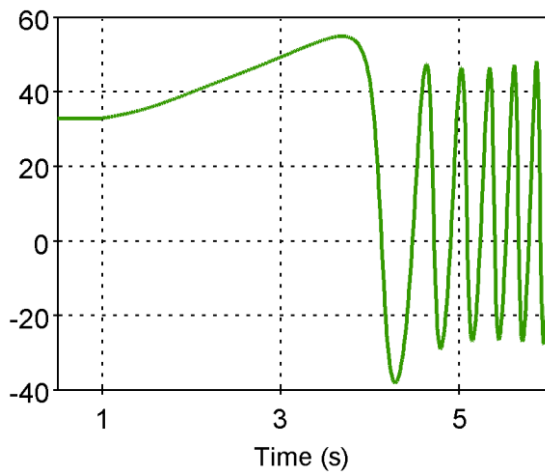
Σχήμα 5.15 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 10 pu$



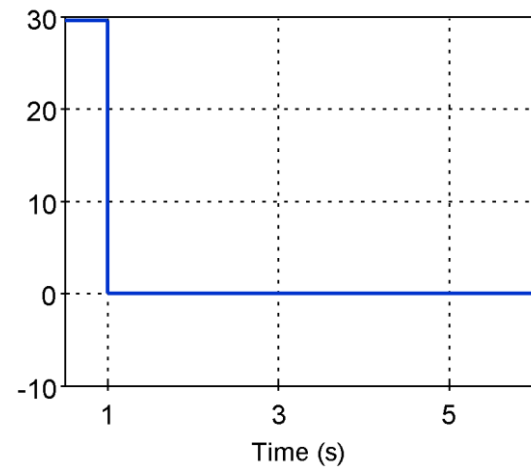
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

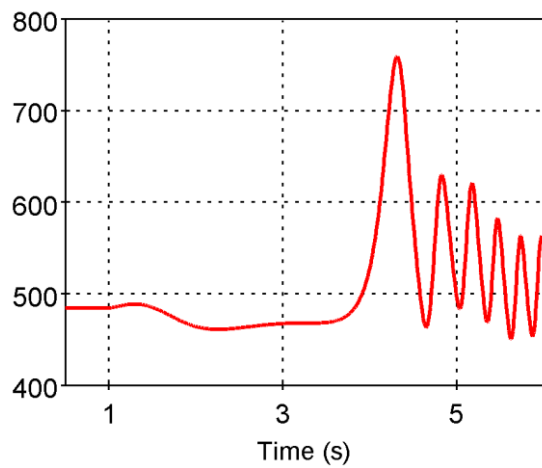


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

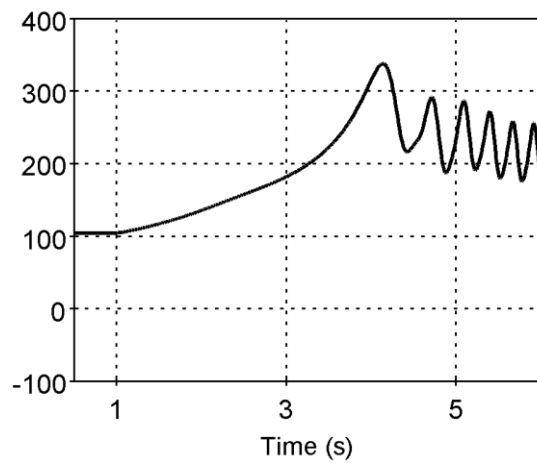


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

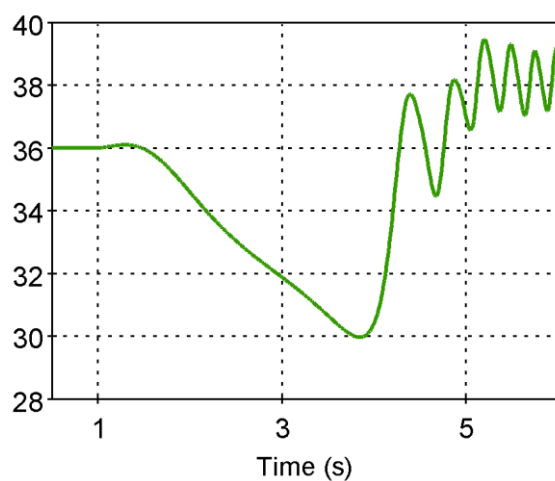
Σχήμα 5.16 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 10$ pu



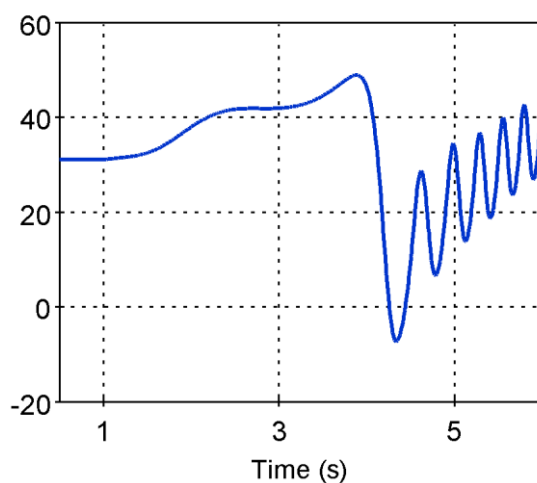
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

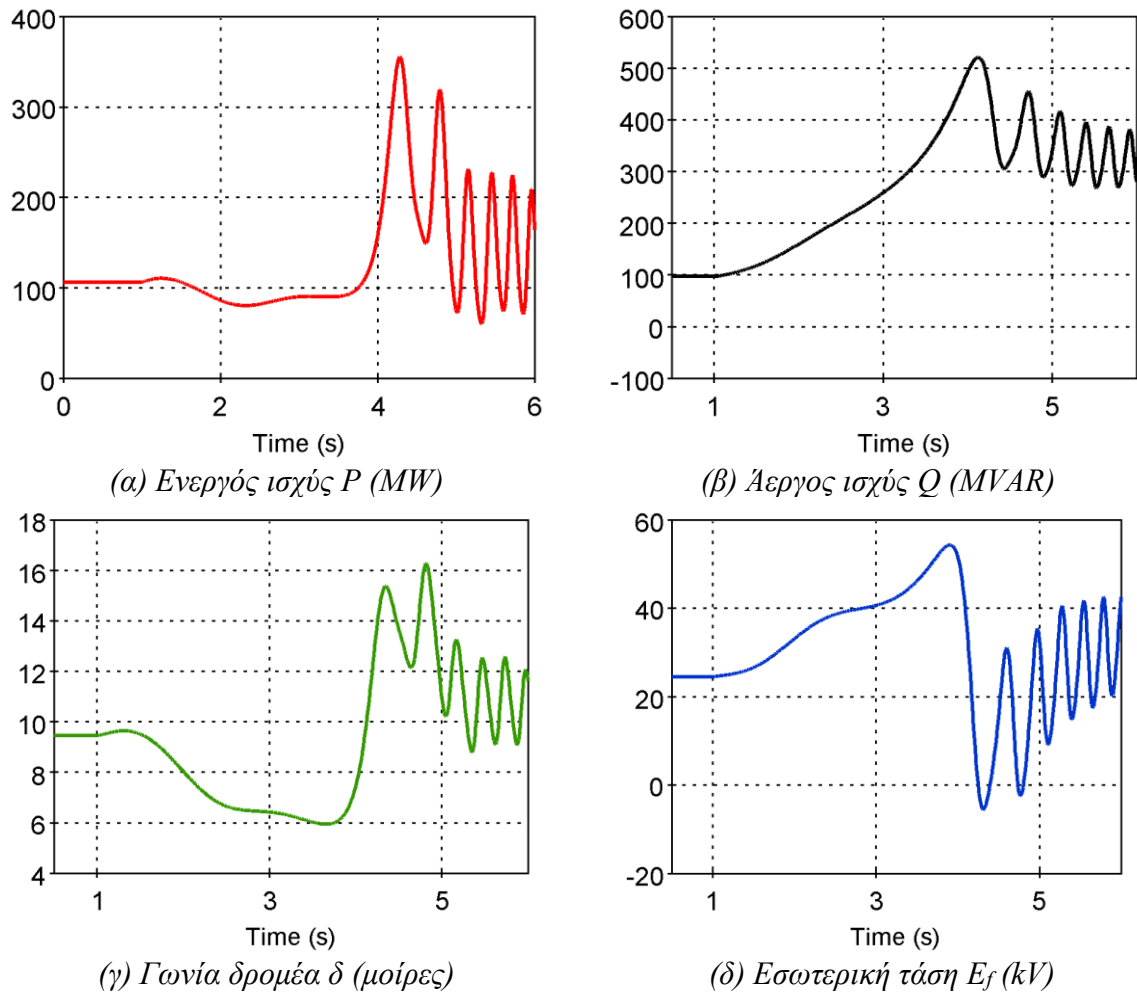


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

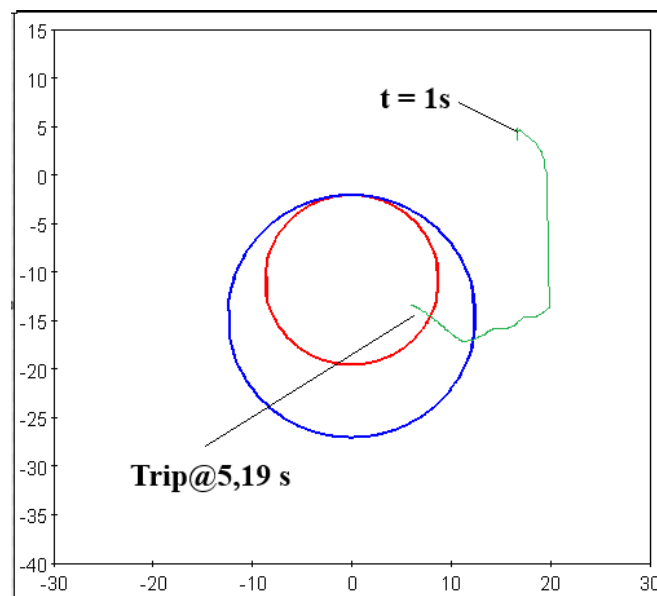


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

Σχήμα 5.17 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 10 pu$



Σχήμα 5.18 Απόκριση γεννήτριας $G4$ στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 10$ pu



Σχήμα 5.19 H/N mho offset γεννήτριας $G1$ στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 10$

Οι προσομοιώσεις απώλειας διέγερσης στο σύστημα δύο περιοχών – τεσσάρων γεννητριών, κατέδειξαν ότι η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος εξαρτάται από παράγοντες όπως το επίπεδο φόρτισης και η τοπολογία του δικτύου.

Η απώλεια διέγερσης με υψηλή φόρτιση προκαλεί ταχεία μείωση της άεργου ισχύος και αύξηση της γωνίας δ του δρομέα οδηγώντας σε έντονες ταλαντώσεις και αυξημένο κίνδυνο αποσυγχρονισμού. Αντίθετα, με χαμηλή φόρτιση οι επιπτώσεις είναι ηπιότερες και το σύστημα διατηρεί την ευστάθεια του για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.

Η απουσία της γεννήτριας G2 μετέβαλε τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος και το κατέστησε πιο ευαίσθητο σε διαταραχές, καθώς το φορτίο μοιράζεται στις υπόλοιπες μονάδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο περιθώριο ευστάθειας και μεγαλύτερη πιθανότητα αποσυγχρονισμού.

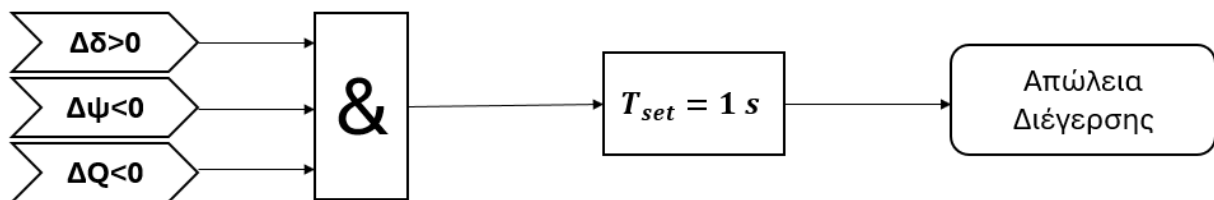
Η μεταβολή της μέγιστης τάσης διέγερσης επέφερε μικρές αλλαγές στους χρόνους απόκρισης. Αυτό μας δείχνει ότι δεν παίζει καθοριστικό ρόλο σε πιθανή απώλεια διέγερσης και δεν επηρεάζει την ευστάθεια του συστήματος.

Συνολικά, η αξιοπιστία και η ευστάθεια του συστήματος εξαρτώνται άμεσα από την επάρκεια της διέγερσης και τη διαθεσιμότητα των γεννητριών. Συνεπώς η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας που να λαμβάνει υπόψη τις συνολικές συνθήκες του δικτύου είναι απαραίτητη.

