



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

# ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πολύκαρπος Αντρέ Χριστοφορίδης

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2012





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

# ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΑΚΤΙΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πολύκαρπος Αντρέ Χριστοφορίδης

**Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Βουρνάς**  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την ..... 2012

.....  
Κ. Βουρνάς  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Κορρές  
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Π. Γεωργιλάκης  
Λέκτορας ΕΜΠ

**Αθήνα 2012**



.....

Πολύκαρπος Αντρέ Χριστοφορίδης

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

Copyright © Πολύκαρπος Αντρέ Χριστοφορίδης, 2012

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.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βουρνά για την πολύτιμη βοήθεια του. Παρά τον περιορισμένο χρόνο η συνεργασία μας ήταν εξαιρετική και η καθοδήγηση του καθοριστική για τη πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου και ιδιαίτερα τον πατέρα μου, που με βοήθησαν και με στήριξαν καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

## Περίληψη

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βασιστούν κυρίως στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή καινούριων γραμμών μεταφοράς είναι δύσκολη αφού υπόκειται στην έγκριση ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών περιορισμών αυξάνοντας δραματικά το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης. Η απάντηση στο αίτημα για αποδοτικότερη αξιοποίηση των συστημάτων μεταφοράς μπορεί να γίνει μέσω των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (FACTS) που επιτρέπουν τον έλεγχο της τάσης και αύξηση των περιθωρίων μεταφερόμενης ισχύος. Επίσης σε δημοσιεύσεις προτείνεται η συνδιασμένη χρήση μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ και μηχανικά συνδεδεμένων ή ελεγχόμενων από θυρίστορ εγκάρσιων πυκνωτών για τον έλεγχο της τάσης και από τις δύο μεριές του μετασχηματιστή και την άεργη αντιστάθμιση.

Έχοντας ως εφιαλτήριο τις παραπάνω σκέψεις η παρούσα εργασία μελετά υπάρχουσες και εναλλακτικές τεχνικές ρύθμισης της τάσης και του συντελεστή ισχύος σε υποσταθμούς υψηλής τάσης/μέσης τάσης και γίνεται σύγκριση τους ως προς το πως επηρεάζουν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε ένα ακτινικό δίκτυο. Μηχανισμοί που μελετώνται είναι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, εγκάρσιοι πυκνωτές, SVC και STATCOM.

Κάθε σενάριο ελέγχου εξετάζεται σε δύο φάσεις. Σε πρώτη φάση γίνονται θεωρητικοί υπολογισμοί που αφορούν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του δικτύου και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μηχανισμών ελέγχου και αντιστάθμισης. Σε δεύτερη φάση το δίκτυο προσομοιώνεται ώστε να φανεί στη πράξη η απόκριση του δικτύου σε κάθε σενάριο ελέγχου. Οι προσομοιώσεις γίνονται σε περιβάλλον MATLAB.

Η εργασία περιλαμβάνει 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και της ευστάθειας τάσεως. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται συνοπτικά μαθηματικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στη θεωρητική ανάλυση του δικτύου και των σεναρίων ελέγχου. Επίσης γίνεται μια ανάλυση των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ καθώς και των μηχανισμών αντιστάθμισης που εξετάστηκαν (εγκάρσιοι πυκνωτές, SVC και STATCOM). Στα κεφάλαια 3, 4 και 5 παρουσιάζονται τα σενάρια ελέγχου που εξετάστηκαν. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η περίπτωση ενός ακτινικού δικτύου χωρίς έλεγχο τάσης ή συντελεστή ισχύος καθώς και η συνήθης πρακτική έλεγχου της δευτερεύουσας τάσης διανομής του μετασχηματιστή και του συντελεστή ισχύος με ΣΑΤΥΦ και εγκάρσιους πυκνωτές αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο 4 εξετάζεται η περίπτωση ελέγχου της δευτερεύουσας τάσης διανομής με χρήση εγκάρσιων πυκνωτών, SVC και STATCOM. Τέλος στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται δύο διαφορετικά σενάρια ταυτόχρονου ελέγχου της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας τάσης του μετασχηματιστή. Στο πρώτο σενάριο το ΣΑΤΥΦ ελέγχει τη δευτερεύουσα τάση ενώ εγκάρσιοι πυκνωτές συνδεδεμένοι στη μεριά της μέσης τάσης ελέγχουν τη πρωτεύουσα τάση. Στο δεύτερο σενάριο η δευτερεύουσα τάση ελέγχεται και πάλι από ΣΑΤΥΦ ενώ η πρωτεύουσα ελέγχεται από SVC που συνδέεται στη μεριά της υψηλής τάσης. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προοπτικές βελτίωσης και περαιτέρω μελέτης των σεναρίων που εξετάστηκαν.





## Abstract

In order to encounter the constantly increasing electricity supply demand, the electric power companies have to rely mainly on the existing infrastructure for production and transmission of electricity. The construction of new transmission lines is difficult since it requires approval by regulatory authorities, it is under environmental restrictions and hence increasing a lot the cost of such an investment. The answer to the requirement for a more efficient usage of transmission systems can be the Flexible AC Transmission Systems (FACTS) that allow voltage control and increase the margins of transmitted power. Also, the combination of Load Tap Changers (LTC) with shunt capacitors (mechanically or electronically switched) for voltage control on both transformer sides and for reactive compensation, is suggested in several publications.

Based on the above, this work studies the existing alternative voltage and power factor control methods in high/medium voltage substations. Additionally, a comparison is done on how these methods affect the maximum power transfer in a radial network. The devices that are examined are : LTC transformers, shunt capacitors, SVC and STATCOM.

Each control scenario is examined in two stages. In the first stage, the theoretical calculations related to the maximum power transfer and the characteristics of the control and compensation methods are performed. In the second stage, the network is computer simulated in order to show in practice the network response in each control scenario. The computer simulations are done in the MATLAB platform.

This work is divided in 6 chapters. The first chapter is an introduction on power system basics and voltage stability. The mathematics used for the theoretical analysis of the network are presented in chapter 2. In the same chapter, there is an analysis of LTC transformers and the controlling devices considered (shunt capacitors, SVC and STATCOM). In chapters 3, 4 and 5 the considered control scenarios are presented. In chapter 3 the case of a radial network without voltage and power factor control is presented. Also, the usual control method of secondary distribution voltage and power factor with LTC and shunt capacitors respectively is presented. In chapter 4, the secondary voltage control with shunt capacitors, SVC and STATCOM is examined. Finally, in chapter 5 two different scenarios of concurrent primary and secondary transformer voltage control are presented. In the first scenario, the LTC controls the secondary voltage while shunt capacitors at medium voltage side control the primary voltage. In the second scenario, the secondary voltage is controlled by LTC while the primary voltage is controlled by an SVC at the high voltage side. In chapter 6, the conclusions of this study are presented together with recommendations for further research.



# Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 Δομή ΣΗΕ.....	13
1.2 Ευστάθεια Τάσεως.....	14
1.2.1 Μηχανισμός εμφάνισης αστάθειας τάσης.....	17
1.2.2 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς και χαρακτηριστική P-V δικτύου.....	19
1.2.3 Αποκατάσταση ισχύος φορτίου και ΣΑΤΥΦ.....	24
1.3 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος: Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και διεσπαρμένη παραγωγή .....	27
1.3.1 Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και ηλεκτρονικά ισχύος.....	27
1.3.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή και έλεγχος τάσης.....	29
1.3.3 Ευφυή Δίκτυα.....	31
1.4 Αντικείμενο και δομή της εργασίας.....	32
2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΓΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ.....	35
2.1 Μαθηματική ανάλυση συστημάτων.....	35
2.1.1 Ποιοτική θεωρία διαφορικών εξισώσεων.....	35
2.1.2 Σημεία ισορροπίας και ευστάθεια.....	36
2.1.3 Αναλλοίωτες πολλαπλότητες.....	39
2.1.4 Διακλαδώσεις.....	42
2.1.5 Συστήματα διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων.....	44
2.1.6 Χωρισμός χρονικών κλιμάκων.....	45
2.1.7 Υβριδικά συστήματα.....	48
2.2 Μετασηματιστές με ΣΑΤΥΦ.....	49
2.3 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος.....	51
2.3.1 Εγκάρσιοι πυκνωτές.....	52
2.3.2 Συσκευές αέργου αντιστάθμισης με ηλεκτρονικά ισχύος (SVC, STATCOM).....	55
3. ΣΥΝΗΘΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ..	63
3.1 Σενάριο αναφοράς: Δίκτυο χωρίς ρύθμιση τάσης.....	63
3.2 Διόρθωση συντελεστή ισχύος.....	65
3.3 Ρύθμιση τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ: Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	67
3.4 Ρύθμιση τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ: Προσομοίωση.....	69
3.4.1 Ρύθμιση ΣΑΤΥΦ χωρίς διόρθωση συντελεστή ισχύος.....	70
3.4.2 Ρύθμιση ΣΑΤΥΦ με διόρθωση συντελεστή ισχύος.....	79
4. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ / SVC / STATCOM.....	89
4.1 Ρύθμιση τάσης διανομής με SVC / STATCOM.....	89
4.1.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί για SVC.....	89
4.1.2 Προσομοίωση για SVC.....	92
4.1.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί για STATCOM.....	96
4.1.4 Προσομοίωση για STATCOM.....	97
4.2 Ρύθμιση τάσης διανομής με συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών.....	100
4.2.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	100
4.2.2 Προσομοίωση για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές.....	102

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ (ΥΤ) ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ (ΜΤ) ΤΑΣΗΣ ...	109
5.1 Ρύθμιση ΥΤ μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ.....	109
5.1.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	109
5.1.2 Προσομοίωση ρύθμισης ΥΤ μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμισης ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ.....	112
5.2 Ρύθμιση ΥΤ μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ.....	117
5.2.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί.....	118
5.2.2 Προσομοίωση για ρύθμιση ΥΤ μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ.....	120
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	129
6.1 Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα.....	129
6.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα.....	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	133

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

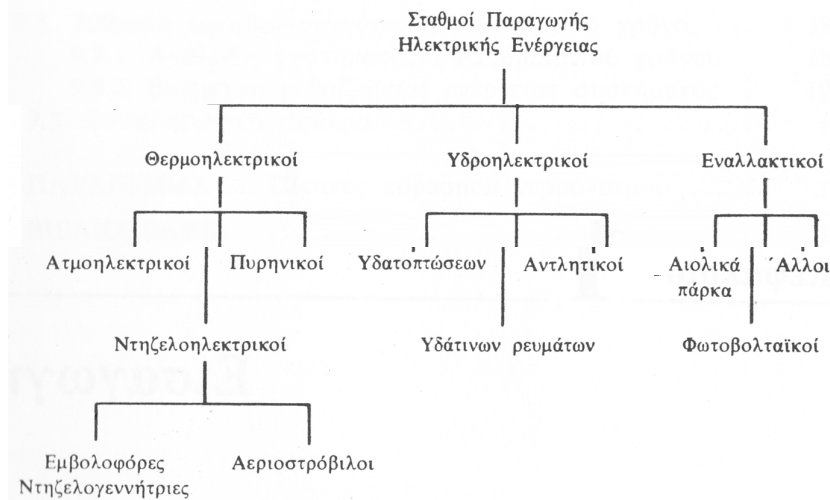
## 1.1 Δομή ΣΗΕ

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί, να λειτουργεί σωστά και να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οποudήποτε υπάρχει ζήτηση.
2. Πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος.
3. Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες που συνιστούν τη ποιότητα αυτή είναι: σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως.
4. Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Αν και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας διαφέρουν ανά τον κόσμο όλα αποτελούνται από τρία βασικά υποσυστήματα. Αυτά είναι το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής.

Το σύστημα παραγωγής αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά του υπό υψηλή τάση (ΥΤ) για μείωση των απωλειών. Οι σταθμοί παραγωγής μετατρέπουν μια πρωτογενή μορφή ενέργειας σε μηχανική (κινητήριες μηχανές-στρόβιλοι) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι διάφοροι τύποι σταθμών παραγωγής κατατάσσονται όπως στο Σχήμα 1.1 σε θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς.



Σχήμα 1.1 Χωρισμός σταθμών παραγωγής

Από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό ως μέσο (εξωτερική καύση) για παραγωγή μηχανικής ενέργειας μέσω αμμοστροβίλων. Αντίθετα οι νηξελοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ).

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής η δυναμική ενέργεια του νερού μετατρέπεται σε κινητική με τη βοήθεια υδροστροβίλων διαφόρων τύπων. Όσον αφορά τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας, οι περισσότερες διαδεδομένες εφαρμογές τους στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται στον ίδιο ζυγό του δικτύου. Συνήθως τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν κυρίως νηξελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί εγκαθίστανται συνήθως για την ηλεκτροδότηση απομονωμένων γεωγραφικών οικισμών, οι οποίοι είναι δύσκολο να συνδεθούν με το δίκτυο. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να γίνεται μια προσπάθεια για την αύξηση της διείσδυσης των εναλλακτικών πηγών ενέργειας στο κύριο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. [4]

Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξεως των δικτύων αυτών, τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων τάσεων του δικτύου και τους υποσταθμούς υποβιβασμού της τάσης σε μέση τάση προς τροφοδότηση των δικτύων διανομής. Με το σύστημα μεταφοράς η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής προς τις περιοχές καταναλώσεως. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Διεθνώς οι εφαρμοζόμενες ονομαστικές τάσεις μεταφοράς σήμερα περιλαμβάνουν τιμές όπως 66 KV, 110 KV, 132 KV, 138 KV, 150 KV, 220 KV, 275 KV, 345 KV, 400 KV, 500 KV και 750 KV. Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές ΜΤ και ΧΤ. Περιλαμβάνουν τις γραμμές ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω των οποίων αυτή φτάνει έως τους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης, οι οποίοι τους συνδέουν με το σύστημα μεταφοράς. Η διάκριση μεταξύ μεταφοράς και διανομής διαφέρει από χώρα σε χώρα. Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, όπως άλλωστε και για τη μεταφορά, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν το ρόλο της μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής. [2]

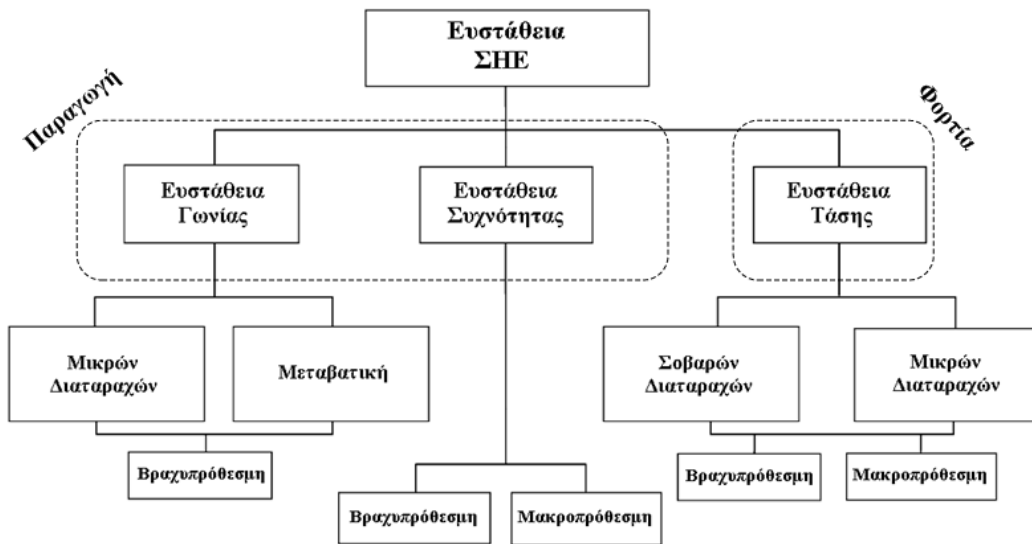
## 1.2 Ευστάθεια Τάσεως

Η ευστάθεια ενός ΣΗΕ γενικά, ορίζεται ως η ικανότητα του να παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας υπό κανονικές συνθήκες και να επανέρχεται σε αυτή μετά από μια διαταραχή.

Η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να πάρει διάφορες μορφές και μπορεί να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Η ανάλυση των προβλημάτων αστάθειας, η αναγνώριση των βασικών παραγόντων που συνεισφέρουν στην αστάθεια και η σχεδίαση μεθόδων βελτίωσης της ευσταθούς λειτουργίας διευκολύνεται ιδιαίτερα από το διαχωρισμό της ευστάθειας σε κατάλληλες κατηγορίες. Αυτές οι κατηγορίες βασίζονται στους παρακάτω παράγοντες:

- Το μέγεθος της διαταραχής που μπορεί να προκαλέσει την αστάθεια
- Οι μηχανισμοί, διαδικασίες και η χρονική κλίμακα που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να εξεταστεί η αστάθεια
- Τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η επικείμενη αστάθεια. [10]

Στο Σχήμα 1.2 δίνεται μια κατηγοριοποίηση των διάφορων μορφών ευστάθειας των ΣΗΕ με βάση τα παραπάνω κριτήρια.



Σχήμα 1.2 Κατηγοριοποίηση των μορφών ευστάθειας ενός ΣΗΕ

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τις τάσεις σε όλους τους ζυγούς σε αποδεκτά επίπεδα τιμών όταν υποβάλλεται σε μια διαταραχή από ένα αρχικό σημείο λειτουργίας και επομένως περιγράφει την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί ή να επαναφέρει την ισορροπία μεταξύ της ζήτησης και παραγωγής. Αντίθετα κατά την απώλεια ευστάθειας τάσης το ισοζύγιο διαταρράσσεται.

Η αστάθεια τάσης εκδηλώνεται με τη μορφή της βαθμιαίας πτώσης ή ανύψωσης των τάσεων ορισμένων ζυγών. Πιθανή επίπτωση μιας τέτοιας εξέλιξης είναι η απώλεια φορτίου μιας περιοχής ή απώλεια γραμμών μεταφοράς εξαιτίας της λειτουργίας ηλεκτρονόμων προστασίας που μπορεί να οδηγήσουν και σε άλλες διαδοχικές απώλειες στοιχείων του συστήματος.

Η κινητήρια δύναμη της αστάθειας τάσης είναι συνήθως τα φορτία που τείνουν να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν. Τέτοια δυναμικά φορτία είναι συνήθως κινητήρες επαγωγής που μεταβάλλουν την ολίσθηση τους, θερμοστατικά φορτία αλλά και έμμεσοι μηχανισμοί αποκατάστασης φορτίου όπως ρυθμιστές τάσης και Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ).

Η ευστάθεια τάσης μπορεί, για λόγους αποτελεσματικότερης ανάλυσης, να χωριστεί σε ευστάθεια μεγάλων και μικρών διαταραχών. Η ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί τα επίπεδα των τάσεων στις επιθυμητές τιμές ύστερα από σοβαρές διαταραχές όπως απώλεια μιας μεγάλης μονάδας παραγωγής ή μιας διασυνδεδετικής γραμμής. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μεγάλων διαταραχών βασίζεται στην εξέταση της μη γραμμικής απόκρισης του συστήματος για ορισμένο χρόνο, ώστε να διαπιστωθεί η συμπεριφορά και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διατάξεων του δικτύου όπως οι σύγχρονες γεννήτριες συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων ελέγχου και προστασίας, οι κινητήρες και τα ΣΑΤΥΦ.

Η ευστάθεια μικρών διαταραχών αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί αποδεκτά επίπεδα τάσεων σε όλους τους ζυγούς όταν υφίσταται μικρές διαταραχές όπως είναι η μεταβολή στη ζήτηση ενός συγκεκριμένου φορτίου. Ο εξεταζόμενος τύπος ευστάθειας εξαρτάται από τη χαρακτηριστική των φορτίων και των συνεχών ή διακριτών διατάξεων ελέγχου σε μια δεδομένη χρονική στιγμή λειτουργίας. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης μικρών διαταραχών μπορεί να γίνει με γραμμικοποίηση του συστήματος στην εγγύτητα του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας.

Επιπλέον η ευστάθεια τάσης μπορεί να κατηγοριοποιηθεί και ως προς το χρονικό πλαίσιο στο οποίο εξετάζεται, δηλαδή είτε στη βραχυπρόθεσμη (μερικά δευτερόλεπτα) είτε στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (δεκάδες λεπτά). Η βραχυπρόθεσμη ευστάθεια τάσης εμπλέκει ταχέως αποκρινόμενους δυναμικούς μηχανισμούς όπως κινητήρες επαγωγής, ηλεκτρικά ελεγχόμενα φορτία και διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος. Η ανάλυση φαινομένων αυτής της κλίμακας απαιτεί την επίλυση διαφορικών εξισώσεων ή και εξισώσεων διαφορών. Επιπλέον η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης σχετίζεται με την ανάλυση βραχυκυκλωμάτων κοντά στα φορτία, σε αντίθεση με την αστάθεια γωνίας που εξετάζεται κοντά στις μονάδες παραγωγής.

Η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης προέρχεται από τη λειτουργία πιο αργών μηχανισμών, όπως τα ΣΑΤΥΦ, επαναφερόμενα θερμοστατικά φορτία, περιοριστές υπερδιέγερσης στις σύγχρονες μηχανές και στατά συστήματα πυκνωτών. Η ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης πραγματοποιείται με δυναμικές προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος για ένα χρονικό διάστημα μερικών λεπτών. Στη περίπτωση αυτή η αστάθεια μπορεί να οφείλεται είτε σε απώλεια μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας είτε στην επίτευξη μακροπρόθεσμου σημείου ισορροπίας, το οποίο όμως είναι ασταθές από πλευράς ευστάθειας μικρών διαταραχών. Επίσης η αστάθεια τάσης μπορεί να προκληθεί όταν ξεπεραστούν τα όρια της περιοχής έλξης ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας μετά τη διαταραχή και τη λήψη διορθωτικών μέτρων.

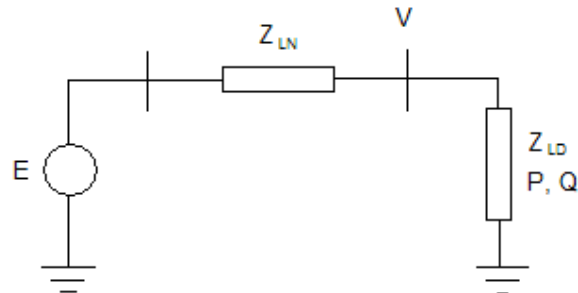
Στις περιπτώσεις αξιολόγησης μέτρων αντιμετώπισης των προβλημάτων μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης απαιτούνται εκτεταμένες χρονικές προσομοιώσεις



του δικτύου. Στις περιπτώσεις αυτές για την απλοποίηση και επιτάχυνση των υπολογισμών χρησιμοποιούνται απλοποιητικές τεχνικές όπως η “οιονεί στατικές μεταβολές” που θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια. [3]

### 1.2.1 Μηχανισμός εμφάνισης αστάθειας τάσης

Η αστάθεια τάσης μπορεί να εμφανιστεί με διάφορους τρόπους. Στην απλουστευμένη μορφή της μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας το ακτινικό δίκτυο που φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 1.3:



Σχήμα 1.3 Ακτινικό δίκτυο με γραμμή και φορτίο

Το ακτινικό δίκτυο του Σχήματος 1.3 αποτελείται από μια σταθερή πηγή τάσης  $E$  που τροφοδοτεί ένα φορτίο  $Z_{LD}$  μέσω μιας σύνθετης αντίδρασης  $Z_{LN}$  σε σειρά. Το ρεύμα που διαρρέει το παραπάνω δίκτυο δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{I} = \frac{\tilde{E}}{\tilde{Z}_{LN} + \tilde{Z}_{LD}} \quad (1.1)$$

όπου  $\tilde{Z}_{LN} = Z_{LN} \angle \theta$  και  $\tilde{Z}_{LD} = Z_{LD} \angle \varphi$

Το μέτρο του ρεύματος δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{E}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \varphi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \varphi)^2}} \quad (1.2)$$

Η παραπάνω έκφραση μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$I = \frac{E}{Z_{LN} \sqrt{F}} \quad (1.3)$$

όπου  $F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2\left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \varphi)$

Το μέτρο της τάσης στο ζυγό του φορτίου δίνεται από τη σχέση (1.4):

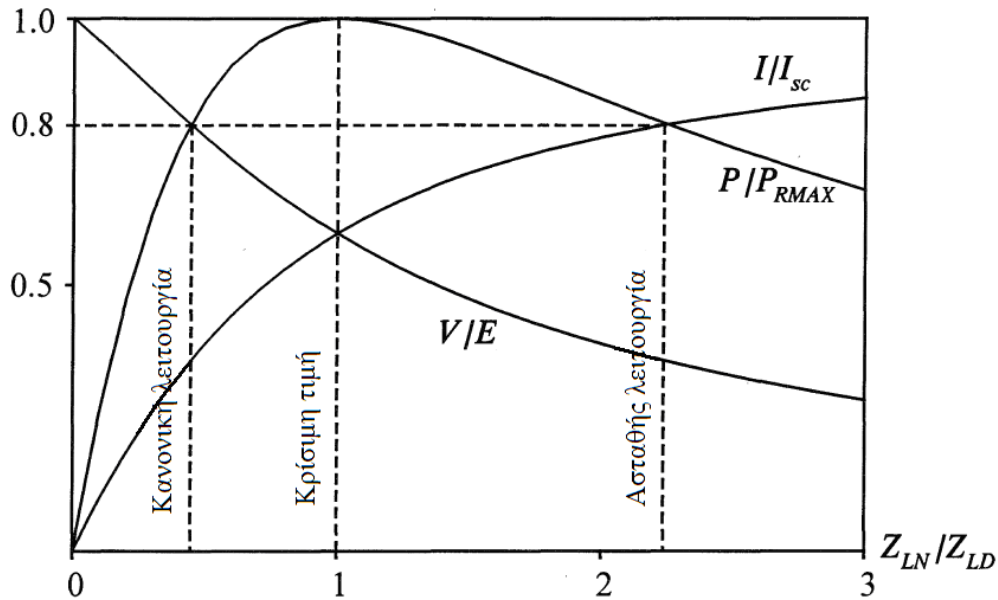
$$V = Z_{LD} I = \frac{E Z_{LD}}{Z_{LN} \sqrt{F}} \quad (1.4)$$

Η ενεργός ισχύς που καταναλώνει το φορτίο είναι:

$$P = VI \cos \varphi = \frac{Z_{LD}}{F} \left( \frac{E}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \varphi \quad (1.5)$$

Οι γραφικές παραστάσεις των  $I$ ,  $V$  και  $P$  φαίνονται στο Σχήμα 1.4 συναρτήσει του  $Z_{LN}/Z_{LD}$  για  $\tan\theta=10$  ( $\theta = \angle Z_{LN}$ ) και  $\cos\varphi=0.95$  ( $\varphi = \angle Z_{LD}$ ). Τα μεγέθη των  $I$ ,  $V$  και  $P$  κανονικοποιούνται, ως προς το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$ , τη τάση της πηγής  $E_s$  και τη μέγιστη ισχύ του φορτίου  $P_{Rmax}$ , ώστε τα συμπεράσματα να είναι εφαρμόσιμα για κάθε τιμή του  $Z_{LN}$ .

