



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

**ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΕΩΣ
ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΕΛΕΓΧΟ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΛΗΨΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΙΓΛΗ Κ. ΜΕΤΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Κ. Δ. ΒΟΥΡΝΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003



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

**ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΕΩΣ
ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΕΛΕΓΧΟ
ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΛΗΨΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΙΓΛΗ Κ. ΜΕΤΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Κ. Δ. ΒΟΥΡΝΑΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Κορρές
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

ΑΘΗΝΑ
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2003

.....
Αίγλη Κ. Μέτσιου

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

Copyright © Αίγλη Κ. Μέτσιου, 2003.

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

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μέτρων εκτάκτου ανάγκης για την προστασία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) από αστάθεια τάσης. Συγκεκριμένα προτείνεται η εφαρμογή αντιστρόφου ελέγχου στους μηχανισμούς μεταβολής της λήψης των μετασχηματιστών διανομής (Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο, ΣΑΤΦ). Η μέθοδος αυτή αντιστρέφει τον έλεγχο των μηχανισμών ΣΑΤΦ, ώστε να ρυθμίζει την τάση πρωτεύοντος (τάση δικτύου) και όχι την τάση δευτερεύοντος, όπως στην κανονική λειτουργία.

Για την ανάλυση της μεθόδου αυτής χρησιμοποιήθηκαν δύο απλά ηλεκτρικά συστήματα: ένα σύστημα τριών ζυγών, όπου μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα αυτοεπαναφερόμενο φορτίο μέσω ενός μετασχηματιστή εξοπλισμένου με μηχανισμό ΣΑΤΦ και ένα σύστημα έξι ζυγών, όπου γεννήτρια με τα ίδια χαρακτηριστικά τροφοδοτεί δύο αυτοεπαναφερόμενα φορτία. Στα συστήματα αυτά εμφανίζεται μία διαταραχή, που είναι η απώλεια μιας γραμμής μεταφοράς και έτσι μεταπίπτουν σε αστάθεια τάσης. Ο αντιστροφος έλεγχος των ΣΑΤΦ ενεργοποιείται όταν η τάση δικτύου πέσει κάτω από μια καθορισμένη τιμή κατωφλιού και στη συνέχεια η τάση αναφοράς στην πλευρά του δικτύου αυξάνει χρησιμοποιώντας μια παράμετρο διόρθωσης.

Η επίδραση του αντιστρόφου ελέγχου στη συμπεριφορά του κάθε συστήματος μετά τη διαταραχή μελετάται με προσομοιώσεις που βασίζονται στο διακριτό, μη γραμμικό μοντέλο του συστήματος. Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προσδιορίζουμε τις κατάλληλες τιμές των παραμέτρων του αντιστρόφου ελέγχου, της τάσης κατωφλιού και της διόρθωσης της τάσης πρωτεύοντος. Ειδικά στο σύστημα των δύο φορτίων προκύπτει το πρόβλημα της επιλογής του ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί, το οποίο επίσης αρχικά εξετάζεται με τη βοήθεια προσομοιώσεων.

Η συμπεριφορά του συστήματος δύο φορτίων προσεγγίζεται και με χρήση μοντέλου συνεχούς χρόνου, στο οποίο εφαρμόζουμε γραμμικοποίηση και ανάλυση ιδιοτιμών. Παράλληλα εξάγεται ο πίνακας ευαισθησιών των ελεγχόμενων τάσεων ως προς τις μεταβολές των σχέσεων μετασχηματισμού στα ΣΑΤΦ, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί για την επιλογή των ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφούν.

Ο σχεδιασμός της μεθόδου αντιστροφής ελέγχου των ΣΑΤΦ βασίζεται στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω προσεγγίσεις.

Λέξεις κλειδιά:

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), αστάθεια τάσης, κατάρρευση τάσης, Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΦ), μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης, αντιστροφος έλεγχος ΣΑΤΦ.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the design of emergency countermeasures in order to protect Power Electric Systems against voltage instability. In particular, a reverse-logic control of Load Tap Changers (LTCs) on bulk power delivery transformers is proposed. This modified control is also referred to as tap-reversing. This technique consists in reversing the control logic of LTCs by regulating the primary voltage (transmission voltage) instead of the secondary voltage, as in normal operation of LTCs.

The proposed emergency control is investigated by using two simple electric systems: a three-bus system in which a generator is feeding a self-restoring load through an LTC transformer and a six-bus system in which a generator with the same characteristics is feeding two self-restoring loads. On both systems we consider a contingency, which is the loss of one transmission line. The contingency leads to voltage instability and collapse. The reverse-logic control of LTCs is activated, when the network voltage gets below a certain threshold, and then the voltage reference for the transmission side is increased to a higher value using a correction parameter.

The effects of the modified control logic on the system evolution after the contingency are investigated with simulation methods, based on the non-linear discrete time model. We use the results of the simulations to define the appropriate values of the tap-reversing parameters, such as voltage threshold and correction of transmission voltage. Another issue that arises is the selection of the LTC that should be reversed, referring to the two-loads system. The first conclusions on the LTC selection are drawn from the simulations.

Following this, the response of the two-loads system is approached also by using the continuous time model and applying linearization and stability analysis techniques. In addition we calculate the sensitivity matrix of the controlled voltages with regard to the tap changes, which is used to determine the LTC, which should be reversed. The design of the reverse-logic control method is based on the conclusions deduced from the above approaches.

Key words:

Power Electric Systems, voltage instability, voltage collapse, Load Tap Changers (LTCs), emergency countermeasures, reverse-logic control on LTCs or tap-reversing.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την καθοδήγηση και επίβλεψη του κ. Μιχάλη Καρυστιανού, υποψήφιο Διδάκτορα της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά για το χρόνο που αφιέρωσε και την πολύτιμη βοήθεια του. Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βουρνά Κωνσταντίνο, Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. για τις γνώσεις που μου παρείχε και την εποικοδομητική καθοδήγησή του.

Θέλω, τέλος, να ευχαριστήσω τους υπεύθυνους εκπαίδευσής μου στον Τομέα Προστασίας της Δ.Ε.Η. Α.Ε. Ρούφ, τον κ. Ζαβόλα Κωνσταντίνο, Βοηθό Διευθυντή για τις βασικές γνώσεις στα θέματα της προστασίας που μου μετέδωσε, τον κ. Μαυρόματο Κωνσταντίνο, Τομεάρχη Προστασίας, για την επιστημονική στήριξη καθώς και τους κ.κ. Βλάχο Γεώργιο, Προϊστάμενο του Υποτομέα Νέας Τεχνολογίας / Τ.Π., Στούμπο Παναγιώτη και Κατοίκο Στέφανο για την συνεργασία που είχαμε στο Εργαστήριο Νέας Τεχνολογίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 13 |
| 1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 13 |
| 1.2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 14 |
| 1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ | 17 |
| 1.3.1 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς | 17 |
| 1.3.2 Σχέση ισχύος-τάσης | 18 |
| 1.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου | 19 |
| 1.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΣΗΕ | 22 |
| 1.4.1 Γενικά - Δυναμική αποκατάστασης φορτίου | 22 |
| 1.4.2 Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) | 23 |
| 1.4.3 Θερμοστατικά φορτία | 28 |
| 1.5 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ | 30 |
| 1.6 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ | 31 |
| | |
| 2 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 33 |
| 2.1 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΣΗΕ | 33 |
| 2.1.1 Γενικά | 33 |
| 2.1.2 Διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων | 35 |
| 2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ | 36 |
| 2.2.1 Γραμμικοποίηση και Ιακωβιανοί πίνακες | 36 |
| 2.2.2 Ιδιοτιμές – Ιδιοδιανύσματα - Ρυθμοί απόκρισης | 38 |
| 2.3 ΟΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ | 40 |
| 2.3.1 Γενικά | 40 |
| 2.3.2 Εφαρμογή στις γεννήτριες με περιορισμό υπερδιέγερσης | 41 |
| | |
| 3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ | 43 |
| 3.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ | 43 |
| 3.1.1 Γενικά | 43 |
| 3.1.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά της προστασίας | 44 |
| 3.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ | 48 |
| 3.2.1 Γενικά | 48 |
| 3.2.2 Αρχές προστασίας | 49 |
| 3.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ | 53 |
| | |
| 4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΕΩΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ | 55 |
| 4.1 ΜΕΤΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΚΤΑΚΤΟΥ ΑΝΑΓΚΗΣ | 55 |
| 4.1.1 Γενικά | 55 |
| 4.1.2 Αρχές λειτουργίας του αντιστρόφου ελέγχου των ΣΑΤΦ | 56 |
| 4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ | 58 |
| 4.2.1 Περιγραφή συστήματος | 58 |
| 4.2.2 Εξισώσεις δικτύου του συστήματος | 60 |
| 4.2.3 Συμπεριφορά του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή | 60 |
| 4.2.4 Εφαρμογή μέτρων για την αντιμετώπιση της κατάρρευσης στο σύστημα | 63 |
| 4.2.5 Επίδραση της αντίδρασης σκεδάσεως του μετασχηματιστή | 67 |
| 4.2.6 Επίδραση της διόρθωσης ε στην λειτουργία του αντιστρόφου ελέγχου | 69 |
| 4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΑ | 75 |
| 4.3.1 Περιγραφή συστήματος | 75 |
| 4.3.2 Εξισώσεις του δικτύου | 76 |
| 4.3.3 Απόκριση συστήματος μετά τη διαταραχή χωρίς εφαρμογή μέτρων εκτάκτου ανάγκης | 77 |
| 4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1: $R_{01}=1.8 \text{ A.M.}$, $R_{02}=0.9 \text{ A.M.}$ | 81 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P1 | 81 |
| 4.4.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2 | 86 |
| 4.4.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού..... | 90 |
| 4.4.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και της απόκρισης του συστήματος χωρίς λήψη μέτρων εκτάκτου ανάγκης..... | 90 |
| 4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2: P _{o1} =1.2 Α.Μ., P _{o2} =1.55 Α.Μ..... | 92 |
| 4.5.1 Αντίστροφη ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P1 | 92 |
| 4.5.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2 | 99 |
| 4.5.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού..... | 103 |
| 4.5.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου | 105 |
| 4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3: P _{o1} =0.9 Α.Μ., P _{o2} =1.85 Α.Μ..... | 108 |
| 4.6.1 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P1 | 108 |
| 4.6.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2 | 112 |
| 4.6.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού..... | 116 |
| 4.6.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου | 116 |

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΜΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ 118

| | |
|--|-----|
| 5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ | 118 |
| 5.1.1 Γενικά | 118 |
| 5.1.2 Γραμμικοποίηση συστήματος και εύρεση πίνακα ευαισθησιών | 119 |
| 5.1.3 Αποτελέσματα γραμμικοποίησης και ανάλυσης του πίνακα ευαισθησιών σε κάθε μία από τις τρεις εφαρμογές στο σύστημα δύο φορτίων | 120 |
| 5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΣΑΤΦ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΕΛΕΓΧΟΥ | 125 |
| 5.2.1 Επιλογή του ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί με χρήση του πίνακα ευαισθησιών Α..... | 125 |
| 5.2.2 Σύγκριση της απόκρισης μετά από μικρή διαταραχή στο χώρο καταστάσεων για κάθε περίπτωση αντιστροφής..... | 128 |
| 5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ..... | 133 |
| 5.3.1 Γενικά | 133 |
| 5.3.2 Εφαρμογή 1η: P _{o1} =1.8 α.μ., P _{o2} =0.9 α.μ. | 134 |
| 5.3.3 Εφαρμογή 2η: P _{o1} =1.2 α.μ., P _{o2} =1.55 α.μ. | 136 |
| 5.3.4 Εφαρμογή 3η: P _{o1} =0.9 α.μ., P _{o2} =1.85 α.μ. | 139 |

6 ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ 142

| | |
|--|-----|
| 6.1 ΓΕΝΙΚΑ | 142 |
| 6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΔΙΚΤΥΟΥ..... | 143 |
| 6.2.1 Εφαρμογή 1 ^η : P _{o1} =1.8 α.μ., P _{o2} =0.9 α.μ. | 143 |
| 6.2.2 Εφαρμογή 2 ^η : P _{o1} =1.2 α.μ., P _{o2} =1.55 α.μ. | 147 |
| 6.2.3 Εφαρμογή 3 ^η : P _{o1} =0.9 α.μ., P _{o2} =1.85 α.μ. | 150 |

7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ..... 154

| | |
|-----------------------------------|-----|
| 7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 154 |
| 7.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ | 156 |

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 157

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 159

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζουμε το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης. Η καλή λειτουργία ενός ΣΗΕ συνίσταται στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας όπου και όταν υπάρχει ζήτηση, συνδυάζοντας την υψηλή αξιοπιστία με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό και οικολογικό κόστος. Η ηλεκτρική ενέργεια που παρέχει το σύστημα πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες ποιοτικές προδιαγραφές, όπως σταθερή τιμή συχνότητας και τάσης τροφοδότησης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διακριθούν σε τρεις ξεχωριστές φάσεις: την *παραγωγή*, την *μεταφορά* και την *διανομή*. Επειδή η ηλεκτρική ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευθεί, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που υπάρχει ζήτηση από τους καταναλωτές και επομένως βρίσκεται σε συνεχή ροή στα δίκτυα των ΣΗΕ.

Το σύστημα παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους υποσταθμούς ανυψώσεως της τάσης για την μεταφορά της. Στη φάση της παραγωγής πραγματοποιείται η μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών.

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεως του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσεως σε μέση τάση. Το δίκτυο μεταφοράς εκτός από το να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στις περιοχές κατανάλωσης, διασυνδέει τους σταθμούς παραγωγής αλλά και διαφορετικά ΣΗΕ μεταξύ τους.

Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) ημιτονοειδή τάση με σταθερή συχνότητα και οι τάσεις των τριών φάσεων θα πρέπει να βρίσκονται σε συμμετρία. Επίσης θα πρέπει περιορίζονται οι επιδράσεις του συστήματος σε άλλες εγκαταστάσεις, τηλεφωνικές, τηλεγραφικές ή ραδιοφωνικές, λόγω ηλεκτρικών ή μαγνητικών παρεμβολών.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται σε υψηλές τάσεις, διότι συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και επομένως πιο οικονομική λειτουργία. Αναλόγως της απόστασης και της μεταφερόμενης ισχύος χρησιμοποιούνται διάφορα επίπεδα τάσεων κατά το στάδιο της μεταφοράς. Ενδεικτικά αναφέρουμε τις τιμές : 66 kV, 11 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV (υψηλές τάσεις), 275 kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV (υπερυψηλές τάσεις), 750 kV και πειραματικά 1100 kV και 1500 kV (εξαιρετικά υψηλές τάσεις). Σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται και συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης, επειδή παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα, κυρίως στη μεταφορά μέσω καλωδίων. Τα δίκτυα μεταφοράς οργανώνονται κατά κανόνα σε βροχοειδή διάταξη, ώστε να δημιουργούνται περισσότεροι συνδυασμοί διαδρομών της ενέργειας και να επιτυγχάνεται καλύτερη οικονομία λειτουργίας.

Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές μέσης και χαμηλής τάσης, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στους τελικούς καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και ΜΤ/ΧΤ. Τα δίκτυα διανομής μπορεί να είναι υπόγεια (π.χ σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα) ή εναέρια. Η διάταξή τους είναι συνήθως βροχοειδής, αλλά λειτουργούν ακτινικά.

1.2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα ΣΗΕ είναι δυναμικά μη γραμμικά συστήματα τα οποία υφίστανται συνεχώς διάφορες μικρές ή σοβαρότερες διαταραχές προερχόμενες από μεταβολές της ζήτησης και της παραγωγής, από διακοπές ή ζεύξεις στοιχείων του συστήματος, καθώς και από βραχυκυκλώματα ή άλλα σφάλματα. Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των δικτύων καλύπτει μια μεγάλη περιοχή φαινομένων διαφορετικής φύσεως: ηλεκτρικά, μηχανικά και θερμικά φαινόμενα. Η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος διαρκεί χρονικά από μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου (υπερτάσεις χειρισμών, γραμμών ή καλωδίων) έως πολλά λεπτά (φαινόμενα μεταβολής της συχνότητας και ανταλλαγής ισχύος μεταξύ διασυνδεδεμένων δικτύων ή φαινόμενα τάσεως).

Η *ευστάθεια* αποτελεί μία από τις βασικές ιδιότητες που πρέπει να διέπει την λειτουργία ενός ΣΗΕ. Η απαίτηση για ευστάθεια είναι περισσότερο επιτακτική όσο πιο εκτεταμένο είναι το σύστημα και όσες περισσότερες διασυνδέσεις έχει με γειτονικά συστήματα.

Το σύστημα χαρακτηρίζεται γενικά *ευσταθές*, όταν υφιστάμενο διαταραχή από οποιαδήποτε αιτία, ενώ λειτουργεί σε ορισμένη μόνιμη κατάσταση, τείνει να επανέλθει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ίδια ή παρόμοια με την αρχική. Σαν *μόνιμη κατάσταση λειτουργίας* ορίζουμε μια συνήθη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος κατά την οποία εκτελεί τον προορισμό του, δηλαδή παράγει, μεταφέρει και διανέμει σε κάθε στιγμή την ζητούμενη κατανάλωση.

Διακρίνονται τα εξής είδη ευστάθειας [4,5]:

- Η *ευστάθεια μονίμου καταστάσεως ή σημείου λειτουργίας* που σχετίζεται με την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας και αφορά την απόκριση του συστήματος σε αργές και βαθμιαίες (μικρές) διαταραχές. Επίσης ονομάζεται *στατική ευστάθεια ή ευστάθεια μικρών διαταραχών*.

Η στατική ευστάθεια εξαρτάται από το εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας, αλλά όχι από τη διαταραχή, που θεωρείται απείρως μικρή κατά την ανάλυση ευστάθειας. Για την ανάλυση της στατικής ευστάθειας μπορούμε να γραμμικοποιήσουμε το σύστημα γύρω από το εξεταζόμενο σημείο λειτουργίας και να χρησιμοποιήσουμε τεχνικές ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων.

- Η *μεταβατική ευστάθεια ή ευστάθεια μεγάλων διαταραχών* που αναφέρεται στην απόκριση του συστήματος σε μεγάλες (σοβαρές) και απότομες διαταραχές (συνήθεις διαταραχές αυτού του τύπου είναι και τα βραχυκυκλώματα). Η μεταβατική ευστάθεια εξετάζει αν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε θέση να επανέρθει σε κανονική λειτουργία μετά από μια συγκεκριμένη μεγάλη διαταραχή και άρα εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος της διαταραχής.

Επίσης μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τα φαινόμενα αστάθειας σε ένα ΣΗΕ ανάλογα με την φύση των εμπλεκόμενων φαινομένων. Έτσι διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες ευστάθειας [3,12]:

- Η *ευστάθεια γωνίας δρομέα* αναφέρεται στην ικανότητα ενός συνόλου συνδεδεμένων σύγχρονων μηχανών να παραμένουν σε συγχρονισμό μετά από την υποβολή τους σε κάποια διαταραχή. Αστάθεια εμφανίζεται στη μορφή μη αποσβενυόμενων ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων (στατική αστάθεια) ή μονότονης επιτάχυνσης του δρομέα που οδηγεί σε απώλεια συγχρονισμού (μεταβατική αστάθεια). Το χρονικό πλαίσιο της ευστάθειας γωνίας είναι αυτό των ηλεκτρομηχανικών φαινομένων, με διάρκεια μερικών δευτερολέπτων και άρα τα φαινόμενα αστάθειας γωνίας κατατάσσονται στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

- Η *ευστάθεια συχνότητας* αντιστοιχεί στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τη συχνότητα κοντά στην ονομαστική τιμή μετά από μια σοβαρή διαταραχή (μεταβατική ευστάθεια). Αστάθεια συχνότητας προκαλείται λόγω αναντιστοιχίας μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενεργού ισχύος. Σε μεγάλα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ, η εμφάνιση αστάθειας συχνότητας είναι πιθανή μόνο σε «νησιδοποιημένα» τμήματα του συστήματος μετά από μεγάλη διαταραχή.
- Η *ευστάθεια τάσεως* αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να διατηρήσει ικανοποιητικές τάσεις σε όλους τους ζυγούς μετά από μια διαταραχή. Αστάθεια τάσης προκαλείται από την αδυναμία του συστήματος να τροφοδοτήσει την απαιτούμενη ισχύ στα φορτία και κινητήρια δύναμή της αποτελούν οι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου. Αστάθεια τάσης μπορεί επίσης να προκληθεί με την επίδραση μικρών (στατική) ή μεγάλων διαταραχών (μεταβατική).

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας διατρέχει μεγαλύτερο κίνδυνο απώλειας της ευστάθειας λειτουργίας του όσο αυξάνεται το φορτίο του. Στις μέρες μας η διαρκής αύξηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια θα έπρεπε να επιβάλλει την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των ηλεκτρικών δικτύων. Ωστόσο λόγω οικονομικών και περιβαλλοντικών περιορισμών δυσχεραίνεται η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς, για την ικανοποίηση των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εντατικότερη χρήση των ήδη διαθέσιμων δικτύων ΣΗΕ.

Σαν συνέπεια της λειτουργίας των δικτύων υπό εντατικότερες συνθήκες εμφανίστηκαν νέες μορφές ασταθούς συμπεριφοράς στα ΣΗΕ. Κύριο χαρακτηριστικό αυτών των νέων φαινομένων αστάθειας είναι η βαθμιαία βύθιση της τάσης, που μπορεί να καταλήξει και σε απότομη κατάρρευση. Αν και το πρόβλημα εντοπίζεται συνήθως σε έναν αριθμό ζυγών του δικτύου δεν λείπουν και οι περιπτώσεις όπου επεκτείνεται και στο υπόλοιπο σύστημα. Τα φαινόμενα αυτά περιλαμβάνονται στην έννοια της «αστάθειας τάσεως» που αναφέρθηκε παραπάνω. Στη συνέχεια δίνουμε έναν γενικό ορισμό της έννοιας αυτής [3].

Η αστάθεια τάσεως πηγάζει από την απόπειρα των δυναμικών φορτίου να αποκαταστήσουν την κατανάλωση ισχύος πέρα από την ικανότητα φόρτισης του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.

Συνεπώς η αστάθεια τάσεως σχετίζεται με το όριο της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε ένα σημείο του δικτύου Ηλεκτρικής Ενέργειας. Μετά την υπέρβαση του ορίου αυτού η διαδικασία ανάκτησης της ισχύος του φορτίου γίνεται ασταθής, καταλήγοντας σε μείωση αντί για αύξηση της απορροφώμενης ισχύος. Η διαδικασία αυτή αποτελεί την κύρια αιτία των προβλημάτων αστάθειας τάσεως. Για το λόγο αυτό τα φαινόμενα αυτά αναφέρονται και ως αστάθεια φορτίου [3].

Η αστάθεια τάσης επομένως συνδέεται με την δυναμική φύση των φορτίων του συστήματος. Πολλά είδη φορτίων, όπως οι κινητήρες επαγωγής ή τα θερμοστατικά φορτία, έχουν την τάση να αποκαθιστούν την απορροφώμενη ισχύ τους ύστερα από μια διαταραχή στο δίκτυο, που μειώνει την τάση τροφοδοσίας τους και άρα και την καταναλισκόμενη ισχύ. Παρόμοια αποτελέσματα επιφέρει έμμεσα και η λειτουργία διατάξεων όπως τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ), τα οποία επαναφέρουν την τάση στους ζυγούς του φορτίου αποκαθιστώντας έτσι και την ισχύ, λόγω της εξάρτησής της από την τάση.

Η εξέλιξη της αστάθειας τάσεως ενός συστήματος μπορεί να έχει διάρκεια από μερικά δευτερόλεπτα έως και μερικές δεκάδες πρώτων λεπτών. Έτσι μπορούμε να ορίσουμε έναν ακόμα διαχωρισμό στην αστάθεια τάσης ως προς τη χρονική κλίμακα εξέλιξης των φαινομένων που την προκαλούν. Διακρίνουμε τη *βραχυπρόθεσμη*

αστάθεια τάσης, που σχετίζεται με δυναμικά φορτία γρήγορης απόκρισης, όπως οι κινητήρες επαγωγής, και τη μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης που συνδέεται με πιο βραδεία φαινόμενα αποκατάστασης ισχύος φορτίου, όπως είναι στα ΣΑΤΦ και στα θερμοστατικά φορτία.

Η αστάθεια τάσης καταλήγει συνήθως σε μία από τις ακόλουθες περιπτώσεις [3]:

- Μια μόνιμη κατάσταση λειτουργίας σε χαμηλό έως απαράδεκτο επίπεδο τάσεων στο σύστημα μεταφοράς, που προφανώς δεν αντιστοιχεί σε μία αποδεκτή μόνιμη κατάσταση. Η κατάσταση εμφανίζεται συνήθως όταν οι μηχανισμοί που συνεισφέρουν στην αστάθεια συναντούν τα όρια λειτουργίας τους (για παράδειγμα το περιθώριο ρύθμισης των ΣΑΤΦ των μετασχηματιστών).
- Μια επιτάχυνση του φαινομένου που οδηγεί στην απότομη βύθιση των τάσεων στην περιοχή εμφάνισης του προβλήματος. Η κατάληξη αυτή ονομάζεται *κατάρρευση τάσεως* και έχει σαν αποτέλεσμα την μερική ή ολική σβέση του συστήματος.

Κοντά στο σημείο κατάρρευσης, η χρονική απόκριση των τάσεων γίνεται ολοένα και πιο γρήγορη και καταλήγει σε μια κατακόρυφη πτώση τη χρονική στιγμή της κατάρρευσης. Δηλαδή στο σημείο της κατάρρευσης έχουμε μια ασυνέχεια στη λειτουργία του συστήματος, οφειλόμενη στη συνεχή δυναμική του συστήματος και όχι σε εξωτερικά αίτια. Η έννοια της κατάρρευσης έχει αποδίδεται συνοπτικά με τον παρακάτω ορισμό [3]:

Ο όρος κατάρρευση χρησιμοποιείται για μια απότομη (πρακτικά ακαριαία) καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται συνήθως σε εμφάνιση αστάθειας πιο γρήγορης χρονικής κλίμακας από την εξεταζόμενη.

1.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

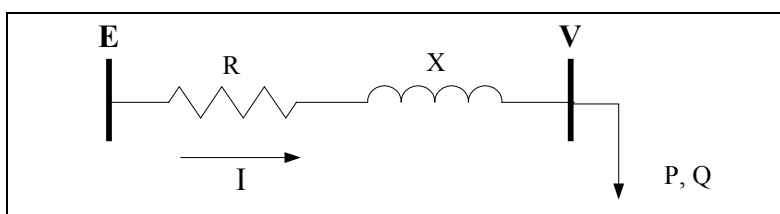
1.3.1 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2 το όριο της μέγιστου μεταφερόμενης ισχύος ενός συστήματος είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την εμφάνιση αστάθειας τάσης.

Ας θεωρήσουμε το σύστημα των δύο ζυγών του σχήματος 1.3.1. Το σύστημα αποτελείται από έναν ζυγό φορτίου που τροφοδοτείται από έναν άπειρο ζυγό σταθερής τάσης E μέσω μιας γραμμής μεταφοράς με σύνθετη αντίσταση $Z = R + jX$.

Θεωρούμε ότι το φορτίο συμπεριφέρεται ως σύνθετη αντίσταση (φορτίο σταθερής αγωγιμότητας) και ότι μεταβάλλεται με σταθερό συντελεστή ισχύος ($\cos \varphi = \text{σταθ.}$). Η σύνθετη αντίσταση του φορτίου επομένως είναι:

$$Z_L = R_L + jX_L = R_L (1 + j \cdot \tan \varphi)$$



Σχήμα 1.3.1 Παράσταση συστήματος απείρου ζυγού - φορτίου

Η απορροφώμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο είναι:

$$P = R_L I^2 = \frac{R_L E^2}{(R + R_L)^2 + (X + R_L \tan \varphi)^2} \quad (1.3.1)$$

Από τη συνθήκη ακρότατου της (1.3.1), $\partial P / \partial R_L = 0$, προκύπτει:

$$R_L^2 = \frac{(R^2 + X^2)}{(1 + \tan^2 \varphi)} \quad (1.3.2)$$

ή ισοδύναμα:

$$|Z_L| = |Z| \quad (1.3.3)$$

Η δεύτερη παράγωγος της (1.1) δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_L^2} = -2R_L (1 + \tan^2 \varphi) < 0$$

άρα η (1.3.1) παρουσιάζει μέγιστο στο σημείο μηδενισμού της παραγώγου της.

Επομένως:

Για σταθερό συντελεστή ισχύος, η ισχύς του φορτίου μεγιστοποιείται όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Η παραπάνω συνθήκη αποτελεί το θεώρημα Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος (με σταθερό συντελεστή ισχύος) που διέρχεται από μία γραμμή μεταφοράς.

Με αντικατάσταση της (1.3.2) στην (1.3.1) υπολογίζουμε τη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ, που εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους του δικτύου (R, X) και όχι από τη χαρακτηριστική του φορτίου:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \frac{E^2 \cos \varphi}{\sqrt{R^2 + X^2} + R \cos \varphi + X \sin \varphi} \quad (1.3.4)$$

1.3.2 Σχέση ισχύος-τάσης

Θα χρησιμοποιήσουμε το σύστημα του σχήματος 1.3.1 όπου για λόγους απλότητας θεωρούμε αμελητέες τις απώλειες στη γραμμή μεταφοράς, δηλαδή $R=0$. Ορίζουμε επίσης την τάση του άπειρου ζυγού ως διάνυσμα αναφοράς, θέτοντας $\bar{E} = E\angle 0$, και η τάση φορτίου παριστάνεται με το διάνυσμα $\bar{V} = V\angle\theta$.

Με εφαρμογή των εξισώσεων ροής φορτίου στο σύστημα προκύπτει:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (1.3.5)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (1.3.6)$$

Αν απαλοιφεί από τις εξισώσεις αυτές η γωνία φάσης θ , θα έχουμε:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.3.7)$$

Η εξίσωση (1.3.7) είναι η διτετράγωνη εξίσωση τάσης του συστήματος. Η εξίσωση αυτή μπορεί να επιλυθεί ως προς V^2 , αν ισχύει η συνθήκη:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0$$

ή ισοδύναμα:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (1.3.8)$$

Η αντίστοιχη ισότητα της σχέσης (1.3.9) αντιστοιχεί σε μια παραβολή στο χώρο (P, Q) . Τα εσωτερικά σημεία της παραβολής δίνουν δύο λύσεις για την τάση V , ενώ τα σημεία πάνω στην παραβολή, που αντιστοιχούν στα σημεία μέγιστης ισχύος, δίνουν μοναδική λύση για την τάση.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο (1.3.1), φαίνεται από τη σχέση (1.3.8) ότι η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς στο φορτίο P_{\max} και η αντίστοιχη τάση $V_{P_{\max}}$ εξαρτώνται μόνο από τις παραμέτρους του δικτύου και το συντελεστή ισχύος στο φορτίο, αλλά όχι από τη χαρακτηριστική του φορτίου.

Αν υποθέσουμε σταθερό συντελεστή ισχύος στο φορτίο, $\cos\phi$, ώστε $Q = P \tan \phi$, στην εξίσωση (1.3.7) τα μεταβαλλόμενα μεγέθη θα είναι η ενεργός ισχύς P και η τάση V , για συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος $\cos\phi$. Έτσι προκύπτει ότι αν η τάση ενός ζυγού παραμένει σταθερή, υπό σταθερό συντελεστή ισχύος, τότε η απορροφώμενη ισχύς στο ζυγό αυτό θα είναι επίσης σταθερή.

Οι λύσεις της εξίσωσης (1.3.7), όταν ικανοποιείται η συνθήκη (1.3.8), είναι:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^2}{4} - X^2P^2 - XE^2Q} \quad (1.3.9)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (1.3.9) για διάφορους συντελεστές φορτίου, ώστε $Q = P \tan \phi$, μπορούν να σχεδιαστούν οι χαρακτηριστικές PV καμπύλες του δικτύου του συστήματος που αποτελούν τις χαρακτηριστικές δικτύου.

1.3.3 Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου

Όπως αναφέραμε στον ορισμό της αστάθειας τάσεως το πρόβλημα της ευστάθειας τάσεως εντοπίζεται στη σχέση μεταξύ ζήτησης φορτίου και ικανότητας μεταφοράς του δικτύου. Έτσι για να αποκτήσουμε μια εποπτική εικόνα για την κατανόηση των μηχανισμών αστάθειας χρησιμοποιούνται πολύ συχνά διαγράμματα στο επίπεδο (P,V) τα οποία αντιστοιχούν σε αυτές τις δύο συνιστώσες: το δίκτυο και το φορτίο.

Η PV χαρακτηριστική του *φορτίου* παριστάνει την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο για διάφορες τάσεις τροφοδοσίας. Η PV χαρακτηριστική *δικτύου* από την άλλη αποτελείται από τα επιτρεπτά σημεία λειτουργίας του δικτύου για διάφορες καταναλώσεις ισχύος από το φορτίο.

Επειδή το φορτίο απορροφά εν γένει ενεργό και άεργο ισχύ, ο υπολογισμός μιας χαρακτηριστικής δικτύου στο επίπεδο PV πρέπει να γίνεται για συγκεκριμένες καταναλώσεις άεργου ισχύος που αντιστοιχούν στα ζεύγη P,V. Μπορούμε π.χ. να λύσουμε το πρόβλημα αυτό σχεδιάζοντας PV καμπύλες για σταθερό συντελεστή ισχύος, για σταθερή άεργο ισχύ Q κτλ.

1.3.3.1 Χαρακτηριστική φορτίου

Η χαρακτηριστική φορτίου, είναι μία σχέση που εκφράζει την ενεργό και άεργο ισχύ του φορτίου ως συνάρτηση της τάσης V του ζυγού φορτίου και μιας αδιάστατης μεταβλητής z, που καλείται ζήτηση φορτίου. Επομένως οι χαρακτηριστικές του φορτίου δίνονται από σχέσεις της μορφής:

$$P = P(z, V) \quad (1.3.10)$$

$$Q = Q(z, V) \quad (1.3.11)$$

Είναι σημαντικό να διαχωριστούν οι πραγματικά καταναλισκόμενες ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου P, Q και η ζήτηση του φορτίου z. Αυτή η διάκριση είναι απαραίτητη για την κατανόηση ενός βασικού μηχανισμού αστάθειας, όπου αυξανόμενη ζήτηση μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη κατανάλωση ισχύος.

Συνήθης μορφή χαρακτηριστικής δικτύου είναι το εκθετικό μοντέλο:

$$P = zP_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha$$

$$Q = zQ_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta$$

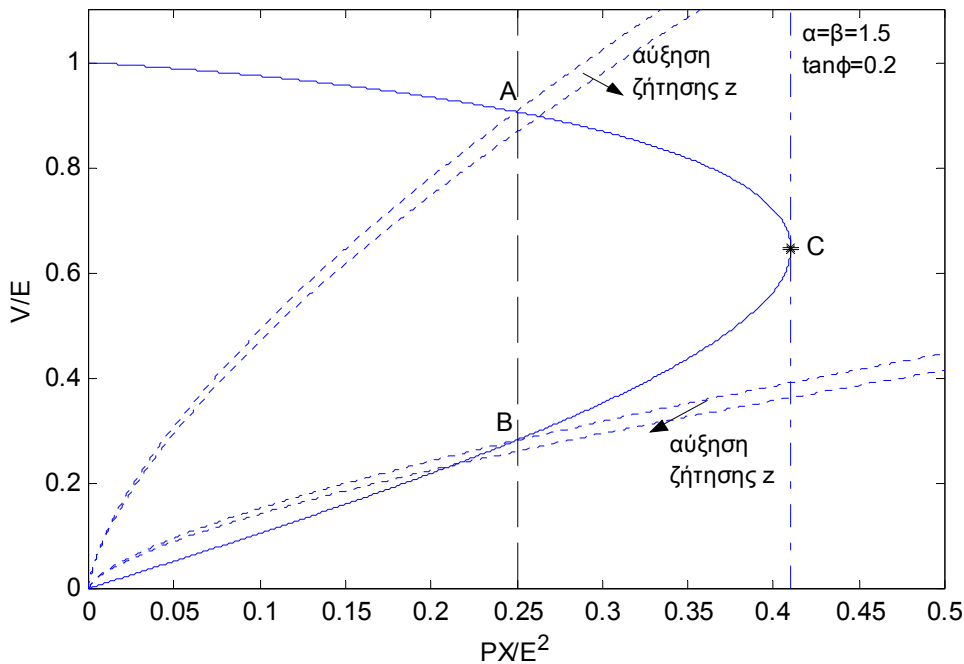
όπου V_0 είναι η τάση αναφοράς και P_0 , Q_0 οι καταναλισκόμενες ενεργός και άεργος ισχύς στο φορτίο για αυτήν την τάση και ονομαστική ζήτηση. Αν οι εκθέτες των εξισώσεων α, β είναι ίσοι, τότε ο συντελεστής ισχύος στο φορτίο παραμένει σταθερός για κάθε τάση, αφού ο λόγος Q/P είναι σταθερός.

Η χαρακτηριστική φορτίου σε περιπτώσεις δυναμικών φορτίων συνήθως έχει διαφορετική στιγμιαία μορφή κατά την εξέλιξη του συστήματος και στη μόνιμη κατάσταση. Έτσι η *μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου* εξαρτάται από τη στιγμιαία τιμή μίας μεταβλητής κατάστασης του φορτίου, ενώ στη μόνιμη κατάσταση το φορτίο τείνει δυναμικά να αποκαταστήσει μια συγκεκριμένη σταθερή σχέση μεταξύ φορτίου και τάσης (συνήθως τύπου σταθερής ισχύος). Αυτή η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική ονομάζεται *χαρακτηριστική φορτίου μόνιμης κατάστασης* ή *χαρακτηριστική ισορροπίας φορτίου*.

1.3.3.2 Χαρακτηριστική δικτύου

Η *χαρακτηριστική δικτύου* εκφράζει την εξάρτηση της τάσης ενός ζυγού του συστήματος από την καταναλισκόμενη ισχύ φορτίου (ενεργού ή άεργου). Η *χαρακτηριστική δικτύου* χαράσσεται επιλύοντας τις εξισώσεις που εκφράζουν το ισοζύγιο ισχύος στο δίκτυο (εξισώσεις ροής φορτίου) και τις συνθήκες ισορροπίας των διατάξεων του συστήματος για διάφορες τιμές ζήτησης του φορτίου z .

Στο σχήμα 1.3.2 φαίνεται η *χαρακτηριστική δικτύου PV* του συστήματος δύο ζυγών του σχήματος 1.3.1. Στο σχήμα έχουν απεικονιστεί επίσης τυπικές *χαρακτηριστικές φορτίου* (εκθετικό μοντέλο, $\alpha=\beta=1.5$) για διάφορες τιμές της ζήτησης φορτίου z . Η *χαρακτηριστική δικτύου* του σχήματος 1.3.2, η οποία παριστάνει την τάση V του ζυγού φορτίου συναρτήσεως του ενεργού φορτίου P του ζυγού ονομάζεται και *καμπύλη PV* του δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, επειδή έχουμε σταθερό συντελεστή ισχύος $\tan\phi=Q_0/P_0=0.2$, η *χαρακτηριστική δικτύου* συμπίπτει με την προβολή της τομής των εξισώσεων (1.3.9) και $Q=P\tan\phi$ στο P,V επίπεδο. Οι εξισώσεις ροής ισχύος για το σύστημα των δύο ζυγών με βάση τις οποίες κατασκευάζεται η *καμπύλη PV* είναι οι (1.3.5) και (1.3.6).



Σχήμα 1.3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου για το σύστημα απείρου ζυγού – φορτίου και για εκθετικό φορτίο

Τα σημεία λειτουργίας του συστήματος καθορίζονται από τη τομή της *χαρακτηριστικής δικτύου* με τη *χαρακτηριστική φορτίου* (βλέπε σχήμα 1.3.2). Επομένως τα σημεία λειτουργίας του συστήματος μπορούν να προκύψουν από την ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων του δικτύου και των *χαρακτηριστικών φορτίου*. Τα σημεία A και B του σχήματος αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά σημεία λειτουργίας που αποδίδουν την ίδια ισχύ φορτίου P (οι δύο λύσεις της εξίσωσης (1.3.9)).

1.3.3.3 Ανάλυση αστάθειας τάσης με χρήση των PV καμπυλών

Θεωρούμε μια μικρή αύξηση της ζήτησης φορτίου z , που απεικονίζεται στο σχήμα 1.3.2. Στο σημείο A η αύξηση της ζήτησης προκαλεί μείωση της τάσης ζυγού V , αλλά αύξηση της ισχύος φορτίου P , όπως είναι η επιθυμητή και αναμενόμενη λειτουργία. Ωστόσο στο σημείο B η αυξημένη ζήτηση οδηγεί σε μείωση τόσο της τάσης ζυγού V όσο και της ισχύος φορτίου P . Αν το φορτίο είναι στατικό, η λειτουργία στο σημείο B είναι δυνατή, αν και μπορεί να υπάρχει πρόβλημα βιωσιμότητας λόγω της χαμηλής τιμής τάσης. Σε περιπτώσεις δυναμικών φορτίων που τείνουν να αυξήσουν τη ζήτηση για να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ, η λειτουργία στο σημείο B καταλήγει σε αστάθεια τάσης. Συνεπώς τα σημεία λειτουργίας πριν το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι ευσταθή, ενώ τα σημεία λειτουργίας μετά το παραπάνω όριο είναι ασταθή. Δεδομένου ότι μιλάμε για σημεία λειτουργίας αναφερόμαστε σε στατική ευστάθεια.

Η προφανής αναγκαία συνθήκη για την ευσταθή λειτουργία του συστήματος είναι η ύπαρξη ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας, που προκύπτει από την τομή των χαρακτηριστικών δικτύου και φορτίου. Σε πολλές περιπτώσεις σεναρίων αστάθειας τάσης εμφανίζονται σημαντικές μεταβολές στις παραμέτρους του συστήματος, που οδηγούν σε απώλεια σημείου ισορροπίας. Τέτοιες μεταβολές μπορεί να είναι:

- Μεγάλη αύξηση της ζήτησης φορτίου z που μεταβάλλει τη χαρακτηριστική φορτίου, ώστε να μην τέμνει πια τη χαρακτηριστική δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση το *όριο φόρτισης* του συστήματος δίνεται από το σημείο που η χαρακτηριστική φορτίου γίνεται εφαπτόμενη στη χαρακτηριστική δικτύου. Το όριο φόρτισης μπορεί να συμπίπτει με το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (π.χ. για χαρακτηριστικές σταθερής ισχύος), αλλά αυτό δεν είναι απαραίτητο και εξαρτάται από τη μορφή της χαρακτηριστικής φορτίου.
- Συρρίκνωση της χαρακτηριστικής φορτίου λόγω σοβαρής διαταραχής, που συνήθως είναι απώλεια γραμμών μεταφοράς ή μονάδων παραγωγής. Η χαρακτηριστική δικτύου μετά τη διαταραχή δεν τέμνει πλέον τη χαρακτηριστική φορτίου (μόνιμης κατάστασης) που παραμένει αμετάβλητη και έτσι δεν μπορεί να αποκατασταθεί κάποιο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις η καταναλισκόμενη ισχύς θα αυξάνεται μέχρι το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, αλλά μετά το σημείο αυτό, η ισχύς και η τάση θα μειώνονται συνεχώς υπό την επίδραση των δυναμικών φορτίου, αφού δεν μπορεί να αποκατασταθεί σημείο ισορροπίας στη μόνιμη κατάσταση, ούτε να υπερκερασθεί το όριο μεταφερόμενης ισχύος.

1.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΩΝ ΣΤΑ ΣΗΕ

1.4.1 Γενικά - Δυναμική αποκατάστασης φορτίου

Όπως αναφέρθηκε στις ενότητες 1.2 και 1.3 η δυναμική αποκατάστασης φορτίου στα ΣΗΕ έχει ιδιαίτερη επίδραση στα εμφανιζόμενα φαινόμενα αστάθειας και για αυτό αναλύεται διεξοδικά στην παρούσα παράγραφο.

Η σχέση εξάρτησης μεταξύ απορροφώμενης ισχύος και τάσης στα φορτία ενός ΣΗΕ, η οποία περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές εξισώσεις φορτίου (σχέσεις (1.3.10) και (1.3.11)), μπορεί να είναι σταθερή ή να μεταβάλλεται με το χρόνο. Στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε σε καθαρά στατικά φορτία, ενώ στη δεύτερη σε δυναμικά φορτία. Η δυναμική των μηχανισμών ελέγχου στα φορτία τείνει να αποκαταστήσει την καταναλισκόμενη ισχύ φορτίου και η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται «αποκατάσταση φορτίου».

Θεωρούμε ότι η σχέση που δίνει την καταναλισκόμενη ενεργό και άεργο ισχύ στο φορτίο P , Q σε κάθε χρονική στιγμή εξαρτάται από την τιμή μιας μεταβλητής κατάστασης του φορτίου x :

$$P = P_t(z, V, x) \quad (1.4.1)$$

$$Q = Q_t(z, V, x) \quad (1.4.2)$$

όπου P_t και Q_t είναι οι μεταβατικές χαρακτηριστικές του φορτίου.

Η δυναμική του φορτίου θεωρούμε ότι περιγράφεται από τη διαφορική εξίσωση:

$$\dot{x} = f(z, V, x) \quad (1.4.3)$$

και άρα η μόνιμη κατάσταση των δυναμικών φορτίου θα χαρακτηρίζεται από την αλγεβρική εξίσωση:

$$f(z, V, x) = 0 \quad (1.4.4)$$

Θεωρώντας ότι $\partial f / \partial x \neq 0$ μπορούμε να εκφράσουμε τη μεταβλητή κατάστασης x στο σημείο ισορροπίας των δυναμικών φορτίου ως συνάρτηση της ζήτησης φορτίου z και της τάσης V , δηλαδή:

$$x = h(z, V) \quad (1.4.5)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (1.4.5) στις (1.4.1), (1.4.2) προκύπτει:

$$P = P_t(z, V, h(z, V)) = P_s(z, V) \quad (1.4.6)$$

$$Q = Q_t(z, V, h(z, V)) = Q_s(z, V) \quad (1.4.7)$$

όπου P_s και Q_s είναι οι χαρακτηριστικές φορτίου για τη μόνιμη κατάσταση, που είναι ανεξάρτητες της μεταβλητής κατάστασης x .

Συνήθως οι μεταβατικές χαρακτηριστικές φορτίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές της τάσης σε σχέση με τις χαρακτηριστικές μόνιμου καταστάσεως, ώστε στη μόνιμη κατάσταση η ισχύς φορτίου να επανέρχεται πλησιέστερα στην τιμή της πριν τη διαταραχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η μετάβαση από χαρακτηριστική σταθερής αντίστασης σε χαρακτηριστική σταθερής ισχύος, όπου η ισχύς δεν εξαρτάται από την τάση.

1.4.2 Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ)

1.4.2.1 Γενικά

Ένας βασικός μηχανισμός αποκατάστασης φορτίου είναι ο μηχανισμός αυτόματης ρύθμισης τάσεως μέσω διατάξεων μεταβλητής λήψης, που χρησιμοποιείται συνήθως στους μετασχηματιστές διανομής των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η διάταξη αυτή παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης στην πλευρά της διανομής (Μέση Τάση ΜΤ), μεταβάλλοντας το λόγο μετασχηματισμού r . Μια πτώση της τάσης στο δευτερεύον ενός μετασχηματιστή εφοδιασμένου με Σύστημα Αλλαγής Τάσεως υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ), η οποία μπορεί να οφείλεται σε αύξηση του φορτίου, μπορεί να αντισταθμιστεί με αντίστοιχη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η μεταβλητή λήψη γίνεται στην πλευρά της υψηλής τάσης (ΥΤ). Αυτό διευκολύνει τη μετατροπή, επειδή το ρεύμα σε αυτή την πλευρά είναι μικρότερο, και επιπλέον επιτρέπει πιο ακριβή ρύθμιση λόγω του μεγαλύτερου αριθμού σπειρών στην πλευρά υψηλής τάσης. Υπάρχουν και εξαιρέσεις αυτού του κανόνα, ιδιαίτερα στην περίπτωση των αυτομετασχηματιστών.

Τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) είναι αργοί μηχανισμοί με διακριτή συμπεριφορά που αλλάζουν την λήψη κατά ένα βήμα κάθε φορά, όταν το σφάλμα τάσης παραμένει εκτός της νεκρής ζώνης για χρόνο μεγαλύτερο από μια συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση. Ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται για το μηχανισμό αλλαγής λήψης για να ολοκληρώσει ένα βήμα είναι συνήθως περίπου 5 δευτερόλεπτα. Θα αναφερόμαστε σε αυτόν τον χρόνο ως μηχανική καθυστέρηση (T_m). Συνήθως προστίθενται σκόπιμα επιπλέον καθυστερήσεις (με διαβάθμιση από μερικά δευτερόλεπτα έως και 2 λεπτά) στη μηχανική καθυστέρηση, για να αποφεύγουμε τις συχνές ή περιττές αλλαγές λήψης, που προκαλούν φθορά του εξοπλισμού. Αυτές οι σκόπιμες χρονικές καθυστερήσεις μπορεί να είναι σταθερές ή μεταβλητές. Για τις μεταβλητές καθυστερήσεις χρησιμοποιείται συνήθως χαρακτηριστική αντίστροφου χρόνου, ώστε η καθυστέρηση να μειώνεται για μεγάλα σφάλματα τάσεως.

Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία του ΣΑΤΦ είναι το συγκεκριμένο περιθώριο μεταβολής της λήψης του μετασχηματιστή:

$$r^{\min} \leq r \leq r^{\max} \quad (1.4.8)$$

Τυπικές τιμές του κάτω ορίου r^{\min} είναι 0.85 έως 0.90 α.μ. και του άνω ορίου r^{\max} 1.10 έως 1.15 α.μ. Το μέγεθος κάθε βήματος αλλαγής λήψης είναι συνήθως στην περιοχή 0.5% έως 1.5%. Είναι προφανές ότι η νεκρή ζώνη πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτό το βήμα, συνήθως είναι διπλάσια του βήματος.

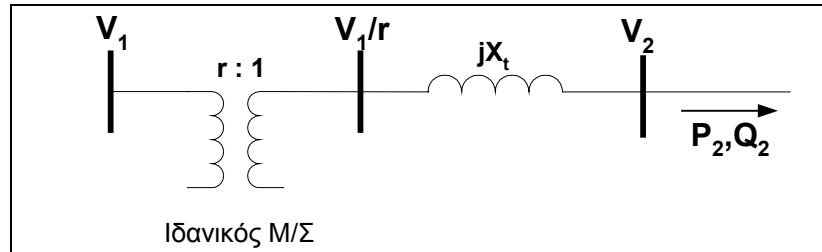
Η δυναμική των ΣΑΤΦ ανήκει στην μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα μέχρι μερικά πρώτα λεπτά), αφού τα ΣΑΤΦ είναι σχετικά αργοί μηχανισμοί.

1.4.2.2 Μοντελοποίηση ΣΑΤΦ

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζουμε δύο μοντέλα ΣΑΤΦ:

- το διακριτό μοντέλο, που παριστάνει την ασυνεχή αλλαγή λήψης
- το προσεγγιστικό συνεχές μοντέλο

Θεωρούμε μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης με αμελητέες απώλειες χαλκού στα τυλίγματα και αμελητέα αντίδραση μαγνήτισης. Η συνολική αντίδραση σκεδάσεως X_t λαμβάνεται σταθερή στο άκρο του μετασχηματιστή. Στο σχήμα (1.4.1) απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΦ που χρησιμοποιεί ένα ιδανικό μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού r :



Σχήμα 1.4.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ εξοπλισμένου με ΣΑΤΦ

• **Διακριτό Μοντέλο**

Σύμφωνα με το διακριτό μοντέλο όταν το ΣΑΤΦ ενεργοποιείται ο λόγος μετασχηματισμού θα αυξηθεί ή θα μειωθεί κατά ένα βήμα Δr ακαριαία. Το ΣΑΤΦ μπορεί να λειτουργεί μόνο σε διακριτές χρονικές στιγμές t_k με $k=0,1,\dots$ που δίνονται από τον αναδρομικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (1.4.9)$$

όπου ΔT_k η χρονική καθυστέρηση για τη λειτουργία του ΣΑΤΦ.

Η χρονική καθυστέρηση ΔT_k δεν είναι γενικά σταθερή, αλλά εξαρτάται από τη χρονική υστέρηση του μηχανισμού λειτουργίας του ΣΑΤΦ και (ενδεχομένως) την απόκλιση της τάσεως δευτερεύοντος από την τάση αναφοράς (χαρακτηριστική αντιστρόφου χρόνου). Επίσης μπορεί να είναι διαφορετική για το πρώτο από ότι για τα επόμενα βήματα ρύθμισης. Σε περιπτώσεις περισσότερων μετασχηματιστών εξοπλισμένων με ΣΑΤΦ που είναι συνδεδεμένοι σε σειρά σε διαδοχικά επίπεδα τάσης, η χρονική καθυστέρηση στα υψηλότερα επίπεδα πρέπει να είναι μικρότερη, ώστε να αποφεύγονται ταλαντώσεις λόγω της αλληλεπίδρασης των μηχανισμών ΣΑΤΦ.

Μια συνήθης σχέση για τη χρονική καθυστέρηση ΔT_k , που περιλαμβάνει καθυστερήσεις σταθερές και αντιστρόφου χρόνου, είναι η εξής:

$$\Delta T_k = T_d \frac{d}{|V_2 - V_2^0|} + T_f + T_m \quad (1.4.10)$$

όπου V_2 η ελεγχόμενη τάση, V_2^0 η τάση αναφοράς, d η ανοχή τάσεως (το ήμισυ της νεκρής ζώνης) του ΣΑΤΦ, T_d η μέγιστη χρονική καθυστέρηση της χαρακτηριστικής αντιστρόφου χρόνου, T_f η σταθερή σκόπιμη χρονική καθυστέρηση και T_m η αναγκαία μηχανική καθυστέρηση για την πραγματοποίηση της αλλαγής λήψης.

Η λογική με την οποία αλλάζει η λήψη τη χρονική στιγμή t_k είναι η παρακάτω:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r & \text{αν } V_2 > V_2^0 + d \text{ και } r_k < r^{\max} \\ r_k - \Delta r & \text{αν } V_2 < V_2^0 - d \text{ και } r_k > r^{\min} \\ r_k & \text{αλλου} \end{cases} \quad (1.4.11)$$

με r^{\min} , r^{\max} τα κάτω και άνω όρια του περιθωρίου μεταβολής της λήψης.

- **Συνεχές Μοντέλο**

Στο συνεχές μοντέλο ΣΑΤΦ υποθέτουμε συνεχή αλλαγή λήψης του λόγου μετασχηματισμού $r(t)$ που μπορεί να πάρει όλες τις πραγματικές τιμές μεταξύ r^{\min} και r^{\max} . Συνήθως η επίδραση της νεκρής ζώνης αμελείται στο συνεχές μοντέλο, οπότε η δράση του ΣΑΤΦ περιγράφεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$T_c \dot{r} = V_2 - V_2^0, \text{ για } r^{\min} \leq r \leq r^{\max} \quad (1.4.12)$$

Το συνεχές μοντέλο είναι λιγότερο ακριβές από το διακριτό, αλλά είναι μια χρήσιμη προσέγγιση, ειδικά για μελέτες ευστάθειας. Δεν χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε χρονικές προσομοιώσεις, όπου προτιμούνται διακριτά μοντέλα.

Το μοντέλο που περιγράφεται από τη σχέση είναι μια συνεχής προσέγγιση ενός διακριτού μοντέλου ΣΑΤΦ, με $T_f = T_m = 0$ και λογική αντιστρόφου χρόνου, (1.4.10). Η σταθερά χρόνου T_c της διαφορικής εξίσωσης ορίζεται ως:

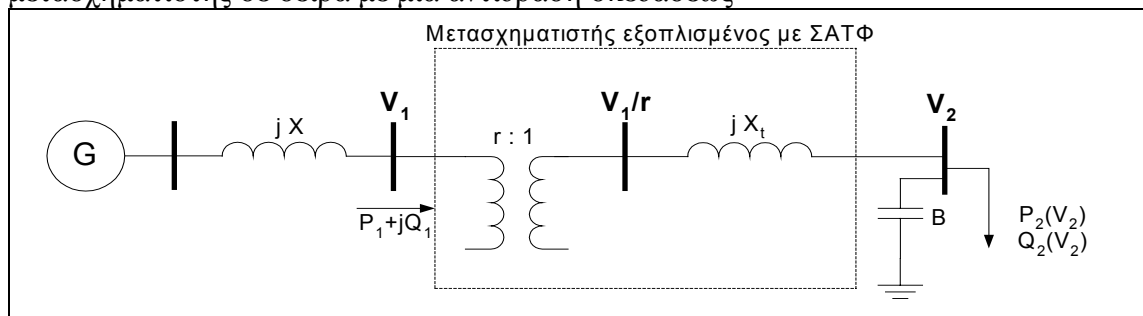
$$T_c = \frac{T_d d}{\Delta r} \quad (1.4.13)$$

όπου T_d μέγιστη χρονική καθυστέρηση της χαρακτηριστικής αντίστροφου χρόνου, d το ήμισυ της νεκρής ζώνης και Δr η μοναδιαία μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού.

1.4.2.3 Αποκατάσταση φορτίου μέσω ΣΑΤΦ

Η αποκατάσταση φορτίου μέσω ΣΑΤΦ είναι έμμεση: όταν το ΣΑΤΦ πετυχαίνει να επαναφέρει την τάση V_2 , στην πλευρά της διανομής, κοντά στην τάση αναφοράς V_2^0 , η ισχύς του φορτίου, η οποία γενικά εξαρτάται από την τάση στο ζυγό, αποκαθίσταται επίσης.

Θα ερμηνεύσουμε την αποκατάσταση του φορτίου μέσω ΣΑΤΦ χρησιμοποιώντας το απλό σύστημα του σχήματος 1.4.2. Το σύστημα περιλαμβάνει μια γεννήτρια η οποία τροφοδοτεί ένα φορτίο μέσω γραμμής μεταφοράς και μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΦ. Το ΣΑΤΦ παριστάνεται όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής σε σειρά με μια αντίδραση σκεδάσεως



Σχήμα 1.4.2 Σύστημα γεννήτριας-γραμμής μεταφοράς-Μ/Σ εξοπλισμένου με ΣΑΤΦ

Η ενεργός ισχύς P και η άεργος ισχύς Q του φορτίου θεωρούμε ότι είναι συναρτήσεις της τάσης στο φορτίο V_2 :

$$P = P(V_2) \quad (1.4.14)$$

$$Q = Q(V_2) \quad (1.4.15)$$

Η τάση V_2 στην πλευρά του φορτίου συνδέεται με την V_1 μέσω της σχέσης :

$$\left(\frac{V_1}{r}\right)^2 = \left[V_2 + \left(\frac{Q(V_2)}{V_2} - BV_2 \right) X_t \right]^2 + \left[\frac{P(V_2)X_t}{V_2} \right]^2 \quad (1.4.16)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς P_1, Q_1 που διέρχονται από τον ιδανικό μετασχηματιστή προκύπτουν από την ισχύ που απορροφά το φορτίο συν τις απώλειες στην αντίδραση X_t του Μ/Σ μείον την άεργο αντιστάθμιση B :

$$P_1 = P(V_2) \quad (1.4.17)$$

$$Q_1 = Q(V_2) + \frac{P(V_2)^2 + Q(V_2)^2}{V_2^2} X_t - BV_2^2 \quad (1.4.18)$$

Μπορούμε να απαλείψουμε το V_2 από τις σχέσεις (1.4.17) και (1.4.18), αντικαθιστώντας το από την εξίσωση (1.4.16), οπότε οι ισχύεις P_1, Q_1 εκφράζονται συναρτήσει του V_1/r :

$$P_1 = P(V_1/r) \quad (1.4.19)$$

$$Q_1 = Q(V_1/r) \quad (1.4.20)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις δίνουν την μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου (όπως φαίνεται από την πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή) για συγκεκριμένη τιμή του λόγου r του μετασχηματιστή. Αν αλλάξει ο λόγος r αλλάζει και η χαρακτηριστική του φορτίου.

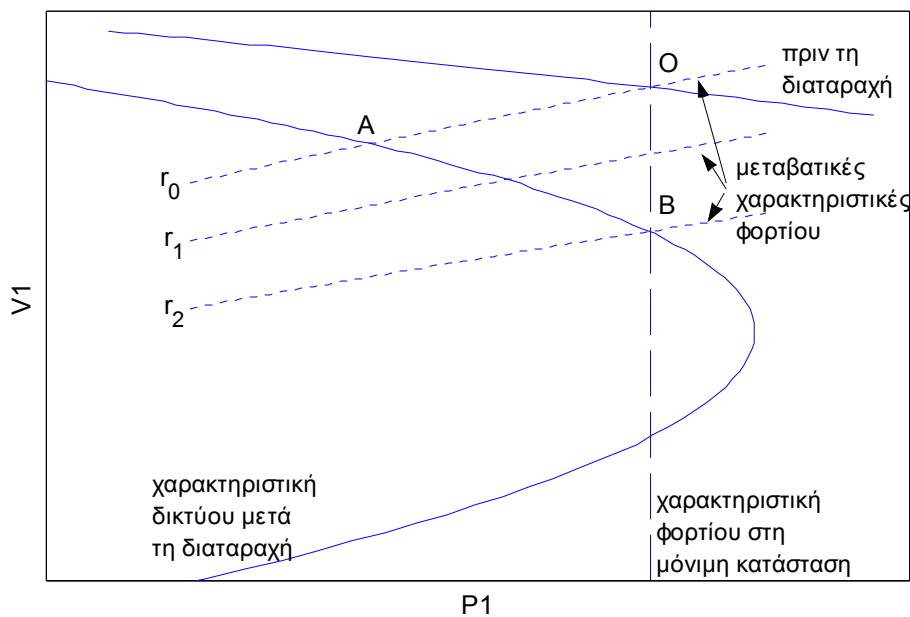
Στο σχήμα 1.4.3 απεικονίζονται δύο P_1V_1 χαρακτηριστικές δικτύου του συστήματος που συσχετίζουν την τάση πρωτεύοντος V_1 με την ισχύ P_1 που απορροφά ο μετασχηματιστής για διαφορετικές τιμές της αντίδρασης X . Επίσης σχεδιάζονται τρεις μεταβατικές χαρακτηριστικές φορτίου με εστιγμένες γραμμές, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικούς λόγους μετασχηματισμού $r_0 > r_1 > r_2$.

Μια διαφορετική χαρακτηριστική φορτίου παράγεται όταν αποκατασταθεί η τάση V_2 στην τάση αναφοράς V_2^0 , όπου το φορτίο καταναλώνει σταθερή ποσότητα ενεργού και άεργου ισχύος :

$$P = P(V_2^0) = \text{σταθ} \quad (1.4.21)$$

$$Q = Q(V_2^0) = \text{σταθ} \quad (1.4.22)$$

Αυτή αποτελεί τη χαρακτηριστική φορτίου μόνιμης κατάστασης, όπως φαίνεται από το πρωτεύον του μετασχηματιστή με ΣΑΤΦ, και στο σχήμα 1.4.3 έχει την μορφή κατακόρυφης ευθείας με διακεκομμένες γραμμές. Δηλαδή στη μόνιμη κατάσταση η ενεργός και άεργος ισχύς που απορροφά το φορτίο είναι σταθερές και ανεξάρτητες από την τάση πρωτεύοντος V_1 , που μεταβάλλεται ακολουθώντας την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού r , για να αποκατασταθεί η τάση δευτερεύοντος.



Σχήμα 1.4.3 PV καμπύλες του συστήματος του σχήματος 1.4.2

Θα χρησιμοποιήσουμε το σχήμα για να ερμηνεύσουμε την λειτουργία του ΣΑΤΦ. Ας θεωρήσουμε ότι το σύστημα βρίσκεται αρχικά στη θέση O του σχήματος όταν μια διαταραχή (αύξηση της αντίδρασης X) αναγκάζει την χαρακτηριστική του δικτύου να συρρικνωθεί στη «μετά τη διαταραχή» καμπύλη. Αμέσως μετά τη διαταραχή η τάση πρωτεύοντος V_1 θα μεταβεί στιγμιαία κατά μήκος της μεταβατικής χαρακτηριστικής φορτίου για τιμή του $r=r_0$ από το σημείο O στο A . Σε αυτό το σημείο η καταναλισκόμενη ισχύς από το φορτίο είναι μικρότερη από την αντιστοιχούσα σε τάση V_2^0 και επειδή η μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου θεωρείται αύξουσα με την τάση V_2 , θα ισχύει $V_2 < V_2^0$. Επομένως το ΣΑΤΦ θα αντιδράσει μειώνοντας το λόγο μετασχηματισμού r σύμφωνα με τη σχέση (1.4.11), ώστε να αυξήσει την τάση V_2 . Η αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού r θα αλλάξει την μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου και το σημείο λειτουργίας θα κινηθεί κατά μήκος της χαρακτηριστικής δικτύου, όπως αυτή διαμορφώνεται μετά την διαταραχή. Το σημείο λειτουργίας θα σταθεροποιηθεί κοντά στο σημείο B , όπου η χαρακτηριστική φορτίου μόνιμου καταστάσεως τέμνει την χαρακτηριστική δικτύου. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας αυτής το ΣΑΤΦ αποκαθιστά την τάση δευτερεύοντος και ταυτόχρονα την καταναλισκόμενη ισχύ στο φορτίο. Αυτό συνιστά την ευσταθή λειτουργία του ΣΑΤΦ.

1.4.2.4 Συνθήκες ευστάθειας ΣΑΤΦ

Η λειτουργία του ΣΑΤΦ υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να καταστεί ασταθής, δηλαδή αντί να επαναφέρει την τάση του ζυγού στα επιθυμητά όρια να την απομακρύνει ολοένα και περισσότερο από τα όρια αυτά. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν το σημείο λειτουργίας του συστήματος ξεπεράσει το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Η ασταθής αυτή λειτουργία του ΣΑΤΦ είναι δυνατόν να οδηγήσει το σύστημα σε κατάρρευση τάσης.

Στην συνέχεια θα εξάγουμε τις συνθήκες ευστάθειας και αστάθειας του ΣΑΤΦ, χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό συνεχές μοντέλο των ΣΑΤΦ. Γραμμικοποιώντας την διαφορική εξίσωση (1.4.12) που περιγράφει την λειτουργία του προκύπτει :

$$\Delta r = \frac{1}{T_c} \frac{\partial V_2}{\partial r} \Delta r \quad (1.4.23)$$

Συνεπώς η συνθήκη ευστάθειας ενός ΣΑΤΦ είναι :

$$\frac{\partial V_2}{\partial r} < 0 \quad (1.4.24)$$

Η παραπάνω συνθήκη ευστάθειας προκύπτει και από την ανάλυση των εξισώσεων λειτουργίας του ΣΑΤΦ. Θεωρούμε μία απόκλιση της τάσης δευτερεύοντος V_2 του μετασχηματιστή από την τάση αναφοράς V_2^0 , και έστω $V_2 > V_2^0$. Τότε σύμφωνα με την εξίσωση (1.4.11) η σχέση μετασχηματισμού r θα αυξηθεί ($\Delta r > 0$) για να μειώσει την τάση V_2 .

- Αν $\frac{\partial V_2}{\partial r} < 0$, τότε η μεταβολή της τάσης δευτερεύοντος V_2 θα είναι $\Delta V_2 = \frac{\partial V_2}{\partial r} \cdot \Delta r < 0$, δηλαδή προς τη σωστή κατεύθυνση για να μειώσει την τάση V_2 και να την επαναφέρει στην τάση αναφοράς V_2^0 . Άρα το ΣΑΤΦ λειτουργεί ευσταθώς.
- Αν αντίθετα $\frac{\partial V_2}{\partial r} > 0$, τότε η μεταβολή της τάσης δευτερεύοντος V_2 θα είναι $\Delta V_2 > 0$, δηλαδή σε αντίθετη από την επιθυμητή κατεύθυνση και θα απομακρύνει τη τάση δευτερεύοντος V_2 από την τάση αναφοράς V_2^0 . Σε αυτήν την περίπτωση η λειτουργία του ΣΑΤΦ είναι ασταθής.

1.4.3 Θερμοστατικά φορτία

Μια τυπική κατηγορία φορτίων με τάση αποκατάστασης της καταναλισκόμενης ισχύος, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 1.4.1, είναι τα ελεγχόμενα από θερμοστάτη στοιχεία, που χρησιμοποιούνται στις συσκευές θέρμανσης. Οι θερμοστάτες ελέγχουν τον κύκλο λειτουργίας των συσκευών θέρμανσης με ζεύξη και απόζευξη των αντίστοιχων αντιστάσεων, ώστε να διατηρούν τη απαιτούμενη θερμοκρασία υπό τις επικρατούσες συνθήκες.

Θεωρούμε η συσκευές θέρμανσης, μοναδιαίου συντελεστή ισχύος και σταθερής αγωγιμότητας, που ελέγχονται από ανεξάρτητους θερμοστάτες και συνδέονται παράλληλα σε τάση V . Σε κάθε στοιχείο k απαιτείται κατανάλωση ισχύος P_{dk} για τη διατήρηση της καθορισμένης θερμοκρασίας υπό τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Η μέση καταναλισκόμενη ισχύς P_k στο στοιχείο k θα είναι:

$$P_k = f_k \cdot G_k \cdot V^2 \quad (1.4.25)$$

όπου $0 \leq f_k \leq 1$ είναι η παράμετρος του κύκλου λειτουργίας. Η παράμετρος f_k αντιστοιχεί στο ποσοστό του χρόνου, όπου η αντίσταση τροφοδοτείται, σε ένα κύκλο.

Η μέση καταναλισκόμενη ισχύς P_k ισούται με την απαιτούμενη ισχύ P_{dk} ($P_k = P_{dk}$), υπό την προϋπόθεση ότι η συσκευή μπορεί να απορροφήσει την απαιτούμενη ισχύ, δηλαδή ότι ικανοποιείται η συνθήκη $P_{dk} \leq G_k \cdot V^2$. Διαφορετικά αν $P_{dk} > G_k \cdot V^2$, η αντίσταση τροφοδοτείται συνεχώς ($f_k=1$), ωστόσο δεν μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ισχύς ($P_k < P_{dk}$).

Μια ακόμα ερμηνεία της παραμέτρου f_k είναι ότι εκφράζει την πιθανότητα η συσκευή k να βρίσκεται σε λειτουργία σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μέση καταναλισκόμενη ισχύς σε όλες τις συσκευές σε μια χρονική στιγμή t θα δίνεται από τη μεταβατική χαρακτηριστική φορτίου:

$$P_t(V) = \sum_{k=1}^n f_k(t) \cdot G_k \cdot V^2 \quad (1.4.26)$$

Θεωρούμε μια αρχική τάση V_o , ώστε η συνολική απορροφώμενη ισχύς από όλες τις συσκευές να είναι:

$$P_o = \sum_{k=1}^n P_{dk} = \sum_{k=1}^n f_{ko} \cdot G_k \cdot V_o^2 \quad (1.4.27)$$

όπου $f_{ko} < 1$ για κάθε k .

Μια απότομη μείωση της τάσης φορτίου σε V θα έχει ως αποτέλεσμα τη στιγμιαία μείωση της συνολικής απορροφώμενης ισχύος P . Επομένως ο έλεγχος του θερμοστάτη βαθμιαία θα αυξάνει το διάστημα λειτουργίας των ανεξάρτητων συσκευών (αύξηση του $f_k(t)$), μέχρι για κάθε συσκευή k να ικανοποιηθεί η σχέση $P_k = P_{dk}$ ή να φτάσει στη μέγιστη τιμή 1 η παράμετρος f_k .

Αν ονομάσουμε $L(V)$ το σύνολο των συσκευών k που δεν μπορούν να αποκαταστήσουν την απαιτούμενη ισχύ ($P_{dk} > G_k \cdot V^2$), η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς στη μόνιμη κατάσταση θα είναι:

$$P_s(V) = \sum_{k=1}^n f_k(\infty) \cdot G_k \cdot V^2 = \sum_{k \notin L} P_{dk} + V^2 \cdot \sum_{k \in L} G_k \quad (1.4.28)$$

Η ισχύς αυτή θα είναι μικρότερη από την αρχική P_o , αν το σύνολο $L(V)$ δεν είναι κενό. Δηλαδή αν η πτώση τάσης είναι αρκετά μεγάλη, είναι πιθανό όλες οι συσκευές να παραμένουν σε συνεχή λειτουργία και επομένως η χαρακτηριστική φορτίου να είναι τύπου σταθερής αντίστασης και στη μόνιμη κατάσταση.

Η δυναμική συμπεριφορά του συνολικού θερμοστατικού φορτίου μπορεί να μοντελοποιηθεί προσεγγιστικά με μία ισοδύναμη χρονικά μεταβαλλόμενη αγωγιμότητα:

$$T_L \cdot \dot{G} = P_o / V^2 - G \quad (1.4.29)$$

όπου T_L είναι η σταθερά χρόνου της θερμοστατικής αποκατάστασης φορτίου. Η διαφορική εξίσωση (1.4.29) συμπληρώνεται με τον περιορισμό:

$$G \leq G_{\max}(V) \quad (1.4.30)$$

όπου:

$$G_{\max}(V) = \frac{P_s(V)}{V^2} = \sum_{k=1}^n f_k(\infty) \cdot G_k \quad (1.4.31)$$

που εξαρτάται από τον αριθμό των συσκευών σε πλήρη λειτουργία και άρα το επίπεδο τάσης V . Η μέγιστη τιμή του $G_{\max}(V)$ αντιστοιχεί στο άθροισμα όλων των αγωγιμοτήτων G_k , και εμφανίζεται όταν όλες οι συσκευές παραμένουν σε διαρκή λειτουργία.

Η συνολική ισχύς σε κάθε χρονική στιγμή θα δίνεται από τη σχέση:

$$P = G \cdot V^2 \quad (1.4.32)$$

1.5 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Στις μέρες μας, λόγω της αυξανόμενης ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται εντατικότερη χρήση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, με αποτέλεσμα να λειτουργούν πολύ κοντά στα όρια φόρτισης τους. Έτσι τα ΣΗΕ διατρέχουν μεγαλύτερο κίνδυνο εμφάνισης αστάθειας τάσης σε περίπτωση κάποιας σοβαρής διαταραχής και η απαίτηση για διατήρηση ορισμένων προδιαγραφών ευσταθούς λειτουργίας γίνεται επιτακτική. Η κατάσταση επιδεινώνεται με τις ανακατατάξεις που προκαλεί το άνοιγμα των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στις περισσότερες χώρες του κόσμου.

Τα τελευταία χρόνια πολλοί ερευνητές και μηχανικοί έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη της αστάθειας τάσεως και των φαινομένων που την προκαλούν. Η έρευνα προσανατολίζεται τόσο στην ανάλυση και την ερμηνεία της αστάθειας τάσεως, όσο και στην ανάπτυξη λογισμικών εργαλείων για τη λήψη μέτρων αντιμετώπισης των φαινομένων αστάθειας τάσεως. Η κατανόηση των μηχανισμών αστάθειας τάσης, που εμπλέκουν μεγάλο εύρος φυσικών φαινομένων, είναι σημαντική για τη σχεδίαση οικονομικών και αποτελεσματικών μέτρων αντιμετώπισης.

Εκτεταμένη ανάλυση των φαινομένων αστάθειας τάσης γίνεται στα [1,2,3], όπου το πρόβλημα της αστάθειας προσεγγίζεται με τη βοήθεια της θεωρίας των μη γραμμικών συστημάτων. Επίσης στα [1,3,12,14] αναλύεται η επίδραση των μηχανισμών που κύρια οδηγούν σε αστάθεια τάσης και οι οποίοι είναι τα φορτία δυναμικής φύσης, τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) και τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) των γεννητριών.