5.3 Εφαρμογή προτεινόμενου σχήματος προστασίας στο σύστημα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή του προτεινόμενου σχήματος προστασίας απώλειας διέγερσης στη γεννήτρια G1 του συστήματος δύο περιοχών – τεσσάρων γεννητριών. Η λεπτομερής μεθοδολογία της διάταξης έχει αναλυθεί εκτενώς στο κεφάλαιο 4. Ο επιτυχής προσδιορισμός του χρόνου ανίχνευσης του σφάλματος βασίστηκε στη συχνότητα ταλάντωσης όλου του δικτύου που είναι $f_{sw} = 0,545 \text{ Hz}$. Η περίοδος των ταλαντώσεων είναι $T_{sw} = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,545} = 1,834 \text{ s}$ και ο τελικός χρόνος ρύθμισης του ηλεκτρονόμου είναι:

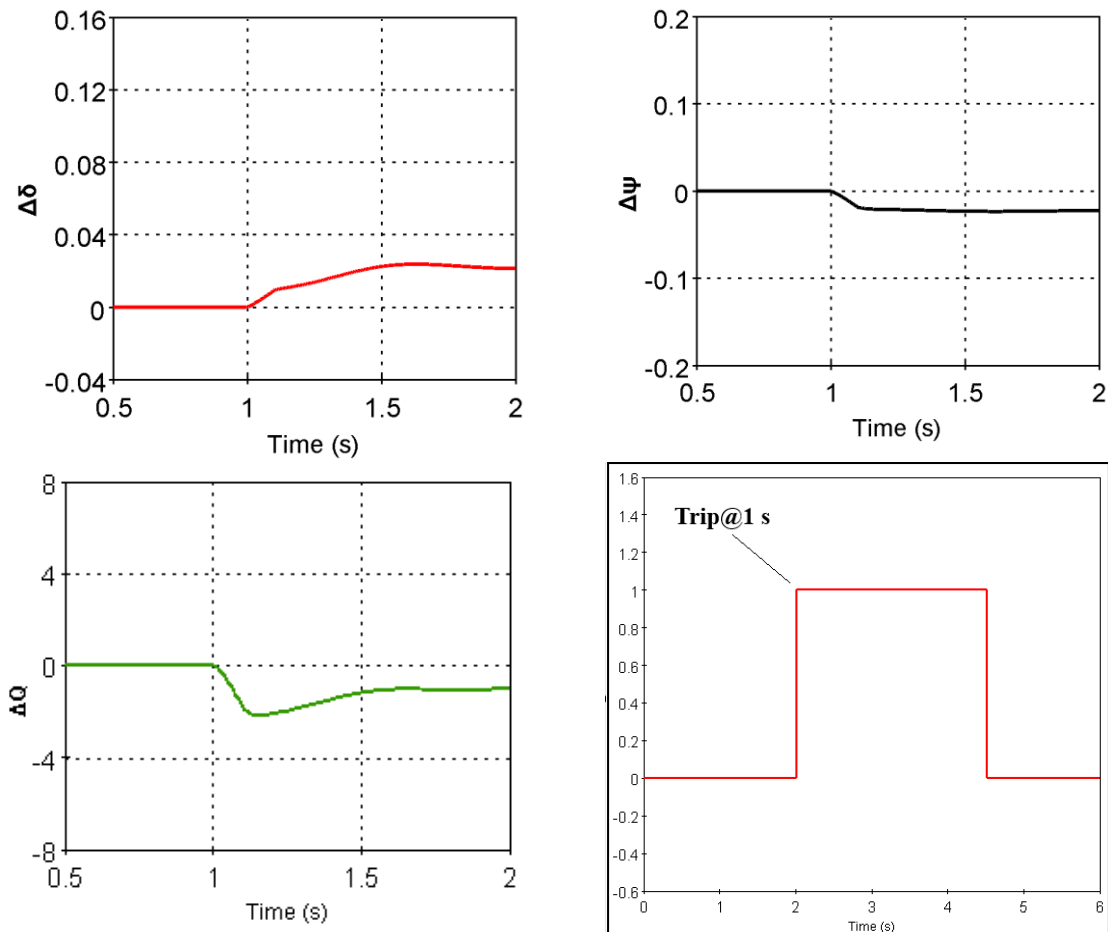
$$T_{set} \geq 1,1 \times 0,5 \times T_{sw} = 1 \text{ s}$$



Σχήμα 5.20 Λογική ανίχνευσης απώλειας διέγερσης

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα του σχήματος καθώς η γεννήτρια απομονώθηκε επιτυχώς σε όλα τα σενάρια και στον προκαθορισμένο χρόνο.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η απόκριση της γεννήτριας G1 και οι ελεγχόμενες μεταβλητές του προτεινόμενου σχήματος.



Σχήμα 5.21 Μεταβολές παρακολουθούμενων μεγεθών της προτεινόμενης μεθόδου (Σενάριο A)

Οι προσομοιώσεις για τα υπόλοιπα σενάρια που μελετήθηκαν είχαν πανομοιότυπες γραφικές παραστάσεις. Σε κάθε περίπτωση, το προτεινόμενο σχήμα προστασίας ανίχνευσε την απώλεια διέγερσης στο πρώτο δευτερόλεπτο, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ανάπτυξη ενός καινοτόμου ηλεκτρονόμου για την ανίχνευση σφάλματος ολικής απώλειας διέγερσης σε σύγχρονη γεννήτρια. Για να αξιολογηθεί η ταχύτητα απόκρισης και η αξιοπιστία του προτεινόμενου συστήματος, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις σε διάφορα σενάρια απώλειας διέγερσης.

Ο προτεινόμενος ηλεκτρονόμος βασίζεται στην ανίχνευση των κρίσιμων ηλεκτρικών μεγεθών που πρέπει να παρακολουθούνται για τον εντοπισμό της απώλειας διέγερσης. Αναλύθηκαν οι αποκρίσεις των παραμέτρων που αφορούν τη γεννήτρια κατά τη διάρκεια διαφόρων σφαλμάτων, προκειμένου να εντοπιστούν εκείνα τα μεγέθη που χαρακτηρίζονται από μοναδική συμπεριφορά σε περίπτωση απώλειας διέγερσης, και διαφοροποιούνται από τα μεγέθη άλλων σφαλμάτων.

Η αρχική επιλογή των παραμέτρων βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική έρευνα. Ως αποτέλεσμα, το κριτήριο απόφασης του ηλεκτρονόμου καθορίστηκε ως ο συνδυασμός τριών ηλεκτρικών μεγεθών: της γωνίας, της πεπλεγμένης ροής του στάτη ανά δευτερόλεπτο και της άεργου ισχύος εξόδου της γεννήτριας.

Η απόκριση του προτεινόμενου συστήματος συγκρίθηκε με αυτή του συμβατικού ηλεκτρονόμου τύπου offset mho. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο νέος ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται πιο γρήγορα σε όλες τις περιπτώσεις, με αποτέλεσμα τη μείωση της καταπόνησης της γεννήτριας και του ΣΗΕ.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου συστήματος είναι ότι αποφεύγεται το πρόβλημα της ανεπιθύμητης πτώσης του διακόπτη, το οποίο εμφανίζεται με τον παραδοσιακό ηλεκτρονόμο offset mho κατά τη διάρκεια ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων στο ΣΗΕ.

Συνοπτικά, τα κύρια πλεονεκτήματα του προτεινόμενου ηλεκτρονόμου σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα στη βιβλιογραφία είναι:

- Ταχύτερη ανίχνευση του σφάλματος ολικής απώλειας διέγερσης.
- Αυξημένη αξιοπιστία του συστήματος προστασίας.
- Υψηλή προσαρμοστικότητα στον καθορισμό της χρονικής καθυστέρησης.

Για μελλοντικές επεκτάσεις της έρευνας, προτείνονται τα εξής:

- Η ανάλυση της απόκρισης του προτεινόμενου ηλεκτρονόμου σε πιο σύνθετο ΣΗΕ, όπως σε ένα ρεαλιστικό σύστημα με πολλές γεννήτριες.
- Η ανάπτυξη μιας γενικευμένης μεθόδου υπολογισμού της συχνότητας των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Προσομοίωσης

Σύγχρονη Γεννήτρια

$S = 104,4 \text{ MVA}$, $V = 13,8 \text{ kV}$, 60 Hz , 2 πόλοι, $R_a = 0,00143 \text{ pu}$, $X_l = 0,13 \text{ pu}$, $X_0 = 0,066 \text{ pu}$, $X_d = 1,48 \text{ pu}$, $X_q = 1,42 \text{ pu}$, $X'_d = 0,196 \text{ pu}$, $X''_d = 0,136 \text{ pu}$, $T'_{d0} = 3,59 \text{ s}$, $T''_{d0} = 0,033 \text{ s}$, $X'_q = 0,484 \text{ pu}$, $T'_{q0} = 0,312 \text{ s}$, $H = 3,09 \text{ s}$

Μετασχηματιστής Ανύψωσης

$S = 97 \text{ MVA}$, $DYg + 30^\circ$, $V1 = 13,8 \text{ kV}$, $V2 = 68,1 \text{ kV}$, 60 Hz ,
 $X = 0,065 \text{ pu}$

Άπειρο Δίκτυο

$V = 67 \text{ kV}$, 60 Hz , $Z_1 = 0,02176 + j0,08105 \Omega$, $Z_2 = 0,02176 + j0,08105 \Omega$, $Z_0 = 0,2176 + j5,4033 \Omega$

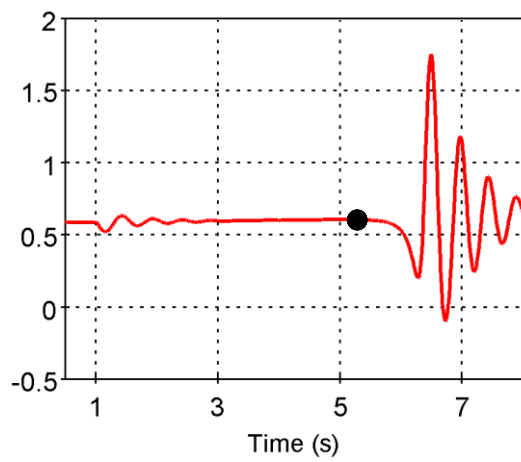
Σύστημα Διέγερσης IEEE1

$I_f = 848,8 \text{ A}$, $K_A = 200 \text{ pu}$, $T_A = 0,02 \text{ s}$, $V_{Rmax} = 10,33 \text{ pu}$, $V_{Rmin} = -3,6 \text{ pu}$, $K_F = 0,0345 \text{ pu}$, $T_F = 1,5 \text{ s}$, $K_E = 0,1 \text{ pu}$, $T_E = 0,4 \text{ s}$, $E_{FD1} = 6,83 \text{ pu}$, $E_{FD2} = 6,08 \text{ pu}$,
 $SE_{E_{FD1}} = 0,132 \text{ pu}$, $SE_{E_{FD2}} = 0,062 \text{ pu}$

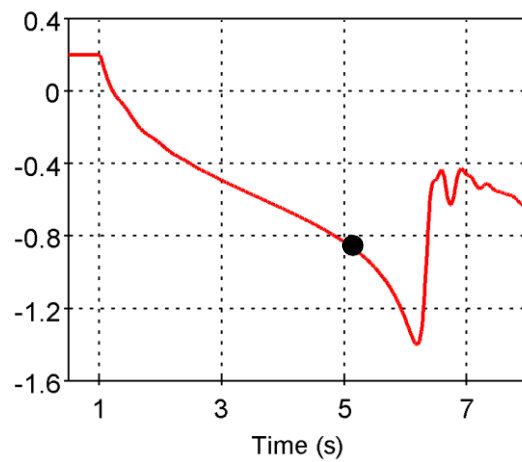
Ρυθμιστής Στροφών IEEEG1

$K = 10 \text{ pu}$, $T_1 = 0,05 \text{ s}$, $T_2 = 0,05 \text{ s}$, $T_3 = 0,05 \text{ s}$, $U_0 = 0,01 \text{ pu/s}$, $U_C = -10 \text{ pu/s}$, $P_{max} = 1 \text{ pu}$, $P_{min} = 0,1 \text{ pu}$, $T_4 = 0,22 \text{ s}$, $T_5 = 5 \text{ s}$, $T_6 = 0,1 \text{ s}$, $K_1 = 0,27 \text{ pu}$, $K_3 = 0$, $K_5 = 0,25 \text{ pu}$, $K_7 = 0,48 \text{ pu}$

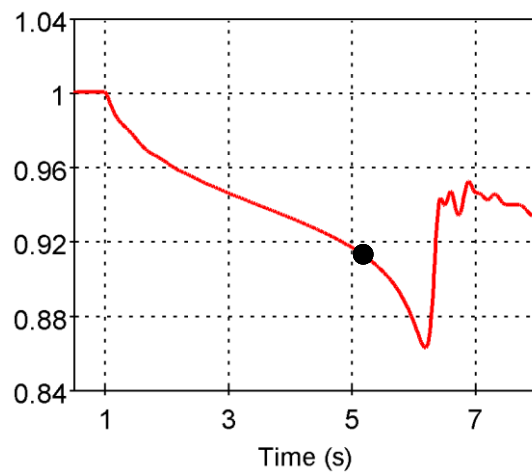
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Συμπληρωματικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Απώλειας Διέγερσης Συμβατικής Μεθόδου



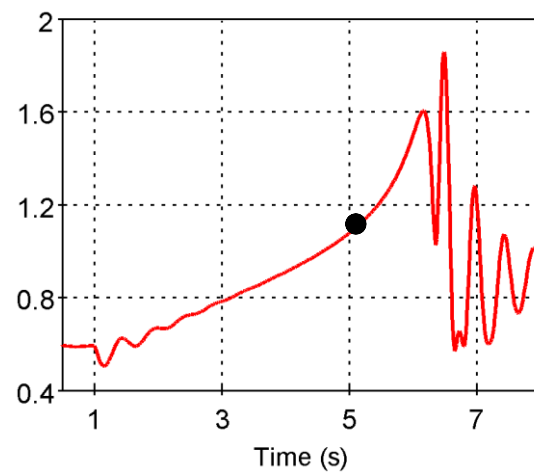
(α) Ενεργός ισχύς P



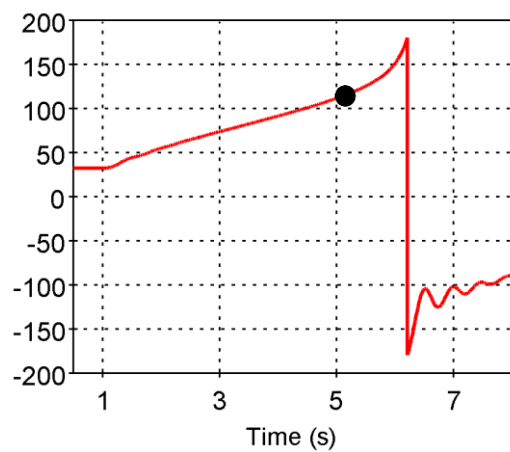
(β) Λεργός ισχύς Q



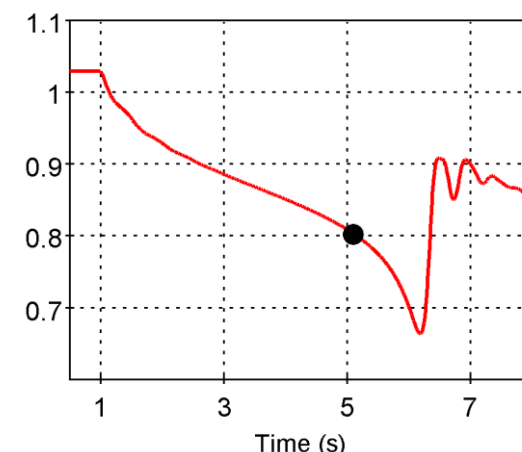
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