Καθώς η ζήτηση του φορτίου αυξάνει με τη μείωση του  $Z_{LD}$ , η ισχύς  $P$  αυξάνει αρχικά γρήγορα και μετά πιο αργά μέχρι να φτάσει στο μέγιστο, μετά από το οποίο μειώνεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι υπάρχει μια μέγιστη τιμή ενεργού ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί από μια σταθερή πηγή τάσης μέσω μιας σύνθετης αντίδρασης.



Σχήμα 1.4  $I$ ,  $V$  και  $P$  συναρτήσει του  $Z_{LN}/Z_{LD}$  για  $\tan\theta=10$  και  $\cos\varphi=0.95$

Η μεταφερόμενη ισχύς είναι μέγιστη όταν η πτώση τάσης στη γραμμή είναι κατά μέτρο ίση με την  $V$ . Αυτό ισχύει όταν  $Z_{LN}/Z_{LD}=1$ . Καθώς το  $Z_{LD}$  μειώνεται σταδιακά, το ρεύμα  $I$  αυξάνεται και το μέτρο της  $V$  μειώνεται. Αρχικά για μεγάλες τιμές του  $Z_{LD}$  η αύξηση του  $I$  κυριαρχεί σε σχέση με τη μείωση του  $V$  και επομένως το  $P$  αυξάνει ταχέως με τη μείωση του  $Z_{LD}$ . Καθώς το  $Z_{LD}$  πλησιάζει το  $Z_{LN}$  η επίδραση της αύξησης του  $I$  είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της μείωσης του  $V$ . Όταν το  $Z_{LD}$

είναι μικρότερο από το  $Z_{LN}$  η μείωση του  $V$  κυριαρχεί της αύξησης του  $I$  με αποτέλεσμα τη μείωση του  $P$ .

Το κρίσιμο σημείο λειτουργίας που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ αντιπροσωπεύει το όριο της κανονικής λειτουργίας. Μετά το κρίσιμο σημείο η χαρακτηριστική του φορτίου είναι αυτή που καθορίζει αν η τάση θα συνεχίσει να μειώνεται και αν το σύστημα τελικά θα περιέλθει σε αστάθεια. Με ένα στατικό φορτίο σταθερής αντίδρασης το σύστημα σταθεροποιείται σε επίπεδα τάσης και ισχύος χαμηλότερα από τα επιθυμητά. Από την άλλη, με φορτία σταθερής ισχύος το σύστημα γίνεται ασταθές μέσω της κατάρρευσης της τάσης του ζυγού. Για άλλες χαρακτηριστικές η τάση καθορίζεται από το συνδυασμό των χαρακτηριστικών της γραμμής και του φορτίου. Αν το φορτίο τροφοδοτείται από μετασχηματιστή με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπο Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), η αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού θα επιχειρήσει να αυξήσει τη τάση στους ακροδέκτες του φορτίου. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα να μειωθεί η φαινόμενη αντίδραση του φορτίου  $Z_{LD}$  όπως φαίνεται από το ζυγό μεταφοράς. Αυτό με τη σειρά του θα οδηγήσει στη περαιτέρω μείωση της  $V$ .

Η παραπάνω ανάλυση περιορίστηκε σε ένα απλό ακτινικό δίκτυο γιατί παρουσιάζει μια απλή, ωστόσο ξεκάθαρη εικόνα του προβλήματος ευστάθειας τάσης. Σε μεγαλύτερα και πολυπλοκότερα ΣΗΕ πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την ευστάθεια και να οδηγήσουν σε κατάρρευση. Μερικοί από αυτούς τους παράγοντες είναι τα επίπεδα μεταφοράς ισχύος, οι χαρακτηριστικές των φορτίων, η ικανότητα άεργης φόρτισης των γεννητριών και οι χαρακτηριστικές αέργου ισχύος των μηχανισμών αντιστάθμισης. [10]

### 1.2.2 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς και χαρακτηριστική P-V δικτύου

Όταν εξετάζουμε σε ένα ακτινικό δίκτυο την ευστάθεια τάσης στη μακροπροθεσμη χρονική κλίμακα η σχέση μεταξύ της τάσης του ζυγού μεταφοράς  $V$  και της ενεργού ισχύος  $P$  που καταναλώνει το φορτίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Οι P-V καμπύλες, όπως συνήθως ονομάζονται στη βιβλιογραφία, παρουσιάζουν γραφικά αυτή τη σχέση και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του ορίου φόρτισης που σχετίζεται άμεσα με την ευστάθεια τάσεως. Οι καμπύλες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την ανάλυση πολυπλοκότερων δικτύων. Σε αυτή τη περίπτωση η ισχύς  $P$  είναι η συνολική ισχύς που καταναλίσκεται σε μια περιοχή του δικτύου και η τάση  $V$  είναι η τάση σε έναν κρίσιμο ή αντιπροσωπευτικό ζυγό μεταφοράς αυτής της περιοχής. [11]

Θεωρούμε ξανά το ακτινικό δίκτυο του Σχήματος 1.3 το οποίο αποτελεί την ανά φάση ισοδύναμη αναπαράσταση ενός απομονωμένου φορτίου. Για την εξαγωγή των επιθυμητών αποτελεσμάτων θεωρούμε ότι το φορτίο εκφράζεται από την ενεργό και άεργο ισχύ  $P$  και  $Q$  που καταναλώνει και ότι έχει σταθερό συντελεστή ισχύος  $\cos\phi$ . Επίσης θεωρούμε ότι  $Z_{LN} = R + jX$ .

Για λόγους απλότητας αγνοούμε την ωμική αντίσταση του παραπάνω δικτύου. Επίσης θεωρούμε την ιδανική πηγή τάσης ως αναφορά, δηλαδή  $\tilde{E} = E \angle 0^\circ$ . Το μέτρο και η γωνία της τάσης του ζυγού που συνδέεται το φορτίο είναι αντίστοιχα  $V$  και  $\theta$ .

Με εφαρμογή του νόμου τάσεων του Kirchhoff βρίσκουμε εύκολα ότι:

$$\tilde{V} = \tilde{E} - jX\tilde{I} \quad (1.6)$$

Η μιγαδική ισχύς που απορροφάται από το φορτίο είναι:

$$S = P + jQ = \tilde{V}\tilde{I}^* = \tilde{V} \frac{\tilde{E}^* - \tilde{V}^*}{-jX} = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (1.7)$$

η οποία αν αναλυθεί σε πραγματικό και φανταστικό μέρος, δίνει:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (1.8)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (1.9)$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις είναι οι εξισώσεις ροής ισχύος ενός δικτύου χωρίς απώλειες.

Απαλείφοντας το  $\theta$  από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η πολύ γνωστή διτετράγωνη εξίσωση, που θα αποδειχθεί πολύ χρήσιμη στην ανάλυση μας στα επόμενα κεφάλαια:

$$V^4 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.10)$$

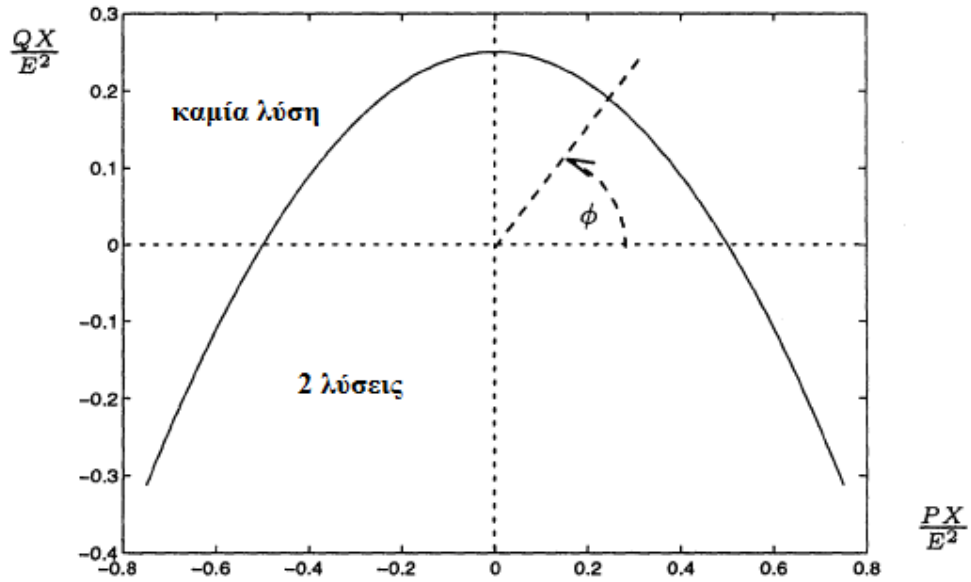
Η παραπάνω εξίσωση είναι δευτέρου βαθμού ως προς  $V^2$ . Για να έχει έστω και μια λύση πρέπει η διακρίνουσα της να είναι μη μηδενική, δηλαδή να ισχύει:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.11)$$

που απλοποιείται στη παρακάτω σχέση:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (1.12)$$

Για ισότητα στη παραπάνω σχέση προκύπτει μια παραβολή στο επίπεδο (P,Q) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.5:



Σχήμα 1.5 Παραβολή ορίων φόρτισης στο επίπεδο (P,Q)

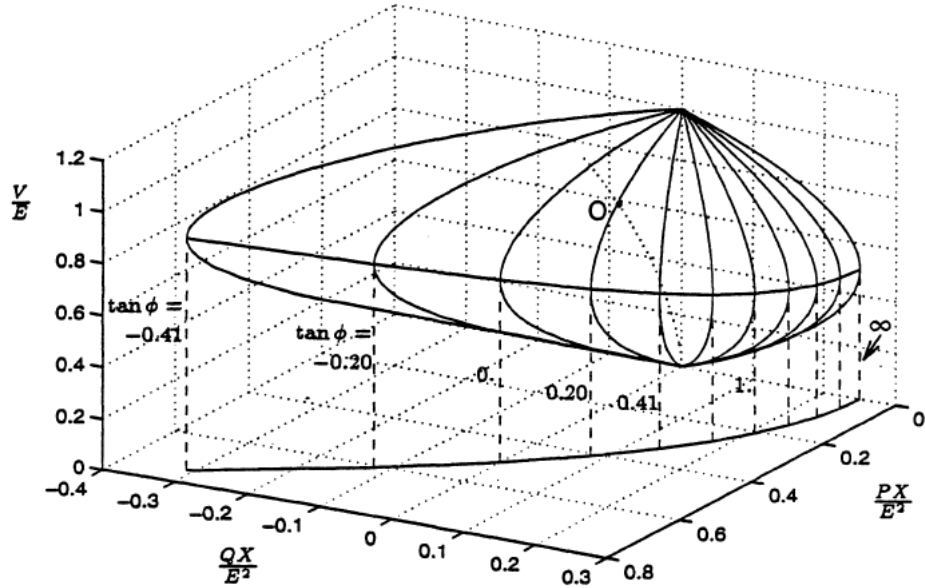
Όλα τα σημεία “εντός” της καμπύλης ικανοποιούν την παραπάνω ανισότητα και έτσι οδηγούν σε δύο λύσεις ροής φορτίου. Έξω από τη παραβολή δεν υπάρχει καμία λύση και πάνω σε αυτή υπάρχει ακριβώς μία λύση.

Αυτή η παραβολή είναι ο γεωμετρικός τύπος των σημείων για τα οποία έχουμε μέγιστη μεταφορά ισχύος. Σημεία με αρνητική ενεργό ισχύ P αντιστοιχούν σε μέγιστη παραγωγή, ενώ σημεία με θετικό P αντιστοιχούν σε μέγιστη κατανάλωση, υπό δοσμένο συντελεστή ισχύος.

Επιστρέφοντας στη σχέση (1.10) και λύνοντας την ως προς  $V$  βρίσκουμε τις παρακάτω 2 λύσεις:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XQE^2}} \quad (1.13)$$

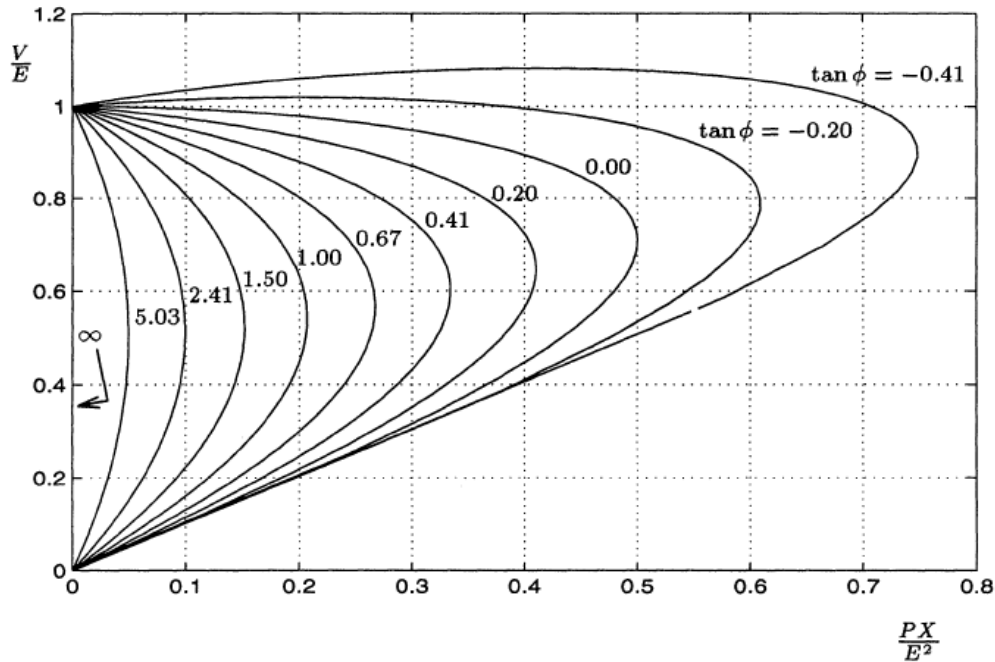
Στο χώρο (P,Q,V), η σχέση (1.10) ορίζει μία δισδιάστατη επιφάνεια που φαίνεται στο Σχήμα 1.6:



Σχήμα 1.6 Χώρος P,Q,V

Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη λύση με το + στη σχέση (1.13), ή αλλιώς στη λύση υψηλότερης τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στη λύση με το - ή αλλιώς στη λύση χαμηλής τάσης. Ο “ισημερινός” της παραπάνω επιφάνειας αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Η προβολή αυτού του ισημερινού στο επίπεδο (P,Q) συμπίπτει με τη παραβολή που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.5.

Προβάλλοντας του “μεσημβρινούς” της παραπάνω επιφάνειας στο επίπεδο (P,V) προκύπτουν οι καμπύλες της τάσης φορτίου συναρτήσει της ενεργού ισχύος για διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος. Αυτές οι γνωστές καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 1.7 και διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη κατανόηση και εξήγηση της αστάθειας τάσης.



Σχήμα 1.7 Καμπύλες PV

Παρατηρώντας το Σχήμα 1.7 μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1. Για δεδομένη ισχύ φορτίου μικρότερη από τη μέγιστη υπάρχουν δύο λύσεις: μία με υψηλότερη τάση και χαμηλό ρεύμα, η άλλη με χαμηλότερη τάση και υψηλό ρεύμα. Η πρώτη λύση αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας με τη τάση του φορτίου  $V$  να είναι πιο κοντά στη τάση της πηγής  $E$ . Μόνιμη λειτουργία στο κάτω μέρος της καμπύλης είναι αδύνατη αφού αντιστοιχεί σε αστάθεια.
2. Όσο το φορτίο αντισταθμίζεται όλο και περισσότερο (που αντιστοιχεί σε μικρότερο  $\tan\phi$ ), η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς αυξάνεται. Ωστόσο η τάση στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη ισχύς αυξάνει και αυτή. Αυτή η κατάσταση είναι επικίνδυνη από την άποψη ότι η μέγιστη μεταφορά μπορεί να επιτευχθεί σε τιμές της τάσης πολύ κοντά στις τιμές κανονικής λειτουργίας. Επίσης για υψηλή αντιστάθμιση και για ισχύ φορτίου κοντά στη μέγιστη οι δύο λύσεις της τάσης είναι κοντά η μία στην άλλη και χωρίς επαρκή ανάλυση μπορεί να αποδειχθεί δύσκολη η εξακρίβωση της λύσης κανονικής λειτουργίας.
3. Για υπερ-αντισταθμισμένα φορτία ( $\tan\phi < 0$ ), για ένα τμήμα της PV καμπύλης, η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος του φορτίου. Η εξήγηση είναι ότι ύπο αρνητικό  $\tan\phi$ , όταν περισσότερη ενεργός ισχύς καταναλώνεται, όλο και περισσότερη άεργος ισχύς παράγεται από το φορτίο. Επομένως για χαμηλή τάση η πτώση τάσης λόγω της αύξησης της κατανάλωσης του φορτίου ακυρώνεται από τη παραγωγή άεργου ισχύος από το φορτίο. Όσο πιο αρνητικό το  $\tan\phi$ , τόσο μεγαλύτερο είναι το τμήμα της PV καμπύλης για το οποίο συμβαίνει αυτό.

### 1.2.3 Αποκατάσταση ισχύος φορτίου και ΣΑΤΥΦ

Η χαρακτηριστική τάσεως ενός φορτίου ή απλά χαρακτηριστική φορτίου είναι μια σχέση που εκφράζει τη σχέση της ενεργού και της αέργου ισχύος που καταναλώνει το φορτίο συναρτήσει της τάσης και μιας ανεξάρτητης μεταβλητής που ονομάζεται ζήτηση φορτίου. Άρα η γενική μορφή της χαρακτηριστικής φορτίου είναι η εξής:

$$P = P(z, V) \quad (1.14\alpha)$$

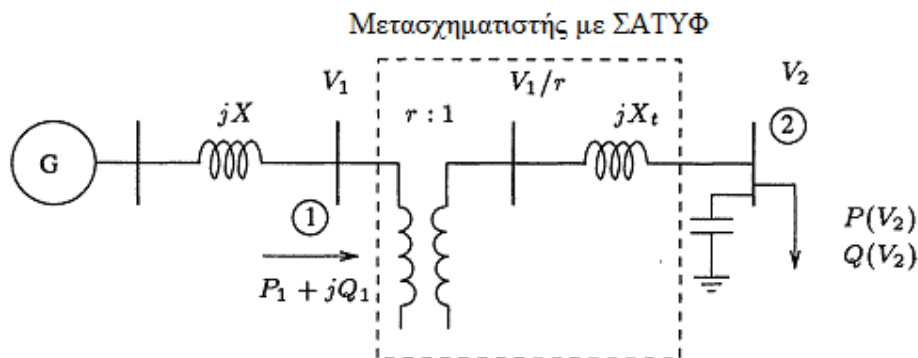
$$Q = Q(z, V) \quad (1.14\beta)$$

Η ζήτηση του φορτίου μπορεί να είναι σταθερή, οπότε το φορτίο είναι στατικό, ή μπορεί να μεταβάλλεται με βάση μια διαφορική εξίσωση ή εξίσωση διαφορών, οπότε το φορτίο είναι δυναμικό. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά διαφορών τύπων φορτίων και μηχανισμών ελέγχου τείνουν να αποκαταστήσουν την ισχύ του φορτίου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται αποκατάσταση ισχύος φορτίου. Συνηθισμένοι τύποι δυναμικών φορτίων είναι οι μηχανές επαγωγής, φορτία πίσω από μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ και τα θερμοστατικά φορτία. Στην παρούσα εργασία μας απασχολεί η δεύτερη κατηγορία δυναμικών φορτίων.

Ένας από τους βασικότερους παράγοντες στην αποκατάσταση ισχύος φορτίων είναι ο έλεγχος της τάσης που πραγματοποιείται από τους μετασχηματιστές διανομής με ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ ελέγχει τη τάση διανομής αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού  $r$  του μετασχηματιστή. Στις περισσότερες περιπτώσεις η μεταβλητή λήψη βρίσκεται στα τυλίγματα του μετασχηματιστή που βρίσκονται στην πλευρά υψηλής τάσης. Ένας λόγος για τον οποίο γίνεται αυτό είναι ότι τα ρεύματα σε αυτή την πλευρά είναι μικρότερα κάνοντας την αλλαγή της λήψης ευκολότερη. Ένας άλλος λόγος είναι ότι η πλευρά υψηλής τάσης έχει περισσότερα τυλίγματα επιτρέποντας ακριβέστερη ρύθμιση της τάσης.

Τα ΣΑΤΥΦ είναι γενικά αργοί μηχανισμοί αποκατάστασης, για να αποφεύγονται άσκοπες αλλαγές του λόγου μετασχηματισμού που φθείρουν τον εξοπλισμό.

Για τη καλύτερη κατανόηση της αποκατάστασης ισχύος του φορτίου θα γίνει χρήση του Σχήματος 1.8 που αναπαριστά ένα ακτινικό δίκτυο που αποτελείται από μια γεννήτρια που τροφοδοτεί ένα μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ μέσω μιας γραμμής μεταφοράς:



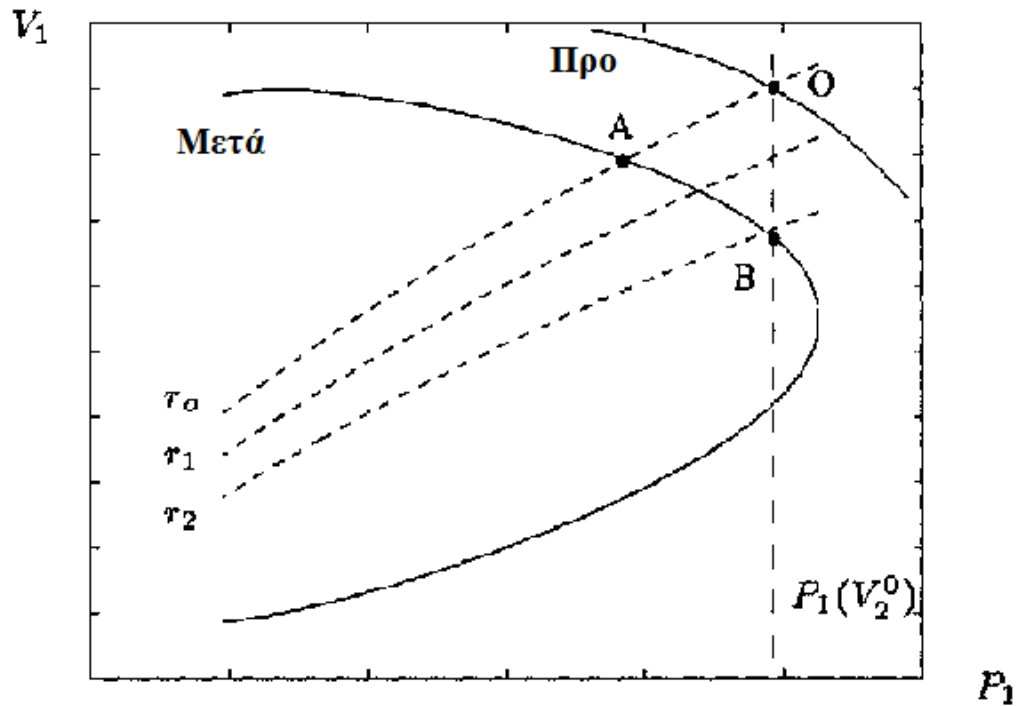
Σχήμα 1.8 Σύστημα με γεννήτρια, γραμμή μεταφοράς και μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ



Η αποκατάσταση ισχύος του φορτίου πραγματοποιείται με έμμεσο τρόπο από τα ΣΑΤΥΦ. Όταν το ΣΑΤΥΦ καταφέρει να επαναφέρει τη τάση  $V_2$  στην πλευρά της διανομής στην επιθυμητή τιμή  $V_{20}$ , τότε και η ισχύς του φορτίου, που γενικά εξαρτάται από τη τάση, αποκαθίσταται πλήρως.