Στις εργασίες [3,6,7,8,9,10,11,12] προτείνονται διάφορα μέτρα αντιμετώπισης της αστάθειας τάσης. Εδώ θα ασχοληθούμε κυρίως με μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΦ των μετασχηματιστών διανομής ενός ΣΗΕ. Μια συνηθισμένη μέθοδος επέμβασης στο μηχανισμό των ΣΑΤΦ σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης είναι η απενεργοποίηση των ΣΑΤΦ (tap blocking) που αναλύεται στην εργασία [6]. Ωστόσο η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα και δεν αντιμετωπίζει άλλους μηχανισμούς αποκατάστασης φορτίου που θα συνεχίζουν να κινούν την αστάθεια. Στο [8] παρουσιάζεται μια τροποποιημένη μέθοδος ελέγχου των ΣΑΤΦ που υπολογίζει σε κάθε χρονική στιγμή τη βέλτιστη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού κάθε ΣΑΤΦ (μείωση, αύξηση ή χωρίς μεταβολή), σε συνδυασμό με άλλα μέτρα αντιμετώπισης, όπως σύνδεση πυκνωτών ή απόρριψη φορτίου, χρησιμοποιώντας μοντέλα πρόβλεψης και μεθόδους δένδρικής αναζήτησης.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η μέθοδος της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΦ (tap reversing), ως μέτρο εκτάκτου ανάγκης για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης. Το μέτρο αυτό αντιστρέφει το μηχανισμό του ΣΑΤΦ, ώστε να ελέγχει την τάση πρωτεύοντος και όχι την τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται συνοπτικά στα [3,12], ενώ έχει αναλυθεί αρχικά στο [9] και εκτενέστερα στο [10]. Στην εργασία [11] η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε ένα απλό σύστημα ενός φορτίου, που τροφοδοτείται από μια γεννήτρια μέσω ενός μετασχηματιστή εξοπλισμένου με ΣΑΤΦ. Εδώ θα εμβαθύνουμε σε αυτήν την εφαρμογή και επιπλέον θα εφαρμόσουμε τη μέθοδο σε ένα πιο σύνθετο σύστημα δύο φορτίων με βροχοειδή διάταξη.

1.6 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε συνοπτικά τη δομή της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια.

Βασικό αντικείμενο της εργασίας είναι η αξιολόγηση της εφαρμογής αντιστρόφου ελέγχου στα ΣΑΤΦ (tap reversing) ως μέτρο εκτάκτου ανάγκης για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης. Η μέθοδος αυτή συνίσταται στην αντιστροφή του μηχανισμού του ΣΑΤΦ, ώστε ο έλεγχος να πραγματοποιείται στην τάση πρωτεύοντος. Για την περιγραφή και ανάλυση της μεθόδου αυτής χρησιμοποιούνται δύο Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, ένα ακτινικό σύστημα ενός φορτίου και ένα σύστημα με δύο φορτία σε βροχοειδή διάταξη. Τα συστήματα αυτά περιλαμβάνουν μετασχηματιστές εξοπλισμένους με Σύστημα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) μέσω των οποίων τροφοδοτούνται τα αντίστοιχα φορτία. Τα φορτία στα δύο συστήματα θεωρούνται ρυθμιζόμενης αγωγιμότητας, με τάση αποκατάστασης της ισχύος φορτίου.

Η μεθοδολογία που ακολουθούμε είναι η παρακάτω :

- Αρχικά εξάγεται με προσομοιώσεις η απόκριση των δύο συστημάτων σε συγκεκριμένη διαταραχή με και χωρίς εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στα ΣΑΤΦ. Στις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιείται το διακριτό, μη γραμμικό μοντέλο για τα ΣΑΤΦ
- Συγκρίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για διάφορες τιμές των παραμέτρων του αντιστρόφου ελέγχου
- Αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος χρησιμοποιώντας το προσεγγιστικό συνεχές μοντέλο του ΣΑΤΦ και γραμμικοποιώντας το σύστημα.
- Εξάγεται με γραμμικοποίηση ο πίνακας ευαισθησιών του συστήματος, ο οποίος χρησιμοποιείται στα κριτήρια επιλογής του ΣΑΤΦ που θα αντιστραφεί (για το σύστημα δύο φορτίων)

Στην συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά τα έξι κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας.

Στο *πρώτο* κεφάλαιο περιγράφεται ο στόχος και η λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) και εισάγονται οι έννοιες της ευστάθειας ηλεκτρικού συστήματος, της αστάθειας τάσης και της κατάρρευσης συστήματος. Επιπλέον αναλύονται η λειτουργία των ΣΗΕ και τα φαινόμενα αστάθειας τάσης χρησιμοποιώντας τις χαρακτηριστικές καμπύλες δικτύου και φορτίου. Τέλος εξηγείται η συμπεριφορά των δυναμικών φορτίων και των Συστημάτων Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) και περιγράφεται η δυναμική αποκατάστασης φορτίου που υλοποιούν οι μηχανισμοί αυτοί.

Στο *δεύτερο* κεφάλαιο κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το χρόνο εξέλιξης τους τα δυναμικά φαινόμενα που συγκροτούν την συμπεριφορά ενός ΣΗΕ και εξάγονται τα μοντέλα αναπαράστασης των ΣΗΕ με διαχωρισμό σε χρονικές κλίμακες. Επίσης παρατίθεται το αναγκαίο μαθηματικό υπόβαθρο για την ανάλυση της στατικής ευστάθειας ενός συστήματος: γραμμικοποίηση, ιδιοτιμές, ιδιοδιανύσματα, ρυθμοί απόκρισης και συσχέτιση τους με την ευστάθεια. Τέλος περιγράφεται η εξαγωγή των επιφανειών ορίων φόρτισης σε ένα ΣΗΕ και οι διάφορες μορφές αυτών των επιφανειών.

Στο *τρίτο* κεφάλαιο περιγράφονται ο σκοπός και οι βασικές αρχές της Προστασίας σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Γίνεται διάκριση μεταξύ της προστασίας του εξοπλισμού του συστήματος από υπερεντάσεις, υπερτάσεις κτλ. που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος, και της προστασίας του συστήματος από αστάθεια τάσης. Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται τα μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης, όπως είναι ο αντίστροφος έλεγχος των ΣΑΤΦ που προτείνεται στην παρούσα εργασία.

Στο *τέταρτο* κεφάλαιο ορίζονται οι κανόνες για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που δίνουν την απόκριση των συστημάτων μετά τη διαταραχή. Ο αντίστροφος έλεγχος εφαρμόζεται στο ΣΑΤΦ όταν η τάση πρωτεύοντος του μετασχηματιστή πέσει κάτω από μια τιμή κατωφλιού. Στο σύστημα ενός φορτίου προσομοιώνεται η εξέλιξη του συστήματος με και χωρίς εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ και για διάφορες τιμές παραμέτρων του αντιστρόφου ελέγχου. Επιλέγονται έτσι οι παράμετροι που δίνουν το καλύτερο αποτέλεσμα. Στο σύστημα δύο φορτίων παρουσιάζονται παρόμοια αποτελέσματα για τρεις διαφορετικούς συνδυασμούς φόρτισης. Εδώ εξάγεται με προσομοίωση η απόκριση του συστήματος για εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο καθένα από τα δύο ΣΑΤΦ ξεχωριστά και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Στο *πέμπτο* κεφάλαιο χρησιμοποιείται το μοντέλο συνεχούς χρόνου για την ανάλυση του συστήματος δύο φορτίων. Με χρήση της γραμικοποίησης και των ιδιοτιμών του πίνακα καταστάσεως προσδιορίζεται η ευστάθεια του συστήματος. Επίσης διατυπώνονται κριτήρια για την επιλογή του ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί, τα οποία στηρίζονται στον πίνακα ευαισθησιών των τάσεων ως προς τις μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού. Τέλος διεξάγεται προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος στο χώρο των μεταβλητών κατάστασης, για αντιστροφή στα δύο ΣΑΤΦ ξεχωριστά χρησιμοποιώντας το μοντέλο συνεχούς χρόνου.

Το *έκτο* κεφάλαιο αναφέρεται στη σχεδίαση της μεθόδου αντιστρόφου ελέγχου των ΣΑΤΦ στο σύστημα δύο φορτίων και την επιλογή των παραμέτρων του αντιστρόφου ελέγχου, ώστε η μέθοδος να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Τέλος στο *έβδομο* κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι προοπτικές που προκύπτουν από την ανάλυση που γίνεται στη παρούσα διπλωματική εργασία.

2 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ **ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

2.1 ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΣΗΕ

2.1.1 Γενικά

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η εξαγωγή ενός γενικού δυναμικού μοντέλου για ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Τα δυναμικά φαινόμενα τα οποία συγκροτούν τη συμπεριφορά ενός συστήματος εξελίσσονται σε διάφορες χρονικές κλίμακες: μερικά έχουν γρήγορη απόκριση ενώ κάποια άλλα αργή. Ανάλογα με την ταχύτητα απόκρισής τους τα δυναμικά φαινόμενα σε ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας διακρίνονται σε τρεις χρονικές κλίμακες [3]:

- **Ακαριαία φαινόμενα**: Τα φαινόμενα αυτά περιγράφονται από αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στο δίκτυο. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, που εξελίσσονται πολύ γρήγορα σε σχέση με τα χρονικά διαστήματα που μας ενδιαφέρουν σε μελέτες ευστάθειας τάσης. Έτσι η απόκριση του δικτύου του συστήματος θεωρείται ακαριαία.
- **Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα**: Σε αυτή τη χρονική κλίμακα ανήκει η δυναμική συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών, των κινητήρων επαγωγής και διατάξεων ελέγχου, όπως αυτόματοι ρυθμιστές τάσεως και ρυθμιστές στροφών. Οι δυναμικές αυτές διαρκούν συνήθως 1-2 sec μετά τη διαταραχή και περιγράφονται από τις διαφορικές εξισώσεις των αντίστοιχων διατάξεων και συστημάτων.
- **Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα** : Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν φαινόμενα με διάρκεια από μερικές δεκάδες δευτερολέπτων μέχρι μερικά λεπτά. Τα φαινόμενα αυτά μπορούν να είναι συνεχή ή διακριτά. Διατάξεις που ανήκουν στην κλίμακα αυτή και λειτουργούν με διακριτό τρόπο είναι τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΦ) στους μετασχηματιστές, τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) των γεννητριών, οι μηχανισμοί ζεύξεως-αποζεύξεως πυκνωτών και πηνίων κτλ. Συνεχή μακροπρόθεσμη δυναμική συμπεριφορά παρουσιάζουν κάποιες βραδείες διατάξεις ελέγχου (όπως η αυτόματη κατανομή παραγωγής μεταξύ των γεννητριών ή ο δευτερεύων έλεγχος τάσης) και τα θερμοστατικά φορτία. Τα φαινόμενα αυτά είναι βραδύτερα από τα προηγούμενα και εμφανίζονται συνήθως αφού τα πρώτα έχουν φτάσει σε κατάσταση ισορροπίας. Ειδικά οι ρυθμιστές και οι συσκευές προστασίας σχεδιάζονται ώστε να δρουν μετά την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και να αποφεύγονται άσκοπες λειτουργίες των διατάξεων αυτών ή αλληλεπιδράσεις με τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα που μπορούν να οδηγήσουν σε αστάθεια. Τα μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα περιγράφονται είτε από διαφορικές εξισώσεις (συνεχή) είτε από εξισώσεις διαφορών (διακριτά).

Σύμφωνα με την παραπάνω διάκριση σε χρονικές κλίμακες ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας περιγράφεται από τις εξής αλγεβρικές και διαφορικές εξισώσεις:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.1.1)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.1.2)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.1.3a)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{w}) \quad (2.1.3b)$$

όπου

\mathbf{x} : διάνυσμα των n μεταβλητών κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (γρήγορες μεταβλητές)

\mathbf{y} : διάνυσμα των l αλγεβρικών μεταβλητών του δικτύου

\mathbf{z}_c : διάνυσμα των m_1 συνεχών μεταβλητών κατάστασης στην μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (αργές μεταβλητές)

\mathbf{z}_d : διάνυσμα των m_2 διακριτών μεταβλητών κατάστασης στην μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα (αργές μεταβλητές)

\mathbf{w} : διάνυσμα των παραμέτρων του συστήματος.

Οι εξισώσεις (2.1.1) αντιστοιχούν στην ακαριαία απόκριση του δικτύου και εκφράζουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στον κάθε ζυγό. Οι διαφορικές εξισώσεις (2.1.2) περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά των διατάξεων του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Τέλος οι εξισώσεις (2.1.3a) και (2.1.3b) εκφράζουν τη δυναμική συμπεριφορά των φαινομένων στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, για συνεχή και διακριτή συμπεριφορά αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε μόνο τις συνεχείς εξισώσεις (2.1.3a) για λόγους απλοποίησης, θεωρώντας ότι μπορούμε να προσεγγίσουμε και τα διακριτά φαινόμενα με συνεχή μοντέλα.

2.1.2 Διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων

Στις περισσότερες περιπτώσεις είναι πρακτικά δύσκολο να αναλύσουμε τη λειτουργία ενός συστήματος χρησιμοποιώντας όλες τις διαφορικές εξισώσεις που το περιγράφουν. Έτσι εκμεταλλευόμαστε το διαχωρισμό χρόνου που εμφανίζεται μεταξύ των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων φαινομένων, για να απλοποιήσουμε το μοντέλο του συστήματος.

Όταν είναι εφικτός ο διαχωρισμός των δυναμικών φαινομένων ενός συστήματος σε χρονικές κλίμακες, είναι δυνατόν να εξάγουμε μοντέλα μειωμένης τάξης που να περιγράφουν τη συμπεριφορά του χωριστά σε κάθε χρονική κλίμακα, χρησιμοποιώντας την Ανάλυση Ιδιαζουσών Διαταραχών. Έτσι χωρίζουμε το σύστημα σε δύο προσεγγιστικά υποσυστήματα μειωμένης τάξης από τα οποία το ένα θα περιγράφει τα γρήγορα, ενώ το άλλο τα αργά δυναμικά φαινόμενα. Ουσιαστικά όταν εξετάζουμε το αργό υποσύστημα θεωρούμε την απόκριση του γρήγορου υποσυστήματος ακαριαία, οπότε το αντικαθιστούμε με τις εξισώσεις ισορροπίας του. Αντίστροφα, όταν προσεγγίζουμε τα γρήγορα φαινόμενα, θεωρούμε τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές σταθερές.

Επομένως, κατά τη μελέτη των μακροπρόθεσμων φαινομένων, τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα αντιμετωπίζονται σαν διαδοχικά σημεία ισορροπίας. Η προσέγγιση αυτή καλείται *Οιονεί Στατική (Quasi Steady State - QSS) προσέγγιση* του γρήγορου υποσυστήματος. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση το αργό υποσύστημα περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.1.4)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.1.5)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.1.6)$$

όπου δηλαδή οι διαφορικές εξισώσεις των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων έχουν αντικατασταθεί με τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας.

Αντίστοιχα, στην ανάλυση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, θεωρούμε τις αργές μεταβλητές \mathbf{z} σταθερές κατά τη διάρκεια εξέλιξης των γρήγορων αυτών φαινομένων. Το γρήγορο υποσύστημα που προκύπτει περιγράφεται από τις εξισώσεις :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.1.7)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.1.8)$$

με \mathbf{z} σταθερές.

2.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΣΗΕ

2.2.1 Γραμμικοποίηση και Ιακωβιανοί πίνακες

Ο συστηματικός τρόπος για την ανάλυση της ευστάθειας μόνιμου καταστάσεως στηρίζεται στη γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από ένα σημείο λειτουργίας x_0 . Η ανάλυση της ευστάθειας ενός σημείου ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται σε προσδιορισμό της ευστάθειας του αντίστοιχου γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από το σημείο ισορροπίας αυτό.

Στην περίπτωση του μοντέλου προσέγγισης του ΣΗΕ που εξετάζουμε η γραμμικοποίηση μπορεί να εφαρμοστεί στο βραχυπρόθεσμο ή το μακροπρόθεσμο μοντέλο, ανάλογα με το ποια δυναμικά φαινόμενα μας ενδιαφέρουν.

2.2.1.1 Βραχυπρόθεσμο μοντέλο

Όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 2.1 το γρήγορο υποσύστημα παριστάνεται από ένα σύνολο διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων της μορφής :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.2.1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.2.2)$$

όπου \mathbf{x} είναι το διάνυσμα των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{y} είναι οι αλγεβρικές μεταβλητές του συστήματος, \mathbf{z} είναι το διάνυσμα των μακροπρόθεσμων μεταβλητών που θεωρούνται σαν αργά μεταβαλλόμενες παράμετροι και \mathbf{w} είναι οι παράμετροι του συστήματος.

Η ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}, \mathbf{w})$ προσδιορίζεται γραμμικοποιώντας το σύστημα των (2.2.1) και (2.2.2) γύρω από αυτό, οπότε προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_s \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

όπου \mathbf{J}_s ο Ιακωβιανός πίνακας του βραχυπρόθεσμου συστήματος που ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{J}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{bmatrix} \quad (2.2.4)$$

όπου \mathbf{f}_x , \mathbf{f}_y , \mathbf{g}_x και \mathbf{g}_y είναι οι Ιακωβιανοί πίνακες των συναρτήσεων \mathbf{f} και \mathbf{g} ως προς τις μεταβλητές καταστάσεις \mathbf{x} και τις αλγεβρικές μεταβλητές \mathbf{y} .

Όταν ο \mathbf{g}_y είναι αντιστρέψιμος ($\det \mathbf{g}_y \neq \mathbf{0}$) το διάνυσμα $\Delta \mathbf{y}$ μπορεί να απαλοισφεί από το γραμμικοποιημένο μοντέλο και το σύστημα να γραφεί στη μορφή:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}_x \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (2.2.5)$$

όπου $\mathbf{F}_x = \mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x$ ο ελαττωμένος κατά τις αλγεβρικές μεταβλητές Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του βραχυπρόθεσμου υποσυστήματος.

2.2.1.2 Μακροπρόθεσμο μοντέλο

Υποθέτοντας έναν καλό διαχωρισμό σε χρονικές κλίμακες και χρησιμοποιώντας την οιονεί στατική προσέγγιση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν φτάσει σε ισορροπία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μακροπρόθεσμο υποσύστημα περιγράφεται από τις εξισώσεις :

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.2.6)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.2.7)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (2.2.8)$$

Γραμμικοποιώντας πάλι γύρω από ένα σημείο ισορροπίας $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{z}_0, \mathbf{w})$ προκύπτει:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{z}} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_L \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z} \\ \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (2.2.9)$$

όπου \mathbf{J}_L ο Ιακωβιανός πίνακας του μακροπρόθεσμου υποσυστήματος :

$$\mathbf{J}_L = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_z & \mathbf{h}_x & \mathbf{h}_y \\ \mathbf{f}_z & \begin{pmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \end{pmatrix} \\ \mathbf{g}_z & \begin{pmatrix} \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{pmatrix} \end{bmatrix} \quad (2.2.10)$$

Ο υποπίνακας στην παρένθεση είναι ο Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_S του βραχυπρόθεσμου υποσυστήματος.

Όταν ο \mathbf{J}_S είναι αντιστρέψιμος ($\det \mathbf{J}_S \neq \mathbf{0}$) τα διανύσματα $\Delta \mathbf{x}$ και $\Delta \mathbf{y}$ μπορούν να απαλειφθούν από το σύστημα εξισώσεων (2.2.9) και το σύστημα θα πάρει τη μορφή

$$\Delta \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{H}_z \cdot \Delta \mathbf{z} \quad (2.2.11)$$

όπου $\mathbf{H}_z = \mathbf{h}_z - \begin{bmatrix} \mathbf{h}_x & \mathbf{h}_y \end{bmatrix} \cdot \mathbf{J}_S^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{f}_z \\ \mathbf{g}_z \end{bmatrix}$ ο ελαττωμένος - κατά τις γρήγορες μεταβλητές

κατάστασης και τις αλγεβρικές μεταβλητές - Ιακωβιανός πίνακας κατάστασης του μακροπρόθεσμου υποσυστήματος.

2.2.2 Ιδιοτιμές – Ιδιοδιανύσματα - Ρυθμοί απόκρισης

Θεωρούμε ένα γραμμικό σύστημα με n μεταβλητές κατάστασης που περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.2.12\alpha)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (2.2.12\beta)$$

όπου \mathbf{x} το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης, \mathbf{u} το διάνυσμα των μεταβλητών εισόδου και \mathbf{y} το διάνυσμα των μεταβλητών εξόδου.

Το σύστημα αυτό μπορεί να έχει προκύψει από γραμμικοποίηση του μοντέλου του ΣΗΕ όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 2.2.1.

Αν θεωρήσουμε μηδενικές εισόδους στο σύστημα, δηλαδή $\mathbf{u}=\mathbf{0}$, οι εξισώσεις καταστάσεων του συστήματος θα γίνουν:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (2.2.13)$$

και η μεταβολή των μεταβλητών καταστάσεων \mathbf{x} με το χρόνο ορίζει την *ελεύθερη απόκριση* του συστήματος.

Ο $n \times n$ πίνακας συστήματος \mathbf{A} έχει ιδιοτιμές λ_k , $k=1,2,\dots,n$, που ικανοποιούν την εξίσωση:

$$\det(\lambda_k \cdot \mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = 0 \quad (2.2.14)$$

Θεωρούμε για λόγους απλότητας ότι οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} είναι διακριτές. Τότε ο πίνακας θα έχει n δεξιά και n αριστερά ιδιοδιανύσματα, \mathbf{u}_k και \mathbf{v}_k αντίστοιχα, που ικανοποιούν τις εξισώσεις:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_k = \lambda_k \cdot \mathbf{u}_k \quad (2.2.15)$$

$$\mathbf{v}_k^T \cdot \mathbf{A} = \lambda_k \cdot \mathbf{v}_k^T \quad \text{ή} \quad \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{v}_k = \lambda_k \cdot \mathbf{v}_k \quad (2.2.16)$$

Τα αριστερά και δεξιά ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ιδιοτιμές είναι μεταξύ τους κάθετα, δηλαδή ισχύει:

$$\mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_j \cdot \mathbf{u}_i^T = 0, \quad \text{για } j \neq i \quad (2.2.17)$$

Επιπλέον μπορούμε να κανονικοποιήσουμε τα ιδιοδιανύσματα, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\mathbf{u}_k^T \cdot \mathbf{v}_k = \mathbf{v}_k \cdot \mathbf{u}_k^T = 1 \quad (2.2.18)$$

Μπορούμε να ορίσουμε τους πίνακες:

$$\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n]$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_n]$$

$$\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

Οι σχέσεις (2.2.15), (2.2.16) τώρα εκφράζονται ως εξής:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{\Lambda} \quad (2.2.19)$$

$$\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{V} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{\Lambda} \quad (2.2.20)$$

Από τις σχέσεις (2.2.17), (2.2.18) προκύπτει ότι ο πίνακας \mathbf{V}^T είναι αντίστροφος του \mathbf{U} , άρα ισχύει:

$$\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{U} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^T = \mathbf{I}_n \quad (2.2.21)$$

Ας θεωρήσουμε ένα νέο διάνυσμα κατάστασης ξ , το οποίο ονομάζουμε *διάνυσμα ρυθμών* και το οποίο ορίζεται μέσω του μετασχηματισμού:

$$\mathbf{x} = \mathbf{U} \cdot \xi \quad (2.2.22)$$

Οι εξισώσεις κατάστασης λόγω της (2.2.22) γίνονται:

$$\mathbf{U} \cdot \dot{\xi} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} \cdot \xi \quad (2.2.23)$$

και ισχύει λόγω της (2.2.19) :

$$\dot{\xi} = \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{U} \cdot \xi = \mathbf{\Lambda} \cdot \xi \quad (2.2.24)$$

Τώρα οι n διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης μπορούν να επιλυθούν ξεχωριστά, αφού ο πίνακας $\mathbf{\Lambda}$ είναι διαγώνιος. Έτσι παίρνουμε τους n ρυθμούς απόκρισης του συστήματος:

$$\xi_{\kappa} = \xi_{\kappa 0} \cdot e^{\lambda_{\kappa} t}, \quad \kappa = 1, 2, \dots, n \quad (2.2.25)$$

Οι αρχικές τιμές ξ_0 των ρυθμών ξ όπως προκύπτει από τον ορισμό του διανύσματος ρυθμών εκφράζονται συναρτήσει των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης \mathbf{x}_0 ως εξής :

$$\xi_0 = \mathbf{U}^{-1} \cdot \mathbf{x}_0 = \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{x}_0 \quad (2.2.26)$$

άρα :

$$\xi_{\kappa 0} = \mathbf{v}_{\kappa}^T \cdot \mathbf{x}_0 \quad (2.2.27)$$

Επομένως η ελεύθερη απόκριση των μεταβλητών κατάστασης \mathbf{x} θα δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{\kappa=1}^n e^{\lambda_{\kappa} t} \cdot \mathbf{u}_{\kappa} \cdot \mathbf{v}_{\kappa}^T \cdot \mathbf{x}_0 \quad (2.2.28)$$

Συνεπώς, η ελεύθερη απόκριση του συστήματος είναι γραμμικός συνδυασμός n εκθετικών συναρτήσεων της μορφής $\mathbf{K} \cdot e^{\lambda_{\kappa} t}$ που αντιστοιχούν στους n ρυθμούς απόκρισης του συστήματος.

Είναι προφανές ότι το σημείο ισορροπίας του γραμμικού συστήματος θα είναι ασυμπτωτικά ευσταθές αν και μόνο αν τα πραγματικά μέρη των ιδιοτιμών λ_{κ} είναι όλα αρνητικά. Αυτό γεωμετρικά σημαίνει ότι όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα \mathbf{A} πρέπει να βρίσκονται στο αριστερό μιγαδικό ημιπίεδο.

Όταν μια ιδιοτιμή είναι πραγματική, ο αντίστοιχος ρυθμός απόκρισης είναι μια φθίνουσα ή αύξουσα εκθετική συνάρτηση, ανάλογα αν η ιδιοτιμή είναι αρνητική ή θετική αντίστοιχα.

Όταν οι ιδιοτιμές εμφανίζονται σε μιγαδικά ζευγάρια, οι αντίστοιχοι ρυθμοί απόκρισης αποτελούν φθίνουσα ή αύξουσα ταλάντωση και ονομάζονται *ρυθμοί ταλάντωσης*. Η απόσβεση και η συχνότητα ταλάντωσης εξαρτώνται αποκλειστικά από το πραγματικό και φανταστικό μέρος της ιδιοτιμής. Συγκεκριμένα για ιδιοτιμές $\lambda_{\kappa} = -\alpha \pm \beta \cdot i$, με $\alpha > 0$, ο συντελεστής απόσβεσης ζ είναι:

$$\zeta = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (2.2.29)$$

Ταλαντώσεις δημιουργούνται για τιμές $0 < \zeta < 1$, αλλά είναι ορατές όταν ο συντελεστής απόσβεσης ζ είναι μικρότερος από την τιμή 0.707 ($0 < \zeta \leq 0.707$).

Από τις σχέσεις (2.2.22) και (2.2.27) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη φυσική σημασία των δεξιών και αριστερών ιδιοδιανυσμάτων:

- Το δεξί ιδιοδιάνυσμα \mathbf{u}_{κ} δείχνει πόσο εμφανίζεται ο ρυθμός κ στις μεταβλητές κατάστασης. Συγκεκριμένα ο κ ρυθμός εμφανίζεται στη μεταβλητή κατάστασης x_i με μέγεθος ανάλογο του i -οστού στοιχείου του \mathbf{u}_{κ} .

- Αντίστροφα το αριστερό ιδιοδιάνυσμα \mathbf{v}_{κ} δείχνει πόσο επηρεάζει κάθε μεταβλητή κατάστασης την εμφάνιση του ρυθμού κ . Δηλαδή η μεταβλητή κατάστασης x_i διεγείρει τον ρυθμό κ σε ποσοστό ανάλογο του i -οστού στοιχείου του αριστερού ιδιοδιανύσματος \mathbf{v}_{κ} .

2.3 ΟΡΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

2.3.1 Γενικά

Σε αυτήν την παράγραφο εξετάζουμε το πρόβλημα του προσδιορισμού των ορίων φόρτισης ενός ηλεκτρικού συστήματος. Το πρόβλημα αυτό καταστρώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς [13].

Το σύνολο των ορίων φόρτισης του ΣΗΕ σχηματίζει την επιφάνεια ορίων φόρτισης, η οποία φράσσει την επιτρεπόμενη περιοχή λειτουργίας του συστήματος.

Θεωρούμε το μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελείται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων που υπόκεινται και σε αλγεβρικούς περιορισμούς (ομαλό μοντέλο):

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{h}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.3.1)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.3.2)$$

όπου \mathbf{z} είναι το διάνυσμα κατάστασης του ηλεκτρικού συστήματος, που περιλαμβάνει μεταβλητές κατάστασης γεννήτριας, διατάξεων ελέγχου και φορτίων, \mathbf{y} είναι οι αλγεβρικές μεταβλητές που σχετίζονται με τις τάσεις δικτύου (μέτρα και γωνίες φάσεων) και \mathbf{p} είναι το διάνυσμα των παραμέτρων ζήτησης φορτίου.

Αν ορίσουμε:

$$\mathbf{x}^T = [\mathbf{z}^T \quad \mathbf{y}^T], \quad \mathbf{f}^T = [\mathbf{h}^T \quad \mathbf{g}^T] \quad (2.3.3)$$

οι συνθήκες ισορροπίας του συστήματος (2.3.1), (2.3.2) που περιγράφουν τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος αποτελούνται από τις ακόλουθες n αλγεβρικές εξισώσεις:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}) = \mathbf{0} \quad (2.3.4)$$

Αν στο μοντέλο αυτό συμπεριλαμβάνουμε ασυνέχειες που εισάγονται από όρια διατάξεων του ΣΗΕ (μοντέλο μεταγωγής), για n_s μεταβλητές κατάστασης οι εξισώσεις (2.3.1) αντικαθίστανται από τις ακόλουθες εξισώσεις υπό συνθήκη:

$$\dot{z}_i = \mathbf{h}_{ia}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad \text{εάν} \quad \mathbf{h}_{ix}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) > \mathbf{0} \quad (2.3.5)$$

$$\dot{z}_i = \mathbf{h}_{ix}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad \text{εάν} \quad \mathbf{h}_{ix}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) < \mathbf{0} \quad (2.3.6)$$

Οι συνθήκες αλλαγής μεταξύ των (2.3.5-6) όταν $\mathbf{h}_{ix}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0}$ είναι:

$$\dot{z}_i = \mathbf{h}_{ia}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad \text{εάν} \quad \mathbf{h}_{ia}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) < \mathbf{0} \quad (2.3.7)$$

$$\dot{z}_i = \mathbf{h}_{ix}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad \text{εάν} \quad \mathbf{h}_{ia}(\mathbf{z}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \geq \mathbf{0} \quad (2.3.8)$$

Σύμφωνα με τον ορισμό (2.3.3) οι συνθήκες ισορροπίας στο σύστημα μεταγωγής γράφονται:

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.3.9)$$

$$\mathbf{f}_{ia}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \cdot \mathbf{f}_{ix}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.3.10)$$

$$\mathbf{f}_{ia}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \geq \mathbf{0} \quad (2.3.11)$$

$$\mathbf{f}_{ix}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \geq \mathbf{0} \quad (2.3.12)$$

με $i=1, \dots, n_s$ και $\boldsymbol{\varphi}$ είναι $n-n_s$ συναρτήσεις, ώστε $\mathbf{f}^T = [\boldsymbol{\varphi}^T \quad \mathbf{f}_a^T \quad \mathbf{f}_x^T]$ όπου τα διανύσματα $\mathbf{f}_a, \mathbf{f}_x$ αποτελούνται από όλες τις $\mathbf{f}_{ia}, \mathbf{f}_{ix}$.

Δηλαδή στο σημείο ισορροπίας μία εκ των $\mathbf{f}_{ia}, \mathbf{f}_{ix}$ ή και οι δύο μηδενίζονται (βλέπε σχέση (2.3.10)). Ο μηδενισμός και των δύο γίνεται σε σημείο ισορροπίας που είναι και σημείο μεταγωγής.

Τα όρια φόρτισης του συστήματος μεταγωγής προκύπτουν ως λύσεις $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{p}})$ του ακόλουθου προβλήματος βελτιστοποίησης :

$$\max_{\mathbf{x} \in X, \mathbf{p} \in P} \{ \zeta(\mathbf{p}) : (2.3.9) - (2.3.12) \} \quad (2.3.13)$$

όπου $\zeta(\mathbf{p})$ είναι μια συνεχής βαθμωτή συνάρτηση, τέτοια ώστε να μην είναι λύση του μη περιορισμένου προβλήματος

$$\max_{\mathbf{p} \in P} \{ \zeta(\mathbf{p}) \} \quad (2.3.14)$$

Οι λύσεις του προβλήματος αυτού θα δώσουν τα οριακά σημεία φόρτισης, όταν συμπεριλαμβάνονται και ανισοτικοί περιορισμοί. Αυτά τα όρια φόρτισης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι:

- σημεία διακλάδωσης, όπου η ορίζουσα του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης του συστήματος μηδενίζεται και άρα ο Ιακωβιανός $D_x \mathbf{f}$ είναι μη αντιστρέψιμος
- ιδίμορφα σημεία, στα οποία εμφανίζεται απότομα η αστάθεια λόγω της επιβολής ορίων σε διατάξεις του ΣΗΕ (σημεία μεταγωγής).

2.3.2 Εφαρμογή στις γεννήτριες με περιορισμό υπερδιέγερσης

Εδώ η παραπάνω ανάλυση θα εφαρμοστεί στην περίπτωση των γεννητριών που περιλαμβάνουν έλεγχο υπερδιέγερσης [13]. Θεωρούμε γεννήτριες εξοπλισμένες με σύστημα αυτόματης ρύθμισης τάσης (APT) πρώτης τάξης και σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) με ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή θα έχουμε:

$$\mathbf{h}_{ia} = \frac{1}{T_{ai}} \cdot [-E_{fi} + K_i \cdot (V_{ri} - V_i)] \quad (2.3.15)$$

$$\mathbf{h}_{ia} = \frac{1}{T_{xi}} (E_{fi}^{lim} - E_{fi}) \quad (2.3.16)$$

όπου V_{ri} και V_i είναι η τάση αναφοράς και η τερματική τάση αντίστοιχα της γεννήτριας i , K_i είναι το κέρδος του APT και E_{fi}^{lim} είναι το άνω όριο που αντιστοιχεί στο επιτρεπτό ρεύμα πεδίου για συνεχή λειτουργία.

Επομένως για κάθε γεννήτρια i οι διαφορικές εξισώσεις (υπό συνθήκη) είναι:

$$T_{ai} \dot{E}_{fi} = -E_{fi} + K_i \cdot (V_{ri} - V_i) \quad \text{εάν } E_f \leq E_f^{lim} \quad (2.3.17)$$

$$T_{xi} \dot{E}_{fi} = E_{fi}^{lim} - E_{fi} \quad \text{εάν } E_{fi} - K_i \cdot (V_{ri} - V_i) \leq 0 \quad (2.3.18)$$

Η σχέση (2.3.18) αντιστοιχεί σε APT, ενώ η (2.3.19) σε συνθήκες δράσης του ΣΠΥ.

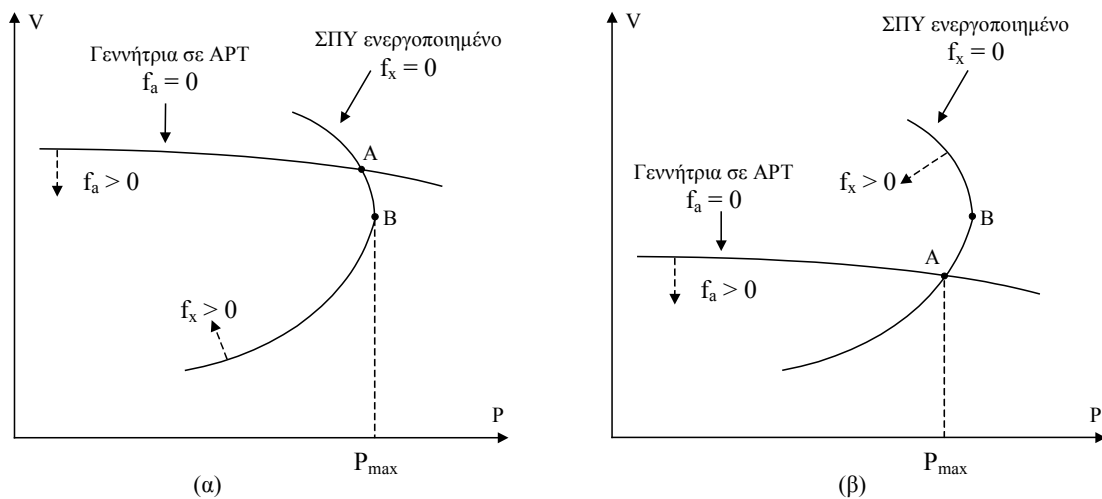
Συνεπώς το σύστημα διέγερσης μιας γεννήτριας i σε συνθήκες ισορροπίας είναι σε μία από τις ακόλουθες δύο καταστάσεις:

- Κάτω από έλεγχο APT: $\mathbf{f}_{ai} = -E_{fi} + K_i \cdot (V_{ri} - V_i) = 0$ (2.3.19)

- Σε συνθήκες δράσης του ΣΠΥ: $\mathbf{f}_{xi} = E_{fi}^{lim} - E_{fi} = 0$ (2.3.20)

Εάν σε κάποιο σημείο βέλτιστου του προβλήματος μόνο ένας από τους ανισοτικούς περιορισμούς είναι ενεργός, δηλαδή ικανοποιεί την ισότητα, η Ιακωβιανή του συστήματος είναι μη αντιστρέψιμη. Εάν τουλάχιστον για μία γεννήτρια και οι δύο ανισοτικοί περιορισμοί είναι ενεργοί στο όριο φόρτισης, ο συνολικός αριθμός των εξισώσεων υπερβαίνει το n και η Ιακωβιανή των αλγεβρικών εξισώσεων σε αυτήν την περίπτωση είναι ορθογώνια..

Η επίδραση του περιορισμού υπερδιέγερσης στο όριο φόρτισης απεικονίζεται στο σχήμα 2.3.1, όπου δίνονται οι PV καμπύλες που αντιστοιχούν στην γεννήτρια για έλεγχο του APT και κάτω από συνθήκες περιορισμού της διεγέρσεως. Στο σχήμα (α) η μηχανή υπερδιεγείρεται στο σημείο A, ενώ το όριο φόρτισης είναι το σημείο B, όπου η Ιακωβιανή με την γεννήτρια σε κατάσταση υπερδιέγερσης είναι μη αντιστρέψιμη. Στο σχήμα (β) απεικονίζεται ο τύπος ορίου φόρτισης λόγω μεταγωγής. Εδώ η γεννήτρια έχει και τις δύο ανισότητες ενεργές και το όριο φόρτισης δεν μπορεί να συσχετιστεί με μια μη αντιστρέψιμη Ιακωβιανή. Το όριο φόρτισης είναι το σημείο τομής A των δύο PV καμπυλών (σημείο καμπής ή οριακό σημείο μεταγωγής). Η ευστάθεια του συστήματος αλλάζει και εδώ, αφού στη PV καμπύλη που αντιστοιχεί στις συνθήκες περιορισμού διεγέρσεως της γεννήτριας, το σημείο τομής A βρίσκεται στο ασταθές κάτω μέρος της καμπύλης.



Σχήμα 2.3.1 Τύποι ορίων φόρτισης

3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

3.1.1 Γενικά

Βασικός στόχος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανότητα παραγωγής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σχεδιάζεται έτσι, ώστε να διανέμει ενέργεια στα σημεία κατανάλωσης με αξιοπιστία και οικονομία. Η εξασφάλιση ικανοποιητικής αξιοπιστίας είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαραίτητη, ωστόσο η αξιοπιστία περιορίζεται από το κόστος που απαιτεί η διασφάλιση της και επιλέγεται πάντα μια συμβιβαστική λύση.

Για λόγους αύξησης της απόδοσης και του κέρδους για την εταιρεία παροχής επιδιώκεται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να λειτουργεί κοντά στο όριο μέγιστης φόρτισης. Η λειτουργία του συστήματος σε μεγάλη φόρτιση όμως, σε συνδυασμό με τις περιορισμένες για οικονομικούς λόγους δυνατότητες εφεδρείας, είναι καταλυτική για την εξασφάλιση της συνεχούς και αξιόπιστης παροχής ενέργειας από το σύστημα. Η διατήρηση του συστήματος σε πλήρη λειτουργία όσο το δυνατόν αδιάκοπα αποτελεί βασική επιδίωξη, αφού προσφέρει βέλτιστη εξυπηρέτηση στον καταναλωτή, αλλά και μεγιστοποίηση του κέρδους για την εταιρεία παροχής.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της αδιάκοπης κανονικής λειτουργίας του ΣΗΕ και της τροφοδοσίας των καταναλωτών υπό κανονικές συνθήκες αλλά και υπό συνθήκες διαταραχών, δεν αρκεί ο σωστός σχεδιασμός και η κατάλληλη διευθέτηση των εφεδρικών μονάδων παραγωγής. Απαιτείται η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος προστασίας που θα αντιμετωπίζει όποιες διαταραχές και σφάλματα εμφανίζονται στο δίκτυο του συστήματος. Ο κίνδυνος σφάλματος ενυπάρχει σε κάθε στοιχείο ενός συστήματος και μάλιστα το ποσοστό κινδύνου πολλαπλασιάζεται σε συστήματα μεγάλων διαστάσεων, όπου υπάρχουν πολλά συσχετιζόμενα στοιχεία. Μάλιστα σε μεγάλα συστήματα η εμφάνιση ενός σφάλματος μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα, αφού πιθανόν να έχει αντίκτυπο σε πολλαπλά τμήματα του συστήματος. Χωρίς την κατάλληλη προστασία επομένως το σύστημα δεν μπορεί να εκπληρώσει το στόχο του.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο διαφορετικά είδη προστασίας, με διαφοροποιημένη λειτουργία και στόχο:

α) προστασία εξοπλισμού

Η προστασία εξοπλισμού στοχεύει σε άμεση εκκαθάριση των σφαλμάτων που εμφανίζονται στο δίκτυο, για να ελαχιστοποιηθούν η μηχανική καταστροφή του εξοπλισμού και οι πιθανές δυσλειτουργίες που προκαλεί το σφάλμα. Ο εξοπλισμός προστασίας πρέπει να απομονώσει το στοιχείο, όπου εμφανίστηκε βλάβη, ή την περιοχή που περικλείει το σημείο βλάβης, δίνοντας σήμα σε κάποιον διακόπτη, ώστε να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος.

β) προστασία συστήματος από αστάθεια

Η προστασία από αστάθεια, στην οποία εντάσσεται και το θέμα της παρούσας εργασίας, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου το σύστημα δεν μπορεί να ισορροπήσει σε κάποιο ευσταθές σημείο λειτουργίας, συνήθως μετά από σοβαρή διαταραχή, πτώση μονάδας παραγωγής ή μεγάλη και συντονισμένη αύξηση της ζήτησης φορτίου.

Απότομες μεταβολές στο σύστημα, όπως αυτές που αναφέρθηκαν, μπορούν να διαταράξουν την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης στη συνέχεια να οδηγήσουν το σύστημα σε αστάθεια, εκτεταμένη απώλεια συγχρονισμού και τελικά κατάρρευση. Σε τέτοιες περιπτώσεις η προστασία αποσκοπεί στην αποκατάσταση του συστήματος έστω και με σχεδιασμένη αποκοπή φορτίου ή νησιδοποίηση, διακόπτοντας δηλαδή την παροχή ενέργειας σε τμήμα των καταναλωτών.

3.1.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά της προστασίας

Για να χαρακτηριστεί ένα σύστημα προστασίας ως προς την ποιότητα και την απόδοση του, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω οριζόμενες έννοιες [16,18,19]:

◆ Εξαρτησιμότητα (Dependability)

Ως *εξαρτησιμότητα* ορίζεται ο βαθμός βεβαιότητας ότι ένα σύστημα προστασίας θα λειτουργήσει σωστά υπό την επίδραση συγκεκριμένων συνθηκών σφάλματος και εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Είναι δηλαδή η πιθανότητα μη αποτυχημένης λειτουργίας υπό δεδομένες συνθήκες, όπου αποτυχημένη λειτουργία είναι η μη λειτουργία ή η λανθασμένη λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες σφάλματος όπου θα έπρεπε να λειτουργήσει με συγκεκριμένο τρόπο.

Υψηλός βαθμός εξαρτησιμότητας σε μία προστασία εξασφαλίζει ότι κάποιο εμφανιζόμενο σφάλμα ή μια διαταραχή θα αντιμετωπιστεί με βεβαιότητα και μάλιστα σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Η εξαρτησιμότητα εκφράζεται από τον παρακάτω δείκτη:

$$D = 1 - \frac{N_F}{N_S} = \frac{N_S - N_F}{N_C + N_F} = \frac{N_C}{N_C + N_F}$$

όπου N_F είναι ο αριθμός των αποτυχημένων λειτουργιών για σφάλματα μέσα στην ζώνη της προστασίας, για τα οποία πρέπει να λειτουργήσει, N_S είναι ο αριθμός των σφαλμάτων για τα οποία η προστασία πρέπει να λειτουργήσει και N_C ο αριθμός των ορθών λειτουργιών.

◆ Ασφάλεια (Security)

Με τον όρο *ασφάλεια* εκφράζεται ο βαθμός βεβαιότητας ότι ένα σύστημα προστασίας δεν θα λειτουργήσει ανεπιθύμητα υπό δεδομένες συνθήκες. Ανεπιθύμητη είναι η λειτουργία του συστήματος όταν δεν υπάρχει σφάλμα ή όταν υπάρχει σφάλμα εκτός της ορισμένης ζώνης λειτουργίας του, γενικά δηλαδή σε κάθε περίπτωση που το σύστημα προστασίας λειτουργεί ενώ δεν θα έπρεπε. Η ασφάλεια επομένως εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να αποφεύγει την ανεπιθύμητη λειτουργία υπό συνθήκες σφάλματος ή όχι.

Υψηλό ποσοστό ασφάλειας σε ένα σύστημα προστασίας σημαίνει ότι δεν θα απομονωθεί κάποιο τμήμα του δικτύου χωρίς να υπάρχει ανάγκη και ότι το τμήμα του δικτύου που θα απομονωθεί σε περίπτωση σφάλματος θα είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

Ορίζεται ο δείκτης ασφάλειας:

$$S = \frac{N_C}{N_C + N_U}$$

όπου N_C ο αριθμός των ορθών λειτουργιών και N_U ο αριθμός των ανεπιθύμητων λειτουργιών, εντός δεδομένου χρονικού διαστήματος.

♦ Αξιοπιστία (Reliability)

Η αξιοπιστία είναι ο συνδυασμός των εννοιών της εξαρτησιμότητας και της ασφάλειας. Εκφράζει την πιθανότητα ότι το σύστημα προστασίας θα εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία για δεδομένες συνθήκες σφάλματος και μάλιστα εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος. Συνεπώς η αξιοπιστία αντιστοιχεί στη συνδυασμένη ικανότητα του συστήματος προστασίας να αποφύγει την αποτυχία λειτουργίας, αλλά και την ανεπιθύμητη λειτουργία.

Η αξιοπιστία ενός συστήματος προστασίας μετράται με τον δείκτη:

$$R = \frac{N_C}{N_C + N_I}$$

όπου N_C είναι ο αριθμός των σωστών λειτουργιών και N_I ο αριθμός των λανθασμένων λειτουργιών συνολικά, δηλαδή $N_I = N_F + N_U$.

Επειδή ένα σύστημα προστασίας εκτελεί λειτουργίες σε πολύ αραιά χρονικά διαστήματα (χρόνια), συχνά αντί της αξιοπιστίας χρησιμοποιούμε την έννοια της *αστοχίας*, η οποία είναι ακριβώς αντίστροφη, δηλαδή Αξιοπιστία = 1 / Αστοχία, και περιλαμβάνει οποιοδήποτε γεγονός επηρεάζει την εξαρτησιμότητα ή την ασφάλεια ενός συστήματος προστασίας. Για ένα μεγάλο σύστημα, η πιθανότητα αστοχίας κάθε συσκευής πολλαπλασιάζεται με τον αριθμό των σχετιζόμενων συσκευών στο σύστημα. Ένας άλλος δείκτης ενδεικτικός της αξιοπιστίας είναι ο *μέσος χρόνος μεταξύ αποτυχιών* (mean time between failure, MTBF) που είναι της τάξης των εκατοντάδων χρόνων για μια μεμονωμένη συσκευή προστασίας.

♦ Επιλεκτικότητα (Selectivity) - Συντονισμός (Coordination)

Η *επιλεκτικότητα* εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να επιλέγει τις συνθήκες για τις οποίες πρέπει να λειτουργήσει ή δεν πρέπει να λειτουργήσει ή πρέπει να λειτουργήσει με ορισμένη χρονική καθυστέρηση, ώστε να ανοίγει ο κοντινότερος στο σφάλμα διακόπτης και να ελαχιστοποιείται η περιοχή απομόνωσης.

Η επιλεκτικότητα εξασφαλίζεται με δύο μεθόδους:

- συστήματα διαβάθμισης χρόνου (time-graded)

Οι προστασίες διαδοχικών ζωνών είναι ρυθμισμένες να λειτουργούν σε διαβαθμισμένους χρόνους στην ακολουθία του κυκλώματος. Έτσι πολλές διαδοχικές προστασίες αντιλαμβάνονται το σφάλμα, αλλά μόνο όσες περικλείουν τη ζώνη του σφάλματος προλαβαίνουν να ολοκληρώσουν τη λειτουργία πτώσης του διακόπτη. Τα υπόλοιπα συστήματα προστασίας διακόπτον τον κύκλο λειτουργίας τους και οι μετρητές χρόνου που περιέχουν μηδενίζονται.

Οι διαβαθμισμένες χρονικές καθυστερήσεις στα μέσα προστασίας μπορεί να έχουν χαρακτηριστική σταθερού χρόνου ή αντίστροφου χρόνου, όπου ο χρόνος καθυστέρησης είναι αντίστροφη συνάρτηση του μεγέθους που ελέγχεται, συνήθως του ρεύματος σφάλματος.

- συστήματα καθορισμένης ζώνης ή μονάδας (unit systems)

Τα συστήματα αυτά ανταποκρίνονται σε συνθήκες σφάλματος μόνο μέσα σε μια καθορισμένη ζώνη με σαφή όρια και έχουν σχετικά πιο γρήγορη λειτουργία.

Επίσης η επιλεκτικότητα περιλαμβάνει και τις λειτουργίες συνεργασίας και συντονισμού μεταξύ των γειτονικών προστασιών, ώστε να λειτουργούν πολύ γρήγορα για σφάλματα στην πρωτεύουσα ζώνη τους, αλλά με καθυστέρηση ή άλλες συντονισμένες λειτουργίες σε μία εκτεταμένη δευτερεύουσα ζώνη (*συντονισμός*).

♦ Χρόνος εκκαθάρισης σφάλματος (Fault clearing time) -Ταχύτητα (Speed)

Το χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης ενός σφάλματος και της λειτουργίας της κατάλληλης προστασίας για την απομόνωσή του πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, χωρίς όμως να προκαλεί την ανεπιθύμητη λειτουργία της προστασίας σε στιγμιαίες μεταβατικές υπερβάσεις ενός μεγέθους. Η ταχεία απομόνωση του σφάλματος απαιτείται για την ελαχιστοποίηση των προκαλούμενων από το σφάλμα μηχανικών καταστροφών και για την αποφυγή εκτεταμένης απώλειας συγχρονισμού και πτώσης κάποιας μονάδας.

Οι απαιτήσεις για τον χρόνο εκκαθάρισης εξαρτώνται από την κρισιμότητα του συγκεκριμένου τμήματος του δικτύου που προστατεύεται και τον σχετικό κίνδυνο που ενυπάρχει. Έτσι στις γραμμές διανομής επιτρέπεται η λιγότερο γρήγορη λειτουργία της προστασίας, ενώ σε μονάδες παραγωγής και γραμμές υπερυψηλής τάσης εγκαθίστανται εξελιγμένα συστήματα προστασίας για να εξασφαλισθεί η μέγιστη δυνατή ταχύτητα.

♦ Άλλα λειτουργικά χαρακτηριστικά

Κάποιες ακόμα παράμετροι που χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός συστήματος προστασίας είναι οι ακόλουθες [19]:

- Διαθεσιμότητα (Availability)

Τα μέσα προστασίας πρέπει να είναι άμεσα διαθέσιμα σε περιπτώσεις μη ανεκτών συνθηκών στο σύστημα. Επειδή μεταξύ διαδοχικών λειτουργιών της προστασίας συχνά περνάνε χρόνια και μπορούν να αναπτυχθούν «κρυφές» βλάβες στις συσκευές προστασίας, απαιτείται τακτικός έλεγχος για να εξασφαλισθεί η διαθεσιμότητα.

- Ευαισθησία (Sensitivity)

Εκφράζει το ελάχιστο ρεύμα λειτουργίας για ένα ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας ή την κατανάλωση V-A στο ελάχιστο ρεύμα λειτουργίας για μεμονωμένη συσκευή προστασίας.

- Ευστάθεια (Stability) – Διακρισιμότητα (Discrimination)

Αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος προστασίας να μένει ανεπηρέαστο σε σφάλματα εξωτερικά στη σχετική με αυτό ζώνη. Ο όρος ευστάθεια χρησιμοποιείται για συστήματα καθορισμένης ζώνης και ο όρος διακρισιμότητα για συστήματα διαβάθμισης χρόνου.

- Απλότητα (Simplicity)

Οι σύγχρονοι ηλεκτρονόμοι προσφέρουν πολλές προγραμματιζόμενες δυνατότητες για διάφορες ειδικές λύσεις. Πρέπει να εξετάζεται σε κάθε περίπτωση αν υπάρχει σοβαρή απαίτηση για τέτοιες σύνθετες λύσεις, που εισάγουν προβλήματα από λανθασμένη ή ατελή εμπέδωση της λειτουργίας τους.

- Ακρίβεια (Accuracy)

Αναφέρεται στο εύρος των τιμών του ελεγχόμενου μεγέθους, οι οποίες ενεργοποιούν τα σχετικά μέσα προστασίας. Συγκεκριμένα η ακρίβεια είναι το αντίστροφο αυτού του εύρους τιμών.

- Ευελιξία (Flexibility)

Τα συστήματα προστασίας πρέπει να είναι ευέλικτα στην αλλαγή ρυθμίσεων ή και αντικατάσταση, ώστε να αντιμετωπίζονται μελλοντικές αλλαγές στη διάταξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης πρέπει να υπάρχει δυνατότητα αποσύνδεσής τους από το δίκτυο για πραγματοποίηση ελέγχου ή επισκευών, χωρίς όμως το σχετικό τμήμα του συστήματος να μένει τελείως απροστάτευτο.

- Συμβατότητα (Compatibility)

Πρέπει να υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης όλων των ηλεκτρονόμων ενός υποσταθμού σε κοινό δίκτυο επικοινωνίας, ώστε να επιτρέπεται ο συντονισμός τους τοπικά ή και σε απόσταση.

Κατά τον σχεδιασμό του σχήματος προστασίας ενός συστήματος λαμβάνονται υπόψη και αξιολογούνται όλες οι παραπάνω παράμετροι απόδοσης. Ιδιαίτερο βάρος βέβαια δίνεται στην αξιοπιστία του συστήματος προστασίας και στις δύο πτυχές της, την εξαρτησιμότητα και την ασφάλεια. Υπάρχει όμως έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο αυτών χαρακτηριστικών, με συνέπεια συχνά η αύξηση του ενός να επιφέρει μείωση του άλλου. Γι' αυτό συνήθως επιχειρείται ένας συμβιβασμός μεταξύ ασφάλειας και εξαρτησιμότητας, αυξάνοντας πάντα την αξιοπιστία. Μάλιστα, ενώ μέχρι σήμερα στις μονοπωλιακές αγορές ενέργειας ο κυριότερος στόχος ήταν η μέγιστη αύξηση της εξαρτησιμότητας, στις σημερινές απελευθερωμένες αγορές ο ανταγωνισμός επιβάλλει την σημαντική αξιολόγηση και του παράγοντα της ασφάλειας, προκειμένου να μειωθεί όσο το δυνατόν το κόστος από τη μη διάθεση ενέργειας και να αυξηθεί η ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος.

Σε κάθε περίπτωση η προσπάθεια για αύξηση της αξιοπιστίας ενός συστήματος προστασίας περιορίζεται από το απαιτούμενο για αυτήν την αύξηση κόστος. Επιδιώκεται η εύρεση κάποιας ισορροπίας μεταξύ της τεχνικής απόδοσης και της οικονομικής επιβάρυνσης από την εγκατάσταση ενός συστήματος προστασίας, ενώ οι απαιτήσεις απόδοσης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το σχετικό κίνδυνο που ενέχει ένα σφάλμα στο εξεταζόμενο τμήμα του δικτύου.

3.2 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

3.2.1 Γενικά

Σκοπός της προστασίας εξοπλισμού είναι η εκκαθάριση των σφαλμάτων που εμφανίζονται σε διάφορα τμήματα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές στα μηχανικά μέρη και διαταραχές στη λειτουργία του συστήματος, όπως απώλεια συγχρονισμού, πτώση γραμμής ή μονάδας και άλλα.

Η σοβαρότερη απειλή για την ασφαλή λειτουργία του ΣΗΕ είναι το βραχυκύκλωμα: αποτελεί μια ξαφνική και σφοδρή διατάραξη της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, συνοδευόμενη από υψηλές εντάσεις ρεύματος και απελευθέρωση τοπικά μεγάλης ποσότητας ενέργειας. Συχνά προκαλεί ανάφλεξη στη θέση σφάλματος και μηχανικές καταστροφές σε πολλά τμήματα του συστήματος, ακόμα και απομακρυσμένα από την περιοχή του σφάλματος. Επιπλέον αν το βραχυκύκλωμα δεν απομονωθεί έγκαιρα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα ευστάθειας του όλου συστήματος.

Είναι αναγκαίο να απομονωθεί άμεσα το στοιχείο ή η περιοχή, όπου εντοπίζεται το σφάλμα, ώστε:

- Να ελαχιστοποιηθεί η βλάβη στο πάσχον στοιχείο και να αποφευχθεί η μηχανική του καταστροφή
- Να περιοριστούν οι επιπτώσεις του σφάλματος σε άλλα στοιχεία του συστήματος και να εξασφαλισθεί η ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου συστήματος
- Να παρεμποδιστεί η πρόκληση επικίνδυνων καταστάσεων για ανθρώπινο δυναμικό (π.χ. ηλεκτροπληξία) και υλικό εξοπλισμό (π.χ. πυρκαγιά).

Συνεπώς κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει απαραίτητως να εμπεριέχει τον κατάλληλο εξοπλισμό εκκαθάρισης σφαλμάτων, ο οποίος να αποτελείται από διακοπτικά μέσα και διακριτά μέσα προστασίας, για έλεγχο των διακοπών. Στα μέσα προστασίας περιλαμβάνεται κάθε είδους εξοπλισμός για την ανίχνευση, τον εντοπισμό των σφαλμάτων και την ενεργοποίηση του μηχανισμού εκκαθάρισης τους. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας αποτελείται από ηλεκτρονόμους, μετασχηματιστές έντασης και τάσης, βοηθητικά πηνία ανοίγματος διακοπών και καλωδιώσεις. Τα διακοπτικά μέσα και οι μπαταρίες του διακόπτη συνήθως δεν κατατάσσονται στα μέσα προστασίας.

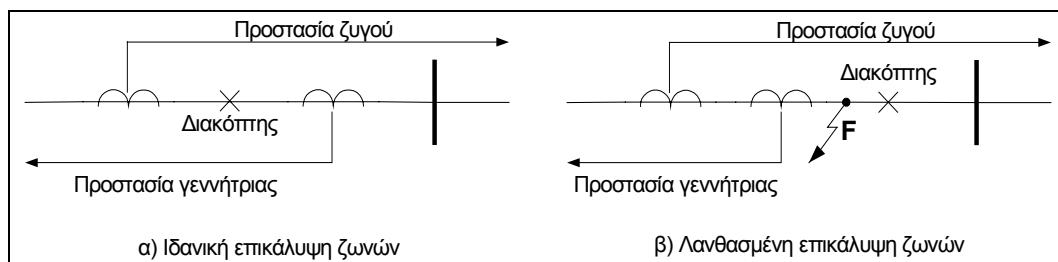
Η επιλογή του κατάλληλου σχήματος προστασίας για κάθε τμήμα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια σύνθετη διαδικασία, που απαιτεί πολύ καλή γνώση ολόκληρου του συστήματος, ανάλυση των πιθανών σφαλμάτων και των επιπτώσεων τους και εναρμόνιση με προστασίες σε παρακείμενα τμήματα. Επίσης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γενικότερη πολιτική προστασίας της εταιρείας παροχής, αν υπάρχει, και να επιχειρείται ένας συμβιβασμός μεταξύ κόστους και αξιοπιστίας, εξετάζοντας και τον σχετικό κίνδυνο που μπορεί να προκληθεί από ένα σφάλμα στην περιοχή που μελετάται. Το σχήμα προστασίας που θα καθοριστεί από μια τέτοια διαδικασία επιλογής δεν είναι το μοναδικό κατάλληλο, αφού γενικά δεν υπάρχει στην κάθε περίπτωση μία σωστή ή τέλεια λύση για την προστασία.

3.2.2 Αρχές προστασίας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να σχεδιαστούν πολλά διαφορετικά σχήματα προστασίας, με διαφορετικές αρχές και τρόπο λειτουργίας. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες γενικές αρχές και βασικά χαρακτηριστικά που εφαρμόζονται σε κάθε σύστημα προστασίας [16,17,18,20]:

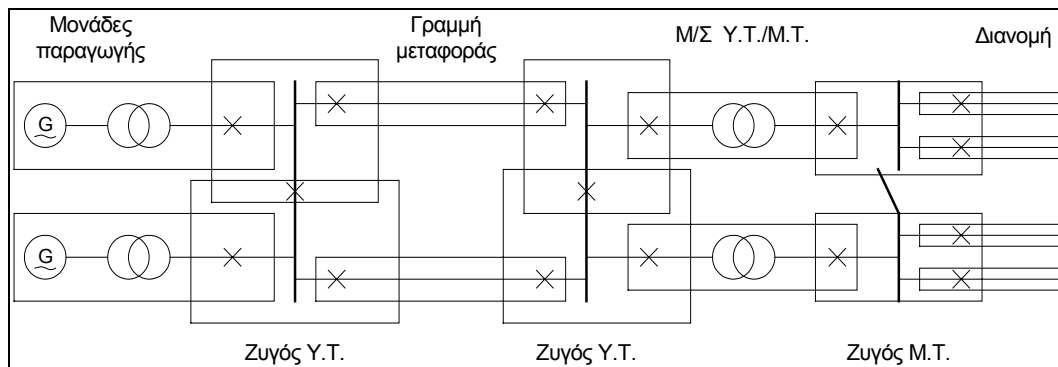
- Η τροφοδοσία των ηλεκτρονόμων ή άλλων συσκευών μέτρησης της προστασίας δεν γίνεται απευθείας από το δίκτυο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά μέσω μετασχηματιστών έντασης και τάσης. Τα κυκλώματα προστασίας και ελέγχου απομονώνονται και έτσι επιτυγχάνεται η ασφάλεια των συσκευών προστασίας και του ανθρώπινου δυναμικού που τις χειρίζεται από υψηλή τάση. Επιπλέον οι είσοδοι των ηλεκτρονόμων μπορούν να ρυθμιστούν σε πιο κατάλληλες τιμές και να τυποποιηθούν οι ονομαστικές τάσεις και εντάσεις τους. Πρέπει όμως οι μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται να έχουν υψηλή ικανότητα και απόδοση, ώστε οι μετρήσεις να έχουν την απαιτούμενη ακρίβεια.
- Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υποδιαιρούνται σε ζώνες, που κάθε μία ελέγχεται με διακοπτικά και προστατευτικά μέσα, επιδιώκοντας κανένα τμήμα του συστήματος να μη μένει απροστάτευτο. Ιδανικά οι ζώνες προστασίας πρέπει να επικαλύπτονται εκατέρωθεν του διακόπτη που ελέγχουν, ώστε ο διακόπτης να περικλείεται και στις δύο ζώνες. Αν κάποια ζώνη προστασίας δεν περικλείει το διακόπτη, ένα σφάλμα στο τμήμα της γραμμής μεταξύ του μετασχηματιστή έντασης, που οριοθετεί τη ζώνη, και του διακόπτη πιθανόν να μην εκκαθαριστεί πλήρως και να συνεχίσει να τροφοδοτείται από την πλευρά αυτής της ζώνης.

Έτσι στην περίπτωση β) του σχήματος 3.2.1, αν εμφανιστεί σφάλμα στο σημείο F, η προστασία του ζυγού θα ανοίξει το διακόπτη του κυκλώματος αλλά η προστασία της γεννήτριας δε θα ανοίξει και θα συνεχίσει να τροφοδοτεί το σφάλμα.



Σχήμα 3.2.1 Τρόπος επικάλυψης ζωνών προστασίας

Ωστόσο η επικάλυψη δεν μπορεί να υλοποιηθεί πάντα, γιατί ίσως δεν υπάρχει δυνατότητα για εγκατάσταση μετασχηματιστών έντασης που θα τροφοδοτούν τις προστασίες και στις δύο πλευρές του διακόπτη. Σε τέτοια περίπτωση μια μορφή επέκτασης των ζωνών μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να εξασφαλισθεί ότι η ροή του ρεύματος σφάλματος θα διακοπεί πλήρως. Μια τυπική διευθέτηση του συστήματος προστασίας με αλληλοεπικαλυπτόμενες ζώνες παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2.2.



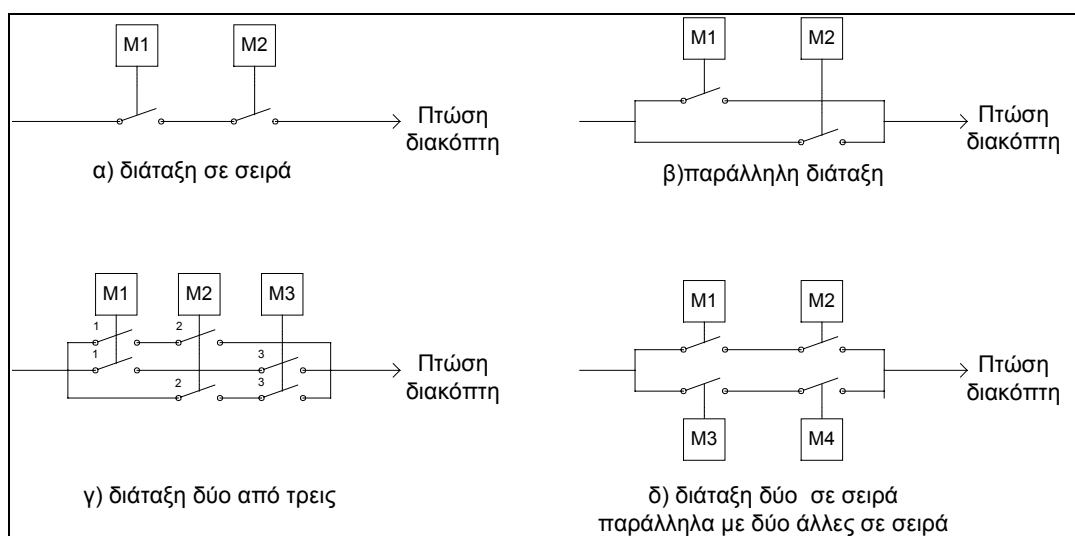
Σχήμα 3.2.2 Αλληλοεπικάλυψη των ζωνών προστασίας σε ένα ΣΗΕ

- Για να εξασφαλισθεί ότι ένα σφάλμα θα απομονωθεί σε κάθε περίπτωση, έστω και με κάποια καθυστέρηση χρόνου, συνήθως προβλέπεται από τη σχεδίαση του συστήματος προστασίας και μια δεύτερη προστατευτική διάταξη, η *δευτερεύουσα προστασία*, που υποστηρίζει την κύρια σε περίπτωση αποτυχίας της.

Η προστασία δεύτερης βαθμίδας είτε είναι ενσωματωμένη στο σύστημα προστασίας, ώστε αν δεν λειτουργήσει η προστασία μιας ζώνης να λειτουργήσει η προστασία της προηγούμενης ή των εκατέρωθεν ζωνών, με κάποια καθυστέρηση, είτε υλοποιείται με τη μορφή επιπλέον παράλληλης προστασίας. Ειδικά στη δεύτερη περίπτωση επιδιώκεται η δευτερεύουσα προστασία να είναι όσο το δυνατόν πιο ανεξάρτητη από την κύρια, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς μετασχηματιστές έντασης και τάσης, διαχωρισμένες τροφοδοσίες πτώσης του διακόπτη και προστασίες με διαφορετικές αρχές λειτουργίας.
- Γενικά επιδίωξη του συστήματος προστασίας είναι πάντα η *απομόνωση, σε περίπτωση σφάλματος, του ελάχιστου δυνατού τμήματος του δικτύου στον ελάχιστο δυνατό χρόνο*. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η μικρότερη ενόχληση για τους καταναλωτές, αλλά και το μεγαλύτερο κέρδος για την εταιρεία παροχής, αφού το μεγαλύτερο τμήμα του συστήματος συνεχίζει να λειτουργεί ομαλά και να παρέχει ενέργεια.
- Για την αύξηση της αξιοπιστίας ενός σχήματος προστασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι διπλασιασμού του εξοπλισμού προστασίας, κατά δύο τρόπους:

 - διάταξη σε σειρά
Απαιτείται να λειτουργήσουν και τα δύο συστήματα προστασίας για την πτώση του διακόπτη ή όποια άλλη ενέργεια ενεργοποιούν τα μέσα προστασίας. Χρησιμοποιώντας αυτή την διάταξη αυξάνεται η ασφάλεια, αλλά μειώνεται η εξαρτησιμότητα.
 - παράλληλη διάταξη
Η πτώση του διακόπτη μπορεί να ενεργοποιηθεί από κάθε σύστημα προστασίας ανεξάρτητα. Σε αυτήν την περίπτωση επιτυγχάνουμε αύξηση της εξαρτησιμότητας, με ταυτόχρονη όμως μείωση της ασφάλειας.
Για να επιτευχθεί αύξηση και των δύο παραμέτρων, ασφάλειας και εξαρτησιμότητας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο σύνθετες διατάξεις, οι οποίες όμως είναι οικονομικά ασύμφωρες και εφαρμόζονται σπάνια, σε πολύ εξεζητημένες περιπτώσεις. Τέτοιες είναι:

- διάταξη με δύο από τρεις προστασίες σε παράλληλη λειτουργία
Για την πρόκληση πτώσης απαιτείται η λειτουργία οποιωνδήποτε δύο προστασιών ταυτόχρονα.
- διάταξη δυο προστασιών σε σειρά παράλληλα με δύο άλλες σε σειρά
Απαιτείται η λειτουργία και των δύο προστασιών σε ένα από τα ζεύγη των εν σειρά προστασιών για την πτώση του διακόπτη.
Αυτές οι δύο διατάξεις προσφέρουν επίσης αυξημένη ευελιξία, αφού μπορεί να απομονωθεί κάποια συσκευή προστασίας για έλεγχο, χωρίς να μείνει το σχετιζόμενο τμήμα του συστήματος απροστάτευτο. Ωστόσο το κόστος τους είναι πολύ υψηλό.
Οι παραπάνω περιγραφόμενες διατάξεις σχεδιάζονται στο σχήμα 3.2.3.



Σχήμα 3.2.3 Διατάξεις πολλαπλασιασμού προστασιών για αύξηση της αξιοπιστίας

- Σύμφωνα με την υποδιαίρεση του συστήματος σε ζώνες που αναφέρθηκε παραπάνω, η προστασία ενός συστήματος είναι διαφορετική για κάθε ένα από τα βασικά στοιχεία του κυκλώματος. Έτσι σχεδιάζονται και αναπτύσσονται τα παρακάτω διαφορετικά σχήματα προστασίας:
 - προστασία γεννητριών
 - προστασία ζυγών
 - προστασία γραμμών μεταφοράς
 - προστασία μετασχηματιστών και αυτομετασχηματιστών
 - προστασία γραμμών διανομής
 - προστασία πηνίων και πυκνωτών
 Για το καθένα από τα παραπάνω στοιχεία απαιτείται διαφορετικό είδος προστασίας, ανάλογα με τις συνθήκες σφάλματος που μπορούν να εμφανιστούν και την κρισιμότητα του στοιχείου αυτού. Ωστόσο η προστασία για κάθε στοιχείο ή ζώνη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να σχεδιάζεται ώστε να λειτουργεί συντονισμένα με τις προστασίες των γειτονικών ζωνών.

- Τα κυριότερα σχήματα προστασίας που εφαρμόζονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να διαχωριστούν σύμφωνα με τη λειτουργία τους στα παρακάτω βασικά είδη:
 - προστασία αποστάσεως (χρησιμοποιείται κυρίως στις γραμμές μεταφοράς)
 - προστασία υπερεντάσεως (σε γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές διανομής, πηνία, συχνά ως δευτερεύουσα προστασία, κτλ.)
 - διαφορική προστασία (σε μετασχηματιστές, ζυγούς, γεννήτριες, πηνία, καλώδια)
 - προστασία υπερέντασης κατεύθυνσης (σε γραμμές με βροχοειδή διάταξη)
 - προστασία σύγκρισης φάσεων (στις γραμμές μεταφοράς)
 - προστασία Buchholtz (σε μετασχηματιστές)
 - προστασία υπερθερμάνσεως (σε μετασχηματιστές)
 - προστασία υπερπιέσεως (σε μετασχηματιστές, πηνία)

Η βασική συσκευή προστασίας, που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση των περισσότερων από τα παραπάνω είδη προστασίας, είναι ο ηλεκτρονόμος. Οι ηλεκτρονόμοι ενεργοποιούνται όταν αντιληφθούν συνθήκες σφάλματος και δίνουν εντολή πτώσης στους διακόπτες, άμεσα ή έμμεσα μέσω βοηθητικών ηλεκτρονόμων.

Επίσης συχνά χρησιμοποιούνται ηλεκτρονόμοι επαναφοράς ή επανακλεισίματος, ιδίως στις γραμμές μεταφοράς και διανομής, οι οποίοι δίνουν στους διακόπτες εντολή εκτέλεσης ενός έως δύο κύκλων «ανοίγματος – αυτόματου επανακλεισίματος» πριν ανοίξουν οριστικά. Αυτό γίνεται για την αποφυγή της διακοπής του κυκλώματος σε παροδικά σφάλματα. Ο διακόπτης θα ανοίξει μετά την εμφάνιση του σφάλματος, αλλά θα παραμείνει ανοιχτός μόνο αν το σφάλμα συνεχίζει να επιδρά μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα.

3.3 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ

Βασικός στόχος της προστασίας συστήματος είναι η αντιμετώπιση της αστάθειας που μπορεί να εμφανιστεί σε ένα ΣΗΕ ως συνέπεια σοβαρών και απότομων διαταραχών. Οι μεγάλες διαταραχές αυτές μπορεί να είναι πτώσεις μονάδων παραγωγής ή γραμμών μεταφοράς. Η προστασία συστήματος μπορεί να ενεργοποιείται σε συνθήκες χαμηλής τάσης, για προστασία από αστάθεια τάσεως, ή σε συνθήκες υπερχρόνου, για προστασία από αστάθεια συχνότητας. Στη συνέχεια εξετάζεται η περίπτωση της προστασίας από αστάθεια τάσεως.

Συνήθως η αστάθεια τάσης προκαλείται όταν το σύστημα μετά τη διαταραχή αδυνατεί να καταλήξει σε κάποιο ευσταθές σημείο λειτουργίας, επειδή το συνδυασμένο σύστημα παραγωγής – μεταφοράς δεν μπορεί να τροφοδοτήσει την ζήτηση φορτίου. Επομένως η αιτία εμφάνισης της αστάθειας μπορεί να είναι είτε η αδυναμία αποκατάστασης ευσταθούς σημείου ισορροπίας είτε η έλλειψη έλξης προς το σημείο ισορροπίας. Κινητήρια δύναμη της αστάθειας είναι όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια είναι η δυναμική των φορτίων του ΣΗΕ που τείνουν να αποκαταστήσουν την απορροφώμενη από αυτά ισχύ, ακόμη και πέρα από τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Τα συστήματα προστασίας για την αντιμετώπιση της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης στοχεύουν σε ένα από τα παρακάτω αποτελέσματα:

- την αποκατάσταση κάποιου μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας με την απαραίτητη ελκτική ικανότητα
- την αναχαίτιση της βαθμιαίας βύθισης των τάσεων του συστήματος, που μπορεί να προκαλέσει αστάθεια και στα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα ή πτώση γραμμών και γεννητριών λόγω ενεργοποίησης άλλων προστασιών του συστήματος (υπότασης ή υπερέντασης), και έτσι να οδηγήσει σε άμεση κατάρρευση

Ο πρώτος στόχος απαιτείται για την αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος και μπορεί να επιτευχθεί αυξάνοντας τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος στα φορτία ή μειώνοντας την κατανάλωση ισχύος. Ο δεύτερος στόχος εξασφαλίζει απλά τη διατήρηση του συστήματος σε λειτουργία και υλοποιείται με διορθωτικά μέτρα που εμποδίζουν το μηχανισμό αποκατάστασης φορτίου. Τα μέτρα αυτά δεν αναιρούν την αιτία πρόκλησης της αστάθειας, αλλά αντιμετωπίζουν απλά την εξέλιξη της, παρέχοντας τον αναγκαίο χρόνο για την εφαρμογή άλλων πιο ριζικών μέτρων του πρώτου είδους. Η λύση αυτή δηλαδή είναι προσωρινή μόνο, όμως έχει το πλεονέκτημα της άμεσης εφαρμογής και ενεργοποίησης.