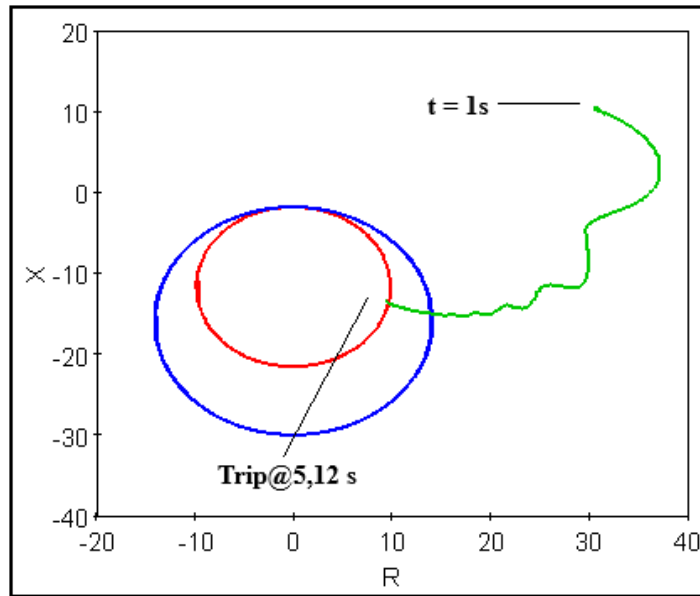


(ε) Γωνία δρομέα δ

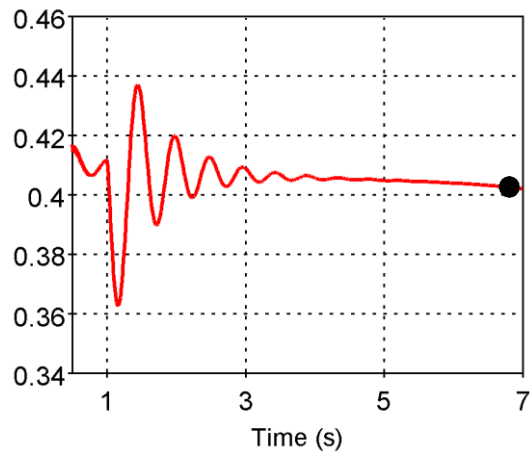


(στ) Ροή διακένου ψ

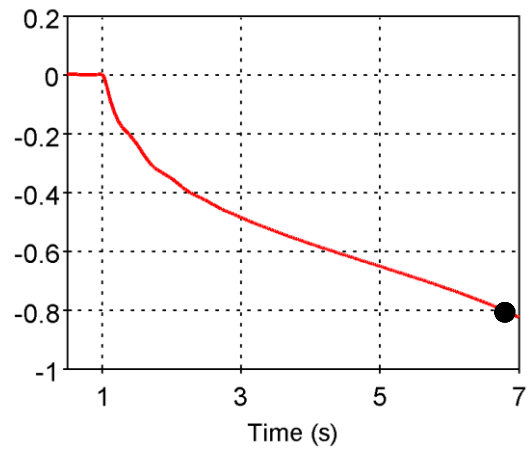
Σχήμα Β.1 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 2: $0,55 + j0,187 pu$)



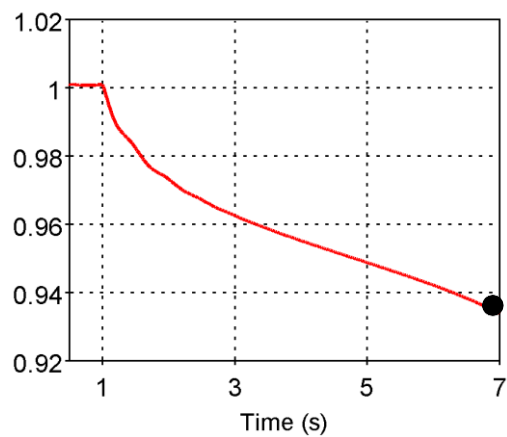
Σχήμα Β.2 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 2: $0,55 + j0,187$)



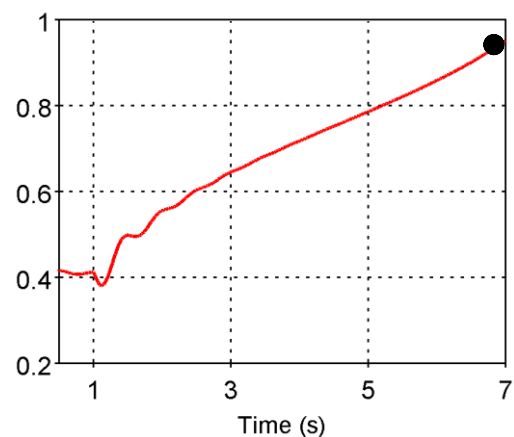
(α) Ενεργός ισχύς P



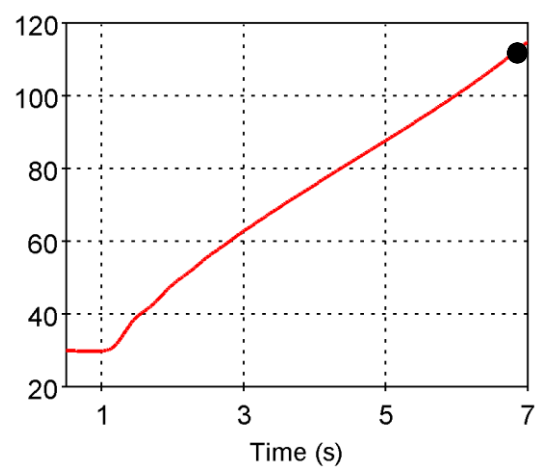
(β) Άεργος ισχύς Q



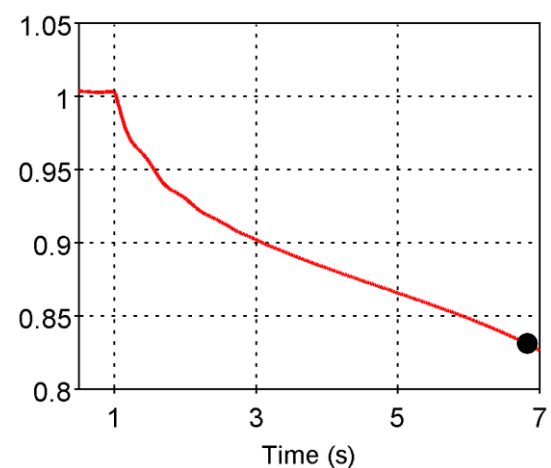
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

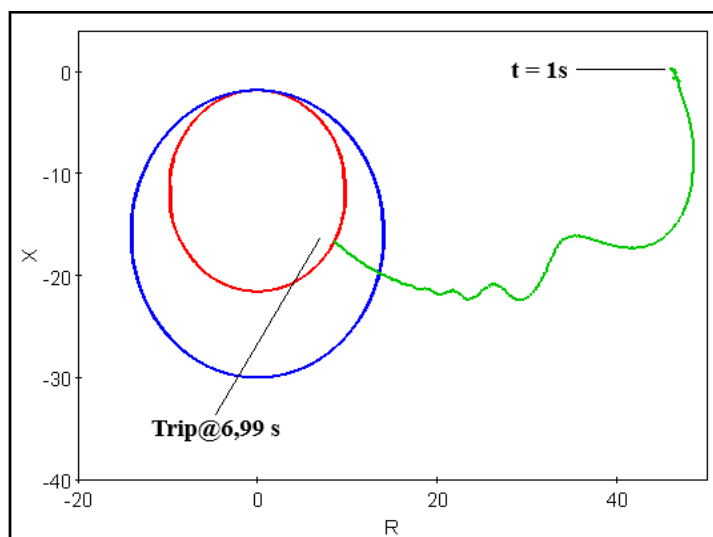


(ε) Γωνία δρομέα δ

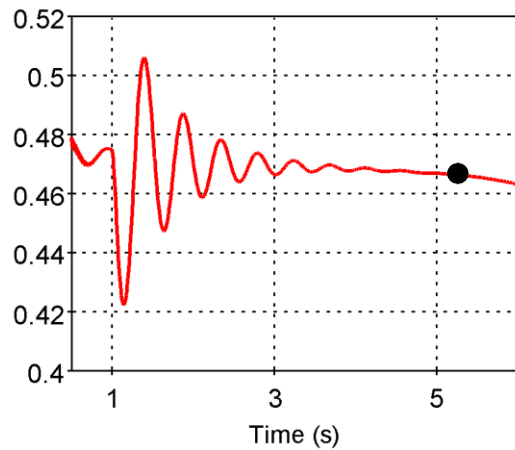


(στ) Ροή διακένου ψ

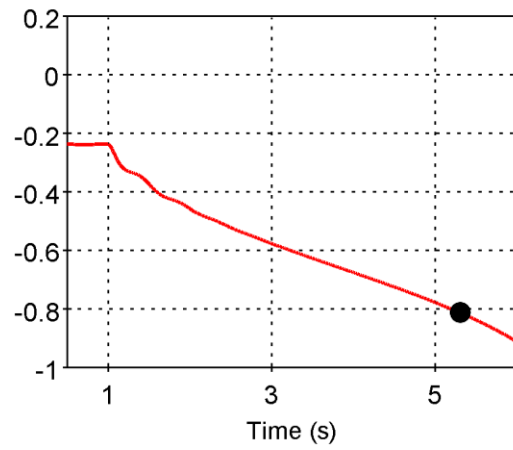
Σχήμα Β.3 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 4: 0,41 pu)



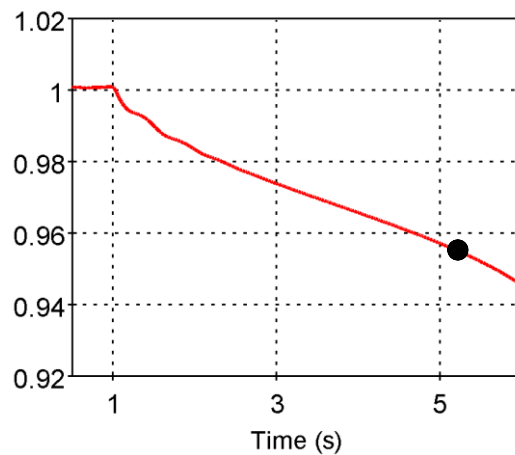
Σχήμα Β.4 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 4:0,41)



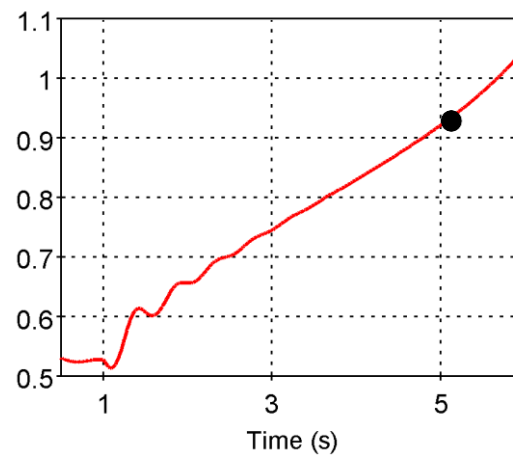
(α) Ενεργός ισχύς P



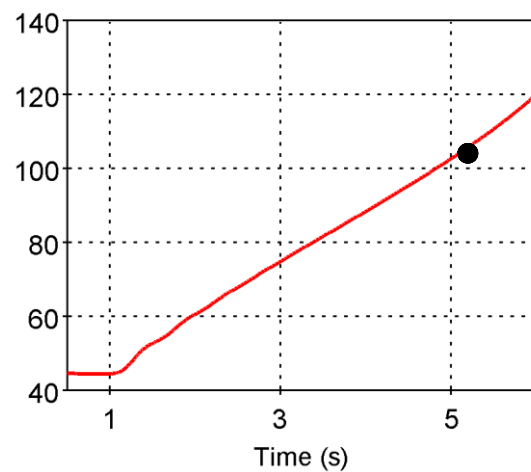
(β) Άεργος ισχύς Q



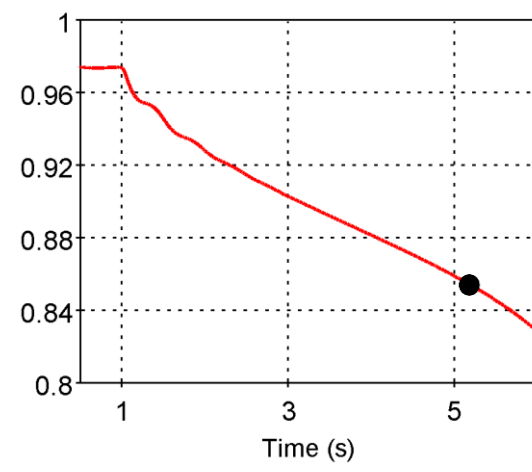
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