Η δυναμική ανάλυση του ΣΑΤΥΦ διευκολύνεται από το γεγονός ότι το ΣΑΤΥΦ είναι αργός μηχανισμός. Επομένως οι γεννήτριες και οι μηχανές επαγωγής μπορούν να αναπαρασταθούν με μοντέλα μόνιμης κατάστασης.

Δύο χαρακτηριστικές  $P_1-V_1$  που συνδέουν τη τάση στη μεριά της μεταφοράς με την ενεργό ισχύ απεικονίζονται με συνεχόμενη γραμμή στο Σχήμα 1.9:



Σχήμα 1.9 P-V καμπύλες συστήματος γεννήτριας, γραμμής μεταφοράς και μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ

Οι δύο καμπύλες P-V που απεικονίζονται στο Σχήμα 1.9 αντιστοιχούν σε διαφορετικές τιμές της αντίδρασης της γραμμής X.

Έστω τώρα η χαρακτηριστική φορτίου όπως φαίνεται από το πρωτεύον του ΣΑΤΥΦ. Υποθέτουμε μια γενική σχέση φορτίου-τάσης:

$$P = P(V_2)$$

$$Q = Q(V_2)$$

Η τάση στη μεριά του φορτίου  $V_2$  σε σχέση με τη τάση του πρωτεύοντος  $V_1$  δίνεται από τη σχέση (1.15):

$$\left(\frac{V_1}{r}\right)^2 = [V_2 + \left(\frac{Q(V_2)}{V_2} - BV_2\right)X_t]^2 + \left[\frac{P(V_2)X_t}{V_2}\right]^2 \quad (1.15)$$

Η ενεργός και άεργος ισχύς  $P_1$  και  $Q_1$  που απορροφούνται από τον ιδανικό μετασχηματιστή του Σχήματος 1.8 αποτελούνται από την ισχύ του φορτίου συν τις άεργες απώλειες στην αντίδραση σκέδασης  $X_t$  του μετασχηματιστή μείον την άεργη αντιστάθμιση και είναι επίσης συνάρτηση της τάσης  $V_2$ :

$$P_1 = P(V_2) \quad (1.16\alpha)$$

$$Q_1 = Q(V_2) + \frac{P(V_2)^2 + Q(V_2)^2}{V_2^2} X_t - BV_2^2 \quad (1.16\beta)$$

Έτσι μπορούμε να απαλείψουμε την  $V_2$  χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.15) ώστε να εκφράσουμε τα  $P_1$  και  $Q_1$  συναρτήσει της  $V_1/r$ :

$$P = P(V_1/r)$$

$$Q = Q(V_1/r)$$

Από τα παραπάνω κατανοούμε ότι με τη μεταβολή του λογου μετασχηματισμού μεταβάλλεται και η χαρακτηριστική φορτίου. Στο Σχήμα 1.9 απεικονίζονται τρεις διαφορετικές μεταβατικές χαρακτηριστικές φορτίου για τρεις διαφορετικές τιμές του  $r$  ( $r_0 > r_1 > r_2$ ) με διακεκομμένες γραμμές.

Μια διαφορετική χαρακτηριστική φορτίου προκύπτει όταν η τάση  $V_2$  ελέγχεται ώστε να διατηρεί μια τιμή αναφοράς  $V_{20}$ . Σε αυτή τη περίπτωση το φορτίο καταναλώνει σταθερή ενεργό και άεργο ισχύ που δίνονται από τις σχέσεις (1.16α) και (1.16β). Αφού αυτή η τιμή είναι ανεξάρτητη από τη τάση  $V_1$ , η ισχύς που καταναλώνει το φορτίο φαίνεται στο Σχήμα 1.9 με μία κατακόρυφη διακεκομμένη γραμμή. Αυτή είναι η χαρακτηριστική φορτίου μόνιμης κατάστασης.

Για να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά του ΣΑΤΥΦ, ας υποθέσουμε ότι το σύστημα αρχικά λειτουργεί στο σημείο Ο του Σχήματος 1.9 όταν μια διαταραχή (έστω μια αύξηση στην αντίδραση της γραμμής) μεταβάλλει τη χαρακτηριστική του συστήματος σε αυτήν κατόπιν της διαταραχής. Η πρωτεύουσα τάση  $V_1$  αρχικά θα μειωθεί κατα μήκος της μεταβατικής χαρακτηριστικής φορτίου που αντιστοιχεί στη τιμή  $r_0$  από το σημείο Ο στο σημείο Α. Σε αυτή τη φάση η ισχύς που καταναλώνει το φορτίο είναι μικρότερη από αυτήν που αντιστοιχεί σε τάση  $V_{20}$ , δεδομένου ότι  $V_2 < V_{20}$ . Αφού η  $V_2 < V_{20}$  το ΣΑΤΥΦ θα αντιδράσει μειώνοντας το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή ώστε να αυξήσει τη τάση στη μεριά του δευτερεύοντος. Αυτό θα αλλάξει τη χαρακτηριστική φορτίου και το σημείο λειτουργίας θα μετακινηθεί κατα μήκος της χαρακτηριστικής του δικτύου κατόπιν της διαταραχής έως ότου φτάσει το σημείο λειτουργίας Β που αντιστοιχεί στο σημείο τομής της χαρακτηριστικής φορτίου μόνιμου καταστάσεως με τη χαρακτηριστική του δικτύου. Με αυτό το τρόπο το ΣΑΤΥΦ αποκαθιστά τόσο τη τάση όσο και την ισχύ του φορτίου. [18]

### **1.3 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος: Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και διεσπαρμένη παραγωγή**

Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος παραδοσιακά γίνεται με τη χρήση εγκάρσιων πυκνωτών. Η ραγδαία εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος έχει φέρει στο προσκήνιο τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς τα οποία λόγω ταχύτερης απόκρισης παρουσιάζουν καλύτερη δυναμική συμπεριφορά από τους μηχανικά συνδεδεμένους πυκνωτές παρότι είναι αρκετές φορές ακριβότερα. Πολλές φορές η χρήση πυκνωτών ή ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς για την άεργη αντιστάθμιση δεν είναι πρακτική από οικονομική άποψη ή από άποψη όγκου. Σε διάφορες μελέτες έχει συζητηθεί η συμμετοχή της διεσπαρμένης παραγωγής στην άεργη αντιστάθμιση, η οποία μπορεί να παράξει ή να απορροφήσει άεργο ισχύ με σχετικά χαμηλό κόστος. Για τους παραπάνω λόγους στη παρούσα παράγραφο δίνονται οι ορισμοί και τα βασικότερα χαρακτηριστικά των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς και της διεσπαρμένης παραγωγής καθώς και των ευφυών δικτύων που είναι στενότερα συνυφασμένα με τη διεσπαρμένη παραγωγή. Η αναλυτική περιγραφή διατάξεων αέργου αντιστάθμισης θα γίνει στη παράγραφο 2.3.

#### **1.3.1 Ευέλικτα συστήματα μεταφοράς και ηλεκτρονικά ισχύος**

Η μεταφερόμενη ισχύς μιας γραμμής μεταφοράς είναι συνάρτηση της επαγωγικής αντίδρασης της, του μέτρου της τάσης αναχώρησης και άφιξης και της μεταξύ τους γωνίας. Ελέγχοντας έτσι έναν ή περισσότερους από τους παραπάνω παράγοντες, είναι δυνατόν να ελέγξουμε την ενεργό καθώς επίσης και την άεργο ισχύ σε μία γραμμή μεταφοράς.

Είναι συνήθης πρακτική στα συστήματα ισχύος να εγκαθίστανται εγκάρσιοι πυκνωτές για να διατηρούν τη τάση του συστήματος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Οι εν σειρά πυκνωτές χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τη συνολική επαγωγική αντίδραση της γραμμής μεταφοράς που οδηγεί στην αύξηση του ορίου μεταφερόμενης ισχύος της γραμμής. Οι μετασχηματιστές αλλαγής φάσης εφαρμόζονται για τον έλεγχο της ροής ισχύος στις γραμμές μεταφοράς, εισάγοντας μια επιπρόσθετη γωνία μεταξύ της τάσης αναχώρησης και άφιξης.

Μέχρι πριν από λίγα χρόνια όλες αυτές οι συσκευές ελέγχονταν μηχανικά για αυτό και ήταν σχετικά αργές. Είναι πολύ χρήσιμες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου η χρονική απόκριση είναι πολύ αργή και μπορεί να προκαλέσει μεταβατικές ταλαντώσεις. Αν τα μηχανικά συστήματα ελέγχου ήταν κατασκευασμένα για να ανταποκρίνονται ταχύτερα, η ασφάλεια των συστημάτων ισχύος θα ήταν αρκετά βελτιωμένη, επιτρέποντας τη πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του συστήματος, διατηρώντας παράλληλα σε ικανοποιητικά επίπεδα τα όρια ευστάθειας. Η πρόοδος που συντελέστηκε στα ηλεκτρονικά ισχύος οδήγησε σε μία νέα προσέγγιση του προβλήματος. Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ή FACTS όπως αποκαλούνται διεθνώς (Flexible AC Transmission Systems) ήταν η λύση για την αποδοτικότερη χρήση των ήδη υπαρχόντων πόρων στα ΣΗΕ, επιτρέποντας την αξιοποίηση και επέκταση των δυνατοτήτων μεταφοράς.

Οι βασικότερες εφαρμογές των συσκευών FACTS είναι:

- Έλεγχος ροής ισχύος
- Αύξηση ικανότητας μεταφοράς ισχύος των γραμμών
- Έλεγχος τάσης
- Αντιστάθμιση αέργου ισχύος
- Βελτίωση ευστάθειας
- Βελτίωση ποιότητας ισχύος
- Διασύνδεση εναλλακτικών (ΑΠΕ) και διεσπαρμένων παραγωγών στο κύριο δίκτυο

Τα ηλεκτρονικά ισχύος που ελέγχουν τη λειτουργία των συσκευών FACTS δίνουν τη δυνατότητα για χρόνους απόκρισης πολύ μικρότερους από 1 δευτερόλεπτο.

Τα ημιαγωγία στοιχεία που χρησιμοποιούνται από τα ηλεκτρονικά ισχύος των συσκευών FACTS έχουν ως κύριους στόχους τις κατά το δυνατόν μειωμένες διακοπτικές απώλειες και απώλειες μετάδοσης. Η εξέλιξη των συσκευών FACTS βασίζεται κυρίως στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ημιαγωγών. Στις μέρες μας οι επικρατέστεροι ημιαγωγάμοι διακόπτες είναι τα θυρίστορ και τα τρανζίστορ. Το θυρίστορ είναι μια διάταξη που μπορεί να πυροδοτηθεί μέσω ενός παλμού στη πύλη του και παραμένει ενεργοποιημένο έως ότου το μέτρο του παλμού μηδενιστεί. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατή μόνο μια πυροδότηση ανά ημιπερίοδο του παλμού, πράγμα που μειώνει την ελεγχσιμότητα της διάταξης. Τα θυρίστορ χρησιμοποιούνται ως διακόπτες σε πηνία ή πυκνωτές, σε μετατροπείς για αντισταθμιστές αέργου ισχύος ή ως διακόπτες προστασίας. Μέχρι σήμερα τα θυρίστορ είναι οι ημιαγωγάμες διατάξεις που μπορούν να χειριστούν καλύτερα υψηλά επίπεδα τάσεων και ισχύων και για αυτό η χρήση τους έχει επικρατήσει σε συσκευές FACTS.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα ελεγχσιμότητας των συμβατικών θυρίστορ, έχουν αναπτυχθεί τα GTO (Gate Turn Off) θυρίστορ που έχουν τη δυνατότητα να απενεργοποιούνται μέσω ενός σήματος τάσεως στη πύλη τους .

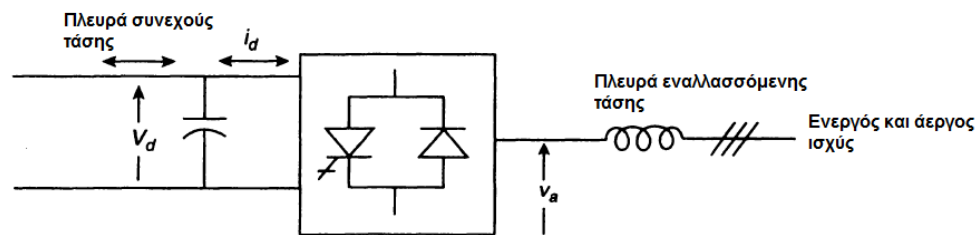
Τέλος όσον αφορά την τεχνολογία τρανζίστορ, τα IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) κερδίζουν μέρα με τη μέρα όλο και περισσότερο έδαφος στο πεδίο των συσκευών FACTS λόγω της απλού και εύκολου τρόπου ελέγχου τους.

Από πλευράς δομής οι συσκευές FACTS μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

1. Συσκευές που επιτρέπουν την ευέλικτη διαχείριση συνιστωσών όπως πηνίων, πυκνωτών ή μετασχηματιστών με ρύθμιση φάσεως. Στη κατηγορία αυτή ανήκει ο στατός άεργος αντισταθμιστής ή SVC (Static Var Compensator), το TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) και το PS (Phase Shifter).
2. Συσκευές που υλοποιούν ελεγχόμενες πηγές τάσεως ή ρεύματος. Στη κατηγορία αυτή ανήκει ο στατός σύγχρονος αντισταθμιστής ή STATCOM (STATic synchronous COMpensator), το SSSC (Static Synchronous Series Compensator), το UPFC (Unified Power Flow Controllers) και το IPFC (Interline Power Flow Controller). Τα ευέλικτα συστήματα αυτής της κατηγορίας εμφανίζουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα της προηγούμενης κατηγορίας επιτρέποντας υπό συνθήκες την έγχυση ή απορρόφηση ενεργού ισχύος.

Όσον αφορά τις συσκευές που ανήκουν στη πρώτη κατηγορία FACTS χρησιμοποιούν thyristor για τη ζεύξη/απόζευξη των πηγών ή πυκνωτών και απλά επιτυγχάνουν γρηγορότερες αποκρίσεις από τους κλασικούς διακόπτες.

Η δεύτερη κατηγορία συσκευών FACTS χρησιμοποιεί μετατροπείς ρεύματος (current-sourced converters) ή τάσης (voltage-sourced converters). Οι μετατροπείς ρεύματος χρησιμοποιούν συμβατικά thyristor χωρίς τη δυνατότητα ελεγχόμενης σβέσης. Οι μετατροπείς τάσης αποτελούνται από συμβατικά thyristor, GTO thyristor ή IGBT. Για οικονομικούς λόγους και λόγους απόδοσης έχει επικρατήσει η χρήση μετατροπέων τάσης. Οι μετατροπείς τάσης στην ουσία μετατρέπουν συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Για ιστορικούς λόγους έχει επικρατήσει να λέγονται αντιστροφείς (inverters) παρά το γεγονός ότι έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Οι μετατροπείς τάσης ελέγχουν τη φασική γωνία, τη συχνότητα και το μέτρο της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου τους. Το Σχήμα 1.10 απεικονίζει τον βασικό τρόπο λειτουργίας του μετατροπέα τάσης. Η συνεχής τάση του μετατροπέα παρέχεται από έναν πυκνωτή (ή συστοιχία πυκνωτών). [5, 8, 16]



Σχήμα 1.10 Τοπολογία μετατροπέα τάσης

### 1.3.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή και έλεγχος τάσης

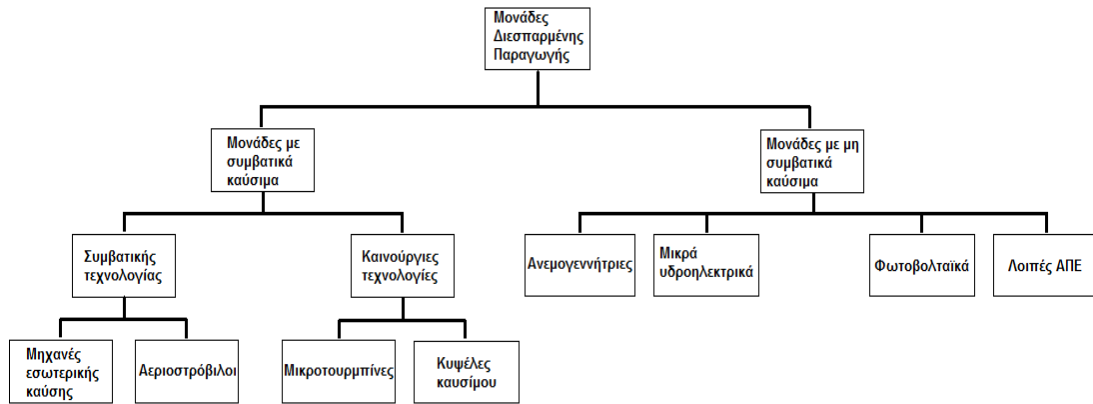
Στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφοροι ορισμοί για τη διεσπαρμένη παραγωγή οι οποίοι δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους. Κάποιοι ορισμοί εστιάζουν στο επίπεδο της παραγόμενης τάσης ενώ άλλοι εστιάζουν στο ότι η διεσπαρμένη παραγωγή συνδέεται στη διανομή, απευθείας στα σημεία που υπάρχουν φορτία. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον ορισμό της CIGRE, σύμφωνα με τον οποίο:

*Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως οι μονάδες παραγωγής με μέγιστη δυνατότητα παροχής ισχύος από 50 MW έως 100 MW, που κατά κανόνα συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν σχεδιάζονται ή κατανομούνται κεντρικά.*

Ο παραπάνω ορισμός υπαινίσσεται ότι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν υπόκειται στον έλεγχο του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς. Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η διεσπαρμένη παραγωγή αφορά τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα σε διάφορα μέρη του δικτύου διανομής ή στο ακραίο τμήμα αυτού από τη πλευρά του καταναλωτή.

Συχνά ο όρος διεσπαρμένη παραγωγή χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή τεχνολογίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Είναι όμως δυνατό για την υλοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τεχνολογία παραγωγής. Οι ΑΠΕ

αποτελούν γενικά συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής αν εξαιρεθούν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μεγάλης κλίμακας ή τα παράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα, όπως τουρμπίνες και μικροτουρμπίνες αερίου, μηχανές εσωτερικής καύσης κ.α. Στο Σχήμα 1.11 φαίνονται οι κυριότερες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής:



**Σχήμα 1.11** Τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Οι κύριοι λόγοι για την ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής την τελευταία δεκαετία είναι:

- Η τεχνολογική πρόοδος σε τεχνολογίες διεσπαρμένης παραγωγής.
- Περιορισμοί στη κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς.
- Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας.
- Στροφή στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τεχνολογίες φιλικότερες προς το περιβάλλον. [6]

Σύμφωνα με οδηγία της IEEE (Institute of Electric and Electronic Engineers) η διεσπαρμένη παραγωγή δεν θα πρέπει να συμμετέχει ενεργά στον έλεγχο της τάσης. Παρόλα αυτά η αναφορά [17] αναγνωρίζει τη πιθανή ευεργετική συνεισφορά της διεσπαρμένης παραγωγής στον έλεγχο της τάσης με την παροχή ή απορρόφηση αέργου ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό χάρη στους μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των διεσπαρμένων παραγωγών με το δίκτυο. Η διεσπαρμένη παραγωγή ωστόσο δεν παράγει μεγάλες ποσότητες ισχύος οπότε θα μπορούσε κανείς να πει η συνεισφορά της στον έλεγχο της τάσης θα ήταν αμελητέα. Αυτό ισχύει στην περίπτωση που οι διεσπαρμένοι παραγωγοί συνδέονται σε ένα ισχυρό δίκτυο. Ωστόσο σε περιπτώσεις που η σύνδεση γίνεται σε σημεία που το δίκτυο είναι αδύναμο η διεσπαρμένη παραγωγή θα είναι σε θέση να συνεισφέρει σημαντικά στον έλεγχο της τάσης. Φυσικά η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης θα έχει επιπτώσεις στη παραγωγή ενεργού ισχύος από τους διεσπαρμένους παραγωγούς, οπότε κάποια οικονομικά οφέλη θα πρέπει να προβλεφθούν για τους παραγωγούς για την παροχή αυτής της δευτερεύουσας υπηρεσίας.

### 1.3.3 Ευφυή Δίκτυα

Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν εδώ και αρκετές δεκαετίες δίκτυα ζωτικής σημασίας για τους παραγωγούς και τους καταναλωτές. Η βασική αρχή λειτουργίας του παραδοσιακού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας είναι ότι η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση από του μεγάλους σταθμούς παραγωγής μέσω συστημάτων μεταφοράς και διανομής στον τελικό καταναλωτή. Η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται κατά συγκεντρωτικό τρόπο από κεντρικούς σταθμούς οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για μεγάλες περιοχές. Επιπλέον υπάρχει ελάχιστη διαδραστικότητα των καταναλωτών.

Το μοντέλο λειτουργίας της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής έχει αρχίσει να αμφισβητείται για τους παρακάτω λόγους:

1. Οι εταιρίες ηλεκτρικής ενέργειας στις περισσότερες ανεπτυγμένες χώρες πλέον πρέπει να μετατραπούν από κοινωφελείς και ενιαίους οργανισμούς σε επιχειρήσεις ανταγωνιστικές με διαχωρισμό της παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Η ανάγκη για αξιοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής με στόχο τη βελτίωση της αποδοτικότητας των δικτύων.
3. Το μεγάλο εύρος διαφοροποίησης στις ανάγκες των καταναλωτών. Οι απαιτήσεις σε αξιοπιστία δεν είναι ίδιες για όλους τους καταναλωτές, ωστόσο το κόστος για την εξασφάλιση ενός υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας είναι κοινό για όλους.
4. Η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σύμφωνα με το πρωτόκολλο του Κυότο οι ρύποι εκπομπής των κρατών πρέπει να μειωθούν και μία από τις πιο ρυπογόνες δραστηριότητες σε εθνικό επίπεδο είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς παραγωγής που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα (άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κτλ.)
5. Η ραγδαία ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών και πληροφοριακών συστημάτων που καθιστούν ευκολότερο τον αποκεντρωμένο έλεγχο των ΣΗΕ.

Για την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων έχει εμφανιστεί την τελευταία δεκαετία η έννοια του ευφυούς δικτύου (smart grid). Το ευφύες δίκτυο περιλαμβάνει διάφορες έννοιες. Περιλαμβάνει καινοτόμες λύσεις για τις υποδομές του μελλοντικού δικτύου διανομής με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος και αξιοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής. Αυτές οι λύσεις θα αλλάξουν τη μορφή του δικτύου ώστε από παθητικό να γίνει ενεργό. Τα ευφυή δίκτυα επιτρέπουν την ενεργή συμμετοχή του καταναλωτή στην αγορά ενέργειας. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι αυτού του είδους τα δίκτυα είναι “πελατοκεντρικά” όσον αφορά τους διεσπαρμένους παραγωγούς και τους καταναλωτές. Πέραν αυτού δίνουν τη δυνατότητα για αμφίδρομη ροή ισχύος, όχι μόνο από το δίκτυο προς τον καταναλωτή αλλά και αντίστροφα. Επιπλέον η χρήση “έξυπνων μετρητών” έχει κεντρικό ρόλο στη δομή ενός τέτοιου δικτύου. Αυτοί οι μετρητές αποτελούν αναβαθμισμένους ηλεκτρικούς μετρητές που καταγράφουν την κατανάλωση σε πραγματικό χρόνο και μεταφέρουν τις σχετικές πληροφορίες μέσω του δικτύου για σκοπούς παρακολούθησης και κοστολόγησής του.

Η έννοια της “ευφύιας” αναφέρεται στην προστασία, την ελεγχιμότητα και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του δικτύου. Η διεσπαρμένη παραγωγή και υπάρχουσες έννοιες και δομές όπως ο έλεγχος των φορτίων και η αντιστάθμιση αέργου ισχύος αποτελούν σημαντικά κεφάλαια στην ανάπτυξη των ευφύων δικτύων.