Για την αποκατάσταση σημείου ισορροπίας στη μόνιμη κατάσταση μπορούν να ληφθούν τα εξής μέτρα εκτάκτου ανάγκης:

- σύνδεση συστοιχιών εγκάρσιων πυκνωτών για αντιστάθμιση άεργου ισχύος
- γρήγορη εκκίνηση εφεδρικών μονάδων παραγωγής
- ανύψωση των τερματικών τάσεων των γεννητριών, όπου υπάρχουν εφεδρείες άεργου ισχύος
- αναδιανομή της ενεργού και άεργου παραγωγής των γεννητριών
- απόρριψη φορτίου ως έσχατο μέτρο

Τα πρώτα μέτρα μεταβάλλουν τη χαρακτηριστική δικτύου του συστήματος και αυξάνουν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στο φορτίο, ενώ η απόρριψη φορτίου μεταβάλλει τη χαρακτηριστική φορτίου (μεταβατική και μόνιμου καταστάσεως), ώστε τελικά να δημιουργηθεί νέο σημείο ισορροπίας που θα αντιστοιχεί στην τομή των χαρακτηριστικών φορτίου και δικτύου.

Η απόρριψη φορτίου αποτελεί γενικά ένα πολύ αποτελεσματικό μέτρο για την αντιμετώπιση της αστάθειας, ωστόσο πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο ως έσχατη λύση σε περιπτώσεις όπου τα υπόλοιπα μέτρα δεν επαρκούν. Κατά την απόρριψη φορτίου αποσυνδέεται από το δίκτυο τμήμα του τροφοδοτούμενου φορτίου, στην περιοχή που εμφανίζεται κυρίως το πρόβλημα αστάθειας, ώστε να διασωθεί το υπόλοιπο σύστημα. Επομένως ως μέτρο είναι αρκετά επώδυνο και δυσάρεστο για τους καταναλωτές και για αυτό το λόγο πρέπει να εφαρμόζεται σπάνια και να διασφαλίζεται η αποκοπή του ελάχιστου απαιτούμενου φορτίου. Στο ελληνικό σύστημα, στο δίκτυο της ΔΕΗ, δεν εφαρμόζεται αποκοπή φορτίου σε συνθήκες αστάθειας τάσης, αλλά μόνο λόγω υποσυχνότητας, όπου η απόρριψη φορτίου εφαρμόζεται σταδιακά, σε τέσσερα διακριτά στάδια συχνότητας.

Μέτρα που αναχαιτίζουν απλά την εξέλιξη της αστάθειας είναι οι εφαρμογές ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στους μηχανισμούς ΣΑΤΦ των μετασχηματιστών διανομής του συστήματος. Αυτά τα μέτρα σκοπεύουν στην αναστολή του μηχανισμού αποκατάστασης τάσης και φορτίου των ΣΑΤΦ, δηλαδή εμποδίζουν την επαναφορά της ισχύος φορτίου στην αρχική ζήτηση πριν τη διαταραχή, και συνεπώς εισάγουν επίσης μια έμμεση αποκοπή φορτίου. Ωστόσο η αποκοπή που υλοποιείται με τον τρόπο αυτό είναι λιγότερο ενοχλητική για τους καταναλωτές. Ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΦ μπορεί να υλοποιηθεί με τις μεθόδους: απενεργοποίηση των ΣΑΤΦ (tap blocking), μείωση της τάσης αναφοράς των ΣΑΤΦ, κλείδωμα του ΣΑΤΦ σε συγκεκριμένη θέση (tap locking), αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ (tap reversing). Οι εφαρμογές εκτάκτου ελέγχου των ΣΑΤΦ θα περιγραφούν εκτενέστερα στα επόμενα κεφάλαια.

Ένα βασικό πρόβλημα στην προστασία του συστήματος από αστάθεια είναι ο καθορισμός των περιοχών του συστήματος όπου θα εφαρμοστούν τα διορθωτικά μέτρα και της χρονικής στιγμής εφαρμογής. Ο έλεγχος εκτάκτου ανάγκης μπορεί να βασίζεται σε τοπική ή κεντρική παρακολούθηση της απόκριση του συστήματος μετά τη διαταραχή. Στην πρώτη περίπτωση επιτυγχάνεται πιο γρήγορη απόκριση των συστημάτων προστασίας, ενώ στη δεύτερη προσδιορίζεται καλύτερα η πάσχουσα περιοχή και υπάρχει μεγαλύτερος συντονισμός των διορθωτικών μέτρων σε διαδοχικά επίπεδα.

Ο χρόνος εφαρμογής των μέτρων εκτάκτου ανάγκης πρέπει να είναι αρκετά μικρός, ώστε το σύστημα να μην απομακρύνεται από την περιοχή έλξης του νέου σημείου ισορροπίας και να επιτυγχάνεται η αποκατάστασή του. Ωστόσο ειδικά στην περίπτωση της αποκοπής φορτίου, πρέπει η εφαρμογή του μέτρου να γίνεται μετά από κάποια χρονική καθυστέρηση, που να συμφωνεί βέβαια με τον προηγούμενο περιορισμό, ώστε να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση του μέτρου όταν δεν είναι απολύτως αναγκαίο.

4 ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΕΩΣ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ

4.1 ΜΕΤΡΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΕΚΤΑΚΤΟΥ ΑΝΑΓΚΗΣ

4.1.1 Γενικά

Τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΦ) παίζουν σημαντικό ρόλο στην αστάθεια τάσης. Σε πολλές περιπτώσεις σεναρίων αστάθειας τάσης ο μηχανισμός ελέγχου των ΣΑΤΦ αποτελεί την κινητήρια δύναμη της αστάθειας. Τα ΣΑΤΦ τείνουν να επαναφέρουν τις τάσεις διανομής στις αρχικές τους τιμές και με αυτό τον τρόπο επαναφέρουν και την ισχύ των φορτίων, που εξαρτώνται συνήθως από την τάση. Σε περιπτώσεις σοβαρών διαταραχών όμως το δίκτυο, δηλαδή το σύνθετο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς, δεν μπορεί πλέον να τροφοδοτήσει το αρχικό φορτίο και έτσι προκαλείται αστάθεια τάσης (βλέπε παράγραφο 1.3.3). Τα ΣΑΤΦ δεν επιτρέπουν την μείωση της τάσης και της ισχύος φορτίου, που θα μπορούσε να ανακουφίσει το σύστημα και να καταλήξει σε κάποιο νέο σημείο ισορροπίας με αρκετά χαμηλή βέβαια τάση και παρεχόμενη ισχύ.

Για αυτό το λόγο σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι επέμβασης στη λογική λειτουργίας των ΣΑΤΦ, για να αντιμετωπιστεί προσωρινά η αστάθεια και η κατάρρευση της τάσης και να δοθεί χρόνος για βραδύτερες και πιο ριζικές λειτουργίες ελέγχου. Αυτές οι μέθοδοι ουσιαστικά εμποδίζουν το μηχανισμό αποκατάστασης φορτίου που υλοποιούν τα ΣΑΤΦ και προκαλούν μια έμμεση αποκοπή φορτίου, αφού η τάση δευτερεύοντος άρα και το φορτίο διατηρούνται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Μια μέθοδος ελέγχου εκτάκτου ανάγκης είναι η απενεργοποίηση των ΣΑΤΦ (tap blocking). Ωστόσο υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα σε αυτήν την μέθοδο όπως θα δούμε και στις προσομοιώσεις. Η τάση δευτερεύοντος άρα και το φορτίο παίρνουν αρκετά χαμηλές τιμές και είναι πλέον πιο ευαίσθητες σε διακυμάνσεις της τάσης στο επίπεδο μεταφοράς. Επιπλέον άλλοι μηχανισμοί επαναφοράς του φορτίου (π.χ. θερμοστάτες ή ρυθμιστές τάσης στη διανομή) θα συνεχίσουν να μειώνουν τις τάσεις και δε θα αποφευχθεί η κατάρρευση. Σε ένα μεγάλο σύστημα η αποτελεσματική επιλογή των ΣΑΤΦ που θα απενεργοποιηθούν πρέπει να γίνει χρησιμοποιώντας κεντρικές μεθόδους δύσκολα υλοποιήσιμες.

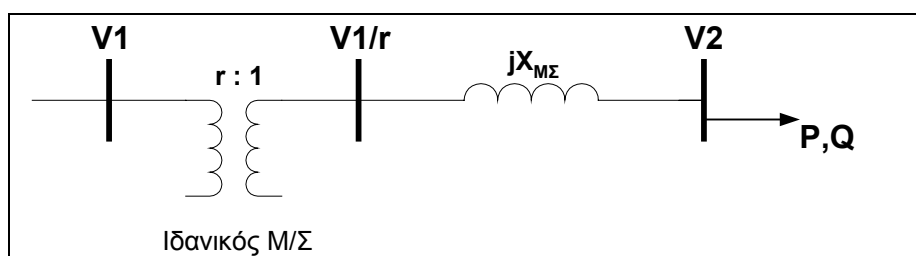
Άλλες λύσεις είναι η μετακίνηση και το κλείδωμα του ΣΑΤΦ σε μια συγκεκριμένη λήψη (tap-locking) ή η μείωση της τάσης αναφοράς του ΣΑΤΦ του μετασχηματιστή. Επίσης και αυτά τα μέτρα δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν όλες τις συνθήκες αστάθειας (π.χ. αυτοεπαναφερόμενα φορτία) και παρουσιάζουν επιπλέον δυσκολία στην επιλογή της κλειδωμένης σχέσης μετασχηματισμού ή της τάσης αναφοράς.

Η μέθοδος που προτείνεται και εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι η αντιστροφή του ελέγχου των ΣΑΤΦ των μετασχηματιστών ισχύος (tap reversing). Ο μηχανισμός του ΣΑΤΦ αντιστρέφεται, ώστε να προσπαθεί να ελέγξει και να διατηρήσει κοντά σε μια τιμή αναφοράς την τάση πρωτεύοντος (τάση δικτύου) και όχι την τάση δευτερεύοντος (τάση φορτίου), όπως στην κανονική του λειτουργία. Με αυτήν την μέθοδο προσπαθούμε να αντιμετωπίσουμε την κατάρρευση της τάσης δικτύου και να προφυλάξουμε το σύστημα, ακόμα και αν αυτό γίνει εις βάρος της τάσης δευτερεύοντος και της παρεχόμενης ισχύος στο συγκεκριμένο ζυγό φορτίου. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της μεθόδου περιγράφεται λεπτομερέστερα στην παρακάτω ενότητα.

4.1.2 Αργές λειτουργίας του αντιστρόφου ελέγχου των ΣΑΤΦ

Στα συστήματα που θα μελετήσουμε στη συνέχεια εφαρμόζουμε την αντιστροφή των ΣΑΤΦ στους μετασχηματιστές διανομής. Για την εφαρμογή της μεθόδου απαραίτητη προϋπόθεση είναι η παρακολούθηση και καταγραφή των τάσεων και στις δύο πλευρές του μετασχηματιστή, δηλαδή στην πλευρά υψηλής και μέσης τάσης αντίστοιχα.

Στο σχήμα 4.1.1 δίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένου με μηχανισμό αλλαγής τάσεως υπό φορτίο ΣΑΤΦ, ο οποίος θεωρούμε ότι αποτελείται από έναν ιδανικό μετασχηματιστή με μεταβαλλόμενο λόγο μετασχηματισμού σε σειρά με μία αντίδραση σκεδάσεως.

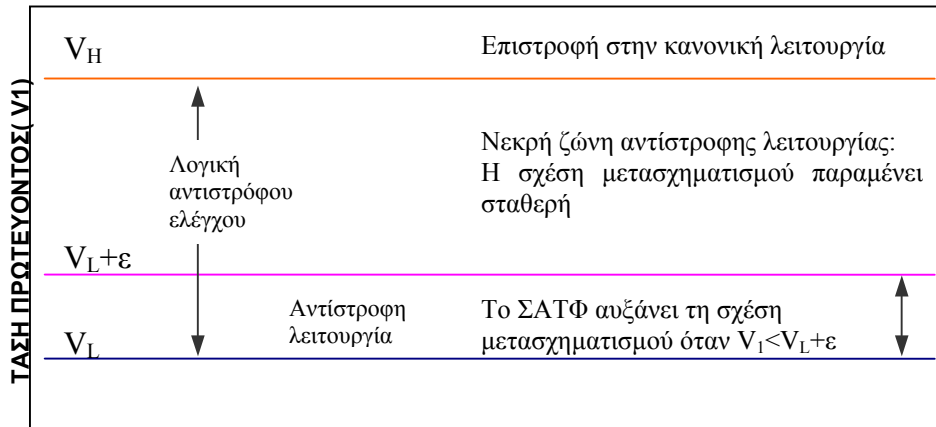


Σχήμα 4.1.1 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή με μηχανισμό ΣΑΤΦ

Η αντιστροφή του ελέγχου των ΣΑΤΦ στηρίζεται στους παρακάτω κανόνες:

1. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ο μηχανισμός του ΣΑΤΦ ελέγχει την τάση V_2 του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή διανομής, στην πλευρά μέσης τάσης δηλαδή, και τη ρυθμίζει μεταβάλλοντας το λόγο μετασχηματισμού r , όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.4.2.
2. Αν η τάση V_1 στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή πέσει κάτω από μια τιμή κατωφλιού V_L ενεργοποιείται η αντίστροφη λογική, οπότε ο έλεγχος μεταφέρεται στο ζυγό υψηλής τάσης και η τάση αναφοράς του πρωτεύοντος V_1 ορίζεται στην τιμή $V_L + \epsilon$. Δηλαδή όταν ο έλεγχος του ΣΑΤΦ έχει αντιστραφεί, εκτελούνται βήματα μεταβολής - και μάλιστα αύξησης - του λόγου μετασχηματισμού μόνο όταν η τάση πρωτεύοντος V_1 βρίσκεται κάτω από την τιμή $V_L + \epsilon$. Αν η V_1 υπερβεί το όριο $V_L + \epsilon$ και το ΣΑΤΦ είναι σε περιοχή αντιστροφής, ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει σταθερός.
3. Αν η τάση V_1 στο ζυγό Υ.Τ. υπερβεί το άνω όριο V_H , τερματίζεται η αντίστροφη λειτουργία και ο έλεγχος γίνεται και πάλι στο ζυγό μέσης τάσης για την τάση V_2 . Δηλαδή ο μηχανισμός ΣΑΤΦ επαναφέρεται στην κανονική λειτουργία.
4. Οι χρονικές καθυστερήσεις θεωρούνται σταθερές και κοινές για τους δύο τρόπους λειτουργίας. Οι μετρητές χρόνου μηδενίζονται κάθε φορά που αλλάζει ο τρόπος λειτουργίας και ο ελεγχόμενος ζυγός.
5. Αν παρατηρηθεί μια μεταβατική πτώση της υψηλής τάσης V_1 , ώστε να μείνει για χρονικό διάστημα μικρότερο από την ορισμένη καθυστέρηση κάτω από το κατώφλι V_L , η λογική λειτουργίας του ΣΑΤΦ αντιστρέφεται δύο φορές και παραμένει τελικά στην κανονική λειτουργία, με μοναδική ενέργεια το μηδενισμό του μετρητή χρόνου.

Οι παραπάνω κανόνες λειτουργίας του αντίστροφου ελέγχου στα ΣΑΤΦ γίνονται περισσότερο κατανοητοί στο σχήμα 4.1.2, όπου φαίνονται καθαρά τα όρια έναρξης και τερματισμού της λειτουργίας αυτής, καθώς και η περιοχή της υψηλής τάσης στην οποία μεταβάλλεται ο λόγος μετασχηματισμού.

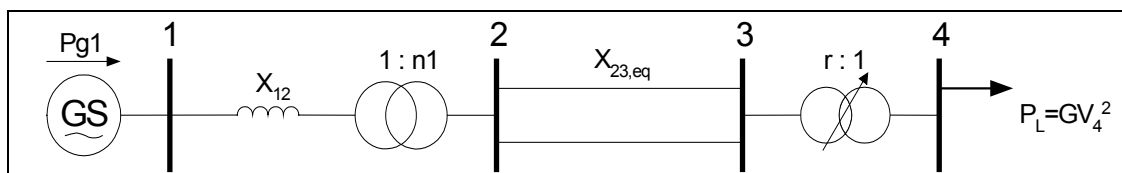


Σχήμα 4.1.2 Όρια αντίστροφης λειτουργίας

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΟΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

4.2.1 Περιγραφή συστήματος

Στο σχήμα 4.2.1 φαίνεται το σύστημα ενός φορτίου που θα μελετήσουμε στη συνέχεια.



Σχήμα 4.2.1 Διάγραμμα του συστήματος ενός φορτίου

Στο σύστημα αυτό μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα αυτοεπαναφερόμενο φορτίο μέσω ενός μετασχηματιστή εξοπλισμένου με σύστημα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο (ΣΑΤΦ) και δύο παράλληλων γραμμών.

Το μοντέλο της γεννήτριας περιλαμβάνει αυτόματη ρύθμιση τάσης και έλεγχο υπερδιέγερσης, δηλαδή η ηλεκτρεγερτική δύναμη E_q της γεννήτριας δίνεται από τις σχέσεις:

$$E = K_E \cdot (V_{1ref} - V_1) \quad (4.2.1)$$

$$E_q = \begin{cases} E & , \text{ αν } E < E_{q\lim} \text{ ή αν } E \geq E_{q\lim} \text{ και } T < T_{E,d} \\ E_{q\lim} & , \text{ αν } E \geq E_{q\lim} \text{ και } T \geq T_{E,d} \end{cases} \quad (4.2.2\alpha)$$

$$(4.2.2\beta)$$

όπου $T_{E,d}$ η χρονική καθυστέρηση για να ενεργοποιηθεί ο έλεγχος υπερδιέγερσης της γεννήτριας και T ο μετρητής χρόνου από τη στιγμή της υπερδιέγερσης.

Η σχέση (4.2.2α) αντιστοιχεί σε λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης (ΑΡΤ), ενώ η (4.2.2β) σε λειτουργία του συστήματος προστασίας από υπερδιέγερση (ΣΠΥ). Όσο η τάση δικτύου V_1 μειώνεται, το σύστημα απορροφά μεγαλύτερη ποσότητα άεργου ισχύος από τη γεννήτρια και κάποια στιγμή η διέγερση της γεννήτριας E_q υπερβαίνει την οριακή τιμή $E_{q\lim}$. Τότε αρχικοποιείται ο μετρητής και μετά από σταθερή χρονική καθυστέρηση $T_{E,d}$ περνάμε σε λειτουργία υπερδιέγερσης, οπότε η διέγερση περιορίζεται στην τιμή $E_{q\lim}$. Η λειτουργία υπερδιέγερσης απενεργοποιείται ακαριαία όταν η ποσότητα E γίνει μικρότερη από την οριακή τιμή $E_{q\lim}$.

Η τάση της γεννήτριας ανυψώνεται μέσω ενός μετασχηματιστή με λόγο 1:n1 και αντίδραση σκέδασης X_{12} .

Ο μετασχηματιστής με σύστημα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο όπως έχουμε αναφέρει παριστάνεται με έναν ιδανικό μετασχηματιστή. Ο λόγος μετασχηματισμού του ανωτέρω συμβολίζεται με r , ενώ η αντίδραση σκεδάσεώς του θεωρείται αμελητέα.

Η δυναμική συμπεριφορά του ΣΑΤΦ παριστάνεται με το διακριτό μοντέλο λειτουργίας, δηλαδή:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r & , \text{ αν } V_4 > V_4^0 + d \text{ και } r_k < r^{\max} \\ r_k - \Delta r & , \text{ αν } V_4 < V_4^0 - d \text{ και } r_k > r^{\min} \\ r_k & , \text{ αλλιώς} \end{cases} \quad (4.2.3)$$

όπου d το μισό της νεκρής ζώνης (ανοχή τάσεως) και τα r_k αντιστοιχούν σε χρόνους t_k , ώστε $t_{k+1} = t_k + \Delta T_r$, με ΔT_r σταθερή χρονική καθυστέρηση ανάμεσα σε διαδοχικά βήματα του ΣΑΤΦ.

Η διπλή γραμμή μεταφοράς θεωρείται χωρίς απώλειες και η συνολική της επαγωγική αντίδραση είναι $X_{23,eq}$.

Το φορτίο αναπαριστάται με μια αυτορυθμιζόμενη αγωγιμότητα σύμφωνα με την εξίσωση:

$$T_G \cdot \dot{G} = (P_0 - GV_4^2) \quad (4.2.4)$$

όπου P_0 είναι η ζήτηση φορτίου, στην οποία αποκαθίσταται το φορτίο μακροπρόθεσμα, και $P_L = GV_4^2$ είναι η ισχύς στο φορτίο κάθε στιγμή.

Στο μοντέλο που χρησιμοποιείται για την αριθμητική προσομοίωση η δυναμική της αυτοεπιαναφοράς του φορτίου υλοποιείται με διακριτό τρόπο, ακολουθώντας την σχέση:

$$G_{k+1} = \begin{cases} G_k + r_G \cdot (P_0 - G_k \cdot V_4^2), & \text{αν } |P_0 - G_k \cdot V_4^2| > d_G \\ G_k, & \text{αν } |P_0 - G_k \cdot V_4^2| \leq d_G \end{cases} \quad (4.2.5)$$

όπου οι λειτουργίες ρύθμισης της αγωγιμότητας εκτελούνται σε διακριτές χρονικές στιγμές με σταθερή χρονική καθυστέρηση $\Delta T_G = \Delta T_r$ μεταξύ τους και d_G το ήμισυ της νεκρής ζώνης του φορτίου γύρω από την αρχική ζήτηση P_0 .

Η δυναμική της αυτοεπιαναφοράς του φορτίου θεωρείται χωρίς άνω όριο $G \leq G_{max}$ (βλέπε παράγραφο 1.4.3).

Επομένως η μεταβατική, βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική του φορτίου είναι του τύπου σταθερής αγωγιμότητας, ενώ η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική είναι μορφής σταθερής ισχύος.

Η μακροπρόθεσμη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος θεωρούμε ότι καθορίζεται από τη ρύθμιση του φορτίου και τη συμπεριφορά του ΣΑΤΦ, ενώ η γεννήτρια και οι ρυθμιστές της, που έχουν πολύ πιο γρήγορη απόκριση, θεωρούμε ότι βρίσκονται σε κατάσταση ισορροπίας, που εκφράζεται με τις εξισώσεις (4.2.1)-(4.2.2).

Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον παρακάτω πίνακα 4.2.1:

Πίνακας 4.2.1 Τιμές παραμέτρων του συστήματος

| | | | | | |
|-------------|-------------|------------|---------|--------------|----------------|
| X_{12} | 0.016 α.μ. | K_E | 100 | d | 8.8125e-3 α.μ. |
| $X_{23,eq}$ | 0.096 α.μ. | $T_{d,E}$ | 40 sec | ΔT_r | 10 sec |
| X_d | 0.8 α.μ. | r^{\min} | 0.8 | d_G | 0.05 α.μ. |
| nI | 1.04 | r^{\max} | 1.2 | r_G | 0.01 |
| E_{qlim} | 2.5968 α.μ. | Δr | 0.00625 | ΔT_G | 10 sec |

4.2.2 Εξισώσεις δικτύου του συστήματος

Οι εξισώσεις των μακροπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος είναι οι (4.2.3) και (4.2.5) που δίνονται στην παράγραφο 4.2.1.

Οι εξισώσεις δικτύου και οι εξισώσεις των βραχυπρόθεσμων δυναμικών σε ισορροπία που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο του συστήματος δίνονται παρακάτω. Οι εξισώσεις σε κάθε ζυγό προκύπτουν από το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στο ζυγό αυτό.

- **Ζυγός 1**

$$g_1 = P_{g1} - V_1 * V_2 * \sin(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} = 0 \quad (4.2.6\alpha)$$

$$g_2 = E_q * V_1 * \cos(d_1 - \theta_1) / X_d - V_1^2 / X_d - V_1^2 / X_{12} + V_1 * V_2 * \cos(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} = 0 \quad (4.2.6\beta)$$

$$g_3 = P_{g1} - E_q * V_1 * \sin(d_1 - \theta_1) / X_d = 0 \quad (4.2.6\gamma)$$

- **Ζυγός 2**

$$g_4 = V_1 * V_2 * \sin(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} - V_2 * V_3 * \sin(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} = 0 \quad (4.2.7\alpha)$$

$$g_5 = V_2^2 * (1/n_1^2 / X_{12} + 1/X_{23}) - V_2 * V_1 * \cos(\theta_2 - \theta_1) / n_1 / X_{12} - V_2 * V_3 * \cos(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} = 0 \quad (4.2.7\beta)$$

- **Ζυγός 3**

$$g_6 = V_2 * V_3 * \sin(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} - G_1 * V_4^2 = 0 \quad (4.2.8\alpha)$$

$$g_7 = V_3^2 * (1/X_{23}) - V_3 * V_2 * \cos(\theta_3 - \theta_2) / X_{23} = 0 \quad (4.2.8\beta)$$

- **Ζυγός 4**

$$g_8 = V_3 - V_4 * r_1 = 0 \quad (4.2.9\alpha)$$

$$g_9 = V_4^2 / X_{34} - V_4 * V_3 * \cos(\theta_4 - \theta_3) / r_1 / X_{34} = 0 \quad (4.2.9\beta)$$

Επίσης στις παραπάνω εξισώσεις για την υλοποίηση του μοντέλου προστίθενται οι εξισώσεις για την διέγερση της γεννήτριας (4.2.1)-(4.2.2).

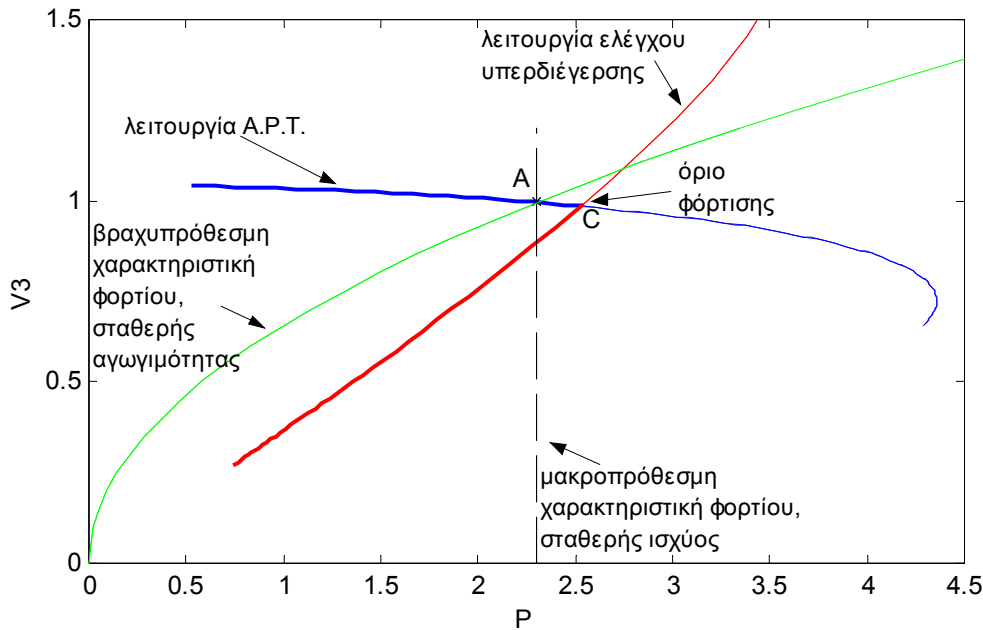
4.2.3 Συμπεριφορά του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή

Το σύστημα αρχικοποιείται για ζήτηση φορτίου $P_0=2.3$ α.μ. και λόγω μετασχηματισμού του ΣΑΤΦ $r_0=1.0$ και κάποιες από τις αρχικές τιμές των μεταβλητών που υπολογίζονται δίνονται στον πίνακα 4.2.2:

Πίνακας 4.2.2 Αρχικές τιμές μεταβλητών που εφαρμόζονται στο σύστημα

| P_0 | r_0 | V_{1ref} | V_4^0 ή V_3^0 | G_0 |
|----------|-------|-------------|-------------------|-------------|
| 2.3 α.μ. | 1.00 | 1.0135 α.μ. | 0.9955 α.μ. | 2.3210 α.μ. |

Στο σχήμα 4.2.2 δίνονται οι χαρακτηριστικές PV καμπύλες του συστήματος, όπως και οι χαρακτηριστικές του φορτίου, βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη, όπου οι τιμές των παραμέτρων είναι αυτές του πίνακα 4.2.1.



Σχήμα 4.2.2 PV-καμπύλες του συστήματος

Το δίκτυο του συστήματος περιγράφεται από δύο διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες, λόγω των περιορισμών υπερδιέγερσης της γεννήτριας. Η μια χαρακτηριστική αντιστοιχεί στη λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης στην οποία η διέγερση της γεννήτριας δίνεται από τη σχέση (4.2.2α), ενώ η άλλη στη λειτουργία προστασίας γεννήτριας από υπερδιέγερση, όπου η διέγερση παίρνει μια σταθερή οριακή τιμή (σχέση 4.2.2β). Ουσιαστικά η χαρακτηριστική PV καμπύλη του δικτύου προκύπτει από τη σύνθεση των δύο παραπάνω καμπυλών, που φαίνεται στο σχήμα 4.2.2 με παχύτερη γραμμή. Το σύστημα ακολουθεί την καμπύλη A.P.T όταν η διέγερση της γεννήτριας είναι μικρότερη από την οριακή τιμή $E_{q\lim}$, ενώ μετά από υπέρβαση του ορίου υπερδιέγερσης, που γίνεται στο σημείο τομής C των δύο χαρακτηριστικών, το σύστημα περιγράφεται από την καμπύλη περιορισμού υπερδιέγερσης (ΠΥ).

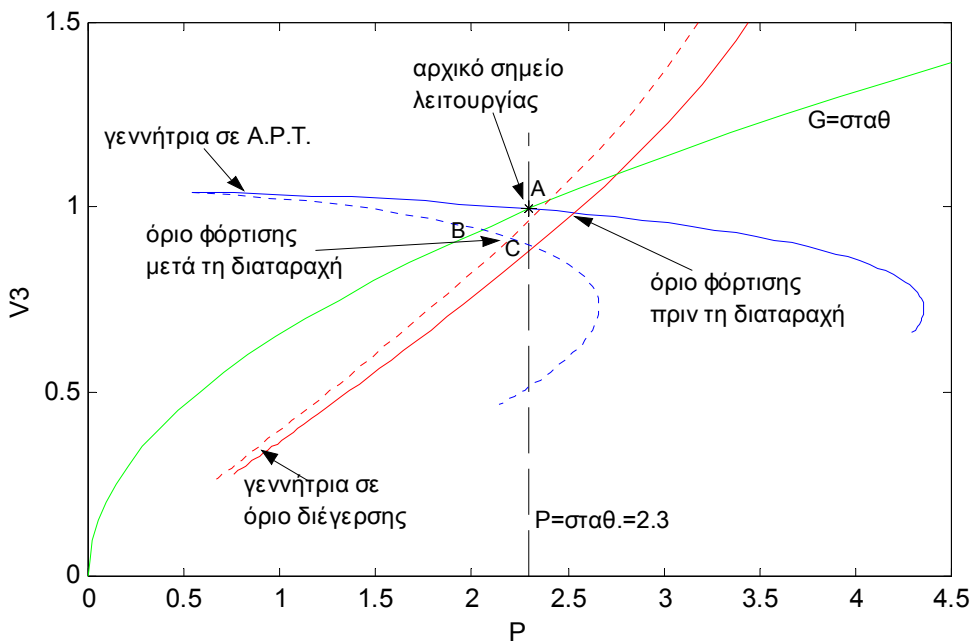
Το σημείο C αντιστοιχεί στο όριο φόρτισης του συστήματος, καθώς σε αυτό το σημείο μεγιστοποιείται η ικανότητα παραγωγής και μεταφοράς ισχύος του συστήματος. Το όριο φόρτισης είναι όριο λόγω μεταγωγής, όπως έχει περιγραφεί στην παράγραφο 2.3.2. Λόγω της υπερδιέγερσης περιορίζεται η παροχή έργου ισχύος από τη γεννήτρια, που θα στήριζε τις τάσεις του συστήματος, ενώ και η παρεχόμενη από το σύστημα ενεργός ισχύς φτάνει στο όριο της.

Το όριο φόρτισης είναι παράλληλα και όριο ευστάθειας του συστήματος (αναφερόμαστε σε στατική ευστάθεια) και χωρίζει την PV καμπύλη στην ευσταθή περιοχή, που αντιστοιχεί στην καμπύλη της λειτουργίας APT, και στη ασταθή περιοχή, που αντιστοιχεί στην καμπύλη της λειτουργίας ΠΥ. Στο όριο φόρτισης κάθε απόπειρα για αποκατάσταση φορτίου, για παράδειγμα μέσω μηχανισμών ελέγχου ΣΑΤΦ ή μέσω των μηχανισμών επαναφοράς του ίδιου του φορτίου, θα οδηγήσει σε ασταθές σύστημα.

Το σημείο A στο σχήμα 4.2.2 είναι το αρχικό σημείο λειτουργίας του συστήματος που είναι μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, επειδή βρίσκεται στην τομή της μακροπρόθεσμης καμπύλης φορτίου με την χαρακτηριστική καμπύλη του δικτύου. Το σημείο αυτό προκύπτει με βάση την αρχικοποίηση του πίνακα 4.2.2.

Θεωρούμε ότι στο σύστημα στη χρονική στιγμή 1000 sec εμφανίζεται μια διαταραχή, που είναι η απώλεια της μίας εκ των δύο παραλλήλων γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τους ζυγούς 2 και 3.

Στο σχήμα 4.2.3 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές PV καμπύλες του δικτύου του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή. Συγκεκριμένα οι συνεχείς γραμμές αντιστοιχούν στο σύστημα πριν την διαταραχή, ενώ οι διακεκομμένες στο σύστημα μετά τη διαταραχή. Επιπλέον απεικονίζονται και οι χαρακτηριστικές του φορτίου, η βραχυπρόθεσμη για το αρχικό σημείο λειτουργίας και η μακροπρόθεσμη.



Σχήμα 4.2.3 PV-καμπύλες του συστήματος πριν και μετά τη διαταραχή

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως το μέγιστο όριο φόρτισης του συστήματος περιορίζεται από τον έλεγχο υπερδιέγερσης της γεννήτριας και αντιστοιχεί στο σημείο τομής των χαρακτηριστικών του δικτύου για αυτόματη ρύθμιση τάσης και για υπερδιέγερση. Πριν τη διαταραχή, το αρχικό σημείο λειτουργίας A βρίσκεται στην τομή της PV καμπύλης του δικτύου με τις χαρακτηριστικές του φορτίου, βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη. Μετά τη διαταραχή όμως η μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική του φορτίου βρίσκεται έξω από τη σύνθετη PV καμπύλη και δεν τέμνονται, άρα δεν υπάρχει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας.

Αρχικά, αμέσως μετά τη διαταραχή, το σημείο λειτουργίας μεταπηδά στο σημείο B, στην τομή της βραχυπρόθεσμης καμπύλης φορτίου και της καμπύλης PV μετά τη διαταραχή. Αυτό είναι βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, όπως και κάθε άλλο σημείο τομής της χαρακτηριστικής δικτύου και της βραχυπρόθεσμης χαρακτηριστικής του φορτίου, διότι οι μακροπρόθεσμες δυναμικές του ΣΑΤΦ και της αυτοεπαναφοράς του φορτίου δεν έχουν προλάβει να επενεργήσουν. Στη συνέχεια οι δυναμικές του ΣΑΤΦ και του φορτίου αυξάνουν τη σύνθετη αντίσταση φορτίου που φαίνεται από την πλευρά του δικτύου, μετακινώντας το σημείο λειτουργίας πάνω στην PV καμπύλη σε διαδοχικά βραχυπρόθεσμα σημεία ισορροπίας. Λόγω αυτής της λειτουργίας η τάση και η ισχύς φορτίου αυξάνονται, ενώ η τάση δικτύου μειώνεται. Η πτώση της τάσης δικτύου δημιουργεί μεγαλύτερη ζήτηση άεργου ισχύος από τη γεννήτρια, με αποτέλεσμα η γεννήτρια να φτάσει το όριο υπερδιέγερσης της στο σημείο C. Ούτε στο σημείο αυτό όμως ικανοποιούνται οι εξισώσεις ισορροπίας του ΣΑΤΦ και της αυτορρύθμισης

φορτίου, με συνέπεια αυτοί οι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου να συνεχίσουν να λειτουργούν.

Μετά την υπερδιέγερση της γεννήτριας και αφού παρέλθει χρονικό διάστημα ίσο με τη χρονική καθυστέρηση $T_{E,d}$, ενεργοποιείται ο περιορισμός υπερδιέγερσης και το σύστημα αρχίζει να κινείται σε σημεία στην αντίστοιχη καμπύλη της λειτουργίας ΠΥ. Το τμήμα όμως αυτό της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι ασταθές και επομένως οι λειτουργίες αποκατάστασης φορτίου (μηχανισμοί ΣΑΤΦ και αυτοεπαναφοράς φορτίου) έχουν αποτελέσματα αντίθετα από τα επιθυμητά. Έτσι η τάση και η ισχύς φορτίου βυθίζονται συνεχώς, όπως και η τάση δικτύου. Επομένως αφού δεν υπάρχει μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας το σύστημα θα οδηγηθεί τελικά σε κατάρρευση, κάτω από την επίδραση του ΣΑΤΦ και της επαναφοράς του φορτίου.

4.2.4 Εφαρμογή μέτρων για την αντιμετώπιση της κατάρρευσης στο σύστημα

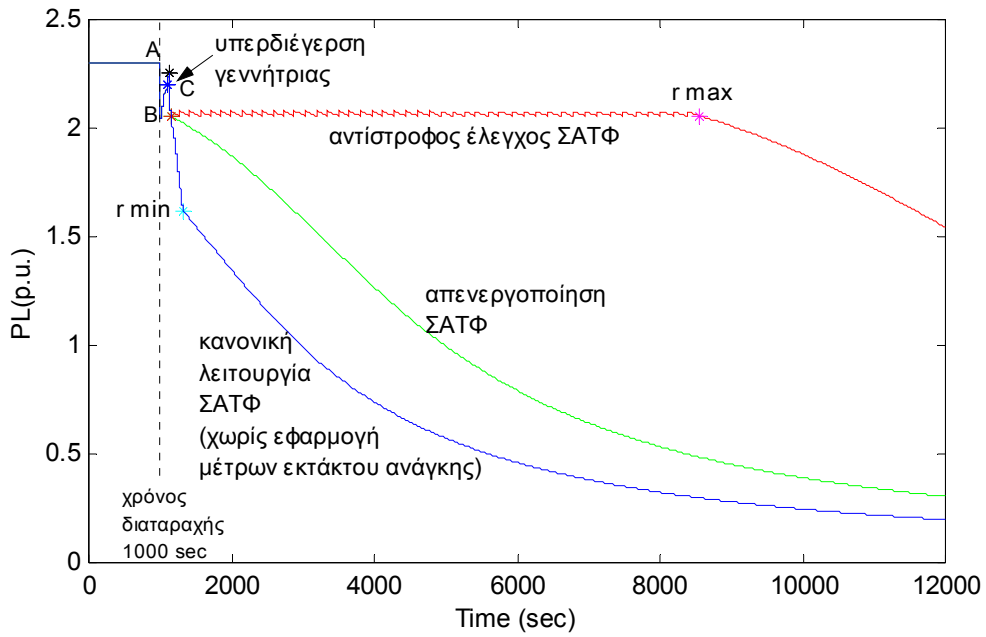
Για να αντιμετωπίσουμε την κατάρρευση τάσης και φορτίου, μπορούμε να εφαρμόσουμε μέτρα ελέγχου εκτάκτου ανάγκης στο ΣΑΤΦ του μετασχηματιστή διανομής και συγκεκριμένα τα εξής που αναφέρθηκαν και στην παράγραφο 4.1.1 :

- α) απενεργοποίηση του ΣΑΤΦ
- β) αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ.

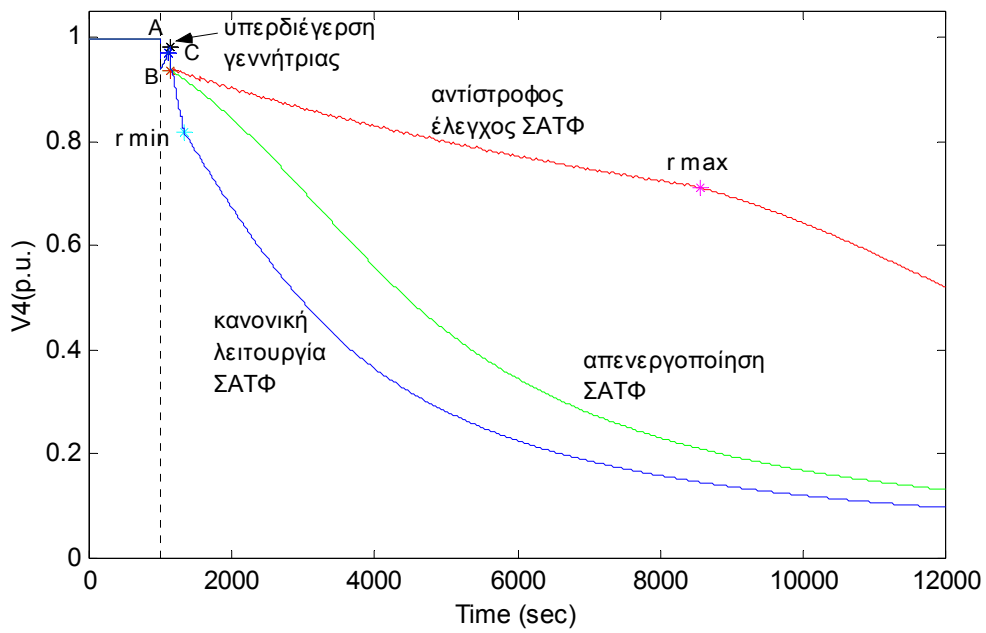
Στην περίπτωση της απενεργοποίησης του ΣΑΤΦ, όταν πέσει η τάση στο ζυγό Υ.Τ. κάτω από μια τιμή, στην περίπτωσή μας 0.85 α.μ., σταματάει η λειτουργία του μηχανισμού ΣΑΤΦ και ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει σταθερός.

Στη δεύτερη περίπτωση αντιστρέφουμε τη λειτουργία του ΣΑΤΦ σύμφωνα με τους κανόνες που έχουν αναφερθεί παραπάνω, θεωρώντας και εδώ το κατώφλι της υψηλής τάσης $V_L=0.85$ α.μ. Η τάση του ζυγού Υ.Τ. στη συνέχεια δεν ανυψώνεται παραπάνω, δηλαδή ορίζουμε την τιμή της διόρθωσης $\varepsilon=0$.

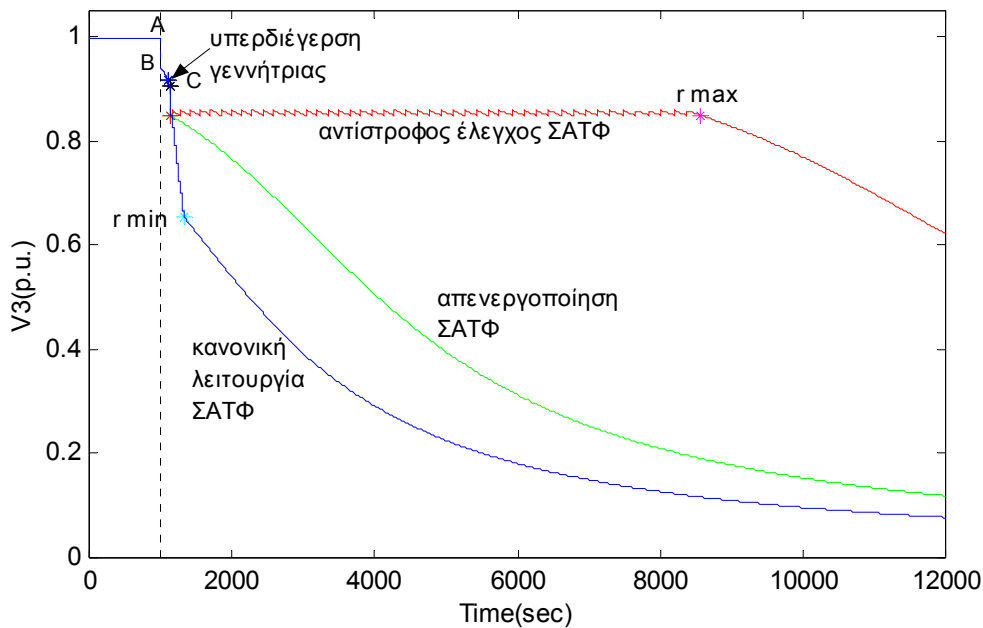
Στα σχήματα 4.2.4-4.2.6 καταγράφεται η μεταβολή της ισχύος φορτίου P_L , της τάσης φορτίου V_4 και της τάσης δικτύου V_3 με το χρόνο, όταν εφαρμοστεί κάποιο από τα παραπάνω μέτρα εκτάκτου ανάγκης, σε σύγκριση με την αντίστοιχη μεταβολή όταν δεν υπάρχει επέμβαση στη λειτουργία του ΣΑΤΦ.



Σχήμα 4.2.4 Ισχύς του φορτίου P_L για κάθε χρησιμοποιούμενη μέθοδο ελέγχου εκτάκτου ανάγκης του ΣΑΤΦ και χωρίς επέμβαση στη λειτουργία του ΣΑΤΦ



Σχήμα 4.2.5 Τάση φορτίου V_4 συναρτήσει του χρόνου για κάθε μέθοδο

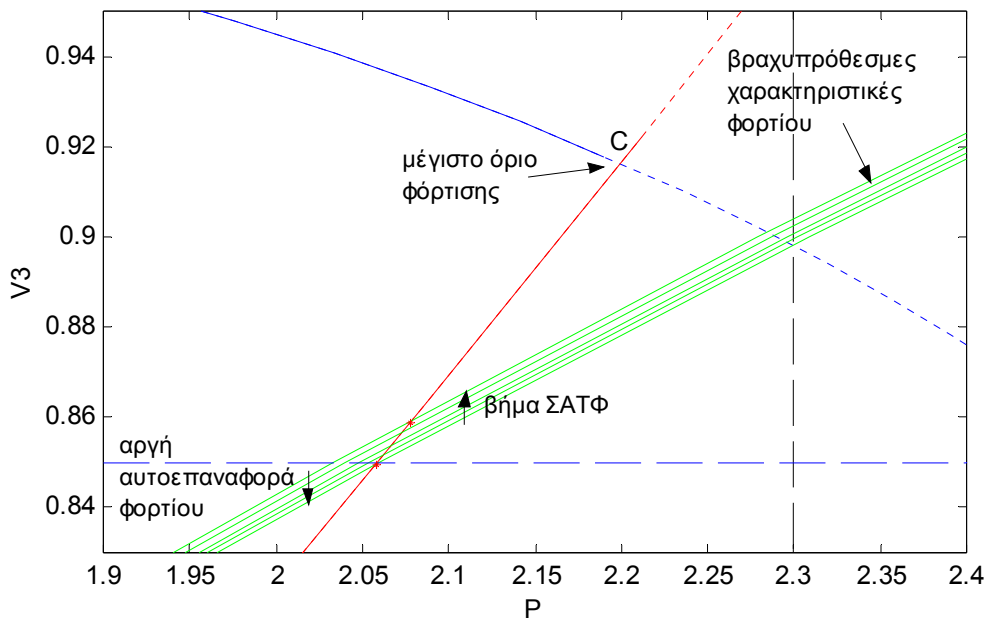


Σχήμα 4.2.6 Τάση δικτύου V_3 συναρτήσει του χρόνου για κάθε μέθοδο

Στην περίπτωση της κανονικής λειτουργίας των ΣΑΤΦ, το σύστημα θα καταρρεύσει σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.2.4-4.2.6. Συγκεκριμένα η τάση δικτύου V_3 πέφτει κάτω από την τιμή 0.75 α.μ. σε χρονικό διάστημα μικρότερο από 300 sec μετά τη διαταραχή. Στην περίοδο μάλιστα που ο μηχανισμός ΣΑΤΦ λειτουργεί και μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού, η κατάρρευση γίνεται με πιο γρήγορο ρυθμό, όπως διακρίνεται στο σχήμα 4.2.6. Όταν το εύρος του λόγου μετασχηματισμού εξαντληθεί στο κάτω όριό του (r^{min}), τότε έχουμε μόνο την επίδραση της ρύθμισης φορτίου, το σύστημα συνεχίζει να καταρρέει, αλλά με μικρότερη κλίση.

Αν απενεργοποιηθεί το ΣΑΤΦ για $V_3=V_L=0.85$ α.μ. το αποτέλεσμα είναι η μείωση του ρυθμού κατάρρευσης, η οποία τώρα οφείλεται αποκλειστικά στην αυτοεπιαναστορέα του φορτίου και συνεπώς έχει μικρότερη κλίση. Εδώ, όπως παρατηρείται στο σχήμα 4.2.6, η τάση δικτύου V_3 διατηρείται πάνω από την τιμή 0.75 α.μ. για περίπου 1200 sec. Συνεπώς η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να αντιμετωπίσει την αστάθεια, απλά την καθυστερεί. Γενικά η απενεργοποίηση των ΣΑΤΦ δεν επιφέρει κάποιο ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε περιπτώσεις με αυτορρυθμιζόμενα φορτία, που συνεχίζουν να μειώνουν τις τάσεις δευτερεύοντος και πρωτεύοντος και οδηγούν σε κατάρρευση.

Όπως παρατηρούμε στα σχήματα 4.2.4-4.2.6 η καλύτερη περίπτωση είναι η αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ. Ο μηχανισμός αυτός καταφέρνει να διατηρήσει την τάση του δικτύου V_3 και την ισχύ του φορτίου P_L σταθερές σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο, για όσο χρονικό διάστημα το ΣΑΤΦ κινείται μέσα στο εύρος τιμών του λόγου μετασχηματισμού, δηλαδή για 8000 sec περίπου μετά τη διαταραχή. Ακριβέστερα η τάση V_3 και η ισχύς κυμαίνονται γύρω από μια σταθερή τιμή: η ρύθμιση της αγωγιμότητας στο φορτίο τις μειώνει και όταν η τάση πρωτεύοντος πέσει κάτω από την τιμή $V_L+\epsilon$ (εδώ $\epsilon=0$), το ΣΑΤΦ κάνει ένα βήμα για να την επαναφέρει σε υψηλότερη τιμή. Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται καλύτερα στο σχήμα 4.2.7. Η τάση στην υψηλή πλευρά δεν ανυψώνεται πάνω από την τιμή κατωφλίου 0.85, αφού έχει τεθεί $\epsilon=0$.



Σχήμα 4.2.7 Εξήγηση της διακύμανσης του φορτίου κατά τη λειτουργία αντιστρόφου ελέγχου του ΣΑΤΦ

Γενικά, όπως έχει αποδειχθεί στην ενότητα 1.3 η ισχύς που απορροφά ένας ζυγός παραμένει σταθερή, όταν η τάση του ζυγού παραμένει σταθερή και η σύνθετη αντίσταση που βλέπει ο ζυγός στην πλευρά του φορτίου είναι ωμική ή ο συντελεστής ισχύος είναι σταθερός. Στην περίπτωση μας η αντίσταση που βλέπει ο ζυγός υψηλής τάσης στο πρωτεύον είναι καθαρά ωμική, αφού για λόγους απλότητας έχουμε αμελήσει την αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή. Για αυτό το λόγο το φορτίο κινείται γύρω από μια σταθερή τιμή, αντίστοιχα με την τάση του πρωτεύοντος, παρά τις αλλαγές της αγωγιμότητας.

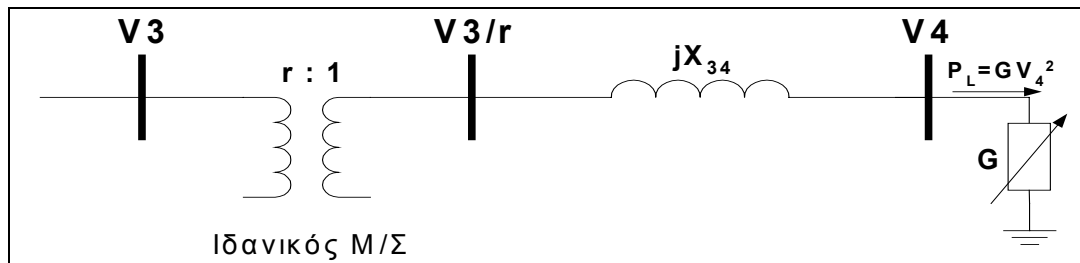
Συγκεκριμένα η μεταβολή της αγωγιμότητας G αντισταθμίζεται από τη μεταβολή της σχέσης μετασχηματισμού r του ΣΑΤΦ και έτσι η ισχύς φορτίου κρατείται σχεδόν σταθερή. Η ισχύς φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_L = G \cdot V_4^2 = G \cdot \frac{V_3^2}{r^2} \quad (4.2.10)$$

Άρα στο διάστημα της αντίστροφης λειτουργίας οι μεταβολές των G , r γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο λόγος G/r^2 να μένει περίπου σταθερός.

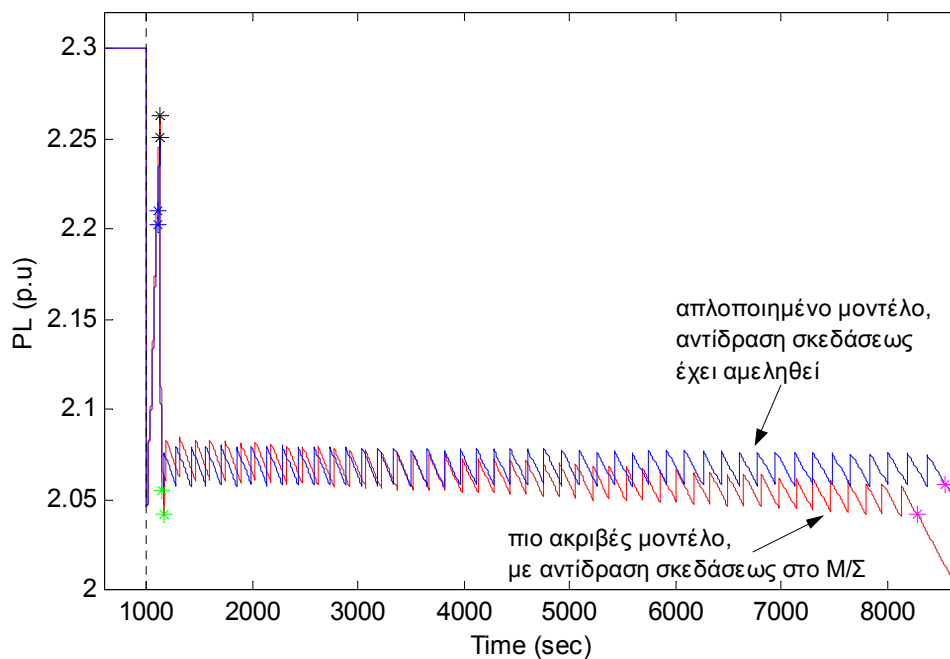
4.2.5 Επίδραση της αντίδρασης σκεδάσεως του μετασχηματιστή

Στην παράγραφο αυτή εξετάζονται τα αποτελέσματα της αντιστροφής του ΣΑΤΦ αν δεν γίνει η παραπάνω παραδοχή ότι η αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή μπορεί να αμεληθεί. Το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή ισχύος με μηχανισμό ΣΑΤΦ θα αποτελείται από ένα ιδανικό Μ/Σ σε σειρά με την αντίδραση σκεδάσεως προς την πλευρά του φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.8.



Σχήμα 4.2.8 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή ισχύος με μηχανισμό ΣΑΤΦ λαμβάνοντας υπόψη την αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ

Στο σχήμα 4.2.9 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος φορτίου για αυτήν την ακριβέστερη παράσταση του συστήματος, συγκρινόμενη με την αντίστοιχη μεταβολή για το απλοποιημένο μοντέλο με αμελητέα αντίδραση σκεδάσεως.



Σχήμα 4.2.9 Προσομοίωση ισχύος φορτίου για τα δύο μοντέλα του Μ/Σ

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.9 τα αποτελέσματα είναι λίγο διαφορετικά: στην περίπτωση του πιο ακριβούς μοντέλου η ισχύς του φορτίου δεν ταλαντώνεται γύρω από μια σταθερή τιμή, αλλά έχει μια μικρή πτωτική κλίση.

Αυτό οφείλεται στην μείωση του συντελεστή ισχύος που βλέπει ο ζυγός πρωτεύοντος, λόγω της αύξησης της αγωγιμότητας του αυτορυθμιζόμενου φορτίου. Στο απλοποιημένο μοντέλο ο ζυγός 3 βλέπει καθαρά ωμική σύνθετη αντίσταση με μεταβαλλόμενη τιμή, αλλά συντελεστή ισχύος σταθερό και ίσο με τη μονάδα. Στο

δεύτερο, πιο ακριβές μοντέλο ο ζυγός 3 βλέπει φορτίο με μεταβαλλόμενο συντελεστή ισχύος, αφού η αντίδραση σκεδάσεως παραμένει σταθερή ενώ η αγωγιμότητα G μεταβάλλεται λόγω της επαναφοράς του φορτίου. Συγκεκριμένα ο συντελεστής ισχύος $\Sigma.I.$ μειώνεται, διότι η αγωγιμότητα G αυξάνεται και ισχύει:

$$\Sigma.I. = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + G^2 \cdot X^2}} \quad (4.2.11)$$

Επομένως, αφού ο συντελεστής ισχύος μεταβάλλεται, το δίκτυο του συστήματος περιγράφεται συνεχώς από διαφορετικές διαδοχικές PV-καμπύλες που αντιστοιχούν στους διαφορετικούς συντελεστές ισχύος. Για το λόγο αυτό, αν και η τάση δικτύου παραμένει σταθερή, η ισχύς μεταβάλλεται και μάλιστα μειώνεται, καθώς το σημείο λειτουργίας περνάει από τη μία χαρακτηριστική δικτύου στην άλλη.

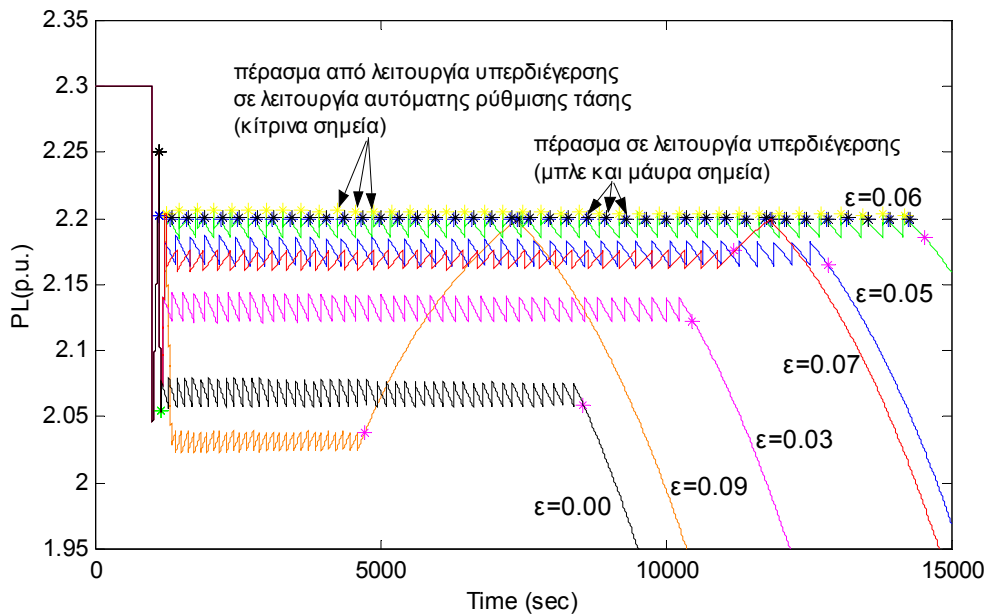
Σε κάθε περίπτωση όμως η επίδραση της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΦ είναι ευεργετική για το σύστημα, αφού το βοηθάει να ανταποκριθεί στη διαταραχή και να σταματήσει την κατάρρευση για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα, έως την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης του ΣΑΤΦ. Μέσα στο διάστημα αυτό δίνεται ευκαιρία σε άλλους μηχανισμούς να δράσουν για την αποκατάσταση του συστήματος. Αν εφαρμοστεί μόνο η αντιστροφή του ΣΑΤΦ, υπό αυτές τις συνθήκες δεν υπάρχει πλέον μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και το σύστημα τελικά θα καταρρεύσει, όταν το ΣΑΤΦ τερματίσει στο άνω όριο του εύρους του λόγου μετασχηματισμού. Το σύστημα θα διασφαλισθεί από την κατάρρευση μόνο αν ληφθούν και άλλα, πιο κρίσιμα μέτρα εκτάκτου ανάγκης, όπως αποκοπή φορτίου, που μπορούν να αποκαταστήσουν κάποιο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας με ικανότητα έλξης.

Σημειώνεται επίσης ότι σε ένα πραγματικό σύστημα η αυτορρύθμιση του φορτίου έχει άνω όρια. Τα όρια αυτά συναντούνται για παράδειγμα όταν συνδεθούν σε διαρκή λειτουργία όλες οι συσκευές που ελέγχονται από θερμοστάτη (βλέπε παράγραφο 1.4.3) ή όταν εξαντληθούν τα περιθώρια ρύθμισης των μετασχηματιστών ρύθμισης τάσης του συστήματος διανομής. Στην παρούσα εργασία δεν παριστάνονται αυτά τα όρια για να είναι το μοντέλο πιο απαισιόδοξο και επομένως αρκετά συντηρητικό. Αν ληφθεί υπόψη όριο G_{\max} και η μεταβολή της αγωγιμότητας λόγω αυτορρύθμισης τερματίσει στο όριο αυτό πριν την εξάντληση του εύρους τιμών της σχέσης μετασχηματισμού r στο ΣΑΤΦ, το σύστημα δε θα καταρρεύσει αλλά θα καταλήξει σε μία μη ευσταθή μόνιμη κατάσταση λειτουργίας με χαμηλές τιμές τάσης και φορτίου (βλέπε 1.2).

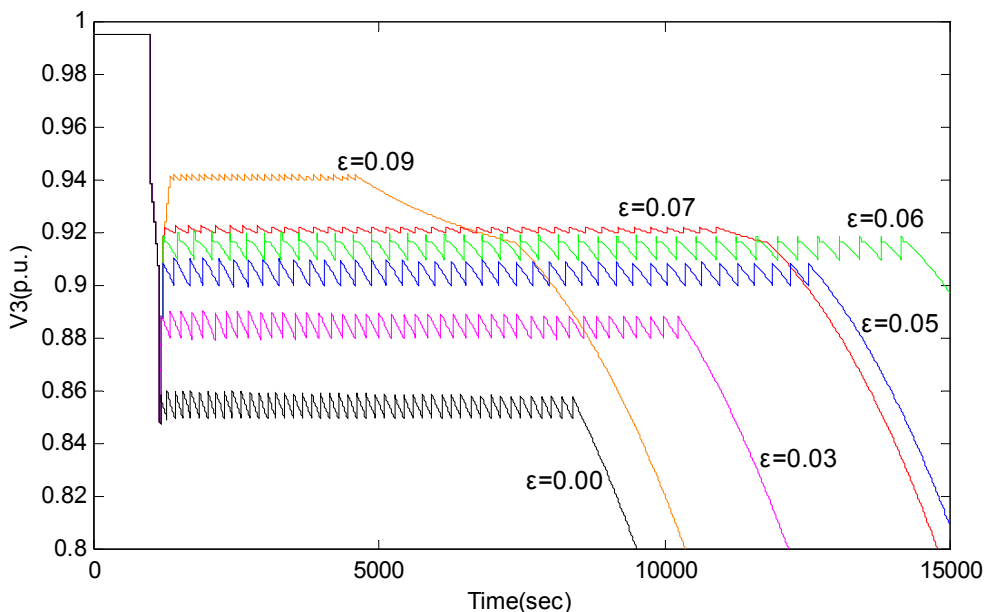
4.2.6 Επίδραση της διόρθωσης ε στην λειτουργία του αντιστρόφου ελέγχου

Στη συνέχεια θα εξεταστούν τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου του ΣΑΤΦ με σταθερή τιμή τάσης κατωφλιού $V_L=0.85$ α.μ. αλλά με διαφορετικές τιμές διόρθωσης ε της τάσης πρωτεύοντος. Σημειώνεται ότι εδώ χρησιμοποιούμε το απλοποιημένο μοντέλο της παραγράφου 4.2.4 όπου η αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή διανομής θεωρείται αμελητέα.

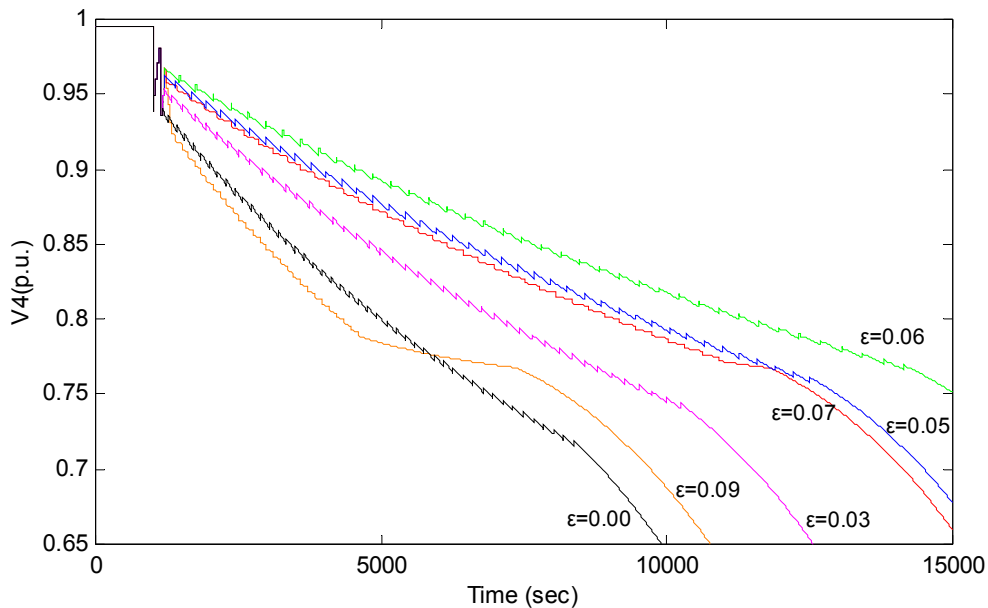
Στα σχήματα 4.2.10-4.2.12 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος φορτίου, της τάσης πρωτεύοντος και της τάσης δευτερεύοντος, όταν αντιστραφεί η λογική λειτουργίας των ΣΑΤΦ με διάφορες ρυθμίσεις για την διόρθωση ε . Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι τιμές: $\varepsilon=0$, $\varepsilon=0.03$, $\varepsilon=0.05$, $\varepsilon=0.06$, $\varepsilon=0.07$, $\varepsilon=0.09$.



Σχήμα 4.2.10 Ισχύς φορτίου P_L συναρτήσει του χρόνου για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 4.2.11 Προσομοίωση της τάσης πρωτεύοντος V_3 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 4.2.12 Τάση δευτερεύοντος V_4 για διάφορες τιμές της διόρθωσης ε

Παρατηρείται ότι για τιμές της διόρθωσης ε έως 0.06, αύξηση της ρύθμισης για το ε έχει ως αποτέλεσμα, εκτός από την αύξηση της τάσης δικτύου που είναι προφανές επακόλουθο, υψηλότερη ισχύ και τάση στο φορτίο, καθώς και τη διαφύλαξη του συστήματος από κατάρρευση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αντίθετα αν αυξηθεί το ε πέρα από την τιμή 0.06, η τάση δικτύου αυξάνεται και πάλι, όμως το φορτίο και η τάση δευτερεύοντος μειώνονται και το ΣΑΤΦ εξαντλείται πολύ πιο γρήγορα, αφήνοντας τις τάσεις να καταρρεύσουν.

Η συμπεριφορά αυτή γίνεται περισσότερο κατανοητή με τη μελέτη της PV καμπύλης του συστήματος, που δίνεται στο σχήμα 4.2.3, για κάθε περιοχή τιμών του ε :

- **$\varepsilon < 0.06$ α.μ.: Το σημείο λειτουργίας κινείται πάνω στην χαρακτηριστική καμπύλη περιορισμού υπερδιέγερσης (ΠΥ) γιατί σε όλο το χρόνο ισχύουν $E > E_{qlim}$ και $E_g = E_{qlim}$ (σχέση 4.2.3)**

Αν έχει τεθεί ε μικρότερο του 0.06 α.μ. και συνεπώς η τάση δικτύου δεν υπερβαίνει την τιμή 0.91 α.μ., η γεννήτρια θα βρίσκεται συνεχώς σε κατάσταση υπερδιέγερσης και περιγράφεται από σημεία πάνω στη χαρακτηριστική του δικτύου που αντιστοιχεί σε περιορισμό υπερδιέγερσης. Πάνω σε αυτήν την χαρακτηριστική όσο ανυψώνουμε την τάση δικτύου, δηλαδή αυξάνουμε τη διόρθωση τάσης ε , θα έχουμε και μεγαλύτερη ισχύ φορτίου, μέχρι το όριο μέγιστης φόρτισης στο σημείο C, που δίνεται από την τομή της χαρακτηριστικής για υπερδιέγερση με την χαρακτηριστική για αυτόματη ρύθμιση τάσης. Όσο διαρκεί η αντίστροφη λειτουργία η συμπεριφορά του συστήματος είναι η παρακάτω: Η αυτοεπαναφορά του φορτίου, που αυξάνει την αγωγιμότητα, μετακινεί το σημείο λειτουργίας πάνω στην χαρακτηριστική ΠΥ με τέτοια κατεύθυνση ώστε να μειώνεται η τάση δικτύου και η ισχύς φορτίου, επειδή βρισκόμαστε στην ασταθή περιοχή. Κάθε φορά που η τάση δικτύου V_3 πέφτει κάτω από την τιμή $V_L + \varepsilon$ το ΣΑΤΦ με ένα βήμα επαναφέρει σε σημείο της χαρακτηριστικής ΠΥ με υψηλότερη τάση δικτύου ($V_3 > V_L + \varepsilon$) και ισχύ φορτίου. Όσο πιο κοντά είμαστε στο μέγιστο όριο φόρτισης, τόσο πλησιάζει το φορτίο στην αρχική ζήτηση P_0 , και η αγωγιμότητα μεταβάλλεται με μικρότερα βήματα $\Delta G = r_G \cdot (P_0 - P_L)$ (βλέπε σχέση 4.2.6), με συνέπεια το ΣΑΤΦ να κάνει πιο αραιές

κινήσεις και να εξαντλείται αργότερα. Για αυτό αυξανόμενη της διόρθωσης ε αυξάνεται ο χρόνος διατήρησης του συστήματος.

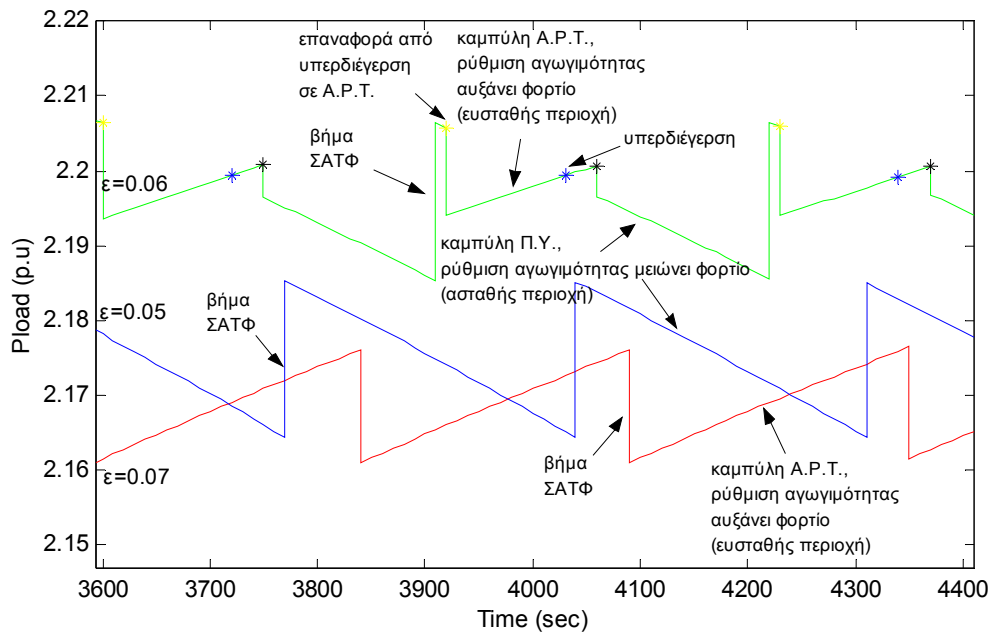
- **$\varepsilon > 0.06$ α.μ.: Η γεννήτρια επανέρχεται σε λειτουργία APT επειδή η τάση δικτύου αυξάνεται τόσο ώστε $E < E_{q\lim}$ (σχέσεις 4.2.1, 4.2.2)**

Με ρύθμιση του $\varepsilon > 0.06$ α.μ., η τάση πρωτεύοντος V_3 με την ανάστροφη λειτουργία ανυψώνεται σε τιμή που βρίσκεται στο πάνω μέρος της σύνθετης χαρακτηριστικής του δικτύου, δηλαδή στη χαρακτηριστική αυτόματης ρύθμισης τάσης. Ο μηχανισμός διέγερσης επανέρχεται στην κανονική λειτουργία APT, όταν η τάση δικτύου V_3 υπερβεί την τιμή που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης φόρτισης C και επομένως $E < E_{q\lim}$ (σχέσεις 4.2.1, 4.2.2). Από αυτό το σημείο και μέχρι το ΣΑΤΦ να τερματίσει τη λειτουργία του στο όριο του λόγου μετασχηματισμού το σύστημα κινείται σε σημεία στη χαρακτηριστική αυτόματης ρύθμισης τάσης. Όσο αυξάνει η ρυθμισμένη τιμή της διόρθωσης ε και άρα ανυψώνεται επιπλέον η τάση δικτύου V_3 , η ισχύς του φορτίου μειώνεται. Η κίνηση πάνω στη χαρακτηριστική λόγω των μηχανισμών ΣΑΤΦ και επαναφοράς του φορτίου έχει τα εξής αποτελέσματα: η ρύθμιση της αγωγιμότητας τείνει να μειώσει την τάση δικτύου και να αυξήσει όμως το φορτίο, αφού βρισκόμαστε στην ευσταθή περιοχή, ενώ το ΣΑΤΦ σε αντιστροφή κάνει βήματα προς την κατεύθυνση που αυξάνει την τάση και μειώνει το φορτίο. Εδώ για μικρότερες τιμές της διόρθωσης ε , το φορτίο πλησιάζει περισσότερο στην αρχική ζήτηση και το ΣΑΤΦ αργεί περισσότερο να εξαντλήσει το περιθώριο ρύθμισής του. Όταν το ΣΑΤΦ τερματίσει τη λειτουργία του στο άνω όριο του λόγου μετασχηματισμού, το σύστημα κινείται αργά, με την επίδραση μόνο της ρύθμισης φορτίου, προς το σημείο C, που αντιστοιχεί στο μέγιστο όριο φόρτισης. Έτσι για λίγο η ισχύς φορτίου αυξάνεται, αφού το σύστημα κινείται στην ευσταθή περιοχή και η αύξηση της αγωγιμότητας τείνει να αποκαταστήσει το φορτίο. Όταν όμως το σύστημα φτάσει στο όριο μέγιστης φόρτισης στο σημείο C και η γεννήτρια περάσει σε έλεγχο υπερδιέγερσης, το σύστημα αρχίζει να καταρρέει, αφού πλέον περνάει στην ασταθή περιοχή και η ρύθμιση του φορτίου επιδρά αρνητικά.