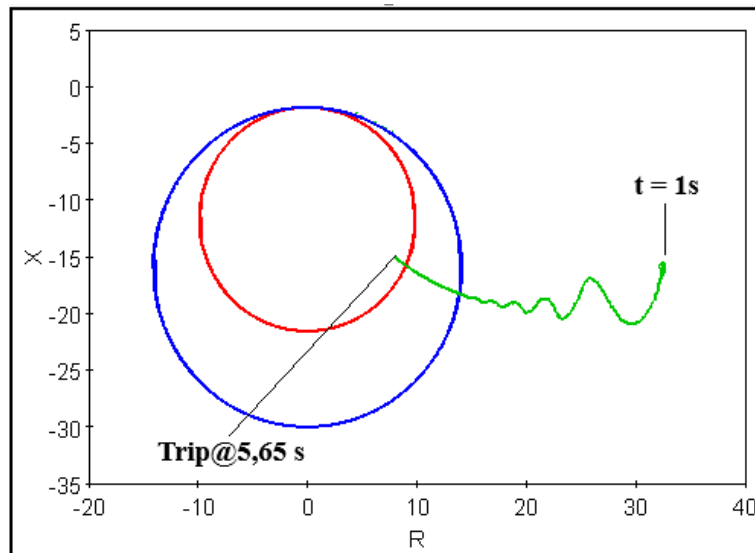


(ε) Γωνία δρομέα δ

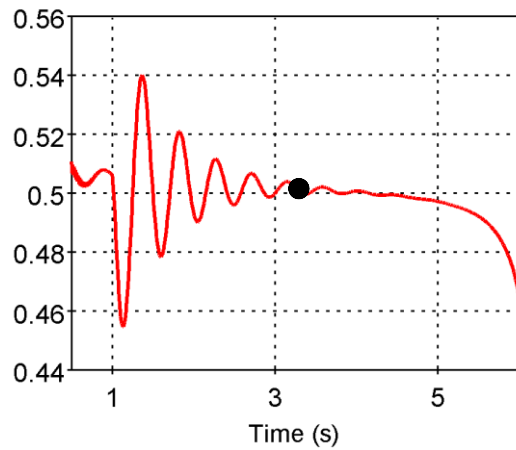


(στ) Ροή διακένου ψ

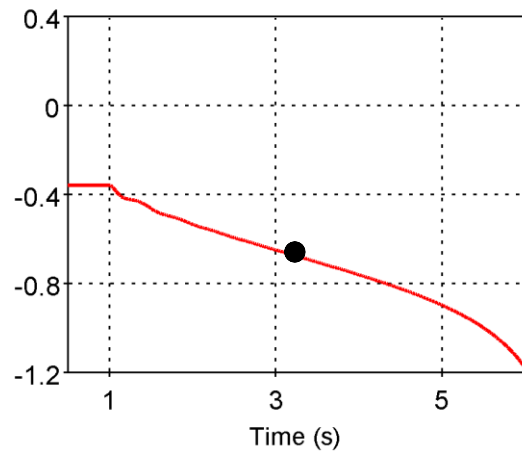
Σχήμα Β.5 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 5: $0,47 - j0,22$ pu)



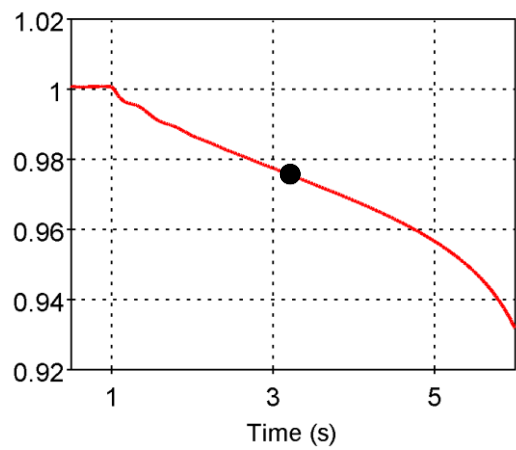
Σχήμα Β.6 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 5: $0,47 - j0,22 pu$)



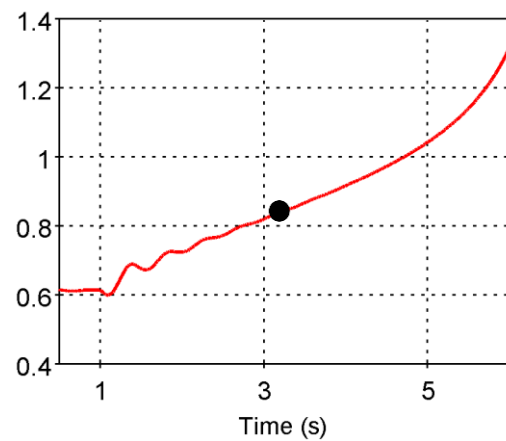
(α) Ενεργός ισχύς P



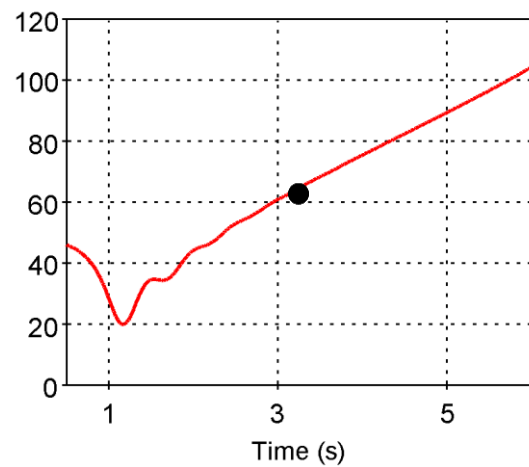
(β) Άεργος ισχύς Q



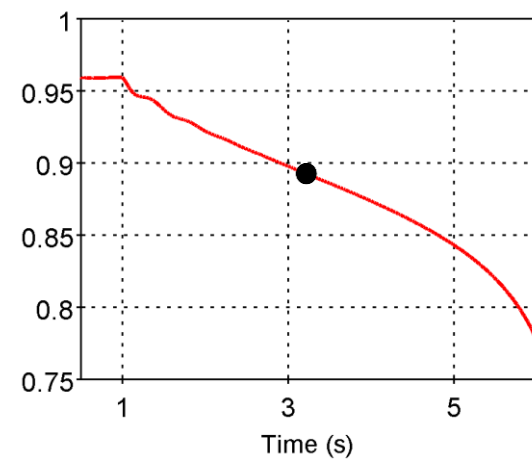
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

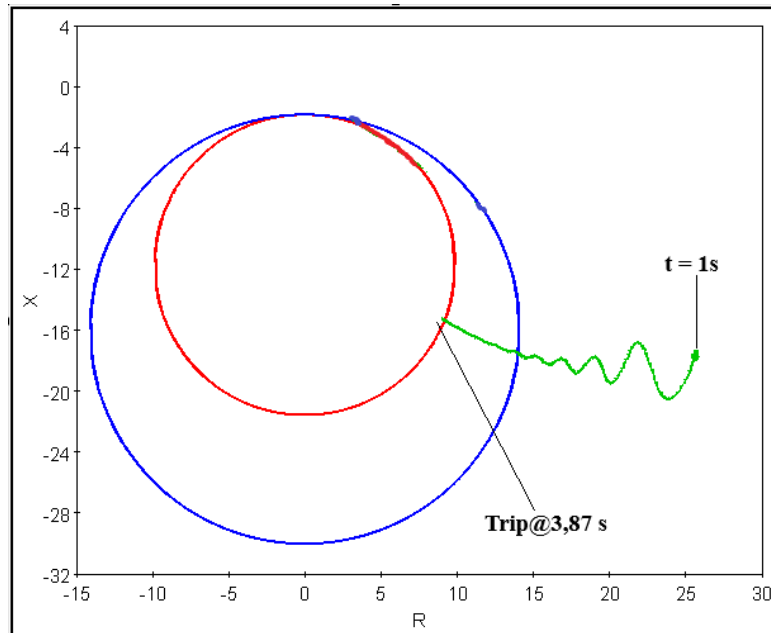


(ε) Γωνία δρομέα δ

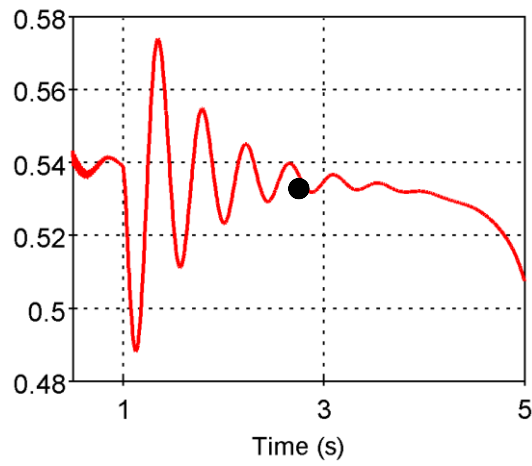


(στ) Ροή διακένου ψ

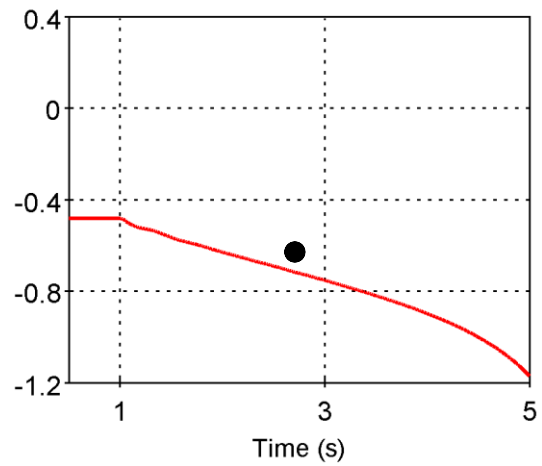
Σχήμα Β.7 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 6: $0,51 - j0,34 pu$)



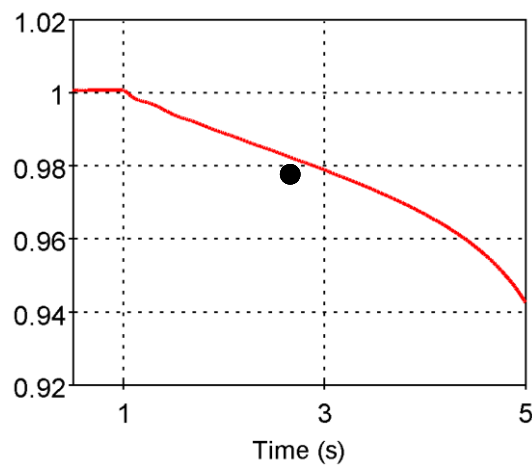
Σχήμα Β.8 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 6: $0,51 - j0,34$ pu)



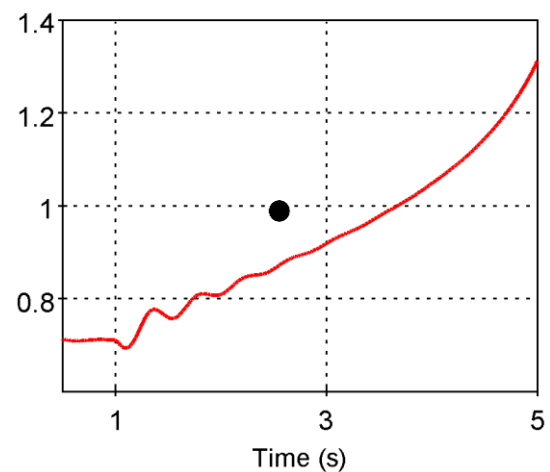
(α) Ενεργός ισχύς P



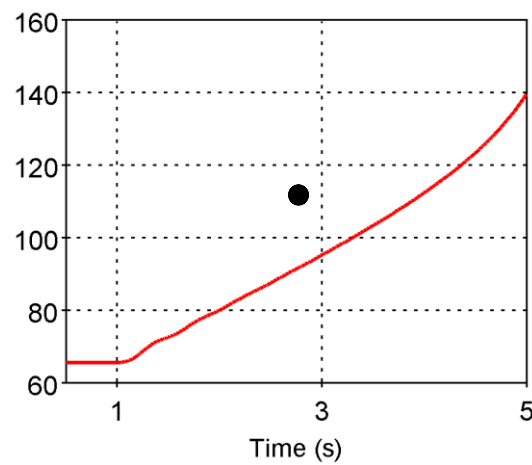
(β) Άεργος ισχύς Q



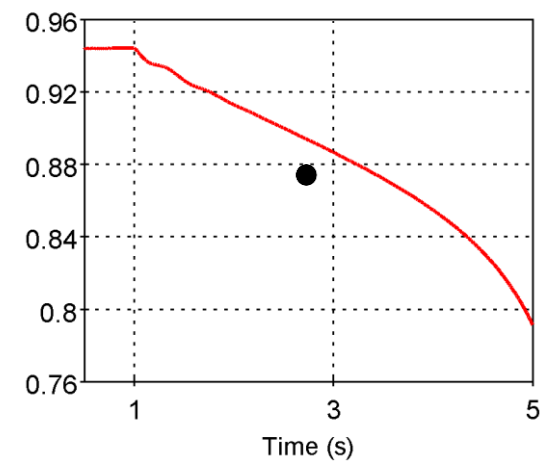
(γ) Τερματική τάση V



(δ) Ρεύμα εξόδου I

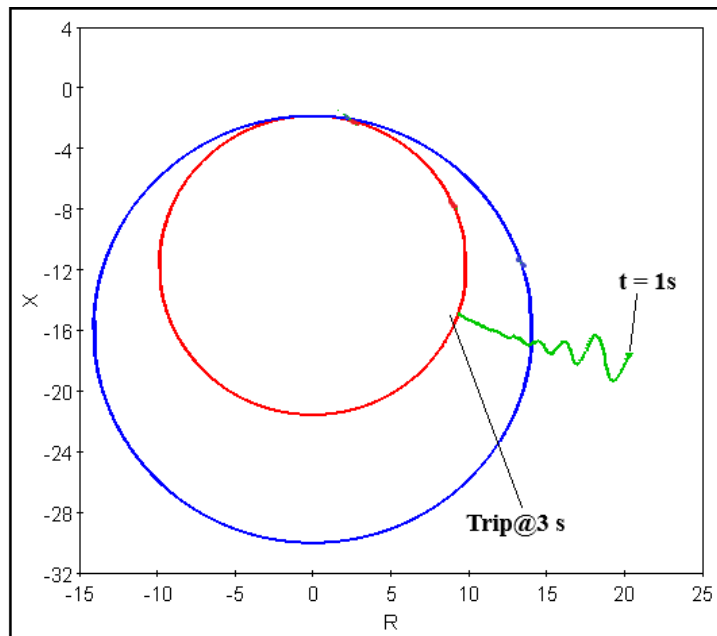


(ε) Γωνία δρομέα δ



(στ) Ροή διακένου ψ

Σχήμα Β.9 Χρονικές διακυμάνσεις χαρακτηριστικών μεγεθών της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 7: $0,54 - j0,46$ pu)



Σχήμα Β.10 H/N mho offset της γεννήτριας μετά από απώλεια διέγερσης (Σενάριο 7: $0,54 - j0,46 pu$)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Κυκλώματος Προσομοίωσης 2 Περιοχών

Σύγχρονη Γεννήτρια

$S = 900 \text{ MVA}$, $V = 20 \text{ kV}$, 60 Hz , $R_a = 0,0025 \text{ pu}$, $X_l = 0,2 \text{ pu}$, $X_d = 1,8 \text{ pu}$, $X_q = 1,7 \text{ pu}$, $X'_d = 0,3 \text{ pu}$, $X'_q = 0,55 \text{ pu}$, $X''_d = X''_q = 0,25 \text{ pu}$, $T'_{d0} = 8 \text{ s}$, $T''_{d0} = 0,03 \text{ s}$, $T'_{q0} = 0,4 \text{ s}$, $T''_{q0} = 0,05 \text{ s}$, $H = 6,5 \text{ s}$

Διέγερση

$K = 200 \text{ pu}$, $T_e = 0 \text{ s}$, $E_{max} = 10 \text{ pu}$, $E_{min} = -10 \text{ pu}$, $T_a = 1 \text{ s}$, $T_b = 10 \text{ s}$

Σταθεροποιητής

$T_1 = 0,05 \text{ s}$, $T_2 = 0,02 \text{ s}$, $T_3 = 3 \text{ s}$, $T_4 = 5,4 \text{ s}$, $T_5 = 10 \text{ s}$, $T_6 = 0 \text{ s}$, $K_s = 20 \text{ pu}$, $A_1 = 0 \text{ s}$, $A_2 = 0 \text{ s}$, $V_{stmax} = 999 \text{ pu}$, $V_{stmin} = -999 \text{ pu}$.