Το ευφυές δίκτυο είναι επομένως, μια αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου που χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνιών, αυτοματοποιημένου ελέγχου, αυτοματοποιημένες συσκευές μέτρησης και γενικότερα αξιοποιεί τη τεχνολογία της πληροφορίας. [12, 13]

## 1.4 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να βασιστούν κυρίως, στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η κατασκευή καινούριων γραμμών μεταφοράς είναι σε μεγάλο βαθμό απαγορευτική αφού υπόκειται στην έγκριση ρυθμιστικών αρχών και περιβαλλοντικών περιορισμών αυξάνοντας δραματικά το κόστος μιας τέτοιας επένδυσης. Η απάντηση στο αίτημα για αποδοτικότερη αξιοποίηση των συστημάτων μεταφοράς μπορεί να γίνει μέσω των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (FACTS) που επιτρέπουν τον έλεγχο της τάσης και αύξηση των περιθωρίων μεταφερόμενης ισχύος. Επίσης σε δημοσίευση του F. Paul de Mello [14] προτείνεται η συνδυασμένη χρήση μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ και μηχανικά συνδεδεμένων ή ελεγχόμενων από θυρίστορ εγκάρσιων πυκνωτών για τον έλεγχο της τάσης και από τις δύο μεριές του μετασχηματιστή και την άεργη αντιστάθμιση.

Έχοντας ως εφελτήριο τις παραπάνω σκέψεις η παρούσα εργασία τροποποιεί και επεκτείνει ιδέες που παρουσιάστηκαν στην αναφορά [9]. Γίνεται μελέτη υπαρχουσών και εναλλακτικών τεχνικών ρύθμισης της τάσης και του συντελεστή ισχύος σε υποσταθμούς υψηλής τάσης/μέσης τάσης και γίνεται σύγκριση τους ως προς το πως επηρεάζουν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ σε ένα ακτινικό δίκτυο. Μηχανισμοί που μελετώνται είναι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, εγκάρσιοι πυκνωτές, ο στατός άεργος αντισταθμιστής (SVC) και ο στατός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM).

Κάθε σενάριο ελέγχου εξετάζεται σε δύο φάσεις. Σε πρώτη φάση γίνονται θεωρητικοί υπολογισμοί που αφορούν τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του δικτύου και τα χαρακτηριστικά μεγέθη των μηχανισμών ελέγχου και αντιστάθμισης. Σε δεύτερη φάση το δίκτυο προσομοιώνεται ώστε να φανεί στη πράξη η απόκριση του δικτύου σε κάθε σενάριο ελέγχου. Οι προσομοιώσεις γίνονται σε περιβάλλον MATLAB.

Η εργασία περιλαμβάνει 6 κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή σε βασικές έννοιες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) και της ευστάθειας τάσεως. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται συνοπτικά μαθηματικές έννοιες που χρησιμοποιήθηκαν στη θεωρητική ανάλυση του δικτύου και των σεναρίων ελέγχου. Επίσης γίνεται μια ανάλυση των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ καθώς και των μηχανισμών αντιστάθμισης που εξετάστηκαν (εγκάρσιοι πυκνωτές, SVC και STATCOM). Στα κεφάλαια 3, 4 και 5 παρουσιάζονται τα σενάρια ελέγχου που εξετάστηκαν. Συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η περίπτωση ενός ακτινικού δικτύου χωρίς έλεγχο τάσης ή συντελεστή ισχύος καθώς και η συνήθης πρακτική ελέγχου της δευτερεύουσας τάσης διανομής του μετασχηματιστή και του συντελεστή ισχύος με ΣΑΤΥΦ και εγκάρσιους πυκνωτές αντίστοιχα. Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζεται η περίπτωση ελέγχου της δευτερεύουσα τάσης διανομής με χρήση



εγκάρσιων πυκνωτών, SVC και STATCOM. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται δύο διαφορετικά σενάρια ταυτόχρονου ελέγχου της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας τάσης του μετασχηματιστή υποβιβασμού. Στο πρώτο σενάριο το ΣΑΤΥΦ ελέγχει τη δευτερεύουσα τάση ενώ εγκάρσιοι πυκνωτές συνδεδεμένοι στην πλευρά της μέσης τάσης ελέγχουν τη πρωτεύουσα τάση. Στο δεύτερο σενάριο η δευτερεύουσα τάση ελέγχεται και πάλι από ΣΑΤΥΦ ενώ η πρωτεύουσα ελέγχεται από SVC που συνδέεται στην πλευρά της υψηλής τάσης. Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και προοπτικές βελτίωσης και περαιτέρω μελέτης των σεναρίων που εξετάστηκαν.



## 2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΕΡΓΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η σχέση της ευστάθειας τάσεως ενός δικτύου με τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να μεταφέρει αυτό το δίκτυο.

Αρχικά εξηγούνται συνοπτικά κάποιες μαθηματικές έννοιες όπως αυτές της διακλάδωσης και των ιδιαιτέρων διαταραχών, οι οποίες χρησιμοποιούνται στα μη γραμμικά συστήματα, όπως είναι τα ΣΗΕ. Επίσης γίνεται αναφορά στο διαχωρισμό των χρονικών κλιμάκων στα συστήματα διαφορικών εξισώσεων, που αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την απλούστευση της ανάλυσης που θα ακολουθήσει. Τέλος εξηγείται ο τρόπος λειτουργίας των μηχανισμών ελέγχου της τάσης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (ΣΑΤΥΦ, συστοιχίες πυκνωτών, SVC, STATCOM) και θα δίνονται τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη θεωρητική ανάλυση αυτών των μηχανισμών.

### 2.1 Μαθηματική ανάλυση συστημάτων

Στη παρούσα παράγραφο δίνονται κάποια βασικά στοιχεία θεωρίας των μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων. Αυτή η θεωρία θα αποδειχθεί χρήσιμη στην ανάλυση ευστάθειας τάσης που θα ακολουθήσει αφού τα ΣΗΕ γενικά παρουσιάζουν μη γραμμική δυναμική συμπεριφορά. Η μελέτη των γραμμικοποιημένων μοντέλων των ΣΗΕ δεν επαρκεί για να εξηγήσει τη συμπεριφορά τους με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρήση των πλήρων μοντέλων που αποτελούνται από ένα σύστημα αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων.

#### 2.1.1 Ποιοτική θεωρία διαφορικών εξισώσεων

Τα περισσότερα δυναμικά συστήματα μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα  $n$  συνήθων διαφορικών εξισώσεων που γράφονται στη συνοπτική μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (2.1)$$

όπου  $\mathbf{x}$  είναι ένα  $n \times 1$  διάνυσμα και κάθε  $f_i(i=1, \dots, n)$  είναι γενικά μια μη γραμμική συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης  $x_i(i=1, 2, \dots, n)$ .

Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με την επίλυση του συστήματος διαφορικών εξισώσεων (2.1) για μία αρχική συνθήκη του διανύσματος μεταβλητών κατάστασης:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (2.2)$$

Οι αρχικές συνθήκες (2.2) και το σύστημα (2.1) αποτελούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών.

Η λύση  $\mathbf{x}(t)$  του συστήματος μπορεί να απεικονιστεί ως μια καμπύλη στο χώρο κατάστασης. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται τροχιά. Η τροχιά καλείται θετική όταν  $t > 0$ ,

ενώ για  $t < 0$  καλείται αρνητική. Η απεικόνιση του συνόλου των τροχιών για διάφορες αρχικές συνθήκες είναι γνωστή ως πορτραίτο φάσεων.

Για κάθε διαφορετική αρχική συνθήκη υπάρχει μοναδική λύση του μη γραμμικού συστήματος. Η παραπάνω ιδιότητα εξασφαλίζεται από το “θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας” σύμφωνα με το οποίο:

1. Αν η  $\mathbf{f}$  είναι συνεχής στο πεδίο  $U$  υπάρχει λύση  $\mathbf{x}(t)$  για όλες τις αρχικές συνθήκες  $\mathbf{x}_0 \in U$ . Κάθε λύση ορίζεται σε ένα μέγιστο διάστημα  $I_{\mathbf{x}_0}$  το οποίο εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες:

$$I_{\mathbf{x}_0} : a_{\mathbf{x}_0} < t < \beta_{\mathbf{x}_0}$$

Φυσικά ένα από τα  $a_{\mathbf{x}_0}$  και  $\beta_{\mathbf{x}_0}$  ή και τα δύο μπορεί να τείνουν στο άπειρο, στην οποία περίπτωση υπάρχει λύση για όλες τις τιμές του χρόνου.

2. Όταν η  $\mathbf{f}$  είναι  $k$  φορές διαφορίσιμη, τότε η λύση είναι μοναδική και έχει  $k$  συνεχείς παραγώγους. Επομένως η επαρκής συνθήκη για τη μοναδικότητα είναι η  $\mathbf{f}$  να είναι ομαλή.

3. Όταν το μέγιστο διάστημα ύπαρξης είναι πεπερασμένο, τα οριακά σημεία της λύσης  $\mathbf{x}(t)$  καθώς  $t \rightarrow \beta^-$  ή  $t \rightarrow a^+$ , είτε ανήκουν στο σύνορο του  $U$ , όταν αυτό είναι φραγμένο, είτε απειρίζονται όταν είναι μη φραγμένο.

### 2.1.2 Σημεία ισορροπίας και ευστάθεια

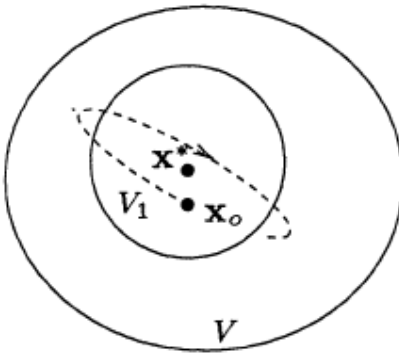
Τα σημεία ισορροπίας  $\mathbf{x}^*$  ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων προκύπτουν από τη λύση της εξίσωσης:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \tag{2.3}$$

Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ευσταθές αν όλες οι λύσεις με αρχική συνθήκη κοντά στο  $\mathbf{x}^*$  παραμένουν κοντά στο  $\mathbf{x}^*$  και αυτές για όλο το χρόνο. Ο παρακάτω ορισμός της ευστάθειας οφείλεται στον Liapunov και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1:

*Ένα σημείο ισορροπίας  $\mathbf{x}^*$  είναι ευσταθές αν για κάθε γειτονιά  $V$  του  $\mathbf{x}^*$  μπορούμε να βρούμε μια γειτονιά  $V_1$  του  $\mathbf{x}^*$  τέτοια ώστε για κάθε  $\mathbf{x}_0 \in V_1$  η λύση  $\mathbf{x}(t)$  υπάρχει στο  $V$  για κάθε  $t > 0$ .*

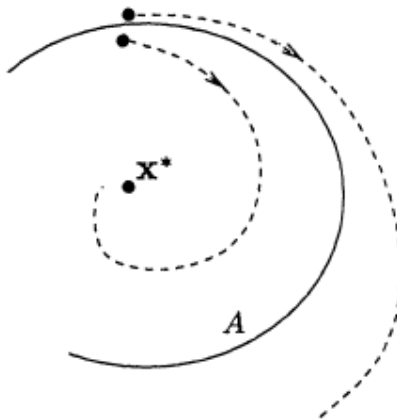
Επιπλέον λέμε ότι ένα σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές όταν όλες οι τροχιές με  $\mathbf{x}_0 \in V_1$  προσεγγίζουν το  $\mathbf{x}^*$  καθώς  $t \rightarrow \infty$ . Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ασταθές όταν δεν είναι ευσταθές.



Σχήμα 2.1 Ορισμός ευστάθειας

Όπως φαίνεται και στον παραπάνω ορισμό η ευστάθεια αναφέρεται σε ένα σημείο ισορροπίας και επομένως είναι μια τοπική ιδιότητα. Αν κάποιος ενδιαφέρεται για μια πιο εποπτική εικόνα της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος θα πρέπει να καταφύγει στο πορτραίτο φάσεων του συστήματος και να δει για ποιές αρχικές συνθήκες οι τροχιές συγκλίνουν ή αποκλίνουν από τα σημεία ισορροπίας.

Το μεγαλύτερο σύνολο  $A$  για το οποίο όλες οι τροχιές με αρχικές συνθήκες  $x_0 \in V_1$  συγκλίνουν στο σημείο ισορροπίας  $x^*$  ονομάζεται περιοχή έλξης του  $x^*$ . Η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.2 Περιοχή έλξης

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα γραμμικό σύστημα διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{x} = Ax \tag{2.4}$$

Ως γνωστόν το ανωτέρω σύστημα έχει μόνο ένα σημείο ισορροπίας  $\mathbf{x}^*=0$ , η ευστάθεια του οποίου καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ . Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα, η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος κατάστασης.

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, σε ένα μη γραμμικό σύστημα ισχύουν τα εξής:

- Ο αριθμός των σημείων ισορροπίας ποικίλει. Ένα σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα από ένα ή κανένα σημείο ισορροπίας.
- Η περιοχή έλξης ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας μπορεί να είναι περιορισμένος, επομένως η ύπαρξη ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν επαρκεί για να εξασφαλίσει την ευστάθεια γενικά.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούμε να προσδιορίσουμε την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας ενός μη γραμμικού συστήματος γραμμικοποιώντας το σύστημα γύρω από το σημείο ισορροπίας  $\mathbf{x}^*$ . Ορίζοντας:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}^* \quad (2.5)$$

και κρατώντας μόνο τους όρους πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor του  $\mathbf{f}$  γύρω από το  $\mathbf{x}^*$ , προκύπτει το παρακάτω γραμμικό σύστημα:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (2.6)$$

όπου ο πίνακας κατάστασης  $\mathbf{A}$  ορίζεται ως η Ιακωβιανή του  $\mathbf{f}$  ως προς  $\mathbf{x}$  στο σημείο  $\mathbf{x}^*$ :

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \mathbf{f}_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*) \quad (2.7)$$

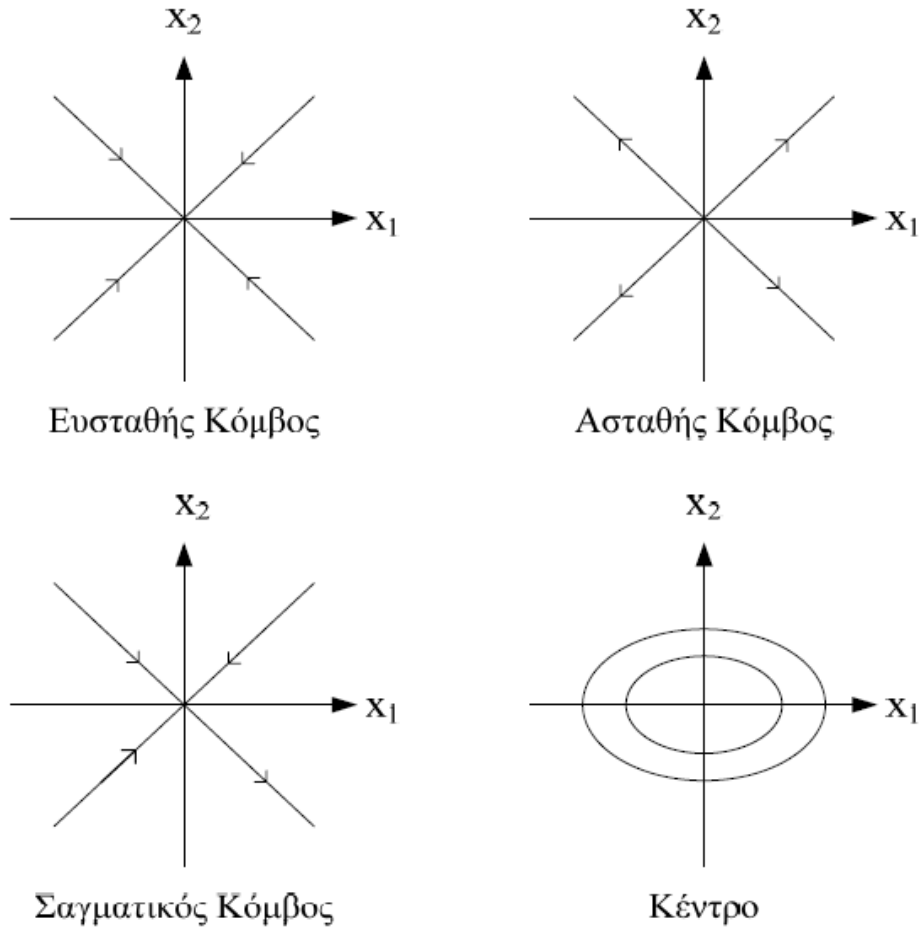
Η ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του Ιακωβιανού πίνακα  $\mathbf{A}$ . Πιο συγκεκριμένα:

- Αν όλες οι ιδιοτιμές του  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$  έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές.
- Αν έστω και μια ιδιοτιμή του γραμμικοποιημένου συστήματος έχει θετικό πραγματικό μέρος τότε το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές.

Τα ασυμπτωτικά ευσταθή σημεία ισορροπίας ονομάζονται καταβόθρες ή ευσταθής καταβόθρες. Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν θετικά πραγματικά μέρη το ασταθές σημείο ισορροπίας ονομάζεται εστία ή ασταθής κόμβος. Αν κάποιες ιδιοτιμές έχουν θετικά πραγματικά μέρη και άλλες αρνητικά το ασταθές σημείο ισορροπίας ονομάζεται σαγματικός κόμβος. Αν από το γραμμικοποιημένο μοντέλο προκύψουν δύο φανταστικές ιδιοτιμές (μηδενικό πραγματικό μέρος) που είναι συζυγείς τότε το σημείο ισορροπίας ονομάζεται κέντρο και οι αντίστοιχες τροχιές είναι περιοδικές γύρω από αυτό το σημείο.

Τονίζεται ότι η γραμμικοποίηση δεν προσφέρει καμία πληροφορία για την ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας στη περίπτωση που από την ιακωβιανή  $\mathbf{f}_x$  προκύψουν μία ή περισσότερες ιδιοτιμές με μηδενικό πραγματικό μέρος. Σε αυτή τη περίπτωση πρέπει κανείς να καταφύγει στον ορισμό της ευστάθειας που έχει δοθεί παραπάνω για να μπορέσει να αποφανθεί για το είδος της.

Για ένα πρώτης τάξης σύστημα τα είδη των σημείων ισορροπίας απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα. Τα βέλη στο σχήμα εκφράζουν τη καταύθυνση των τροχιών.



Σχήμα 2.3 Είδη σημείων ισορροπίας

### 2.1.3 Αναλλοίωτες πολλαπλότητες

Όπως είναι γνωστό η απόκριση ενός γραμμικού συστήματος μπορεί να δοθεί με την βοήθεια του δεξιού ( $\mathbf{v}$ ) και του αριστερού ( $\mathbf{w}$ ) ιδιοδιανύσματος του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$ . Το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα ορίζονται αντίστοιχα:

$$\mathbf{A}\mathbf{v}_i = \lambda_i \mathbf{v}_i, \quad i=1, \dots, n \tag{2.8}$$

$$\mathbf{w}_i \mathbf{A} = \lambda_i \mathbf{w}_i^T, \quad i=1, \dots, n$$

Ενώ επιπλέον θεωρώντας  $n$  διαφορετικές ιδιοτιμές  $\lambda_i$ , τα ιδιοδιανύσματα είναι ορθογώνια μεταξύ τους, δηλαδή ικανοποιούν και τη παρακάτω σχέση:

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{v}_j = 0, \quad \forall i \neq j \quad (2.9)$$

Με βάση τα ανωτέρω η χρονική απόκριση ενός γραμμικού συστήματος με αρχική συνθήκη  $\mathbf{x}_0$  δίνεται από τον τύπο:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_0 \quad (2.10)$$

Η σχέση (2.10), πέρα από την σημαντική της εφαρμογή για τον υπολογισμό της απόκρισης του συστήματος, ανεξάρτητα των αρχικών συνθηκών, αποδεικνύει ότι αν το σύστημα βρεθεί πάνω σε ένα ιδιοδιάνυσμα, τότε θα παραμείνει σε αυτό για όλο το χρόνο.

Πράγματι αν θεωρήσουμε ότι η αρχική συνθήκη είναι συγγραμμική με ένα δεξί ιδιοδιάνυσμα, έστω το  $\mathbf{v}_i$ , δηλαδή ισχύει:

$$\mathbf{x}_0 = a \mathbf{v}_i \quad (2.11)$$

και αντικαταστήσουμε την σχέση (2.11) στην (2.10) κάνοντας χρήση της (2.8), έχουμε το εξής αποτέλεσμα:

$$\mathbf{x}(t) = e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_0 = e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T a \mathbf{v}_i = b \mathbf{v}_i \quad (2.12)$$

Η σχέση (2.12) εκφράζει την αναλλοίωτη ιδιότητα ενός δεξιού ιδιοδιανύσματος, η οποία όμως μπορεί να επεκταθεί και στους υπόχωρους που ορίζονται από έναν αριθμό δεξιών ιδιοδιανυσμάτων. Θεωρώντας για παράδειγμα ότι η αρχική συνθήκη μπορεί να δοθεί σαν γραμμικός συνδυασμός δυο δεξιών ιδιοδιανυσμάτων έχουμε:

$$\mathbf{x}_0 = a \mathbf{v}_i + b \mathbf{v}_j \quad (2.13)$$

και εφαρμόζοντας όσα έχουν ήδη αναφερθεί, έχουμε για την απόκριση του συστήματος:

$$\mathbf{x}(t) = e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T \mathbf{x}_0 = e^{\lambda_i t} \mathbf{v}_i \mathbf{w}_i^T (a \mathbf{v}_i + b \mathbf{v}_j) = c \mathbf{v}_i + d \mathbf{v}_j \quad (2.14)$$

Δηλαδή η απόκριση του συστήματος βρίσκεται πάντα πάνω στον γραμμικό υπόχωρο που ορίζουν τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα.

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα που αποκαλύπτεται από την μελέτη της σχέσης (2.10) είναι το γεγονός πως ιδιοτιμές με αρνητικό πραγματικό μέρος, θα έχουν σαν αποτέλεσμα η απόκριση του συστήματος να τείνει στο 0 καθώς ο χρόνος  $t \rightarrow \infty$  (το 0 είναι το μοναδικό σημείο ισορροπίας των γραμμικών συστημάτων), ενώ ιδιοτιμές με θετικό πραγματικό μέρος έχουν σαν αποτέλεσμα οι αποκρίσεις να πηγάζουν από το μηδέν.



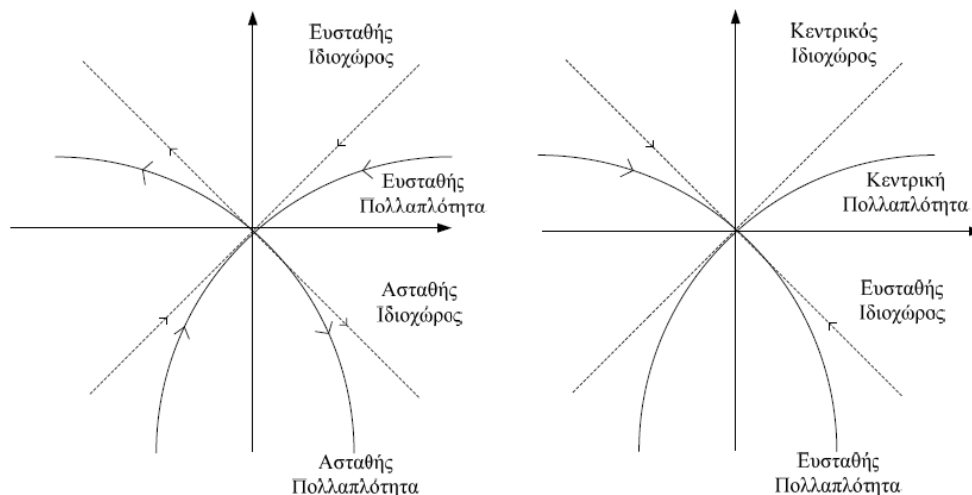
Με βάση αυτά μπορούμε να ορίσουμε διάφορους υποχώρους ανάλογα με τις ιδιοτιμές και τις συνεπαγόμενες αποκρίσεις του συστήματος. Συγκεκριμένα ο γραμμικός υπόχωρος που ορίζεται από τα ιδιοδιανύσματα που αντιστοιχούν σε ιδιοτιμές με αρνητικό πραγματικό μέρος ονομάζεται ευσταθής ιδιοχώρος του γραμμικού συστήματος, ενώ ο υπόχωρος που ορίζεται από τα ιδιοδιανύσματα των ιδιοτιμών με θετικό πραγματικό μέρος ονομάζεται ασταθής ιδιοχώρος. Τέλος ιδιοδιανύσματα με μηδενικό πραγματικό μέρος ιδιοτιμών διαμορφώνουν τον κεντρικό ιδιοχώρο.

Όλες οι έννοιες και οι ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω και αφορούν τα γραμμικά συστήματα, γενικεύονται και εφαρμόζονται στα μη γραμμικά συστήματα με την βοήθεια της έννοιας της πολλαπλότητας, η οποία παίζει ακριβώς τον ίδιο ρόλο με τα ιδιοδιανύσματα.

Οι πολλαπλότητες είναι λείες καμπύλες, επιφάνειες ή υπερεπιφάνειες, οι οποίες δεν τέμνονται είτε μεταξύ τους είτε με τον εαυτό τους και δεν έχουν ιδιόμορφα σημεία.