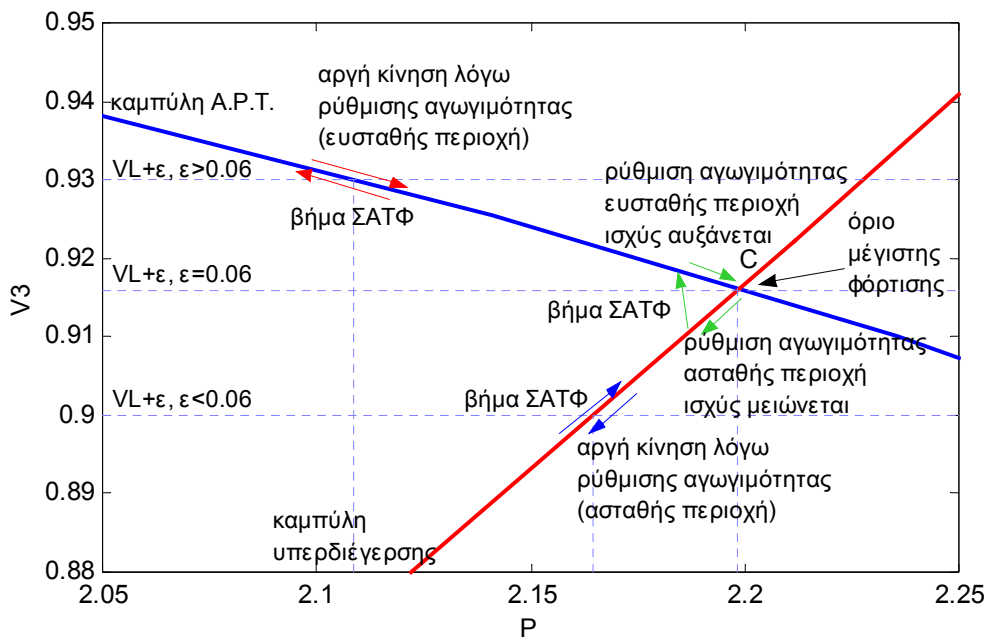
- **$\varepsilon \approx 0.06$ α.μ.: Η τάση δικτύου ανυψώνεται πολύ κοντά στην τιμή που αντιστοιχεί στο όριο μέγιστης φόρτισης (σημείο C), στην τομή των χαρακτηριστικών APT και ΠΥ**

Αν τεθεί διόρθωση τάσης ε τέτοια ώστε να προσεγγίζεται το σημείο μέγιστου φορτίου C ($\varepsilon \approx 0.06$ α.μ.), το σύστημα θα ταλαντώνεται γύρω από το σημείο τομής C των χαρακτηριστικών αυτόματης ρύθμισης τάσης και ελέγχου υπερδιέγερσης, περνώντας συνεχώς από τη μία στην άλλη. Το σημείο C όπως φαίνεται από την PV γραφική είναι σε τάση δικτύου $V_3 = 0.9161$ α.μ., δηλαδή λίγο μεγαλύτερη από την $V_{L+\varepsilon} = 0.91$ α.μ. για $\varepsilon = 0.06$ α.μ.. Έτσι τα βήματα του ΣΑΤΦ ανυψώνουν την τάση πρωτεύοντος σε σημείο στο πάνω μέρος της σύνθετης χαρακτηριστικής, όπου λειτουργεί η αυτόματη ρύθμιση τάσης. Κάτω από την επίδραση της ρύθμισης αγωγιμότητας, η ισχύς φορτίου αυξάνεται αρχικά μέχρι το μέγιστο όριο φόρτισης, επειδή το σύστημα λειτουργεί στην ευσταθή περιοχή, και στη συνέχεια μειώνεται, αφού η γεννήτρια έχει υπερδιεγερθεί και το σύστημα έχει περάσει στην ασταθή περιοχή. Η επόμενη λειτουργία του ΣΑΤΦ θα πραγματοποιηθεί όταν η τάση δικτύου πέσει κάτω από 0.91 α.μ. Ο μηχανισμός ΣΑΤΦ λειτουργεί για τον μέγιστο δυνατό χρόνο, επειδή κινούμαστε πολύ κοντά στο μέγιστο όριο φόρτισης δηλαδή με το πλησιέστερο δυνατό φορτίο στην αρχική ζήτηση και συνεπώς η ρύθμιση φορτίου γίνεται με σχετικά αργό ρυθμό.

Η συμπεριφορά για κάθε περίπτωση φαίνεται πολύ καθαρά στα σχήματα 4.2.13, 4.2.14.



Σχήμα 4.2.13 Μεταβολές της ισχύος φορτίου για κάθε περιοχή τιμών του ε



Σχήμα 4.2.14 Κινήσεις πάνω στην PV-καμπύλη για κάθε περιοχή τιμών του ε

Για την επιλογή του βέλτιστου ε εξετάζουμε τα παρακάτω κριτήρια:

- α) χρόνος διατήρησης του συστήματος από κατάρρευση
- β) παρεχόμενο φορτίο ή μη εξυπηρετηθέν φορτίο
- γ) τάσεις στη μεταφορά και στη διανομή

Ιδιαίτερα ενδιαφέρει ο χρόνος διατήρησης, καθώς όπως έχει αναφερθεί η ανάστροφη λειτουργία είναι μία προσωρινή λύση του προβλήματος αστάθειας, που προσφέρει το κατάλληλο χρονικό περιθώριο για να προλάβουν να ανταποκριθούν οι ουσιαστικές λειτουργίες ελέγχου έκτακτης ανάγκης που διαθέτει το σύστημα

Το μέσο μη-εξυπηρετηθέν φορτίο προκύπτει από τη διαφορά της αρχικής ζήτησης φορτίου και του μέσου παρεχόμενου φορτίου κατά τη διάρκεια λειτουργίας της ανάστροφης λογικής.

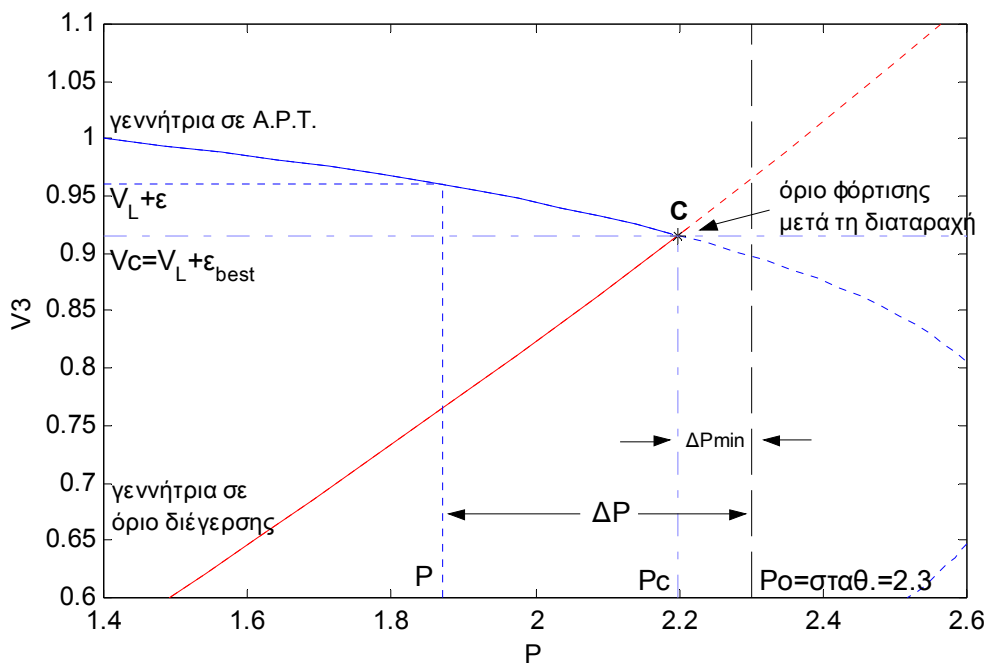
Στον πίνακα 4.2.3 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε μία από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για διάφορες τιμές της διόρθωσης ε

| Διόρθωση ε | Μη εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP | Χρόνος διατήρησης της τάσης δικτύου του συστήματος πάνω από 0.80 α.μ. |
|--|---|--|
| 0.00 α.μ. | 0.2317 α.μ. | 8700 sec |
| 0.03 α.μ. | 0.1675 α.μ. | 11300 sec |
| 0.05 α.μ. | 0.1253 α.μ. | 14200 sec |
| 0.06 α.μ. | 0.1059 α.μ. | 16200 sec |
| 0.07 α.μ. | 0.1313 α.μ. | 13800 sec |
| 0.09 α.μ. | 0.2646 α.μ. | 9500 sec |

Σύμφωνα με τα παραπάνω και παρατηρώντας τα σχήματα 4.2.9-4.2.12 φαίνεται ότι η τιμή $\varepsilon=0.06$ α.μ. είναι η βέλτιστη. Για αυτήν την τιμή η ανάστροφη λειτουργία καταφέρνει να διασφαλίσει το σύστημα από κατάρρευση για το μέγιστο χρόνο και το παρεχόμενο φορτίο είναι μέγιστο - η αλλιώς το μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ελάχιστο, ενώ και η τάση στο δευτερεύον είναι αυξημένη σε σχέση με τις άλλες περιπτώσεις. Ωστόσο για λόγους ευστάθειας και για την αποφυγή ταλαντώσεων μεταξύ της κατάστασης APT και της υπερδιεγερμένης κατάστασης στη γεννήτρια, η σωστότερη επιλογή θα είναι η πιο συντηρητική τιμή $\varepsilon=0.05$ α.μ., παρόλο που επιφέρει μεγαλύτερη αποκοπή φορτίου.

Γενικά η επιλογή του επιπέδου της τάσης δικτύου μέσω της διόρθωσης ε καθορίζει και το φορτίο που τροφοδοτεί το σύστημα [10]. Η βέλτιστη επιλογή για τη διόρθωση ε είναι αυτή που ανυψώνει την τάση πρωτεύοντος σε τέτοια τιμή ώστε να προσεγγίζεται το σημείο C του μέγιστου ορίου φόρτισης μετά τη διαταραχή (κρίσιμο σημείο), που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τομή των καμπυλών αυτόματης ρύθμισης τάσης και υπερδιέγερσης. Αν η ρύθμιση γίνει σε τέτοια τιμή του ε , η παρεχόμενη ισχύς φορτίου P_C θα είναι η μέγιστη δυνατή και η πλησιέστερη στην αρχική ζήτηση P_0 , όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2.14. Έτσι η ρύθμιση της αγωγιμότητας γίνεται με πιο αργό ρυθμό (σχέση 4.2.6) και τα ΣΑΤΦ εξαντλούν το περιθώριο ρύθμισης τους σε πιο προχωρημένο χρόνο, αφού λειτουργούν με πιο αραιά βήματα. Επιπλέον αυξημένη ισχύς φορτίου συνεπάγεται και αυξημένη τάση στο φορτίο.



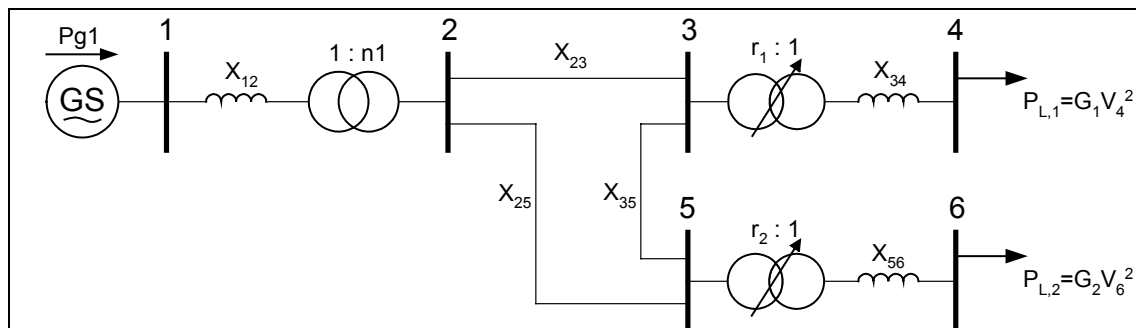
Σχήμα 4.2.15 Κρίσιμη τάση ανύψωσης $V_L+\epsilon$ για ελάχιστο μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP

Πρέπει βέβαια να επιλέγεται η τιμή του ϵ που θα ανυψώνει την τάση σε σημείο λίγο χαμηλότερο από το κρίσιμο, ώστε να υπάρχει το αναγκαίο περιθώριο ασφαλείας και να εξασφαλίζεται έτσι πρωταρχικά η ευστάθεια του συστήματος, ακόμα και αν αυτό σημαίνει ότι θα τροφοδοτηθεί μικρότερο τμήμα της ζήτησης φορτίου.

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΑ

4.3.1 Περιγραφή συστήματος

Το σύστημα που θα εξεταστεί στη δεύτερη εφαρμογή σχεδιάζεται στο σχήμα 4.3.1.



Σχήμα 4.3.1 Διάγραμμα του εξεταζόμενου συστήματος

Το σύστημα είναι παρόμοιο με αυτό της πρώτης εφαρμογής της παραγράφου 4.2, μόνο που εδώ η γεννήτρια τροφοδοτεί δύο αυτοεπαναφερόμενα φορτία, συνδεδεμένα σε δίκτυο με διάταξη βρόχου, μέσω μετασχηματιστών εξοπλισμένων με μηχανισμό ΣΑΤΦ.

Το μοντέλο της γεννήτριας είναι ίδιο, όπως και στην πρώτη εφαρμογή, με αυτόματη ρύθμιση τάσης και έλεγχο υπερδιέγερσης, και περιγράφεται από τις σχέσεις 4.2.1-4.2.2. Η τάση εξόδου της γεννήτριας ανυψώνεται ομοίως με μετασχηματιστή με λόγο 1:n1 και αντίδραση σκεδάσεως X_{12} .

Ο ζυγός εξόδου 2 του ανωτέρω μετασχηματιστή συνδέεται στο δίκτυο και τροφοδοτεί τα φορτία P_1 και P_2 μέσω μετασχηματιστών εξοπλισμένων με μηχανισμό ΣΑΤΦ με μεταβαλλόμενους λόγους μετασχηματισμού αντίστοιχα r_1 και r_2 . Οι μετασχηματιστές παριστάνονται ως ιδανικοί μετασχηματιστές σε σειρά με τις αντιδράσεις σκεδάσεως τους προς την πλευρά του φορτίου, οι οποίες είναι αντίστοιχα X_{34} και X_{56} .

Οι γραμμές μεταφοράς θεωρούνται χωρίς απώλειες και έχουν υλοποιηθεί ώστε οι αντιδράσεις τους να είναι $X_{25}=X_{23}/4$ και $X_{35}=3*X_{23}/4$, δηλαδή το φορτίο P_1 θεωρείται πιο απομακρυσμένο από το P_2 .

Τα φορτία αναπαριστώνται με αυτορυθμιζόμενες αγωγιμότητες όπως και στην προηγούμενη εφαρμογή:

$$G_{k+1,i} = \begin{cases} G_{k,i} + r_{G,i} \cdot (P_{0,i} - G_{k,i} \cdot V_j^2), & \text{αν } |P_{0,i} - G_{k,i} \cdot V_j^2| > d_{G,i} \\ G_{k,i} & , \text{αν } |P_{0,i} - G_{k,i} \cdot V_j^2| \leq d_{G,i} \end{cases} \quad (4.3.1)$$

όπου $i = 1, 2$ και τα αντίστοιχα $j = 4, 6$ για το κάθε φορτίο. Βήματα μεταβολής της αγωγιμότητας εκτελούνται σε διακριτές χρονικές στιγμές με σταθερή χρονική καθυστέρηση $\Delta T_{G,i} = \Delta T_G$ μεταξύ τους και $d_{G,i} = d_G$ το ήμισυ της νεκρής ζώνης του φορτίου γύρω από την αρχική ζήτηση $P_{0,i}$. Δε λαμβάνουμε υπόψη άνω όρια $G_{\max,i}$ για τη μεταβολή της αγωγιμότητας (βλέπε παράγραφο 1.4.3).

Επομένως ομοίως τα φορτία έχουν βραχυπρόθεσμη χαρακτηριστική σταθερής αγωγιμότητας και μακροπρόθεσμη χαρακτηριστική σταθερής ισχύος.

Για τα ΣΑΤΦ χρησιμοποιείται όπως και στην παράγραφο 4.2 το διακριτό μοντέλο λειτουργίας, δηλαδή:

$$r_{k+1,i} = \begin{cases} r_{k,i} + \Delta r, & \text{αν } V_j > V_j^0 + d \text{ και } r_{k,i} < r^{\max} \\ r_{k,i} - \Delta r, & \text{αν } V_j < V_j^0 - d \text{ και } r_{k,i} > r^{\min} \\ r_{k,i}, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.3.2)$$

όπου $i = 1, 2$ και τα αντίστοιχα $j = 4, 6$ για το κάθε φορτίο. Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ των βημάτων των ΣΑΤΦ είναι ΔT_r σταθερή και V_j είναι η τάση δευτερεύοντος στο μετασχηματιστή του κάθε φορτίου.

Οι τιμές των παραμέτρων του συστήματος που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στον πίνακα 4.3.1:

Πίνακας 4.3.1 Τιμές παραμέτρων του συστήματος δύο φορτίων

| | | | | | | | |
|----------|------------|---------------|-------------|------------|-------------|--------------|----------------|
| X_{12} | 0.016 α.μ. | X_{56} | 0.05 α.μ. | V_{Iref} | 1.0238 α.μ. | d | 8.8125e-3 α.μ. |
| X_{23} | 0.08 α.μ. | X_d | 0.8 α.μ. | $T_{d,E}$ | 40 sec | ΔT_r | 10 sec |
| X_{25} | 0.02 α.μ. | n1 | 1.04 | r^{\min} | 0.8 | $d_{G,i}$ | 0.005 α.μ. |
| X_{34} | 0.04 α.μ. | $E_{q_{lim}}$ | 2.5968 α.μ. | r^{\max} | 1.2 | ΔT_G | 10 sec |
| X_{35} | 0.06 α.μ. | K_E | 100 | Δr | 0.00625 | $r_{G,i}$ | 0.005 |

Πάνω στο σύστημα αυτό θα αναλυθούν τρεις περιπτώσεις για τη ζήτηση φορτίου στους δύο ζυγούς, οι οποίες δίνονται στον πίνακα 4.3.2.

Πίνακας 4.3.2 Περιπτώσεις ζήτησης φορτίων που αναλύονται

| ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ | ΜΑΚΡΙΝ Ο ΦΟΡΤΙΟ (P_{01}) | ΚΟΝΤΙΝ Ο ΦΟΡΤΙΟ (P_{02}) | ΤΑΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ $P_1 (V_4^0)$ | ΤΑΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΣΤΟ $P_2 (V_6^0)$ |
|----------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 ^η | 1.8 α.μ. | 0.9 α.μ. | 1.0213 α.μ. | 1.0275 α.μ. |
| 2 ^η | 1.2 α.μ. | 1.55 α.μ. | 1.0261 α.μ. | 1.0257 α.μ. |
| 3 ^η | 0.9 α.μ. | 1.85 α.μ. | 1.0271 α.μ. | 1.0236 α.μ. |

4.3.2 Εξισώσεις του δικτύου

Οι εξισώσεις δικτύου και οι εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο του συστήματος δύο φορτίων δίνονται παρακάτω. Οι εξισώσεις αυτές προκύπτουν από την εφαρμογή του ισοζυγίου ισχύος, ενεργού και άεργου, στον κάθε ζυγό του συστήματος.

• Ζυγός 1

$$g_1 = P_{g1} - V_1 * V_2 * \sin(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} = 0 \quad (4.3.3.a)$$

$$g_2 = E_q * V_1 * \cos(d_1 - \theta_1) / X_d - V_1^2 / X_d - V_1^2 / X_{12} + V_1 * V_2 * \cos(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} = 0 \quad (4.3.3.b)$$

$$g_3 = P_{g1} - E_q * V_1 * \sin(d_1 - \theta_1) / X_d = 0 \quad (4.3.3.c)$$

$$g_4 = \theta_1 = 0 \quad (4.3.3.d)$$

• Ζυγός 2

$$g_5 = V_1 * V_2 * \sin(\theta_1 - \theta_2) / n_1 / X_{12} - V_2 * V_3 * \sin(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} - V_2 * V_5 * \sin(\theta_2 - \theta_5) / X_{25} = 0 \quad (4.3.4.a)$$

$$g_6 = V_2^2 * (1/n_1^2 / X_{12} + 1/X_{23} + 1/X_{25}) - V_2 * V_1 * \cos(\theta_2 - \theta_1) / n_1 / X_{12} - V_2 * V_3 * \cos(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} - V_2 * V_5 * \cos(\theta_2 - \theta_5) / X_{25} = 0 \quad (4.3.4.b)$$

- **Ζυγός 3**

$$g_7 = V_2 * V_3 * \sin(\theta_2 - \theta_3) / X_{23} + V_3 * V_5 * \sin(\theta_5 - \theta_3) / X_{35} + V_3 * V_4 * \sin(\theta_4 - \theta_3) / r_1 / X_{34} = 0 \quad (4.3.5.a)$$

$$g_8 = V_3^2 * (1 / X_{23} + 1 / X_{35} + 1 / r_1^2 / X_{34}) - V_3 * V_2 * \cos(\theta_3 - \theta_2) / X_{23} - V_3 * V_5 * \cos(\theta_3 - \theta_5) / X_{35} - V_3 * V_4 * \cos(\theta_3 - \theta_4) / r_1 / X_{34} = 0 \quad (4.3.5.b)$$

- **Ζυγός 4**

$$g_9 = V_4 * V_3 * \sin(\theta_3 - \theta_4) / r_1 / X_{34} - G_1 * V_4^2 = 0 \quad (4.3.6.a)$$

$$g_{10} = V_4^2 / X_{34} - V_4 * V_3 * \cos(\theta_4 - \theta_3) / r_1 / X_{34} = 0 \quad (4.3.6.b)$$

- **Ζυγός 5**

$$g_{11} = V_5 * V_2 * \sin(\theta_2 - \theta_5) / X_{25} + V_3 * V_5 * \sin(\theta_3 - \theta_5) / X_{35} + V_5 * V_6 * \sin(\theta_6 - \theta_5) / r_2 / X_{56} = 0 \quad (4.3.7.a)$$

$$g_{12} = V_5^2 * (1 / X_{25} + 1 / X_{35} + 1 / r_2^2 / X_{56}) - V_5 * V_2 * \cos(\theta_5 - \theta_2) / X_{25} - V_5 * V_3 * \cos(\theta_5 - \theta_3) / X_{35} - V_5 * V_6 * \cos(\theta_5 - \theta_6) / r_2 / X_{56} = 0 \quad (4.3.7.b)$$

- **Ζυγός 6**

$$g_{13} = V_5 * V_6 * \sin(\theta_5 - \theta_6) / r_2 / X_{56} - G_2 * V_6^2 = 0 \quad (4.3.8.a)$$

$$g_{14} = V_6^2 / X_{56} - V_6 * V_5 * \cos(\theta_6 - \theta_5) / r_2 / X_{56} = 0 \quad (4.3.8.b)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις για να ολοκληρωθεί το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση προστίθενται οι εξισώσεις διέγερσης της γεννήτριας που είναι οι (4.2.1)-(4.2.2) και οι εξισώσεις των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων (4.3.1) και (4.3.2).

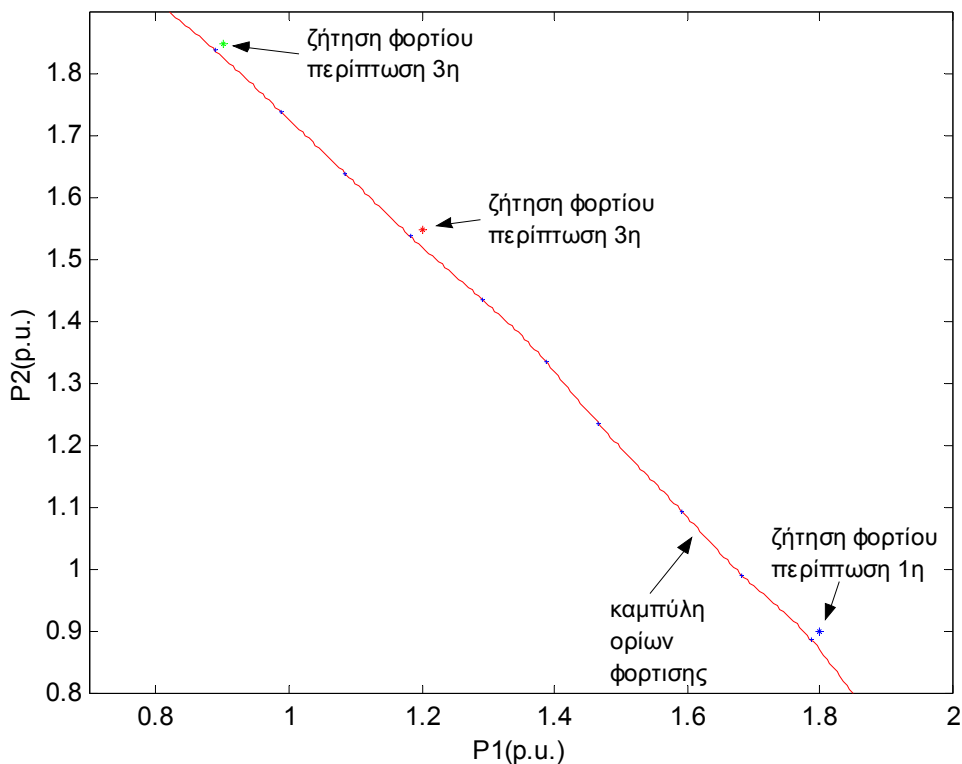
4.3.3 Απόκριση συστήματος μετά τη διαταραχή χωρίς εφαρμογή μέτρων εκτάκτου ανάγκης

Θεωρούμε ότι στο σύστημα εμφανίζεται μία διαταραχή σε χρόνο 1000 sec, που είναι η απώλεια της γραμμής 2-3, που συνδέει άμεσα τη γεννήτρια με το φορτίο P₁. Μετά την απομόνωση της γραμμής το δίκτυο μετατρέπεται σε ακτινικό και το φορτίο P₁ τροφοδοτείται αποκλειστικά μέσω της διαδρομής ζυγών 2-5-3, ενώ πριν το φορτίο μοιραζόταν στις διαδρομές 2-3 και 2-5-3. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιπλέον επιβάρυνση της γραμμής 2-5, από την οποία διέρχεται η συνολική ισχύς που παράγει το σύστημα, και, σε συνδυασμό με τον περιορισμό υπερδιέγερσης της γεννήτριας, το δίκτυο δεν μπορεί πλέον να τροφοδοτήσει το ζητούμενο φορτίο P_{o1} και P_{o2}.

Το σύστημα φτάνει στο μέγιστο όριο φόρτισης του χωρίς να μπορεί να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση φορτίου και θα καταρρεύσει, αφού δεν μπορεί να αποκατασταθεί πλέον μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας. Το όριο φόρτισης αντιστοιχεί και εδώ στο σημείο που υπερδιεγείρεται η γεννήτρια (όριο λόγω μεταγωγής), αφού όπως φαίνεται στη συνέχεια από τις προσομοιώσεις μετά την υπερδιέγερση η ρύθμιση επαναφοράς των φορτίων οδηγεί σε μείωση των φορτίων.

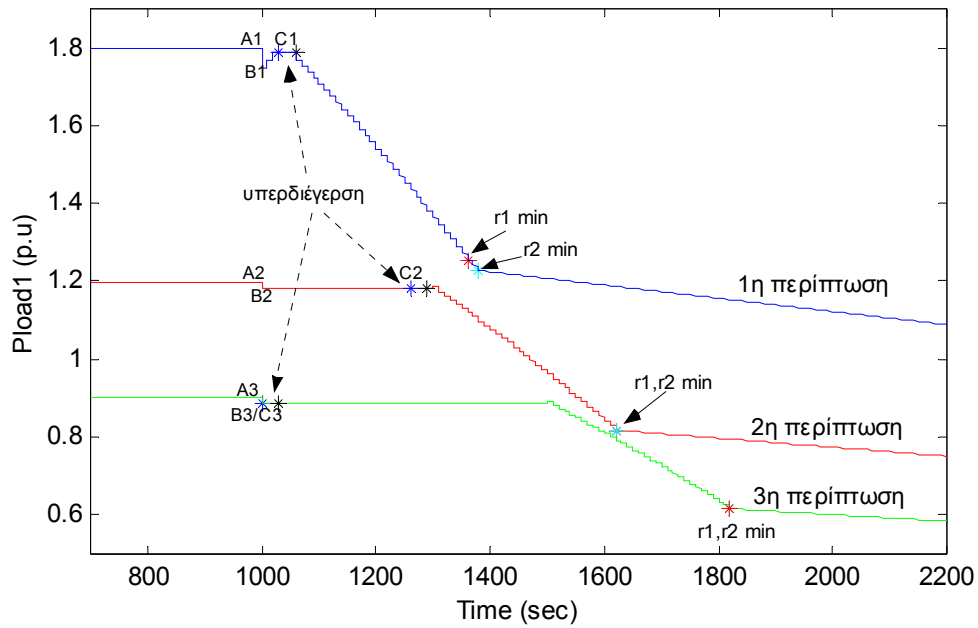
Στην εφαρμογή των δύο φορτίων δεν είναι σκόπιμο να σχεδιαστεί η PV-καμπύλη, καθώς υπάρχουν περισσότερες μεταβλητές τάσης και ισχύος φορτίου και επιπλέον λόγω της ρύθμισης της αγωγιμότητας και του λόγου μετασχηματισμού μεταβάλλονται οι συντελεστές φορτίου και κατά τη λειτουργία το σύστημα μεταπηδά συνεχώς σε διαδοχικές PV-καμπύλες. Στο σύστημα αυτό το όριο φόρτισης δεν αποτελεί ένα σημείο, όπως προηγουμένως, αλλά ένα συνδυασμό σημείων με διαφορετική ισχύ για τα δύο φορτία, που βρίσκονται σε μία καμπύλη ορίων φόρτισης.

Στο σχήμα 4.3.2 δίνεται μια προσεγγιστική απεικόνιση της καμπύλης ορίων φόρτισης μετά τη διαταραχή, που έχει προκύψει συνδέοντας τα σημεία όπου πραγματοποιείται η υπερδιέγερση της γεννήτριας σε διαδοχικές προσομοιώσεις για διάφορους συνδυασμούς φόρτισης του συστήματος. Η καμπύλη είναι προσεγγιστική επειδή λόγω της διακριτής μορφής του μοντέλου, ο έλεγχος δεν αντιλαμβάνεται αμέσως την υπερδιέγερση, αλλά όταν η διέγερση της γεννήτριας έχει φτάσει σε τιμή λίγο μεγαλύτερη από την οριακή τιμή $E_{q\lim}$. Επομένως η πραγματική καμπύλη θα είναι εσωτερική αυτής του σχήματος 4.3.2, με μικρότερες οριακές τιμές για τα φορτία. Επιπλέον στο σχήμα 4.3.2 έχουν σχεδιαστεί και τα σημεία αρχικής φόρτισης για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις του πίνακα 4.3.2 τα οποία βρίσκονται εκτός της καμπύλης ορίων φόρτισης.

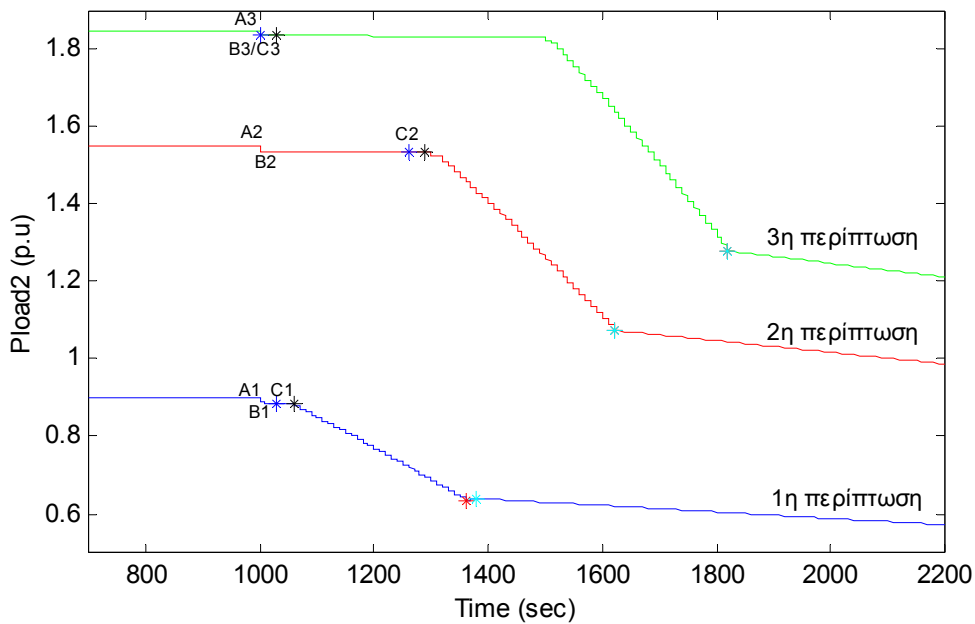


Σχήμα 4.3.2 Καμπύλη μέγιστης φόρτισης μετά τη διαταραχή

Η συμπεριφορά του συστήματος αν δεν εφαρμοστεί κάποιο μέσο έκτακτης ανάγκης για να αναχαιτίσει την κατάρρευση φαίνεται στα σχήματα 4.3.3, 4.3.4 για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 4.3.3 Προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_1 συναρτήσει του χρόνου για τις τρεις περιπτώσεις



Σχήμα 4.3.4 Ισχύς φορτίου P_2 συναρτήσει του χρόνου

Μετά τη διαταραχή το σύστημα μεταπίπτει από το αρχικό σημείο λειτουργίας $A_{1,2,3}$ στο σημείο $B_{1,2,3}$ που προκύπτει από την επίλυση των νέων εξισώσεων του συστήματος, όπως διαμορφώνονται με την απώλεια της γραμμής, για τις ίδιες με τις αρχικές τιμές αγωγιμότητας. Στο σημείο $C_{1,2,3}$ η γεννήτρια υπερδιεγείρεται, είτε απευθείας (3η περίπτωση) είτε μετά από κάποιο διάστημα, με την επίδραση της αυτορρύθμισης του φορτίου και των ΣΑΤΦ που τείνουν να αυξήσουν την ισχύ των φορτίων (1η και 2η περίπτωση).

Όταν αλλάζει η σχέση για την διέγερση της γεννήτριας σε $E_q = E_{q\lim}$, σε χρόνο 40 sec μετά από την εμφάνιση της υπερδιέγερσης, η ρύθμιση της αγωγιμότητας και των ΣΑΤΦ έχει αποτελέσματα αντίθετα από τα επιθυμητά και μειώνει τις καταναλισκόμενες ισχύεις και τις τάσεις στα φορτία, όπως και τις τάσεις δικτύου, δηλαδή το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια τάσης. Αυτό συμβαίνει επειδή το σύστημα έχει φτάσει στο μέγιστο όριο φόρτισής του, με την υπερδιέγερση της γεννήτριας, και έχει περάσει στην ασταθή περιοχή λειτουργίας. Η βύθιση των τάσεων και των ισχύων γίνεται με γρηγορότερο ρυθμό όσο λειτουργούν οι μηχανισμοί ΣΑΤΦ και με βραδύτερο όταν το εύρος των λόγων μετασχηματισμού στους δύο ζυγούς φορτίου εξαντληθεί και παραμένει μόνο η ρύθμιση επαναφοράς των φορτίων. Το σύστημα σε όλες τις περιπτώσεις οδηγείται σε κατάρρευση.

Όπως παρατηρούμε απαιτείται η εφαρμογή κάποιου μέτρου έκτακτης ανάγκης για την αντιμετώπιση της κατάρρευσης που προκαλείται από την εμφανιζόμενη διαταραχή. Η απενεργοποίηση των ΣΑΤΦ (tap blocking) έχει ως αποτέλεσμα απλά τη μείωση του ρυθμού κατάρρευσης: επενεργεί στο σύστημα η αυτορρύθμιση των φορτίων που οδηγεί λόγω αστάθειας στην μείωση τάσεων και ισχύων. Γενικά σε περιπτώσεις συστημάτων με φορτία που εμπεριέχουν σημαντικό παράγοντα αυτοεπαναφοράς δεν ενδείκνυται η χρησιμοποίηση της μεθόδου απενεργοποίησης του ΣΑΤΦ. Εξετάζεται έτσι εδώ η εφαρμογή της μεθόδου αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΦ.

Στην περίπτωση πολλών ζυγών φορτίου προκύπτει το πρόβλημα της επιλογής των μετασχηματιστών όπου θα εφαρμοστεί ο αντίστροφος έλεγχος των ΣΑΤΦ. Επομένως πρέπει να εξεταστούν δύο περιπτώσεις:

- α) εφαρμογή της αντιστροφής του ΣΑΤΦ στο μετασχηματιστή του φορτίου P_1
- β) εφαρμογή της αντιστροφής του ΣΑΤΦ στο μετασχηματιστή του φορτίου P_2

Επίσης θα εξετάσουμε πως θα λειτουργήσει ο αντίστροφος έλεγχος αν υπάρχει σύστημα ενεργοποίησης της αντίστροφης λογικής και στα δύο ΣΑΤΦ, για την ίδια τάση κατωφλιού $V_{L1} = V_{L2} = 0.85$ α.μ. Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο θα λειτουργεί αντίστροφα μόνο το ΣΑΤΦ στο οποίο η τάση πρωτεύοντος είναι χαμηλότερη και πέφτει πιο γρήγορα κάτω από την τάση κατωφλιού.

Άρα για κάθε μία εκ των τριών περιπτώσεων για τα αρχικά φορτία (πίνακας 4.3.2) θα αναλύσουμε την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου σε κάθε ΣΑΤΦ ξεχωριστά. Το κατώφλι της υψηλής τάσης για την αντίστροφη των ΣΑΤΦ ρυθμίζεται στην τιμή $V_L = 0.85$ α.μ. και η περαιτέρω διόρθωση ε αρχικά ορίζεται μηδενική.

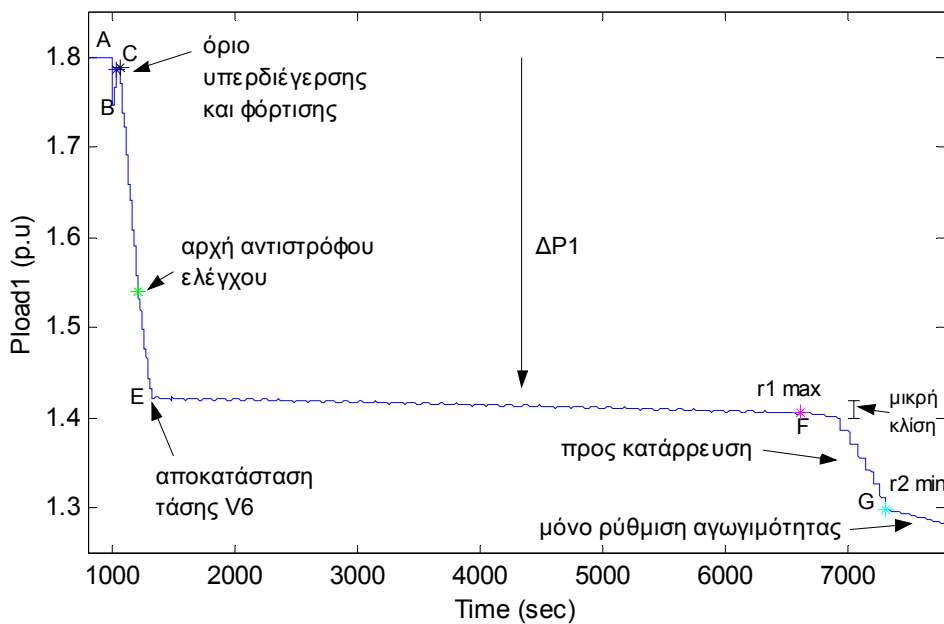
4.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 1: $P_{o1}=1.8$ α.μ., $P_{o2}=0.9$ α.μ.

Στην περίπτωση αυτή το απομακρυσμένο φορτίο P_1 είναι πολύ μεγαλύτερο, συγκεκριμένα διπλάσιο, από το πιο κοντινό φορτίο P_2 .

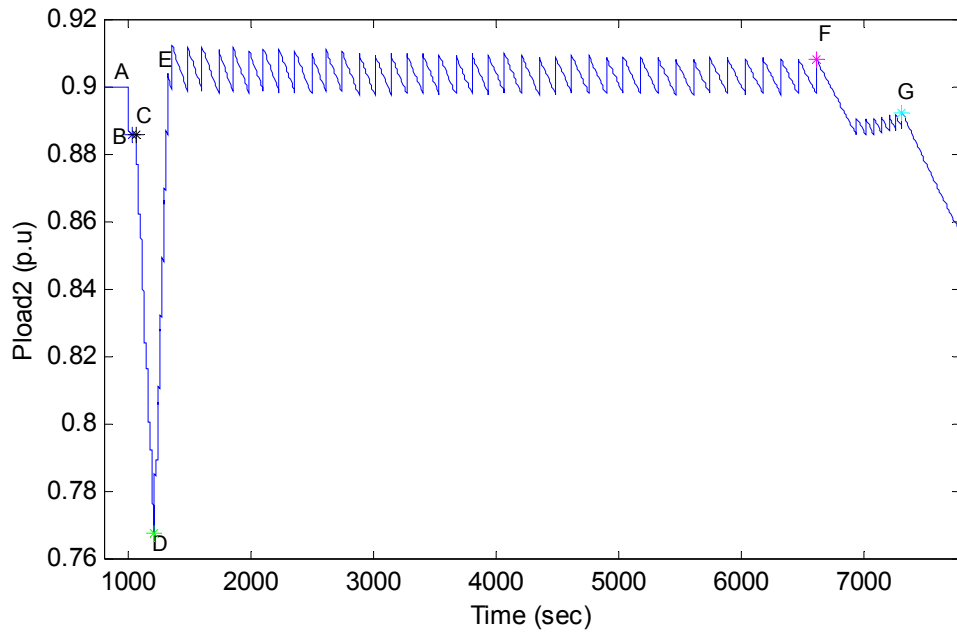
4.4.1 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P_1

Στα σχήματα 4.4.1-4.4.4 καταγράφονται οι μεταβολές της ισχύος στα δύο φορτία και των τάσεων V_3 και V_6 που προκύπτουν από την προσομοίωση αν αντιστραφεί ο έλεγχος στο ΣΑΤΦ του φορτίου P_1 .

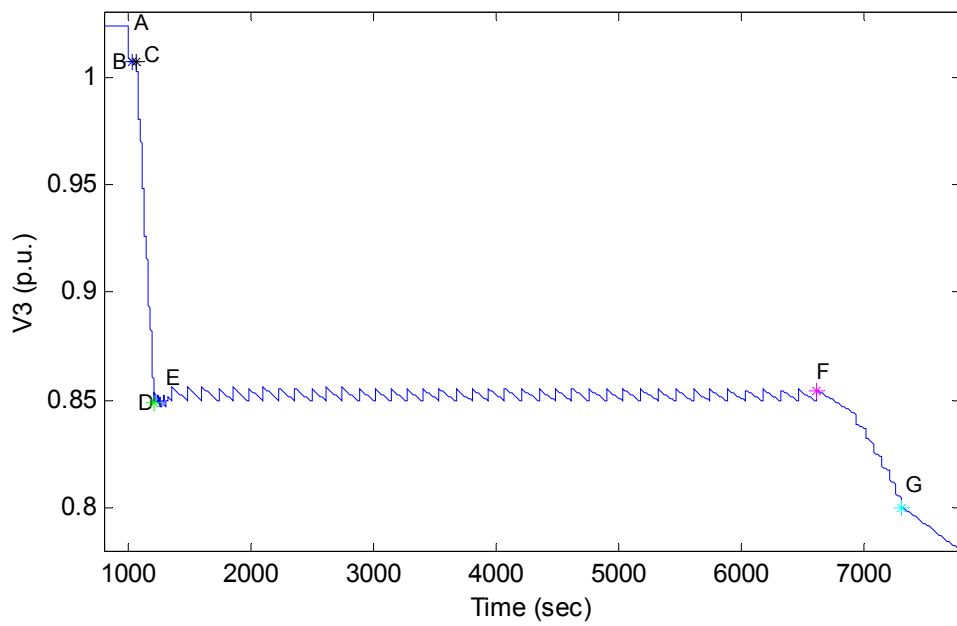
Παρατίθενται μόνο οι μεταβολές των τάσεων V_3 στο πρωτεύον του μετασχηματιστή στο φορτίο P_1 και V_6 στο δευτερεύον του μετασχηματιστή στο φορτίο P_2 , γιατί αυτές ελέγχουν τα ΣΑΤΦ όταν εφαρμοστεί η αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 1 του φορτίου P_1 . Εξάλλου η μεταβολή της ισχύος φορτίου P_1 είναι ενδεικτική για την μεταβολή της τάσεως V_4 , αφού $P_1=G_1*V_4^2$ και η αγωγιμότητα G_1 μεταβάλλεται πολύ αργά, ενώ η τάση πρωτεύοντος V_5 στο ΣΑΤΦ 2 έχει ίδια συμπεριφορά με την τάση V_3 .



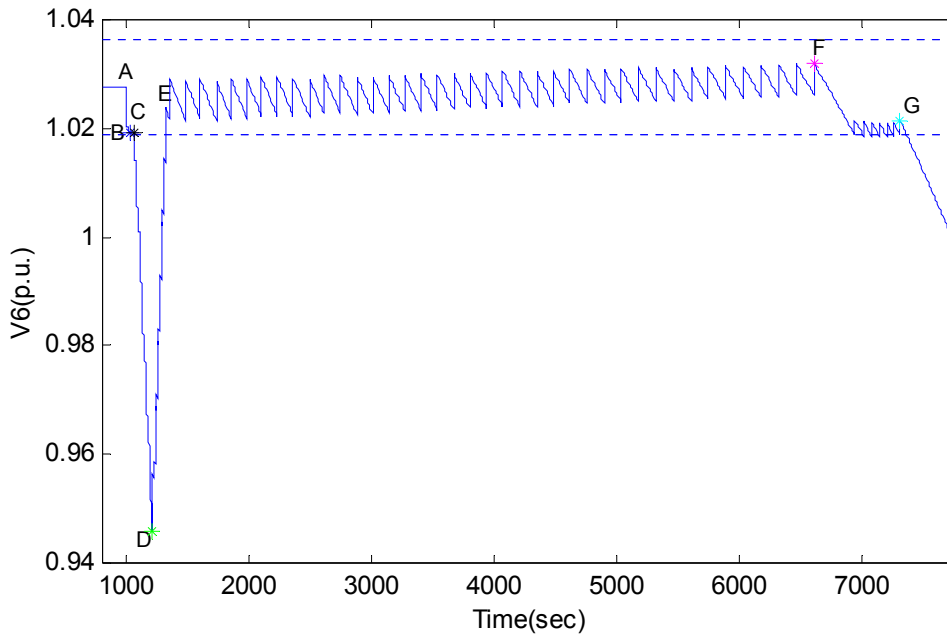
Σχήμα 4.4.1 Ισχύς φορτίου P_1 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.4.2 Ισχύς φορτίου P_2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.4.3 Τάση πρωτεύοντος στο φορτίο P_1 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.4.4 Τάση δευτερεύοντος στο φορτίο P₂ συναρτήσει του χρόνου

Όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 4.3.3, το σύστημα μετά τη διαταραχή τη χρονική στιγμή 1000 sec λειτουργεί στιγμιαία στο σημείο B. Μετά το σημείο αυτό η αυτορρύθμιση των φορτίων και τα ΣΑΤΦ αυξάνουν την ισχύ των φορτίων και τις τάσεις δευτερεύοντος μέχρι το όριο μέγιστης φόρτισης στο σημείο C (t=1020 sec). Συγκεκριμένα μόνο η τάση V₄ στο φορτίο P₁ βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης και το ΣΑΤΦ 1 προσπαθεί να την επαναφέρει, μειώνοντας όμως έτσι την τάση δικτύου V₃ και άρα την τάση V₆ στο φορτίο P₂. Αφού το σύστημα περιοριστεί από τον έλεγχο υπερδιέγερσης της γεννήτριας (t=1060 sec), οι κινήσεις των ΣΑΤΦ και η αυτορρύθμιση των φορτίων έχουν αρνητική επίδραση και μειώνουν συνεχώς τις τάσεις και την ισχύ των φορτίων.

Στο σημείο D (t=1210 sec) η τάση πρωτεύοντος V₃ στο μετασχηματιστή του φορτίου P₁ πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλίου V_L=0.85 α.μ. και ενεργοποιείται η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 1. Το ΣΑΤΦ 1 του φορτίου P₁ εκτελεί τώρα αντίστροφα βήματα και αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού r₁, προσπαθώντας να διατηρήσει την τάση πρωτεύοντος V₃ στο επίπεδο κατωφλίου. Ταυτόχρονα λειτουργεί το ΣΑΤΦ 2 του φορτίου P₂ που μειώνει το λόγο μετασχηματισμού r₂ και επιδρά αρνητικά στην τάση δικτύου. Ο συνδυασμός των λειτουργιών των δύο ΣΑΤΦ έχει ως αποτέλεσμα η τάση δικτύου V₃ να παραμένει περίπου σταθερή. Ωστόσο η ισχύς φορτίου P₁ μειώνεται. Η ισχύς P₁ αν αμελήσουμε την αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή δίνεται από τη σχέση:

$$P_1 \cong V_3^2 \cdot G_1 / r_1^2 \quad (4.4.1)$$

Επομένως επειδή το G₁ αργεί να προσαρμοστεί η ισχύς φορτίου μειώνεται με την αύξηση της σχέσης μετασχηματισμού r₁.

Η τάση V₆ στο φορτίο P₂ επανέρχεται γρήγορα εντός της νεκρής ζώνης στο σημείο E, αφού και τα δύο ΣΑΤΦ λειτουργούν ωφέλιμα για αυτήν. Από τη στιγμή αυτή (t=1310 sec) παύει να λειτουργεί το ΣΑΤΦ 2 και στο σύστημα επιδρούν μόνο ο μηχανισμός του ΣΑΤΦ 1 και η αυτορρύθμιση των φορτίων. Η τάση V₃ και το φορτίο P₁ καταφέρνουν να σταθεροποιηθούν σχεδόν, κυμαινόμενες λόγω της αυτορρύθμισης των φορτίων και των βημάτων του ΣΑΤΦ 1 κάθε φορά που η V₃ πέφτει κάτω από την τάση

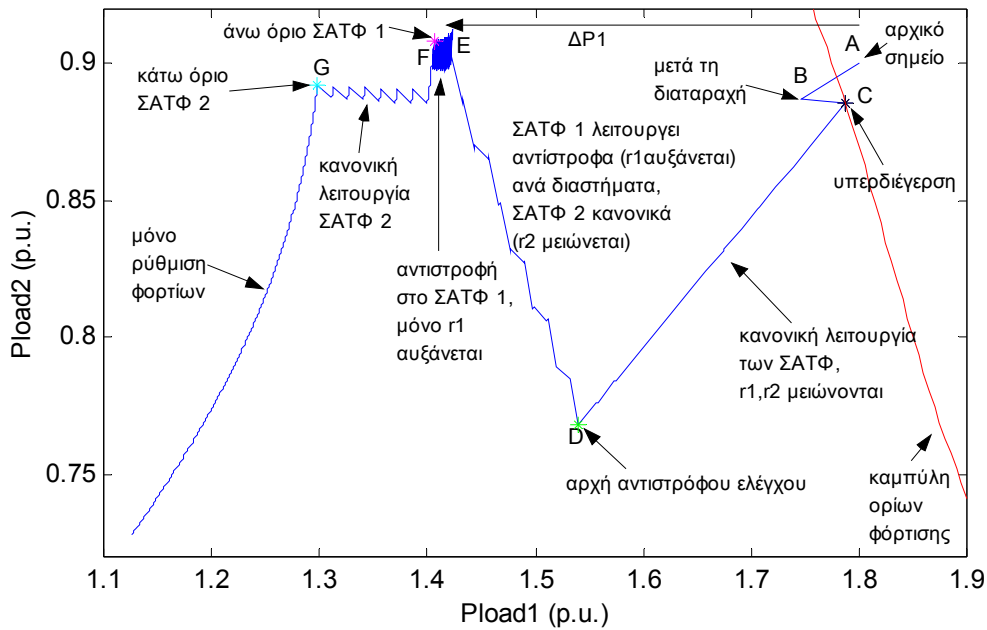
κατωφλίου (βλέπε παράγραφο 4.2.4) . Επίσης και η τάση V_6 και η ισχύς P_2 στο δεύτερο φορτίο ταλαντώνονται γύρω από μια περίπου σταθερή τιμή και μάλιστα λίγο μεγαλύτερη από την αρχική, πριν τη διαταραχή, λόγω ελάττωσης του φορτίου P_1 κατά $\Delta P_1 \approx 0.38$ α.μ Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μία μικρή αρνητική κλίση στις ισχύεις των φορτίων P_1 και P_2 , λόγω των αντιδράσεων σκεδάσεως των μετασχηματιστών και της μεταβολής του συντελεστή ισχύος στο φορτίο (βλέπε παράγραφο 4.2.5.) Η τάση δευτερεύοντος V_6 αντίθετα παρουσιάζει μικρή θετική κλίση, αν και η τάση δικτύου μένει σταθερή, η οποία οφείλεται στη μείωση της αγωγιμότητας G_2 λόγω της αυτοεπαναφοράς του φορτίου ($P_2 > P_{o2}$).

Αφού εξαντληθεί η δυνατότητα ρύθμισης του ΣΑΤΦ 1 στο σημείο F ($t=6620$ sec), όπου $r_1 = r_1^{\max}$, το σύστημα γίνεται ξανά ασταθές, διότι η αυτορρύθμιση των φορτίων οδηγεί την V_3 σε κατάρρευση. Η τάση δευτερεύοντος V_6 πέφτει κάτω από την νεκρή ζώνη, οπότε ενεργοποιείται το ΣΑΤΦ 2 και την επαναφέρει για μικρό χρονικό διάστημα. Ωστόσο αυτή η λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 επιταχύνει τη βύθιση της τάσης δικτύου V_3 . Το ΣΑΤΦ 2 τερματίζει σύντομα τη λειτουργία του στο σημείο G ($t=7320$ sec), φτάνοντας στο κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού, και παραμένει μόνο η αυτοεπαναφορά των φορτίων να οδηγεί την κατάρρευση.

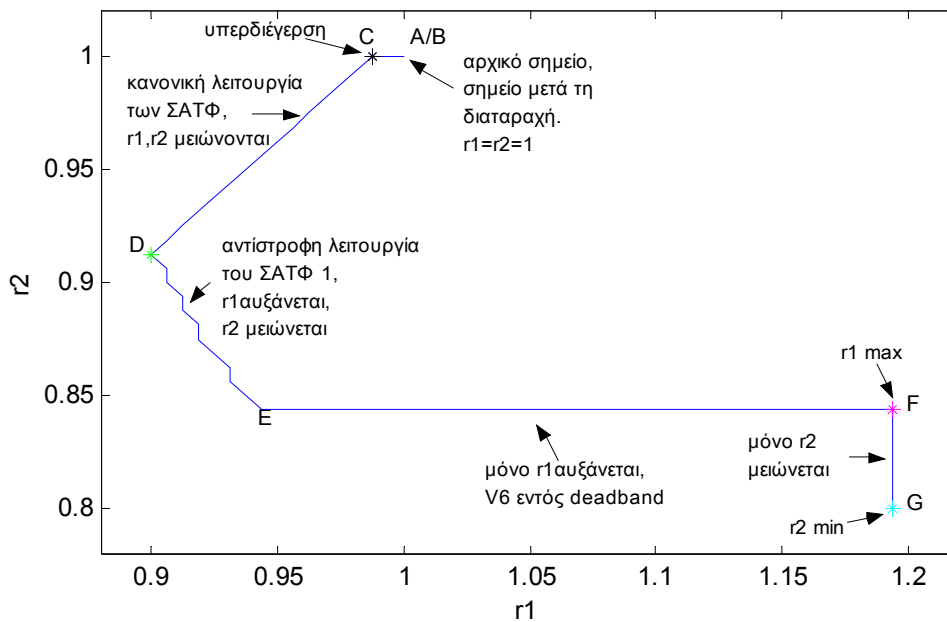
Παρατηρούμε δηλαδή ότι η αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ στο φορτίο P_1 καταφέρνει να διατηρήσει το φορτίο P_1 και τις τάσεις δικτύου V_3 και V_5 σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο για αρκετό χρόνο. Η τάση δικτύου V_3 κρατείται στην τιμή 0.85 α.μ. για περίπου 5800 sec μετά τη διαταραχή. Επιπλέον στηρίζει πλήρως το φορτίο P_2 , αφού το ανεβάζει τουλάχιστον στην αρχική του τιμή, όπως και την τάση στο φορτίο αυτό, V_6 . Δηλαδή η έμμεση αποκοπή φορτίου, που πραγματοποιείται με την αντιστροφή, γίνεται αποκλειστικά στο φορτίο που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής στον οποίο αντιστρέφεται το ΣΑΤΦ.

Τελικά όμως η κατάρρευση δε θα αποφευχθεί, αφού η αντιστροφή των ΣΑΤΦ δεν επιλύει το πρόβλημα της απουσίας μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας και αποτελεί μόνο ένα προσωρινό μέτρο αντιμετώπισης που θα δώσει τον απαραίτητο χρόνο για την εφαρμογή άλλων μέτρων ανάγκης.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του συστήματος και των δύο ΣΑΤΦ, στα σχήματα 4.4.5, 4.4.6 απεικονίζονται οι μεταβολές των ισχύων των φορτίων και των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ σε αλληλεξάρτηση μεταξύ τους. Στο διάγραμμα 4.4.5 που απεικονίζει τη εξέλιξη του συστήματος στο χώρο των ισχύων φορτίου σχεδιάστηκε και η προσεγγιστική καμπύλη ορίων φόρτισης, που αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.3.3.



Σχήμα 4.4.5 Μεταβολή των ισχύων φορτίου P_1 και P_2

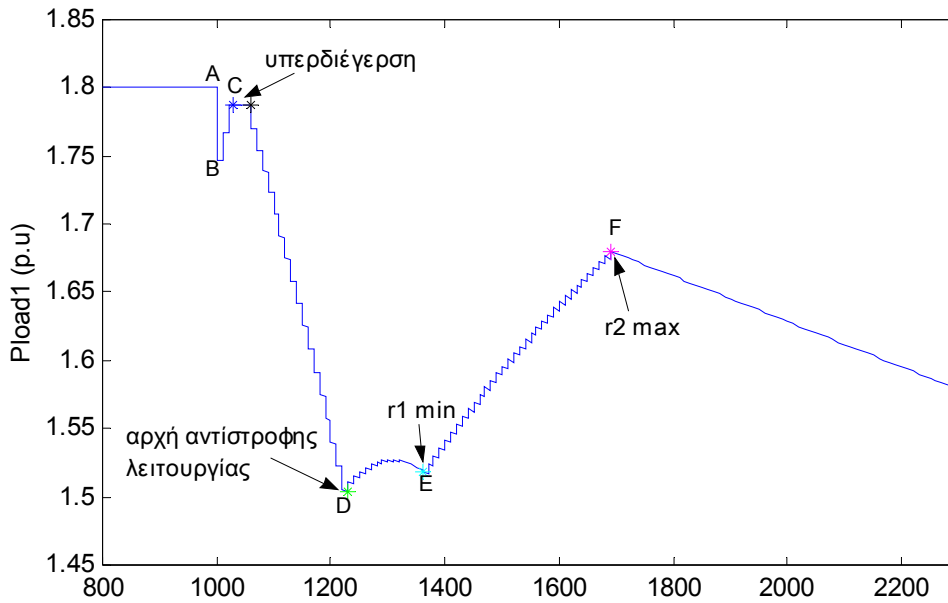


Σχήμα 4.4.6 Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ

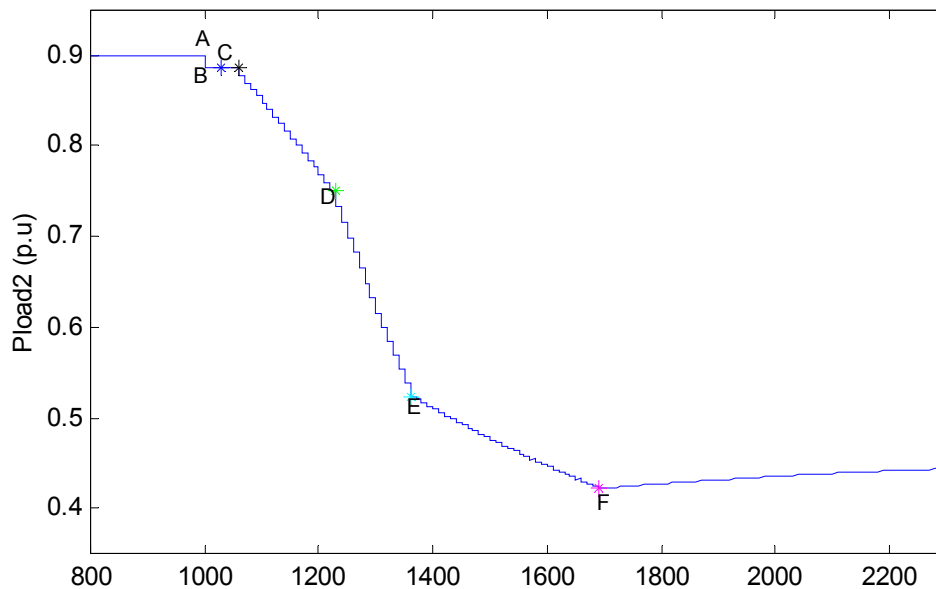
Στο σχήμα 4.4.5 φαίνεται ότι κατά την κύρια περίοδο της αντιστροφής λειτουργίας, μεταξύ των σημείων E και F, όπου η τάση δικτύου κυμαίνεται γύρω από την τιμή κατωφλιού, οι ισχύεις των φορτίων παραμένουν σχεδόν σταθερές, με πολύ μικρή πτωτική τάση. Όλο αυτό το χρονικό διάστημα απεικονίζεται στο διάγραμμα σε μία πολύ μικρή συγκεντρωμένη περιοχή, που περιέχει τις διακυμάνσεις των ισχύων λόγω της αυτορρύθμισης των φορτίων και των ακόλουθων λειτουργιών του ΣΑΤΦ 1. Η μεταβολή της ισχύος των φορτίων σε αυτό το διάστημα είναι ελάχιστη σε σχέση με τις μεταβολές σε κάθε άλλη περιοχή λειτουργίας.

4.4.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2

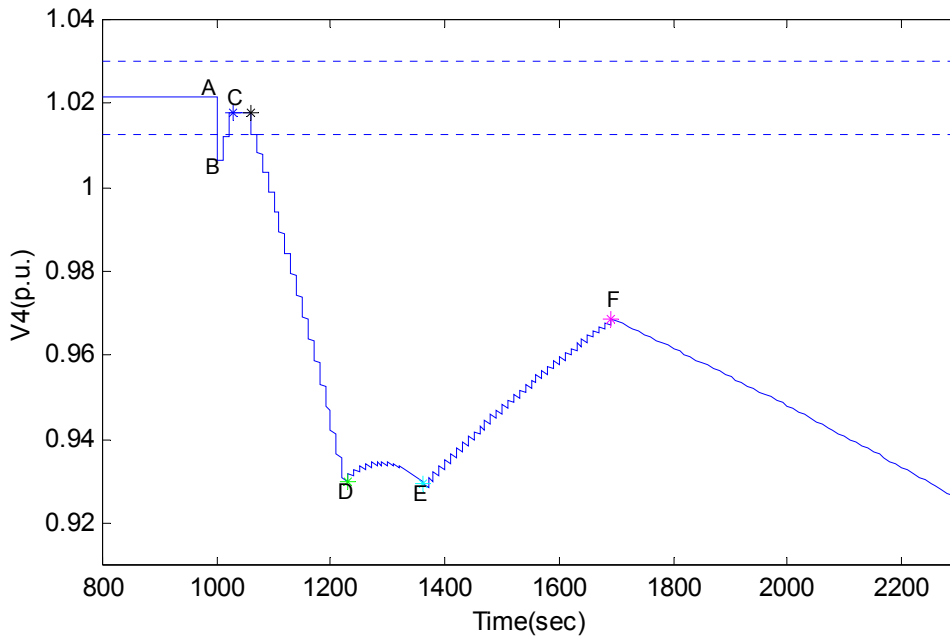
Η συμπεριφορά του συστήματος, αν αντιστραφεί ο έλεγχος του ΣΑΤΦ στο φορτίο P₂, φαίνεται στα σχήματα 4.4.7-4.4.10 όπου απεικονίζονται οι μεταβολές της ισχύος των φορτίων P₁ και P₂ και των τάσεων δευτερεύοντος στο φορτίο P₁, V₄, και πρωτεύοντος στο φορτίο P₂, V₅.



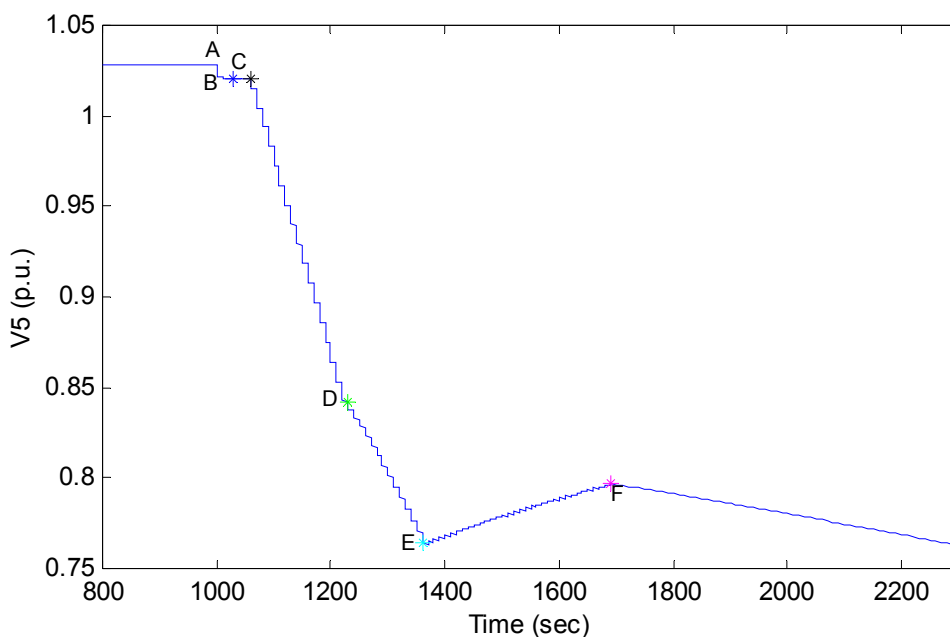
Σχήμα 4.4.7 Προσομοίωση της ισχύος φορτίου P₁



Σχήμα 4.4.8 Ισχύς φορτίου P₂



Σχήμα 4.4.9 Τάση δευτερεύοντος V_4 του φορτίου P_1



Σχήμα 4.4.10 Τάση πρωτεύοντος V_5 στο φορτίο P_2

Η συμπεριφορά του συστήματος πριν η τάση δικτύου V_5 πέσει κάτω από το κατώφλι $V_L=0.85$ α.μ. είναι όπως έχει αναφερθεί στις παραγράφους 4.3.2, 4.4.1. Εδώ η αντίστροφη λειτουργία αρχίζει λίγο πιο αργά, γιατί η τάση δικτύου V_5 είναι λίγο μεγαλύτερη από την V_3 και περνάει λίγο αργότερα το κατώφλι. Από το σημείο D ($t=1230$ sec) το ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P_2 λειτουργεί αντίστροφα και αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού r_2 , προσπαθώντας να ανεβάσει την τάση δικτύου V_5 στην τιμή κατωφλίου. Αντίθετα το ΣΑΤΦ 1 που λειτουργεί κανονικά συνεχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού r_1 , επηρεάζοντας αρνητικά την τάση δικτύου V_5 . Επειδή το φορτίο P_1 είναι αρκετά πιο μεγάλο, το ΣΑΤΦ 1 έχει ισχυρότερη επίδραση στο σύστημα και

εμποδίζει την επιθυμητή αύξηση της τάσης δικτύου. Έτσι και η τάση V_6 και η ισχύς P_2 συνεχίζουν να μειώνονται, με γρηγορότερο μάλιστα ρυθμό, ενώ στην τάση V_4 και την ισχύ στο άλλο φορτίο P_1 παρατηρείται μία ελάχιστη αύξηση, λόγω της μείωσης του r_1 (σχέση 4.4.1).

Το ΣΑΤΦ 1 εξαντλεί αρκετά γρήγορα το περιθώριο ρύθμισής του στο κάτω όριο, στο σημείο E ($t=1360$ sec), και μόνο από εκείνο το σημείο η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 καταφέρνει να αυξήσει την τάση δικτύου V_5 , ενώ αυξάνει και την ισχύ P_1 και την τάση δευτερεύοντος V_4 στο απομακρυσμένο φορτίο. Η ισχύς του φορτίου P_2 συνεχίζει να μειώνεται με μικρότερο ρυθμό, λόγω της αύξησης της σχέσης μετασχηματισμού r_2 , όπως προκύπτει από τη σχέση:

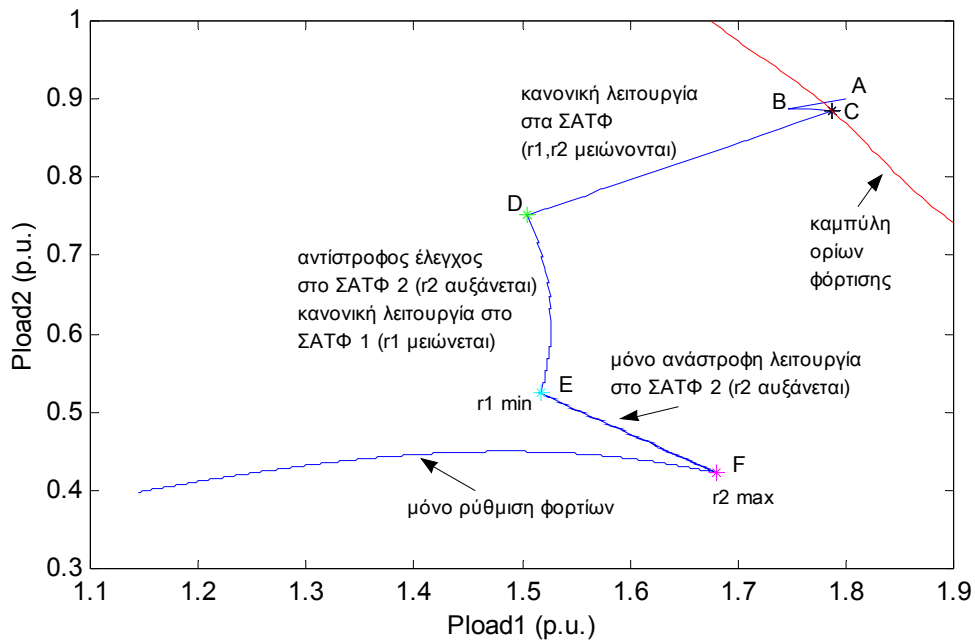
$$P_2 \cong V_5^2 \cdot G_2 / r_2^2 \quad (4.4.2)$$

Ωστόσο και το ΣΑΤΦ του φορτίου P_2 τερματίζει τη λειτουργία του σε μικρό χρονικό διάστημα, φτάνοντας το άνω όριο του λόγου μετασχηματισμού στο σημείο F ($t=1690$ sec), χωρίς να έχει επαναφέρει την τάση δικτύου στην τιμή κατωφλίου ούτε κανένα από τα φορτία αρκετά κοντά στην αρχική τους ζήτηση.

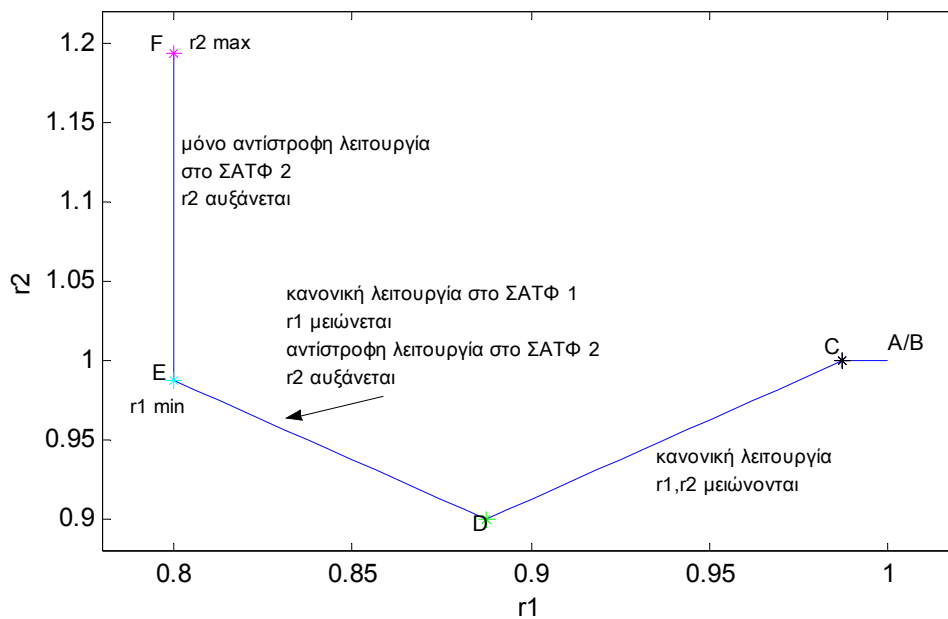
Στην περίπτωση που εξετάζεται, η εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 2 του κοντινού φορτίου P_2 δεν είναι επιτυχής, αφού δεν καταφέρνει να κρατήσει την τάση δικτύου η κάποιο από τα φορτία σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Αυτό συμβαίνει επειδή το άλλο φορτίο P_1 είναι πολύ μεγάλο και η λειτουργία του ΣΑΤΦ 1 είναι η κυρίαρχη και επηρεάζει πολύ όλο το σύστημα. Και στην παράγραφο 4.4.1 η λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 επιδρά αρνητικά στην τάση δικτύου, αλλά εδώ η λειτουργία του μη αντεστραμμένου ΣΑΤΦ 1 υπερισχύει και εμποδίζει τη σταθεροποίηση της τάσης δικτύου στην τιμή κατωφλίου. Έτσι μόνο μετά τον τερματισμό του αρχίζει να έχει κάποιο αποτέλεσμα η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 2, όταν όμως είναι πολύ αργά γιατί το ΣΑΤΦ έχει πλησιάσει αρκετά το άνω όριο του περιθωρίου ρύθμισής του. Έτσι η κατάρρευση δεν μπορεί να αποφευχθεί παρά μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, στο οποίο τάσεις και ισχείς φορτίων στο σύστημα είναι αρκετά χαμηλές. Η τάση δικτύου V_5 πέφτει κάτω από την τιμή 0.85 α.μ. σε χρόνο 220 sec μετά τη διαταραχή και δεν φτάνει ξανά στην τιμή κατωφλίου.

Σε επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η ανάπτυξη κάποιου κανόνα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποφυγή τέτοιων αναποτελεσματικών εφαρμογών του αντιστρόφου ελέγχου στα ΣΑΤΦ. Η επιλογή των ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφούν σε ένα σύστημα είναι απαραίτητη, για να διασφαλισθεί ότι με τη μέθοδο αυτή θα αντιμετωπιστεί η αστάθεια για χρονικό διάστημα αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί κάποιο ριζικότερο μέτρο.

Στα σχήματα 4.4.11, 4.4.12 δίνονται οι μεταβολές της ισχύος των φορτίων και των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ, που περιγράφουν καλύτερα τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 4.4.11 Σχετική μεταβολή των ισχύων φορτίου P_1 και P_2



Σχήμα 4.4.12 Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού στα ΣΑΤΦ

Στο σχήμα 4.4.11 δεν υπάρχει πυκνή περιοχή με σχεδόν σταθερές ισχύεις που να συγκεντρώνει μεγάλο χρονικό διάστημα λειτουργίας, όπως στην περίπτωση A, επειδή ο αντίστροφος έλεγχος στο ΣΑΤΦ 2 δεν καταφέρνει να σταθεροποιήσει την τάση δικτύου γύρω από την τιμή κατωφλίου, λόγω νωρίτερης εξάντλησης του ΣΑΤΦ.

4.4.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού

Σε αυτήν την περίπτωση όπως έχουμε διαπιστώσει στις παραγράφους 4.4.1 και 4.4.2 η τάση πρωτεύοντος V_3 στο ΣΑΤΦ 1 πέφτει πιο γρήγορα κάτω από την τάση κατωφλιού σε σχέση με την τάση πρωτεύοντος V_5 στο ΣΑΤΦ 2. Έτσι εάν θεωρηθεί μόνο το επίπεδο τάσης ως κριτήριο για την εφαρμογή της αντιστροφής, θα ενεργοποιηθεί ο αντίστροφος έλεγχος μόνο στο ΣΑΤΦ 1 όπου η τάση δικτύου είναι πιο επιβαρημένη. Βέβαια όπως προκύπτει από τις παραγράφους 4.4.1 και 4.4.2 η αντιστροφή του ΣΑΤΦ αυτού είναι και η αποτελεσματικότερη.