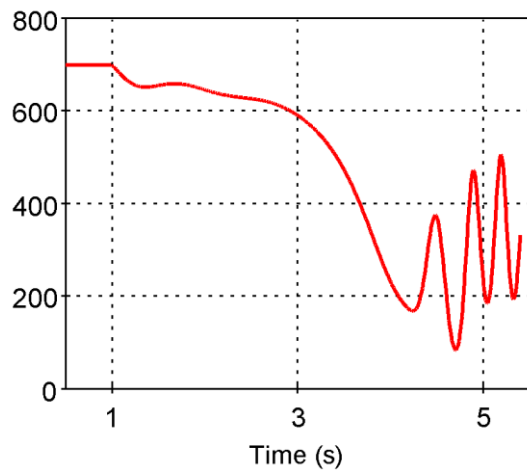
Στοιχεία Ζυγών

Ζυγός 1 (PV): $V_B = 20 \text{ kV}$, $1,03 \angle 20,07 \text{ pu}$
Ζυγός 2 (PV): $V_B = 20 \text{ kV}$, $1,01 \angle 10,31 \text{ pu}$
Ζυγός 3 (SLACK): $V_B = 20 \text{ kV}$, $1,03 \angle -7 \text{ pu}$
Ζυγός 4 (PV): $V_B = 20 \text{ kV}$, $1,01 \angle -17,19 \text{ pu}$
Ζυγός 5 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $1,00 \angle 13,61 \text{ pu}$
Ζυγός 6 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $0,97 \angle 3,52 \text{ pu}$
Ζυγός 7 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $0,96 \angle -4,89 \text{ pu}$
Ζυγός 8 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $0,97 \angle -18,76 \text{ pu}$
Ζυγός 9 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $0,97 \angle -32,35 \text{ pu}$
Ζυγός 10 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $0,98 \angle -23,94 \text{ pu}$
Ζυγός 11 (PQ): $V_B = 230 \text{ kV}$, $1,00 \angle -13,63 \text{ pu}$

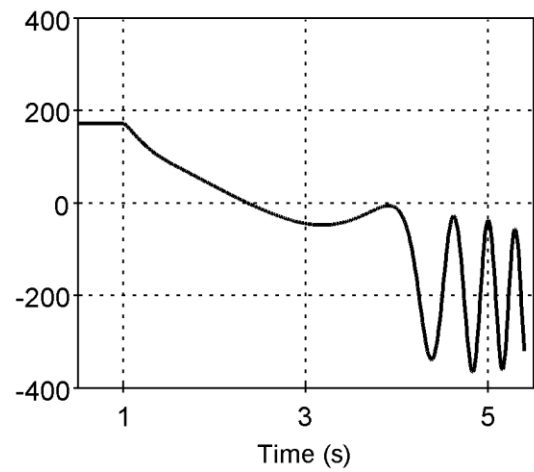
Μετασχηματιστές Ανύψωσης

$S = 900 \text{ MVA}$, $V1 = 20 \text{ kV}$, $V2 = 230 \text{ kV}$, 60 Hz , $X = 0,15 \text{ pu}$

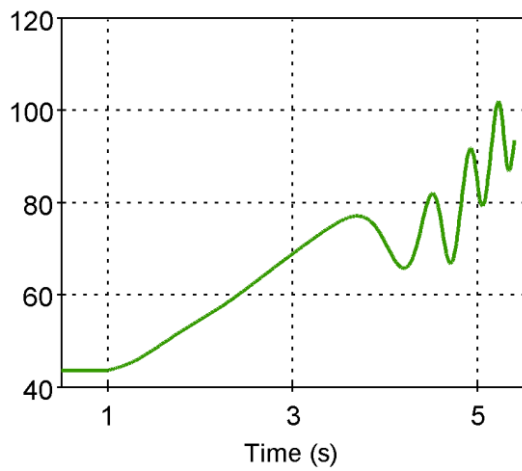
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Συμπληρωματικά Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Απώλειας Διέγερσης Συστήματος δύο Περιοχών



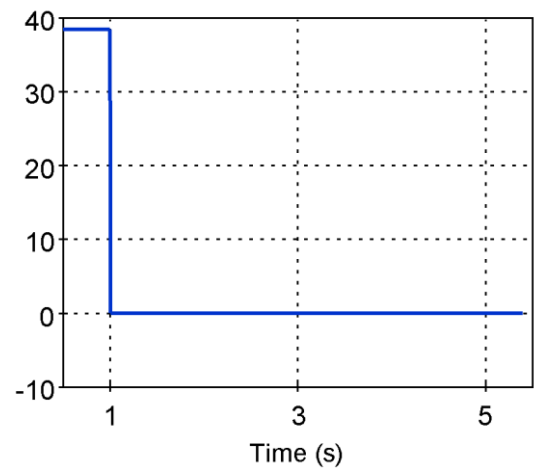
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

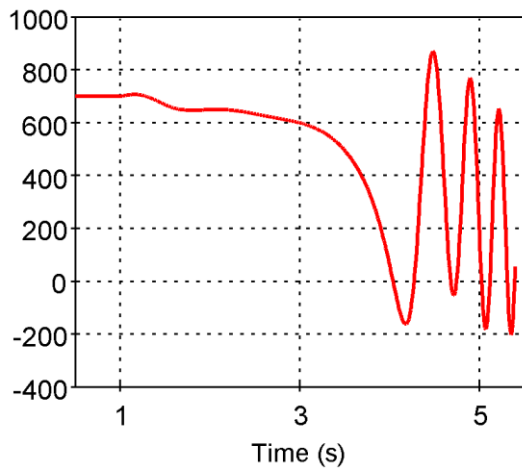


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

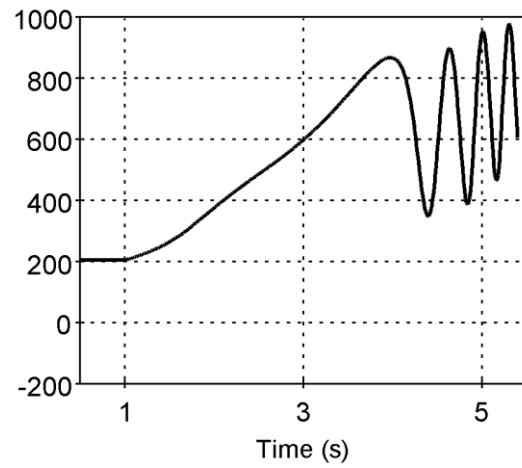


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

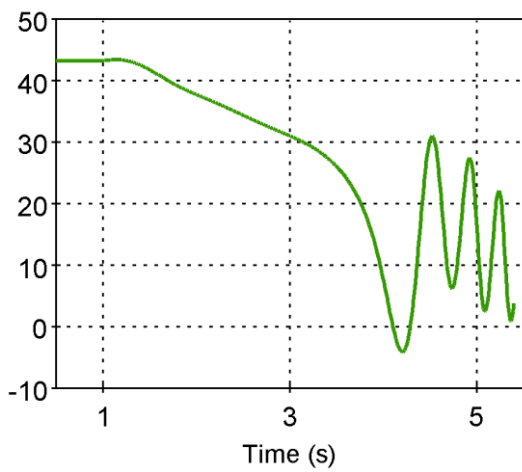
Σχήμα Δ.1 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο Α με $E_f^{max} = 3 pu$



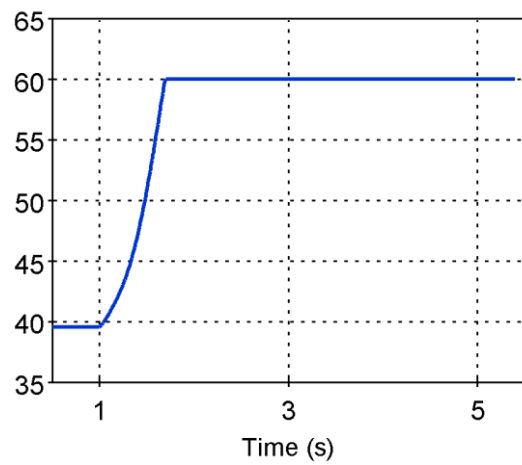
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

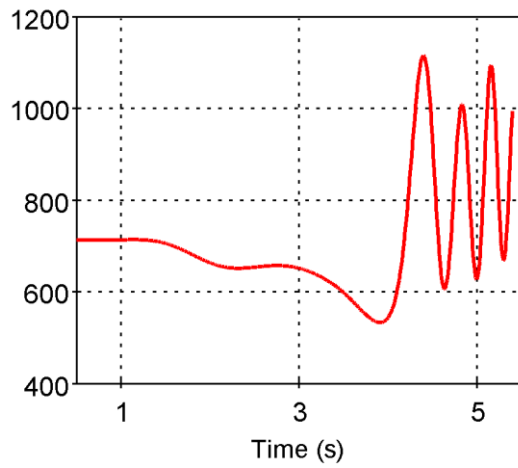


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

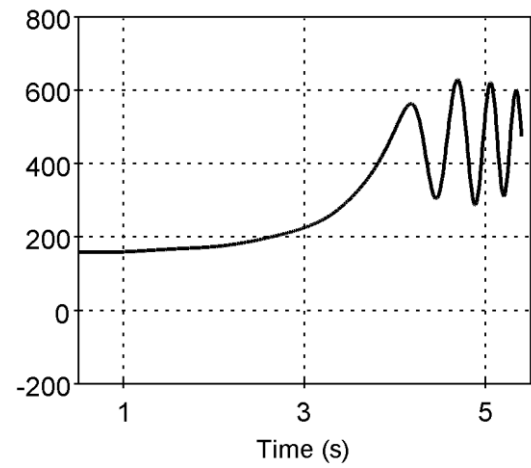


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

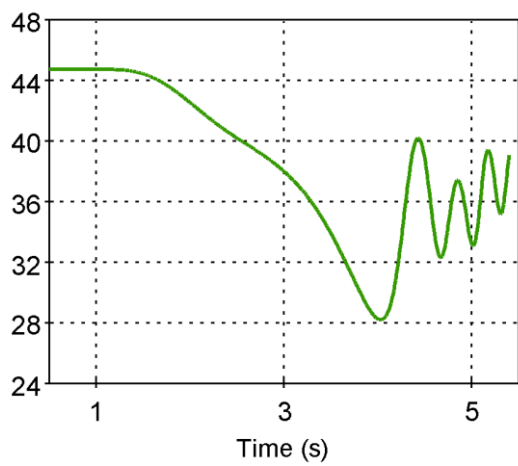
Σχήμα Δ.2 Απόκριση γεννήτριας G2 στο σενάριο Α με $E_f^{max} = 3 \text{ pu}$



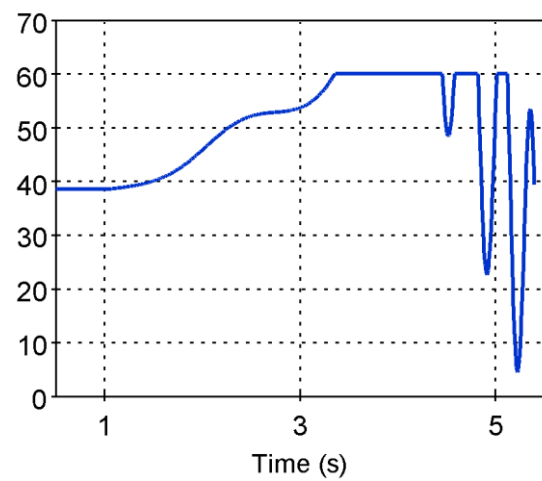
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