Και σε αυτήν την περίπτωση ορίζονται αναλλοίωτες πολλαπλότητες και το αναλλοίωτο των υποχώρων που αυτές ορίζουν, με την έννοια ότι το σύστημα με αρχική συνθήκη πάνω σε αυτές, θα παραμείνει για όλη την διάρκεια της απόκρισης του σε αυτές. Επομένως κατά αναλογία με τα γραμμικά ομογενή συστήματα, ο ευσταθής, ασταθής και κεντρικός ιδιοχώρος του μη γραμμικού συστήματος, ορίζεται αντίστοιχα από ευσταθείς, ασταθείς ή κεντρικές πολλαπλότητες. Πάνω στο σημείο ισορροπίας οι πολλαπλότητες είναι εφαπτομενικές των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων που προκύπτουν από γραμμικοποίηση του συστήματος.

Στο Σχήμα 2.4 φαίνονται οι ευσταθείς και ασταθείς πολλαπλότητες ενός μη γραμμικού συστήματος δεύτερης τάξης, καθώς και οι αντίστοιχοι ιδιοχώροι και τα αντίστοιχα ιδιοδιανύσματα του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από την περιοχή του σημείου ισορροπίας.



**Σχήμα 2.4** Ευσταθής, ασταθής και κεντρική πολλαπλότητα με τους αντίστοιχους υποχώρους και ιδιοδιανύσματα

### 2.1.4 Διακλαδώσεις

Η θεωρία διακλαδώσεων ασχολείται με ένα βασικό χαρακτηριστικό των μη γραμμικών συστημάτων: την εμφάνιση απότομων αλλαγών στην απόκριση του συστήματος μετά από μια μικρή και ομαλή μεταβολή των παραμέτρων του.

Έστω το σύστημα που περιγράφεται από τη παρακάτω συμπυκνωμένη εξίσωση:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (2.15)$$

όπου  $\mathbf{x}$  ένα  $n \times 1$  διάνυσμα και  $\mathbf{p}$  ένα  $k \times 1$  διάνυσμα. Για κάθε τιμή του  $\mathbf{p}$  τα σημεία ισοροπίας του συστήματος δίνονται από τη λύση της εξίσωσης:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.16)$$

Η παραπάνω εξίσωση ορίζει την  $k$ -διάστατη πολλαπλότητα στον  $(n+k)$ -διάστατο χώρο κατάστασης και παραμέτρων. Έστω ένα σημείο ισοροπίας  $\mathbf{x}^{(1)}$  που αντιστοιχεί στη παράμετρο  $\mathbf{p}_0$  και ας υποθέσουμε ότι η Ιακωβιανή της  $\mathbf{f}$  ως προς το  $\mathbf{x}$  μπορεί να αντιστραφεί:

$$\det \mathbf{f}_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{p}_0) \neq 0 \quad (2.17)$$

Τότε από το θεμελιώδες θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων συνεπάγεται ότι υπάρχει μοναδική λεία συνάρτηση ώστε:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{g}^{(1)}(\mathbf{p}) \quad (2.18)$$

όπου η  $\mathbf{x}^{(1)} = \mathbf{g}^{(1)}(\mathbf{p})$  δίνει ένα κλάδο σημείων ισοροπίας σαν συνάρτηση του  $\mathbf{p}$ .

Ας θεωρήσουμε τώρα ότι για την ίδια τιμή παραμέτρου  $\mathbf{p}_0$  υπάρχει κι άλλο σημείο ισοροπίας  $\mathbf{x}^{(2)}$ , δηλαδή μια δεύτερη λύση της σχέσης 2.16 για την οποία η Ιακωβιανή και πάλι αντιστρέφεται. Από το θεμελιώδες θεώρημα πεπλεγμένων συναρτήσεων συνεπάγεται ότι έχουμε μια δεύτερη συνάρτηση:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p}) \quad (2.19)$$

όπου η  $\mathbf{x}^{(2)} = \mathbf{g}^{(2)}(\mathbf{p})$  δίνει έναν ακόμη κλάδο σημείων ισοροπίας του συστήματος 2.15 συναρτήσει του  $\mathbf{p}$ .

Όταν διαφορετικοί κλάδοι σημείων ισοροπίας τέμνονται τότε διακλαδίζονται και έτσι προκύπτει η έννοια της διακλάδωσης. Στα σημεία διακλάδωσης η Ιακωβιανή  $\mathbf{f}_{\mathbf{x}}$  αντιστρέφεται και επομένως το θεμελιώδες θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων δε μπορεί να εφαρμοστεί.

Γενικεύοντας την έννοια του σημείου διακλάδωσης σημειώνουμε ότι μια διακλάδωση προκύπτει σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου καταστάσης η ποιοτική δομή του συστήματος αλλάζει, για μια μικρή μεταβολή του διανύσματος παραμέτρων  $\mathbf{p}$ . Παρακάτω δίνονται οι κυριότερες ιδιότητες ενός συστήματος, από τις οποίες αν μια ή περισσότερες αλλάζουν τότε προκύπτει διακλάδωση:

1. αριθμός σημείων ισορροπίας
2. αριθμός οριακών κύκλων
3. ευστάθεια σημείων ισορροπίας ή οριακών κύκλων

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διακλαδώσεων ανάλογα με το είδος της αλλαγής της δομικής συμπεριφοράς του συστήματος καθώς και διάφορες υποκατηγορίες αυτών, που χαρακτηρίζονται από τον ελάχιστο αριθμό αναγκαίων συνθηκών που απαιτούνται για την εμφάνισή τους. Παρακάτω αναλύονται οι διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου που εμφανίζονται πιο συχνά και παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Για ένα βαθμωτό σύστημα με μια παράμετρο οι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για μια διακλάδωση σαγματικού κόμβου είναι:

$$f(x^*, \mu) = 0 \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial f(x^*, \mu)}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial f(x^*, \mu)}{\partial \mu} \neq 0 \quad (\text{συνθήκη εγκάρσιας τομής}) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial^2 f(x^*, \mu)}{\partial x^2} \neq 0 \quad (\text{συνθήκη δεύτερης παραγώγου}) \quad (2.23)$$

όπου  $\mu$  η παράμετρος φόρτισης.

Θεωρώντας το πολυπαραμετρικό σύστημα  $n$  διαφορικών εξισώσεων και  $k$  παραμέτρων (2.15) οι αναγκαίες και ικανές συνθήκες για την εμφάνιση διακλαδώσεων σαγματικού κόμβου είναι

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.24)$$

$$\det \mathbf{f}_x(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}) = 0 \quad (2.25)$$

$$\text{Απλή μηδενική ιδιοτιμή του Ιακωβιανού πίνακα του συστήματος} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{f}_p^T(\mathbf{x}^*, \mathbf{p}) \mathbf{w} \neq \mathbf{0} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{v}^T \left( \sum_{i=1}^n w_i \mathbf{H}_i \right) \mathbf{v} \neq \mathbf{0} \quad (2.28)$$

όπου  $\mathbf{v}, \mathbf{w}$  το δεξί και αριστερό ιδιοδιάνυσμα της αντίστοιχης μηδενικής ιδιοτιμής του Ιακωβιανού πίνακα κατάστασης και  $\mathbf{H}_i$  είναι ο Εσσιανός πίνακας (δεύτερης παραγώγου) της  $f_i$ , τα στοιχεία του οποίου δίνονται από τον τύπο:

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.29)$$

Στα σημεία διακλάδωσης σαγματικού κόμβου η καμπύλη ισορροπίας του συστήματος διπλώνει ως προς τον χώρο των παραμέτρων.

Η προβολή όλων των σημείων ύπαρξης διακλάδωσης σαγματικού κόμβου στον  $k$  -

διάστατο χώρο των παραμέτρων δημιουργεί μια υπερεπιφάνεια διάστασης  $k-1$ , η οποία καλείται *επιφάνεια διακλαδώσεων* και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς κατά τη διάβαση του συστήματος από αυτήν ο αριθμός των σημείων ισορροπίας αλλάζει κατά δύο. Η επιφάνεια διακλαδώσεων φράζει την περιοχή λειτουργίας ενός συστήματος, πέρα από την οποία δεν υπάρχουν σημεία λειτουργίας.

### 2.1.5 Συστήματα διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων

Σε αυτή τη παράγραφο αναλύουμε συστήματα που περιγράφονται από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που περιλαμβάνουν, αλγεβρικές μεταβλητές και υπόκεινται σε αλγεβρικούς περιορισμούς. Αυτά τα συστήματα ονομάζονται συστήματα διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων και προκύπτουν από τον χωρισμό χρονικών κλιμάκων που θα αναλυθεί παρακάτω.

Τα συστήματα Διαφορικών – Αλγεβρικών εξισώσεων περιγράφονται από ένα σύνολο  $n$  διαφορικών και  $m$  αλγεβρικών εξισώσεων, της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.30)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) \quad (2.31)$$

Όπου  $\mathbf{x}$  είναι το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης διάστασης  $n$ ,  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα των  $m$  αλγεβρικών μεταβλητών, και  $\mathbf{p}$  είναι το διάνυσμα των  $k$  παραμέτρων του συστήματος.

Αυτού του τύπου τα συστήματα αναλύονται χρησιμοποιώντας το θεώρημα των πεπλεγμένων συναρτήσεων. Έτσι θεωρώντας ένα σημείο  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p})$  στο οποίο ο αλγεβρικός Ιακωβιανός πίνακας  $\mathbf{g}_y$  είναι αντιστρέψιμος, μπορούμε εφαρμόζοντας το προαναφερθέν θεώρημα να υποθέσουμε ότι υπάρχει μια τοπικά μοναδική, λεία συνάρτηση  $\mathbf{F}$ , τέτοια ώστε:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) \quad (2.32)$$

και από την οποία έχουν απαλειφθεί οι αλγεβρικές μεταβλητές. Εφόσον η  $\mathbf{F}$  μπορεί να οριστεί και είναι λεία σε όλα τα σημεία που ο πίνακας  $\mathbf{g}_y$  είναι αντιστρέψιμος, με βάση το θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας, υπάρχει μοναδική χρονική λύση για το διαφορικό - αλγεβρικό σύστημα των εξισώσεων (2.30), (2.31). Συμβολίζοντας με  $U_p$  το πεδίο ορισμού της  $\mathbf{F}$  στον χώρο κατάστασης για δεδομένη τιμή των παραμέτρων, μπορούμε να πούμε ότι το σύνολο  $U_p$  φράζεται από τα σημεία στα οποία ο πίνακας  $\mathbf{g}_y$  είναι μη αντιστρέψιμος.

Για δεδομένη τιμή των παραμέτρων  $\mathbf{p}$  το σύστημα έχει σημεία ισορροπίας που ικανοποιούν της εξής σχέσεις:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.33)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = \mathbf{0} \quad (2.34)$$

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας μπορεί να καθοριστεί από τη γραμμικοποίηση του συστήματος διαφορικών-αλγεβρικών εξισώσεων γύρω από αυτά:

$$\begin{pmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} = \mathbf{J} \begin{pmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

όπου  $\mathbf{J}$  είναι ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \mathbf{f}_x & \mathbf{f}_y \\ \mathbf{g}_x & \mathbf{g}_y \end{pmatrix} \quad (2.36)$$

Υποθέτοντας ότι ο  $\mathbf{g}_y$  είναι αντιστρέψιμος μπορούμε να απαλείψουμε το  $\Delta \mathbf{y}$  από τη σχέση (2.35):

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \Delta \mathbf{x} \quad (2.37)$$

Έτσι υπολογίζεται ο πίνακας κατάστασης του γραμμικοποιημένου συστήματος:

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_x = (\mathbf{f}_x - \mathbf{f}_y \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) \quad (2.38)$$

Ο πίνακας  $\mathbf{A}$  δίνεται επομένως σαν το συμπλήρωμα Schur του Ιακωβιανού πίνακα  $\mathbf{g}_y$  στον Ιακωβιανό  $\mathbf{J}$ , και ονομάζεται συχνά ελαττωμένος Ιακωβιανός του συστήματος.

Η ευστάθεια ενός σημείου ισορροπίας ενός διαφορικού-αλγεβρικού συστήματος για δοσμένη τιμή της παραμέτρου  $\mathbf{p}$  εξαρτάται από τις ιδιοτιμές του πίνακα  $\mathbf{A}$ . Καθώς οι τιμές των παραμέτρων μεταβάλλονται το διαφορικό αλγεβρικό σύστημα υφίσταται διακλαδώσεις όπως ένα απλό σύστημα διαφορικών εξισώσεων.

Οι διακλαδώσεις σαγματικού κόμβου χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Σύμφωνα με τη σχέση του Schur έχουμε:

$$\det \mathbf{J} = \det \mathbf{g}_y \det (\mathbf{f}_x \mathbf{g}_y^{-1} \mathbf{g}_x) = \det \mathbf{g}_y \det \mathbf{A} \quad (2.39)$$

Σύμφωνα με τη παραπάνω σχέση ο μη ελαττωμένος Ιακωβιανός  $\mathbf{J}$  του συστήματος γίνεται μη αντιστρέψιμος όταν γίνει μη αντιστρέψιμος ο πίνακας κατάστασης  $\mathbf{A}$ , δεδομένου ότι ο πίνακας  $\mathbf{g}_y$  είναι μη αντιστρέψιμος. Επομένως μια απαραίτητη προϋπόθεση για να εμφανιστεί διακλάδωση σαγματικού κόμβου στο σύστημα είναι η μη αντιστρεψιμότητα του Ιακωβιανού  $\mathbf{J}$ .

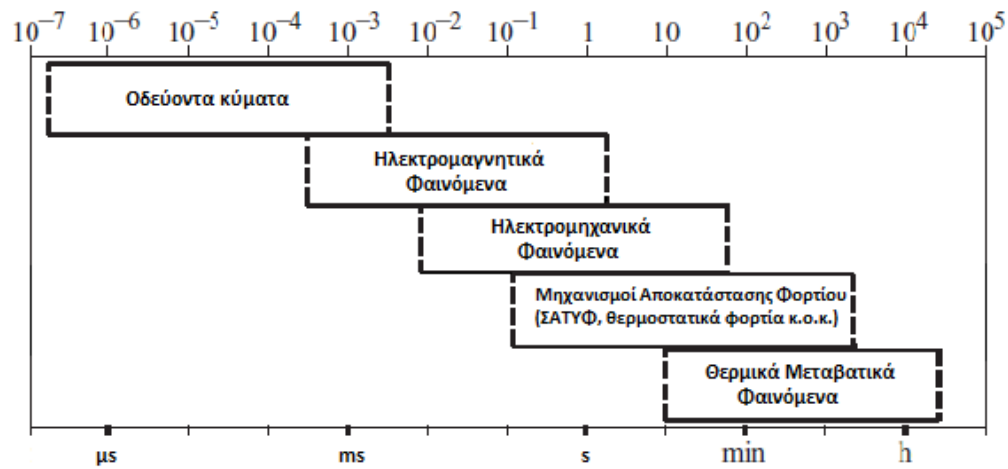
### 2.1.6 Χωρισμός χρονικών κλιμάκων

Πολλά συστήματα περιλαμβάνουν δυναμικούς μηχανισμούς που εξελίσσονται σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες, άλλες βραχυπρόθεσμες και άλλες μακροπρόθεσμες. Για την προσεγγιστική ανάλυση τέτοιων συστημάτων θεωρούμε συνήθως ότι κατά τις γρήγορες μεταβολές του συστήματος οι αργές μεταβλητές του παραμένουν πρακτικά σταθερές, ενώ κατά τις αργές μεταβολές του, οι γρήγορες μεταβλητές έχουν προλάβει να φτάσουν σε ισορροπία.

Στα ΣΗΕ τα διάφορα δυναμικά φαινόμενα μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις κατηγορίες ως εξής:

- κυματικά φαινόμενα
- ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα
- ηλεκτρομηχανικά φαινόμενα
- θερμικά μεταβατικά φαινόμενα

Η ανωτέρω κατηγοριοποίηση εκφράζει μια κατηγοριοποίηση με βάση τη χρονική κλίμακα εκδήλωσης τους. Παρακάτω φαίνεται αυτή η κατηγοριοποίηση σχηματικά:



**Σχήμα 2.5** Κατηγοριοποίηση δυναμικών φαινομένων

Από ένα μοντέλο με πολλαπλές χρονικές κλίμακες μπορεί να εξαχθούν ακριβή, μειωμένης τάξης μοντέλα κατάλληλα για κάθε χρονική κλίμακα. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται χωρισμός χρονικών κλιμάκων και βασίζεται στην ανάλυση ιδιαιδουσών διαταραχών.

Ένα σύστημα το οποίο υφίσταται μια ιδιάζουσα διαταραχή, είναι εκείνο στο οποίο μια ή περισσότερες παράγωγοι μεταβλητών κατάστασης είναι πολλαπλασιασμένες με μία μικρή παράμετρο  $\varepsilon$ . Για αυτό όταν η παράμετρος αυτή τείνει στο μηδέν, η τάξη του συστήματος αλλάζει. Ένα τέτοιο σύστημα περιγράφεται από εξισώσεις της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \varepsilon) \quad (2.40)$$

$$\varepsilon \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \varepsilon) \quad (2.41)$$

όπου  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$  διανύσματα κατάστασης διάστασης  $n$  και  $m$  αντίστοιχα.

Ο χωρισμός σε χρονικές κλίμακες περιλαμβάνει την εξαγωγή δύο μειωμένης τάξης υποσυστημάτων, εκ των οποίων το ένα περιγράφει τους αργούς μηχανισμούς και το άλλο τους γρήγορους του αρχικού συστήματος, που περιγράφεται από τις σχέσεις (2.40) και (2.41). Συμβολίζοντας με  $\mathbf{x}_s$ ,  $\mathbf{y}_s$  τις αργές συνιστώσες των μεταβλητών κατάστασης και με  $\mathbf{x}_f$ ,  $\mathbf{y}_f$  τις αντίστοιχες ταχείες έχουμε:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_f \quad (2.42)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{y}_s + \mathbf{y}_f \quad (2.43)$$

Εξαιτίας του όρου  $\varepsilon$ , η δυναμική των μεταβλητών  $\mathbf{y}$  είναι γρηγορότερη αυτής των μεταβλητών  $\mathbf{x}$ . Επομένως μπορούμε προσεγγιστικά να θεωρήσουμε ότι η αργή δυναμική του συστήματος των (2.40) και (2.41) αντιστοιχεί σε  $\varepsilon$  που τείνει στο μηδέν. Αυτό ορίζει την οιονεί στατική προσέγγιση (quasi steady state, QSS) του αργού υποσυστήματος, η οποία περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) \quad (2.44)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_s) \quad (2.45)$$

Όπως φαίνεται από τις σχέσεις (2.44) και (2.45), το αργό υποσύστημα της οιονεί στατικής προσέγγισης είναι ένα διαφορικο-αλγεβρικό σύστημα και η ανάλυση της ευστάθειας του μπορεί να γίνει με την μέθοδο της παραγράφου 2.1.5.

Η οιονεί στατική προσέγγιση μπορεί να βελτιωθεί σε οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας εισάγοντας την έννοια της *αργής πολλαπλότητας*. Η τελευταία αυτή πολλαπλότητα ορίζεται σαν αναλλοίωτη πολλαπλότητα πάνω στην οποία δεν διεγείρονται η ταχείς δυναμικοί μηχανισμοί, ώστε  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_s$ ,  $\mathbf{y} = \mathbf{y}_s$ . Σε αυτήν την περίπτωση η αργή πολλαπλότητα είναι διάστασης  $n$ , όση και η διάσταση των αργών μεταβλητών, και μπορεί να οριστεί με την βοήθεια των  $m$  εξισώσεων:

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{h}(\mathbf{x}_s) \quad (2.46)$$

Για να αποτελούν λύσεις του συστήματος (2.40), (2.41) τα  $\mathbf{x}_s$  και  $\mathbf{y}_s$  πρέπει οι εξισώσεις  $\mathbf{h}$  που ορίζουν το αργό υποσύστημα να ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη, που προκύπτει από την αντικατάσταση των σχέσεων (2.40) και (2.46) στη (2.41):

$$\varepsilon \mathbf{h}_x \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}) = \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}) \quad (2.47)$$

όπου  $\mathbf{h}_x$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας των  $\mathbf{h}$  ως προς  $\mathbf{x}$ . Αυτές οι μερικές διαφορικές εξισώσεις συνήθως δε μπορούν να λυθούν με αναλυτικές μεθόδους, γι' αυτό το αργό υποσύστημα συνήθως προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor ως προς  $\varepsilon$ :

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_s) = \mathbf{h}_0(\mathbf{x}_s) + \varepsilon \mathbf{h}_1(\mathbf{x}_s) + \varepsilon^2 \mathbf{h}_2(\mathbf{x}_s) + \dots$$

Για  $\varepsilon=0$  παίρνουμε τον πρώτο όρο  $\mathbf{h}_0$  του αναπτύγματος και για τον οποίο η (2.47) γίνεται:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}_0) = \mathbf{0}$$

Επομένως όταν  $\varepsilon \rightarrow 0$  η αργή πολλαπλότητα δίνεται από την οιονεί στατική προσέγγιση της σχέσης (2.45). Σε αυτήν την περίπτωση το σφάλμα που γίνεται από αυτήν την προσέγγιση, κρατώντας μόνο τον πρώτο όρο της σειράς Taylor, είναι τόσο μικρότερο, όσο κοντύτερα στο μηδέν είναι το  $\varepsilon$  (μέγεθος σφάλματος τάξης  $\varepsilon$ ). Έχοντας υπολογίσει την αργή πολλαπλότητα με όση ακρίβεια είναι επιθυμητή, οι αργοί δυναμικοί μηχανισμοί του συστήματος (2.40), (2.41) δίνονται από το ελαττωμένης τάξης αργό υποσύστημα:

$$\dot{\mathbf{x}}_s = \mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s)) \quad (2.48)$$

Ενώ οι αργές συνιστώσες των γρήγορων μεταβλητών, δίνονται από την σχέση (2.46). Η προσέγγιση του γρήγορου υποσυστήματος θεωρεί ότι οι μεταβλητές  $\mathbf{x}$  είναι τόσο αργές ώστε να παραμένουν πρακτικά σταθερές ( $\mathbf{x} \approx \mathbf{x}_s$ ). Ως εκ τούτου οι μεταβλητές κατάστασης του γρήγορου υποσυστήματος, είναι οι ταχείες συνιστώσες  $\mathbf{y}_f$ , που έχουν ήδη αναφερθεί και καλούνται επίσης και μεταβλητές εκτός (αργής) πολλαπλότητας.

$$\mathbf{y}_f = \mathbf{y} - \mathbf{y}_s = \mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_s) \quad (2.49)$$

Συνδυασμός των σχέσεων (2.49) και (2.41) δίνει:

$$\varepsilon \dot{\mathbf{y}}_f = \varepsilon \dot{\mathbf{y}} - \varepsilon \dot{\mathbf{y}}_s = \mathbf{g}(\mathbf{x}_s, \mathbf{y}_f + \mathbf{h}(\mathbf{x}_s)) \quad (2.50)$$

Η σχέση (2.50) αποδεικνύει ότι το γρήγορο υποσύστημα έχει σημείο ισορροπίας πάνω στην αργή πολλαπλότητα, ενώ οι μεταβλητές  $\mathbf{x}_s$  αποτελούν τις παραμέτρους του.

Η γραμμικοποίηση της (2.50) γύρω από ένα σημείο ( $\mathbf{x}_s, \mathbf{h}(\mathbf{x}_s)$ ) δίνει:

$$\varepsilon \Delta \mathbf{y}_f = \mathbf{g}_y \Delta \mathbf{y}_f \quad (2.51)$$

απ' όπου συνάγεται ότι η ευστάθεια του γρήγορου υποσυστήματος καθορίζεται από τον Ιακωβιανό πίνακα  $\mathbf{g}_y$  των γρήγορων εξισώσεων. [18]

## 2.1.7 Υβριδικά συστήματα

Υβριδικά συστήματα χαρακτηρίζονται τα συστήματα που απαρτίζονται τόσο από μηχανισμούς με συνεχή συμπεριφορά όσο και από μηχανισμούς με διακριτή συμπεριφορά. Χαρακτηρίζονται ως υβριδικά αφού δεν παρουσιάζουν καθαρά συνεχή ή διακριτή συμπεριφορά. Τα ΣΗΕ είναι τέτοιου είδους συστήματα αφού περιέχουν συνεχείς μηχανισμούς όπως π.χ γεννήτριες αλλά και διακριτούς μηχανισμούς όπως εγκάρσιοι πυκνωτές ή ΣΑΤΥΦ.

Οι σχέσεις που περιγράφουν ένα υβριδικό σύστημα δίνονται παρακάτω:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}) \quad (2.52)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}^o(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}) \quad (2.53)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}^{i-}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}), y_i < 0 \quad (2.54)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}^{i+}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}), y_i < 0 \quad (2.55)$$

$$\mathbf{z}^+ = \mathbf{h}(\mathbf{x}^-, \mathbf{y}^-, \mathbf{z}^-, \mathbf{p}), y_j = 0 \quad (2.56)$$

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{0}, y_j \neq 0 \quad (2.57)$$



όπου  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{p}$  είναι οι συνεχείς, αλγεβρικές, διακριτές μεταβλητές και οι παράμετροι αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις  $\mathbf{f}, \mathbf{g}$  είναι συναρτήσεις που αφορούν τις συνεχείς μεταβλητές αλλά εξαρτώνται και από τις διακριτές. Τα σύμβολα + και - αναφέρονται στις στιγμές πριν και μετά από ένα διακριτό γεγονός. Τέλος  $\mathbf{h}$  είναι η συνάρτηση που απεικονίζει τις διακριτές μεταβλητές.