Όσο το ΣΑΤΦ 1 λειτουργεί με αντίστροφη λογική και κρατάει την τάση πρωτεύοντος V_3 πάνω από το επίπεδο κατωφλιού 0.85 α.μ., η λίγο μεγαλύτερη τάση V_5 δεν πέφτει κάτω από την τιμή αυτή. Επομένως η αντιστροφή ελέγχου μπορεί να ενεργοποιηθεί στο ΣΑΤΦ 2 μόνο μετά την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης του ΣΑΤΦ 1 στο r_1^{\max} , αν δεν υπάρχει κάποιος επιπλέον έλεγχος που να εμποδίζει την ενεργοποίηση του δεύτερου ΣΑΤΦ μετά την ενεργοποίηση της αντιστροφής στο πρώτο.

Επομένως η προσομοίωση σε αυτήν την περίπτωση θα έχει την ίδια εξέλιξη όπως στην παράγραφο 4.4.1, τουλάχιστον μέχρι το σημείο όπου το ΣΑΤΦ 1 τερματίζει τη μεταβολή της σχέσης μετασχηματισμού του στο άνω όριο r_1^{\max} .

4.4.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και της απόκρισης του συστήματος χωρίς λήψη μέτρων εκτάκτου ανάγκης

Από τα σχήματα 4.4.1-4.4.12 φαίνεται καθαρά ότι πρέπει να επιλεγεί η αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ στο μεγάλο και απομακρυσμένο φορτίο P_1 , αφού αυτή διατηρεί τα φορτία και την τάση δικτύου σε ικανοποιητικό επίπεδο για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Μάλιστα η αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 1 αποκόπτοντας κάποιο τμήμα του φορτίου ΔP_1 καταφέρνει να στηρίξει πλήρως το υπόλοιπο σύστημα και να τροφοδοτεί όλη τη ζητούμενη ισχύ στο φορτίο P_2 .

Η αντιστροφή του ελέγχου στο ΣΑΤΦ 2 αντίθετα καταφέρνει μόνο να καθυστερήσει την κατάρρευση για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, ενώ η τάση δικτύου V_3 κρατείται σε πολύ χαμηλή τιμή, κάτω από την τιμή κατωφλιού $V_L=0.85$ α.μ.

Στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας των ΣΑΤΦ, χωρίς αντιστροφή ελέγχου, το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια τάσης και τα φορτία και οι τάσεις βυθίζονται συνεχώς, όπως φαίνεται στην παράγραφο 4.3.3.

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν καταγραφεί με περισσότερες λεπτομέρειες στον πίνακα 4.4.1.

Πίνακας 4.4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις για την 1^η εφαρμογή φόρτισης

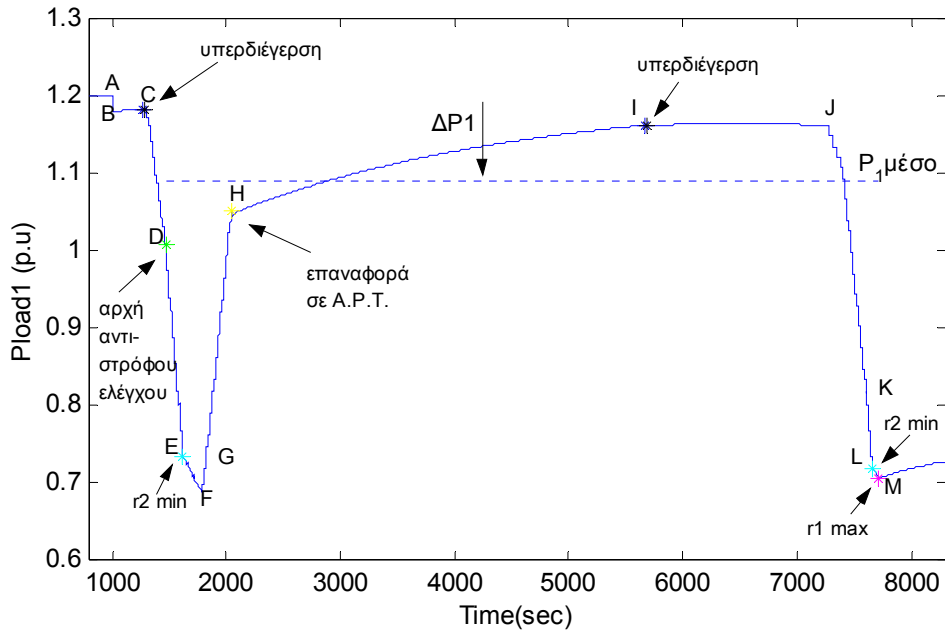
| Αντιστροφή ΣΑΤΦ | Αποτελέσματα της προσομοίωσης | Μη εξυπηρετηθέν φορτίο | Συμπέρασμα |
|------------------------|--|---|--|
| ΣΑΤΦ 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Τάση δικτύου $V_3 \cong 0.85$ α.μ. για περίπου 5800 sec μετά τη διαταραχή - $P_1 > 1.4$ α.μ. για περίπου 6000 sec - P_2 στην αρχική ζήτηση P_{o2} | <ul style="list-style-type: none"> $\Delta P_1 = 0.3845$ α.μ. $\Delta P_2 = -0.0030$ α.μ. | Επιτυχής. Προφυλάσσει το σύστημα από κατάρρευση για αρκετά μεγάλο διάστημα |
| ΣΑΤΦ 2 | <ul style="list-style-type: none"> - Τάση δικτύου V_5 δεν σταθεροποιείται στο 0.85 α.μ., ούτε ανυψώνεται ξανά στην τιμή αυτή - $P_1 > 1.4$ α.μ. για περίπου 2300 sec - P_2 βυθίζεται με γρήγορο ρυθμό | Δεν έχει νόημα αφού δεν κρατάει σταθερές τάσεις και φορτία | Αποτυχία. Δεν καταφέρνει να ανυψώσει καν την τάση δικτύου στην τιμή κατωφλιού |
| ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ | <ul style="list-style-type: none"> Τάσεις και φορτία βυθίζονται μετά την υπερδιέγερση - Τάση δικτύου V_3 πέφτει κάτω από 0.8 α.μ. μέσα σε 250 sec | | Κατάρρευση. |

4.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 2: $P_{o1}=1.2$ α.μ., $P_{o2}=1.55$ α.μ.

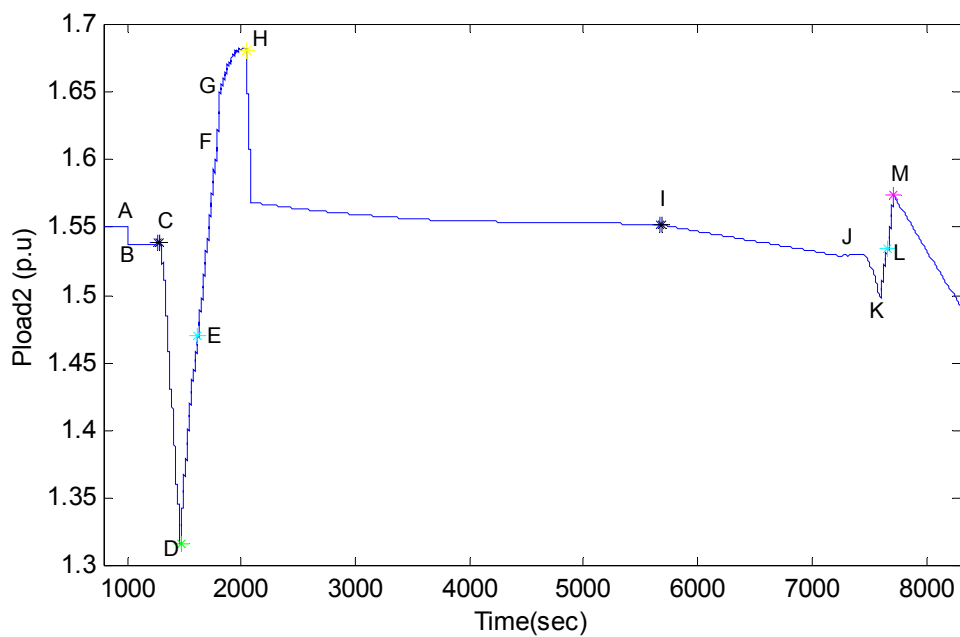
Στην περίπτωση αυτή το απομακρυσμένο φορτίο P_1 είναι λίγο μικρότερο από το κοντινό φορτίο P_2 .

4.5.1 Αντίστροφη ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P_1

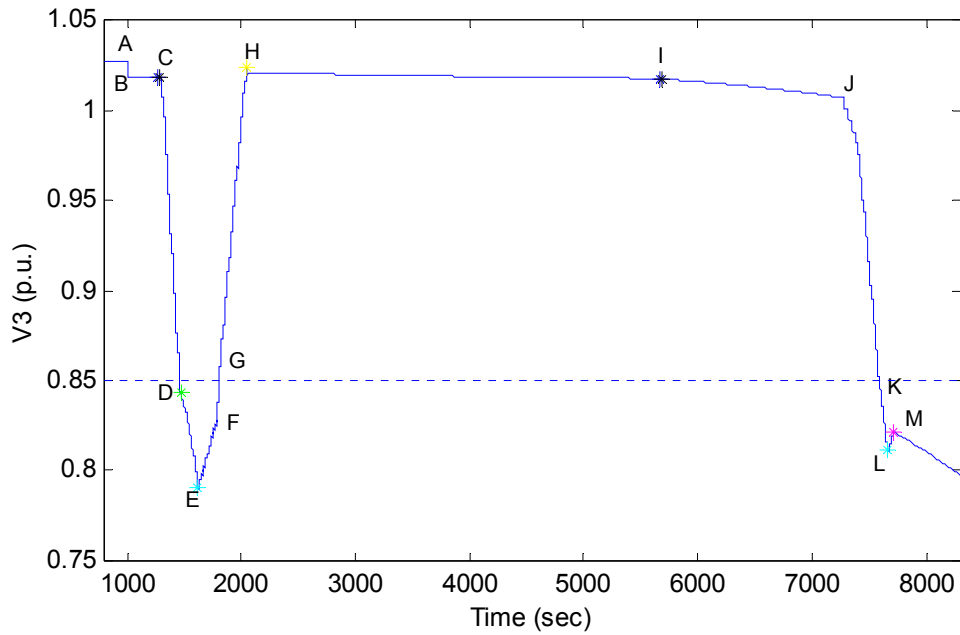
Στα σχήματα 4.5.1-4.5.4 απεικονίζονται οι μεταβολές της ισχύος στα δύο φορτία και των τάσεων V_3 και V_6 που προκύπτουν από την προσομοίωση αν εφαρμοστεί η αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P_1 .



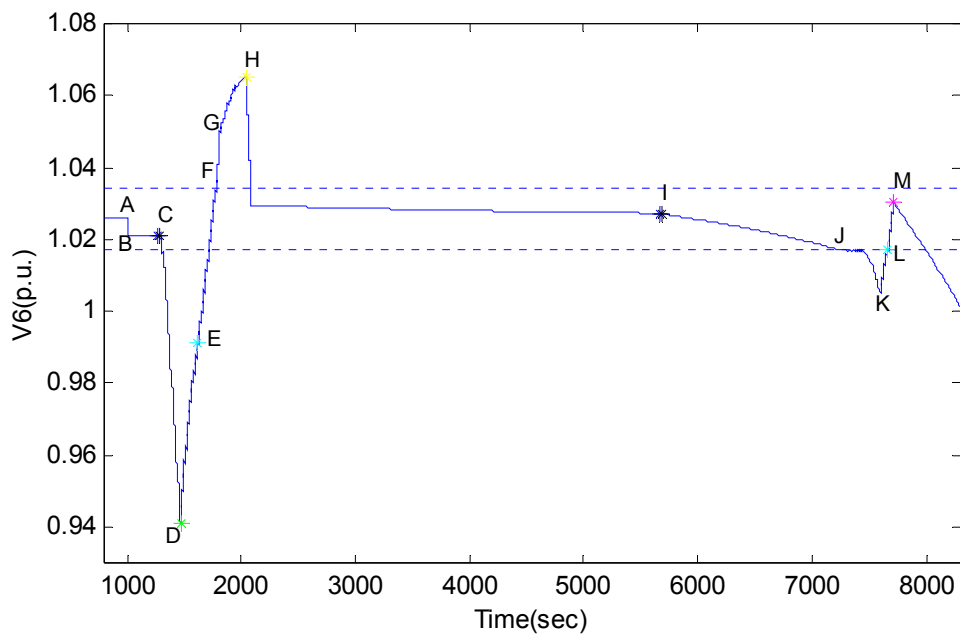
Σχήμα 4.5.1 Ισχύς φορτίου P_1 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.5.2 Ισχύς φορτίου P_2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.5.3 Τάση πρωτεύοντος V_3 στο φορτίο P_1



Σχήμα 4.5.4 Τάση δευτερεύοντος V_6 στο φορτίο P_2

Μετά την εμφάνιση και απομόνωση της διαταραχής στα 1000 sec, το σύστημα μεταπίπτει ακαριαία από το αρχικό σημείο A στο σημείο B που προκύπτει από τη επίλυση των νέων εξισώσεων του συστήματος για σταθερές τιμές αγωγιμότητας στα φορτία. Στη συνέχεια επιδρά μόνο η αυτορρύθμιση των φορτίων, αυξάνοντας την αγωγιμότητα, επειδή οι τάσεις δευτερεύοντος στα ΣΑΤΦ είναι εντός της νεκρής ζώνης, και προκαλείται υπερδιέγερση της γεννήτριας, στο σημείο C ($t=1260$ sec). Μετά από χρονική καθυστέρηση 40 sec, η διέγερση της γεννήτριας περιορίζεται στην οριακή τιμή $E_{q\lim}$, το σύστημα γίνεται ασταθές και αρχίζει η κατάρρευση των τάσεων και φορτίων κάτω από την επίδραση της αυτοεπιαναφοράς των φορτίων και των μηχανισμών ΣΑΤΦ.

Όταν η τάση πρωτεύοντος V_3 του ΣΑΤΦ 1 πέσει κάτω από την τιμή κατωφλιού 0.85 α.μ., στο σημείο D ($t=1470$ sec), ενεργοποιείται η αντιστροφή του ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1, που έχει στόχο τη διατήρηση της τάσης δικτύου V_3 στην τιμή κατωφλίου. Ωστόσο λόγω της ισχυρής επίδρασης του άλλου ΣΑΤΦ στο φορτίο P_2 , που λειτουργεί κανονικά, η τάση πρωτεύοντος V_3 συνεχίζει να μειώνεται. Αυτό συμβαίνει επειδή το ΣΑΤΦ 2 μειώνει το λόγο μετασχηματισμού r_2 για να αυξήσει την τάση V_6 , μειώνοντας έτσι την τάση V_5 του δικτύου, άρα και την V_3 . Όμως η τάση και η ισχύς στο φορτίο P_2 αυξάνονται, αφού σ' αυτές και τα δύο ΣΑΤΦ επιδρούν θετικά.

Οι τάσεις δικτύου V_3 και V_5 ανακάμπτουν με μικρά βήματα μόνο μετά τον τερματισμό του ΣΑΤΦ 2 στο κάτω όριο του στο σημείο E ($t=1620$ sec) και την προσωρινή διακοπή της λειτουργίας του. Η ισχύς φορτίου P_1 συνεχίζει να μειώνεται, αν και με μικρότερο ρυθμό, επειδή αυξάνεται ο λόγος μετασχηματισμού r_1 και η μεταβολή του G_1 είναι πολύ αργή για να μπορεί να αντισταθμίσει την αύξηση του r_1 (βλέπε σχέση 4.4.1). Η τάση δευτερεύοντος V_6 και η ισχύς P_2 ακολουθούν την άνοδο της τάσης δικτύου, αφού πλέον ο λόγος μετασχηματισμού r_2 παραμένει σταθερός, και όχι μόνο επανέρχονται στη νεκρή ζώνη, αλλά την ξεπερνάνε.

Στο σημείο F ($t=1780$ sec) η τάση V_6 υπερβαίνει την νεκρή ζώνη και το ΣΑΤΦ 2 αρχίζει να αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού r_2 , ενώ ήδη και η αυτορρύθμιση του φορτίου P_2 λειτουργεί αντίθετα από πριν, μειώνοντας την αγωγιμότητα G_2 , αφού το φορτίο έχει υπερβεί την αρχική ζήτηση P_{o2} . Οι παραπάνω λειτουργίες αυξάνουν τις τάσεις δικτύου V_3 και V_5 αλλά και την τάση V_4 και ισχύ P_1 . Το συνολικό αποτέλεσμα της επίδρασης και των δύο ΣΑΤΦ είναι αύξηση όλων των τάσεων και ισχύων φορτίου του συστήματος, ακόμα και της τάσης δευτερεύοντος V_6 , την οποία προσπαθεί να μειώσει το ΣΑΤΦ 2.

Ακόμα και αφού η τάση V_3 ξεπεράσει την τιμή κατωφλιού στο σημείο G ($t=1810$ sec), και σταματήσει η λειτουργία του ΣΑΤΦ 1, οι τάσεις και ισχύς συνεχίζουν να αυξάνονται υπό την επίδραση μόνο του ΣΑΤΦ 2, που είναι ιδιαίτερα ισχυρή λόγω του μεγάλου του φορτίου. Η τάση δευτερεύοντος V_6 εμφανίζει υπερύψωση, αλλά το ΣΑΤΦ 2 που ελέγχει την τάση αυτή δεν καταφέρνει να τη μειώσει: αυξάνοντας το λόγο μετασχηματισμού r_2 αυξάνει αρκετά την τάση δικτύου V_5 , ώστε να αναιρείται η μείωση της τάσης δευτερεύοντος V_6 και αντίθετα να παρουσιάζει μικρή άνοδο. Βέβαια, ο ρυθμός αύξησης της τάσης V_6 μειώνεται, λόγω του μεγαλύτερου ρυθμού μείωσης της αγωγιμότητας G_2 , όσο απομακρύνεται το φορτίο από την αρχική ζήτηση. Οι τάσεις δικτύου και άρα και η V_1 αυξάνονται τόσο, ώστε η γεννήτρια επανέρχεται στην κανονική λειτουργία αυτόματης ρύθμισης τάσης (APT).

Στο σημείο H ($t=2050$ sec) η διέγερση της γεννήτριας αρχίζει να δίνεται πάλι από τη σχέση APT, αφού $K_E \cdot (V_{1ref} - V_1) < E_{qlim}$ και το σύστημα λειτουργεί σε σημεία της χαρακτηριστικής αυτόματης ρύθμισης τάσης. Τώρα η λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 καταφέρνει να μειώσει την τάση V_6 και ισχύ P_2 του κοντινού φορτίου, προκαλώντας πολύ μικρή αύξηση στις υπόλοιπες τάσεις και στην ισχύ P_1 .

Όταν η τάση V_6 μπει εντός της νεκρής ζώνης ($t=2090$ sec) παύει προσωρινά κάθε λειτουργία των ΣΑΤΦ και το σύστημα αλλάζει σημείο λειτουργίας μόνο υπό την πολύ αργή επίδραση της αυτορρύθμισης των φορτίων. Η αγωγιμότητα G_1 αυξάνεται αφού $P_1 < P_{o1}$. Η G_2 αρχικά μειώνεται, επειδή $P_2 < P_{o2}$, και σταθεροποιείται όταν η ισχύς φορτίου P_2 μπει στο περιθώριο ανοχής της αρχικής ζήτησης P_{o2} . Αποτέλεσμα των μεταβολών αυτών είναι η αύξηση της ισχύος P_1 και μείωση όλων των άλλων μεγεθών, που πραγματοποιούνται όμως με πολύ αργό ρυθμό. Στο σημείο G η γεννήτρια περνάει και πάλι σε λειτουργία υπερδιέγερσης ($t=5690$ sec), ενώ η αυτορρύθμιση των φορτίων συνεχίζει να λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο. Όταν η ισχύς P_2 πέσει κάτω από τη νεκρή

ζώνη του φορτίου P_{o2} , πλέον και οι δύο αγωγιμότητες G_1 και G_2 αυξάνονται, προκαλώντας αργή μείωση όλων των μεγεθών.

Το ΣΑΤΦ 2 ενεργοποιείται πάλι στο σημείο J ($t=7270$ sec) λόγω πτώσης της τάσης δευτερεύοντος V_6 κάτω από τη νεκρή ζώνη. Η μείωση του λόγου μετασχηματισμού t_2 για μικρό διάστημα επαναφέρει κάποιες φορές την τάση V_6 μέσα στη νεκρή ζώνη, ενώ η αργή αυτορρύθμιση των φορτίων την μειώνει πάλι, αλλά τελικά η τάση V_6 αρχίζει να καταρρέει. Οι κινήσεις αυτές του ΣΑΤΦ 2 μειώνει τις τάσεις δικτύου και την τάση V_4 και ισχύ P_1 του μακρινού φορτίου.

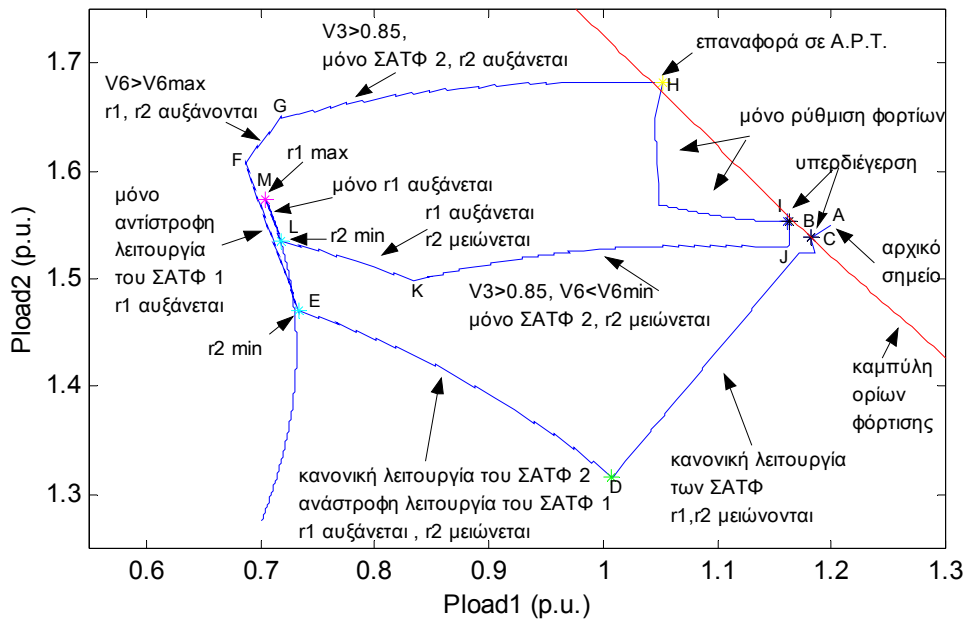
Μετά την πτώση της τάσης δικτύου V_3 κάτω από το κατώφλι 0.85 α.μ. στο σημείο K ($t=7600$ sec) αρχίζει ξανά να εκτελεί βήματα και το ΣΑΤΦ 1 σε αντιστροφή, χωρίς να καταφέρνει ωστόσο να αυξήσει την τάση δικτύου λόγω της αλληλεπίδρασης με το ΣΑΤΦ 2. Αύξηση επιτυγχάνεται μόνο στην τάση V_6 και ισχύ του φορτίου P_2 , για τα οποία και τα δύο ΣΑΤΦ λειτουργούν θετικά. Η αύξηση της τάσης δικτύου γίνεται δυνατή μόνο μετά την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης του ΣΑΤΦ 2 στο κάτω όριο του (σημείο L για $t=7660$ sec). Ωστόσο σε σύντομο χρόνο ακολουθεί και η εξάντληση του περιθωρίου του ΣΑΤΦ 1 στο άνω όριο (σημείο M για $t=7710$ sec), οπότε το σύστημα αφήνεται να καταρρεύσει υπό την επίδραση μόνο της αυτορρύθμισης φορτίων.

Γενικά στην εξεταζόμενη περίπτωση το σύστημα διασφαλίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα από την κατάρρευση, συγκεκριμένα η τάση δικτύου V_3 μένει πάνω από την τιμή 0.85 α.μ. για περίπου 6700 sec. Μάλιστα στο μεγαλύτερο τμήμα του χρόνου αυτού οι ισχείς φορτίου διατηρούνται σε πολύ υψηλές τιμές, η ισχύς P_1 σε τιμή ελάχιστα μικρότερη της αρχικής ζήτησης ($\Delta P_1=0.1098$) και η P_2 σε τιμές ακόμα και μεγαλύτερες από την αρχική ζήτηση. Παράλληλα και οι τάσεις υψώνονται σε πολύ ικανοποιητικές τιμές, κοντά στις αρχικές πριν τη διαταραχή. Η έμμεση αποκοπή φορτίου γίνεται και εδώ σχεδόν αποκλειστικά στο φορτίο P_1 όπου εφαρμόζεται η ανάστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ.

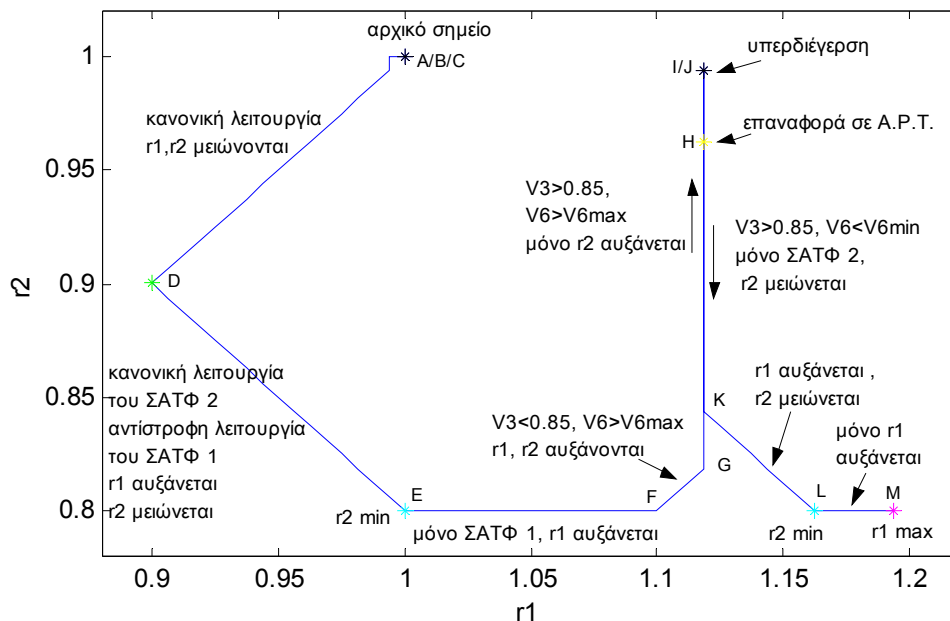
Ωστόσο σε αυτήν την ιδιαίζουσα περίπτωση παρατηρείται έντονη υπερύψωση στην τάση V_6 και την ισχύ P_2 , και η συμπεριφορά του συστήματος είναι αρκετά ταλαντωτική. Όπως και στην παράγραφο 4.4.2 η αποτελεσματικότητα της ανάστροφης λειτουργίας επηρεάζεται πολύ από την κανονική λειτουργία του άλλου ΣΑΤΦ, που τροφοδοτεί μεγάλο φορτίο και έχει ισχυρή επίδραση. Εδώ το αποτέλεσμα είναι αρκετά καλό επειδή το ΣΑΤΦ 1 εξαντλεί το περιθώριο του όταν έχει ήδη ανεβάσει την τάση V_6 του φορτίου πάνω από την νεκρή ζώνη, οπότε και η επίδραση της κανονικής λειτουργίας του ΣΑΤΦ 2 είναι θετική για την αύξηση των τάσεων δικτύου. Ουσιαστικά δηλαδή η μεγάλη ανύψωση τάσεων και φορτίου σε αυτήν την περίπτωση δεν οφείλεται άμεσα στην αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 1, αλλά στις κινήσεις του ισχυρού μηχανισμού του ΣΑΤΦ 2, όταν η αντίστροφη λειτουργία υπερυψώσει την τάση και ισχύ του φορτίου P_1 .

Άρα σε αυτήν την εφαρμογή η αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 έχει αμφίβολα ως προς την ευστάθεια αποτελέσματα. Η απόκριση του συστήματος είναι έντονα ταλαντωτική και το σχετικά ικανοποιητικό αποτέλεσμα που εμφανίζεται εδώ δεν μπορεί να διασφαλισθεί για περιπτώσεις μικρών τροποποιήσεων στο σύστημα.

Στα σχήματα 4.5.5, 4.5.6 δίνονται οι ισχύεις των φορτίων και οι λόγοι μετασχηματισμού στα δύο ΣΑΤΦ, σε μεταξύ τους απεικόνιση, ώστε να διακρίνονται οι ταυτόχρονες μεταβολές τους.



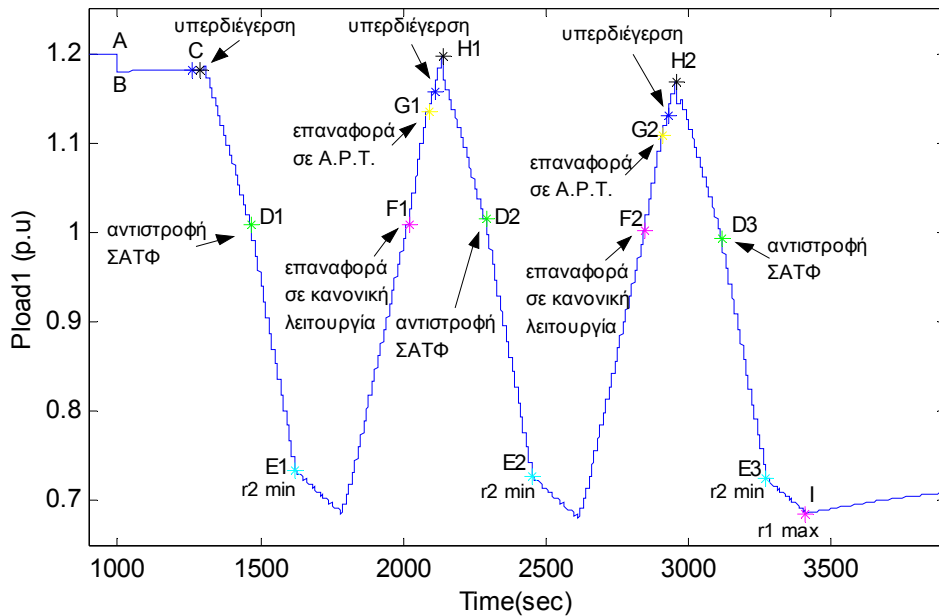
Σχήμα 4.5.5 Μεταβολή των ισχύων του φορτίου



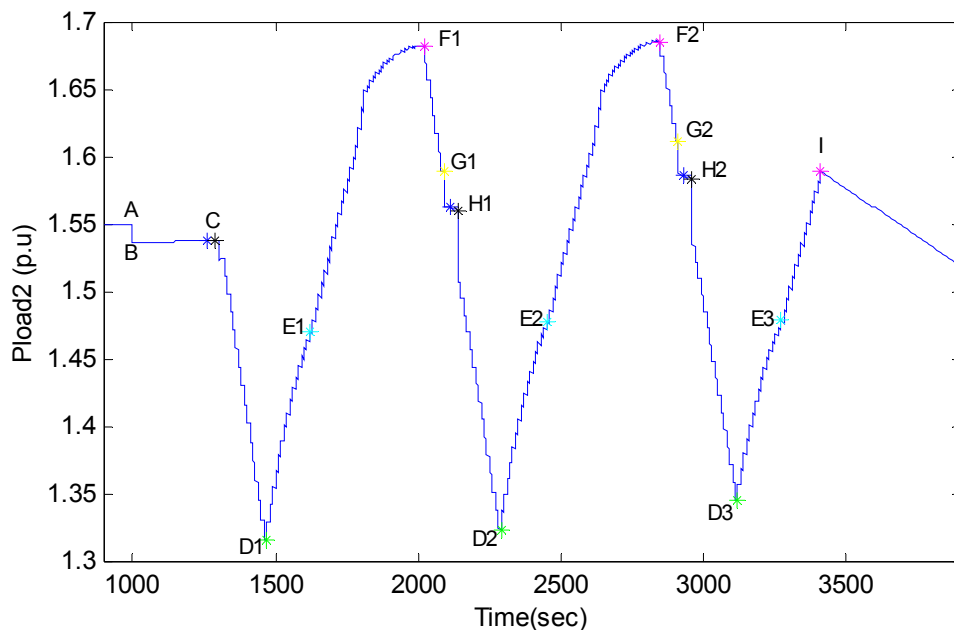
Σχήμα 4.5.6 Μεταβολή των λόγων μετασχηματισμού

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.5.5, 4.5.6 φαίνεται πιο καθαρά η αρκετά ταλαντωτική συμπεριφορά του συστήματος. Αν και στην περίπτωση αυτή οι τάσεις και τα φορτία διατηρούνται σε πολύ ικανοποιητικό επίπεδο κατά τη διάρκεια της αντίστροφης λειτουργίας, δημιουργούνται ωστόσο αρκετές επιφυλάξεις ως προς το κατά πόσο η λειτουργία του συστήματος είναι ικανοποιητική.

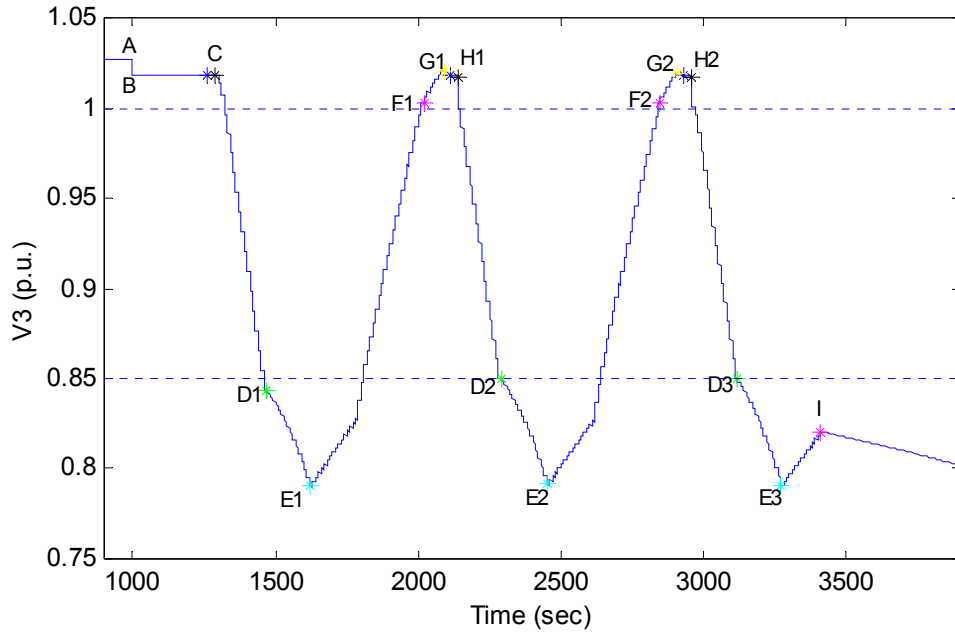
Επίσης σημειώνεται ότι σε αυτήν την προσομοίωση η τάση V_H , όπου απενεργοποιείται ο αντίστροφος έλεγχος του ΣΑΤΦ (βλέπε παράγραφο 4.1.2), έχει οριστεί σε πολύ υψηλή τιμή. Αν θεωρήσουμε μια τιμή του $V_H=1$ α.μ., λόγω της υπερύψωσης στην τάση V_3 , θα έχουμε μια εναλλαγή μεταξύ της κανονικής λογικής του ΣΑΤΦ και της λογικής αντιστρόφου ελέγχου και το σύστημα θα παρουσιάζει πολύ έντονες ταλαντώσεις, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.5.7 – 4.5.10.



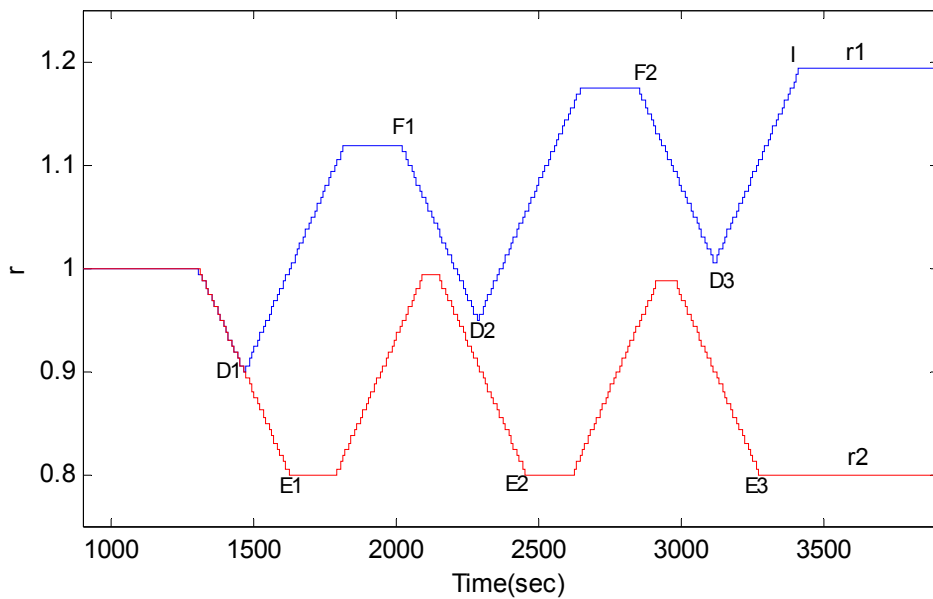
Σχήμα 4.5.7 Ισχύς φορτίου P_1 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.5.8 Ισχύς φορτίου P_2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.5.9 Τάση δικτύου V_3 συναρτήσει του χρόνου

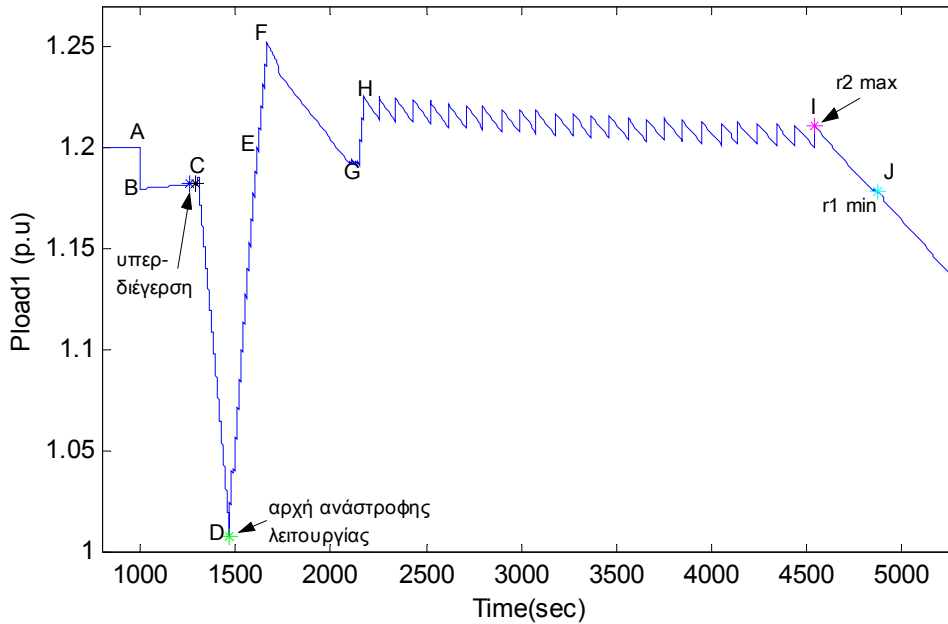


Σχήμα 4.5.10 Μεταβολή των σχέσεων μετασχηματισμού r_1 και r_2 με το χρόνο

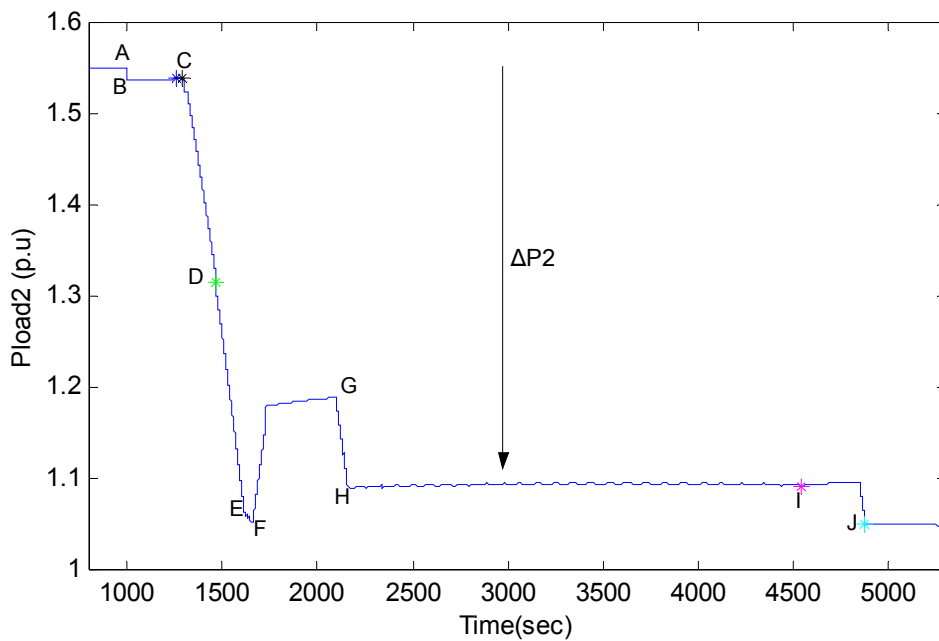
Όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.5.7 – 4.5.10 το σύστημα αρχικά συμπεριφέρεται όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, αλλά στο σημείο F1 η τάση δικτύου V_3 υπερβαίνει το όριο της λογικής αντιστροφής ελέγχου $V_H=1$ α.μ., οπότε το ΣΑΤΦ1 επανέρχεται σε κανονική λειτουργία και αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού r_1 . Έτσι η τάση δικτύου μειώνεται και πάλι κάτω από την τιμή κατωφλιού V_L και ο ίδιος κύκλος λειτουργίας επαναλαμβάνεται, μέχρι τον τερματισμό της λειτουργίας του ΣΑΤΦ 1 στο άνω όριο της σχέσης μετασχηματισμού r_1^{\max} . Επομένως διαπιστώνουμε ότι η αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 σε αυτήν την εφαρμογή είναι αρκετά επικίνδυνη, επειδή λόγω της μεγάλης υπερύψωσης μπορούν να προκληθούν πολύ έντονες ταλαντώσεις, και για αυτό θα έπρεπε να αποφεύγεται.

4.5.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2

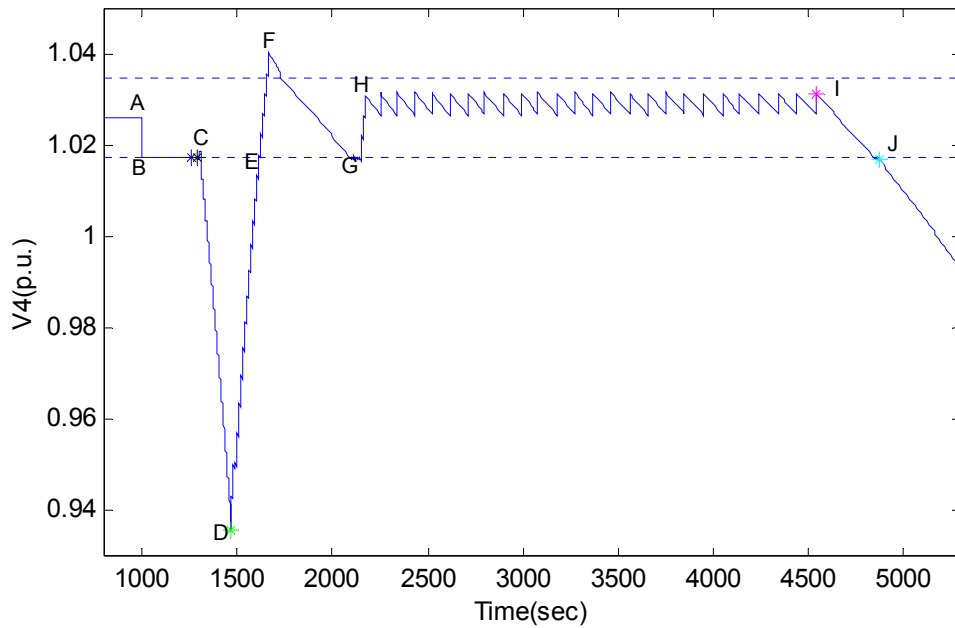
Στα σχήματα 4.5.11-4.5.14 δίνονται οι μεταβολές της ισχύος των δύο φορτίων P₁ και P₂, της τάσης δευτερεύοντος V₄ στο P₁ και της τάσης πρωτεύοντος V₅ στο P₂. όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος με αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2.



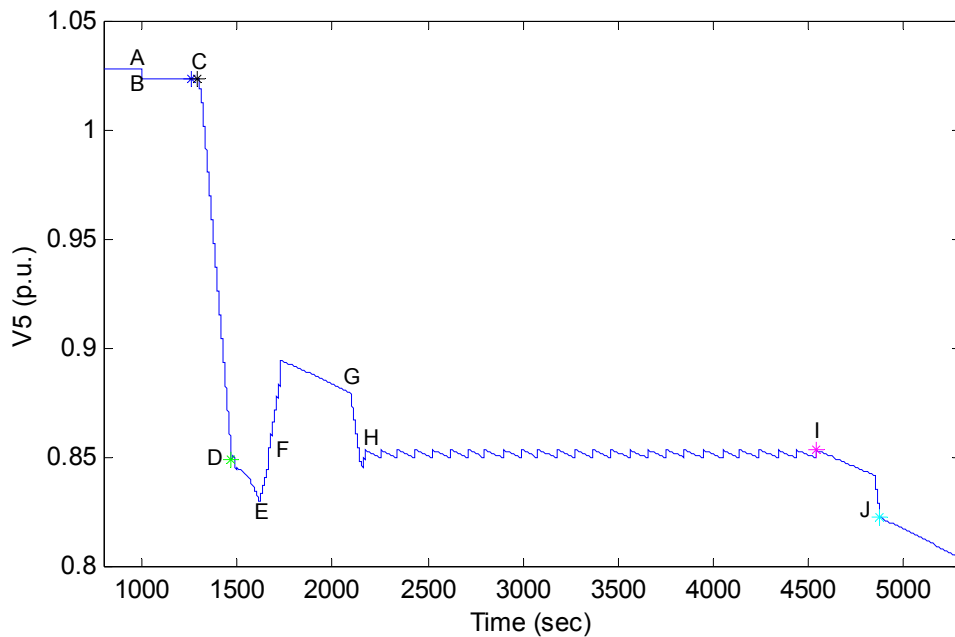
Σχήμα 4.5.11 Ισχύς φορτίου P₁



Σχήμα 4.5.12 Ισχύς φορτίου P₂



Σχήμα 4.5.13 Τάση δευτερεύοντος V_4 στο φορτίο P_1



Σχήμα 4.5.14 Τάση πρωτεύοντος V_5 στο φορτίο P_2

Αρχικά το σύστημα κινείται όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.5.1 και αφού περάσει το μέγιστο όριο φόρτισης οι τάσεις και τα φορτία αρχίζουν να καταρρέουν. Η αντιστροφή εφαρμόζεται στο ΣΑΤΦ 2 την ίδια χρονική στιγμή με πριν, στο σημείο D ($t=1470$ sec) όπου η τάση δικτύου V_5 πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλιού V_L . Το ΣΑΤΦ 2 μετά την αντιστροφή δεν καταφέρνει να σταθεροποιήσει την τάση δικτύου στην τιμή 0.85 α.μ., λόγω λειτουργίας και του άλλου ΣΑΤΦ, που μειώνει το λόγο μετασχηματισμού του r_1 προσπαθώντας να αυξήσει την τάση δευτερεύοντος V_4 . Το συνολικό αποτέλεσμα των κινήσεων των δύο ΣΑΤΦ είναι η συνέχιση της μείωσης της

V_3 με μικρότερο ρυθμό. Μόνο η τάση V_4 και η ισχύς φορτίου P_1 αυξάνονται με αρκετά γρήγορο ρυθμό, αφού και τα δύο ΣΑΤΦ επιδρούν θετικά στην τάση δευτερεύοντος V_4 .

Η τάση δικτύου V_5 ανακάμπτει μόνο όταν η τάση δευτερεύοντος V_4 του ΣΑΤΦ 1 μπει στη νεκρή ζώνη, στο σημείο E ($t=1610$ sec). Ωστόσο η ισχύς φορτίου P_2 συνεχίζει να μειώνεται με αργό ρυθμό, επειδή στη σχέση (4.4.2) η αύξηση της σχέσης μετασχηματισμού r_2^2 αναιρεί την αύξηση της τάσης V_5 και της αγωγιμότητας G_2 . Αύξηση της P_2 επιτυγχάνεται όταν η τάση V_4 υπερβεί τα όρια της νεκρής ζώνης και το ΣΑΤΦ 1 αρχίσει να αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού r_1 για να μειώσει την τάση δευτερεύοντος, οπότε συντελεί σε επιπλέον αύξηση της τάσης δικτύου V_5 . Εκείνη τη στιγμή όμως, στο σημείο F ($t=1660$ sec), παύει να λειτουργεί το ΣΑΤΦ 2, επειδή η τάση δικτύου V_5 ξεπερνά την τιμή 0.85 α.μ.. Οι τάσεις δικτύου V_3 , V_5 και η ισχύς φορτίου P_2 συνεχίζουν να αυξάνονται για λίγο με την επίδραση του ΣΑΤΦ 1, και όταν η τάση V_4 μπει εντός της νεκρής ζώνης επενεργεί πλέον μόνο η ρύθμιση της αγωγιμότητας των φορτίων.

Στο σημείο G ($t=2100$ sec) η τάση δευτερεύοντος V_4 του απομακρυσμένου φορτίου P_1 κατεβαίνει λίγο κάτω από την νεκρή ζώνη και το ΣΑΤΦ 1 κάνει κάποια βήματα και την επαναφέρει, μειώνοντας όμως έτσι τις τάσεις δικτύου. Η πτώση της τάσης V_5 λίγο κάτω από το κατώφλι V_L ενεργοποιεί και πάλι τη λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 σε αντίστροφο έλεγχο. Η τάση δικτύου V_5 επανέρχεται και παράλληλα ανυψώνει την τάση V_4 στο μέσο της νεκρής ζώνης στο σημείο H ($t=2170$ sec), οπότε παύει η λειτουργία του ΣΑΤΦ 1.

Έτσι οι τάσεις δικτύου, η τάση δευτερεύοντος V_4 και τα φορτία σταθεροποιούνται σχεδόν, με μια μικρή διακύμανση λόγω της επίδρασης της αυτορρύθμισης των φορτίων και των αντίστροφων βημάτων του ΣΑΤΦ 2. Η ρύθμιση των αγωγιμοτήτων μειώνει με αργό ρυθμό τις τάσεις και την ισχύ των φορτίων και κάθε φορά που η τάση V_5 πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλιού, εκτελείται ένα βήμα του ΣΑΤΦ, αυξάνοντας το λόγο μετασχηματισμού r_2 , που επαναφέρει την τάση δικτύου και τα άλλα μεγέθη. Η σταθεροποίηση επιτυγχάνεται επειδή ο λόγος (G_2/r_2^2) παραμένει σταθερός κατά μέση τιμή. Μάλιστα η τάση V_4 και η ισχύς P_1 κυμαίνονται κοντά στην αρχική τους τιμή.

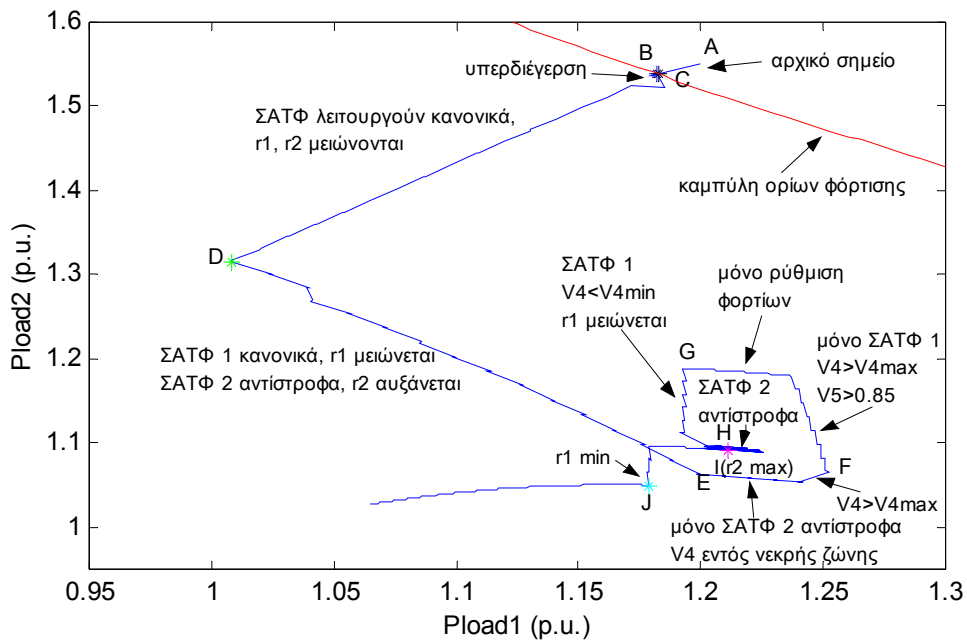
Όταν εξαντληθεί το εύρος του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΦ 2 οι τάσεις και τα φορτία αρχίζουν να καταρρέουν υπό την επίδραση της αυτοεπιπελάσεως των φορτίων. Το ΣΑΤΦ 1 κάνει κάποια τελευταία βήματα πριν τερματίσει τη λειτουργία του στο r_1^{\min} , προσπαθώντας να διατηρήσει την τάση V_4 εντός της νεκρής ζώνης, αλλά με αυτήν τη λειτουργία επιταχύνει την κατάρρευση των τάσεων. Μετά την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης και των δυο ΣΑΤΦ στα σημεία I ($r_2=r_2^{\max}$ για $t=4540$ sec) και J ($r_1=r_1^{\min}$ για $t=4870$ sec) αντίστοιχα η ρύθμιση αυτοεπιπελάσεως των φορτίων οδηγεί το σύστημα σε κατάρρευση.

Η εφαρμογή της αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 2 σε αυτήν την περίπτωση φόρτισης καταφέρνει να διαφυλάξει για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα το σύστημα από την κατάρρευση. Η τάση δικτύου V_5 κρατείται πάνω από την τιμή 0.85 α.μ. για χρονικό διάστημα περίπου 3700 sec, ενώ η τάση V_4 και η ισχύς P_1 στο απομακρυσμένο φορτίο διατηρούνται στις αρχικές τους τιμές: η τάση μέσα στη νεκρή ζώνη και η ισχύς στην αρχική ζήτηση P_{01} . Η έμμεση αποκοπή φορτίου που δημιουργεί η αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 γίνεται μόνο στο φορτίο P_2 στο οποίο αντιστοιχεί το ΣΑΤΦ αυτό ($\Delta P_2=0.4409$), ενώ το υπόλοιπο σύστημα στηρίζεται πλήρως και καλύπτει την αρχική ζήτηση φορτίου.

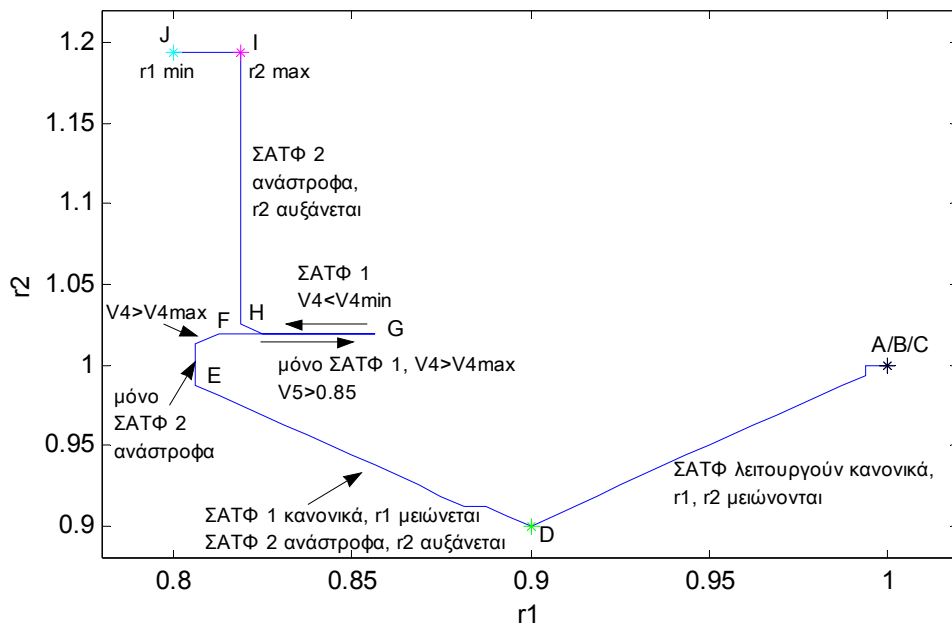
Στην περίπτωση αυτή επίσης παρατηρείται μικρή υπερύψωση στην τάση V_4 και την ισχύ P_2 , ενώ η εξέλιξη του συστήματος μετά τη διαταραχή παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά, αν και σε μικρό βαθμό.

Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται στα σχήματα 4.5.15 και 4.5.16 που ακολουθούν.

Στα σχήματα 4.5.15 και 4.5.16 παρουσιάζονται ταυτόχρονα οι μεταβολές των ισχύων των φορτίων P_1 , P_2 και των λόγων μετασχηματισμού των δύο ΣΑΤΦ r_1 , r_2 αντίστοιχα, για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος.



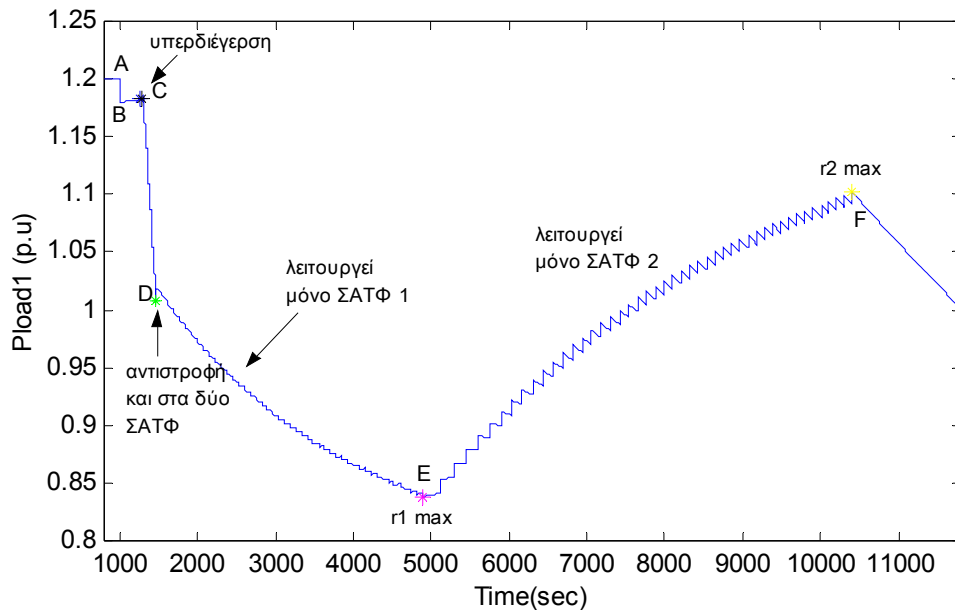
Σχήμα 4.5.15 Ταυτόχρονη απεικόνιση των μεταβολών των ισχύων των δύο φορτίων



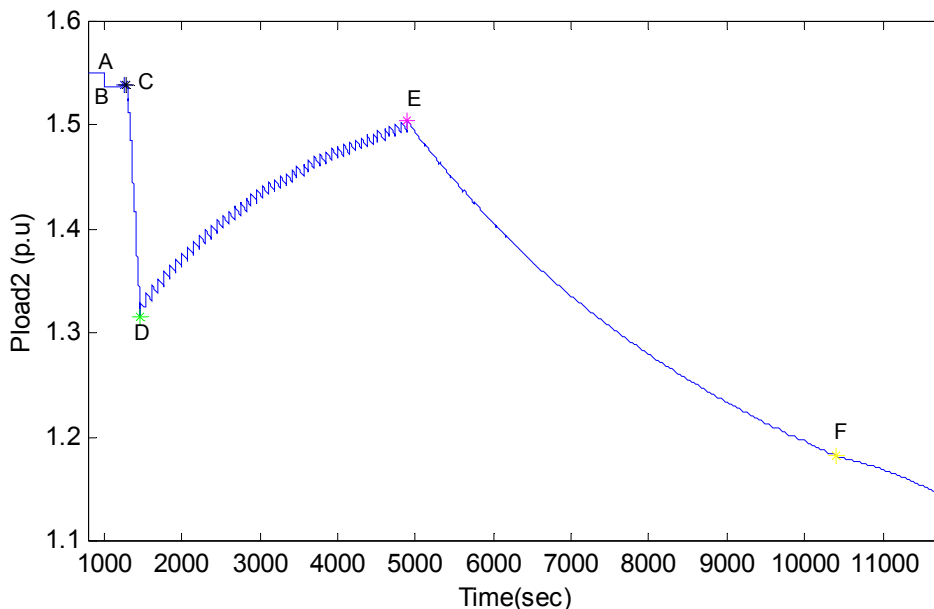
Σχήμα 4.5.16 Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού r_1 , r_2

4.5.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού

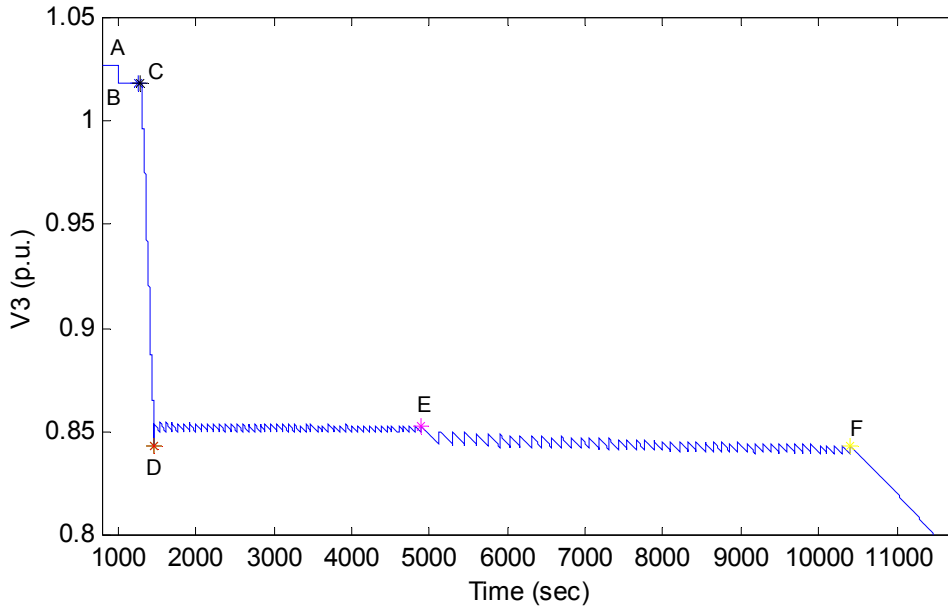
Σε αυτήν την εφαρμογή παρατηρούμε ότι οι τάσεις πρωτεύοντος στα δύο ΣΑΤΦ V_3 και V_5 είναι συγκρίσιμες και πέφτουν ταυτόχρονα κάτω από την τιμή κατωφλιού $V_{L1}=V_{L2}=0.85$ α.μ. Επομένως εδώ μπορεί να ενεργοποιηθεί και στα δύο ΣΑΤΦ η λογική αντιστρόφου ελέγχου. Στα σχήματα 4.5.17-4.5.20 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αν θέσουμε και στα δύο ΣΑΤΦ την ίδια τάση κατωφλιού 0.85 α.μ. για την ενεργοποίηση του αντιστρόφου ελέγχου.



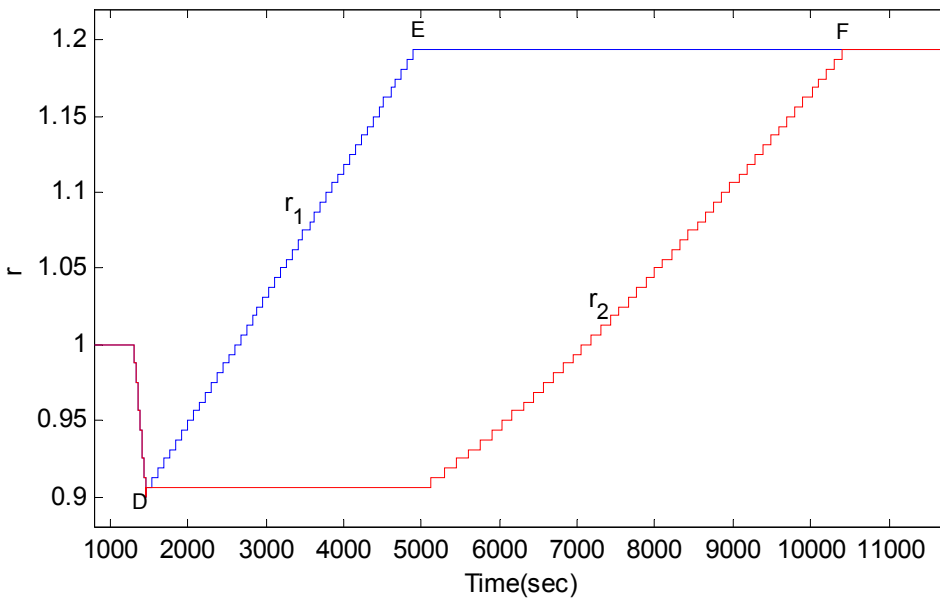
Σχήμα 4.5.17 Προσομοίωση της ισχύος P_1 για αντιστροφή και στα δύο ΣΑΤΦ



Σχήμα 4.5.18 Προσομοίωση της ισχύος P_2 για αντιστροφή και στα δύο ΣΑΤΦ



Σχήμα 4.5.19 Προσομοίωση της τάσης δικτύου V_3 για αντιστροφή και στα δύο ΣΑΤΦ



Σχήμα 4.5.20 Μεταβολή των λόγων μετασχηματισμού r_1, r_2 συναρτήσει του χρόνου

Όπως παρατηρούμε στα σχήματα 4.5.17-4.5.20 τη χρονική στιγμή $t=1470$ sec (σημείο D) και οι δύο τάσεις πρωτεύοντος V_3, V_5 πέφτουν κάτω από το επίπεδο κατωφλιού και άρα ενεργοποιείται η αντιστροφή και των δύο ΣΑΤΦ. Ωστόσο μετά το πρώτο βήμα η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 1 κρατάει την τάση V_5 πάνω από την τιμή κατωφλιού και άρα μόνο το ΣΑΤΦ 1 μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού του r_1 , ενώ το ΣΑΤΦ 2 δεν κινείται.

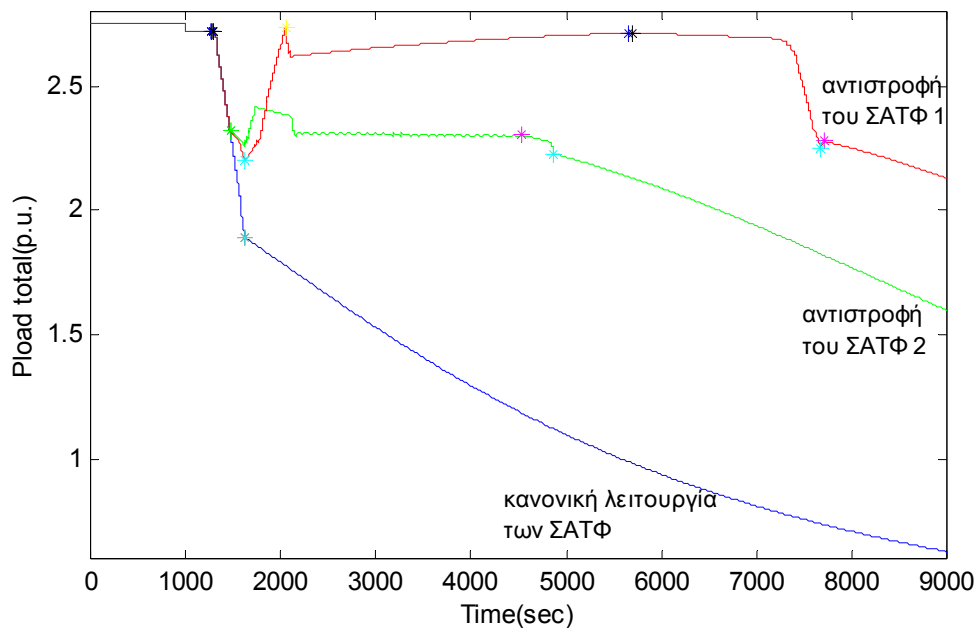
Η λειτουργία του ΣΑΤΦ 1 διατηρεί την τάση V_3 σχεδόν σταθερή στην τιμή $V_{L1}=0.85$ α.μ., μειώνοντας την τάση δευτερεύοντος V_4 λόγω της αύξησης του r_1 . Έτσι η ισχύς φορτίου P_1 μειώνεται, καθώς η αύξηση της αγωγιμότητας G_1 δεν μπορεί να αντισταθμίσει την αύξηση του λόγου μετασχηματισμού r_1 (βλέπε σχέση 4.4.1). Η τάση δευτερεύοντος V_6 παραμένει σταθερή, αφού η τάση δικτύου V_5 και ο λόγος μετασχηματισμού r_2 είναι σταθεροί, και η ισχύς φορτίου P_2 αυξάνεται με την αύξηση της αγωγιμότητας G_2 λόγω αυτορρύθμισης του φορτίου.

Όταν το ΣΑΤΦ 1 τερματίσει τη λειτουργία του στο άνω όριο r_1^{\max} (σημείο E), η τάση δικτύου V_5 πέφτει κάτω από την τιμή κατωφλιού 0.85 α.μ. και αρχίζει να αυξάνεται ο λόγος μετασχηματισμού r_2 . Με τη λειτουργία αυτή σταθεροποιούνται οι τάσεις δικτύου V_3 , V_5 και η τάση δευτερεύοντος V_4 ενώ η τάση V_6 και η ισχύς φορτίου P_2 μειώνονται και η ισχύς P_1 αυξάνεται, με την ίδια λογική που περιγράφηκε αντίστροφα παραπάνω. Αυτή η συμπεριφορά συνεχίζεται μέχρι την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης του ΣΑΤΦ 2 (σημείο F).

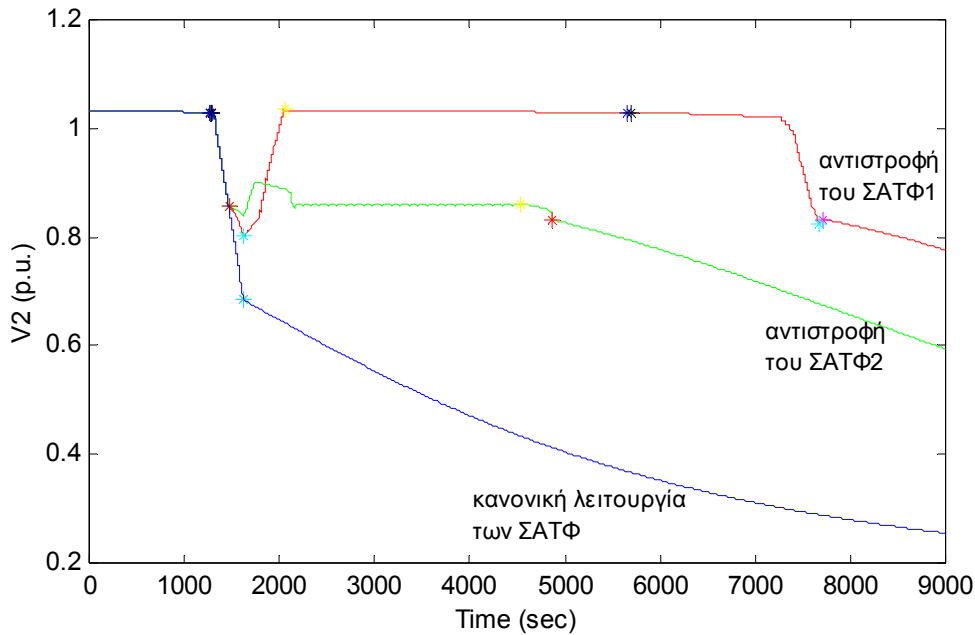
Όπως παρατηρούμε σε αυτήν την εφαρμογή δεν μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι η αντιστροφή ελέγχου θα ενεργοποιηθεί μόνο στο πιο αποτελεσματικό ΣΑΤΦ, αν θέσουμε ως μόνο κριτήριο για την αντιστροφή το επίπεδο της τάσης. Η αντιστροφή ελέγχου ενεργοποιείται ταυτόχρονα και στα δύο ΣΑΤΦ, ουσιαστικά όμως το ένα από τα δύο δε λειτουργεί καν γιατί κατά τη διάρκεια της αντιστροφής στο άλλο η τάση πρωτεύοντος του βρίσκεται στη νεκρή ζώνη $[V_{L+e}, V_H]$. Επομένως πρέπει να εφαρμοστεί κάποια άλλη μέθοδος για την επιλογή του ΣΑΤΦ που θα αντιστραφεί.

4.5.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου

Στην εφαρμογή αυτή η επιλογή του κατάλληλου ΣΑΤΦ προς αντιστροφή είναι πιο δύσκολη, επειδή και οι δύο περιπτώσεις αντιστροφής καταφέρνουν να διαφυλάξουν το σύστημα από κατάρρευση για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Στα σχήματα 4.5.21, 4.5.22 απεικονίζεται η συνολική ισχύς του συστήματος και η τάση δικτύου V_3 που προκύπτει από την προσομοίωση για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των ΣΑΤΦ: κανονική λειτουργία και των δύο ΣΑΤΦ, αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 και αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2.



Σχήμα 4.5.21 Συνολική ισχύς φορτίου $P_{\text{total}} = P_1 + P_2$



Σχήμα 4.5.22 Τάση δικτύου V_2 για κάθε τρόπο λειτουργίας των ΣΑΤΦ

Σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα φαίνεται αρχικά ικανοποιητικό, ως προς τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί στη παράγραφο 4.2.6, όπου ΣΑΤΦ και αντιστραφεί: και στις δύο περιπτώσεις αντιστροφής το σύστημα διατηρείται για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, σε αποδεκτά επίπεδα τάσης και ισχύος φορτίων. Η αντιστροφή σε κάποιο από τα ΣΑΤΦ, με την επακόλουθη έμμεση αποκοπή μέρους του αντίστοιχου φορτίου, έχει ως αποτέλεσμα τη στήριξη του υπόλοιπου συστήματος και την κάλυψη της αρχικής ζήτησης στο φορτίο που τροφοδοτεί το άλλο ΣΑΤΦ, όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.5.1-4.5.6 και 4.5.11-4.5.16.

Στα σχήματα 4.5.13, 4.5.14 παρατηρούμε ότι η αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 1 διατηρεί τη συνολική ισχύ φορτίου και την τάση δικτύου σε υψηλότερο επίπεδο, ενώ η κατάρρευση αποφεύγεται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Ωστόσο η λειτουργία κατά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 έχει έντονα ταλαντωτική συμπεριφορά, που είναι ένδειξη όχι τόσο ευσταθούς συμπεριφοράς. Επομένως η λύση της αντιστροφής του ΣΑΤΦ 2 είναι πιο σίγουρη και αξιόπιστη.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις τρεις περιπτώσεις λειτουργίας των ΣΑΤΦ συνοψίζονται στον πίνακα 4.5.1.