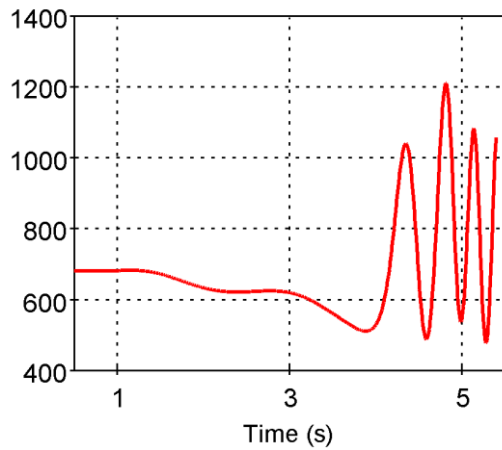


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

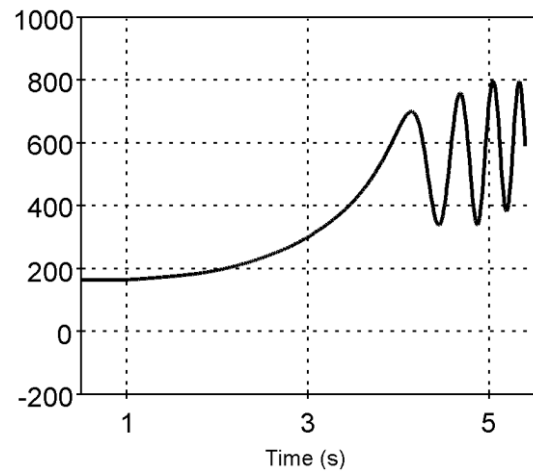


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

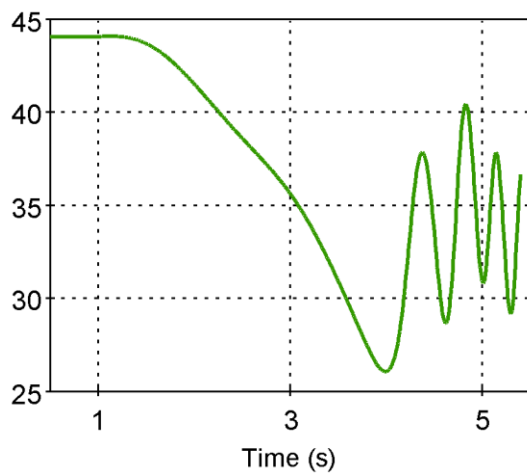
Σχήμα Δ.3 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο Α με $E_f^{max} = 3 pu$



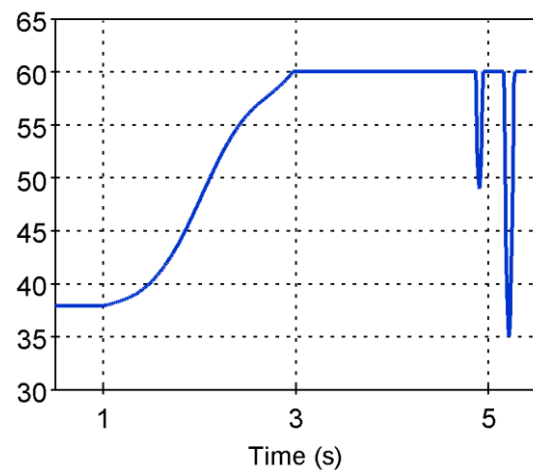
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

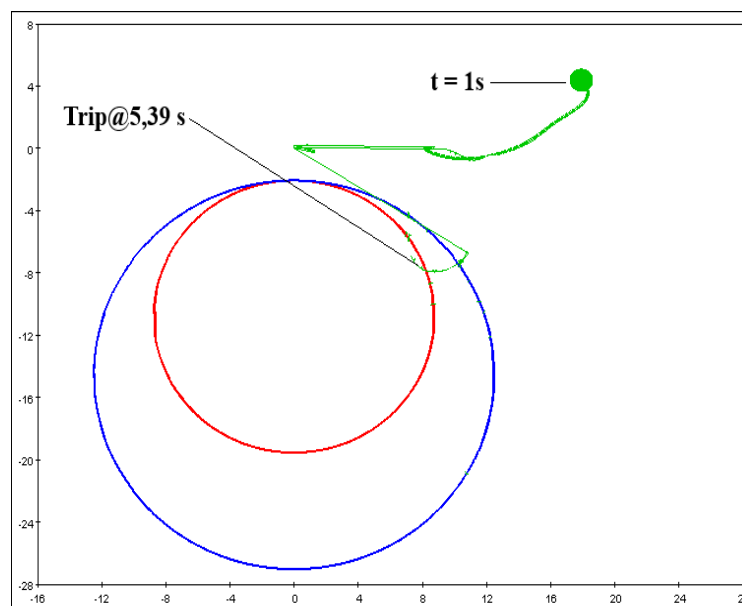


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

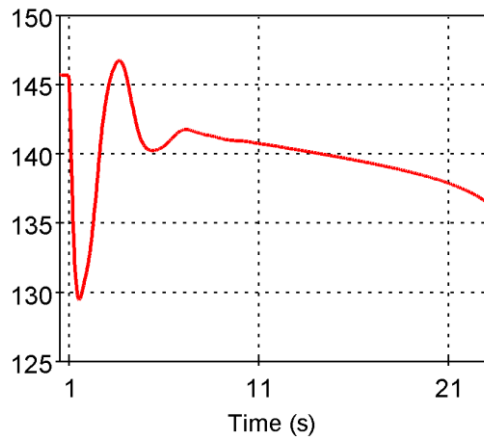


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

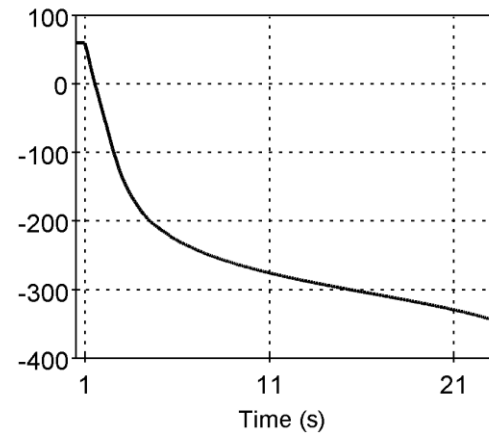
Σχήμα Δ.4 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο Α με $E_f^{max} = 3 \text{ pu}$



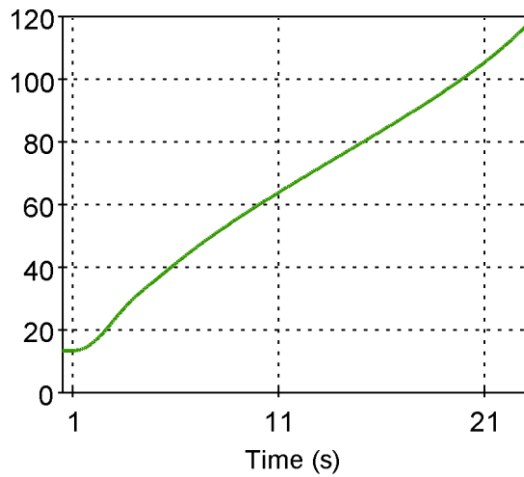
Σχήμα Δ.5 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο Α με $E_f^{max} = 3 \text{ pu}$



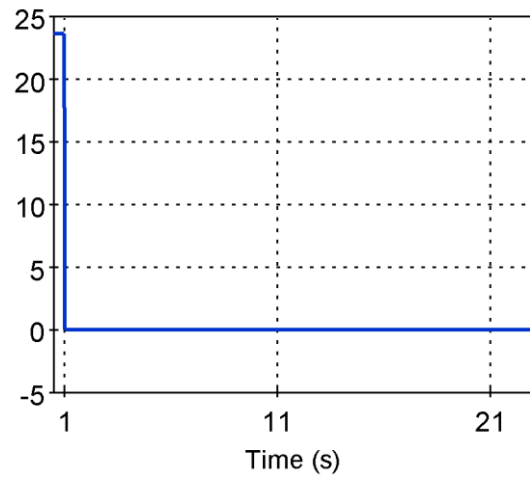
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

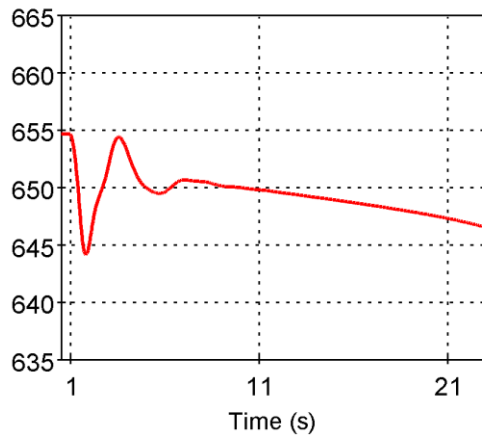


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

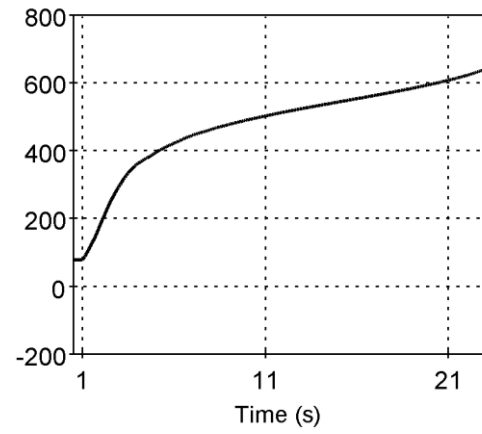


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

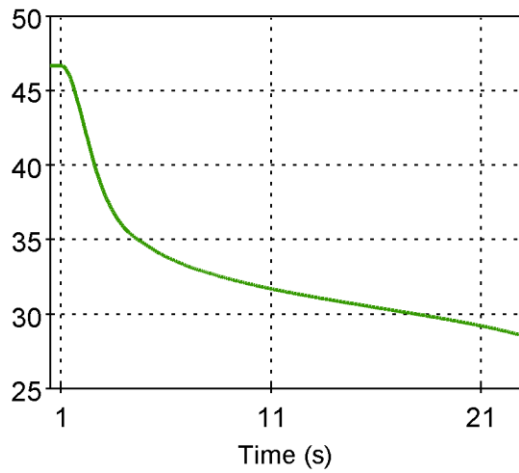
Σχήμα Α.6 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 3 \text{ pu}$



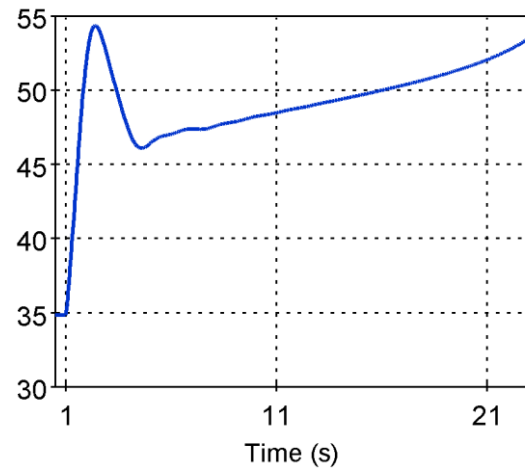
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

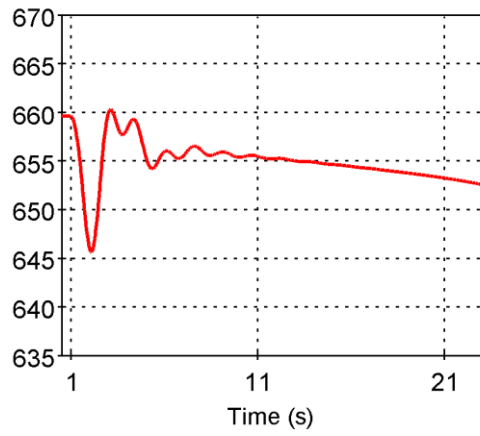


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

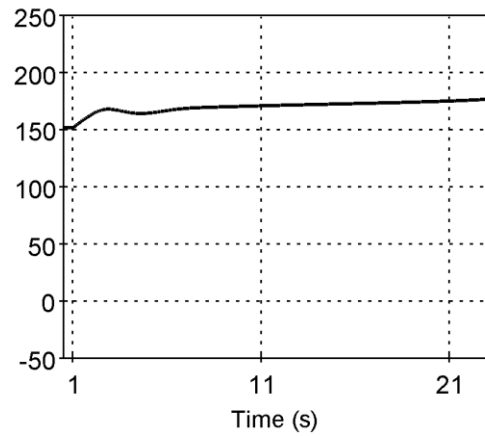


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

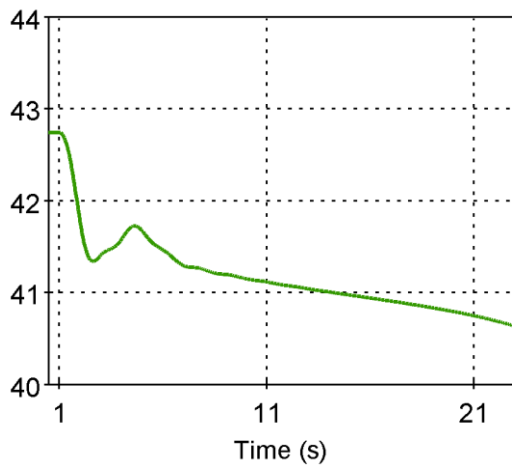
Σχήμα Δ.7 Απόκριση γεννήτριας G2 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 3 pu$



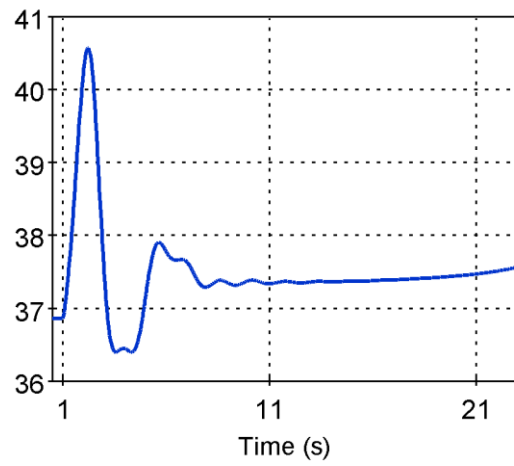
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