Όπως έχει αναφερθεί στη παράγραφο 2.2.2 όταν ένα γραμμικό σύστημα είναι συνεχές η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας τους καθορίζεται μονοσήμαντα από το πρόσημο του πραγματικού μέρους των ιδιοτιμών του πίνακα κατάστασης  $\mathbf{A}$  του συστήματος. Ακόμα και όταν το σύστημα είναι μη γραμμικό είναι δυνατό να γραμμικοποιηθεί γύρω από ένα σημείο ισορροπίας και να ακολουθηθεί η παραπάνω ανάλυση.

Όσον αφορά τα διακριτά συστήματα αυτά περιγράφονται από εξισώσεις διαφορών της μορφής:

$$\mathbf{z}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{z}(k) \quad (2.58)$$

όπου  $\mathbf{z}(k+1), \mathbf{z}(k)$  οι διακριτές μεταβλητές τις χρονικές στιγμές  $k+1$  και  $k$  αντίστοιχα και  $\mathbf{A}_d$  ο πίνακας κατάστασης του διακριτού συστήματος (γραμμικού ή γραμμικοποιημένου).

Η ευστάθεια των σημείων ισορροπίας ενός τέτοιου συστήματος εξαρτάται και πάλι από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης, αλλά σε αυτή τη περίπτωση το κριτήριο ευστάθειας του σημείου ισορροπίας είναι η ύπαρξη ιδιοτιμών εντός του μοναδιαίου κύκλου.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι στη περίπτωση ενός υβριδικού συστήματος η ευστάθεια δε μπορεί να οριστεί μόνο από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης και απαιτούνται επιπλέον κριτήρια, τα οποία όμως δε θα παρουσιαστούν στην παρούσα εργασία. Η σύνθετη συμπεριφορά των υβριδικών συστημάτων έχει ως συνέπεια την εμφάνιση νέων μορφών αστάθειας, όπως π.χ η περιοδική ταλαντωτική συμπεριφορά των οριακών κύκλων. [15]

## 2.2 Μετασηματιστές με ΣΑΤΥΦ

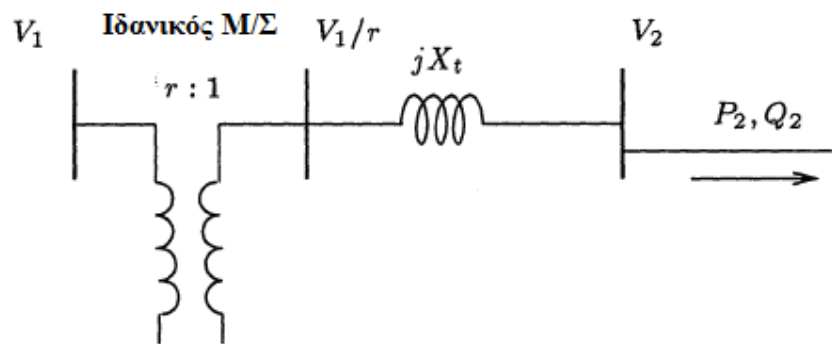
Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφορα επίπεδα τάσης τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια μετασηματιστών και αυτομετασηματιστών ισχύος. Οι μεγάλοι μετασηματιστές ισχύος υπερυψηλής τάσης/υψηλής τάσης ή υψηλής τάσης/μέσης τάσης είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασηματισμού χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή της λήψεως στα τυλίγματα του μετασηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και σε όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασυνδέσεως ή υποβιβασμού του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός τους γίνεται αυτόματα. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασηματιστή, καθώς σε αυτή

την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δημιουργώντας την δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ ελέγχουν συνήθως τη τάση στη πλευρά διανομής. Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού τους κατά ένα βήμα τη φορά. Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ότι ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού έχει περιορισμένο εύρος τιμών:

$$r_{\min} \leq r \leq r_{\max} \quad (2.59)$$

Τυπικές τιμές του κάτω ορίου είναι 0.85-0.9 α.μ και του άνω ορίου 1.1-1.15 α.μ. Το μέγεθος του βήματος κάθε φορά είναι συνήθως 0.5%-1.5.

Θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνητίσεως του μετασχηματιστή είναι απειρη, αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων και θεωρώντας σταθερή αντίδραση σκεδάσεως  $X_t$ , το ισοδύναμο κύκλωμα του ΣΑΤΥΦ φαίνεται στο Σχήμα 2.6:



Σχήμα 2.6 Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ

Υπάρχουν δύο μοντέλα για την αναπαράσταση μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ. Το ένα είναι το διακριτό μοντέλο σύμφωνα με το οποίο ο λόγος μετασχηματισμού μεταβάλλεται ασυνεχώς και με ένα βήμα τη φορά. Το δεύτερο μοντέλο είναι το συνεχές, το οποίο είναι προσεγγιστικό σε σχέση με το διακριτό μοντέλο.

Στο διακριτό μοντέλο όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ, θεωρούμε ότι αλλάζει ο λόγος του ιδανικού Μ/Σ ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους  $\Delta r$ . Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου, έστω  $t_k, k=0,1,\dots$  οι οποίες δίνονται από τον επαναληπτικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (2.60)$$

Σημειώνεται ότι το  $t_k$  μπορεί να είναι ανεξάρτητη μεταβλητή και το  $\Delta T_k$  δεν είναι απαραίτητα σταθερό αφού εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συσκευής και το σφάλμα της τάσης.

Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος του ΣΑΤΥΦ τις χρονικές στιγμές  $t_{k+1}$ , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$\begin{aligned} r_{k+1} &= r_k + \Delta r \quad \text{εάν } V_2 > V_{2o} + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_{k+1} &= r_k - \Delta r \quad \text{εάν } V_2 > V_{2o} - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_{k+1} &= r_k \quad \text{διαφορετικά} \end{aligned} \quad (2.61)$$

όπου  $V_{2o}$  είναι η τάση αναφοράς του δευτερεύοντος και  $d$  η νεκρή ζώνη της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ (θεωρείται ότι η λήψη για την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού βρίσκεται στο πρωτεύον). Η νεκρή ζώνη είναι μια περιοχή τιμών γύρω από την τάση αναφοράς. Όταν το σφάλμα της τάσης ξεπεράσει τα όρια της νεκρής ζώνης τότε το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται.

Το συνεχές μοντέλο βασίζεται στην υπόθεση ενός συνεχόμενα μεταβαλλόμενου λόγου μετασχηματισμού που μπορεί να πάρει όλες τις πραγματικές τιμές στον εύρος τιμών μεταξύ  $r_{\min}$  και  $r_{\max}$ . Στο συνεχές μοντέλο η νεκρή ζώνη αγνοείται και ισχύει η διαφορική εξίσωση (2.62):

$$T_c \dot{r} = V_2 - V_2^o \quad (2.62)$$

Για τις τιμές του λόγου μετασχηματισμού που προκύπτουν από τη σχέση (2.62) ισχύει ο περιορισμός (2.59). Με βάση την παραπάνω εξίσωση το ΣΑΤΥΦ μοντελοποιείται ως ένας ολοκληρωτικός ελεγκτής. Το συνεχές μοντέλο του ΣΑΤΥΦ προσεγγίζει τη συμπεριφορά ενός ελεγκτή αντιστρόφου χρόνου και αποτελεί μια χρήσιμη προσέγγιση, ιδιαίτερα για μαθηματικούς σκοπούς. Η χρήση του σε προσομοιώσεις είναι περιορισμένη. [1, 19]

### 2.3 Αντιστάθμιση αέργου ισχύος

Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος είναι συχνά ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για να αυξήσουμε την ικανότητα μεταφοράς ισχύος και να βελτιώσουμε την ευστάθεια τάσεως σε ένα δίκτυο. Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος μπορεί να χωριστεί σε εγκάρσια και εν σειρά αντιστάθμιση. Συχνές μορφές αέργου αντιστάθμισης είναι πυκνωτές εν σειρά, εγκάρσιες συστοιχίες πυκνωτών και επαγωγών και ευέλικτα συστήματα μεταφοράς (FACTS). Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε μόνο εγκάρσιους μηχανισμούς αέργου αντιστάθμισης.

Σε αυτή τη παράγραφο εξηγείται ο τρόπος δράσης των μηχανισμών ελέγχου της τάσης, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και δίνονται τα μαθηματικά μοντέλα αυτών.

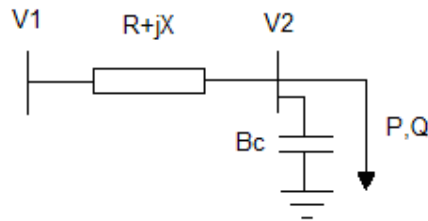
### 2.3.1 Εγκάρσιοι πυκνωτές

Το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων τα οποία τροφοδοτούνται από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι επαγωγικού χαρακτήρα και συνεπώς απαιτείται η παραγωγή αέργου ισχύος από το σύστημα ώστε να διατηρείται το επίπεδο της τάσεως. Πρόσθετη άεργος ισχύς καταναλώνεται ως απώλειες ( $I^2 X$ ) του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Μερικές από τις επιπτώσεις της αέργου ισχύος στο σύστημα είναι:

1. Αύξηση του μέτρου του ρεύματος για ίδια ενεργό ισχύ (αφού  $I = \frac{P}{V \cos \varphi}$ ) με αποτέλεσμα αύξηση των απωλειών ενεργού ισχύος ( $I^2 R$ ) στις γραμμές και τον εξοπλισμό.
2. Αυξημένη εγκατεστημένη ισχύς γραμμών και εξοπλισμού και επομένως αυξημένες επενδύσεις κεφαλαίων.
3. Πτώση τάσεως από την παραγωγή προς τις θέσεις των φορτίων.

Στη παρούσα παράγραφο ενδιαφέρει κυρίως η έγχυση αέργου ισχύος στο σύστημα με πυκνωτές εν παραλλήλω για τη βελτίωση της τάσης του δικτύου. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής για τη βελτίωση της τάσεως έχει γενικά σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση της οικονομίας του συστήματος.

Η άεργος ισχύς που εγχέεται αντισταθμίζει τη ζήτηση αέργου ισχύος και επομένως αυξάνει την τάση. Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε το δίκτυο του Σχήματος 2.7:



Σχήμα 2.7 Τμήμα δικτύου για τον υπολογισμό πτώσης τάσης

Η πτώση τάσης στο ζυγό του φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + X(Q - Q_c)}{V} \quad (2.63)$$

όπου R, X η αντίσταση και αντίδραση της γραμμής αντίστοιχα, Q η άεργος ισχύς του φορτίου,  $Q_c$  η άεργος ισχύς που παράγει ο πυκνωτής και V η τάση του ζυγού φορτίου.

Η σχέση (2.63) υποδεικνύει ότι ο πυκνωτής μειώνει τη πτώση τάσης. Επιπλέον όταν ο πυκνωτής αντισταθμίζει κατάλληλα τη ζήτηση σε άεργο ισχύ, το ρεύμα της γραμμής μειώνεται όπως προκύπτει από τη σχέση (2.64):

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_c)^2}}{V} \quad (2.64)$$

με συνέπεια να μειωθούν και οι απώλειες στη γραμμή ( $P_{Loss} = I^2 R$ ).

Οι στατοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται ευρύτατα ως πηγές αέργου ισχύος, λόγω των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε στάθμη διανομής Μέσης Τάσης (MT). Οι στατοί πυκνωτές είναι φθηνότεροι από τους σύγχρονους πυκνωτές και τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς ή FACTS (Flexible AC Transmission Systems) όπως είναι γνωστά διεθνώς, είναι όμως λιγότερο ευέλικτοι στη λειτουργία. Με τους στατούς πυκνωτές η αέργος ισχύς δεν μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, παρά μόνο κατά βήματα και επιπλέον δεν μπορούν να απορροφήσουν αέργο ισχύ, σε περίπτωση που χρειαστεί, όπως οι σύγχρονοι πυκνωτές ή τα FACTS. Η αέργος ισχύς που παράγεται από τους πυκνωτές τείνει να μειωθεί με τη βύθιση της τάσης ( $Q_C = V^2 B_C$ ) και άρα δεν συμπεριφέρονται αρκετά ικανοποιητικά σε περιπτώσεις σφαλμάτων ή βύθισης τάσης. Επιπλέον η διακοπή των πυκνωτών συνοδεύεται πολλές φορές από υπερτάσεις και η ζεύξη τους στο σύστημα από μεγάλα κρουστικά ρεύματα.

Εν τούτοις οι εγκάρσιοι πυκνωτές έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικονομικά, σε μικρές μονάδες και στις θέσεις ακριβώς που απαιτείται η παροχή αέργου ισχύος στα δίκτυα Μέσης και Υψηλής τάσης.

Η λογική με την οποία συνδέονται / αποσυνδέονται οι βαθμίδες των πυκνωτών τη χρονική στιγμή tk+1 δίνεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$\begin{aligned} B_{Ck+1} &= B_{Ck} + \Delta B_C & \text{αν } V_2 < V_{2o} + d \text{ και } B_{Ck} < B_{Cmax} \\ B_{Ck+1} &= B_{Ck} - \Delta B_C & \text{αν } V_2 > V_{2o} - d \text{ και } B_{Ck} > 0 \\ B_{Ck+1} &= B_{Ck} & \text{διαφορετικά} \end{aligned} \quad (2.65)$$

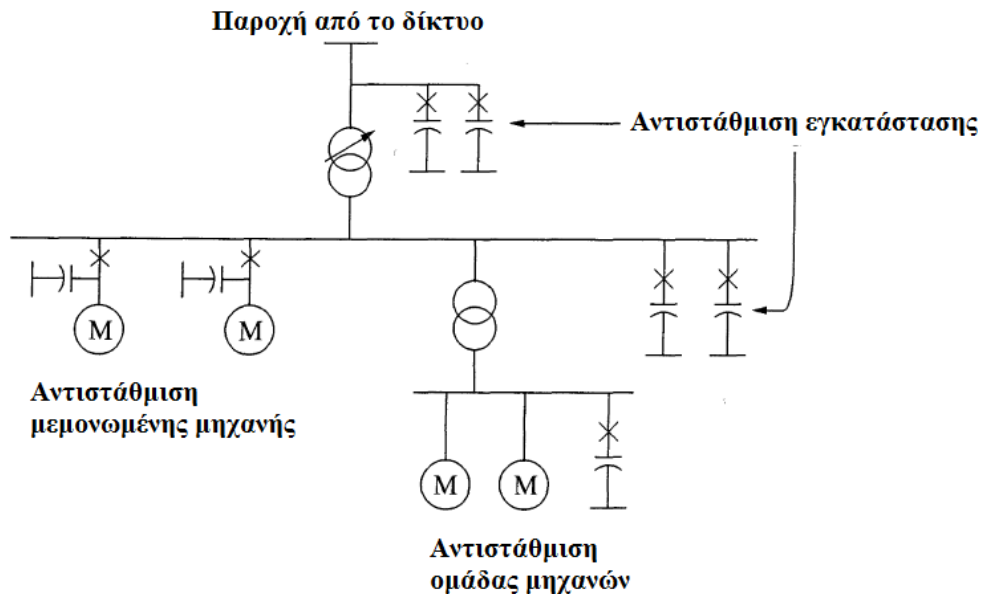
όπου  $V_{2o}$  είναι η τάση αναφοράς του ζυγού που προσπαθούν να διατηρήσουν οι πυκνωτές και  $d$  το μισό της νεκρής ζώνης της ρύθμισης των πυκνωτών.

Η σύνδεση και αποσύνδεση των βαθμίδων πυκνωτών μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα είτε αυτόματα. Στη τελευταία περίπτωση οι πυκνωτές μπορεί να είναι μηχανικά χειριζόμενοι οι ελεγχόμενοι από θυρίστρο.

Γενικά η χρονική καθυστέρηση για τη σύνδεση των πυκνωτών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να μην επηρεάζεται η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Εξάλλου επειδή οι χειρισμοί ζεύξης – απόζευξης δημιουργούν μεταβατικά φαινόμενα θα πρέπει να αποφεύγεται, κατά το δυνατόν, η συχνή λειτουργία τους.

Εκτός από τον έλεγχο της τάσης οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται στη μεριά της διανομής για τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος. Σκοπός αυτής της διόρθωσης είναι η παροχή αέργου ισχύος κοντά στο σημείο που καταναλώνεται, αποφεύγοντας έτσι την παροχή της από απομακρυσμένους παραγωγούς. Η διόρθωση του συντελεστή ισχύος πραγματοποιείται μέσω εγκάρσιων πυκνωτών (άλλων μόνιμα συνδεδεμένων και άλλων όχι) σε διάφορα επίπεδα τάσης στο σύστημα διανομής. Για μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές, η διόρθωση συντελεστή ισχύος γίνεται, όπως φαίνεται

στο Σχήμα 2.8, σε διάφορα τμήματα: (i) σε μια μηχανή, (ii) σε μία ομάδα μηχανών, (iii) στην εγκατάσταση συνολικά.



Σχήμα 2.8 Διόρθωση συντελεστή ισχύος σε βιομηχανικό καταναλωτή

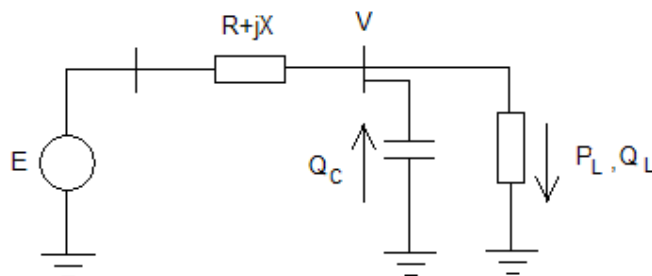
Με τη διόρθωση του συντελεστή ισχύος αυξάνεται η τάση στο φορτίο και επομένως και η ενεργός ισχύς που καταναλώνει, αφού η ενεργός ισχύς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της τάσης. Επιπλέον μειώνονται και οι απώλειες ενεργού ισχύος στο δίκτυο. Από το Σχήμα 2.9 έχουμε:

$$I = \frac{\sqrt{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}}{V} \quad (2.66)$$

οι απώλειες του δικτύου δίνονται από τη σχέση:

$$P_{Loss} = I^2 R = \frac{P^2 R + (Q_L - Q_C)^2 R}{V^2} \quad (2.67)$$

Από τη σχέση (2.67) είναι φανερό ότι οι απώλειες είναι μειωμένες σε σχέση με τη περίπτωση που δεν έχουμε διόρθωση συντελεστή ισχύος.



Σχήμα 2.9 Ακτινικό δίκτυο με διόρθωση συντελεστή ισχύος

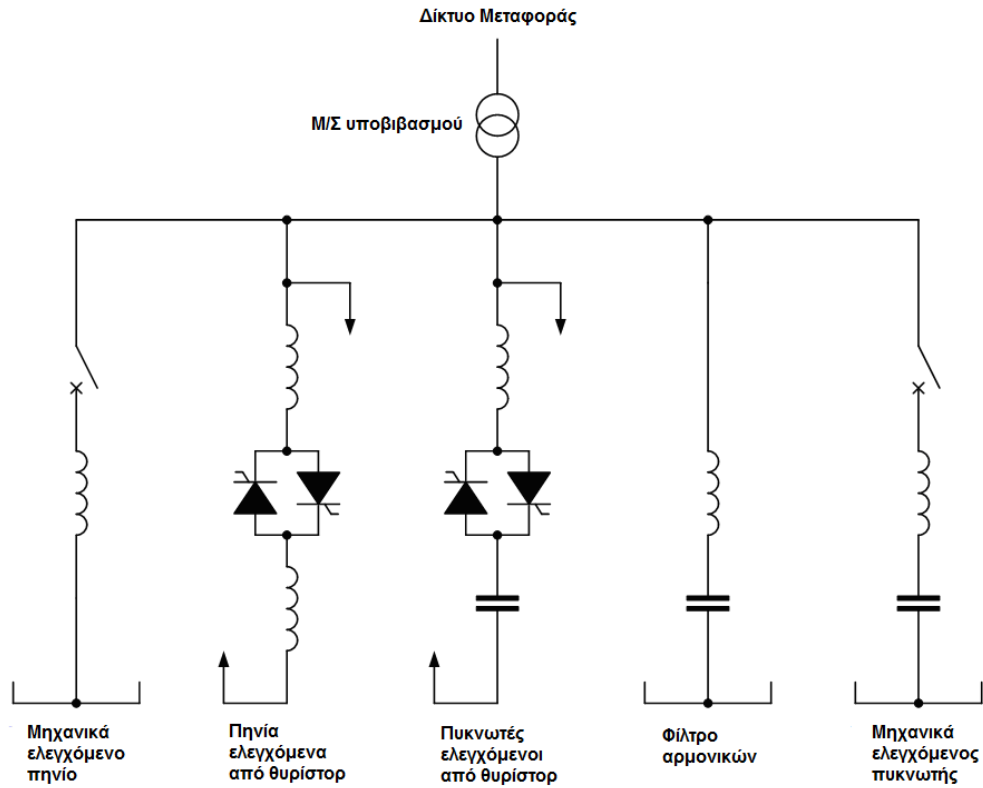
Η διόρθωση γίνεται συνήθως με τέτοιο τρόπο ώστε ο συντελεστής ισχύος να γίνει ίσος με τη μονάδα. Επίσης όπως και στον έλεγχο της τάσης οι πυκνωτές λειτουργούν σε διακριτές χρονικές στιγμές και έχουν νεκρή ζώνη ρύθμισης.  
[1, 10, 11, 19]

### **2.3.2 Συσκευές αέργου αντιστάθμισης με ηλεκτρονικά ισχύος (SVC, STATCOM)**

Στη παράγραφο 2.3.1 αναφέρθηκε ότι οι εγκάρσιοι πυκνωτές είναι αργοί μηχανισμοί ρύθμισης και επιπλέον έχουν νεκρή ζώνη ρύθμισης με αποτέλεσμα η ελεγχόμενη τάση να μην διατηρείται ακριβώς στην επιθυμητή τιμή, αλλά σε μια περιοχή τιμών κοντά σε αυτή. Για να ξεπεραστούν αυτές τις αποκλίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση των εγκάρσιων στατών πυκνωτών συσκευές FACTS αέργου αντιστάθμισης οι οποίες έχουν ταχύτερη απόκριση και καλύτερο έλεγχο.

Υπάρχουν δύο ειδών συσκευές FACTS αέργου αντιστάθμισης, αυτές που ελέγχονται από θυρίστορ και αυτά που αποτελούνται από μετατροπείς ισχύος. Οι Στατοί Αντισταθμιστές Αέργου Ισχύος ή SVC αποτελούνται από ένα ρυθμιζόμενο πηνίο που ελέγχεται από θυρίστορ και είναι παρόμοιοι με συστοιχίες πυκνωτών / πηνίων με διακοπτική ζεύξη αλλά όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπερτερούν στην ταχύτητα απόκρισης και τον έλεγχο. Η άλλη κατηγορία αντισταθμιστών αφορά ελεγχόμενες σύγχρονες πηγές εναλλασσόμενης τάσης ή ρεύματος. Έχουν πολύ ανώτερη λειτουργικότητα για κάθε είδος αντιστάθμισης και εκτός της άεργης αντιστάθμισης, έχουν τη δυνατότητα άμεσης ανταλλαγής ενεργού ισχύος με το δίκτυο (εάν διαθέτουν κατάλληλη πηγή ενέργειας όπως π.χ συσσωρευτές), εξασφαλίζοντας πιο ευέλικτη διαχείριση ροής ισχύος και αντιμετώπιση δυναμικών διαταραχών. Μια τέτοια πηγή είναι ανάλογη με μια ιδανική στρεφόμενη σύγχρονη μηχανή, η οποία παράγει ένα συμμετρικό τριφασικό σύστημα τάσεων στη θεμελιώδη συχνότητα, με ελεγχόμενο πλάτος και φάση. Σε αυτή τη κατηγορία ανήκουν οι Στατοί Σύγχρονοι Αντισταθμιστές ή STATCOM.