Πίνακας 4.5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις για την 2^η εφαρμογή

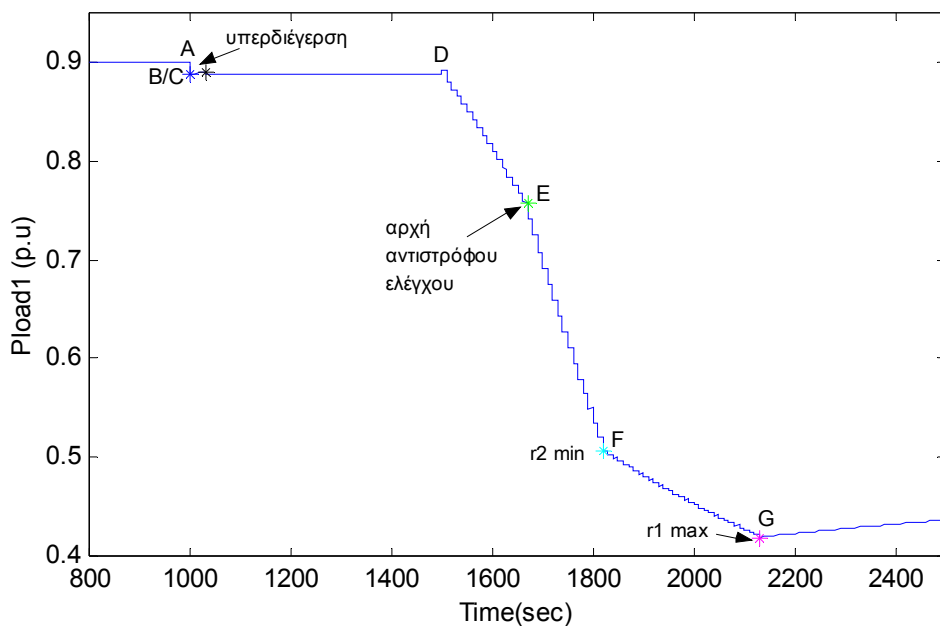
| Αντιστροφή ΣΑΤΦ | Αποτελέσματα της προσομοίωσης | Μη εξυπηρητηθέν φορτίο | Συμπέρασμα |
|------------------|--|---|--|
| ΣΑΤΦ 1 | -Τάση δικτύου $V_2 > 0.85$ α.μ. για περίπου 6600 sec μετά τη διαταραχή. Μάλιστα για περίπου 5500sec $V_2 > 1.0$ α.μ. - $P_1 > 0.7$ α.μ. για περίπου 9000 sec. Για 5500 sec $P_1 > 1.05$ α.μ. - P_2 στην αρχική ζήτηση P_{o2} | $\Delta P_1 = 0.1098$ α.μ. $\Delta P_2 = -0.0016$ α.μ. | Αμφιλεγόμενη. Εισάγει μικρή αποκοπή φορτίου (ΔP), αλλά παρουσιάζει έντονη ταλάντωση με μικρή απόσβεση και μεγάλη υπερύψωση. Κίνδυνος επαναφοράς του ΣΑΤΦ σε κανονική λειτουργία λόγω μεγάλης υπερύψωσης. |
| ΣΑΤΦ 2 | -Τάση δικτύου $V_2 > 0.85$ α.μ. για 3850 sec μετά τη διαταραχή - P_1 στην αρχική ζήτηση P_{o1} - P_2 κρατείται στο 1.1 α.μ. για περίπου 4000 sec | $\Delta P_1 = -0.0084$ α.μ. $\Delta P_2 = 0.4409$ α.μ. | Επιτυχής. Προφυλάσσει το σύστημα από κατάρρευση για αρκετά μεγάλο διάστημα Και εδώ μικρή ταλάντωση. |
| ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ | Τάσεις και φορτία βυθίζονται -Τάση δικτύου V_2 πέφτει κάτω από την τιμή 0.85 α.μ. μέσα σε 470 sec μετά τη διαταραχή | | Κατάρρευση. |

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.5.1-4.5.6 και 4.5.11-4.5.16 και τον πίνακα 4.5.1 η συμπεριφορά σε αυτήν την εφαρμογή είναι γενικά ταλαντωτική και η διάκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων αντιστροφής λειτουργίας είναι δυσχερής.

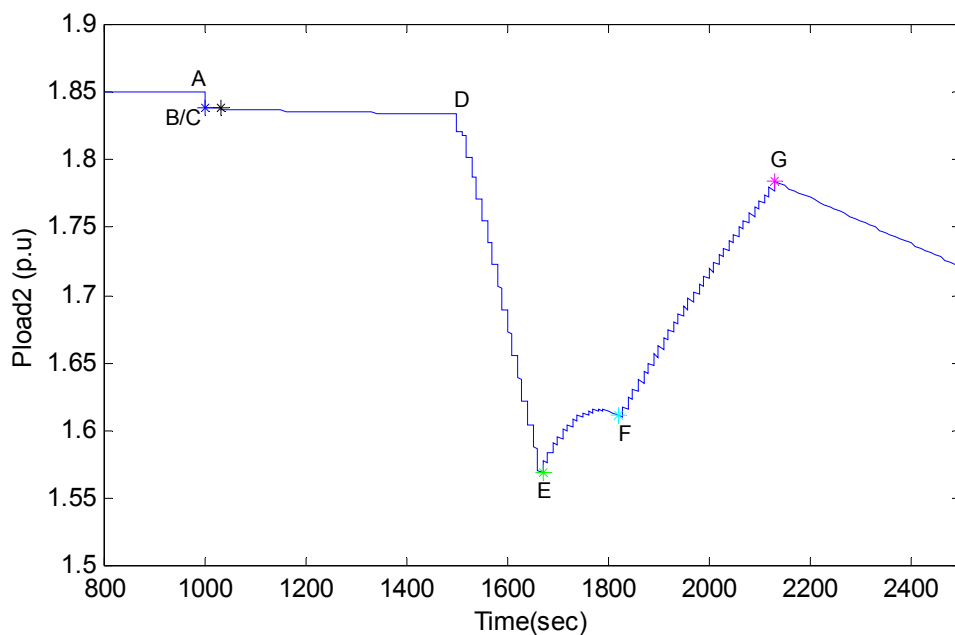
4.6 ΕΦΑΡΜΟΓΗ 3: $P_{o1}=0.9$ α.μ., $P_{o2}=1.85$ α.μ.

4.6.1 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 1 στο φορτίο P_1

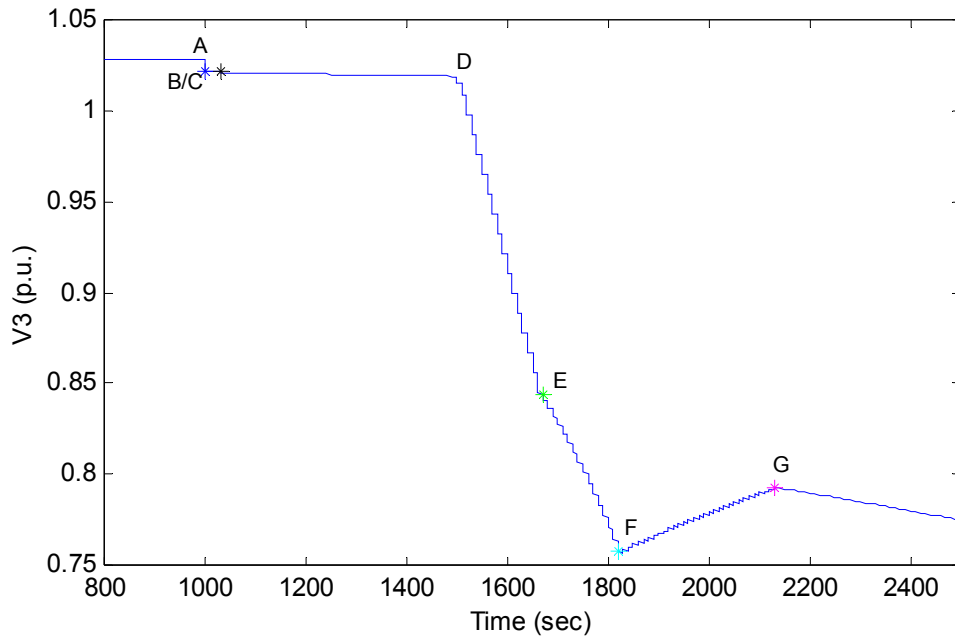
Στα σχήματα 4.6.1-4.6.4 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την ισχύ των δύο φορτίων P_1 και P_2 , την τάση πρωτεύοντος V_3 στο P_1 και την τάση δευτερεύοντος V_6 στο P_2 , όταν εφαρμοστεί αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ στο φορτίο P_1 .



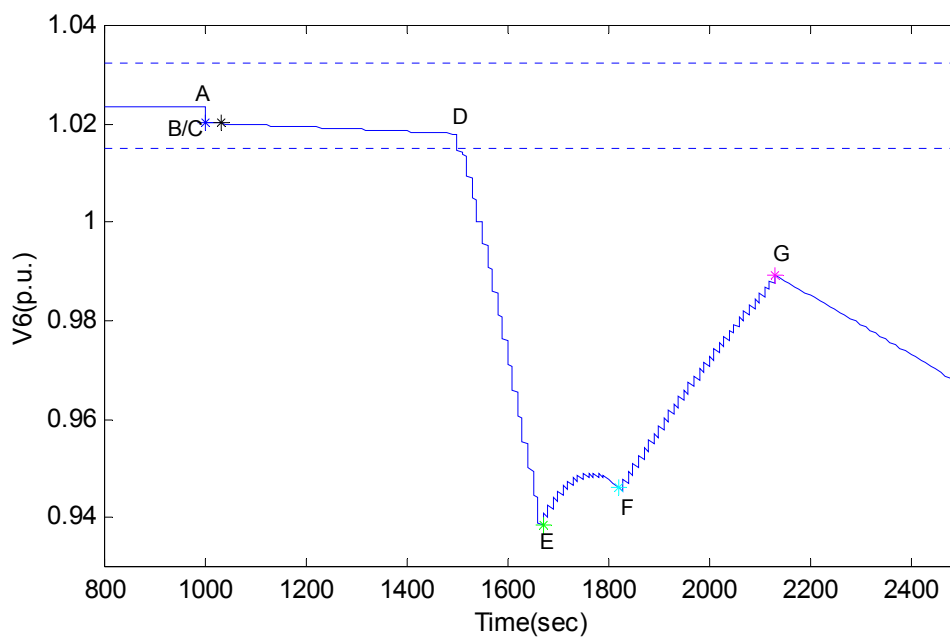
Σχήμα 4.6.1 Ισχύς φορτίου P_1 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.6.2 Ισχύς φορτίου P_2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.6.3 Τάση πρωτεύοντος V_3 στο μετασχηματιστή του φορτίου P_1



Σχήμα 4.6.4 Τάση δευτερεύοντος V_6 στο μετασχηματιστή του φορτίου P_2

Σε αυτήν την περίπτωση η συμπεριφορά του συστήματος είναι παρόμοια με την παράγραφο 4.4.2, με εναλλαγή των δύο φορτίων.

Στην περίπτωση αυτή το σύστημα αμέσως μετά τη διαταραχή (σημείο B) συναντά το όριο υπερδιέγερσης της γεννήτριας E_{qlim} , αν και ο περιορισμός της υπερδιέγερσης γίνεται μετά από την καθορισμένη χρονική καθυστέρηση. Οι τάσεις στα φορτία δεν έχουν πέσει κάτω από το όριο της νεκρής ζώνης τους, με αποτέλεσμα η μόνη δυναμική που επενεργεί στο σύστημα να είναι η αυτοεπιαναφορά των φορτίων, που αυξάνει τις αγωγιμότητες και μειώνει τις τάσεις με αργό ρυθμό.

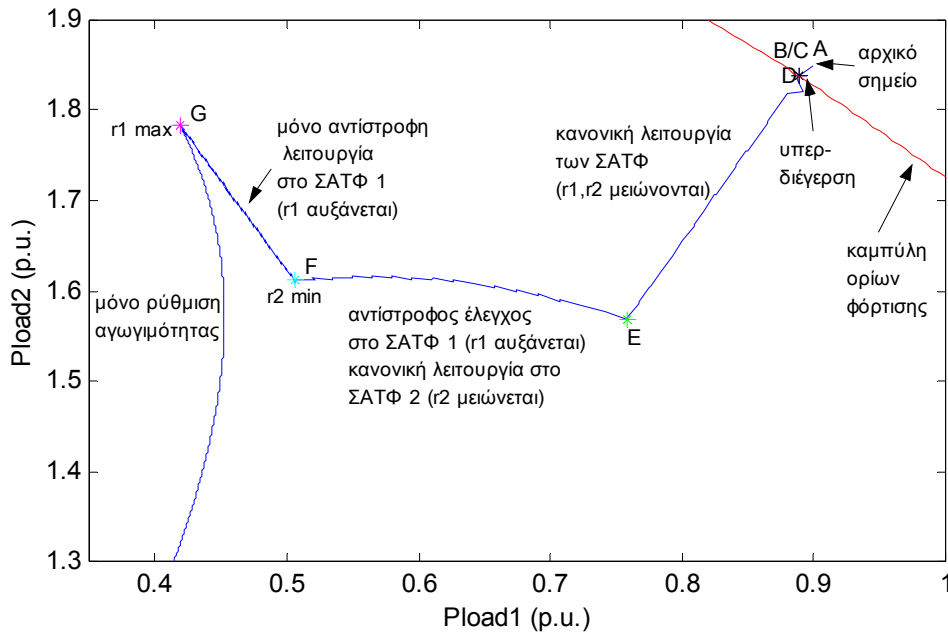
Στο σημείο D ($t=1500$ sec) η τάση δευτερεύοντος V_4 στο φορτίο P_1 πέφτει λίγο κάτω από την νεκρή ζώνη και η επακόλουθη λειτουργία του ΣΑΤΦ 1 την επαναφέρει, μειώνοντας όμως τις τάσεις δικτύου και την τάση φορτίου V_6 . Η τάση V_6 μειώνεται έτσι κάτω από το όριο της νεκρής ζώνης, αλλά το ΣΑΤΦ 2 δεν καταφέρνει να την επαναφέρει, μειώνοντας όλες τις τάσεις του συστήματος, επειδή βρισκόμαστε στην ασταθή περιοχή λειτουργίας. Πλέον και τα δύο ΣΑΤΦ εκτελούν λειτουργίες μείωσης των λόγων μετασχηματισμού για να επαναφέρουν τις τάσεις δευτερεύοντος, προκαλώντας όμως αντίθετα αποτελέσματα. Όλες οι τάσεις του συστήματος, καθώς και οι ισχύς των φορτίων αρχίζουν να βυθίζονται υπό την επίδραση των ΣΑΤΦ και της ρύθμισης της αγωγιμότητας, που είναι πολύ πιο αργή.

Στο σημείο E ($t=1670$ sec) η τάση πρωτεύοντος V_3 στο φορτίο P_1 μειώνεται κάτω από την τιμή κατωφλίου $V_L=0.85$ α.μ. και αρχίζει η λειτουργία του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1. Το ΣΑΤΦ 1 αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού προσπαθώντας να επαναφέρει την τάση δικτύου V_3 στην τιμή 0.85 α.μ., ωστόσο δεν επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η ταυτόχρονη λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 στο πιο μεγάλο φορτίο P_2 , που μειώνει το λόγο μετασχηματισμού r_2 , υπερισχύει και η συνολική επίδραση είναι συνέχιση της μείωσης των τάσεων δικτύου, αν και με μικρότερο ρυθμό. Μάλιστα η ισχύς του φορτίου P_1 μειώνεται με γρηγορότερο ρυθμό, λόγω της γρήγορης αύξησης του λόγου μετασχηματισμού r_1 και της πτώσης της τάσης δικτύου V_3 (σχέση 4.4.1). Μόνο η τάση V_6 και η ισχύς στο φορτίο P_2 παρουσιάζουν μία μικρή αύξηση, αφού και τα δύο ΣΑΤΦ λειτουργούν με κατεύθυνση θετική για αυτές: το ΣΑΤΦ 1 προσπαθεί να αυξήσει την τάση δικτύου V_3 , άρα και την τάση φορτίου V_6 ενώ το ΣΑΤΦ 2 λειτουργεί κανονικά, με στόχο την επαναφορά της τάσης V_6 .

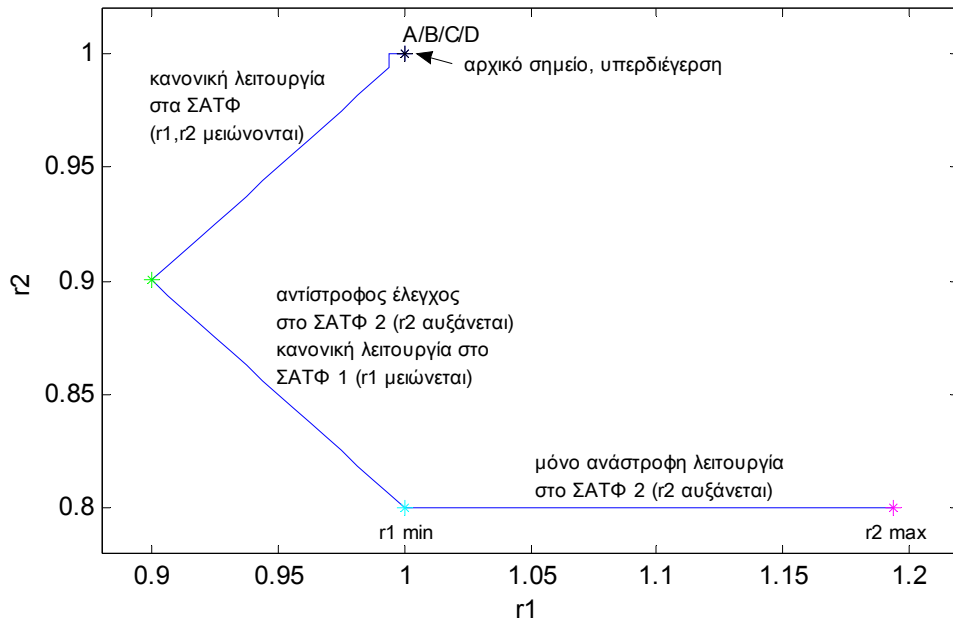
Το ΣΑΤΦ 2 εξαντλεί αρκετά γρήγορα το περιθώριο ρύθμισής του στο κάτω όριο, στο σημείο F ($t=1820$ sec). Μόνο τότε η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΦ 1 καταφέρνει να αυξήσει την τάση δικτύου, όχι όμως την ισχύ και την τάση δευτερεύοντος V_4 στο απομακρυσμένο φορτίο, που συνεχίζουν να μειώνονται με μικρότερο ρυθμό. Η μείωση της ισχύος P_1 ενώ η τάση δικτύου V_3 αυξάνεται, οφείλεται στην αύξηση της σχέσης μετασχηματισμού r_1 με γρήγορο ρυθμό, που δεν μπορεί να εξισορροπηθεί από την αύξηση της V_3 και της αγωγιμότητας G_1 (βλέπε σχέση 4.4.1). Η τάση δευτερεύοντος V_6 και η ισχύς φορτίου P_2 συνεχίζουν να αυξάνονται, ακολουθώντας την αύξηση της τάσης δικτύου. Όταν και το ΣΑΤΦ 1 τερματίσει τη λειτουργία του, σε μικρό χρονικό διάστημα, φτάνοντας το άνω όριο του λόγου μετασχηματισμού στο σημείο G ($t=2130$ sec), παραμένει στο σύστημα μόνο η επίδραση της αυτοεπιαναφοράς των φορτίων που οδηγεί σε κατάρρευση. Η τάση δικτύου V_3 δεν έχει επανέλθει στην τιμή κατωφλίου 0.85 α.μ., ούτε η τάση δευτερεύοντος V_6 στη νεκρή ζώνη.

Επομένως στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 του μακρινού φορτίου P_1 αποτελεί κακή επιλογή, αφού δεν καταφέρνει να διατηρήσει την τάση δικτύου πάνω από την τάση κατωφλίου ή κάποιο από τα φορτία σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο. Αυτό οφείλεται στην ισχυρή επίδραση της λειτουργίας του ΣΑΤΦ 2 στο άλλο φορτίο P_2 , που είναι πολύ μεγάλο. Η λειτουργία του ΣΑΤΦ 2 μειώνει τόσο την τάση δικτύου V_3 , ώστε ούτε μετά την εξάντλησή του να μην επιτυγχάνεται η επαναφορά της V_3 στην τιμή κατωφλίου, επειδή το ΣΑΤΦ 1 έχει πλησιάσει αρκετά το άνω όριο του περιθωρίου ρύθμισής του. Έτσι η κατάρρευση δεν μπορεί να αποφευχθεί παρά μόνο για πολύ μικρό χρονικό διάστημα, στο οποίο τάσεις και ισχύς φορτίων στο σύστημα είναι αρκετά χαμηλές.

Στα σχήματα 4.6.5, 4.6.6 δίνονται οι μεταβολές της ισχύος των φορτίων και των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ, σε μεταξύ τους απεικόνιση, που απεικονίζουν καλύτερα τη λειτουργία του συστήματος.



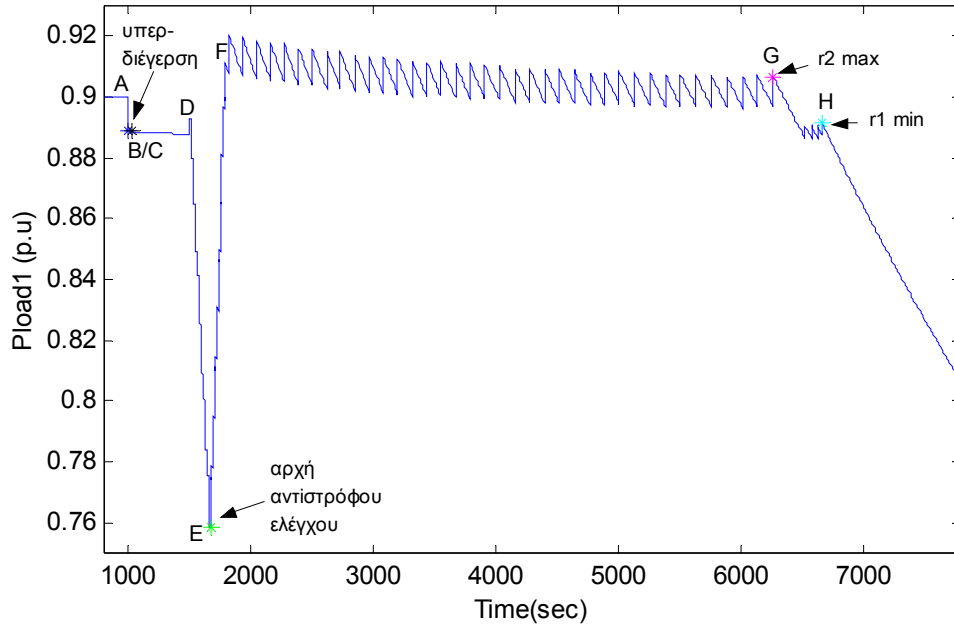
Σχήμα 4.6.5 Ταυτόχρονη απεικόνιση μεταβολών στην ισχύ των δύο φορτίων P_1 , P_2



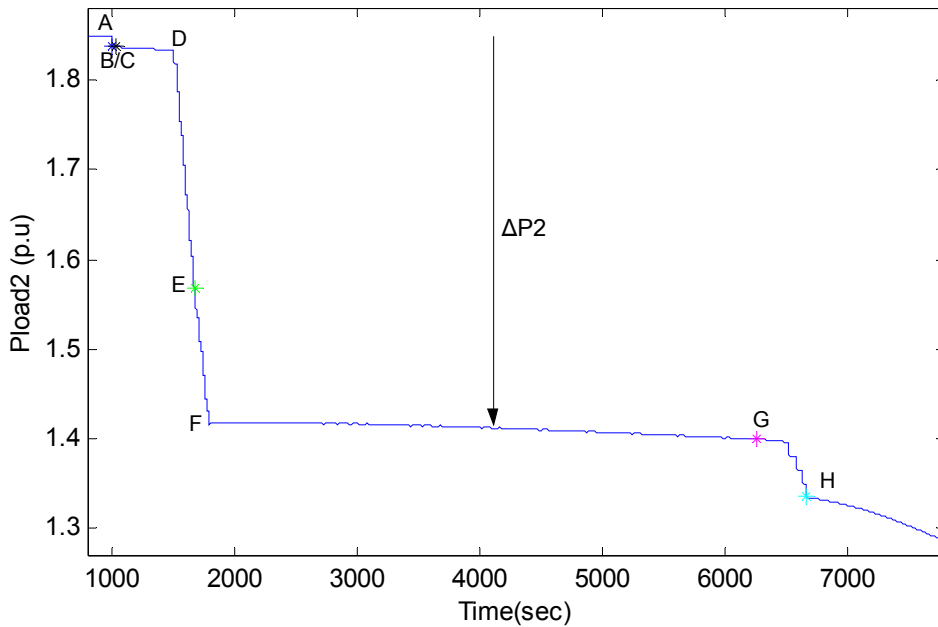
Σχήμα 4.6.6 Ταυτόχρονη απεικόνιση των λόγων μετασχηματισμού r_1 , r_2

4.6.2 Αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P2

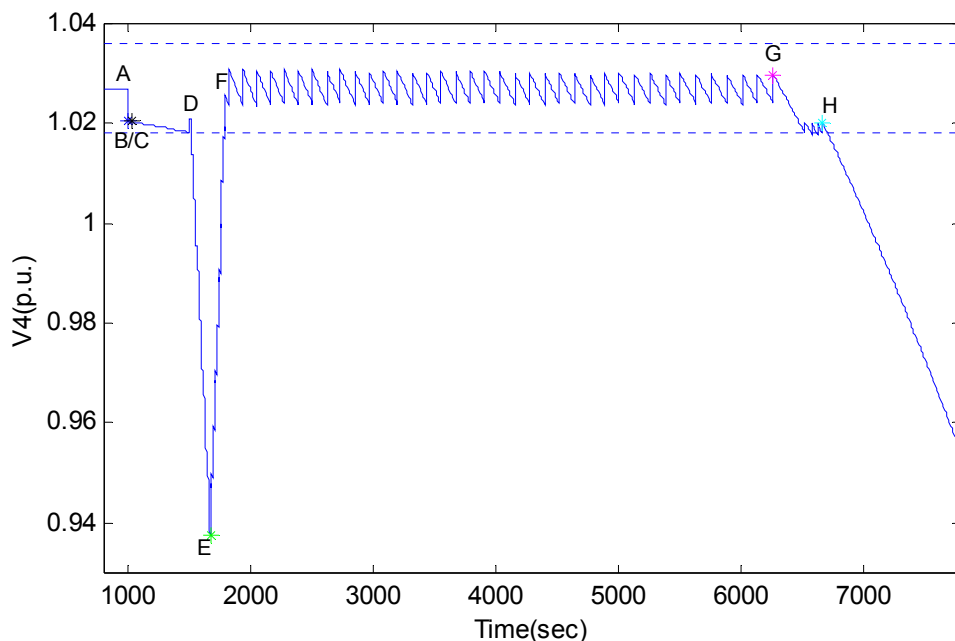
Στα σχήματα 4.6.7-4.6.10 απεικονίζονται οι μεταβολές της ισχύος των δύο φορτίων P₁ και P₂, της τάσης δευτερεύοντος V₄ στο P₁ και της τάσης πρωτεύοντος V₅ στο P₂, όπως προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος μετά την εμφάνιση της διαταραχής με αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2.



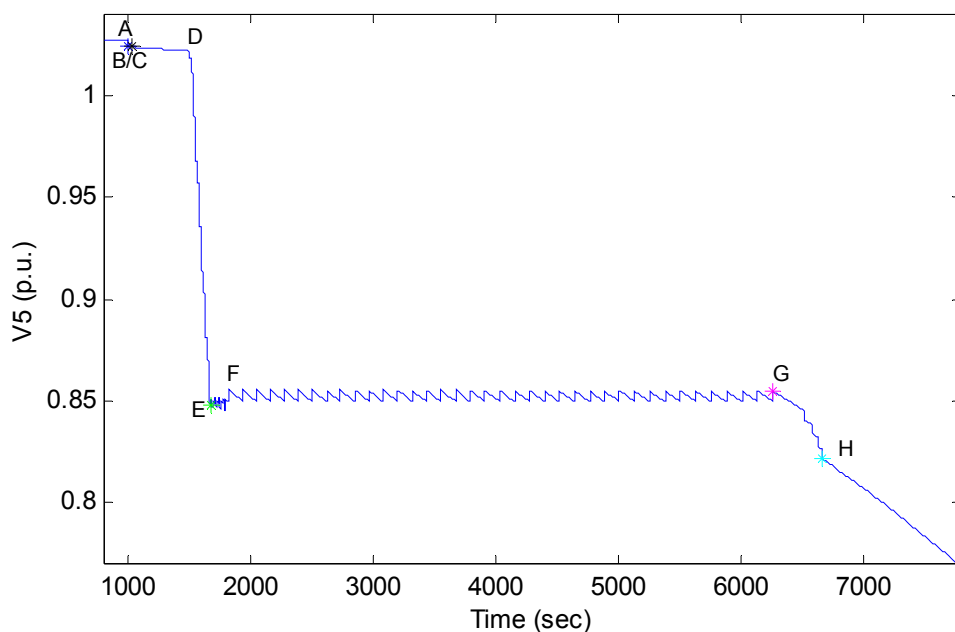
Σχήμα 4.6.7 Ισχύς φορτίου P₁ συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.6.8 Ισχύς φορτίου P₂ συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 4.6.9 Τάση δευτερεύοντος V_4 στο φορτίο P_1



Σχήμα 4.6.10 Τάση πρωτεύοντος V_5 στο ΣΑΤΦ 2

Η συμπεριφορά του συστήματος σε αυτήν την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτή της παραγράφου 4.4.1, αν βέβαια εναλλάξουμε τα φορτία και τα ΣΑΤΦ.

Η μεταβολή των μεγεθών του συστήματος μέχρι την εφαρμογή της αντιστροφής του ΣΑΤΦ έχει περιγραφεί στην παράγραφο 4.6.1. Η λειτουργία αντιστροφής ελέγχου ενεργοποιείται στο ΣΑΤΦ 2 στον ίδιο χρόνο με την παράγραφο 4.6.1, στο σημείο E ($t=1670$ sec), όταν η τάση πρωτεύοντος V_5 στο μετασχηματιστή του φορτίου P_2 πέσει κάτω από την τιμή κατωφλιού $V_L=0.85$. Το ΣΑΤΦ 2 αυξάνει τώρα το λόγο μετασχηματισμού, προσπαθώντας να διατηρήσει την τάση πρωτεύοντος V_5 στο επίπεδο κατωφλιού και προκαλώντας πτώση στην τάση δευτερεύοντος V_6 . Το ΣΑΤΦ 1 του φορτίου P_1 , που λειτουργεί κανονικά μειώνοντας τη σχέση μετασχηματισμού r_1 , επιδρά

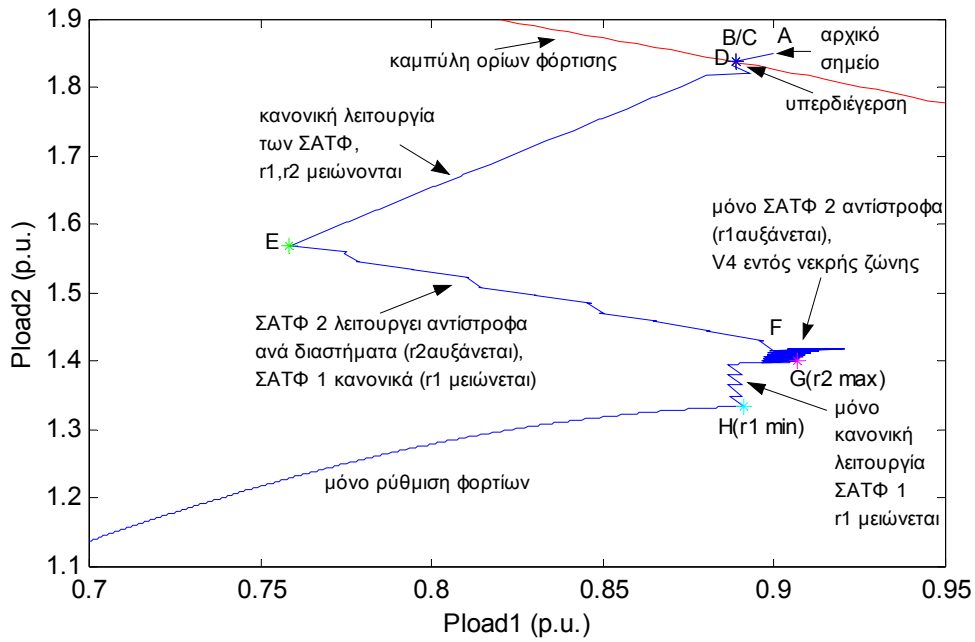
αρνητικά στην τάση δικτύου V_5 . Ωστόσο το συνολικό αποτέλεσμα είναι η διατήρηση της τάσης δικτύου V_5 σχεδόν σταθερής, ενώ η ισχύς φορτίου P_2 συνεχίζει να μειώνεται, όπως έχει εξηγηθεί και στην παράγραφο 4.4.1. Όμως η τάση δευτερεύοντος V_4 , την οποία ελέγχει το ΣΑΤΦ 1, επανέρχεται γρήγορα εντός της νεκρής ζώνης, αφού και τα δύο ΣΑΤΦ επιδρούν θετικά σε αυτήν, και το ΣΑΤΦ 1 παύει να λειτουργεί στο σημείο F ($t=1790$ sec).

Από τη στιγμή αυτή η τάση πρωτεύοντος V_5 και η ισχύς φορτίου P_2 καταφέρνουν να σταθεροποιηθούν σχεδόν: υπάρχει μια μικρή διακύμανση λόγω της αυτοεπιαναφοράς των φορτίων και της ρύθμισης του ΣΑΤΦ 2. Η ρύθμιση της αγωγιμότητας μειώνει με αργό ρυθμό τάσεις και ισχύεις φορτίου και κάθε φορά που η V_5 πέφτει κάτω από την τάση κατωφλίου, εκτελείται ένα ακαριαίο βήμα του ΣΑΤΦ 2 για να την επαναφέρει. Η τάση V_4 και η ισχύς P_1 στο απομακρυσμένο φορτίο ταλαντώνονται κατά τον ίδιο τρόπο γύρω από μια σχεδόν σταθερή τιμή που είναι ίση ή μάλιστα και λίγο μεγαλύτερη από την αρχική τους τιμή, πριν τη διαταραχή. Δηλαδή η τάση δευτερεύοντος V_4 σ' αυτό το διάστημα παραμένει εντός της νεκρής ζώνης και το ΣΑΤΦ 1, που την ελέγχει, δεν εκτελεί κάποια κίνηση.

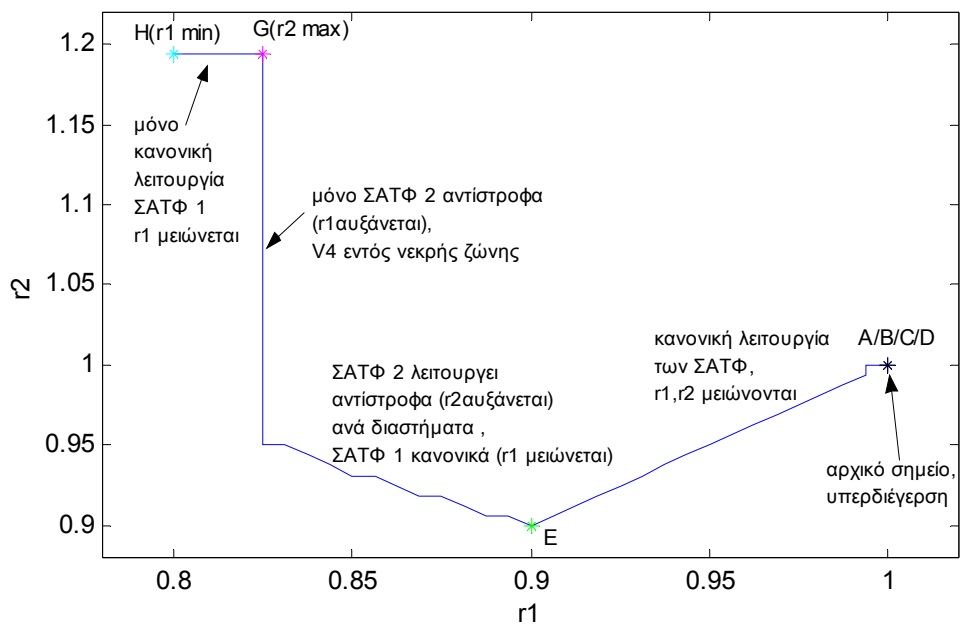
Μετά την εξάντληση του περιθωρίου ρύθμισης του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P_2 , στο σημείο G ($t=6270$ sec), οι τάσεις και οι ισχύεις φορτίου του συστήματος αρχίζουν να μειώνονται υπό την επίδραση της αυτορρύθμισης των φορτίων. Η τάση δευτερεύοντος V_4 κρατείται για μικρό χρονικό διάστημα ακόμα στη νεκρή ζώνη, βοηθούμενη από κάποια βήματα μείωσης του λόγου μετασχηματισμού r_1 στο ΣΑΤΦ 1, που υποβιβάζουν τις υπόλοιπες τάσεις. Όμως το ΣΑΤΦ 1 φτάνει σύντομα στο κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού και τερματίζει τη λειτουργία του στο σημείο H ($t=6670$ sec), όποτε παραμένει μόνο η αυτοεπιαναφορά των φορτίων να κινεί την κατάρρευση του συστήματος.

Συνεπώς, η αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P_2 έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση των φορτίων και των τάσεων δικτύου V_3 και V_5 σε ένα ικανοποιητικό επίπεδο για αρκετό χρόνο. Η τάση δικτύου V_5 κρατείται στην τιμή 0.85 α.μ. για περίπου 5400 sec μετά τη διαταραχή. Η ισχύς P_1 και η τάση V_4 στο απομακρυσμένο φορτίο στηρίζονται πλήρως, αφού επανέρχονται τουλάχιστον στην αρχική τους τιμή. Δηλαδή η έμμεση αποκοπή φορτίου, που πραγματοποιείται με την αντιστροφή, γίνεται αποκλειστικά στο φορτίο P_2 ($\Delta P_2=0.4367$ α.μ.), που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής στον οποίο αντιστρέφεται το ΣΑΤΦ.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά του συστήματος και των δύο ΣΑΤΦ, στα σχήματα 4.6.11, 4.6.12 δίνονται οι μεταβολές των ισχύων των φορτίων P_1 , P_2 και των λόγων μετασχηματισμού r_1 , r_2 των ΣΑΤΦ σε μεταξύ τους απεικόνιση.



Σχήμα 4.6.11 Μεταβολές ισχύος στα δύο φορτία P_1 και P_2



Σχήμα 4.6.12 Μεταβολές των δύο λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ r_1, r_2

4.6.3 Εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου και στα δύο ΣΑΤΦ για την ίδια τάση κατωφλιού

Σε αυτήν την εφαρμογή οι τάσεις πρωτεύοντος V_3 και V_5 των δύο ΣΑΤΦ είναι συγκρίσιμες, όπως και στην 2^η εφαρμογή. Οι τάσεις V_3 και V_5 περνούν ταυτόχρονα την τάση κατωφλιού $V_{L1}=V_{L2}=0.85$ α.μ. και επομένως αν χρησιμοποιηθεί μόνο το κριτήριο τάσεως πρωτεύοντος η αντιστροφή του ελέγχου θα ενεργοποιηθεί ταυτόχρονα και στα δύο ΣΑΤΦ. Ωστόσο, όπως και στην παράγραφο 4.6.3, μετά το πρώτο βήμα αντίστροφης λογικής θα αυξάνει μόνο το ΣΑΤΦ 1 το λόγο μετασχηματισμού του r_1 , ενώ το ΣΑΤΦ 2 θα παραμένει ακίνητο και η σχέση μετασχηματισμού r_2 σταθερή. Αυτό συμβαίνει επειδή η τάση στον πιο απομακρυσμένο ζυγό V_3 είναι χαμηλότερη από την τάση V_5 , ακόμα και αν το φορτίο στο ζυγό 5 είναι μεγαλύτερο, και άρα πέφτει πιο γρήγορα κάτω από την τιμή κατωφλιού.

Επομένως προκύπτει ότι το κριτήριο τάσεως με επιλογή ίδιων τιμών για την τάση κατωφλιού $V_{L1}=V_{L2}=0.85$ α.μ. δεν είναι επαρκές, αφού δεν εξασφαλίζει ότι η αντιστροφή θα γίνει στο κατάλληλο ΣΑΤΦ, ώστε να είναι αποτελεσματική και να σώσει το σύστημα.

4.6.4 Σύγκριση των δύο διαφορετικών επιλογών για την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου

Η κατάλληλη επιλογή του ΣΑΤΦ που θα αντιστραφεί σε αυτήν την περίπτωση είναι ξεκάθαρη: μόνο με αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 2 το σύστημα διαφυλάσσεται από την κατάρρευση για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, διατηρώντας σε αποδεκτές τιμές τάση δικτύου και ισχείς φορτίων. Και εδώ το φορτίο που τροφοδοτεί το ΣΑΤΦ σε αντιστροφή (ΣΑΤΦ 2) μειώνεται κατά ένα μέρος ΔP_2 σε σχέση με την αρχική ζήτηση, επιτρέποντας έτσι την πλήρη κάλυψη της ζήτησης στο άλλο φορτίο P_1 , όπως φαίνεται στα σχήματα 4.6.7, 4.6.8.

Αντίθετα η αντιστροφή του ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 δεν καταφέρνει να ανυψώσει την τάση δικτύου V_3 πάνω από την τιμή κατωφλιού $V_L=0.85$ α.μ. και έτσι απλά καθυστερεί για μικρό διάστημα την κατάρρευση.

Στην περίπτωση κανονικής λειτουργίας των ΣΑΤΦ, χωρίς αντιστροφή ελέγχου, το σύστημα οδηγείται σε αστάθεια τάσης και τα φορτία και οι τάσεις βυθίζονται συνεχώς.

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν καταγραφεί με περισσότερες λεπτομέρειες στον πίνακα 4.6.1.

Πίνακας 4.6.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις για την 3^η εφαρμογή

| Αντιστροφή ΣΑΤΦ | Αποτελέσματα της προσομοίωσης | Μη εξυπηρετηθέν φορτίο | Συμπέρασμα |
|------------------|---|---|--|
| ΣΑΤΦ 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Τάση δικτύου V_3 δεν κρατείται στην τιμή $V_L=0.85$ α.μ. - P_1 βυθίζεται με γρήγορο ρυθμό - $P_2 > 1.4$ α.μ. για περίπου 3500 sec μετά τη διαταραχή | Δεν έχει νόημα αφού δεν κρατούνται σταθερές τάσεις και φορτία | Αποτυχία. Δεν καταφέρνει να ανυψώσει καν την τάση δικτύου στην τιμή κατωφλιού |
| ΣΑΤΦ 2 | <ul style="list-style-type: none"> - Τάση δικτύου $V_3 \approx 0.85$ α.μ. για περίπου 5400 sec μετά τη διαταραχή - P_1 στην αρχική ζήτηση P_{o1} - $P_2 > 1.4$ α.μ. για περίπου 5500sec μετά τη διαταραχή | <ul style="list-style-type: none"> $\Delta P_1 = -0.0040$ α.μ. $\Delta P_2 = 0.4367$ α.μ. | Επιτυχής. Προφυλάσσει το σύστημα από κατάρρευση για αρκετά μεγάλο διάστημα |
| ΧΩΡΙΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ | <ul style="list-style-type: none"> Τάσεις και φορτία βυθίζονται μετά την υπερδιέγερση -Τάση δικτύου V_3 πέφτει κάτω από την τιμή 0.85 α.μ. μέσα σε 670 sec | | Κατάρρευση |

5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΜΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ

5.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΠΙΝΑΚΑ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΩΝ

5.1.1 Γενικά

Στο σύστημα με δύο ζυγούς φορτίου δεν είναι τόσο εύκολο να διαπιστωθεί αν το σύστημα βρίσκεται στην ευσταθή ή ασταθή περιοχή, επειδή υπάρχουν δύο μηχανισμοί ΣΑΤΦ και δύο μηχανισμοί επαναφοράς φορτίου που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο θα προσπαθήσουμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα για την ευστάθεια του συστήματος, χρησιμοποιώντας τον πίνακα ευαισθησιών $A=[\Delta V_i/\Delta r_j]$ που δίνει τη μεταβολή κάθε ελεγχόμενης από τα ΣΑΤΦ τάσης V_i για μία μεταβολή ενός λόγου μετασχηματισμού r_j και προκύπτει με γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από κάποιο σημείο λειτουργίας x_0 .

Στην ανάλυση αυτή πρέπει να προσέξουμε το εξής λεπτό σημείο: Δεν προσπαθούμε να διαπιστώσουμε αν το σύστημα είναι ευσταθές. Γνωρίζουμε ότι δεν μπορεί να αποκατασταθεί μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και το σύστημα είναι ασταθές, αφού η απαιτούμενη ζήτηση φορτίου βρίσκεται εκτός της οριακής καμπύλης μέγιστης φόρτισης του συστήματος μετά τη διαταραχή. Ουσιαστικά με την εύρεση του πίνακα ευαισθησιών A και την ανάλυση των ιδιοτιμών του εξετάζουμε αν οι μηχανισμοί ΣΑΤΦ λειτουργούν ευσταθώς, μεταβάλλοντας τις ελεγχόμενες από αυτούς τάσεις στην επιθυμητή κατεύθυνση. Αν θεωρήσουμε αυθαίρετα το σημείο εφαρμογής της γραμμικοποίησης x_0 ως σημείο ισορροπίας, ορίζοντας τις τάσεις αναφοράς και τη ζήτηση φορτίων ίδιες με τα αντίστοιχα μεγέθη στο σημείο x_0 , η ανάλυση των ιδιοτιμών θα μας δείξει αν το σημείο αυτό είναι ευσταθές ή ασταθές και ποια θα είναι η συμπεριφορά του συστήματος για μικρή απομάκρυνση από αυτό το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας. Το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας θα είναι ευσταθές αν όλες οι ιδιοτιμές του πίνακα ευαισθησιών είναι αρνητικές και ασταθές αν υπάρχει έστω και μία θετική ιδιοτιμή.

5.1.2 Γραμμικοποίηση συστήματος και εύρεση πίνακα ευαισθησιών

Στο μοντέλο του συστήματος που θα εφαρμόσουμε τη γραμμικοποίηση έχουμε κάνει ορισμένες παραδοχές για λόγους απλοποίησης. Έτσι αμελούμε την επαναφορά των φορτίων που ρυθμίζει τις αγωγιμότητες με πολύ αργό ρυθμό, θεωρώντας τις αγωγιμότητες σταθερές και ίσες με τις τιμές τους στο σημείο εφαρμογής της γραμμικοποίησης. Στο σύστημα επομένως θα επενεργούν μόνο οι μακροπρόθεσμες δυναμικές των μηχανισμών ΣΑΤΦ, για τους οποίους χρησιμοποιούμε το συνεχές μοντέλο, χωρίς τους περιορισμούς r^{\min} και r^{\max} στους λόγους μετασχηματισμού. Για την διέγερση της γεννήτριας E_q χρησιμοποιείται η σχέση (4.2.2α) που αντιστοιχεί σε αυτόματη ρύθμιση τάσεως ή (4.2.2β) που αντιστοιχεί σε περιορισμό υπερδιέγερσης, ανάλογα αν στο σημείο εφαρμογής η γεννήτρια βρίσκεται σε κατάσταση αυτομάτου ρύθμισης τάσης ή ελέγχου υπερδιέγερσης.

Στις εξισώσεις του μοντέλου συνεχούς χρόνου, που θα εφαρμόσουμε, συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις δικτύου (4.3.3)-(4.3.8) που δίνονται στην παράγραφο 4.3.2, οι εξισώσεις για τη διέγερση της γεννήτριας (4.2.1)-(4.2.2) και οι εξισώσεις συνεχούς μοντέλου των ΣΑΤΦ:

$$T_{r1} \cdot \dot{i}_1 = V_4 - V_{4ref} \quad (5.1.1)$$

$$T_{r2} \cdot \dot{i}_2 = V_6 - V_{6ref} \quad (5.1.2)$$

όπου οι χρονικές σταθερές T_{r1} , T_{r2} υπολογίζονται ως εξής: $T_{r,i}=T_{r0}=\Delta T_r \cdot d/\Delta r = 14.1 \text{ sec}$ και οι τάσεις αναφοράς είναι στο μέσο της νεκρής ζώνης.

Αν εφαρμοστεί αντίστροφος έλεγχος σε κάποιο ΣΑΤΦ η εξίσωση του ΣΑΤΦ αυτού αλλάζει σε μία από τις εξισώσεις:

$$T_{r1} \cdot \dot{i}_1 = V_{3ref} - V_3 \quad (5.1.3)$$

$$T_{r2} \cdot \dot{i}_2 = V_{5ref} - V_5 \quad (5.1.4)$$

Η σχέση (5.1.3) αντιστοιχεί σε αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1, ενώ η (5.1.4) σε αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2.

Η μακροπρόθεσμη δυναμική του συστήματος περιγράφεται από τις εξισώσεις των ΣΑΤΦ (5.1.1)-(5.1.4) μόνο, επειδή όπως αναφέρθηκε πιο πάνω στην ανάλυση αυτή θεωρούμε τις αργά μεταβαλλόμενες αγωγιμότητες σταθερές.

Οι εξισώσεις (5.1.1),(5.1.2) των ΣΑΤΦ για $\dot{i}_i = 0$ μας δίνουν τον πίνακα των συνθηκών ισορροπίας των μακροπρόθεσμων δυναμικών του συστήματος:

$$\mathbf{h}(\mathbf{V}) = \begin{bmatrix} V_4 - V_{4ref} \\ V_6 - V_{6ref} \end{bmatrix} \quad (5.1.5)$$

Ο πίνακας αυτός σε περίπτωση αντιστροφής κάποιου ΣΑΤΦ τροποποιείται σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.3.6.3-4).

Ο μη ελαττωμένος (17x17) μακροπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακας \mathbf{J}_1 του συστήματος των παραπάνω εξισώσεων είναι:

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{h}_v \\ \mathbf{f}_r & \mathbf{J}_s \end{bmatrix} \quad (5.1.6)$$

όπου:

\mathbf{h}_v ο πίνακας των μερικών παραγώγων των εξισώσεων του $\mathbf{h}(\mathbf{V})$ ως προς το διάνυσμα των μεταβλητών του συστήματος $\mathbf{x}=[V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, P_{g1}, E_q]$
 \mathbf{f}_r ο πίνακας των μερικών παραγώγων των βραχυπρόθεσμων εξισώσεων ισορροπίας (4.3.3)-(4.3.8) και (4.2.2)-(4.3.3) ως προς το διάνυσμα των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ $\mathbf{r}=[r_1, r_2]$

\mathbf{J}_s ο βραχυπρόθεσμος Ιακωβιανός πίνακα \mathbf{J}_s που είναι ο πίνακας μερικών παραγώγων των βραχυπρόθεσμων εξισώσεων ισορροπίας ως προς τις μεταβλητές του συστήματος \mathbf{x} .

Ο πίνακας ευαισθησιών $\mathbf{A}=[a_{ij}]=[\Delta V_i/\Delta r_j]$ δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{A} = -\mathbf{h}_v \cdot \mathbf{J}_s^{-1} \cdot \mathbf{f}_r \quad (5.1.7)$$

Ο ελαττωμένος πίνακας κατάστασης του μακροπρόθεσμου συστήματος συνδέεται με τον πίνακα ευαισθησιών με τη σχέση:

$$\mathbf{S} = \mathbf{T}_r^{-1} \cdot \mathbf{A} \quad (5.1.8)$$

όπου $\mathbf{T}_r = \begin{pmatrix} T_{r1} & 0 \\ 0 & T_{r2} \end{pmatrix} = T_{r0} \cdot \mathbf{I}_2$ ο πίνακας των σταθερών χρόνου

Και αυτός ο πίνακας βέβαια αντιστοιχεί στο απλοποιημένο σύστημα όπου οι αγωγιμότητες θεωρούνται αργά μεταβαλλόμενες παράμετροι και λαμβάνονται σταθερές.

Επειδή στην περίπτωση που εξετάζουμε οι χρονικές σταθερές στα δύο ΣΑΤΦ είναι ίσες, άρα ο πίνακας \mathbf{S} ισούται με τον \mathbf{A} πολλαπλασιασμένο με σταθερό αριθμό T_{r0}^{-1} , οι ιδιοτιμές των πινάκων θα έχουν την ίδια σχέση, δηλαδή:

$$\lambda_{s,i} = T_{r0}^{-1} \cdot \lambda_{A,i} \quad (5.1.9)$$

5.1.3 Αποτελέσματα γραμμικοποίησης και ανάλυσης του πίνακα ευαισθησιών σε κάθε μία από τις τρεις εφαρμογές στο σύστημα δύο φορτίων

- Εφαρμογή 1^η: $P_{o1}=1.8$ α.μ., $P_{o2}=0.9$ α.μ.

Η γραμμικοποίηση του συστήματος και ο υπολογισμός του πίνακα ευαισθησιών γίνεται δειγματοληπτικά γύρω από χαρακτηριστικά σημεία, όπου αλλάζει η κατάσταση του συστήματος, για παράδειγμα σε σημεία μεταγωγής της γεννήτριας από κατάσταση αυτομάτου ρύθμισης τάσης (ΑΡΤ) σε κατάσταση περιορισμού υπερδιέγερσης (ΠΥ) ή σε σημεία εφαρμογής του αντιστρόφου ελέγχου σε κάποιο από τα ΣΑΤΦ.

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.1.1 για εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 ή στο ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.1 Ανάλυση πίνακα ευαισθησιών για 1^η εφαρμογή

| Σημείο γραμμικοποίησης | Πίνακας ευαισθησιών $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Delta V_4/\Delta r_1 & \Delta V_4/\Delta r_2 \\ \Delta V_6/\Delta r_1 & \Delta V_6/\Delta r_2 \end{pmatrix}$ | Ιδιοτιμές πίνακα $\mathbf{S} = \mathbf{T}_{r0}^{-1} \cdot \mathbf{A}$ | Ιδιοδιανύσματα (δεξιά \mathbf{u}_i , αριστερά \mathbf{v}_i) ενδιαφέρουν μόνο σε περιπτώσεις θετικών ιδιοτιμών |
|--|---|--|--|
| Αμέσως μετά τη διαταραχή, $t=1000^+$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0.8997 & 0.0215 \\ 0.0726 & -0.9984 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0628$ $\lambda_2 = -0.0718$ | |
| Πριν την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1060^-$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0.9172 & 0.0218 \\ 0.0761 & -0.9974 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0638$ $\lambda_2 = -0.0719$ | |
| Μετά την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1060^+$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -0.1767 & 0.5220 \\ 1.1670 & -0.4914 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = 0.0491$ $\lambda_2 = -0.0714$ | $\mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} 0.7119 \\ 0.7023 \end{pmatrix}, \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} -0.4037 \\ 0.9149 \end{pmatrix}$ $\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} 0.9149 \\ 0.4037 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} -0.7023 \\ 0.7119 \end{pmatrix}$ |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 1 | | | |
| Πριν την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 $t=1210^-$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0.2412 & 0.5591 \\ 1.2415 & -0.4747 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = 0.0560$ $\lambda_2 = -0.0726$ | $\mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} 0.7136 \\ 0.7005 \end{pmatrix}, \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} -0.4043 \\ 0.9146 \end{pmatrix}$ $\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} 0.9146 \\ 0.4043 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} -0.7005 \\ 0.7136 \end{pmatrix}$ |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 $T=1210^+$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\Delta V_3/\Delta r_1 & -\Delta V_3/\Delta r_2 \\ \Delta V_6/\Delta r_1 & \Delta V_6/\Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.1475 & -0.5198 \\ 1.2355 & -0.4728 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0575 \pm 0.0516i$ | |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 2 | | | |
| Πριν την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 $t=1230^-$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0.2497 & 0.5636 \\ 1.2499 & -0.4721 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = 0.0569$ $\lambda_2 = -0.0727$ | $\mathbf{u}_1 = \begin{pmatrix} 0.7140 \\ 0.7002 \end{pmatrix}, \mathbf{u}_2 = \begin{pmatrix} -0.4044 \\ 0.9146 \end{pmatrix}$ $\mathbf{v}_1 = \begin{pmatrix} 0.9146 \\ 0.4044 \end{pmatrix}, \mathbf{v}_2 = \begin{pmatrix} -0.7002 \\ 0.7140 \end{pmatrix}$ |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 $T=1230^+$ sec | $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \Delta V_4/\Delta r_1 & \Delta V_4/\Delta r_2 \\ -\Delta V_5/\Delta r_1 & -\Delta V_5/\Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2647 & 0.5504 \\ -1.1390 & -0.4950 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0082 \pm 0.0493i$ | |

• **Εφαρμογή 2^η: Ρο1=1.2 α.μ., Ρο2=1.55 α.μ.**

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.1.2 για εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 ή στο ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.2 Ανάλυση του πίνακα ευαισθησιών για την 2^η εφαρμογή

| Σημείο γραμμικοποίησης | Πίνακας ευαισθησιών $A = \begin{pmatrix} \Delta V_4/\Delta r_1 & \Delta V_4/\Delta r_2 \\ \Delta V_6/\Delta r_1 & \Delta V_6/\Delta r_2 \end{pmatrix}$ | Ιδιοτιμές πίνακα $S = T_{r0}^{-1} \cdot A$ | Ιδιοδιανύσματα (δεξιά u_i , αριστερά v_i) ενδιαφέρουν μόνο σε περιπτώσεις θετικών ιδιοτιμών |
|---|--|--|--|
| Αμέσως μετά τη διαταραχή, $t=1000^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.9603 & 0.0419 \\ 0.0417 & -0.9792 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0657$ $\lambda_2 = -0.0718$ | |
| Πριν την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1290^-$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.9600 & 0.0420 \\ 0.0418 & -0.9790 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0657$ $\lambda_2 = -0.0718$ | |
| Μετά την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1290^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.2499 & 0.9413 \\ 0.7543 & -0.0761 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0716$ $\lambda_2 = 0.0485$ | $u_1 = \begin{pmatrix} -0.7780 \\ 0.6283 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 0.7098 \\ 0.7044 \end{pmatrix}$ $v_1 = \begin{pmatrix} -0.7044 \\ 0.7098 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0.6283 \\ 0.7780 \end{pmatrix}$ |
| Πριν την αντιστροφή κάποιου ΣΑΤΦ $t=1470^-$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.2080 & 1.0166 \\ 0.8134 & -0.0232 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0730$ $\lambda_2 = 0.0566$ | $u_1 = \begin{pmatrix} -0.7777 \\ 0.6286 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 0.7106 \\ 0.7036 \end{pmatrix}$ $v_1 = \begin{pmatrix} -0.7036 \\ 0.7106 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0.6286 \\ 0.7777 \end{pmatrix}$ |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 1 | | | |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 $T=1470^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -\Delta V_3/\Delta r_1 & -\Delta V_3/\Delta r_2 \\ \Delta V_6/\Delta r_1 & \Delta V_6/\Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.7317 & -0.9330 \\ 0.7999 & -0.0100 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0263 \pm 0.0557i$ | |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 2 | | | |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 $t=1470^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} \Delta V_4/\Delta r_1 & \Delta V_4/\Delta r_2 \\ -\Delta V_5/\Delta r_1 & -\Delta V_5/\Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.1981 & 1.0046 \\ -0.7514 & -0.9057 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0391 \pm 0.0563i$ | |

• **Εφαρμογή 3^η: Ρο1=0.9 α.μ., Ρο2=1.85 α.μ.**

Τα αποτελέσματα δίνονται στον πίνακα 5.1.3 για εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 ή στο ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1.3 Ανάλυση του πίνακα ευαισθησιών για την 3^η εφαρμογή

| Σημείο γραμμικοποίησης | Πίνακας ευαισθησιών $A = \begin{pmatrix} \partial V_4 / \partial r_1 & \partial V_4 / \partial r_2 \\ \partial V_6 / \partial r_1 & \partial V_6 / \partial r_2 \end{pmatrix}$ | Ιδιοτιμές πίνακα $S = T_{r0}^{-1} \cdot A$ | Ιδιοδιανύσματα (δεξιά u_i , αριστερά v_i) ενδιαφέρουν μόνο σε περιπτώσεις θετικών ιδιοτιμών |
|---|--|--|--|
| Αμέσως μετά τη διαταραχή, $t=1000^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.9833 & 0.0524 \\ 0.0284 & -0.9679 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0720$ $\lambda_2 = -0.0664$ | |
| Πριν την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1030^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.9833 & 0.0524 \\ 0.0284 & -0.9679 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0720$ $\lambda_2 = -0.0664$ | |
| Μετά την ενεργοποίηση του ΠΥ $t=1030^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.4530 & 1.1378 \\ 0.5583 & -0.1174 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0719$ $\lambda_2 = 0.0481$ | $u_1 = \begin{pmatrix} -0.8968 \\ 0.4424 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 0.7090 \\ 0.7052 \end{pmatrix}$ $v_1 = \begin{pmatrix} -0.7052 \\ 0.7090 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0.4424 \\ 0.8968 \end{pmatrix}$ |
| Πριν την αντιστροφή κάποιου ΣΑΤΦ $t=1670^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -0.4248 & 1.2274 \\ 0.6045 & 0.1858 \end{pmatrix}$ | $\lambda_1 = -0.0733$ $\lambda_2 = 0.0563$ | $u_1 = \begin{pmatrix} -0.8959 \\ 0.4442 \end{pmatrix}, u_2 = \begin{pmatrix} 0.7095 \\ 0.7047 \end{pmatrix}$ $v_1 = \begin{pmatrix} -0.7047 \\ 0.7095 \end{pmatrix}, v_2 = \begin{pmatrix} 0.4442 \\ 0.8959 \end{pmatrix}$ |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 1 | | | |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 $T=1670^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} -\Delta V_3 / \Delta r_1 & -\Delta V_3 / \Delta r_2 \\ \Delta V_6 / \Delta r_1 & \Delta V_6 / \Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.5396 & -1.1197 \\ 0.5912 & 0.2003 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0120 \pm 0.0514i$ | |
| ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΟ ΣΑΤΦ 2 | | | |
| Μετά την αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 $t=1670^+$ sec | $A = \begin{pmatrix} \Delta V_4 / \Delta r_1 & \Delta V_4 / \Delta r_2 \\ -\Delta V_5 / \Delta r_1 & -\Delta V_5 / \Delta r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.4211 & 1.2196 \\ -0.5621 & -1.0953 \end{pmatrix}$ | $\lambda_{1,2} = -0.0538 \pm 0.0536i$ | |

Όπως φαίνεται σε όλες τις εφαρμογές τα ΣΑΤΦ αρχικά μετά τη διαταραχή λειτουργούν ευσταθώς, αφού οι πίνακες S έχουν αρνητικές ιδιοτιμές, μέχρι το σημείο εφαρμογής του ελέγχου υπερδιέγερσης. Τότε αλλάζει μία από τις σχέσεις του συστήματος, η (4.2.2α) σε (4.2.2β), και ο πίνακας ευαισθησιών μεταβάλλεται και αποκτά μια θετική ιδιοτιμή. Η λειτουργία των ΣΑΤΦ θα έχει το αντίθετο από το επιθυμητό αποτέλεσμα, απομακρύνοντας το σύστημα αντί να το επαναφέρει, όπως εξάλλου έχει φανεί και από τις προσομοιώσεις της παραγράφου 4.3.3.

Στη συνέχεια η εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου επαναφέρει τα ΣΑΤΦ σε ευσταθή λειτουργία, εισάγει όμως ταλαντώσεις στην επαναφορά του συστήματος στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας αφού εμφανίζονται μιγαδικές ιδιοτιμές.

Οι πίνακες ευαισθησιών A επιπλέον βοηθούν στην κατανόηση των αποτελεσμάτων που προκαλούν οι μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού των ΣΑΤΦ στις ελεγχόμενες από αυτά τάσεις, επειδή για μικρές μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού Δr_i μπορούμε να θεωρήσουμε:

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{r} \quad (5.1.10)$$

όπου \mathbf{V} το διάνυσμα των ελεγχόμενων από τα ΣΑΤΦ τάσεων.

Επίσης μπορούμε από τον πίνακα A να διαπιστώσουμε πόσο ισχυρή είναι η επίδραση ενός ΣΑΤΦ, καθώς κάθε στήλη του πίνακα αντιστοιχεί στις μεταβολές των τάσεων που θα προέκυπταν από μια μοναδιαία μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού r_i ενός από τα δύο ΣΑΤΦ.

5.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΣΑΤΦ ΓΙΑ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΕΛΕΓΧΟΥ

5.2.1 Επιλογή του ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί με χρήση του πίνακα ευαισθησιών A

Ο πίνακας ευαισθησιών A μπορεί να μας υποδείξει τη σωστή επιλογή του ΣΑΤΦ στο οποίο θα αντιστρέψουμε τον έλεγχο της τάσης. Χρησιμοποιούμε τα ακόλουθα κριτήρια:

- **Κριτήριο 1^ο: Άθροισμα στηλών του πίνακα A (χωρίς υπολογισμό ιδιοτιμών)**

Το πρώτο κριτήριο εφαρμόζεται στον πίνακα που προκύπτει με γραμμικοποίηση στο σημείο λειτουργίας πριν την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου. Για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις τα σημεία αυτά είναι σε χρόνους $t_1=1230\text{sec}$, $t_2=1470\text{sec}$, $t_3=1670\text{sec}$ και οι αντίστοιχοι πίνακες είναι:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0.2497 & 0.5636 \\ 1.2499 & -0.4721 \end{pmatrix}, A_2 = \begin{pmatrix} -0.2080 & 1.0166 \\ 0.8134 & -0.0232 \end{pmatrix}, A_3 = \begin{pmatrix} -0.4248 & 1.2274 \\ 0.6045 & 0.1858 \end{pmatrix}$$

Για κάθε στήλη j υπολογίζουμε το άθροισμα των στοιχείων της που προκύπτει ως εξής:

$$n_j = \alpha_{jj} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^k |\alpha_{ij}| \quad (5.2.1a)$$

Το άθροισμα αυτό αντιστοιχεί στο ΣΑΤΦ με λόγο μετασχηματισμού r_j . Επειδή ο πίνακας αναφέρεται στις ευαισθησίες για τα δύο ΣΑΤΦ που κατά την κανονική τους λειτουργία έχουν ασταθή επίδραση το ένα στο άλλο, τα στοιχεία α_{ij} , $i \neq j$ είναι πάντα θετικά. Επομένως μπορούμε να αφαιρέσουμε την απόλυτο τιμή και το n_j να γραφεί ως αλγεβρικό άθροισμα των στοιχείων της στήλης j :

$$n_j = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta V_i}{\Delta r_j} \quad (5.2.1b)$$

Το ΣΑΤΦ στο οποίο αντιστοιχεί μεγαλύτερο αλγεβρικό άθροισμα n_j συμβάλλει περισσότερο στην αστάθεια και η αντιστροφή είναι προτιμότερο να γίνει στο ΣΑΤΦ αυτό [6].

Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο έχουμε για την κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πίνακα 5.2.1:

Πίνακας 5.2.1 Επιλογή του ΣΑΤΦ που θα αντιστραφεί με κριτήριο αθροίσματος στηλών

| Εφαρμογές | Άθροισμα στήλης 1 (n_1) | Άθροισμα στήλης 2 (n_2) | Επιλεγόμενο ΣΑΤΦ για αντίστροφη |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 ^η εφαρμογή | 1.4996 | 0.0915 | ΣΑΤΦ 1 |
| 2 ^η εφαρμογή | 0.6054 | 0.9934 | ΣΑΤΦ 2 |
| 3 ^η εφαρμογή | 0.1797 | 1.4132 | ΣΑΤΦ 2 |

Και με το κριτήριο αυτό, όπως και στην παράγραφο 4.5, η επιλογή στη δεύτερη εφαρμογή είναι δυσκολότερη, αφού η διαφορά των αθροισμάτων είναι αρκετά μικρή.

• **Κριτήριο 2ο: Αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ασταθή ιδιοτιμή**

Το κριτήριο του αριστερού ιδιοδιανύσματος του πίνακα ευαισθησιών εφαρμόζεται στο σημείο πριν την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου, όπως και πριν. Το αριστερό ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην θετική (ασταθή) ιδιοτιμή εκφράζει το συνδυασμό των μεταβλητών κατάστασης που διεγείρει τον ασταθή ρυθμό απόκρισης του συστήματος. Δηλαδή το i -οστό στοιχείο του αριστερού ιδιοδιανύσματος μετρά την επίδραση της μεταβλητής x_i στον ασταθή ρυθμό απόκρισης. Έτσι μελετώντας τα αριστερά ιδιοδιανύσματα μπορούμε να διαπιστώσουμε ποιο ΣΑΤΦ διεγείρει περισσότερο τον ασταθή ρυθμό απόκρισης, στο οποίο θα πρέπει να επέμβουμε με την αντιστροφή του ελέγχου του για να αποφύγουμε την αστάθεια τάσης. Η αντιστροφή του ελέγχου θα πρέπει να γίνει στο ΣΑΤΦ που αντιστοιχεί σε μεγαλύτερο στοιχείο στο αριστερό ιδιοδιάνυσμα της ασταθούς ιδιοτιμής.

Εναλλακτικά αντί για το αριστερό ιδιοδιάνυσμα της ασταθούς ιδιοτιμής μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους συντελεστές συμμετοχής των μεταβλητών κατάστασης στον ασταθή ρυθμό απόκρισης, οι οποίοι επιπλέον είναι αδιάστατοι. Ο συντελεστής συμμετοχής $p_{\lambda+,i}$ για την i -οστή μεταβλητή κατάστασης προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το i -οστό στοιχείο του δεξιού ιδιοδιανύσματος με το i -οστό του αριστερού ιδιοδιανύσματος της θετικής ιδιοτιμής, δηλαδή είναι: $p_{\lambda+,i} = u_{\lambda+}(i) \cdot v_{\lambda+}(i)$. Επιλέγεται να γίνει η αντιστροφή στο ΣΑΤΦ για το οποίο η τιμή του συντελεστή συμμετοχής είναι μεγαλύτερη.

Τα αποτελέσματα του κριτηρίου αυτού για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτισης δίνονται στον πίνακα 5.2.2:

Πίνακας 5.2.2 Επιλογή του ΣΑΤΦ για αντιστροφή με το κριτήριο του αριστερού ιδιοδιανύσματος ή του συντελεστή συμμετοχής της ασταθούς ιδιοτιμής

| Εφαρμογές | Σημείο εφαρμογής | Αριστερό ιδιοδιάνυσμα ασταθούς ιδιοτιμής | Πίνακας συντελεστών συμμετοχής για ασταθή ιδιοτιμή | Επιλεγόμενος ΣΑΤΦ για αντιστροφή |
|-------------------------|-------------------|---|---|----------------------------------|
| 1 ^η εφαρμογή | $t_1=1230$ sec | $v_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.9146 \\ 0.4044 \end{pmatrix}$ | $p_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.6530 \\ 0.2832 \end{pmatrix}$ | ΣΑΤΦ 1 |
| 2 ^η εφαρμογή | $t_2=1470$ sec | $v_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.6286 \\ 0.7777 \end{pmatrix}$ | $p_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.4467 \\ 0.5472 \end{pmatrix}$ | ΣΑΤΦ 2 |
| 3 ^η εφαρμογή | $t_3=1670$ sec | $v_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.4442 \\ 0.8959 \end{pmatrix}$ | $p_{\lambda+} = \begin{pmatrix} 0.3152 \\ 0.6313 \end{pmatrix}$ | ΣΑΤΦ 2 |

Στην 2^η εφαρμογή η διαφορά των στοιχείων είναι πολύ μικρή και άρα η επιλογή μεταξύ των δύο ΣΑΤΦ είναι δυσκολότερη.

• **Κριτήριο 3ο: Ιδιοτιμές πίνακα ευαισθησιών A μετά την αντιστροφή των ΣΑΤΦ**

Στην περίπτωση αυτή υπολογίζουμε τον πίνακα ευαισθησιών A που προκύπτει μετά την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου σε κάθε ΣΑΤΦ. Ο έλεγχος των ιδιοτιμών του πίνακα του συστήματος $S = T_r^{-1} \cdot A$ περιλαμβάνει δύο σημεία : α) ελέγχουμε αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος, ώστε να έχουμε ευστάθεια και β) υπολογίζουμε το λόγο απόσβεσης των ταλαντώσεων που δημιουργεί κάθε ζεύγος μιγαδικών ιδιοτιμών.

Ο λόγος απόσβεσης για μιγαδικές ιδιοτιμές $-a \pm \beta i$ προκύπτει από τη σχέση:

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_n} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (5.2.2)$$

Η καλύτερη επιλογή του ΣΑΤΦ αντιστροφής αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο λόγο απόσβεσης, αφού σε αυτήν την περίπτωση θα έχουμε μικρότερες ταλαντώσεις κατά την επαναφορά στο σημείο ισορροπίας. Αποδεκτή τιμή για το ζ είναι για παράδειγμα $\zeta > 0.5$, ώστε οι ταλαντώσεις που παρουσιάζονται να είναι σχετικά μικρές.

Το παραπάνω κριτήριο εφαρμόζεται στον πίνακα 5.2.3 για την αξιολόγηση της κάθε εφαρμογής αντιστροφής ΣΑΤΦ στις τρεις περιπτώσεις φόρτισης του συστήματος.

Πίνακας 5.2.3 Επιλογή ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί με ανάλυση ιδιοτιμών πίνακα ευαισθησιών μετά την αντιστροφή κάθε ΣΑΤΦ

| Εφαρμογές | ΣΑΤΦ αντιστρόφου ελέγχου | Ιδιοτιμές πίνακα S | Λόγος απόσβεσης ζ | Βέλτιστη επιλογή ΣΑΤΦ για αντιστροφή |
|-------------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1 ^η εφαρμογή | ΣΑΤΦ 1 | $\lambda_{1,2} = -0.0575 \pm 0.0516i$ | 0.7443 | όλα ευσταθή ΣΑΤΦ 1 |
| | ΣΑΤΦ 2 | $\lambda_{1,2} = -0.0082 \pm 0.0493i$ | 0.1641 | |
| 2 ^η εφαρμογή | ΣΑΤΦ 1 | $\lambda_{1,2} = -0.0263 \pm 0.0557i$ | 0.4270 | όλα ευσταθή ΣΑΤΦ 2 |
| | ΣΑΤΦ 2 | $\lambda_{1,2} = -0.0391 \pm 0.0563i$ | 0.5704 | |
| 3 ^η εφαρμογή | ΣΑΤΦ 1 | $\lambda_{1,2} = -0.0120 \pm 0.0514i$ | 0.2273 | όλα ευσταθή ΣΑΤΦ 2 |
| | ΣΑΤΦ 2 | $\lambda_{1,2} = -0.0538 \pm 0.0536i$ | 0.7084 | |

Όπως φαίνεται από τους πίνακες 5.2.1-5.2.3 η εφαρμογή οποιουδήποτε από τα τρία κριτήρια έχει τα ίδια αποτελέσματα για κάθε περίπτωση φόρτισης.

Η επιλογή του ΣΑΤΦ που πρέπει να αντιστραφεί είναι ξεκάθαρη στις εφαρμογές 1 και 3, όπου το ένα φορτίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το άλλο (σχεδόν διπλάσιο), αφού τα μεγέθη που ελέγχουν τα τρία κριτήρια έχουν μεγάλη διαφορά τιμών για τα δύο ΣΑΤΦ. Η αντιστροφή πρέπει να γίνει στο ΣΑΤΦ που τροφοδοτεί το ισχυρό φορτίο, το οποίο είναι το ΣΑΤΦ 1 στην 1^η εφαρμογή και το ΣΑΤΦ 2 στην 3^η εφαρμογή. Η σωστή επιλογή για την αντιστροφή ελέγχου εξάλλου φαίνεται και από τις προσομοιώσεις στις παραγράφους 4.4 - 4.6, αφού στις δύο περιπτώσεις αυτές η αντιστροφή του ΣΑΤΦ στο πιο μικρό φορτίο δεν καταφέρνει καν να επαναφέρει την τάση δικτύου στην τάση κατωφλιού.

Στη 2^η εφαρμογή φόρτισης, όπου τα φορτία στους δύο ζυγούς δεν έχουν ιδιαίτερα μεγάλη διαφορά στη ζητούμενη ισχύ (η ισχύς του μακρινού φορτίου P_1 είναι λίγο μικρότερη από την ισχύ του κοντινού φορτίου P_2 , $P_{o1}=1.2$ α.μ., $P_{o2}=1.55$ α.μ.), η επιλογή του ΣΑΤΦ για την αντιστροφή είναι πιο δύσκολη. Σύμφωνα με τα παραπάνω αναφερόμενα κριτήρια είναι προτιμότερη η αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 στο φορτίο P_2 , αν και η διαφορά μεταξύ των ελεγχόμενων από τα κριτήρια μεγεθών είναι πολύ μικρή. Αν βέβαια θεωρήσουμε αποδεκτή τιμή του ζ στο 3^ο κριτήριο όπως αναφέρθηκε παραπάνω $\zeta > 0.5$, ο πίνακας κατάστασης με αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 1 δεν πληροί αυτήν την απαίτηση.

Από τις προσομοιώσεις και από τον συνοπτικό πίνακα στην παράγραφο 4.5, η αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 φαίνεται να έχει καλύτερα αποτελέσματα ως προς το μη-εξυπηρετηθέν φορτίο, τις τιμές των τάσεων και το χρονικό διάστημα διατήρησης του συστήματος από κατάρρευση, όμως δημιουργεί έντονες ταλαντώσεις στην απόκριση του συστήματος.