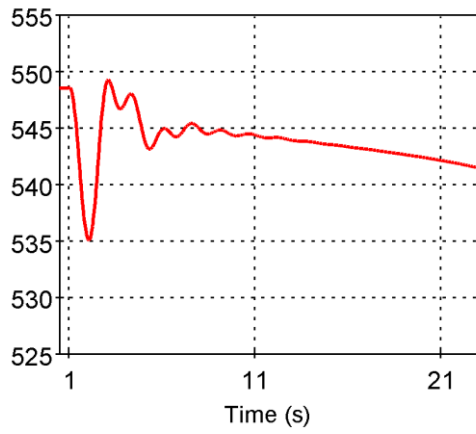


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

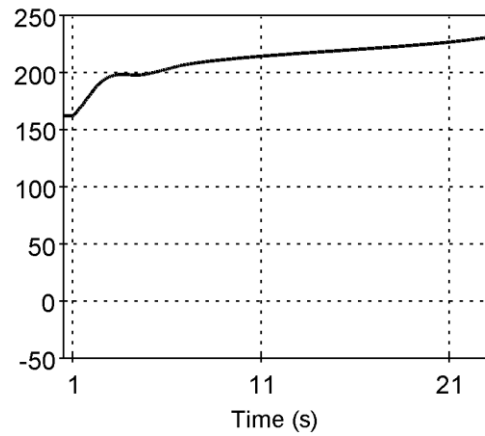


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

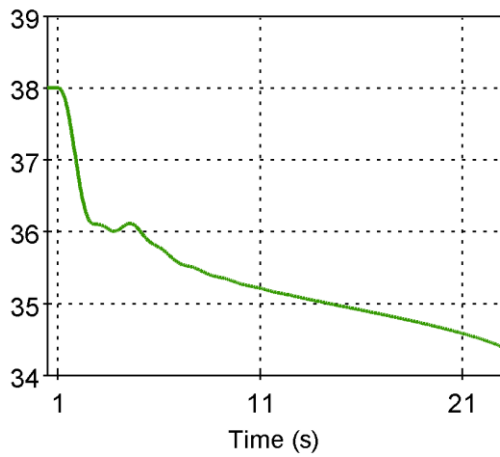
Σχήμα 1.8 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 3 pu$



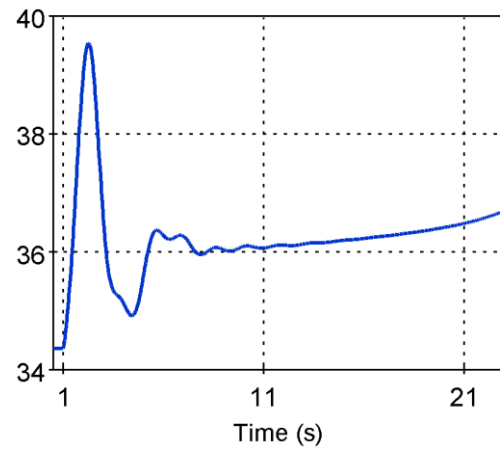
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

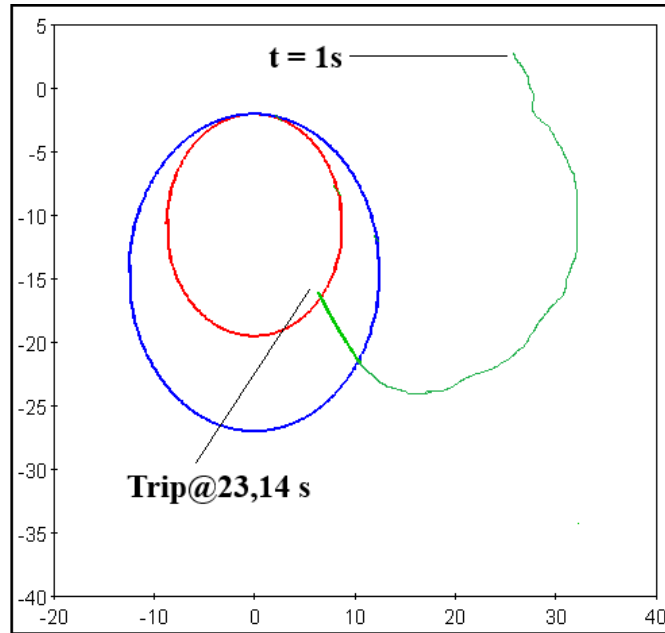


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

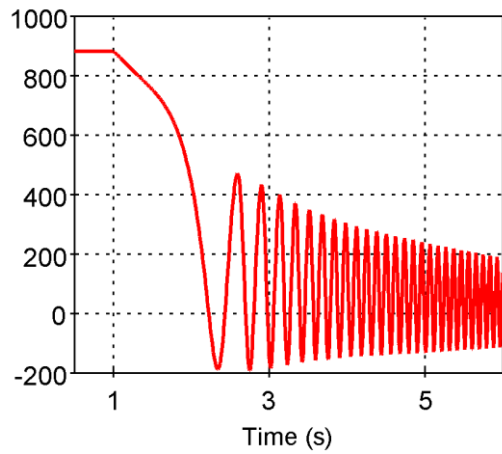


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

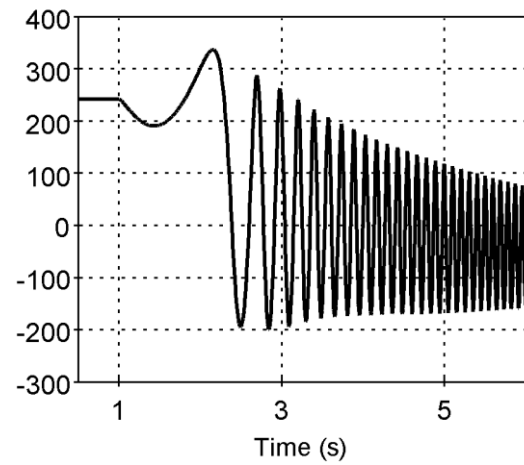
Σχήμα Δ.9 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 3 pu$



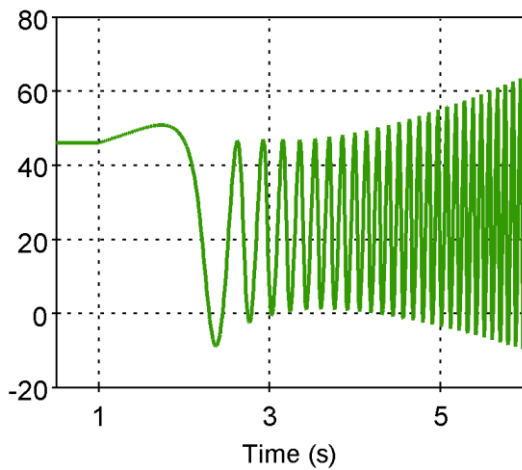
Σχήμα 4.10 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο B με $E_f^{max} = 3 pu$



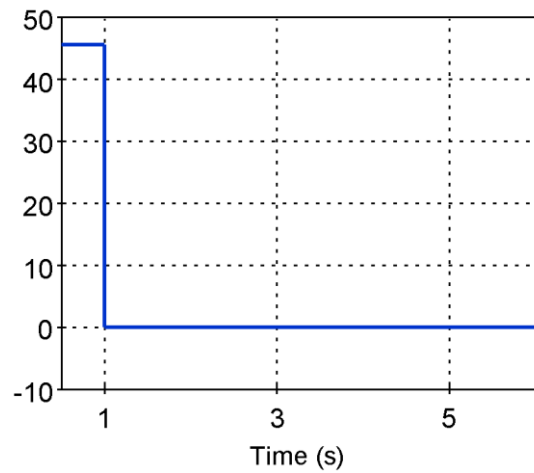
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Αεργός ισχύς Q (MVAR)

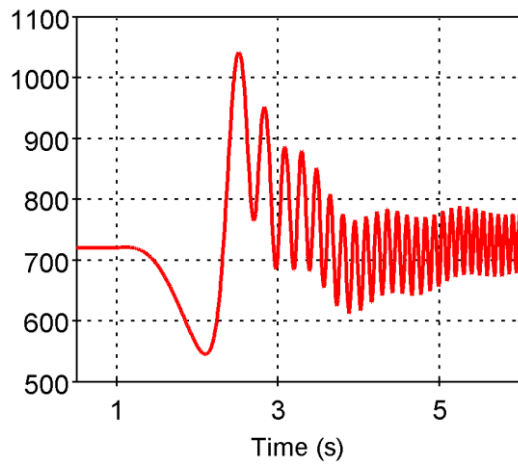


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

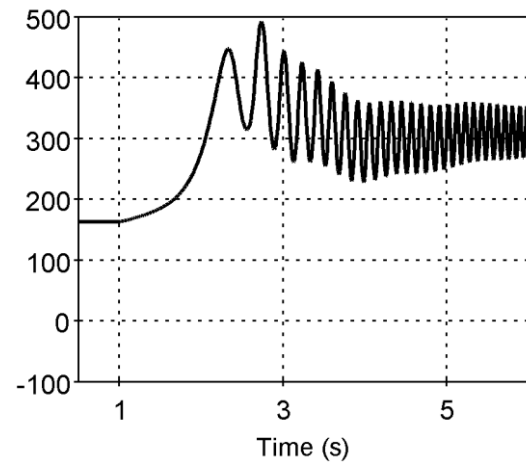


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

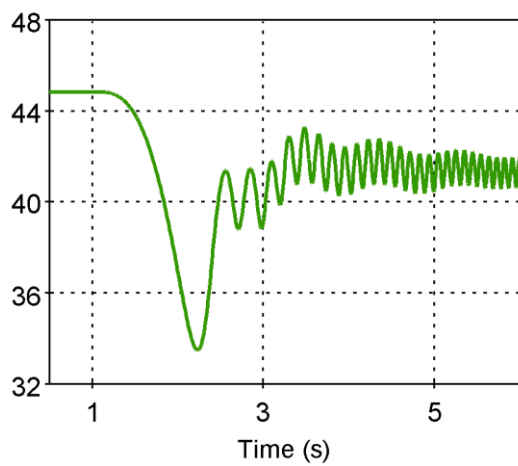
Σχήμα 4.11 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 3 pu$



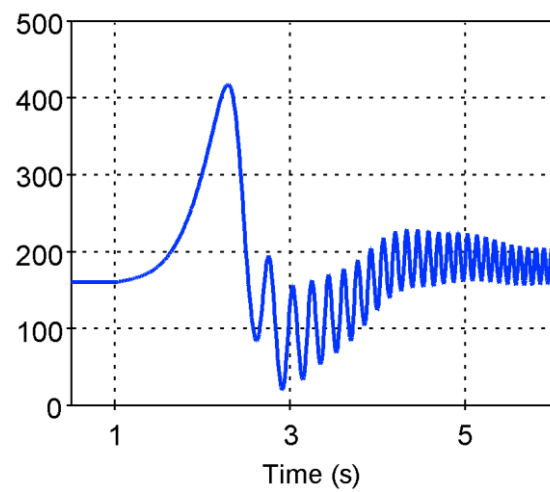
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

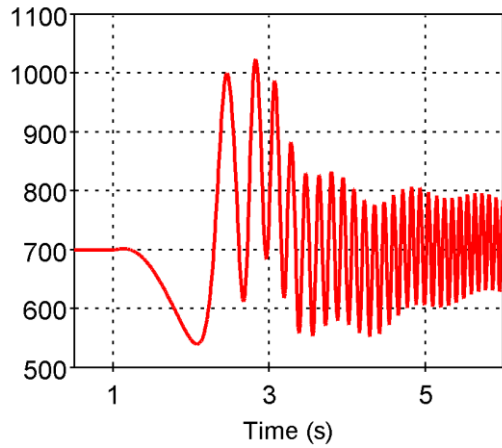


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

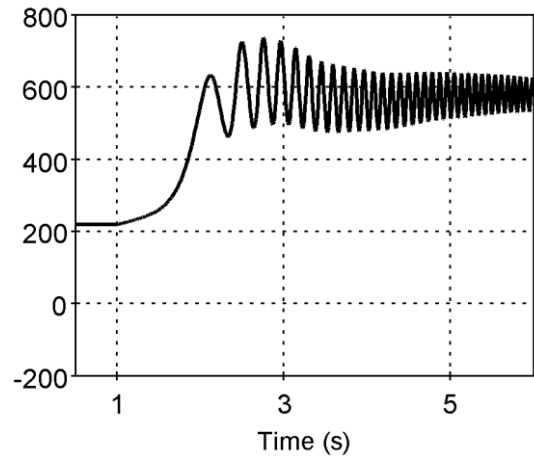


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

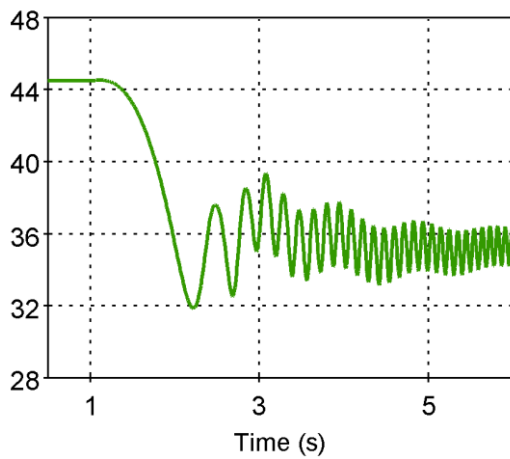
Σχήμα Δ.12 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 3 pu$



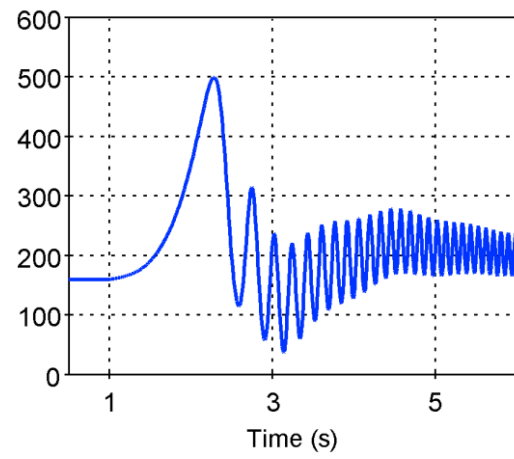
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