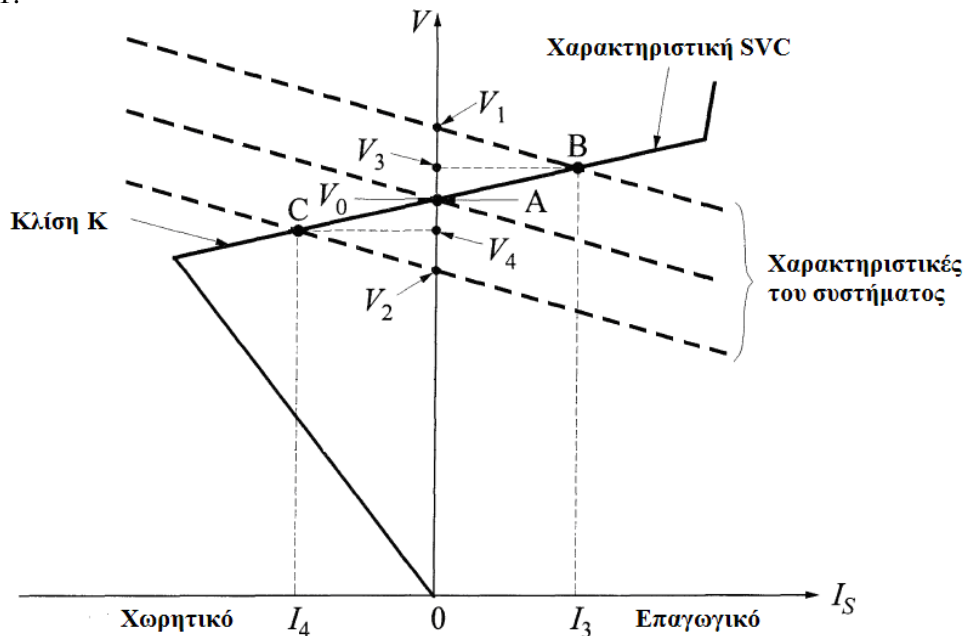
Το SVC θεωρείται ως μια εγκάρσια αντίσταση (χωρητική ή επαγωγική) με ρυθμιζόμενη τιμή. Το SVC μπορεί να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ στο σημείο σύνδεσής του. Η εγκάρσια παρεχόμενη αντιστάθμιση είναι συνάρτηση της τάσεως της γραμμής. Ένας τυπικός εγκάρσιος στατικός αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελείται από βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενων από θυρίστορ (TSCs-Thyristor Switched Capacitors) καθώς και βαθμίδες πηνίων ελεγχόμενων από θυρίστορ (TCRs-Thyristor Control Reactors) φαίνεται στο Σχήμα 2.10:



Σχήμα 2.10 κυκλωματική αναπαράσταση SVC

Εκτός από την ενίσχυση της τάσεως, τα SVC χρησιμοποιούνται και για τη βελτίωση της μεταβατικής και δυναμικής ευστάθειας, καθώς συμβάλουν στην αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Ο τρόπος με τον οποίο το SVC αντισταθμίζει τη τάση ενός ζυγού φαίνεται στο Σχήμα 2.11:



Σχήμα 2.11 Χαρακτηριστική V-I του SVC



Στο Σχήμα 2.11 απεικονίζονται με διακεκομμένη γραμμή, 3 χαρακτηριστικές ενός δικτύου, για διαφορετικές συνθήκες φορτίου, και η χαρακτηριστική V-I του SVC. Η χαρακτηριστική του δικτύου, αν αναπαρασταθεί με ένα ισοδύναμο Thevenin στην άκρη του οποίου συνδέεται ένα φορτίο, εκφράζεται από τη σχέση (2.68):

$$V = E_{th} - X_{th} I_s \quad (2.68)$$

Όπου  $E_{th}$  και  $X_{th}$ , η ισοδύναμη τάση και αντίδραση Thevenin του δικτύου,  $V$  η τάση του ζυγού που συνδέεται το φορτίο και  $I_s$  το ρεύμα που διαρρέει το δίκτυο.

Η χαρακτηριστική του SVC, στην ελεγχόμενη περιοχή που χαρακτηρίζεται από τη κλίση  $K$ , δίνεται από τη σχέση (2.69):

$$V = V_o + K I_s \quad (2.69)$$

Όσον αφορά τη κλίση  $X_{SL}$  σημειώνουμε ότι στις περισσότερες εφαρμογές το SVC δεν χρησιμοποιείται ως ιδανικός ρυθμιστής τάσης, αλλά η τάση μεταβάλλεται ανάλογα με το ρεύμα αντιστάθμισης. Η κλίση  $K$  δίνεται από τη σχέση (2.70) :

$$K = \frac{\Delta V_{C_{max}}}{I_{C_{max}}} = \frac{\Delta V_{L_{max}}}{I_{L_{max}}} \quad (2.70)$$

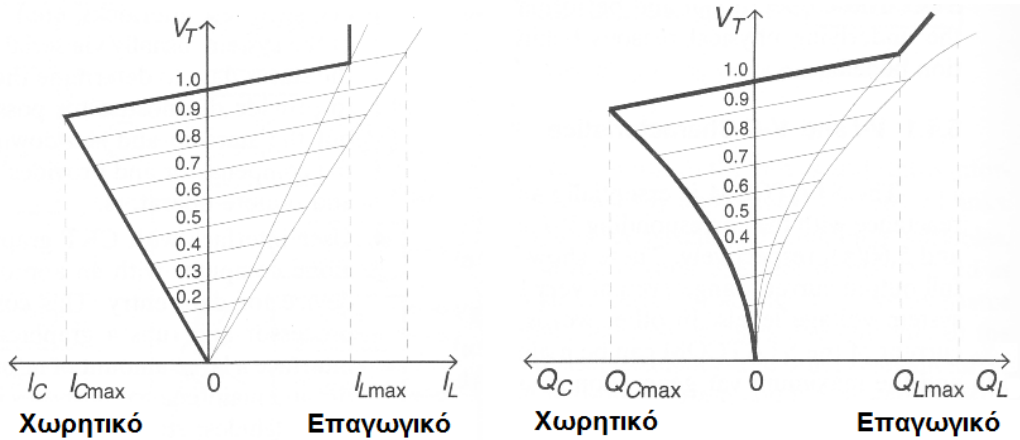
Αυτή η κλίση επιτρέπει:

- Την επέκταση της γραμμικής περιοχής λειτουργίας του SVC.
- Τον σαφή ορισμό του σημείου λειτουργίας και την αποφυγή ταλαντώσεων κατά τη ρύθμιση.
- Την αυτόματη κατανομή φορτίου μεταξύ του SVC και άλλων συσκευών ρύθμισης τάσης .

Η μεσαία χαρακτηριστική του δικτύου, στο Σχήμα 2.11, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει το δίκτυο ύπο ονομαστικές συνθήκες και τέμνει τη χαρακτηριστική του SVC στο σημείο A όπου  $V=V_o$  και  $I_s=0$ .

Αν η τάση του ζυγού αυξηθεί, π.χ λόγω μια μείωσης του φορτίου, η  $V$  θα αυξηθεί παίρνοντας τη τιμή  $V_1$  δεδομένου ότι δεν είναι συνδεδεμένο το SVC. Υπό την επίδραση ωστόσο του SVC, αυτό θα απορροφήσει επαγωγικό ρεύμα  $I_3$  κρατώντας τη τάση του ζυγού στη τιμή  $V_3$  και μετακινώντας το σημείο λειτουργίας στο B. Παρόμοια, αν η τάση του ζυγού μειωθεί, π.χ λόγω μιας αύξησης στο φορτίο, το SVC θα κρατήσει τη τάση στο  $V_4$ , αντί του  $V_2$  για τη περίπτωση χωρίς SVC. Αν η κλίση  $K$  της χαρακτηριστικής του SVC ήταν 0, η τάση θα διατηρούνταν στο  $V_o$  και στις 2 περιπτώσεις.

Γενικά η λειτουργία του SVC προσεγγίζει αυτή μια εγκάρσια χωρητικής ή επαγωγικής αγωγιμότητας, επομένως το μέγιστο ρεύμα αντιστάθμισης του SVC μεταβάλλεται γραμμικά με τη τάση του δικτύου ενώ η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος αντιστάθμισης μεταβάλλεται με το τετράγωνο της τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12 V-I και V-Q χαρακτηριστικές SVC

Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές V-I και V-Q του Σχήματος 2.12 πρέπει να τονίσουμε ότι η κάθε μία αντιστοιχεί σε μία διαφορετική λογική ελέγχου. Αυτό φαίνεται από τις περιοχές κανονικής λειτουργίας κάθε χαρακτηριστικής.

Για παράδειγμα η περιοχή κανονικής λειτουργίας της χαρακτηριστικής V-Q διέπεται από τη γραμμική σχέση (2.71):

$$Q_{comp} = K(V_o - V) \quad (2.71)$$

όπου  $Q_{comp}$  είναι η άεργος ισχύς αντιστάθμισης που παρέχεται ή καταναλώνεται από το SVC,  $K$  η κλίση της γραμμικής περιοχής λειτουργίας και  $V_o$  η τάση για μηδενική αντιστάθμιση (1 α.μ στο Σχήμα 2.12).

Από την άλλη η περιοχή κανονικής λειτουργίας της χαρακτηριστικής V-I διέπεται από τη γραμμική σχέση (2.72):

$$I_{comp} = K(V_o - V) \quad (2.72)$$

όπου  $I_{comp}$  είναι το ρεύμα αντιστάθμισης του SVC.

Άμα τώρα δεχτούμε ότι ισχύει η σχέση (2.72) τότε η άεργος ισχύς αντιστάθμισης του SVC θα πρέπει να δίνεται από τη σχέση (2.73):

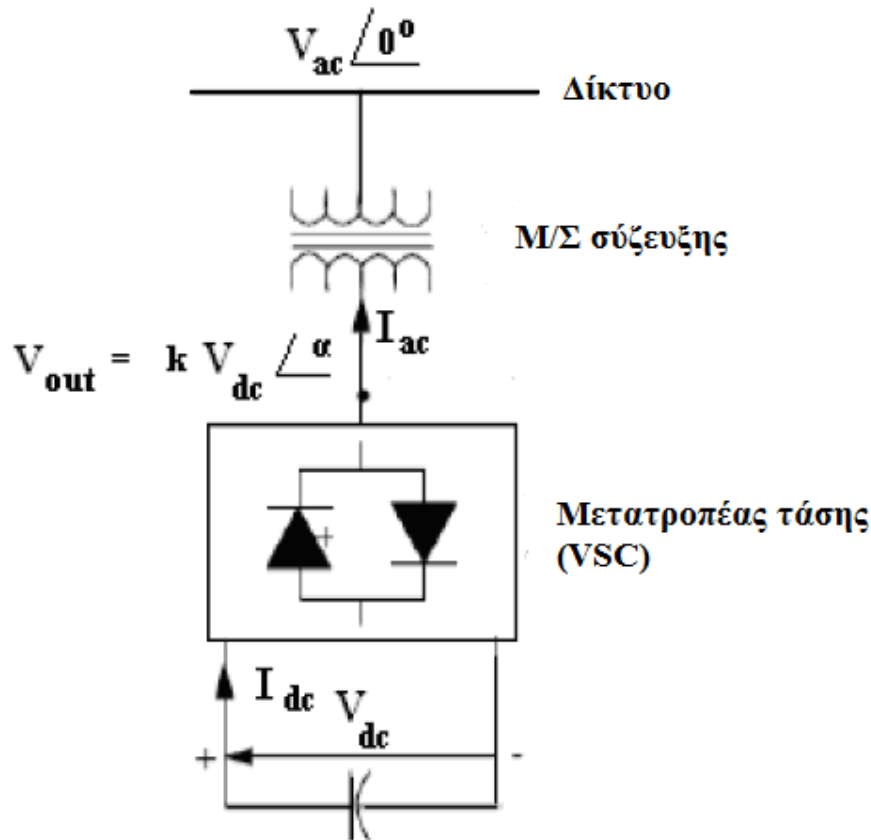
$$Q_{comp} = VI_{comp} = K(V_o - V)V = KV_oV - KV^2 \quad (2.73)$$

Παρατηρούμε ότι οι σχέσεις (2.71) και (2.73) διαφέρουν αφού η μία είναι ανάλογη της τάσης και η άλλη ανάλογη του τετραγώνου της τάσης. Άρα δεν γίνεται και η V-I και η V-Q χαρακτηριστικές να έχουν ταυτόχρονα γραμμική συμπεριφορά στη περιοχή κανονικής λειτουργίας, για τον ίδιο τρόπο ελέγχου.

Στη μοντελοποίηση του SVC για τις προσομοιώσεις, που θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια, χρησιμοποιήθηκε η λογική ελέγχου που αντιστοιχεί στη χαρακτηριστική V-Q του Σχήματος 2.12.

Το STATCOM είναι μία προέκταση του SVC βασισμένη σε DC-AC μετατροπείς, οι οποίοι παράγουν μια εναλλασσόμενη τάση (ή ρεύμα) από μια συνεχή τάση (ή ρεύμα) συνήθως με τη μέθοδο SPWM. Η ανάλυση του STATCOM είναι παρόμοια με αυτή του SVC αν λάβουμε υπόψη ότι η άεργος ισχύς του STATCOM είναι ανάλογη της τάσης, ενώ η άεργος ισχύς του SVC είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης.

Στο Σχήμα 2.13 φαίνεται το λειτουργικό διάγραμμα του STATCOM:

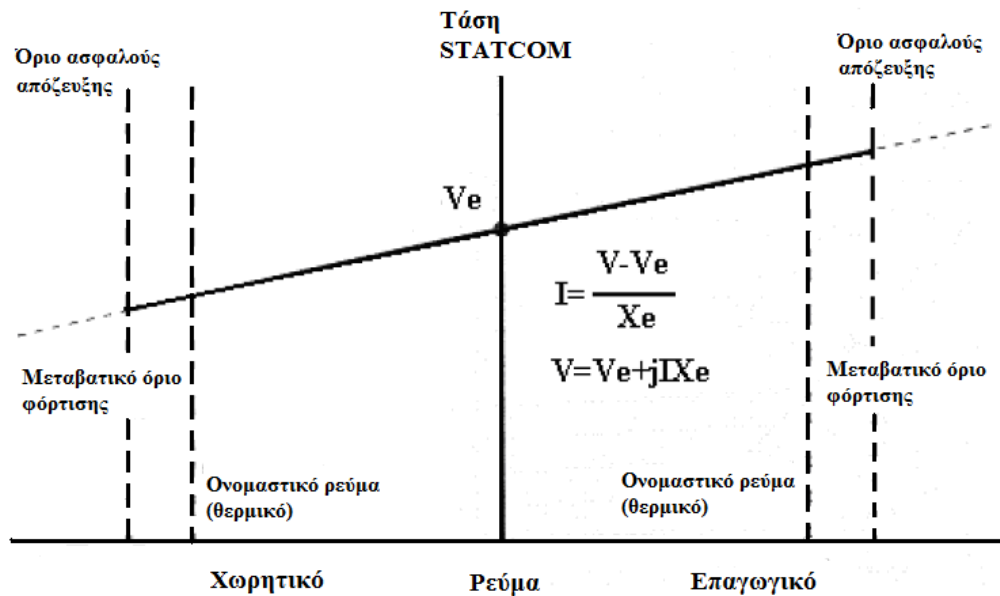


Σχήμα 2.13 Λειτουργικό διάγραμμα STATCOM

Η βασική συμπεριφορά του STATCOM βασίζεται στη λειτουργία του σύγχρονου αντισταθμιστή. Εάν η παραγόμενη τάση από το STATCOM είναι μικρότερη από τη τάση του ζυγού του συστήματος στον οποίο είναι συνδεδεμένο, τότε το STATCOM συμπεριφέρεται ως επαγωγικό φορτίο απορροφώντας άεργο ισχύ από το σύστημα. Αντίθετα το STATCOM συμπεριφέρεται ως εγκάρσιος πυκνωτής, παρέχοντας άεργο ισχύ στο σύστημα, όταν η παραγόμενη τάση από το STATCOM είναι μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος. Οι απώλειες παρέχονται από το σύστημα και όχι από κάποια πηγή συνεχούς τάσης ή ρεύματος. Ο μετατροπέας διατηρεί τον πυκνωτή φορτισμένο στην επιθυμητή τάση, η οποία επιτυγχάνεται όταν οι τάσεις εξόδου του μετατροπέα έπονται των τάσεων του δικτύου με μία μικρή γωνία. Έτσι ο μετατροπέας απορροφά ένα μικρό ποσό ενεργού ισχύος από το AC σύστημα για να καλύπτει τις εσωτερικές του απώλειες και να διατηρεί τη τάση του πυκνωτή σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Ο ίδιος μηχανισμός ελέγχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αύξηση ή μείωση της τάσης του πυκνωτή και επομένως και του πλάτους της τάσης εξόδου του μετατροπέα, ώστε να ελέγχεται η παροχή ή η απορρόφηση αέργου ισχύος. Η

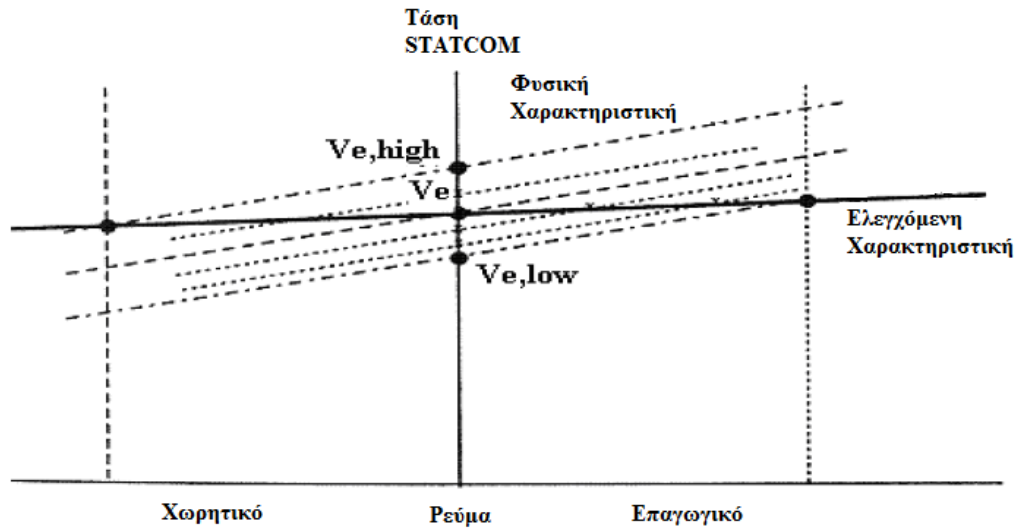
απευθείας σύνδεση του μετατροπέα με το σύστημα τροφοδότησης, το οποίο έχει πολύ μεγαλύτερη ισχύ βραχυκύκλωσης από αυτό που αντέχει ο μετατροπέας, αποφεύγεται. Για το λόγο αυτό υπάρχει πάντα μια αντίδραση σύζευξης μεταξύ του ζυγού του δικτύου και των ακροδεκτών του μετατροπέα. Όταν ο μετατροπέας συνδέεται με το σύστημα μέσω μετασχηματιστή, αυτός μπορεί να έχει αρκετά μεγάλη αντίδραση για την ικανοποιητική λειτουργία του STATCOM.

Στο Σχήμα 2.14 φαίνεται η χαρακτηριστική λειτουργίας V-I στα άκρα του STATCOM, η οποία εξαρτάται αποκλειστικά από τη τάση  $V_e$  στους ακροδέκτες του μετατροπέα και την επαγωγική αντίδραση σύζευξης  $X_e$ .



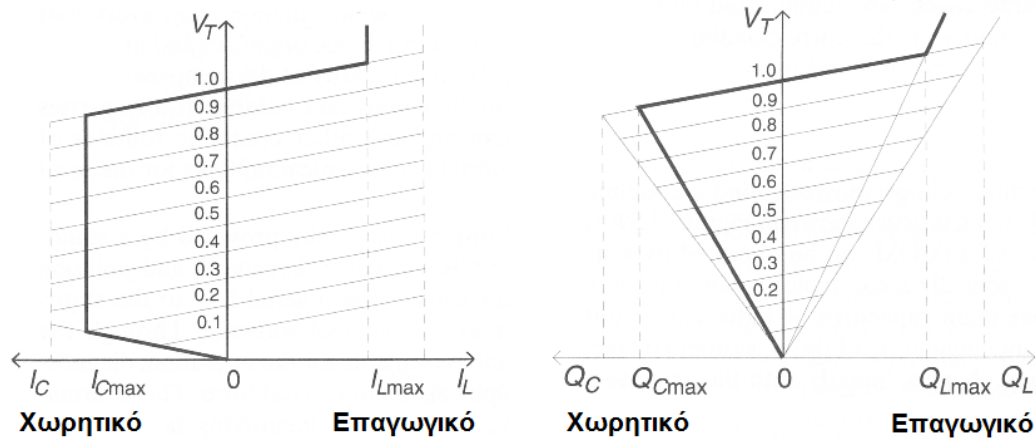
Σχήμα 2.14 Ερμηνεία V-I χαρακτηριστικής του STATCOM

Γενικά η αντίδραση σύζευξης  $X_e$  παίρνει τυπικές τιμές μεταξύ 10% και 20%. Για παράδειγμα, η πτώση ή η ανύψωση τάσης στα άκρα της αντίδρασης είναι της τάξης του 10-20% της ονομαστικής τάσης του συστήματος για το ρεύμα λειτουργίας του STATCOM. Οι περισσότερες πρακτικές εφαρμογές απαιτούν από οποιοδήποτε τύπο STATCOM να λειτουργεί με μια ελάχιστη κλίση που κυμαίνεται μεταξύ 2% και 5%, τιμές που είναι σαφώς μικρότερες από την αντίδραση σύζευξης. Λόγω του ότι η αντίδραση σύζευξης είναι σταθερή, η τάση του μετατροπέα πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15:



Σχήμα 2.15 Ελεγχόμενη χαρακτηριστική του STATCOM

Επομένως η τάση του μετατροπέα πρέπει να αυξηθεί έως τη τιμή  $V_{e,high}$ , ώστε να αποκτήσει χωρητική συμπεριφορά. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να μειωθεί έως τη τιμή  $V_{e,low}$  ώστε να έχει επαγωγική συμπεριφορά.



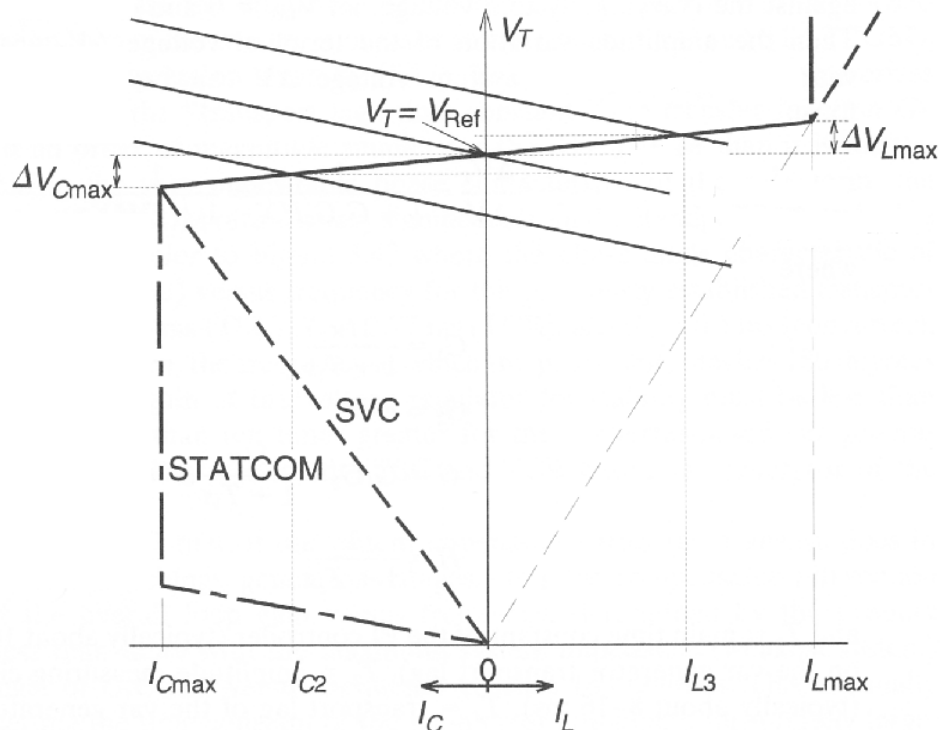
Σχήμα 2.16 V-I και V-Q χαρακτηριστικές STATCOM

Το STATCOM πρακτικά είναι μια εναλλασσόμενη πηγή τάσης που συνδέεται με το δίκτυο μέσω μιας αντίδρασης σύζευξης και έχει τις V-I και V-Q χαρακτηριστικές που φαίνονται στο Σχήμα 2.16. Αυτές οι χαρακτηριστικές δείχνουν ότι το STATCOM μπορεί να λειτουργήσει παρέχοντας μέγιστο ρεύμα αντιστάθμισης ακόμα και για πολύ μικρές τιμές της τάσης (πρακτικά γύρω στο 0.2 α.μ). Με άλλα λόγια το μέγιστο επαγωγικό ή χωρητικό ρεύμα του STATCOM μπορεί να διατηρηθεί ανεξάρτητα από τη τάση του δικτύου ενώ η μέγιστη παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με τη τάση του δικτύου.

Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές V-Q και V-I του Σχήματος 2.16 ισχύουν τα όσα αναφέραμε για τις χαρακτηριστικές του σχήματος 2.12.

Για τη μοντελοποίηση του STATCOM, στις προσομοιώσεις, χρησιμοποιήθηκε η λογική ελέγχου της χαρακτηριστικής V-Q του Σχήματος 2.16.