Η διαφορετική συμπεριφορά του συστήματος σε αυτήν την ιδιαίτερη περίπτωση οφείλεται κυρίως σε μη γραμμικότητες που δεν λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση του πίνακα ευαισθησιών, αλλά επιδρούν στο μοντέλο του συστήματος. Τέτοιες μη γραμμικότητες εισάγονται από το διακριτό μοντέλο των ΣΑΤΦ που περιλαμβάνει περιοχή νεκρής ζώνης και συγκεκριμένα όρια ρύθμισης του λόγου μετασχηματισμού $[r^{\min}, r^{\max}]$. Εξάλλου στην ανάλυση ιδιοτιμών του πίνακα ευαισθησιών έχει αμεληθεί και ο μηχανισμός επαναφοράς των φορτίων, που μεταβάλλει τις αγωγιμότητες.

Βέβαια στην δεύτερη περίπτωση και οι δύο αντιστροφές του ΣΑΤΦ 1 ή του ΣΑΤΦ 2 έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, οπότε τελικά δεν έχει πολύ μεγάλη σημασία ποιο ΣΑΤΦ θα επιλεγεί για να αντιστραφεί. Η πιο σίγουρη επιλογή ωστόσο είναι αυτή του ΣΑΤΦ 2, όπου τα ΣΑΤΦ λειτουργούν με μεγαλύτερη ευστάθεια.

5.2.2 Σύγκριση της απόκρισης μετά από μικρή διαταραγή στο χώρο καταστάσεων για κάθε περίπτωση αντιστροφής

Για την καλύτερη κατανόηση του 3^{ου} κριτηρίου μελετάμε την εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων, μετά από μια μικρή απομάκρυνση από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας. Γίνονται και πάλι οι ίδιες παραδοχές: αμελείται η ρύθμιση επαναφοράς του φορτίου, χρησιμοποιείται το συνεχές μοντέλο για τους μηχανισμούς ΣΑΤΦ, ενώ η γεννήτρια τίθεται σε κατάσταση ΠΥ, εφόσον μας ενδιαφέρει η συμπεριφορά μετά την υπερδιέγερση.

Χρησιμοποιούμε το σημείο λειτουργίας του συστήματος πριν την εφαρμογή αντιστροφής ελέγχου σε κάποιο ΣΑΤΦ, το οποίο είναι σε χρόνους $t_1=1230$ sec, $t_2=1470$ sec, $t_3=1670$ sec αντίστοιχα για την κάθε περίπτωση. Το σημείο αυτό θεωρείται αυθαίρετα σημείο ισορροπίας και οι τάσεις αναφοράς ορίζονται στις τιμές που έχουν οι τάσεις και οι ισχύεις φορτίων στο συγκεκριμένο αυτό σημείο. Οι αγωγιμότητες G_1 , G_2 έχουν σταθερή τιμή ίση με αυτή στο υποθετικό σημείο ισορροπίας.

Εξετάζουμε τη απόκριση του συστήματος που μοντελοποιείται με τις εξισώσεις (4.3.3)-(4.3.8), (4.2.1)-(4.2.2) και (5.1.1)-(5.1.4), αν το σημείο λειτουργίας απομακρυνθεί λίγο από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, με μείωση και των δύο λόγων μετασχηματισμού r_1 , r_2 κατά ποσότητα 0.005.

Η συμπεριφορά αυτή απεικονίζεται στο χώρο καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ για εφαρμογή αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 1, στο ΣΑΤΦ 2 και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ χωρίς αντιστροφή.

• **Εφαρμογή 1^η: $P_{o1}=1.8$ α.μ., $P_{o2}=0.9$ α.μ.**

Εν δυνάμει σημείο ισορροπίας θεωρείται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_1=1230$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις τιμές που δίνονται στον πίνακα 5.2.4:

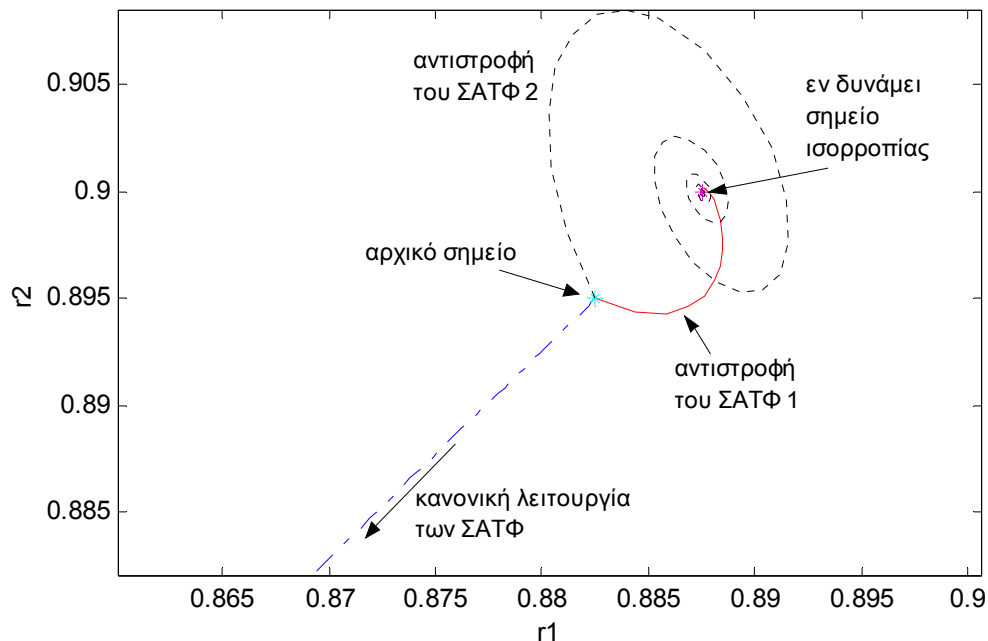
Πίνακας 5.2.4 Μεταβλητές συστήματος στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας

| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.8875 | 0.9 | 1.7398 | 0.8600 | 0.8273 | 0.9299 | 0.8420 | 0.9411 | 1.5045 | 0.7513 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Επομένως οι τάσεις αναφοράς τίθενται στις τιμές $V_{4ref}=V_4$, $V_{6ref}=V_6$ και $V_{3ref}=V_3$, $V_{5ref}=V_5$ για αντιστροφή κάποιου από τα ΣΑΤΦ 1 ή ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα. Ως αρχικό σημείο θεωρούμε το σημείο που προκύπτει με μείωση των λόγων μετασχηματισμού στις τιμές $r_1=0.8825$, $r_2=0.8950$ και έχει απομακρυνθεί λίγο από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας.

Η εξέλιξη του συστήματος μετά από την απομάκρυνση αυτή από το σημείο ισορροπίας απεικονίζεται στο χώρο καταστάσεων στο σχήμα 5.2.1 για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.2.1 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων για κάθε περίπτωση αντιστροφής ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ

Στο διάγραμμα του χώρου καταστάσεων φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις αντιστροφής το σύστημα επανέρχεται στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, άρα το σύστημα με αντεστραμμένο ένα από τα δύο ΣΑΤΦ είναι ευσταθές. Ωστόσο στην περίπτωση αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 2 δημιουργούνται ταλαντώσεις και η επαναφορά του συστήματος γίνεται σε αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Αν τα ΣΑΤΦ δεν

έχουν αντιστραφεί και λειτουργούν κανονικά το σύστημα είναι ασταθές και απομακρύνεται συνεχώς από το σημείο ισορροπίας.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το διάγραμμα συμφωνούν πλήρως με την ανάλυση ιδιοτιμών που έχει γίνει για αυτήν την εφαρμογή.

• **Εφαρμογή 2^η: $P_{o1}=1.2$ α.μ., $P_{o2}=1.55$ α.μ.**

Εν δυνάμει σημείο ισορροπίας θεωρείται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_1=1470$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις τιμές που δίνονται στον πίνακα 5.2.5:

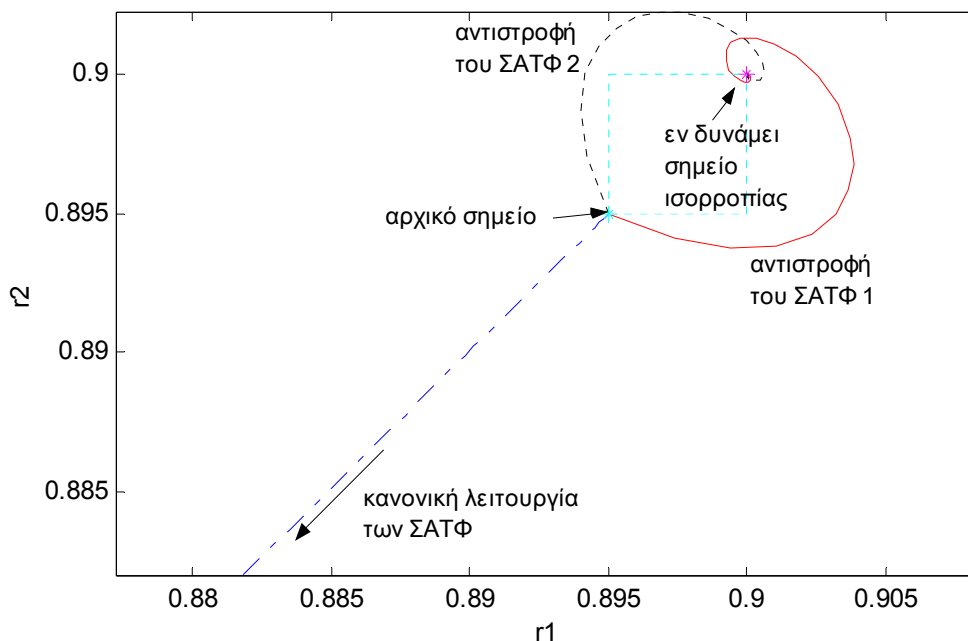
Πίνακας 5.2.5 Μεταβλητές συστήματος στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας

| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9 | 0.9 | 1.1513 | 1.4856 | 0.8430 | 0.9356 | 0.8493 | 0.9384 | 1.0079 | 1.3156 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Οι τάσεις αναφοράς τίθενται στις τιμές $V_{4ref}=V_4$, $V_{6ref}=V_6$ και $V_{3ref}=V_3$, $V_{5ref}=V_5$ για αντιστροφή κάποιου από τα ΣΑΤΦ 1 ή ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα. Ως αρχικό σημείο ορίζεται το σημείο που προκύπτει με μείωση των λόγων μετασχηματισμού στις τιμές $r_1=0.8950$, $r_2=0.8950$.

Η συμπεριφορά του συστήματος μετά από την απομάκρυνση αυτή από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας απεικονίζεται στο χώρο καταστάσεων στο σχήμα 5.2.2 για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.2.2 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων για κάθε περίπτωση αντιστροφής ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ

Στο διάγραμμα του χώρου καταστάσεων φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις αντιστροφής το σύστημα επανέρχεται στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας, μετά βέβαια από μικρή ταλάντωση, άρα το σύστημα με αντεστραμμένο ένα από τα δύο ΣΑΤΦ είναι ευσταθές. Η διαφορά στη συμπεριφορά του συστήματος για τις δύο περιπτώσεις

αντιστροφής είναι οριακή. Η ταλάντωση είναι λίγο μεγαλύτερη για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1.

Αν τα ΣΑΤΦ δεν έχουν αντιστραφεί και λειτουργούν κανονικά το σύστημα απομακρύνεται συνεχώς από το σημείο ισορροπίας, άρα τα ΣΑΤΦ λειτουργούν ασταθώς.

Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την ανάλυση ιδιοτιμών που έχει γίνει για αυτήν την εφαρμογή.

• **Εφαρμογή 3^η: $P_{o1}=0.9$ α.μ., $P_{o2}=1.85$ α.μ.**

Ως εν δυνάμει σημείο ισορροπίας λαμβάνεται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_1=1670$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις ακόλουθες τιμές του πίνακα 5.2.6:

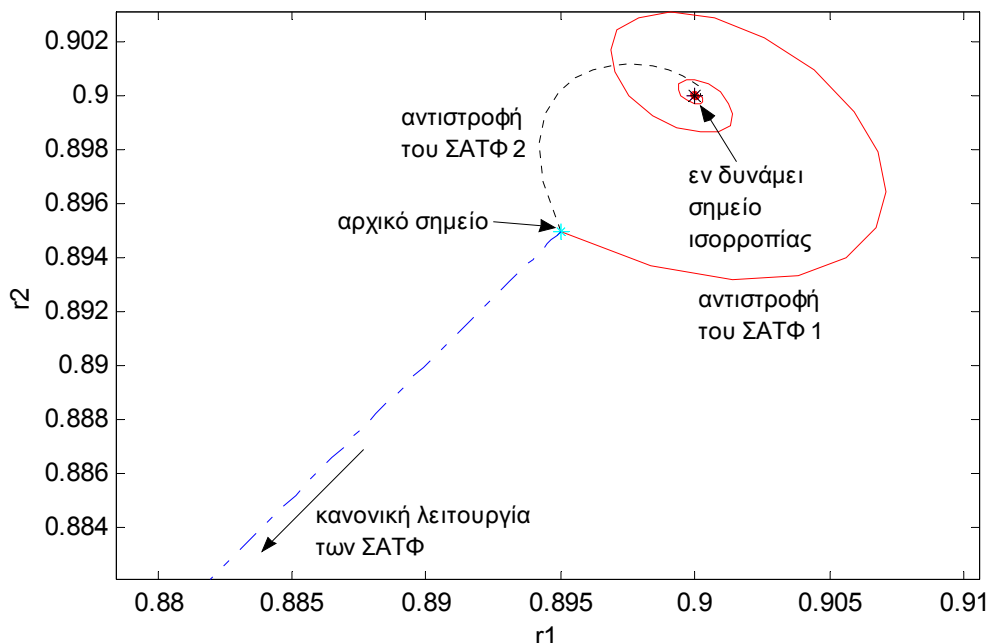
Πίνακας 5.2.6 Μεταβλητές συστήματος στο εν δυνάμει σημείο ισορροπίας

| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9 | 0.9 | 0.8626 | 1.7816 | 0.8443 | 0.9376 | 0.8479 | 0.9384 | 0.7582 | 1.5687 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Οι τάσεις αναφοράς τίθενται στις τιμές $V_{4ref}=V_4$, $V_{6ref}=V_6$ και $V_{3ref}=V_3$, $V_{5ref}=V_5$ για αντιστροφή κάποιου από τα ΣΑΤΦ 1 ή ΣΑΤΦ 2 αντίστοιχα. Ως αρχικό σημείο ορίζεται το σημείο που προκύπτει με μείωση των λόγων μετασχηματισμού στις τιμές $r_1=0.8950$, $r_2=0.8950$.

Η συμπεριφορά του συστήματος μετά την απομάκρυνση από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας απεικονίζεται στο χώρο καταστάσεων στο σχήμα 5.2.3 για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.2.3 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων για κάθε περίπτωση αντιστροφής ΣΑΤΦ και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2.3 και στις δύο περιπτώσεις αντιστροφής ΣΑΤΦ έχουμε ευστάθεια, αφού το σύστημα μετά τη διαταραχή επανέρχεται στο εν δυνάμει

σημείο ισορροπίας. Ωστόσο στην περίπτωση αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 1, το σύστημα καταλήγει σε ισορροπία μετά από αρκετές ταλαντώσεις, ενώ με αντιστροφή στο ΣΑΤΦ 2 η ταλάντωση είναι πολύ μικρή.

Αν δεν εφαρμοστεί αντιστροφή σε κανένα από τα δύο ΣΑΤΦ, το σύστημα απομακρύνεται από το εν δυνάμει σημείο ισορροπίας και πέφτει σε αστάθεια.

Η συμπεριφορά στο χώρο καταστάσεων είναι η αναμενόμενη από την ανάλυση ιδιοτιμών.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΧΡΟΝΟΥ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ

5.3.1 Γενικά

Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε τη συμπεριφορά του συστήματος μετά τη διαταραχή που εισάγει η απώλεια της γραμμής 2-3 (βλέπε παράγραφο 4.3.2), αν χρησιμοποιηθούν συνεχή μοντέλα για τα μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Συγκεκριμένα το μοντέλο που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει τις εξισώσεις δικτύου και τις εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων (4.3.3.)-(4.3.8) και (4.2.1)-(4.2.2), όπως και στην προσομοίωση, ενώ τα μοντέλα για το μηχανισμό των ΣΑΤΦ και για τη δυναμική της επαναφοράς των φορτίων είναι συνεχή όπως δίνονται παρακάτω:

Εξισώσεις των ΣΑΤΦ

$$T_{r1} \cdot \dot{i}_1 = V_4 - V_{4ref} \quad (5.3.1)$$

$$T_{r1} \cdot \dot{i}_1 = V_6 - V_{6ref} \quad (5.3.2)$$

$$T_{r1} \cdot \dot{i}_1 = V_{3ref} - V_3 \quad (5.3.3)$$

$$T_{r2} \cdot \dot{i}_2 = V_{5ref} - V_5 \quad (5.3.4)$$

Οι εξισώσεις (5.3.1) και (5.3.2) αντιστοιχούν σε κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ, ενώ η (5.3.3) σε αντιστροφή του ΣΑΤΦ1 και η (5.3.4) σε αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2.

Εξισώσεις αυτοεπαναφοράς φορτίων

$$T_{G1} \cdot \dot{G}_1 = P_{o1} - G_1 \cdot V_4^2 \quad (5.3.5)$$

$$T_{G2} \cdot \dot{G}_2 = P_{o2} - G_2 \cdot V_6^2 \quad (5.3.6)$$

όπου οι χρονικές σταθερές είναι:

$$T_{r,i} = \Delta T_r \cdot d / \Delta r = 14.1 \text{ sec}$$

$$T_{G1} = T_{G2} = \Delta T_G / r_G = 2000 \text{ sec}$$

Οι τάσεις αναφοράς V_{4ref} , V_{6ref} και η ζήτηση ισχύος των φορτίων P_{o1} , P_{o2} έχουν ίδιες τιμές με τις αντίστοιχες των προσομοιώσεων που δίνονται στον πίνακα 4.3.2. Σε περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ οι τάσεις αναφοράς παίρνουν την τιμή της τάσης κατωφλιού V_L , δηλαδή $V_{3ref}, V_{5ref} = 0.85$ α.μ. Στο συνεχές μοντέλο οι σχέσεις μετασχηματισμού r_1, r_2 δεν περιορίζονται από τα όρια r^{min} και r^{max} .

Δεν εφαρμόζουμε το συνεχές μοντέλο αμέσως μετά τη διαταραχή, αλλά στο σημείο που και οι δύο τάσεις πρωτεύοντος V_3 και V_5 έχουν πέσει κάτω από την τιμή κατωφλιού και ενεργοποιείται ο αντίστροφος έλεγχος των ΣΑΤΦ. Το αρχικό αυτό σημείο λαμβάνεται από τις προσομοιώσεις και αντιστοιχεί σε χρόνους $t_1=1230$ sec, $t_2=1470$ sec, $t_3=1670$ sec για τις τρεις εφαρμογές φόρτισης.

Η εξέλιξη του συστήματος για κάθε περίπτωση αντιστροφής ΣΑΤΦ απεικονίζεται στους χώρους των μεταβλητών καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ και $\{G_1, G_2\}$.

5.3.2 Εφαρμογή 1η: $P_{o1}=1.8$ α.μ., $P_{o2}=0.9$ α.μ.

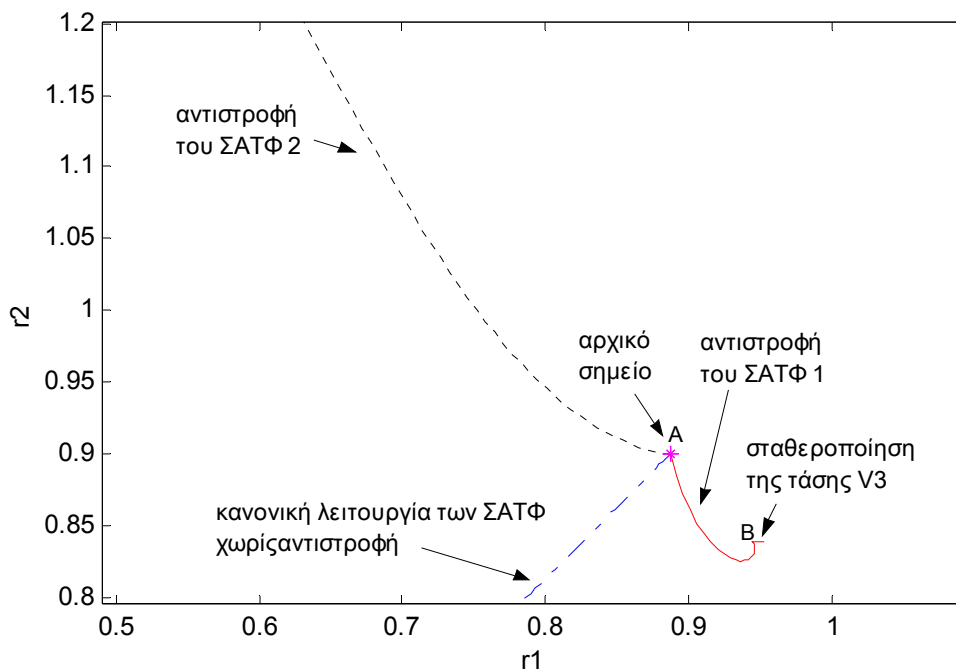
Αρχικό σημείο θεωρείται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_1=1230$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις ακόλουθες τιμές του πίνακα 5.3.1:

Πίνακας 5.3.1 Μεταβλητές συστήματος στο αρχικό σημείο

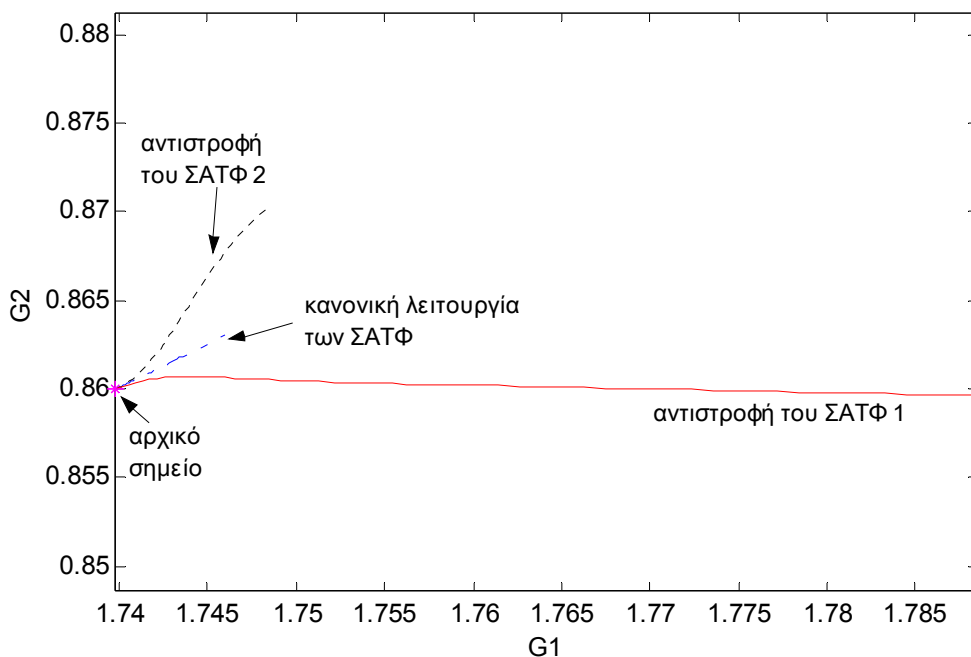
| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.8875 | 0.9 | 1.7398 | 0.8600 | 0.8273 | 0.9299 | 0.8420 | 0.9411 | 1.5045 | 0.7513 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Στα σχήματα 5.3.1, 5.3.2 απεικονίζεται η εξέλιξη του συστήματος στους χώρους καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ και $\{G_1, G_2\}$, όπως προκύπτει από την επίλυση του συνεχούς μοντέλου για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.3.1 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ

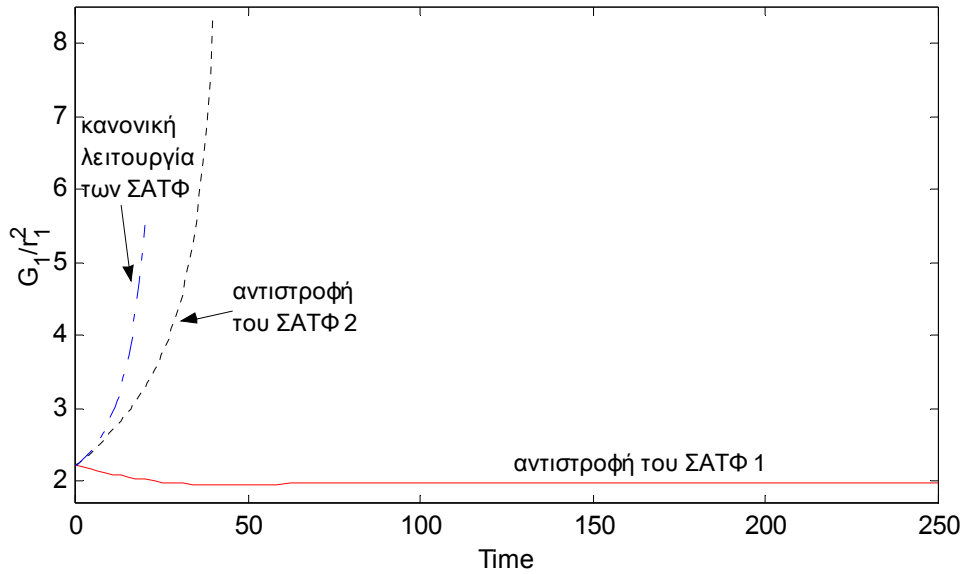


Σχήμα 5.3.2 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{G_1, G_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ

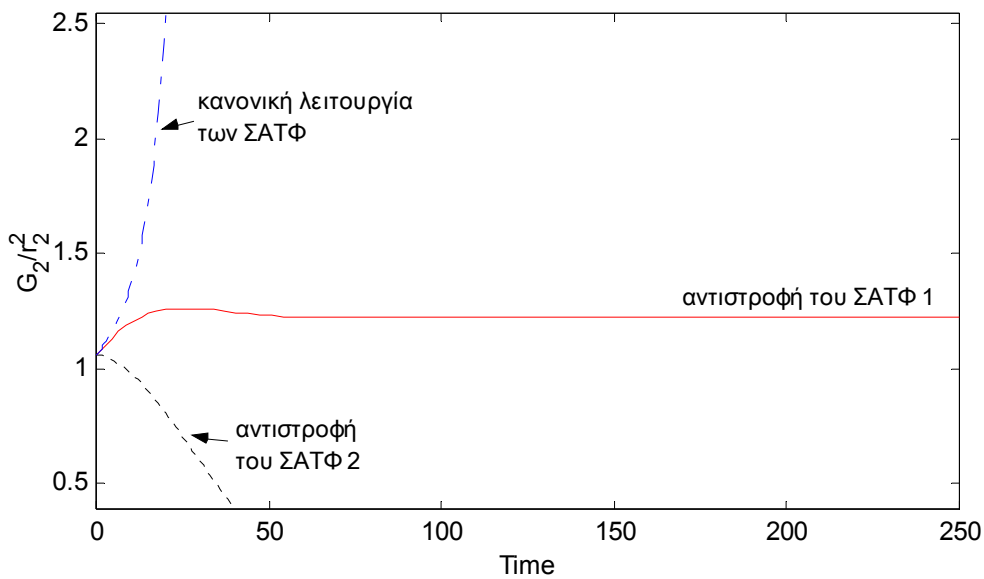
Στα σχήματα 5.3.1, 5.3.2 η προσομοίωση του συστήματος έχει γίνει για διαφορετική χρονική διάρκεια σε κάθε περίπτωση αντιστροφής. Συγκεκριμένα οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι $T=250$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1, $T=40$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 και $T=20$ sec για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.

Όπως προκύπτει από τα σχήματα, μόνο η περίπτωση της αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 1 φαίνεται να είναι ευσταθής. Σε αυτήν το σύστημα μετά από μικρή ταλάντωση καταλήγει στο σημείο B σε σταθεροποίηση των λόγων G_1/r_1^2 και G_2/r_2^2 , όπως φαίνεται στα σχήματα 5.3.3, 5.3.4, και επομένως σταθεροποίηση των τάσεων δικτύου V_3, V_5 και των φορτίων P_1, P_2 . Βέβαια το σύστημα δεν καταλήγει σε κάποιο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και για αυτό οι αγωγιμότητες και οι σχέσεις μετασχηματισμού συνεχίζουν να μεταβάλλονται. Η μεταβολή της αγωγιμότητας G_2 και της σχέσης μετασχηματισμού r_2 είναι σχεδόν μηδενικές, επειδή η τάση V_6 και η ισχύς P_2 προσεγγίζουν τις αρχικές τιμές αναφοράς.

Αντίθετα στην περίπτωση αντιστροφής του ΣΑΤΦ 2 οι μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού r_1, r_2 δεν καταφέρνουν να σταθεροποιήσουν την τάση δικτύου και το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση, όπως και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ. Αυτό φαίνεται στα σχήματα 5.3.1-5.3.2 από την διαρκή πολύ γρήγορη μεταβολή των μεταβλητών κατάστασης προς ασταθή κατεύθυνση.



Σχήμα 5.3.3 Λόγος G_1/r_1^2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.3.4 Λόγος G_2/r_2^2 συναρτήσει του χρόνου

5.3.3 Εφαρμογή 2η: $P_01=1.2$ α.μ., $P_02=1.55$ α.μ.

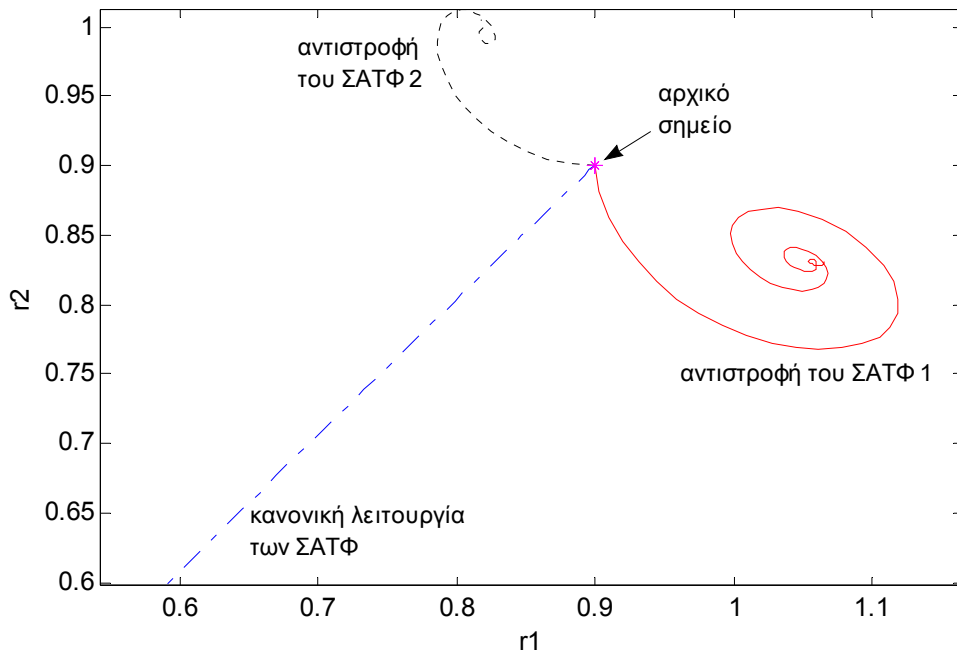
Αρχικό σημείο θεωρείται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_2=1470$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις ακόλουθες τιμές του πίνακα 5.3.2:

Πίνακας 5.3.2 Μεταβλητές συστήματος στο αρχικό σημείο

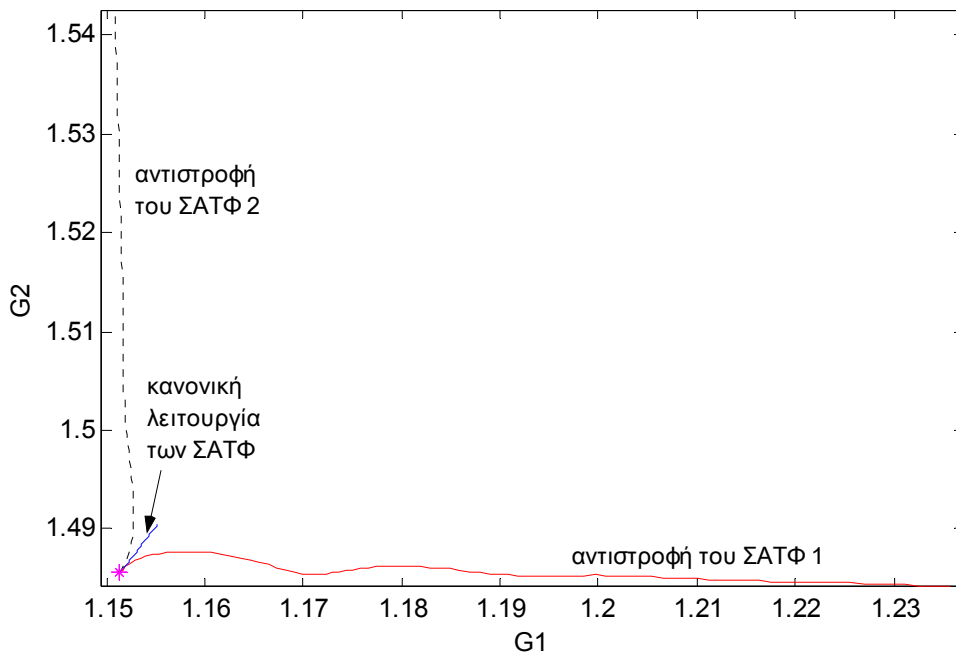
| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9 | 0.9 | 1.1513 | 1.4856 | 0.8430 | 0.9356 | 0.8493 | 0.9384 | 1.0079 | 1.3156 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Στα σχήματα 5.3.5, 5.3.6 απεικονίζεται η συμπεριφορά του συστήματος στους χώρους καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ και $\{G_1, G_2\}$, όπως προκύπτει από την επίλυση του συνεχούς μοντέλου για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.3.5 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ



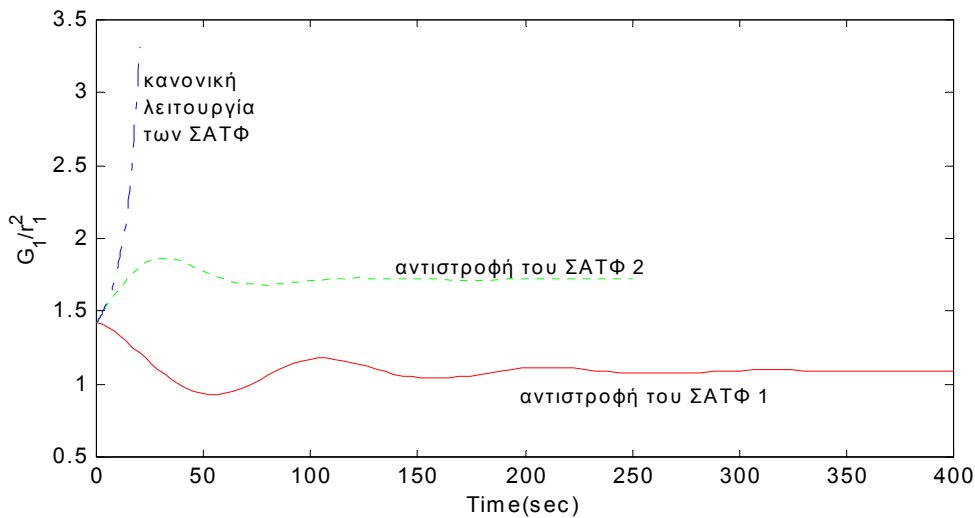
Σχήμα 5.3.6 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{G_1, G_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ

Στα σχήματα 5.3.5, 5.3.6 η προσομοίωση του συστήματος έχει γίνει για διαφορετική χρονική διάρκεια σε κάθε τρόπο λειτουργίας των ΣΑΤΦ. Συγκεκριμένα οι αντίστοιχοι

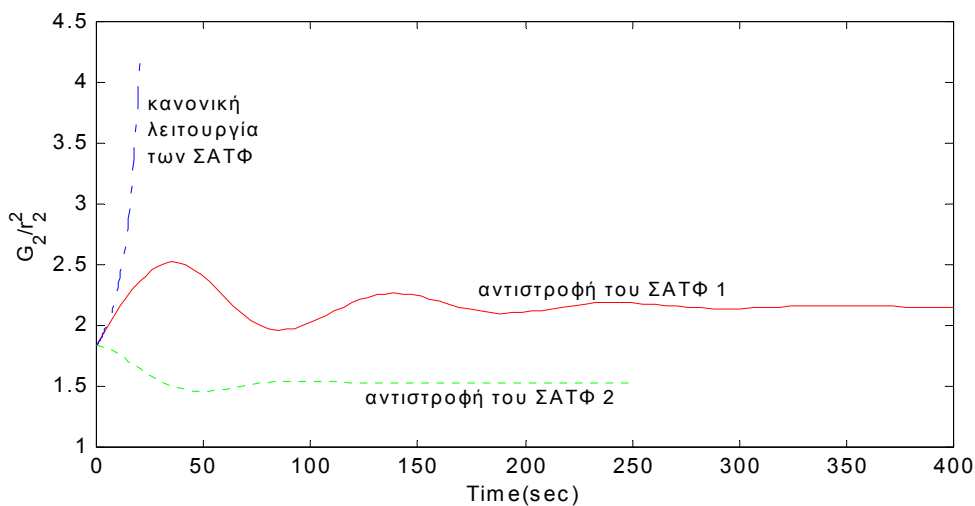
χρόνοι είναι $T=400$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1, $T=250$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 και $T=20$ sec για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.

Όπως προκύπτει από τα σχήματα και οι δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ είναι ευσταθείς, αλλά καταλήγουν σε σταθεροποίηση των τάσεων δικτύου V_3 , V_5 και των φορτίων P_1 , P_2 μετά από αρκετές ταλαντώσεις. Οι ταλαντώσεις φαίνονται και στα σχήματα 5.3.7, 5.3.8 όπου έχουν παρασταθεί οι λόγοι G_1/r_1^2 και G_2/r_2^2 συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα στην περίπτωση αντιστροφής του ΣΑΤΦ 1 οι ταλαντώσεις είναι μεγαλύτερες και το σύστημα αργεί περισσότερο να σταθεροποιήσει τις τάσεις και τα φορτία. Αυτό είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παραγράφου 4.5, αλλά και των κριτηρίων της παραγράφου 5.2.

Αντίθετα στην κανονική λειτουργία οι μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού r_1 , r_2 δεν καταφέρνουν να σταθεροποιήσουν την τάση δικτύου και το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση.



Σχήμα 5.3.7 Λόγος G_1/r_1^2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.3.8 Λόγος G_2/r_2^2 συναρτήσει του χρόνου

5.3.4 Εφαρμογή 3η: $Po1=0.9$ α.μ., $Po2=1.85$ α.μ.

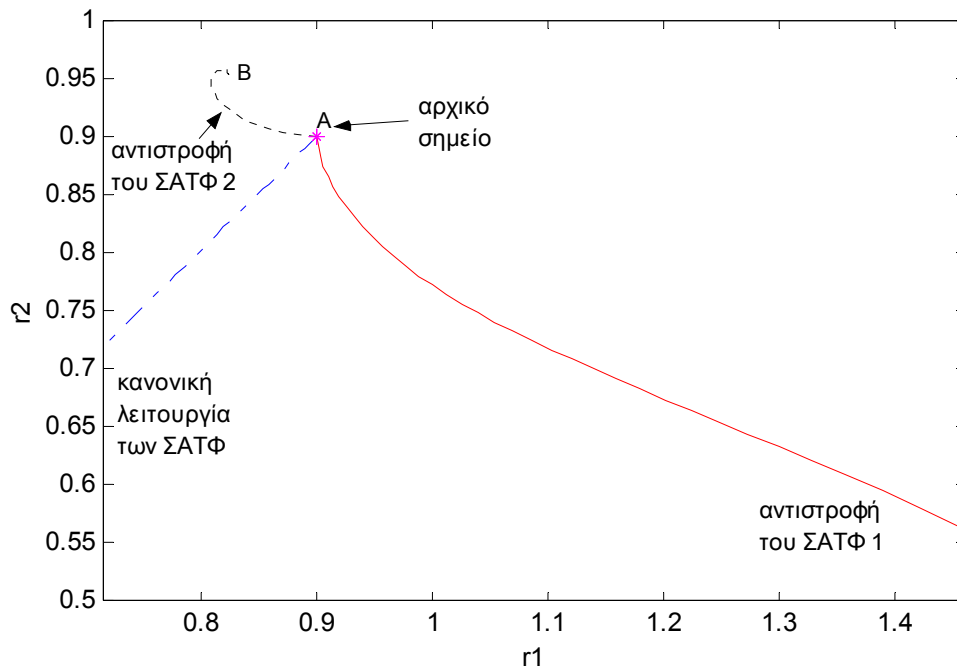
Αρχικό σημείο θεωρείται το σημείο που προκύπτει από την προσομοίωση για χρόνο $t_2=1670$ sec και οι μεταβλητές του συστήματος στο σημείο αυτό έχουν τις τιμές του πίνακα 5.3.3:

Πίνακας 5.3.3 Μεταβλητές συστήματος στο αρχικό σημείο

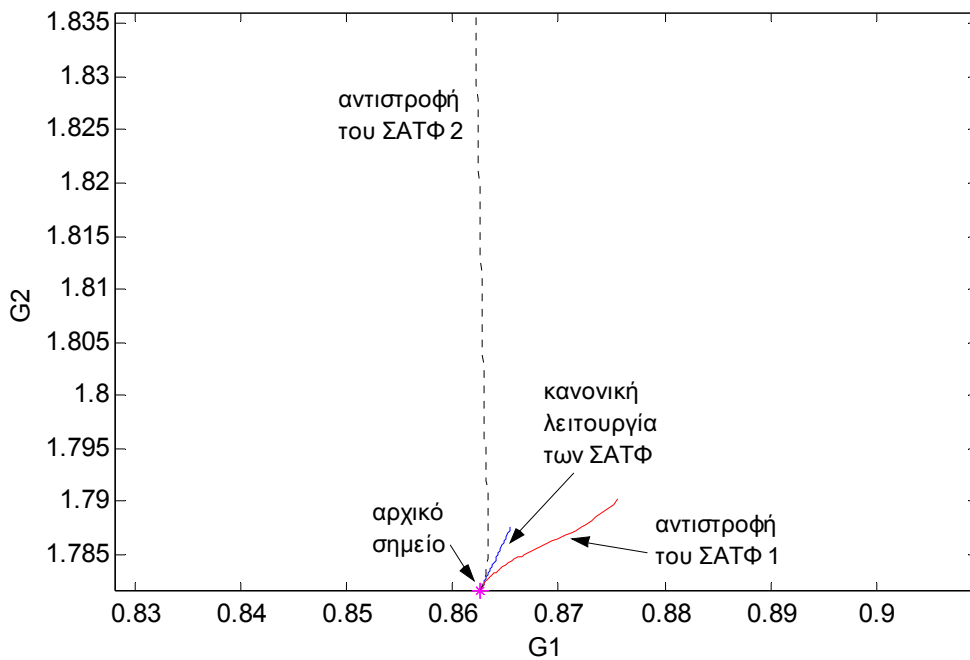
| r_1 | r_2 | G_1 | G_2 | V_3 | V_4 | V_5 | V_6 | P_1 | P_2 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.9 | 0.9 | 0.8626 | 1.7816 | 0.8443 | 0.9376 | 0.8479 | 0.9384 | 0.7582 | 1.5687 |

Τα μεγέθη στον πίνακα δίνονται στο ανά μονάδα σύστημα.

Στα σχήματα 5.3.9, 5.3.10 απεικονίζεται η συμπεριφορά του συστήματος με αρχή το παραπάνω σημείο στους χώρους καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ και $\{G_1, G_2\}$, όπως προκύπτει από την επίλυση του συνεχούς μοντέλου για τις δύο περιπτώσεις αντιστροφής των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.3.9 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{r_1, r_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ

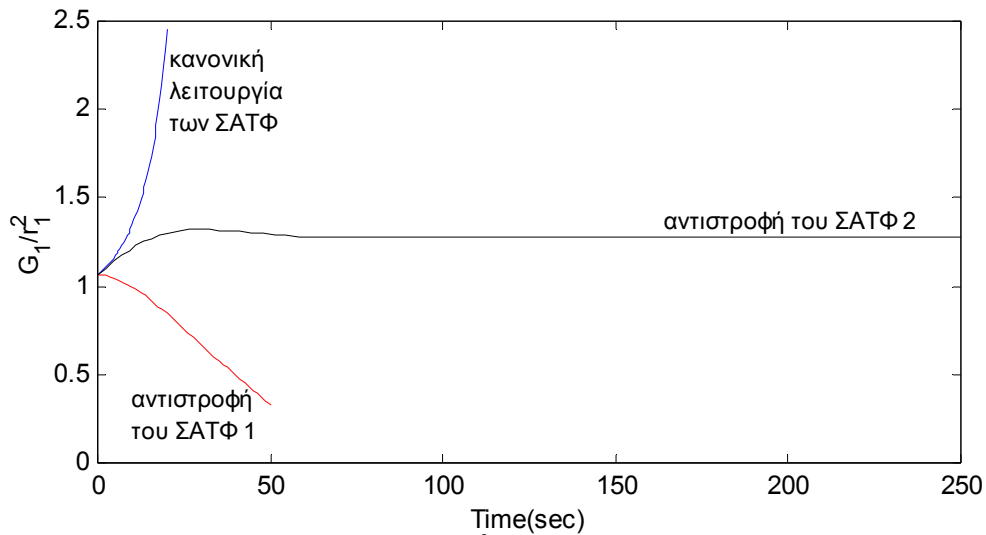


Σχήμα 5.3.10 Εξέλιξη του συστήματος στο χώρο καταστάσεων $\{G_1, G_2\}$ για κάθε περίπτωση λειτουργίας των ΣΑΤΦ

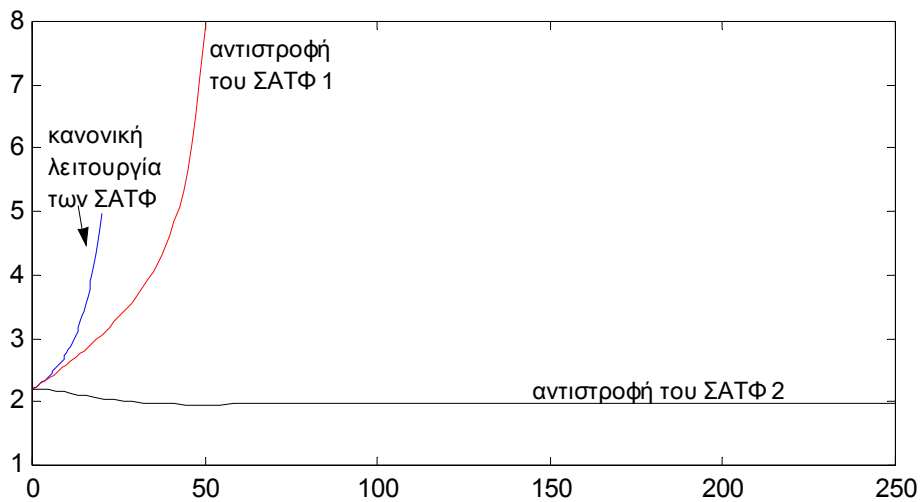
Η προσομοίωση του συστήματος έχει γίνει για διαφορετική χρονική διάρκεια σε κάθε περίπτωση αντιστροφής. Συγκεκριμένα οι αντίστοιχοι χρόνοι είναι $T=50$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1, $T=250$ sec για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 και $T=20$ sec για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.

Όπως φαίνεται από τα σχήματα 5.3.9, 5.3.10 μόνο η περίπτωση της αντιστροφής στο ΣΑΤΦ 2 είναι ευσταθής. Το σύστημα μετά από μικρή ταλάντωση σταθεροποιεί στο σημείο B τις τάσεις δικτύου V_3, V_5 και τα φορτία P_1, P_2 . Αυτό προκύπτει από την σταθεροποίηση των λόγων G_1/r_1^2 και G_2/r_2^2 που απεικονίζεται στα σχήματα 5.3.11, 5.3.12. Επίσης παρατηρείται ότι μετά το σημείο B η σχέση μετασχηματισμού r_1 και η αγωγιμότητα G_1 μένουν σχεδόν σταθερές που σημαίνει ότι η τάση V_4 και η ισχύς P_1 είναι πολύ κοντά στις αρχικές τους τιμές.

Στην περίπτωση αντιστροφής του ΣΑΤΦ 1 οι μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού r_1, r_2 δεν καταφέρνουν να σταθεροποιήσουν την τάση δικτύου και το σύστημα οδηγείται σε κατάρρευση, όπως και για κανονική λειτουργία των ΣΑΤΦ.



Σχήμα 5.3.11 Λόγος G_1/r_1^2 συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 5.3.12 Λόγος G_2/r_2^2 συναρτήσει του χρόνου

Όπως φαίνεται παραπάνω τα αποτελέσματα συμφωνούν γενικά με αυτά από την προσομοίωση στην παράγραφο 4.6. Οι εμφανιζόμενες διαφορές οφείλονται σε μη γραμμικότητες που υπεισέρχονται στην ανάλυση με την προσομοίωση λόγω του διακριτού μοντέλου που χρησιμοποιείται. Τέτοιες μη γραμμικότητες προκύπτουν για παράδειγμα από την εισαγωγή νεκρής ζώνης, την χρονική καθυστέρηση και τον περιορισμό του περιθωρίου ρύθμισης της σχέσης μετασχηματισμού στο διακριτό μηχανισμό ΣΑΤΦ. Η μεγαλύτερη διαφοροποίηση παρουσιάζεται στην ιδιάζουσα 2^η εφαρμογή για αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1.

6 ΠΡΟΤΑΣΗ ΓΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟΥ **ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΣΑΤΦ ΩΣ ΜΕΤΡΟ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ** **ΤΗΣ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ**

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 4.1, ο αντίστροφος έλεγχος των ΣΑΤΦ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο αποκατάστασης της τάσης σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, όπου εμφανίζεται αστάθεια τάσης. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά αναιρεί το μηχανισμό αποκατάστασης φορτίου, που υλοποιούν τα ΣΑΤΦ με την κανονική τους λειτουργία, και έτσι εισάγει μια έμμεση απόρριψη φορτίου λιγότερο επώδυνη βέβαια από την άμεση αυτόματη απόρριψη φορτίου.

Ένα κρίσιμο ζήτημα στο σχεδιασμό του αντιστρόφου ελέγχου των ΣΑΤΦ είναι η επιλογή των περιοχών και των ΣΑΤΦ, στα οποία θα εφαρμοστεί η αντιστροφή ελέγχου. Η επιλογή των ΣΑΤΦ που θα αντιστραφούν βασίζεται στα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.2.1 και χρησιμοποιούν τον πίνακα ευαισθησιών των ΣΑΤΦ, $A=[\Delta V_i/\Delta T_j]$. Όταν το σύστημα μεταπέσει σε αστάθεια τάσης, μία τουλάχιστον ιδιοτιμή του πίνακα ευαισθησιών γίνεται θετική. Το 1^ο και 2^ο κριτήριο ουσιαστικά εντοπίζουν τα ΣΑΤΦ, τα οποία διεγείρουν περισσότερο τον ασταθή ρυθμό που αντιστοιχεί στη θετική ιδιοτιμή. Αυτά τα ΣΑΤΦ είναι η κινητήρια δύναμη της αστάθειας και σε αυτά πρέπει να επέμβουμε για να σταθεροποιήσουμε το σύστημα. Το 3^ο κριτήριο εξετάζει αν το σύστημα έχει γίνει ευσταθές και έχει επαρκή απόσβεση ταλάντωσης μετά την αντιστροφή του ελέγχου στα επιλεγμένα ΣΑΤΦ.

Επίσης πρέπει να επιλεγούν οι τιμές των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν στην αντιστροφή του ελέγχου των ΣΑΤΦ, δηλαδή της τάσης κατωφλιού V_L , του άνω ορίου V_H και της διόρθωσης ϵ της τάσης πρωτεύοντος.

Η τάση κατωφλιού επιλέγεται ελέγχοντας δύο βασικούς περιορισμούς. Η τάση V_L πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να μην ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί ελέγχου εκτάκτου ανάγκης των ΣΑΤΦ σε πιθανές μεταβατικές πτώσεις τάσης κατά τη διάρκεια της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, που οφείλονται για παράδειγμα σε αύξηση της φόρτισης. Ωστόσο αν η τάση κατωφλιού είναι πολύ χαμηλή και η κατάρρευση εξελίσσεται για μεγάλο χρονικό διάστημα, το σύστημα πιθανόν να οδηγηθεί και σε βραχυπρόθεσμη αστάθεια μετά από απώλεια συγχρονισμού. Επίσης υπάρχει κίνδυνος πτώσης μονάδων του εξοπλισμού με την επίδραση συστημάτων προστασίας από υπόταση. Στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 4 η τιμή κατωφλιού V_L έχει ληφθεί σε αρκετά χαμηλό επίπεδο, συγκεκριμένα στην τιμή $V_L=0.85$ α.μ., αφού στο εξεταζόμενο σύστημα υπάρχει μόνο ο πρώτος περιορισμός.

Το άνω όριο V_H της λειτουργίας αντιστρόφου ελέγχου επιλέγεται κοντά στην ονομαστική τιμή της τάσης δικτύου, ώστε αν με την αντιστροφή η τάση φτάσει στο επίπεδο αυτό, να επιστρέψουμε στην κανονική λειτουργία.

Η επιλογή της διόρθωσης ϵ για το σύστημα των δύο φορτίων θα εξεταστεί στην επόμενη παράγραφο 6.2. Βέβαια ο υπολογισμός του ϵ που θα γίνει, ισχύει μόνο για τη συγκεκριμένη διαταραχή, την πτώση της γραμμής 2-3 (βλέπε σχήμα 4.3.1). Γενικά, όπως έχει διαπιστωθεί και στην παράγραφο 4.2.6 για το σύστημα ενός φορτίου, η βέλτιστη διόρθωση ϵ της τάσης είναι αυτή για την οποία το σύστημα προσεγγίζει το μέγιστο όριο φόρτισης, ενώ παράλληλα όμως εξασφαλίζεται η ευσταθής λειτουργία.

6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΗΣ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η επιλογή της διόρθωσης ε γίνεται για το συγκεκριμένο σύστημα και τη διαταραχή που εξετάζεται και στα κεφάλαια 4 και 5. Για την επιλογή της διόρθωσης χρησιμοποιούμε την προσεγγιστική καμπύλη ορίων φόρτισης που έχει σχεδιαστεί στο σχήμα 4.3.2.

Για κάθε εφαρμογή φόρτισης βρίσκουμε κάποιο σημείο εσωτερικό της καμπύλης ορίων φόρτισης, ώστε να μειώνεται η ισχύς φορτίου σε σχέση με την αρχική ζήτηση μόνο στο ζυγό του ΣΑΤΦ όπου εφαρμόζεται ο αντίστροφος έλεγχος. Αυτό συμφωνεί με τη διαπίστωση που έχει γίνει στις προσομοιώσεις του κεφαλαίου 4 ότι η έμμεση αποκοπή φορτίου πραγματοποιείται αποκλειστικά στα ΣΑΤΦ όπου αντιστρέφουμε τον έλεγχο, ενώ το φορτίο στο άλλο ΣΑΤΦ καλύπτει την αρχική ζήτηση. Αυτό το εσωτερικό σημείο θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε με την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου, ώστε οι ισχείς φορτίου να σταθεροποιηθούν σε αυτό το επίπεδο. Επειδή η προσεγγιστική καμπύλη ορίων φόρτισης είναι εξωτερική της πραγματικής και αντιστοιχεί σε λίγο μεγαλύτερα όρια, όπως έχει εξηγηθεί στην παράγραφο 4.3.3, το παραπάνω σημείο πρέπει να βρίσκεται αρκετά πιο μέσα από την καμπύλη, ώστε να υπάρχει το απαραίτητο περιθώριο ασφαλείας.

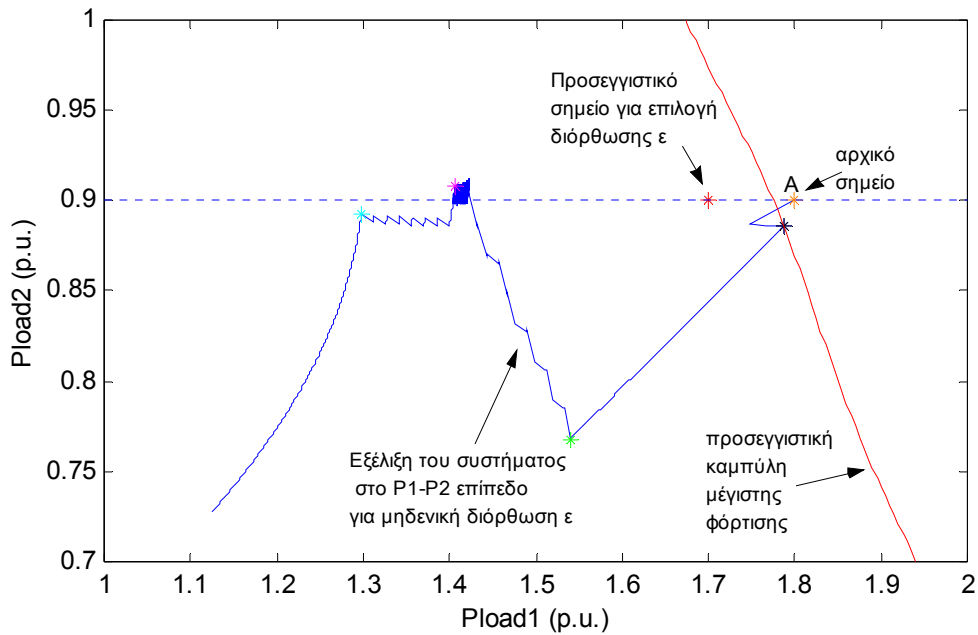
Στη συνέχεια από τις προσομοιώσεις που έχουν γίνει στο κεφάλαιο 4 για κάθε εφαρμογή προσεγγίζουμε την τάση δικτύου που αντιστοιχεί στις τιμές φόρτισης αυτού του σημείου και βρίσκουμε την αντίστοιχη διόρθωση ε . Στη διόρθωση ε επίσης εισάγουμε κάποιο περιθώριο ασφαλείας και παίρνουμε λίγο μικρότερη τιμή, ώστε να αποφύγουμε εναλλαγή μεταξύ των καταστάσεων ΑΡΤ και ΠΥ στη γεννήτρια λόγω πιθανών υπερψώσεων στην τάση δικτύου.

Τα παραπάνω βήματα για την επιλογή της διόρθωσης ε γίνονται πιο κατανοητά με την εφαρμογή τους στο σύστημα για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις φόρτισης του πίνακα 4.3.2.

6.2.1 Εφαρμογή 1^η: $P_{o1}=1.8$ α.μ., $P_{o2}=0.9$ α.μ.

Στην εφαρμογή αυτή η αντιστροφή ελέγχου πρέπει να εφαρμοστεί στο ΣΑΤΦ 1 που τροφοδοτεί το απομακρυσμένο φορτίο P_1 , όπως αναφέρθηκε στα κεφάλαια 4 και 5.

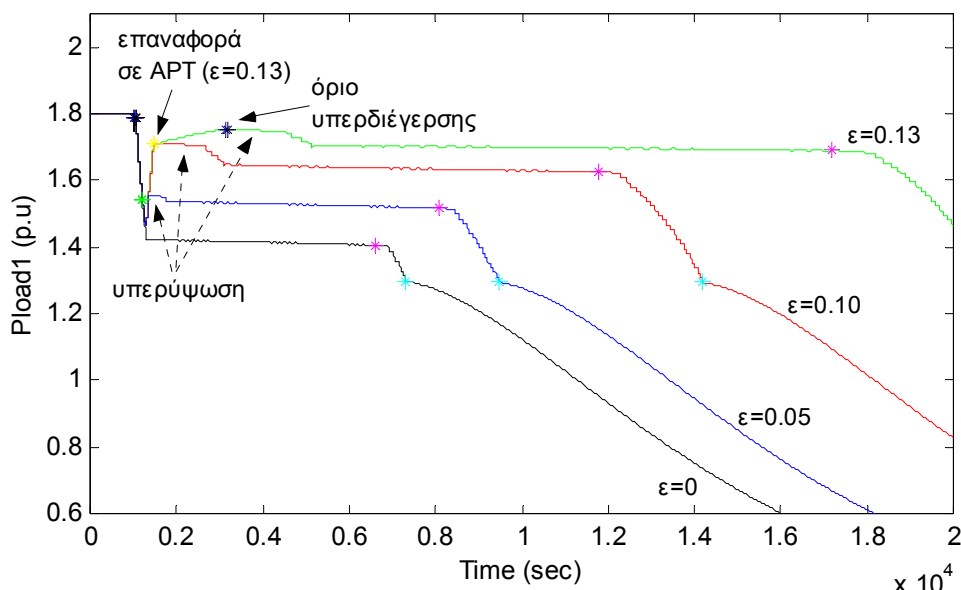
Στο σχήμα 6.2.1 έχει απεικονιστεί η εξέλιξη του συστήματος μετά τη διαταραχή στο χώρο P_1 - P_2 για μηδενική διόρθωση ε , το αρχικό σημείο λειτουργίας Α πριν τη διαταραχή και η οριακή καμπύλη ορίων φόρτισης μετά τη διαταραχή. Το προσεγγιστικό σημείο για τη λειτουργία με αντιστροφή του ΣΑΤΦ 1 θα βρίσκεται πάνω στην ευθεία με $P_2=P_{o2}=0.9$ α.μ., λίγο πιο μέσα από την καμπύλη ορίων φόρτισης. Θεωρούμε το σημείο $P_1=1.7$ α.μ., $P_2=0.9$ α.μ.



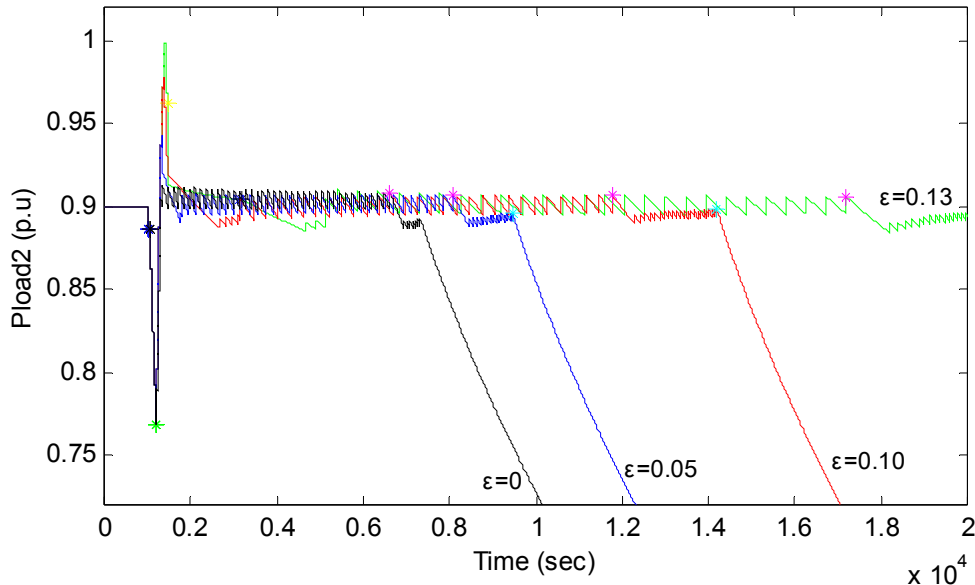
Σχήμα 6.2.1 Επιλογή του σημείου λειτουργίας που θα προσεγγίσουμε με την αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 1

Από τις προσομοιώσεις της παραγράφου 4.4.1 φαίνεται ότι η παραπάνω φόρτιση του συστήματος αντιστοιχεί σε τάση δικτύου $V_3 \approx 0.98$ α.μ. Η αντίστοιχη διόρθωση είναι $\varepsilon = 0.13$ α.μ., ωστόσο για λόγους ασφάλειας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την πιο συντηρητική τιμή $\varepsilon = 0.10$ α.μ.

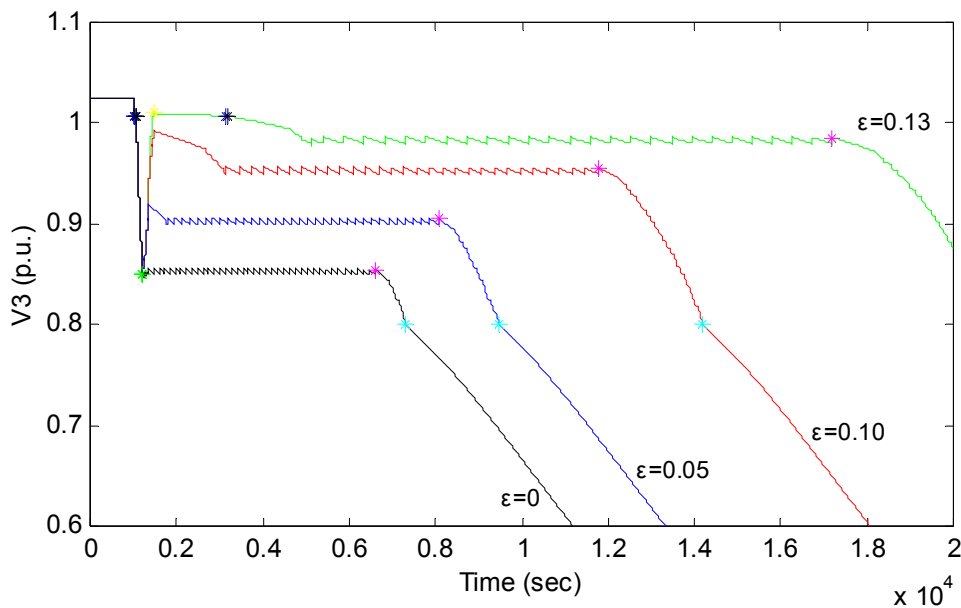
Στα σχήματα 6.2.2-6.2.4 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος για εφαρμογή αντιστρόφου ελέγχου στο ΣΑΤΦ 1 με διόρθωση $\varepsilon = 0.13$, $\varepsilon = 0.10$, $\varepsilon = 0.05$ και $\varepsilon = 0$ α.μ.



Σχήμα 6.2.2 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_1 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.3 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_2 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.4 Χρονική προσομοίωση της τάσης δικτύου V_3 για διάφορες τιμές του ε

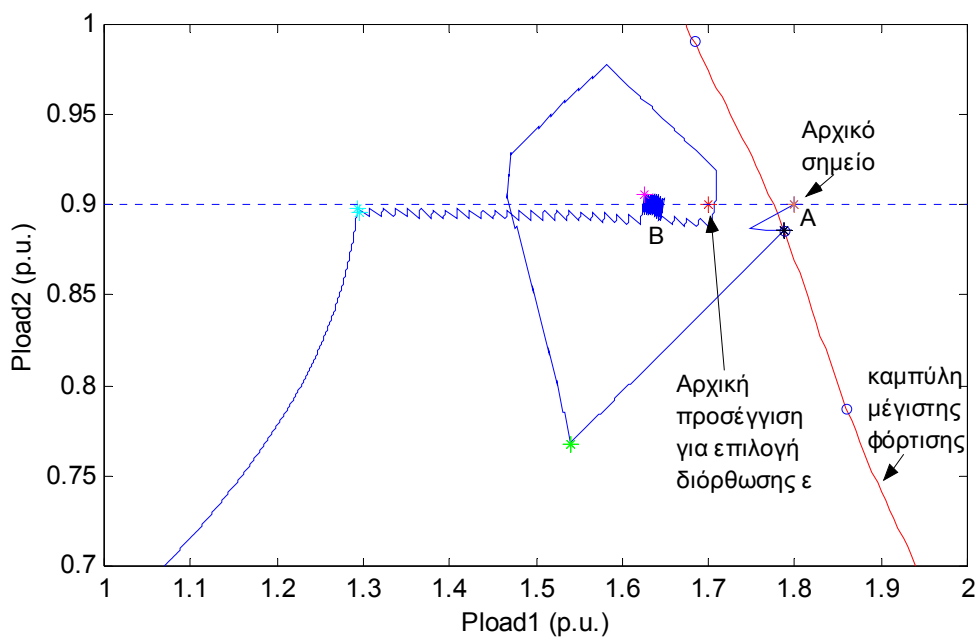
Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.2.2-6.2.4 αν χρησιμοποιήσουμε την τιμή $\varepsilon=0.13$ α.μ., παρουσιάζεται μεταβατική εναλλαγή μεταξύ των καταστάσεων ΑΡΤ και ΠΥ στη γεννήτρια, την οποία θέλουμε να αποφύγουμε για λόγους ασφάλειας. Επίσης λόγω της υπερύψωσης που εμφανίζεται υπάρχει κίνδυνος η τάση δικτύου V_3 να υπερβεί το άνω όριο του αντιστρόφου ελέγχου V_H και το ΣΑΤΦ 1 να επιστρέψει στην κανονική λειτουργία. Αυτό θα συμβεί αν το άνω όριο οριστεί π.χ. σε μια τιμή $V_H=1$ α.μ. και η απόκριση του συστήματος τότε θα παρουσιάζει μεγάλες ταλαντώσεις, όπως στα σχήματα 4.5.7-4.5.10 της παραγράφου 4.5.1. Επομένως επιβεβαιώνεται ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια πιο συντηρητική τιμή για τη διόρθωση ε . Βέβαια ακόμα και στις περιπτώσεις μικρότερων ε ($\varepsilon=0.10$, $\varepsilon=0.05$ α.μ.) εμφανίζεται υπερύψωση στις τάσεις και τα φορτία, που δεν είναι όμως τόσο μεγάλη για να αλλάξει την κατάσταση διέγερσης της γεννήτριας.

Όσο αυξάνουμε τη διόρθωση μέχρι το όριο $\varepsilon=0.13$ α.μ., η ισχύς στο φορτίο P_1 αυξάνεται, ενώ η ισχύς P_2 είναι για όλες τις περιπτώσεις σχεδόν σταθερή και κοντά στην αρχική ζήτηση P_{o2} . Τα παραπάνω φαίνονται και στον πίνακα 6.2.1, όπου δίνεται το μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_1 και ΔP_2 καθώς και ο χρόνος διατήρησης του συστήματος για κάθε τιμή της διόρθωσης ε . Έτσι επιλέγουμε την τιμή $\varepsilon=0.10$ α.μ. που οδηγεί σε αρκετά υψηλά επίπεδα το φορτίο P_1 και την τάση δικτύου V_3 χωρίς να δημιουργεί εναλλαγές στην κατάσταση διέγερσης και στη λογική λειτουργίας του ΣΑΤΦ.

Πίνακας 6.2.1 Αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες τιμές της διόρθωσης ε

| Διόρθωση ε | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_1 | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_2 | Χρόνος διατήρησης συστήματος (sec) |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0 | 0.3845 | -0.0030 | 6600 |
| 0.05 | 0.2723 | -0.0015 | 8100 |
| 0.10 | 0.1572 | -0.0004 | 11800 |
| 0.13 | 0.0962 | -0.0014 | 17200 |

Η απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για την επιλεγόμενη αυτή τιμή $\varepsilon=0.10$ α.μ. απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.5.



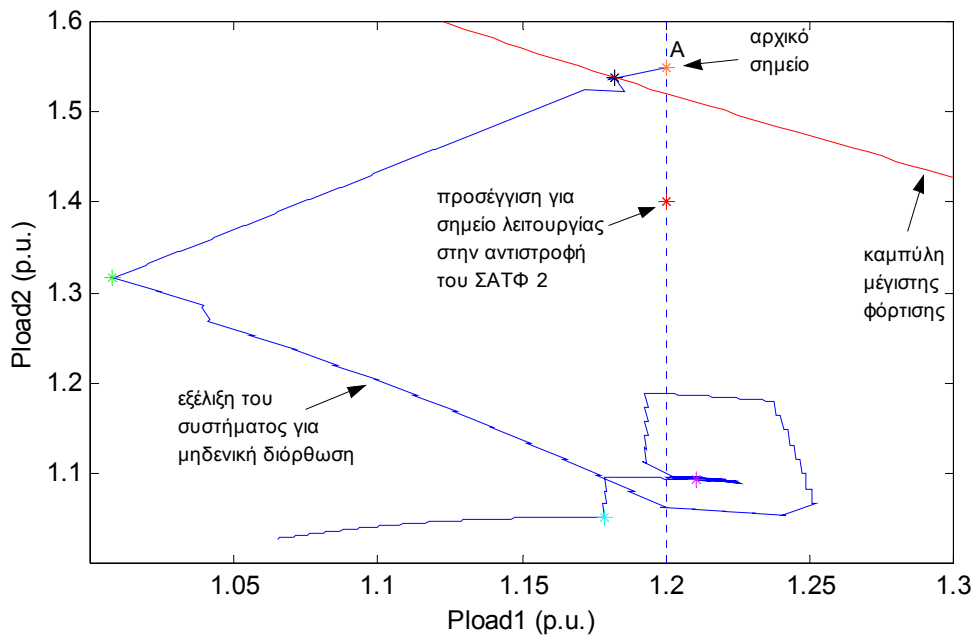
Σχήμα 6.2.5 Απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για διόρθωση $\varepsilon=0.10$ α.μ.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.5, η κύρια περιοχή της αντίστροφης λειτουργίας, μετά την σταθεροποίηση του συστήματος, που χαρακτηρίζεται στο σχήμα με το γράμμα B, πλησιάζει τώρα πολύ περισσότερο στην καμπύλη οριακής φόρτισης. Η περιοχή αυτή δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από την ευθεία $P_2=P_{o2}=0.9$ α.μ., αφού όπως αναφέρθηκε η αποκοπή φορτίου γίνεται σχεδόν αποκλειστικά στο ΣΑΤΦ που αντιστρέφεται, δηλαδή το ΣΑΤΦ 1. Παρατηρούμε ότι το σύστημα παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά πριν τη σταθεροποίηση γύρω από το σημείο B λόγω της διαταραχής που δημιουργείται με την αύξηση της τάσης δικτύου V_3 κατά περίπου 10%.

6.2.2 Εφαρμογή 2^η: $P_{o1}=1.2$ α.μ., $P_{o2}=1.55$ α.μ.

Στην εφαρμογή αυτή η αντιστροφή ελέγχου πρέπει να εφαρμοστεί στο ΣΑΤΦ 2 που τροφοδοτεί το φορτίο P_2 , όπως έχει διαπιστωθεί στα κεφάλαια 4 και 5.

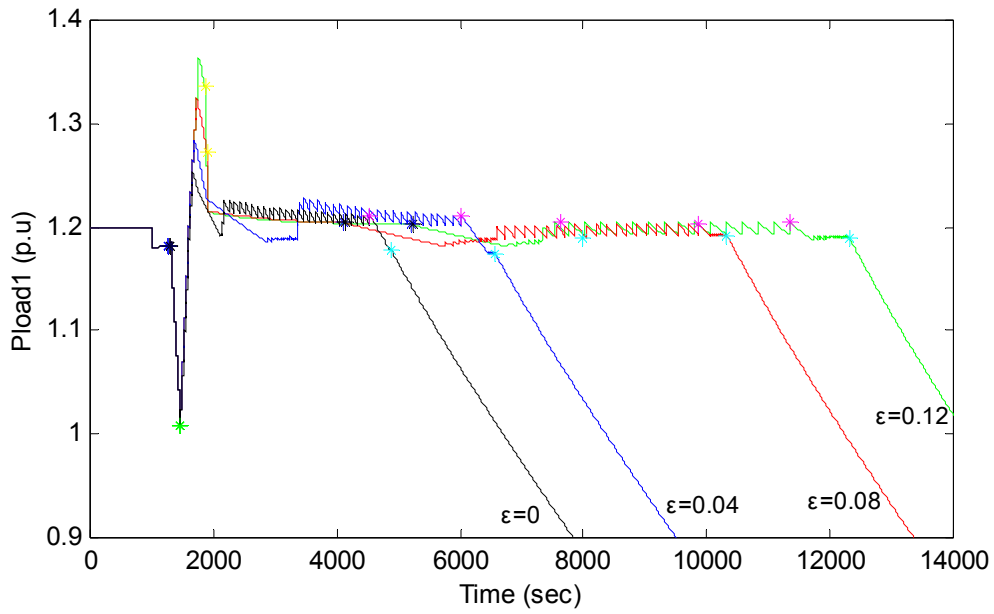
Χρησιμοποιούμε και πάλι το διάγραμμα P_1 - P_2 όπου έχει απεικονιστεί και η οριακή καμπύλη ορίων φόρτισης μετά τη διαταραχή (σχήμα 6.2.6). Το προσεγγιστικό σημείο για τη λειτουργία με αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 θα βρίσκεται πάνω στην ευθεία με $P_1=P_{o1}=1.2$ α.μ., λίγο πιο μέσα από την καμπύλη ορίων φόρτισης. Θεωρούμε το σημείο $P_1=1.2$ α.μ., $P_2=1.4$ α.μ.