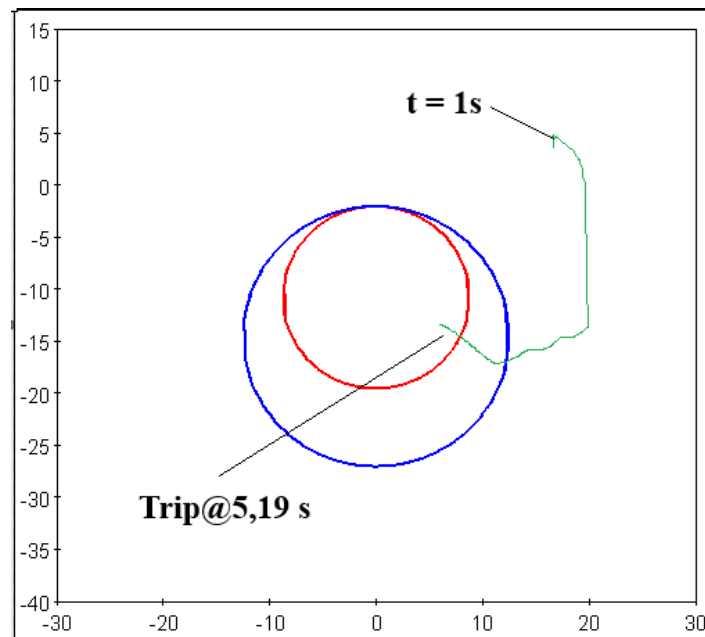


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

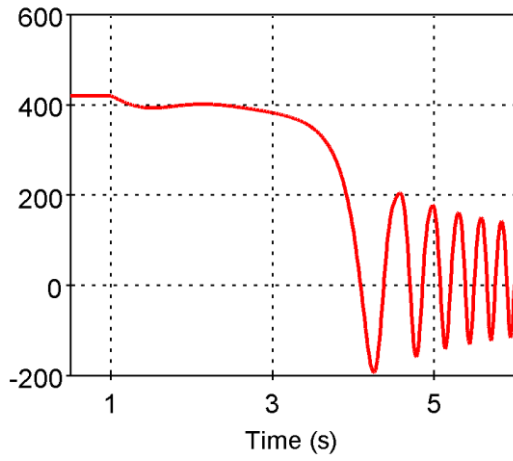


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

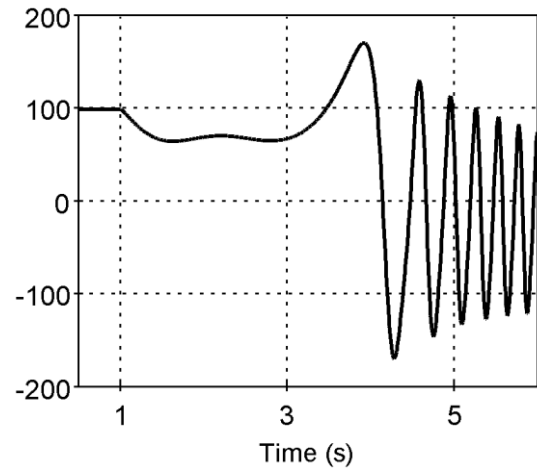
Σχήμα Δ.13 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 3 pu$



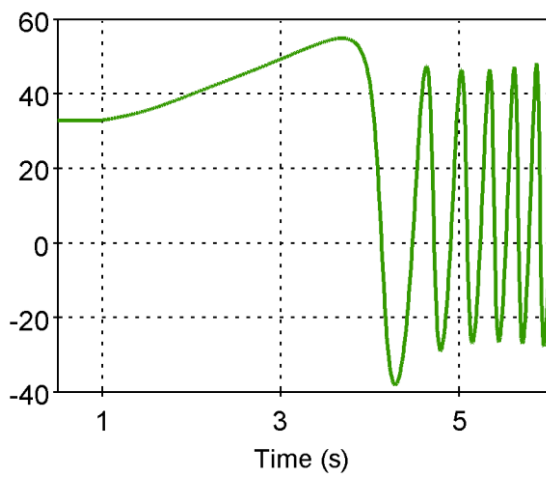
Σχήμα Δ.14 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο Γ με $E_f^{max} = 3 pu$



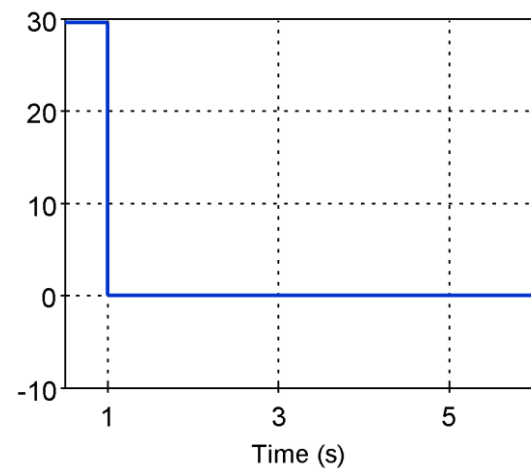
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Άεργος ισχύς Q (MVAR)

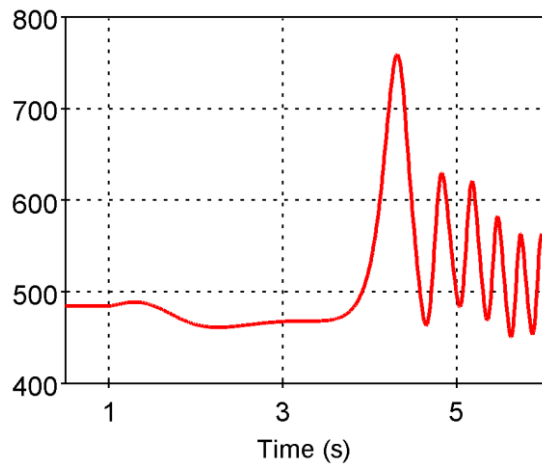


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

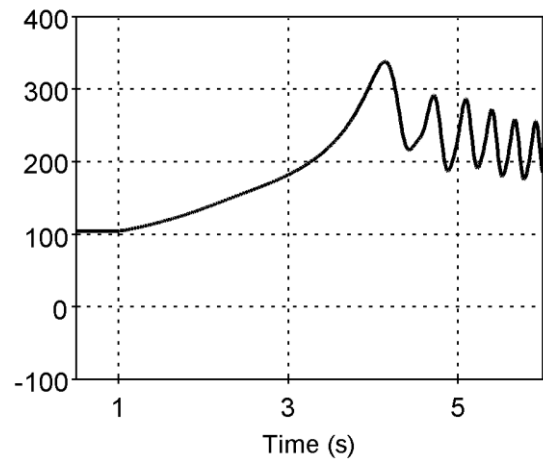


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

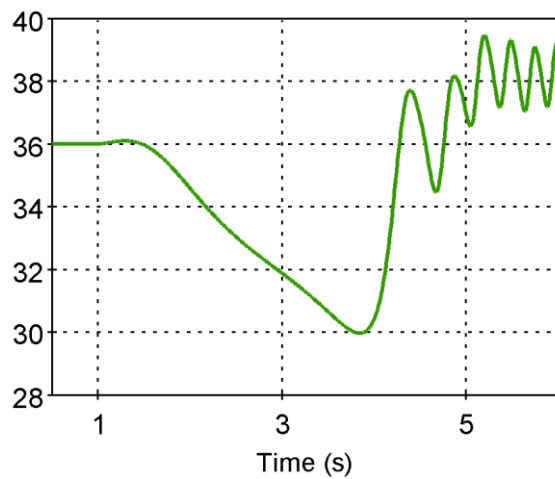
Σχήμα Δ.15 Απόκριση γεννήτριας G1 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 3 pu$



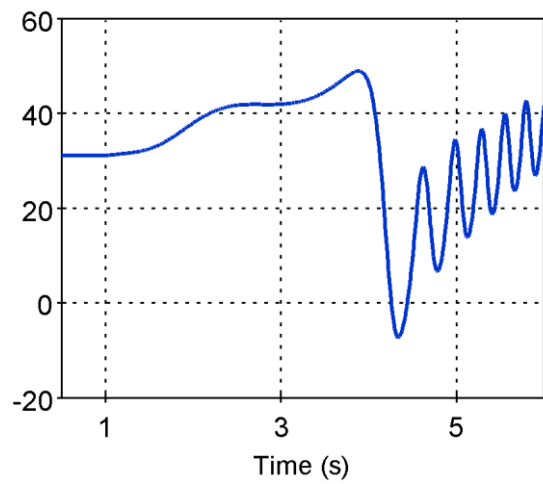
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

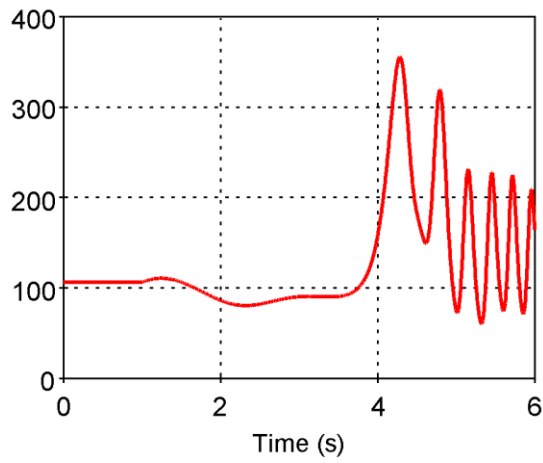


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)

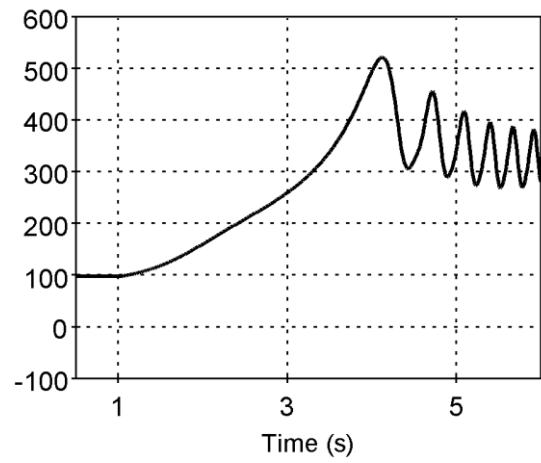


(δ) Εσωτερική τάση E_f (kV)

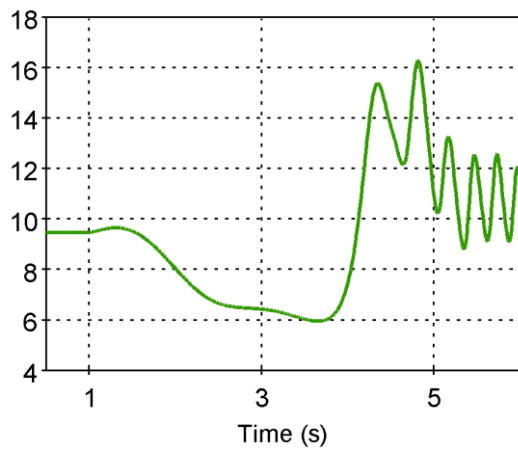
Σχήμα Δ.16 Απόκριση γεννήτριας G3 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 3 pu$



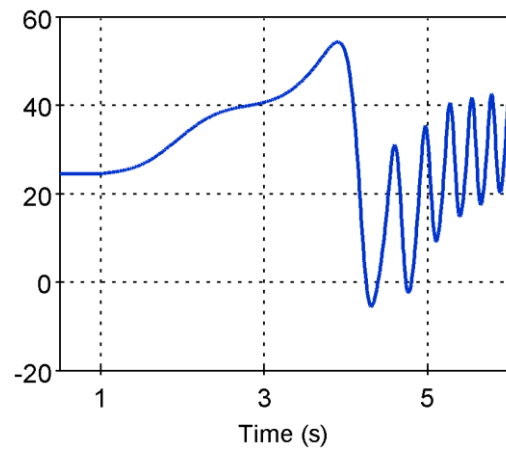
(α) Ενεργός ισχύς P (MW)



(β) Λεργός ισχύς Q (MVAR)

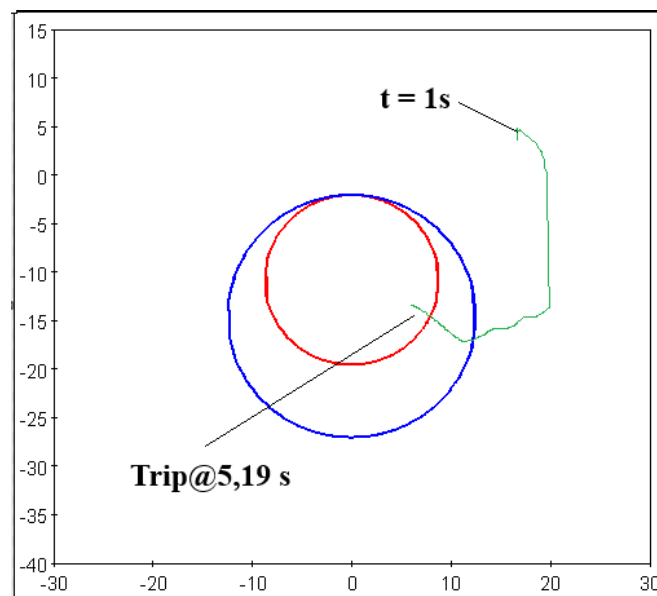


(γ) Γωνία δρομέα δ (μοίρες)



(δ) Εσωτερική Τάση E_f (kV)

Σχήμα Δ.17 Απόκριση γεννήτριας G4 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 3 pu$



Σχήμα Δ.18 H/N mho offset γεννήτριας G1 στο σενάριο Δ με $E_f^{max} = 3 pu$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] D. Reimert, *Protective Relaying for Power Generation Systems*, CRC Press, 2006.
- [2] IEEE *Tutorial on the Protection of Synchronous Generators*, 2nd Edition, 2011
- [3] A. Hasani and F. Haghjoo, “A secure and setting-free technique to detect loss of field in synchronous generators,” *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 32, no. 4, pp. 1512–1522, Dec. 2017.
- [4] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Συμμετρία, 2010.
- [5] S.J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw – Hill, 2004
- [6] Γ. Β. Γιαννακόπουλος, Ν. Α. Βοβός, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Ζήτη, 2008
- [7] J. L. Blackburn, T. J. Domin, *Protective Relaying Principles and Applications*, Third Edition, CRC Press, 2007
- [8] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005
- [9] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw – Hill, 1994
- [10] Κ. Βουρνάς, Β.Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας, Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος*, Εκδόσεις Συμμετρία, 2011
- [11] IEEE Benchmark Systems for Small – Signal Stability Analysis and Control, 2015