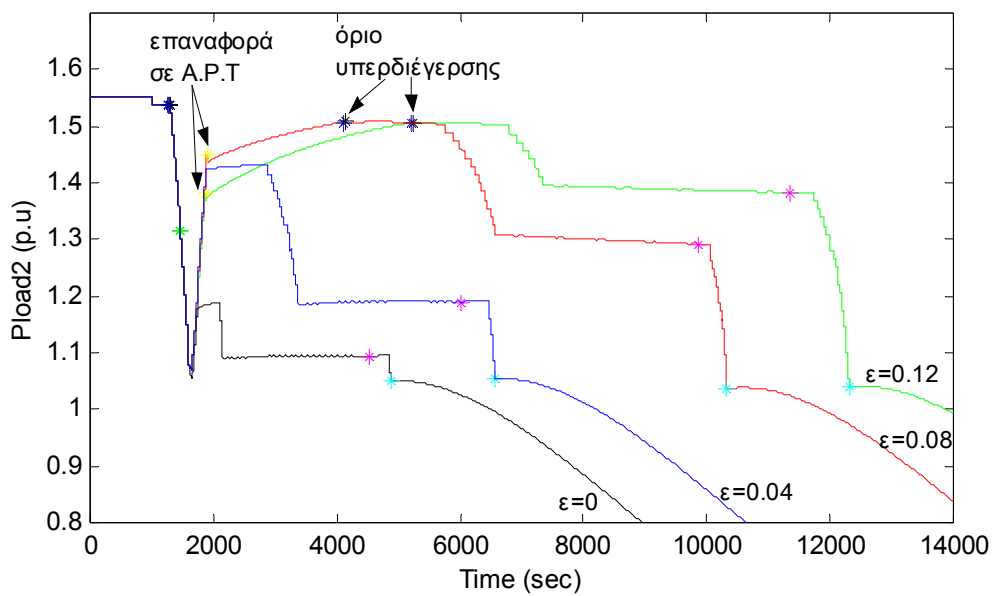
Σχήμα 6.2.6 Επιλογή του σημείου λειτουργίας που θα προσεγγίσουμε με την αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2

Από τις προσομοιώσεις της παραγράφου 4.5.2 φαίνεται ότι η παραπάνω φόρτιση του συστήματος αντιστοιχεί σε τάση δικτύου $V_3 \approx 0.97$ α.μ. Η αντίστοιχη διόρθωση είναι $\varepsilon=0.12$ α.μ., ωστόσο για λόγους ασφάλειας επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε μια πιο συντηρητική τιμή, έστω $\varepsilon=0.07$ α.μ. Ιδιαίτερα σε αυτήν την εφαρμογή, όπου από τις προσομοιώσεις και την ανάλυση ευστάθειας στα κεφάλαια 4 και 5 έχουμε διαπιστώσει ότι η λειτουργία των ΣΑΤΦ παρουσιάζει αρκετές ταλαντώσεις, χρησιμοποιούμε μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας.

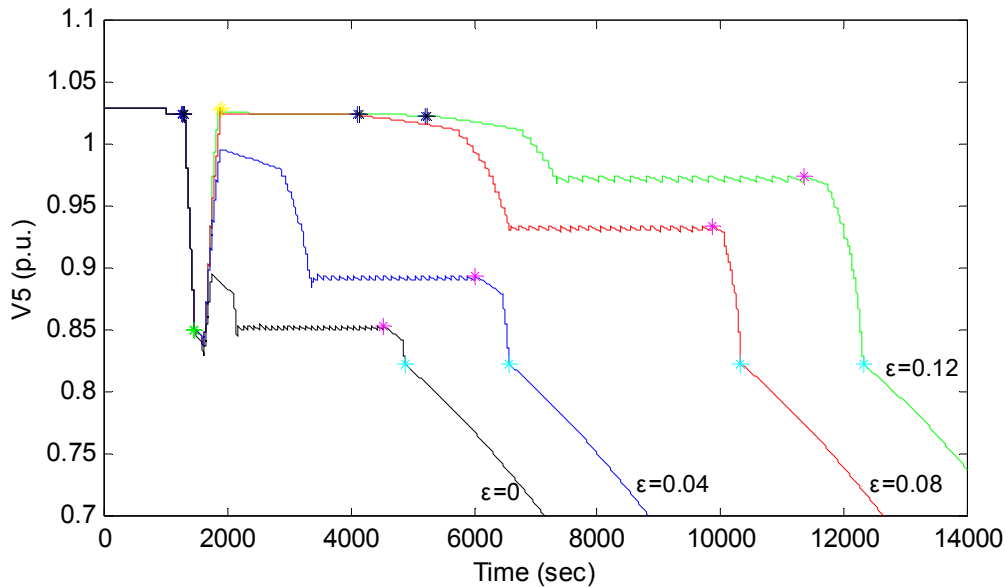
Στα σχήματα 6.2.7-6.2.9 απεικονίζεται η χρονική απόκριση του συστήματος για τιμές διόρθωσης $\varepsilon=0.12$, $\varepsilon=0.07$ και $\varepsilon=0.05$ α.μ.



Σχήμα 6.2.7 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_1 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.8 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_2 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.9 Χρονική προσομοίωση της τάσης δικτύου V_5 για διάφορες τιμές του ε

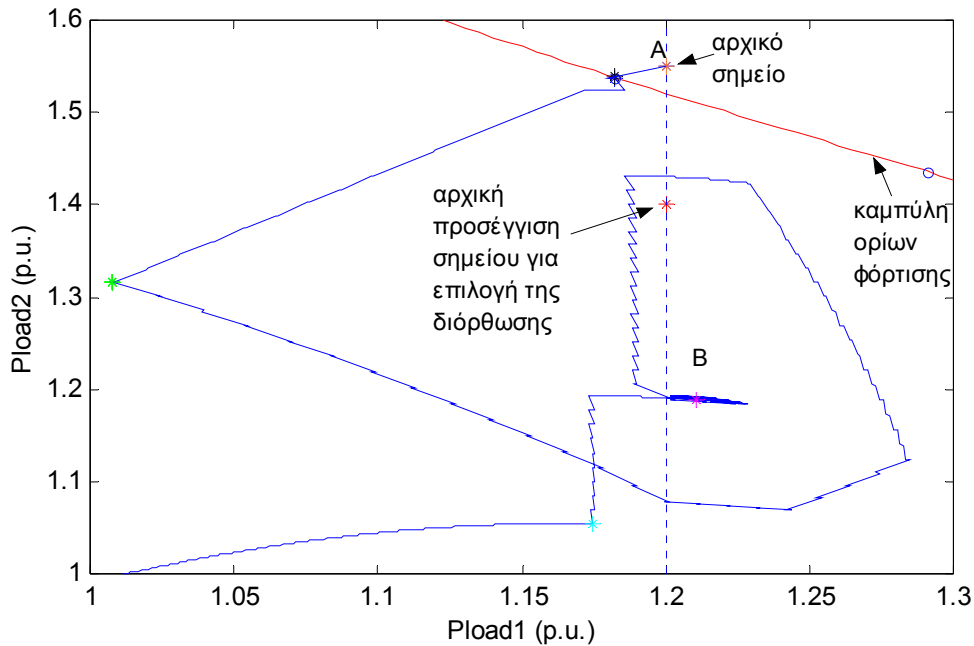
Όπως φαίνεται από τα σχήματα 6.2.7-6.2.9, η μεγάλη υπερύψωση της τάσης δικτύου V_5 αποφεύγεται μόνο για τιμές της διόρθωσης μικρότερες του 0.04 α.μ. Υπερύψωση παρουσιάζεται ακόμα και για μηδενική διόρθωση, ωστόσο για τόσο μικρές τιμές διόρθωσης η τάση δικτύου δεν ξεπερνά την τιμή 1 α.μ., ώστε να υπάρχει κίνδυνος μη επιθυμητής επιστροφής των ΣΑΤΦ σε κανονική λειτουργία. Επίσης χρησιμοποιώντας διόρθωση $\varepsilon \leq 0.04$ α.μ. αποφεύγεται η μεταβατική εναλλαγή μεταξύ των καταστάσεων ΑΡΤ και ΠΥ. Επομένως για λόγους ασφάλειας θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιήσουμε την τιμή $\varepsilon = 0.04$ α.μ. Ωστόσο η επιλογή είναι αρκετά δύσκολη, καθώς για μεγαλύτερες τιμές διόρθωσης το σύστημα διατηρείται για αρκετά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και τροφοδοτεί πολύ μεγαλύτερο μέρος του φορτίου. Σε αυτήν την εφαρμογή το σύστημα εμφανίζει έντονα ταλαντωτική συμπεριφορά και άρα είναι προτιμότερο να είμαστε αρκετά συντηρητικοί στην επιλογή της διόρθωσης ε , ακόμα και αν αυτό σημαίνει μείωση της ισχύος φορτίου και της τάσης δικτύου V_3 .

Η αύξηση στο φορτίο P_2 και το χρόνο διατήρησης του συστήματος που επιτυγχάνεται με την αύξηση της διόρθωσης φαίνεται στον πίνακα 6.2.2. Η ισχύς του φορτίου P_1 και στις τρεις περιπτώσεις για τη διόρθωση ε είναι περίπου σταθερή και πολύ κοντά στην αρχική της τιμή P_{01} .

Πίνακας 6.2.2 Αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες τιμές της διόρθωσης ε

| Διόρθωση ε | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_1 | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_2 | Χρόνος διατήρησης συστήματος (sec) |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0 | -0.0084 | 0.4409 | 4500 |
| 0.04 | -0.0084 | 0.2921 | 6000 |
| 0.08 | -0.0002 | 0.1563 | 9900 |
| 0.12 | -0.0014 | 0.1250 | 11300 |

Η απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για την επιλεγόμενη τιμή $\varepsilon = 0.04$ α.μ. απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.10.



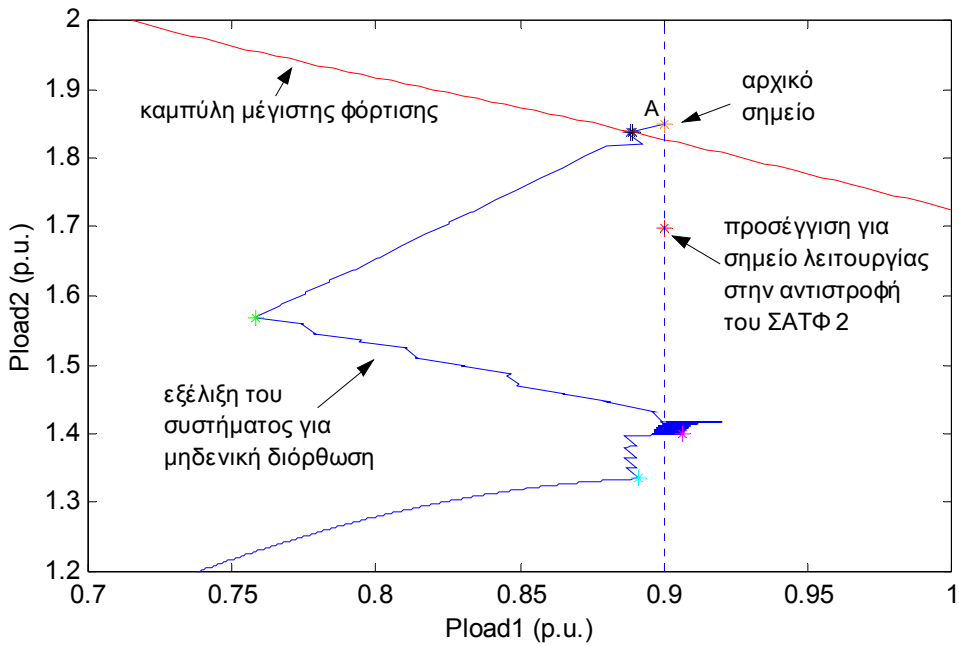
Σχήμα 6.2.10 Απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για διόρθωση $\varepsilon=0.05$ α.μ.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.10, επειδή εδώ επιλέγουμε αναγκαστικά μικρή τιμή για τη διόρθωση, το σημείο σταθεροποίησης B κατά την εφαρμογή της αντιστροφής ελέγχου του ΣΑΤΦ 2 βρίσκεται αρκετά μακριά από την καμπύλη ορίων φόρτισης. Ωστόσο πλησιάζουμε περισσότερο το όριο φόρτισης σε σχέση με την εφαρμογή για μηδενική διόρθωση (σχήμα 6.2.6). Η περιοχή B δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από την κατακόρυφη ευθεία $P_1=P_{o1}=1.2$ α.μ., αφού όπως αναφέρθηκε η αποκοπή φορτίου γίνεται αποκλειστικά στο ΣΑΤΦ 2 που αντιστρέφεται.

6.2.3 Εφαρμογή 3^η: $P_{o1}=0.9$ α.μ., $P_{o2}=1.85$ α.μ.

Στην εφαρμογή αυτή η αντιστροφή ελέγχου πρέπει να εφαρμοστεί στο ΣΑΤΦ 2 που τροφοδοτεί το φορτίο P_2 , όπως έχει διαπιστωθεί στα κεφάλαια 4 και 5.

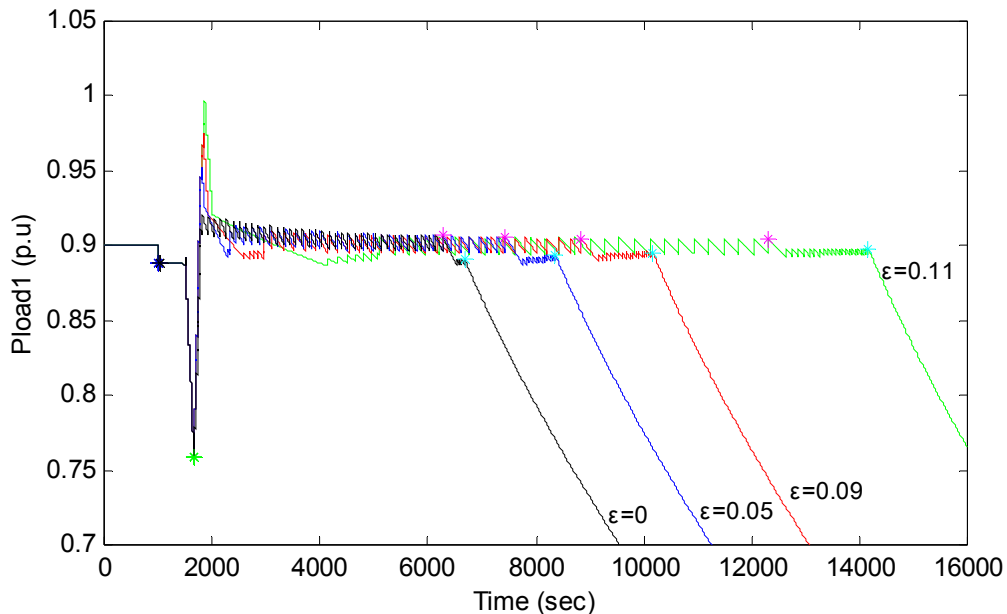
Χρησιμοποιούμε και πάλι το διάγραμμα P_1 - P_2 όπου έχει απεικονιστεί και η οριακή καμπύλη ορίων φόρτισης μετά τη διαταραχή (σχήμα 6.2.11). Το προσεγγιστικό σημείο για τη λειτουργία με αντιστροφή του ΣΑΤΦ 2 θα βρίσκεται πάνω στην ευθεία με $P_1=P_{o1}=0.9$ α.μ., λίγο πιο μέσα από την καμπύλη ορίων φόρτισης. Θεωρούμε το σημείο $P_1=0.9$ α.μ., $P_2=1.7$ α.μ.



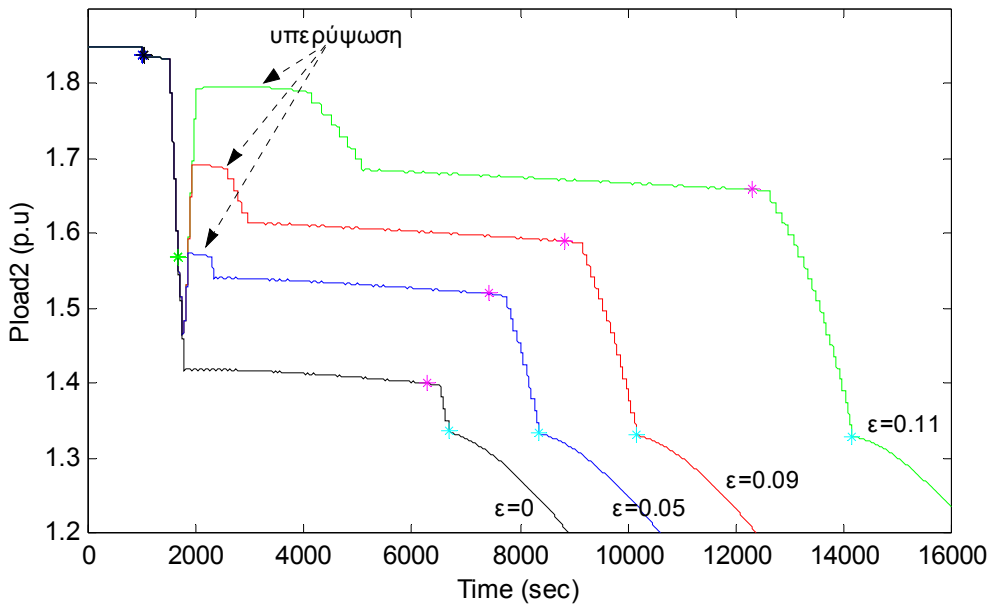
Σχήμα 6.2.11 Επιλογή του σημείου λειτουργίας που θα προσεγγίσουμε με την αντιστροφή του ελέγχου του ΣΑΤΦ 2

Από τις προσομοιώσεις της παραγράφου 4.6.2 φαίνεται ότι η παραπάνω φόρτιση του συστήματος αντιστοιχεί σε τάση δικτύου $V_3 \approx 0.96$ α.μ. Η αντίστοιχη διόρθωση είναι $\varepsilon = 0.11$ α.μ., ωστόσο για λόγους ευστάθειας χρησιμοποιούμε την πιο συντηρητική τιμή $\varepsilon = 0.09$ α.μ.

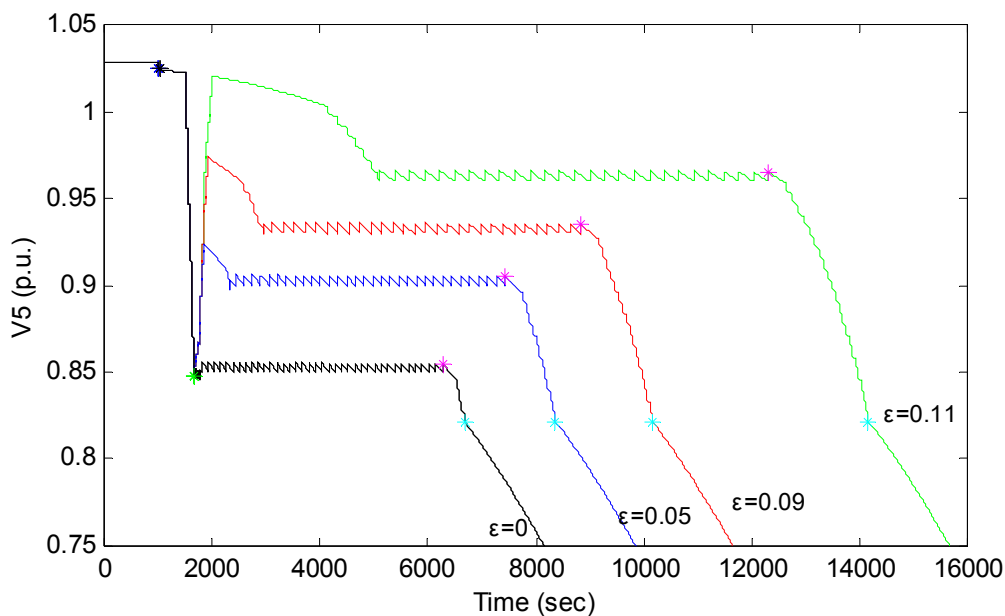
Στα σχήματα 6.2.12-6.2.14 απεικονίζεται η χρονική απόκριση του συστήματος για διόρθωση $\varepsilon = 0.11$, $\varepsilon = 0.09$, $\varepsilon = 0.05$ και $\varepsilon = 0$ α.μ.



Σχήμα 6.2.12 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_1 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.13 Χρονική προσομοίωση της ισχύος φορτίου P_2 για διάφορες τιμές του ε



Σχήμα 6.2.14 Χρονική προσομοίωση της τάσεως δικτύου V_5 για διάφορες τιμές του ε

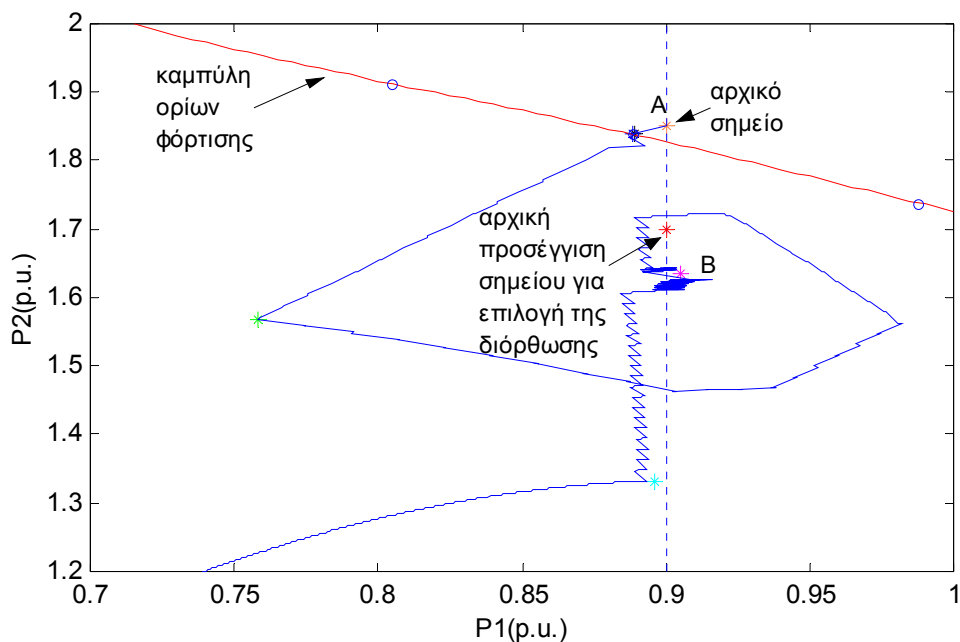
Όπως φαίνεται από τα σχήματα 6.2.12-6.2.14, στην εφαρμογή αυτή η κατάσταση διέγερσης της γεννήτριας δεν παρουσιάζει εναλλαγές μεταξύ ΑΡΤ και ΠΥ για καμία από τις τρεις περιπτώσεις τιμών για τη διόρθωση ε . Ωστόσο η τάση δικτύου εμφανίζει υπερύψωση και στην περίπτωση $\varepsilon=0.11$ α.μ. ξεπερνάει την τιμή $V_H=1$ α.μ. Επομένως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για μεγαλύτερη ασφάλεια την τιμή $\varepsilon=0.09$ α.μ.

Η ισχύς του φορτίου P_1 και στις τρεις περιπτώσεις για τη διόρθωση ε είναι περίπου σταθερή και πολύ κοντά στην αρχική της τιμή P_{01} , ενώ η ισχύς P_2 αυξάνεται με την αύξηση του ε , όπως φαίνεται στον πίνακα 6.2.3.

Πίνακας 6.2.3 Αποτελέσματα της προσομοίωσης για διάφορες τιμές της διόρθωσης ε

| Διόρθωση ε | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_1 | Μη-εξυπηρετηθέν φορτίο ΔP_2 | Χρόνος διατήρησης συστήματος (sec) |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 0 | -0.0040 | 0.4367 | 6300 |
| 0.05 | -0.0031 | 0.3161 | 7400 |
| 0.09 | -0.0031 | 0.2150 | 9500 |
| 0.11 | -0.0004 | 0.1509 | 12300 |

Η απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για την επιλεγόμενη τιμή $\varepsilon=0.10$ α.μ. απεικονίζεται στο σχήμα 6.2.15



Σχήμα 6.2.15 Απόκριση του συστήματος στο χώρο P_1 - P_2 για διόρθωση $\varepsilon=0.10$ α.μ.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.2.5, η σταθεροποίηση μετά την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου γίνεται στην περιοχή B, που πλησιάζει αρκετά στην καμπύλη οριακής φόρτισης. Τα σημεία της περιοχής αυτής έχουν πολύ μικρή απόσταση από την ευθεία $P_1=P_{o1}=0.9$ α.μ., αφού όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4 η αποκοπή φορτίου γίνεται αποκλειστικά στο ΣΑΤΦ που αντιστρέφεται, δηλαδή το ΣΑΤΦ 2.

7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

7.1 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η μέθοδος της αντιστροφής του ελέγχου των ΣΑΤΦ ως μέτρο εκτάκτου ανάγκης για την αντιμετώπιση της αστάθειας τάσης σε ένα ΣΗΕ. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε δύο διαφορετικά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας:

- ένα ακτινικό σύστημα ενός φορτίου που τροφοδοτείται από μια γεννήτρια μέσω ενός μετασχηματιστή εξοπλισμένου με μηχανισμό ΣΑΤΦ
- ένα ηλεκτρικό σύστημα δύο φορτίων σε βροχοειδή διάταξη που τροφοδοτούνται κατά τον ίδιο τρόπο από μια γεννήτρια μέσω μετασχηματιστών εξοπλισμένων με ΣΑΤΦ.

Η γεννήτρια των παραπάνω συστημάτων περιλαμβάνει αυτόματη ρύθμιση τάσης (APT) και έλεγχο περιορισμού υπερδιέγερσης (ΠΥ), ενώ τα φορτία έχουν δυναμική φύση και τείνουν να αποκαταστήσουν την ισχύ τους μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα τους.

Αρχικά εξάχθηκε με προσομοιώσεις η συμπεριφορά των συστημάτων μετά από μια διαταραχή, που είναι η απώλεια μίας γραμμής μεταφοράς. Στις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το διακριτό μοντέλο για τα ΣΑΤΦ και την αυτορύθμιση του φορτίου. Μετά τη διαταραχή αυτή και στα δύο συστήματα παρουσιάστηκε αστάθεια τάσης και τελικά κατάρρευση, επειδή το σύστημα συναντά τον περιορισμό υπερδιέγερσης και αδυνατεί να τροφοδοτήσει πλέον το αρχικό φορτίο. Έτσι εφαρμόστηκε στα συστήματα αυτά η μέθοδος της αντιστροφής ελέγχου των ΣΑΤΦ. Η μέθοδος αυτή ενεργοποιείται όταν η τάση πρωτεύοντος στον αντίστοιχο μετασχηματιστή πέφτει κάτω από μία τιμή κατωφλιού.

Στο σύστημα ενός φορτίου η εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου κράτησε το σύστημα σε ικανοποιητικό επίπεδο τάσης για αρκετό χρονικό διάστημα, διατηρώντας σχεδόν σταθερή την τάση δικτύου αλλά και την ισχύ φορτίου. Μάλιστα η μέθοδος αυτή συγκρίθηκε με τη μέθοδο απενεργοποίησης του ΣΑΤΦ και αποδείχθηκε πολύ καλύτερη, αφού η απενεργοποίηση κατάφερε μόνο να καθυστερήσει την κατάρρευση. Βέβαια η εξεταζόμενη μέθοδος δεν αποκαθιστά κάποιο μακροπρόθεσμο σημείο ισορροπίας αλλά απλά αντιμετωπίζει προσωρινά την αστάθεια, επομένως το σύστημα τελικά κατέληξε σε κατάρρευση υπό την επίδραση της αυτορρύθμισης του φορτίου. Επίσης στο σύστημα αυτό προσδιορίστηκε η βέλτιστη τιμή της διόρθωσης της τάσης πρωτεύοντος, που υλοποιείται με την αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ. Χρησιμοποιώντας ως βασικά κριτήρια την ελαχιστοποίηση του μη εξυπηρετηθέντος φορτίου και τη μεγιστοποίηση του χρόνου διατήρησης του συστήματος από κατάρρευση, διαπιστώθηκε ότι πρέπει η τάση πρωτεύοντος να ανυψώνεται σε τέτοια τιμή, ώστε να προσεγγίζεται το όριο φόρτισης του συστήματος.

Στην περίπτωση του συστήματος δύο φορτίων εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί συνδυασμοί αρχικής ζήτησης για τα δύο φορτία του συστήματος. Για κάθε έναν από τους παραπάνω συνδυασμούς υλοποιήθηκε η αντιστροφή ελέγχου ξεχωριστά στο κάθε ΣΑΤΦ και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα. Το σύστημα αυτό μετά τη διαταραχή μετατράπηκε σε ακτινικό και το ένα φορτίο ήταν πολύ απομακρυσμένο από τη γεννήτρια σε σχέση με το άλλο. Όπως προέκυψε από τις προσομοιώσεις η αντιστροφή ελέγχου δεν ήταν αποτελεσματική σε όλες τις περιπτώσεις. Η αντιστροφή στο ΣΑΤΦ που τροφοδοτούσε πολύ μικρό φορτίο δεν κατάφερε να κρατήσει την τάση δικτύου στην τιμή κατωφλιού και έτσι το σύστημα κατέρρευε μετά από μικρό χρονικό διάστημα.

Επίσης στην περίπτωση που τα δύο φορτία είχαν μικρή διαφορά στην αρχική ζήτηση μετά την αντιστροφή διατηρούνταν οι τάσεις σε ικανοποιητικό επίπεδο, όμως η συμπεριφορά του συστήματος ήταν έντονα ταλαντωτική. Η αντιστροφή ελέγχου του ΣΑΤΦ είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα μόνο στις περιπτώσεις όπου εφαρμοζόταν στο αρκετά πιο μεγάλο φορτίο. Σε αυτές τις περιπτώσεις το φορτίο στο αντεστραμμένο ΣΑΤΦ διατηρούταν σε ικανοποιητικό επίπεδο, σχεδόν σταθερό, ενώ το φορτίο στο άλλο ΣΑΤΦ επανερχόταν στην αρχική ζήτηση. Δηλαδή η αντιστροφή στο ένα ΣΑΤΦ στήριζε πλήρως το υπόλοιπο σύστημα. Επίσης από τις προσομοιώσεις προέκυψε ότι αν εφαρμοστεί ο αντίστροφος έλεγχος και στα δύο ΣΑΤΦ, με μόνο κριτήριο το επίπεδο της τάσης πρωτεύοντος και για ίδια τάση κατωφλιού, δεν μπορεί να εξασφαλισθεί ότι η αντιστροφή θα είναι αποτελεσματική.

Τα αποτελέσματα αυτά των προσομοιώσεων επαληθεύθηκαν στη συνέχεια με τη χρησιμοποίηση του προσεγγιστικού μοντέλου συνεχούς χρόνου. Αρχικά αναλύθηκε η στατική ευστάθεια του συστήματος, γραμμικοποιώντας το σύστημα γύρω από χαρακτηριστικά σημεία μεταγωγής του και υπολογίζοντας τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης. Από το γραμμικοποιημένο σύστημα προσδιορίστηκε επίσης ο πίνακας ευαισθησιών των ελεγχόμενων τάσεων του συστήματος ως προς τη μεταβολή των σχέσεων μετασηματισμού των ΣΑΤΦ. Ο πίνακας αυτός χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή κάποιων κριτηρίων που υποδεικνύουν την κατάλληλη επιλογή του ΣΑΤΦ στο οποίο θα εφαρμοστεί η αντιστροφή ελέγχου. Τα κριτήρια αυτά είναι: το αλγεβρικό άθροισμα στηλών του πίνακα ευαισθησιών, τα στοιχεία του αριστερού ιδιοδιανύσματος του πίνακα ευαισθησιών και οι ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης μετά την αντιστροφή. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των κριτηρίων αυτών ήταν σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Επομένως διαπιστώσαμε ότι τα παραπάνω κριτήρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή των ΣΑΤΦ που θα αντιστραφούν σε συστήματα περισσοτέρων φορτίων. Επιπλέον προτάθηκε μία μέθοδος για την επιλογή της διόρθωσης τάσης του αντιστρόφου ελέγχου στο σύστημα δύο φορτίων και για τη συγκεκριμένη διαταραχή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την προσεγγιστική καμπύλη ορίων φόρτισης και ορίζει τη διόρθωση τάσης δικτύου ώστε να προσεγγίζεται η καμπύλη αυτή. Στον προσδιορισμό του σημείου λειτουργίας, που θα καθορίσει την διόρθωση τάσης, χρησιμοποιούμε τη διαπίστωση ότι η αποκοπή του φορτίου γίνεται σχεδόν αποκλειστικά στο ΣΑΤΦ που αντιστρέφεται, ενώ το άλλο φορτίο παραμένει κοντά στην αρχική του ζήτηση, και κινούμαστε στην αντίστοιχη κατεύθυνση. Επίσης παίρνουμε ένα αρκετά μεγάλο περιθώριο ασφαλείας από την καμπύλη ορίων φόρτισης, για να συμπεριλάβουμε και τις υπερυψώσεις στην τάση και τα φορτία που εμφανίζονται λόγω της ταλαντωτικής συμπεριφοράς στο σύστημα δύο φορτίων.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω κριτήρια και μεθόδους επιλογής των παραμέτρων σχεδιάστηκε η εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου για το σύστημα των δύο φορτίων, που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία.

7.2 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Ο σχεδιασμός της μεθόδου αντιστρόφου ελέγχου των ΣΑΤΦ που υλοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για τα απλά συστήματα ενός και δύο φορτίων μπορεί να επεκταθεί και σε πιο σύνθετα συστήματα.

Έτσι αν σε κάποιους ζυγούς του συστήματος εμφανιστούν συνθήκες χαμηλής τάσης, δηλαδή ενδείξεις αστάθειας τάσης, μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος του αντιστρόφου ελέγχου για την αντιμετώπιση της αστάθειας. Ο πίνακας ευαισθησιών μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά με τη βοήθεια κάποιου προγράμματος εκτίμησης κατάστασης του συστήματος, ώστε να εφαρμοστούν τα κριτήρια της παραγράφου 5.2 και να επιλεγεί το κατάλληλο ΣΑΤΦ που θα αντιστραφεί. Δυσχερέστερη θα είναι η επιλογή της διόρθωσης τάσης με τη μέθοδο του κεφαλαίου 6, επειδή η καμπύλη ορίων φόρτισης δεν είναι εύκολο να προσεγγιστεί. Επίσης σε πιο σύνθετα συστήματα θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στο συντονισμό των παραμέτρων των ΣΑΤΦ που βρίσκονται σε διαδοχικά επίπεδα τάσης, ώστε να αποφεύγεται η εμφάνιση ταλαντώσεων.

Επιπλέον η αντιστροφή ελέγχου των ΣΑΤΦ μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με άλλες πιο ριζικές μεθόδους αντιμετώπισης της αστάθειας, όπως για παράδειγμα την απόρριψη φορτίου. Η αντιστροφή ελέγχου των ΣΑΤΦ μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα για να διασώσει το σύστημα από την κατάρρευση, καθώς είναι ως μέθοδος πιο ανώδυνη για τους καταναλωτές. Έτσι παρέχεται ένα μεγαλύτερο χρονικό περιθώριο για την απόρριψη φορτίου, στο οποίο μπορεί να εξεταστεί αν όντως είναι αναγκαία η εφαρμογή της και να αποφευχθεί η άσκοπη χρησιμοποίηση της απόρριψης σε περιπτώσεις παροδικών διαταραχών. Επίσης το μη εξυπηρετηθέν φορτίο που προκύπτει κατά τη διάρκεια της αντιστροφής ελέγχου των ΣΑΤΦ στους αντίστοιχους ζυγούς ίσως είναι ενδεικτικό για το ποσοστό αποκοπής φορτίου που θα πρέπει να εφαρμοστεί στο σύστημα, αν και δεν αντιστοιχεί απαραίτητα στην ελάχιστη αποκοπή και ίσως είναι αρκετά συντηρητικό. Έτσι τα μετρούμενα μεγέθη του συστήματος κατά την εφαρμογή του αντιστρόφου ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο μηχανισμό που ελέγχει την απόρριψη φορτίου για τον προσδιορισμό του ποσοστού αποκοπής σε κάθε ζυγό του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. C. W. Taylor, *“Power System Voltage Stability”*, McGraw-Hill, 1994.
2. P. Kundur, *“Power System Stability and Control”*, McGraw-Hill, 1993.
3. T. Van Cutsem, C. D. Vournas, *“Voltage Stability of Electric Power Systems”*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
4. Α. Β. Μαχιάς, Κ. Δ. Βουρνάς, *“Ευστάθεια Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”*, ΕΜΠ, Αθήνα 1990.
5. Β. Κ. Παπαδιάς, *“Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”*, Τόμοι Ι, ΙΙ, ΕΜΠ, Αθήνα 1985.
6. C. D. Vournas, G. A. Manos, *“Emergency Tap-Blocking to Prevent Voltage Collapse”*, IEEE/PES Porto Power Tech, Sept. 1999.
7. M. Larsson, *“Coordinated Voltage Control in Electric Power Systems”*, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2000.
8. M. Larsson, D. J. Hill, G. Olsson, *“Emergency Voltage Control using Search and Predictive Control”*, 2000.
9. T. Van Cutsem, *“Analysis of emergency voltage situations”*, Proc. 11th Conference, Avignon, 1993, pp. 323-330.
10. T. Van Cutsem, B. Otomega, V. Sermanson, *“Reverse-logic control of load tap changers in emergency voltage conditions”*, IEEE/PES Bologna Power Tech, June 2003.
11. C. D. Vournas, M. E. Karystianos, *“On-Line VSA and Emergency Voltage Controls for the Hellenic Interconnected System”*, IEEE/PES General Meeting, July 2003, Toronto.
12. C. Moors, *“On the design of load shedding schemes against Voltage Instability in Electric Power Systems”*, PhD Thesis, Universite de Liege, 2003.
13. C. D. Vournas, M. E. Karystianos, N. G. Maratos, *“Exploring Power System Loadability Surface with Optimization Methods”*, Bulk Power System Dynamics and Control V, August 2001, Onomichi Japan.
14. Γ. Α. Μάνος, *“Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”*, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Η/Υ, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Αθήνα, Απρίλης 1998.
15. Δ. Μακρίδου, *“Ανάλυση Ευστάθειας και Ταλαντώσεων δύο ρυθμιζόμενων μετασχηματιστών εν σειρά”*, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Η/Υ, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Αθήνα 1999.
16. Μ. Π. Παπαδόπουλος, *“Προστασία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”*, ΕΜΠ, Αθήνα 1997.
17. Walter A. Elmore, *“Protective Relaying Theory and Applications”*, ABB Power T&D Company Inc., Florida.
18. *“Protective Relays”*, GEC ALSTHOM, 1987.
19. C. E. Zavalas, *“Transmission Lines Protection Schemes Reliability”*, 7th International DPSP Conference, Amsterdam, April 2001.
20. Β. Χ. Νικολαΐδης, *“Ανάλυση μεθόδων και περιγραφή εξοπλισμού Προστασίας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”*, Διπλωματική εργασία, ΔΠΜΣ «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας», ΕΜΠ, Αθήνα 2002.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στη συνέχεια παρατίθενται τα προγράμματα σε κώδικα Matlab που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του συστήματος δύο φορτίων και συγκεκριμένα :

- το TAOPERATION_TWoloads που υλοποιεί την προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος μετά τη διαταραχή για αντιστροφή ελέγχου των ΣΑΤΦ. Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει το φορτίο και τις τάσεις δικτύου και φορτίου σε διακριτές χρονικές στιγμές με βήμα 10 sec και τις κρατάει σε πίνακες. Το πρόγραμμα αυτό επιλύει τις εξισώσεις του δικτύου χρησιμοποιώντας τα βοηθητικά αρχεία INIT_GEN2, TOTAL_P2, TOTALTAP2. Παρατίθεται ενδεικτικά το TOTALTAP2 που χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου στη μεταβατική κατάσταση μετά υτη διαταραχή.
- Το SENSITIVITIES που υπολογίζει τον πίνακα ευαισθησιών με γραμμικοποίηση γύρω από συγκεκριμένο σημείο που παίρνουμε από τη προσομοίωση. Σε αυτήν την προσέγγιση χρησιμοποιείται το μοντέλο συνεχούς χρόνου.
- Το SRSOLVE που προσομοιώνει το σύστημα δύο φορτίων με το μοντέλο συνεχούς χρόνου και εξάγει την απόκριση του στο χώρο καταστάσεων, χρησιμοποιώντας τα αρχεία R1R2 (περιέχει τις διαφορικές εξισώσεις) και SOLVETAP (περιέχει τις εξισώσεις του δικτύου).

1.Πρόγραμμα TAOPERATION TWoloads

```
clear
% GPF (nominal generator power factor)
Xd=2.0;
GPF=0.9;
PR=GPF; % p.u.
QR=sqrt(1-PR^2); % p.u.
V2=1; % p.u. (nominal voltage)
Eqlim=abs(V2+j*Xd*(PR-j*QR)/V2); % p.u.

% -----DATA-----
%L=[Xd1 X12 X23 X25 X34 X35 X56 n1 r1 r2 Eqlim1 Vlref KE1 a1 Bs3 a2 Bs5]
L(1)=0.8;
L(2)=0.016;
L(3)=0.08;
L(4)=L(3)/4;
L(5)=0.04;
L(6)=3*L(3)/4;
L(7)=0.05;
L(8)=1.04;
L(9)=1.00; %r1
L(10)=1.00; %r2
L(11)=Eqlim;
L(13)=100;
L(14)=0;
L(15)=0;
L(16)=0;
L(17)=0;
ag=1; %Ratio of power generation P=Pm0-a*(vsys-1)
% -----Initialization-----
Po1=1.5; Po2=1; Pm01=Po1+Po2; V1=1; vsys=1;
X0=[0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 1]';

Y=fsolve('init_gen2',X0,[],L,Pm01,Po1,Po2,V1,vsys,ag);
p=Y;
TH1=p(1); TH2=p(2); V2=p(3); TH3=p(4); V3=p(5); TH4=p(6);
V4=p(7); TH5=p(8); V5=p(9); TH6=p(10); V6=p(11);
G1=p(12); G2=p(13); Eq1=p(14); d1=p(15); Vlref=p(16);
```

```

L(12)=Vlref;
% -----Initialization end-----

% ----- FIRST POINT -----

X0=[0.2 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 ]';
P1=1.8; P2=0.9; flagoxl=0;

Y=fsolve('total_P2', X0, [], L, P1, P2, flagoxl);
if abs(Y(15)-P1-P2)<1e-3 & Y(2:2:12)>0 & Y(13)>0
    p=Y;
    TH1=p(1); V1=p(2); TH2=p(3); V2=p(4); TH3=p(5); V3=p(6);
    TH4=p(7); V4=p(8); TH5=p(9); V5=p(10); TH6=p(11); V6=p(12);
    Eq1=p(13); d1=p(14); Pg1=p(15);

    Gf1=P1/V4^2;
    Gf2=P2/V6^2;
    Pg1f=Pg1;
    V11f=V1;
    V22f=V2;
    V33f=V3;
    V44f=V4;
    V55f=V5;
    V66f=V6;
    Eq11f=Eq1;
else fprintf('error', '\n')
end
%break
% ----- FIRST POINT END-----

% -----Time Simulation-----

X0=Y; %X0=[0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 ]';
P1=Gf1*V44f^2; P2=Gf2*V66f^2;

Po1=P1; Po2=P2;
G1=Gf1; G2=Gf2;
step=10; Dt=-10; k=0; flagoxl=0; sametime=0;
db=1e-3;
r1=0.005;% ration of G1
r2=0.005;% ration of G2

V4min=V44f-1.25*0.00625;
V4max=V44f+1.25*0.00625;
V6min=V66f-1.25*0.00625;
V6max=V66f+1.25*0.00625;
VL1=0.85; %threshold for tapreversing at tap 1
VH1=1; % upper limit of reverse mode at tap 1
e1=0.0; % correction of transmission voltage
VL2=0.85; %threshold for tapreversing at tap 2
VH2=1; % upper limit of reverse mode at tap 2
e2=0.0;

tapreversing1=0; taplimitup1=0; taplimitdown1=0;
firstreversel=0; reverse_model=0; reverse_stop1=0;
tapreversing2=0; taplimitup2=0; taplimitdown2=0;
firstreverse2=0; reverse_mode2=0;

j4=0; % firsttime tapreversing1
j8=0; % firsttime reverse_stop1: %reverse_mode=0, if V3>VH1
m4=0; % firsttime tapreversing2
h = waitbar(0, 'Please wait...');
k1=[]; % blue - overexcitation
k2=[]; % yellow - return to voltage regulation
k4=[]; % green - tapreversing
k5=[]; % cyan - taplimitdown
k6=[]; % magenta - taplimitup
k7=[]; % black - limit overexcitation, change of flagoxl

```



```

k8=[]; % reverse_stop1
l4=[]; % red- tapreversing2
l5=[]; % taplimitdown2
l6=[]; % taplimitup2
i1=0; % count for k1
i2=0; % count for k2
i4=0; % count for k4
i7=0; % count for k7
i8=0; % count for k8
j5=0; % count for l5

count=0; % to count when flagox1 changes
Ptotal1=0; % used for the calculation of the not-served load
Ptotal2=0; % used for the calculation of the not-served load
krev=0; % used for the calculation of the not-served load

for m=1:101
    k=k+1; Dt=Dt+step;
    Pload1(k)=P1; Pload2(k)=P2;
    V22(k)=V2; V44(k)=V4; V33(k)=V3; V55(k)=V5; V66(k)=V6;
    Time(k)=Dt;
    R1(k)=L(9); R2(k)=L(10);
end

flagnormal1=0; flagtapreversing1=1;
flagnormal2=0; flagtapreversing2=1;

Dt=Dt-step; TT=2900; % time of simulation

% after contingency
for m=1:1:TT
    waitbar(m/TT)
    Dt=Dt+step;
    if (Po1-G1*V4^2)>0.005
        G1=G1+r1*(Po1-G1*V4^2);
    elseif (Po1-G1*V4^2)<-0.005
        G1=G1+r1*(Po1-G1*V4^2);
    end
    if (Po2-G2*V6^2)>0.005
        G2=G2+r2*(Po2-G2*V6^2);
    elseif (Po2-G2*V6^2)<-0.005
        G2=G2+r2*(Po2-G2*V6^2);
    end

    Y=fsolve('totaltap2', X0, [],L,G1,G2,flagox1)
    if abs(Y(15)-G1*Y(8)^2-G2*Y(12)^2)<1e-3 & Y(2:2:12)>0 & Y(13)>0
        k=k+1;
        p=Y;
        V1=p(2); V2=p(4); V3=p(6); V4=p(8); V5=p(10); V6=p(12);
        Eq1=p(13); Pg1=p(15);
        Pload1(k)=G1*V4^2;
        Pload2(k)=G2*V6^2;
        Pg1(k)=Pg1;
        V22(k)=V2;
        V33(k)=V3;
        V44(k)=V4;
        V55(k)=V5;
        V66(k)=V6;
        Time(k)=Dt;
        R1(k)=L(9);
        R2(k)=L(10);
        if flagox1==0 & Eq1>Eqlim+1e-4
            count=count+1;
            if count==1
                i1=i1+1; k1(i1)=k;
            elseif count==4
                flagox1=1; count=0; i7=i7+1; k7(i7)=k;
                sametime=1;
            end
        end
    end
end

```

```

end
elseif flagoxl==0 & count>=1 & Eq1<Eqlim
count=0;
elseif flagoxl==1 & -Eq1+L(13)*(Vlref-V1)<0
flagoxl=0; i2=i2+1; k2(i2)=k;
sametime=1;
end

% TAP NORMAL %
if flagnormal1==1
if m>1
if V4>V4max+db & taplimitup1==0
L(9)=L(9)+0.00625; taplimitdown1=0; sametime=1;
elseif V4<V4min-db & taplimitdown1==0
L(9)=L(9)-0.00625; taplimitup1=0; sametime=1;
end
end
end

if flagnormal2==1
if m>1
if V6>V6max+db & taplimitup2==0
L(10)=L(10)+0.00625; taplimitdown2=0; sametime=1;
elseif V6<V6min-db & taplimitdown2==0
L(10)=L(10)-0.00625; taplimitup2=0; sametime=1;
end
end
end

%TAP REVERSING- TAP1 %
if flagtapreversing1==1
if m>1
if V3<VL1 & reverse_model==0; %tap reversing
reverse_model=1; firstreverse1=1;
reverse_stop1=0; j8=0;
end
if V3>VH1 & reverse_model==1
reverse_model=0; firstreverse1=0;
reverse_stop1=1; j4=0;
end
if reverse_model==1 & V3<VL1+e1
tapreversing1=1;
else tapreversing1=0;
end
if reverse_model==0
if V4>V4max+db & taplimitup1==0
L(9)=L(9)+0.00625; taplimitdown1=0; sametime=1;
elseif V4<V4min-db & taplimitdown1==0
L(9)=L(9)-0.00625; taplimitup1=0; sametime=1;
end
end
if tapreversing1==1
if V4>V4max+db & taplimitdown1==0
L(9)=L(9)-0.00625; taplimitup1=0; sametime=1;
elseif V4<V4min-db & taplimitup1==0
L(9)=L(9)+0.00625; taplimitdown1=0; sametime=1;
end
end
end
end

% % TAP REVERSING END %

%TAP REVERSING - TAP2%
if flagtapreversing2==1
if m>1
if V5<VL2 & reverse_mode2==0; %tap reversing
reverse_mode2=1; firstreverse2=1;

```

```

end
if V3>VH2 & reverse_mode2==1
    reverse_model=0; firstreverse1=0; m4=0;
end
if reverse_mode2==1 & V5<VL2+e2
    tapreversing2=1;
else tapreversing2=0;
end
if reverse_mode2==0
    if V6>V6max+db & taplimitup2==0
        L(10)=L(10)+0.00625; taplimitdown2=0; sametime=1;
    elseif V6<V6min-db & taplimitdown2==0
        L(10)=L(10)-0.00625; taplimitup2=0; sametime=1;
    end
end
if tapreversing2==1
    if V6>V6max+db & taplimitdown2==0
        L(10)=L(10)-0.00625; taplimitup2=0; sametime=1;
    elseif V6<V6min-db & taplimitup2==0
        L(10)=L(10)+0.00625; taplimitdown2=0; sametime=1;
    end
end
end
end
% % TAP REVERSING END %
%%% tap 1 limits
if L(9)<0.8
    L(9)=L(9)+0.00625; taplimitdown1=1; k5=movement1_lastdown;
elseif L(9)<R1(k)
    movement1_lastdown=k+1;
end
if L(9)>1.2
    L(9)=L(9)-0.00625; taplimitup1=1; k6=movement1_lastup;
elseif L(9)>R1(k)
    movement1_lastup=k+1;
end
%%% tap 2 limits
if L(10)<0.8
    L(10)=L(10)+0.00625; taplimitdown2=1;
    j5=j5+1; l5(j5)=movement2_lastdown;
elseif L(10)<R2(k)
    movement2_lastdown=k+1;
end
if L(10)>1.2
    L(10)=L(10)-0.00625; taplimitup2=1; l6=movement2_lastup;
elseif L(10)>R2(k)
    movement2_lastup=k+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if tapblocking1==1 & j3==0;
    k3=k; j3=j3+1;
end
if tapreversing1==1 & j4==0;
    i4=i4+1; k4(i4)=k; j4=j4+1;
end
if reverse_stop1==1 & j8==0;
    i8=i8+1; k8(i8)=k; j8=j8+1;
end
if tapblocking2==1 & m3==0;
    l3=k; m3=m3+1;
end
if tapreversing2==1 & m4==0;
    l4=k; m4=m4+1;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if sametime==1
    Y=fsolve('totaltap2', X0, [],L,G1,G2,flagox1);
    if abs(Y(15)-G1*Y(8)^2-G2*Y(12)^2)<1e-3 & Y(2:2:12)>0 & Y(13)>0

```

```

        k=k+1; p=Y;
        V1=p(2); V2=p(4); V3=p(6); V4=p(8); V5=p(10); V6=p(12);
        Eq1=p(13); Pg1=p(15);

        Pload1(k)=G1*V4^2;
        Pload2(k)=G2*V6^2;
        Pg11(k)=Pg1;
        V22(k)=V2;
        V33(k)=V3;
        V44(k)=V4;
        V55(k)=V5;
        V66(k)=V6;
        Time(k)=Dt;
        R1(k)=L(9);
        R2(k)=L(10);
    end
end

%calculation of average Pload during the tap reversing
if reverse_model==1 & taplimitup1==0
    krev=krev+1; Ptotal1=Ptotal1+Pload1(k); Ptotal2=Ptotal2+Pload2(k);
end
end
end
end
%not served load during the tapreversing
DP1=Po1-Ptotal1/krev;
DP2=Po2-Ptotal2/krev;

```

2. Πρόγραμμα TOTALTAP2

```

function g=totaltap2(p,L,G1,G2,flagoxl);

TH1=p(1); V1=p(2); TH2=p(3); V2=p(4); TH3=p(5); V3=p(6);
TH4=p(7); V4=p(8); TH5=p(9); V5=p(10); TH6=p(11); V6=p(12);
Eq1=p(13); d1=p(14); Pg1=p(15);

g=zeros(14,1);

% bus 1
g(1)= Pg1-V1*V2*sin(TH1-TH2)/L(8)/L(2);
g(2)=Eq1*V1*cos(d1-TH1)/L(1)-V1^2/L(1)-V1^2/L(2)+V1*V2*cos(TH1-TH2)/L(8)/L(2);
g(3)= Pg1-Eq1*V1*sin(d1-TH1)/L(1);
% bus 2
g(4)= V1*V2*sin(TH1-TH2)/L(8)/L(2)-V2*V5*sin(TH2-TH5)/L(4);
g(5)= V2^2*(1/L(8)^2/L(2)+1/L(4))-V2*V1*cos(TH2-TH1)/L(8)/L(2)-
V2*V5*cos(TH2-TH5)/L(4);
% bus 3
g(6)= V3*V5*sin(TH5-TH3)/L(6)+V3*V4*sin(TH4-TH3)/L(9)/L(5);
g(7)= V3^2*(1/L(6)+1/L(9)^2/L(5))-V3*V5*cos(TH3-TH5)/L(6)-
V3*V4*cos(TH3-TH4)/L(9)/L(5)-L(15)*V3^2;
% bus 4
g(8)= V4*V3*sin(TH3-TH4)/L(9)/L(5)-G1*V4^2;
g(9)= V4^2/L(5)-V4*V3*cos(TH4-TH3)/L(9)/L(5)+L(14)*G1*V4^2;
% bus 5
g(10)=V5*V2*sin(TH2-TH5)/L(4)+V3*V5*sin(TH3-TH5)/L(6)+
V5*V6*sin(TH6-TH5)/L(10)/L(7);
g(11)=V5^2*(1/L(4)+1/L(6)+1/L(10)^2/L(7))-V5*V2*cos(TH5-TH2)/L(4)-
V5*V3*cos(TH5-TH3)/L(6)-V5*V6*cos(TH5-TH6)/L(10)/L(7)-L(17)*V5^2;
% bus 6
g(12)= V5*V6*sin(TH5-TH6)/L(10)/L(7)-G2*V6^2;
g(13)= V6^2/L(7)-V6*V5*cos(TH6-TH5)/L(10)/L(7)+L(16)*G2*V6^2;

if (flagoxl==1) g(14) = Eq1-L(11);
else g(14) = Eq1-L(13)*(L(12)-V1);
end

```

```
%q(15) = TH1;
```

3. Πρόγραμμα SENSITIVITIES

```
%CALCULATION OF SENSITIVITY MATRIX
```

```
Xd1=L(1); X12=L(2); X23=L(3); X25=L(4); X34=L(5); X35=L(6); X56=L(7);  
n1=L(8); r1=L(9); r2=L(10); Eqlim=L(11); Vlref=L(12); KE1=L(13);  
a1=L(14); Bs3=L(15); a2=L(16); Bs5=L(17);
```

```
X23=1000; %contingency
```

```
flagox1=flagox1_sample; tapreverse=tapreverse_sample; %sample from simulation  
r1=r1_sample; r2=r2_sample; G1=G1_sample; G2=G2_sample; p=Sample;  
TH1=p(1); V1=p(2); TH2=p(3); V2=p(4); TH3=p(5); V3=p(6); TH4=p(7); V4=p(8);  
TH5=p(9); V5=p(10); TH6=p(11); V6=p(12); Eq1=p(13); d1=p(14); Pg1=p(15);
```

```
%-----calculation of the short-term jacobian-----
```

```
% x=[V1, V2, V3, V4, V5, V6, TH1, TH2, TH3, TH4, TH5, TH6, Pg1, Eq1, d1]  
% Js=[θqi/θxj]
```

```
%q(1) = Pg1-V1*V2*sin(TH1-TH2)/n1/X12;  
Js(1,1)=V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12; Js(1,2)=V1*sin(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(1,3)=0; Js(1,4)=0; Js(1,5)=0; Js(1,6)=0;  
Js(1,7)=-V1*V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12; Js(1,8)=V1*V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(1,9)=0; Js(1,10)=0; Js(1,11)=0; Js(1,12)=0;  
Js(1,13)=1; Js(1,14)=0; Js(1,15)=0;
```

```
%q(2) = Eq1*V1*cos(d1-TH1)/Xd1-V1^2/Xd1-V1^2/X12+V1*V2*cos(TH1-TH2)/n1/X12;
```

```
Js(2,1)=Eq1*cos(d1-TH1)/Xd1-2*V1/Xd1-2*V1/X12+V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(2,2)=V1*cos(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(2,3)=0; Js(2,4)=0; Js(2,5)=0; Js(2,6)=0;  
Js(2,7)=Eq1*V1*sin(d1-TH1)/Xd1+V1*V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(2,8)=-V1*V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(2,9)=0; Js(2,10)=0; Js(2,11)=0; Js(2,12)=0; Js(2,13)=0;  
Js(2,14)=V1*cos(d1-TH1)/Xd1; Js(2,15)=-Eq1*V1*sin(d1-TH1)/Xd1;
```

```
%q(3) = Pg1-Eq1*V1*sin(d1-TH1)/Xd1;
```

```
Js(3,1)=-Eq1*sin(d1-TH1)/Xd1;  
Js(3,2)=0; Js(3,3)=0; Js(3,4)=0; Js(3,5)=0; Js(3,6)=0;  
Js(3,7)=Eq1*V1*cos(d1-TH1)/Xd1;  
Js(3,8)=0; Js(3,9)=0; Js(3,10)=0; Js(3,11)=0; Js(3,12)=0; Js(3,13)=1;  
Js(3,14)=-V1*sin(d1-TH1)/Xd1; Js(3,15)=-Eq1*V1*cos(d1-TH1)/Xd1;
```

```
%q(4)=V1*V2*sin(TH1-TH2)/n1/X12-V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23-V2*V5*sin(TH2-TH5)/X25;
```

```
Js(4,1)=-V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(4,2)=-V1*sin(-TH1+TH2)/n1/X12-V3*sin(TH2-TH3)/X23-V5*sin(TH2-TH5)/X25;  
Js(4,3)=-V2*sin(TH2-TH3)/X23; Js(4,4)=0; Js(4,5)=-V2*sin(TH2-TH5)/X25;  
Js(4,6)=0; Js(4,7)=V1*V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(4,8)=-V1*V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12-V2*V3*cos(TH2-TH3)/X23  
-V2*V5*cos(TH2-TH5)/X25;  
Js(4,9)=V2*V3*cos(TH2-TH3)/X23; Js(4,10)=0;  
Js(4,11)=V2*V5*cos(TH2-TH5)/X25;  
Js(4,12)=0; Js(4,13)=0; Js(4,14)=0; Js(4,15)=0;
```

```
%q(5) = V2^2*(1/n1^2/X12+1/X23+1/X25)-V2*V1*cos(TH2-TH1)/n1/X12  
-V2*V3*cos(TH2-TH3)/X23-V2*V5*cos(TH2-TH5)/X25;
```

```
Js(5,1)=-V2*cos(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(5,2)=2*V2*(1/n1^2/X12+1/X23+1/X25)-V1*cos(-TH1+TH2)/n1/X12  
-V3*cos(TH2-TH3)/X23-V5*cos(TH2-TH5)/X25;  
Js(5,3)=-V2*cos(TH2-TH3)/X23; Js(5,4)=0;  
Js(5,5)=-V2*cos(TH2-TH5)/X25; Js(5,6)=0;  
Js(5,7)=-V1*V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12;  
Js(5,8)=V1*V2*sin(-TH1+TH2)/n1/X12+V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23  
+V2*V5*sin(TH2-TH5)/X25;  
Js(5,9)=-V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23; Js(5,10)=0;  
Js(5,11)=-V2*V5*sin(TH2-TH5)/X25; Js(5,12)=0;
```

```

Js(5,13)=0; Js(5,14)=0; Js(5,15)=0;

%x=[V1, V2, V3, V4, V5, V6, TH1, TH2, TH3, TH4, TH5, TH6, Pg1, Eq1, d1]
%q(6) = V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23+V3*V5*sin(TH5-TH3)/X35
+V3*V4*sin(TH4-TH3)/r1/X34;
Js(6,1)=0; Js(6,2)=V3*sin(TH2-TH3)/X23;
Js(6,3) = V2*sin(TH2-TH3)/X23-V5*sin(-TH5+TH3)/X35-V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(6,4) = -V3*sin(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(6,5) = -V3*sin(-TH5+TH3)/X35;
Js(6,6) = 0; Js(6,7) = 0;
Js(6,8) = V2*V3*cos(TH2-TH3)/X23;
Js(6,9) = -V2*V3*cos(TH2-TH3)/X23-V3*V5*cos(-TH5+TH3)/X35
-V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(6,10) = V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(6,11) = V3*V5*cos(-TH5+TH3)/X35;
Js(6,12)=0; Js(6,13)=0; Js(6,14)=0; Js(6,15)= 0;

%q(7) = V3^2*(1/X23+1/X35+1/r1^2/X34)-V3*V2*cos(TH3-TH2)/X23
-V3*V5*cos(TH3-TH5)/X35-V3*V4*cos(TH3-TH4)/r1/X34-Bs3*V3^2;

Js(7,1)=0; Js(7,2) = -V3*cos(TH2-TH3)/X23;
Js(7,3) = 2*V3*(1/X23+1/X35+1/r1^2/X34)-V2*cos(TH2-TH3)/X23
-V5*cos(-TH5+TH3)/X35-V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34-2*Bs3*V3;
Js(7,4)=-V3*cos(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(7,5) = -V3*cos(-TH5+TH3)/X35;
Js(7,6)=0; Js(7,7) = 0;
Js(7,8) = V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23;
Js(7,9) = -V2*V3*sin(TH2-TH3)/X23+V3*V5*sin(-TH5+TH3)/X35
+V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(7,10)=-V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(7,11) = -V3*V5*sin(-TH5+TH3)/X35;
Js(7,12)=0; Js(7,13)=0; Js(7,14)=0; Js(7,15)=0;

%q(8) = V4*V3*sin(TH3-TH4)/r1/X34-G1*V4^2;
Js(8,1)=0; Js(8,2)=0; Js(8,3) = V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(8,4) = V3*sin(-TH4+TH3)/r1/X34-2*V4*G1; Js(8,5)=0; Js(8,6)=0;
Js(8,7)=0; Js(8,8)=0; Js(8,9)=V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(8,10) = -V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(8,11)=0; Js(8,12)=0;
Js(8,13)=0; Js(8,14)=0; Js(8,15)=0;

%q(9) = V4^2/X34-V4*V3*cos(TH4-TH3)/r1/X34+a1*G1*V4^2;
Js(9,1)=0; Js(9,2)=0; Js(9,3) = -V4*cos(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(9,4) = 2*V4/X34-V3*cos(-TH4+TH3)/r1/X34+2*a1*V4*G1; Js(9,5)=0; Js(9,6)=0;
Js(9,7)=0; Js(9,8)=0; Js(9,9)=V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34;
Js(9,10) = -V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1/X34; Js(9,11)=0; Js(9,12)=0;
Js(9,13)=0; Js(9,14)=0; Js(9,15)=0;

%q(10)=V5*V2*sin(TH2-TH5)/X25+V3*V5*sin(TH3-TH5)/X35
+V5*V6*sin(TH6-TH5)/r2/X56;

Js(10,1)=0; Js(10,2) = V5*sin(TH2-TH5)/X25;
Js(10,3) = V5*sin(-TH5+TH3)/X35; Js(10,4)=0;
Js(10,5) = V2*sin(TH2-TH5)/X25+V3*sin(-TH5+TH3)/X35-V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(10,6) = -V5*sin(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(10,7)=0; Js(10,8) = V2*V5*cos(TH2-TH5)/X25;
Js(10,9) = V3*V5*cos(-TH5+TH3)/X35; Js(10,10)=0;
Js(10,11)=-V2*V5*cos(TH2-TH5)/X25-V3*V5*cos(-TH5+TH3)/X35
-V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(10,12)=V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56; Js(10,13)=0; Js(10,14)=0; Js(10,15)=0;

%q(11)=V5^2*(1/X25+1/X35+1/r2^2/X56)-V5*V2*cos(TH5-TH2)/X25-V5*V3*cos(TH5-
TH3)/X35-V5*V6*cos(TH5-TH6)/r2/X56-Bs5*V5^2;

Js(11,1)=0; Js(11,2)=-V5*cos(TH2-TH5)/X25;
Js(11,3) = -V5*cos(-TH5+TH3)/X35; Js(11,4)=0;
Js(11,5) = 2*V5*(1/X25+1/X35+1/r2^2/X56)-V2*cos(TH2-TH5)/X25
-V3*cos(-TH5+TH3)/X35-V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56-2*Bs5*V5;
Js(11,6) = -V5*cos(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(11,7)=0; Js(11,8) = V2*V5*sin(TH2-TH5)/X25;
Js(11,9) = V3*V5*sin(-TH5+TH3)/X35; Js(11,10)=0;
Js(11,11) = -V2*V5*sin(TH2-TH5)/X25-V3*V5*sin(-TH5+TH3)/X35
+V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56;

```

```

Js(11,12)=-V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56; Js(11,13)=0; Js(11,14)=0; Js(11,15)=0;

%x=[V1, V2, V3, V4, V5, V6, TH1, TH2, TH3, TH4, TH5, TH6, Pg1, Eq1, d1]
%q(12)= V5*V6*sin(TH5-TH6)/r2/X56-G2*V6^2;
Js(12,1)=0; Js(12,2)=0; Js(12,3)=0; Js(12,4)=0;
Js(12,5)= V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56; Js(12,6)=V5*sin(-TH6+TH5)/r2/X56-2*V6*G2;
Js(12,7)=0; Js(12,8)=0; Js(12,9)=0; Js(12,10)=0;
Js(12,11)=V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56; Js(12,12)=-V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(12,13)=0; Js(12,14)=0; Js(12,15)=0;

%q(13)= V6^2/X56-V6*V5*cos(TH6-TH5)/r2/X56+a2*G2*V6^2;
Js(13,1)=0; Js(13,2)=0; Js(13,3)=0; Js(13,4)=0;
Js(13,5)= -V6*cos(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(13,6)= 2*V6/X56-V5*cos(-TH6+TH5)/r2/X56+2*a2*V6*G2;
Js(13,7)=0; Js(13,8)=0; Js(13,9)=0; Js(13,10)=0;
Js(13,11)=V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56; Js(13,12)=-V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2/X56;
Js(13,13)=0; Js(13,14)=0; Js(13,15)=0;

%q(14)=Eq1-KE1(V1ref-V1) or q(14) = Eq1-Eqlim;
if flagox1==0 Js(14,1)=KE1;
elseif flagox1==1 Js(14,1)=0;
end
Js(14,2)=0; Js(14,3)=0; Js(14,4)=0; Js(14,5)=0; Js(14,6)=0;
Js(14,7)=0; Js(14,8)=0; Js(14,9)=0; Js(14,10)=0; Js(14,11)=0; Js(14,12)=0;
Js(14,13)=0; Js(14,14)=1; Js(14,15)=0;

%q(15) = TH1;
Js(15,:)= [0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0];

%-----
%-----
% vector of partial derivatives of short-term equilibrium equations with
respect to tap ratios fr=[@qi/@rj]
fr(1:5,:)=zeros(5,2);
fr(6,1)=V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1^2/X34; fr(6,2)=0;
fr(7,1)=-2*V3^2/r1^3/X34+V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1^2/X34; fr(7,2)=0;
fr(8,1)=-V3*V4*sin(-TH4+TH3)/r1^2/X34; fr(8,2)=0;
fr(9,1)=V3*V4*cos(-TH4+TH3)/r1^2/X34; fr(9,2)=0;
fr(10,1)=0; fr(10,2)=V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2^2/X56;
fr(11,1)=0; fr(11,2)=-2*V5^2/r2^3/X56+V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2^2/X56;
fr(12,1)=0; fr(12,2)=-V5*V6*sin(-TH6+TH5)/r2^2/X56;
fr(13,1)=0; fr(13,2)=V5*V6*cos(-TH6+TH5)/r2^2/X56;
fr(14:15,:)=zeros(2,2);

% vector of partial derivatives of the equilibrium conditions of long-term
dynamics with respect to the controlled voltages
if tapreverse==0
% normal tap operation (0=V4-V4ref , 0=V6-V6ref)
hv = [ 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
elseif tapreverse==1
% tapreversing (0=V3ref-V3 , 0=V6-V6ref)
hv = [ 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0;
0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0];
end

% sensitivity matrix A=[aij]=[@Vi/@rj]

A=-hv*inv(Js)*fr

```

3. Πρόγραμμα SRSOLVE

```
clear
global L V3o V4o V5o V6o Po1 Po2 Z tapreverse k V3 V4 V5 V6 Pload1 Pload2 Eq
errorsolve flag %G1 G2

Xd=2.0;
GPF=0.9;
PR=GPF; % p.u.
QR=sqrt(1-PR^2); % p.u.
V2=1; % p.u. (nominal voltage)
Eqlim=abs(V2+j*Xd*(PR-j*QR)/V2); % p.u.

Vref=1.02380772854233;
L=[0.8 0.016 0.08 0.02 0.04 0.006 0.05 1.04 1.00 1.00 Eqlim Vref 100 0 0 0 0];

%cased1: P1=1.8, P2=0.9, t=1230 sec, tapnormal%
% V3 under 0.85 at 1210 sec, V5 under 0.85 at 1230 sec
%ro1=0.8875; ro2=0.9; Go1=1.73981462429115; Go2=0.85999608200662;
% V3o=0.85; V4o=1.02133903488089; V5o=0.85; V6o=1.02752930316116;
%Po1=1.8; Po2=0.9;

%caseg: P1=1.2, P2=1.55, t=1470 sec, tapnormal
% V3 under 0.85 at 1470 sec, V5 under 0.85 at 1470 sec
%ro1=0.9; ro2=0.9; Go1=1.15130213119296; Go2=1.48555376116047;
%V3o=0.85; V4o=1.02609579589124; V5o=0.85; V6o=1.02568210765854;
%Po1=1.2; Po2=1.55;

%caseh: P1=0.9, P2=1.85, t=1670 sec, tapnormal
ro1=0.9; ro2=0.9; Go1=0.86254754426791; Go2=1.78159669000839;
V3o=0.85; V4o=1.02707054089050; V5o=0.85; V6o=1.02363928626722;
Po1=0.9; Po2=1.85;

tapreverse=2;

%G1=Go1; G2=Go2;
k=0; Z=[0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 2]';

%ignore load self-recovery:G1,G2 constant
%tol=odeset('AbsTol',[1e-4 1e-4],'RelTol',1e-6);
%[T,Y]=ode45('r1r2',[0 400],[ro1-1e-2 ro2-1e-2],tol);

% self-restoring load
tol=odeset('AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-4 1e-4],'RelTol',1e-6);
[T,Y]=ode45('r1r2',[0 260],[ro1 ro2 Go1 Go2],tol);

figure(1)
plot(Y(:,1),Y(:,2),'g')
xlabel('r1')
ylabel('r2')
axis equal
hold on

figure(2)
plot(Y(:,3),Y(:,4),'g')
xlabel('G1')
ylabel('G2')
axis equal
hold on

for i=1:length(T);
r1square(i)=Y(i,1)^2;
r2square(i)=Y(i,2)^2;
ratio1(i)=Y(i,3)/r1square(i);
ratio2(i)=Y(i,4)/r2square(i);
end
```


4. Πρόγραμμα R1R2

```
function dy=r1r2(t,y)
global L V3o V4o V5o V6o Po1 Po2 Z tapreverse k V3 V4 V5 V6 Pload1 Pload2 Eq
errorsolve flag %G1 G2

r1=y(1);
r2=y(2);
G1=y(3);
G2=y(4);

TL1=12.5; TL2=TL1; %TL1=Td*d/Dr=10*1.25*0.00625/0.00625
TG1=2000; TG2=TG1; %TG1=10/0.005

L(9)=r1;
L(10)=r2;

X0=Z; %X0=[0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 2]';

YY=fsolve('solvetap', X0, [],L,G1,G2);
k=k+1;
flag(k)=0;
if YY(13)>L(11)+1e-3
    YY=fsolve('solvetap1',X0,[],L,G1,G2);
    flag(k)=1;
end
if abs(YY(15)-G1*YY(8)^2-G2*YY(12)^2)<1e-3 & YY(2:2:12)>0 & YY(13)>0
    p=YY; errorsolve(k)=0; Z=YY;
else
    display('PROBLEM!')
    p=Z; errorsolve(k)=1;
end
V3(k)=p(6);
V4(k)=p(8);
V5(k)=p(10);
V6(k)=p(12);
Pload1(k)=G1*V4(k)^2;
Pload2(k)=G2*V6(k)^2;
Eq(k)=p(13);

if tapreverse==1
    dy(1)=(V3o-V3(k))/TL1;
else
    dy(1)=(V4(k)-V4o)/TL1;
end
if tapreverse==2
    dy(2)=(V5o-V5(k))/TL2;
else
    dy(2)=(V6(k)-V6o)/TL2;
end
dy(3)=(Po1-G1*V4(k)^2)/TG1;
dy(4)=(Po2-G2*V6(k)^2)/TG2;

dy=dy';
```

5. Πρόγραμμα SOLVETAP

```
function g=solvetap(p,L,G1,G2);

TH1=p(1);
V1=p(2);
TH2=p(3);
V2=p(4);
TH3=p(5);
V3=p(6);
TH4=p(7);
V4=p(8);
TH5=p(9);
V5=p(10);
TH6=p(11);
V6=p(12);
Eq1=p(13);
d1=p(14);
Pg1=p(15);

g=zeros(14,1);

% bus 1
g(1) = Pg1-V1*V2*sin(TH1-TH2)/L(8)/L(2);
g(2) = Eq1*V1*cos(d1-TH1)/L(1)-V1^2/L(1)-V1^2/L(2)+V1*V2*cos(TH1-
TH2)/L(8)/L(2);
g(3) = Pg1-Eq1*V1*sin(d1-TH1)/L(1);
% bus 2
g(4) = V1*V2*sin(TH1-TH2)/L(8)/L(2)-V2*V5*sin(TH2-TH5)/L(4);
g(5) = V2^2*(1/L(8)^2/L(2)+1/L(4))-V2*V1*cos(TH2-TH1)/L(8)/L(2)-V2*V5*cos(TH2-
TH5)/L(4);
% bus 3
g(6) = V3*V5*sin(TH5-TH3)/L(6)+V3*V4*sin(TH4-TH3)/L(9)/L(5);
g(7) = V3^2*(1/L(6)+1/L(9)^2/L(5))-V3*V5*cos(TH3-TH5)/L(6)-V3*V4*cos(TH3-
TH4)/L(9)/L(5)-L(15)*V3^2;
% bus 4
g(8) = V4*V3*sin(TH3-TH4)/L(9)/L(5)-G1*V4^2;
g(9) = V4^2/L(5)-V4*V3*cos(TH4-TH3)/L(9)/L(5)+L(14)*G1*V4^2;
% bus 5
g(10)=V5*V2*sin(TH2-TH5)/L(4)+V3*V5*sin(TH3-TH5)/L(6)+V5*V6*sin(TH6-
TH5)/L(10)/L(7);
g(11)=V5^2*(1/L(4)+1/L(6)+1/L(10)^2/L(7))-V5*V2*cos(TH5-TH2)/L(4)-
V5*V3*cos(TH5-TH3)/L(6)-V5*V6*cos(TH5-TH6)/L(10)/L(7)-L(17)*V5^2;
% bus 6
g(12)= V5*V6*sin(TH5-TH6)/L(10)/L(7)-G2*V6^2;
g(13)= V6^2/L(7)-V6*V5*cos(TH6-TH5)/L(10)/L(7)+L(16)*G2*V6^2;

g(14) = Eq1-L(11);
```