Στη γραμμική περιοχή λειτουργίας, σε συνθήκες μονίμου καταστάσεως και για αργές μεταβολές στο σύστημα, τόσο το SVC όσο και το STATCOM λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο. Δηλαδή το μέτρο της ρυθμιζόμενης τάσης, στη γραμμική περιοχή λειτουργίας, εξαρτάται αποκλειστικά από τη κλίση ρύθμισης της χαρακτηριστικής V-I. Εκτός της γραμμικής περιοχής λειτουργίας το SVC και το STATCOM συμπεριφέρονται διαφορετικά όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17. Επίσης η δυναμική συμπεριφορά τους διαφέρει. [5, 7, 10, 16]



Σχήμα 2.17 V-I χαρακτηριστικές SVC και STATCOM

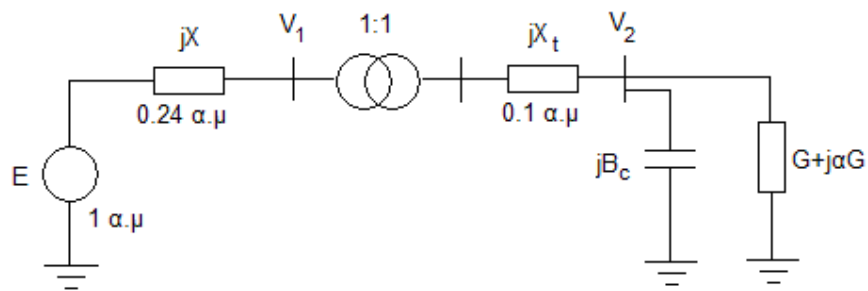
### 3. ΣΥΝΗΘΗΣ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΙΣΧΥΟΣ

Πρωτού παρουσιαστούν στο παρόν, αλλά και στα επόμενα κεφάλαια οι διάφορες τεχνικές ρύθμισης της τάσης, εξετάζεται το απλό ακτινικό δίκτυο για τη περίπτωση που δεν πραγματοποιείται κανένας έλεγχος τάσης, δηλαδή το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή υποβιβασμού είναι απενεργοποιημένο και δεν πραγματοποιείται αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Ο λόγος μελέτης αυτής της περίπτωσης είναι καθαρά για να οριστούν τα μεγέθη αναφοράς βάση των οποίων θα γίνει η σύγκριση της επίδρασης των διαφόρων τεχνικών ελέγχου της τάσης στην ευστάθεια της τάσης και τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι συνήθειες πρακτικές ελέγχου της τάσης (ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ) και του συντελεστή ισχύος (διόρθωση συντελεστή ισχύος με εγκάρσιους πυκνωτές). Σε κάθε σενάριο ελέγχου υπολογίζονται η θεωρητική μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς και τα χαρακτηριστικά των συσκευών ρύθμισης της τάσης (στο παρόν κεφάλαιο ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ) και έπειτα προσομοιώνεται το κάθε σύστημα για να επαληθευθούν οι θεωρητικοί υπολογισμοί

#### 3.1 Σενάριο αναφοράς: Δίκτυο χωρίς ρύθμιση τάσης

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στο ζυγό φορτίου ενός ακτινικού ΣΗΕ είναι συνάρτηση των χαρακτηριστικών του συστήματος μεταφοράς και παραγωγής. Η αύξηση στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, που επιτυγχάνεται λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ και των διαφόρων μηχανισμών αντιστάθμισης αέργου ισχύος, είναι απόρροια της μεταβολής που υφίσταται το δίκτυο στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του. Η διερεύνηση των συνεπειών από τον έλεγχο της τάσης θα βασιστεί στο απλό ακτινικό δίκτυο με σταθερές παραμέτρους  $E$  και  $X$  του Σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1 Ακτινικό δίκτυο με Μ/Σ υποβιβασμού, συσκευή αέργου ρύθμισης και φορτίο

Σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια ελέγχου, το δίκτυο μεταφοράς παριστάνεται, για λόγους απλότητας, με ένα ισοδύναμο Thevenin με στάθερή τάση  $E$  και ισοδύναμη αντίδραση  $X$ . Ο μετασχηματιστής υποβιβασμού έχει ΣΑΤΥΦ, το οποίο ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο είναι άλλοτε ενεργό και άλλοτε απενεργό με  $r=1$  α.μ. Ο μετασχηματιστής μοντελοποιείται ως ένας ιδανικός μετασχηματιστής σε σειρά με την

αντίδραση σκεδάσεως του. Θεωρούμε ότι το φορτίο έχει σταθερό συντελεστή ισχύος  $\cos\varphi=0.93$  επαγωγικό. Ο συντελεστής ισχύος στο ζυγό του φορτίου θεωρείται ότι αντισταθμίζεται με ζεύξη/απόζευξη πυκνωτών χωρητικής αγωγιμότητας Bc. Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε αρχικά ότι οι πυκνωτές λειτουργούν με συνεχή τρόπο ( $\Delta Bc \rightarrow 0$ ) ώστε ο συντελεστής ισχύος να διατηρείται σταθερός.

$$T_C \dot{B}_C = \cos \varphi_o - \cos \varphi \quad (3.1)$$

όπου  $\cos\varphi_o$  ο επιθυμητός συντελεστής ισχύος και  $T_C$  η χρονική σταθερά ζεύξη/απόζευξης των πυκνωτών. Σε συνθήκες ισορροπίας ισχύει  $\cos\varphi=\cos\varphi_o$ . Για λόγους σύγκρισης θα κανονικοποιήσουμε την μεταφερόμενη ισχύ ώστε η μέγιστη ισχύς για συντελεστή ισχύος 0.93 επαγωγικό, χωρίς έλεγχο τάσης να είναι 1 α.μ. Σε αυτή τη περίπτωση  $Q_2=aP$ , όπου  $a=\tan\varphi=0.3952$  για τον θεωρούμενο συντελεστή ισχύος.

Η γενική σχέση των τάσεων  $E$  και της τάσης μεταφοράς  $V_1$  δίνεται από την ακόλουθη διτετράγωνη εξίσωση:

$$V_1^4 - (E^2 - 2Q_1X)V_1^2 + (P^2 + Q_1^2)X^2 = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{όπου: } Q_1 = aP + \frac{P^2(1+a^2)}{V_2^2} X_t \quad (3.3)$$

Προκειμένου να επιτύχουμε μεταφορά ισχύος η διτετράγωνη εξίσωση (3.2) θα πρέπει να έχει πραγματικές λύσεις και άρα η διακρίνουσά της θα πρέπει να μην είναι αρνητική:

$$(E^2 - 2Q_1X)^2 - 4(P^2 + Q_1^2)X^2 \geq 0 \quad (3.4)$$

Μηδενίζοντας την παραπάνω διακρίνουσα υπολογίζουμε τη σχέση που δίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ για την περίπτωση που δεν έχουμε έλεγχο τάσης:

$$P_{\max} = \frac{E^2(1 - \sin \varphi)}{2(X + X_t) \cos \varphi} \quad (3.5)$$

Αυτή θα είναι η μέγιστη ισχύς αναφοράς μας. Αν υποθέσουμε ότι  $E=1$  α.μ,  $X=0.24$  α.μ και  $X_t=0.1$  α.μ τότε  $P_{\max}=1$  α.μ.

Ομαδοποιώντας τις αντιδράσεις ώστε  $X_o=X+X_t$  και εφαρμόζοντας τη διτετράγωνη εξίσωση βρίσκουμε τη σχέση των τάσεων  $E$  και της τάσης διανομής  $V_2$ :

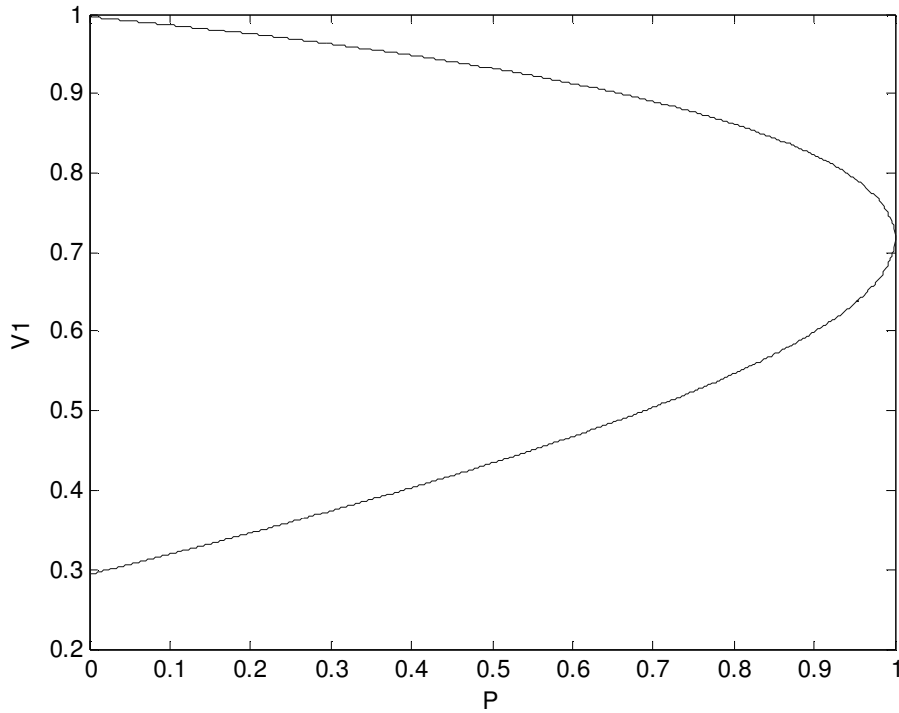
$$V_2^4 - (E^2 - 2aPX_o)V_2^2 + X_o^2(P^2 + (aP)^2) = 0 \quad (3.6)$$

από την επίλυση ως προς  $V_2$  της οποίας προκύπτει η σχέση:

$$V_{2\max P} = \frac{E}{\sqrt{2(1 + \sin \varphi)}} \quad (3.7)$$



Οι λύσεις της εξίσωσης (3.2) για  $E=1$  α.μ φαίνονται στο Σχήμα 3.2 στη μορφή των γνωστών καμπυλών P-V<sub>1</sub> για συντελεστή ισχύος 0.93 επαγωγικό:



Σχήμα 3.2. Θεωρητική καμπύλη P-V<sub>1</sub> για συντελεστή ισχύος 0.93 επαγωγικό χωρίς ρύθμιση τάσης

### 3.2 Διόρθωση συντελεστή ισχύος

Σε αυτή τη παράγραφο οι πυκνωτές που συνδέονται στο ζυγό του φορτίου αντισταθμίζουν το συντελεστή ισχύος ώστε να γίνει ωμικός (δηλαδή  $\cos\phi=1$ ). Η σχέση των τάσεων  $E$  και  $V_1$  δίνεται και πάλι από τη σχέση (3.2) με τη διαφορά ότι η άεργος ισχύς στο ζυγό τάσης  $V_1$  δίνεται από τη σχέση:

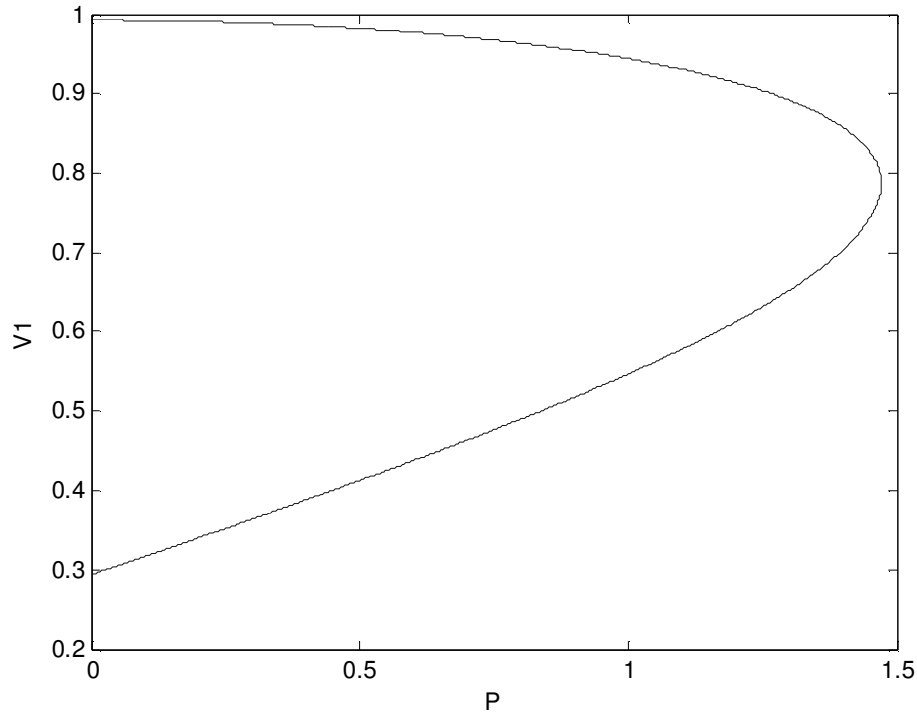
$$Q_1 = aP - B_C V_2^2 + \frac{P^2 + (aP - B_C V_2^2)^2}{V_2^2} X, \quad (3.8)$$

όπου  $B_C$  η χωρητική αγωγιμότητα της συστοιχίας πυκνωτών που συνδέονται ώστε να επιτευχθεί ο ωμικός συντελεστής ισχύος και  $V_2$  η δευτερεύουσα τάση του μετασχηματιστή. Επίσης ισχύουν και οι σχέσεις (3.5) και (3.7) που δίνουν τη μέγιστη ισχύ και τη δευτερεύουσα τάση στη μέγιστη ισχύ.

Η τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας που απαιτείται για να γίνει ο συντελεστής ισχύος ίσος με τη μονάδα, για τη μέγιστη ισχύ δίνεται από τη σχέση:

$$V_{2o}^2 B_C = aP \Leftrightarrow B_C = \frac{aP}{V_{2o}^2} \quad (3.9)$$

Παρακάτω δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη P-V<sub>1</sub> του δικτύου για συντελεστή ισχύος 1:



Σχήμα 3.3 Θεωρητική καμπύλη P-V<sub>1</sub> χωρίς ρύθμιση τάσης για cosφ=1

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.2 και 3.3 παρατηρούμε ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς αλλά και η τιμή της τάσης V<sub>1</sub> στη μέγιστη ισχύ έχουν αυξηθεί. Η παρατήρηση αυτή επαληθεύει τα όσα ειπώθηκαν στη παράγραφο 1.5. Η παρατηρούμενη αύξηση στη μέγιστη ισχύ συμβαίνει διότι η άεργος ισχύς που καταναλώνει το φορτίο παρέχεται πλέον από τις συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών που είναι συνδεδεμένες απευθείας στο ζυγό του φορτίου με αποτέλεσμα η παραγωγή να χρειάζεται να παράσχει λιγότερη άεργο ισχύ και άρα να αυξήσει τη παροχή ενεργού ισχύος.

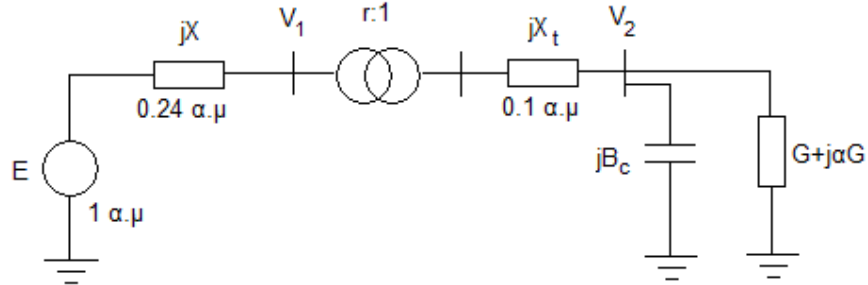
Με αντικατάσταση των κατάλληλων τιμών (E=1 α.μ, V<sub>20</sub>=1 α.μ, X=0.24 α.μ, X<sub>f</sub>=0.1 α.μ, α=tanφ) στις σχέσεις (3.5), (3.7) και (3.9) προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1 Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς χωρίς ρύθμιση τάσης

Σ.Ι	P <sub>max</sub> (α.μ)	B <sub>CmaxP</sub> (α.μ)	V <sub>2maxP</sub> (α.μ)	Γ <sub>maxP</sub> (α.μ)
0.93	1.0	0	0.605	1.0
1.0	1.47	1.16	0.707	1.0

### 3.3 Ρύθμιση τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ: Θεωρητικοί υπολογισμοί

Το δίκτυο που εξετάστηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4 Ακτινικό δίκτυο με Μ/Σ υποβιβασμού με ΣΑΤΥΦ, συσκευή αέργου ρύθμισης και φορτίο

Το ΣΑΤΥΦ ελέγχει τη πλευρά της χαμηλότερης τάσης, στη περίπτωση μας τη  $V_2$ . Σε αυτό το σενάριο ελέγχου η συστοιχία πυκνωτών που είναι συνδεδεμένη στο ζυγό του φορτίου δεν χρησιμοποιείται για έλεγχο τάσης, αλλά για ρύθμιση του συντελεστή ισχύος. Θα εξετάσουμε δύο περιπτώσεις, στη πρώτη ο συντελεστής ισχύος είναι 0.93, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η συστοιχία κρατάει το συντελεστή ισχύος στο 1.

Εφαρμόζοντας τη γνωστή διτετράγωνη εξίσωση (3.2) στην πλευρά της υψηλής τάσης του δικτύου και θεωρώντας ότι το ΣΑΤΥΦ διατηρεί την τάση διανομής σταθερή και ίση με  $V_{2o} = 1$  α.μ, έχουμε:

$$V_1^4 + (2Q_1X - E^2)V_1^2 + X^2(P^2 + Q_1^2) = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{όπου } Q_1 = I^2X_t + aP = \frac{P^2(1+a^2)}{V_{2o}^2}X_t + aP \quad (3.11)$$

Μηδενίζοντας τη διακρίνουσα της εξίσωσης (3.10) και κάνοντας χρήση της εξίσωσης (3.11), έχουμε:

$$E^4 - 4X^2P^2 - 4E^2X\left(\frac{1+a^2}{V_2^o}X_tP^2 + aP\right) = 0 \quad (3.12)$$

από την επίλυση της οποίας βρίσκουμε τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ:

$$P_{\max} = \frac{-aXE^2 + E^2 \sqrt{X\left(X + \frac{1+a^2}{V_{2o}^2}E^2X_t\right) + (aX)^2}}{2X\left(X + \frac{1+a^2}{V_{2o}^2}E^2X_t\right)} \quad (3.13)$$

Λύνοντας τη σχέση (3.10) ως προς  $V_1$  έχουμε:

$$V_1 = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XQE^2} \quad (3.14)$$

Εφαρμόζοντας τώρα την διτετράγωνη στην πλευρά της Μέσης Τάσης του δικτύου για να υπολογίσουμε το  $r_{\max P}$ , βρίσκουμε:

$$\frac{V_1}{r} = \sqrt{\frac{V_{2o}^2}{2} - QX_i} \pm \sqrt{\frac{V_{2o}^2}{4} - X_i^2 P^2 - X_i Q V_{2o}^2} \quad (3.15)$$

Από τις εξισώσεις (3.14) και (3.15) προκύπτει:

$$r = \frac{\sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XQE^2}}{\sqrt{\frac{V_{2o}^2}{2} - QX_i} \pm \sqrt{\frac{V_{2o}^2}{4} - X_i^2 P^2 - X_i Q V_{2o}^2}} \quad (3.16)$$

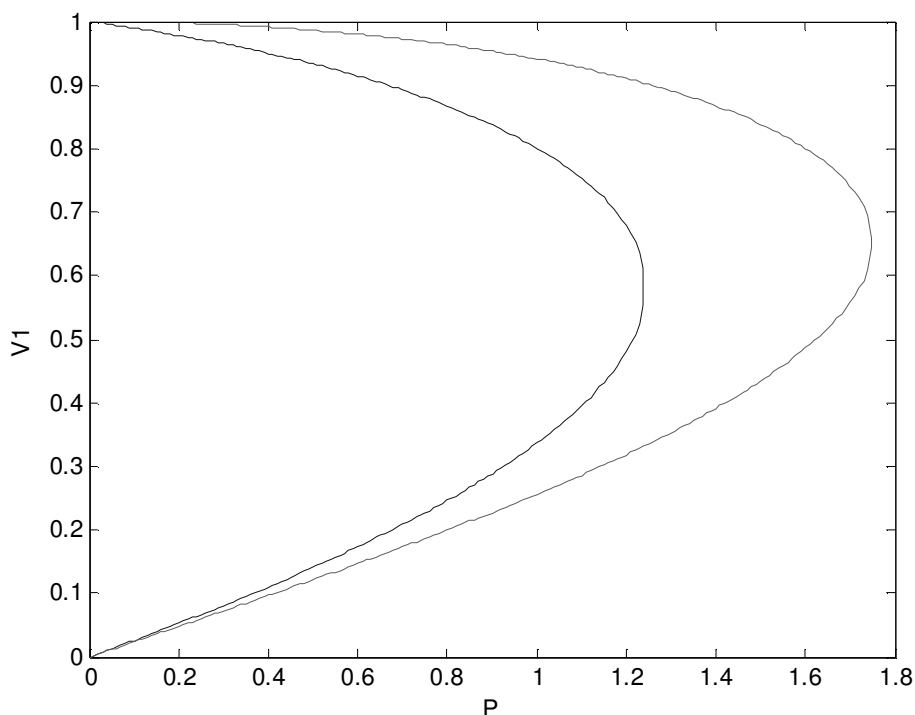
Για συντελεστή ισχύος 0.93, χωρίς δηλαδή να γίνεται αντιστάθμιση συντελεστή ισχύος από τους πυκνωτές, έχουμε  $\alpha = \tan(\arccos 0.93) = 0.3952$ . Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (3.9), (3.11), (3.13) και (3.16) τις τιμές των μεγεθών ( $E=1$  α.μ,  $V_{2o}=1$  α.μ,  $\alpha=0.3952$ ,  $X=0.24$  α.μ,  $X_i=0.1$  α.μ) προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 3.2:

**Πίνακας 3.2** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς με ρύθμιση τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ (όρια  $r$  αγνοούνται)

$\Sigma I$	$P_{\max}$ (α.μ)	$B_{C_{\max P}}$ (α.μ)	$V_{2_{\max P}}$ (α.μ)	$r_{\max P}$ (α.μ)
0.93	1.24	0	1.0	0.64
1.0	1.75	0.69	1.0	0.7

Από τις τιμές του πίνακα 3.2 παρατηρούμε ότι για την επίτευξη της μέγιστης ισχύος ο λόγος μετασχηματισμού πρέπει να πάρει τιμή χαμηλότερη από αυτή που μπορεί στη πράξη. Για το λόγο αυτό μέσω των προσομοιώσεων θα βρεθούν πιο ρεαλιστικές τιμές.

Στο Σχήμα 3.5 δίνονται οι θεωρητικά υπολογισμένες χαρακτηριστικές P-V<sub>1</sub> του δικτύου για συντελεστή ισχύος 0.93 επαγωγικό και 1:



**Σχήμα 3.5** Θεωρητικές χαρακτηριστικές καμπυλές P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και cosφ=0.93 επαγωγικό και cosφ=1

### 3.4 Ρύθμιση τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ: Προσομοίωση

Το δίκτυο που προσομοιώθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3.4. Στις προσομοιώσεις το φορτίο είναι σταθερού  $\Sigma.I=0.93$  επαγωγικό (δηλαδή της μορφής  $Y_L = G - jaG$ , όπου  $a=\tan(\arccos(0.93))=0.3952$ ). Η παράμετρος του συστήματος μας είναι η αγωγιμότητα του φορτίου  $G$ . Στη μελέτη μας αυξάνουμε την αγωγιμότητα κάθε χρονική στιγμή σύμφωνα με μια συνάρτηση ράμπας και υπολογίζουμε τα χαρακτηριστικά μεγέθη του δικτύου (τάση, ισχύ κτλ.) για κάθε τιμή της παραμέτρου. Η συνάρτηση ράμπας της αγωγιμότητας του φορτίου είναι:

$$G(t) = G_o(1+bt) \quad (3.16)$$

όπου  $G_o$  είναι η τιμή του φορτίου τη χρονική στιγμή  $t=0$  και  $b$  ( $b=0.01$ ) η κλίση με την οποία αυξάνεται το φορτίο.

Η αύξηση του φορτίου γίνεται έως ότου ξεπεραστεί το όριο ευστάθειας και η τάση καταρρεύσει.

Το μοντέλο για το ΣΑΤΥΦ που χρησιμοποιήθηκε στη προσομοίωση είναι το διακριτό και ακολουθεί τη λογική των σχέσεων (3.17):

$$\begin{aligned}
r_{k+1} &= r_k + \Delta r & \text{εάν } V_2 > V_{2o} + d \text{ και } r_k < r_{\max} \\
r_{k+1} &= r_k - \Delta r & \text{εάν } V_2 > V_{2o} - d \text{ και } r_k > r_{\min} \\
r_{k+1} &= r_k & \text{διαφορετικά}
\end{aligned}
\tag{3.17}$$

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές για τη περίπτωση που γίνεται και διόρθωση του συντελεστή ισχύος δεν θεωρείται ότι λειτουργούν με συνεχή τρόπο όπως υποθέτουμε στη θεωρητική μελέτη στις παραγράφους 3.1 και 3.2. Η διακριτή λειτουργία τους διέπεται από τις σχέσεις (3.18):

$$\begin{aligned}
B_{Ck+1} &= B_{Ck} + \Delta B_C & \text{αν } Q > \delta \\
B_{Ck+1} &= B_{Ck} - \Delta B_C & \text{αν } Q < 0 \\
B_{Ck+1} &= B_{Ck} & \text{διαφορετικά}
\end{aligned}
\tag{3.18}$$

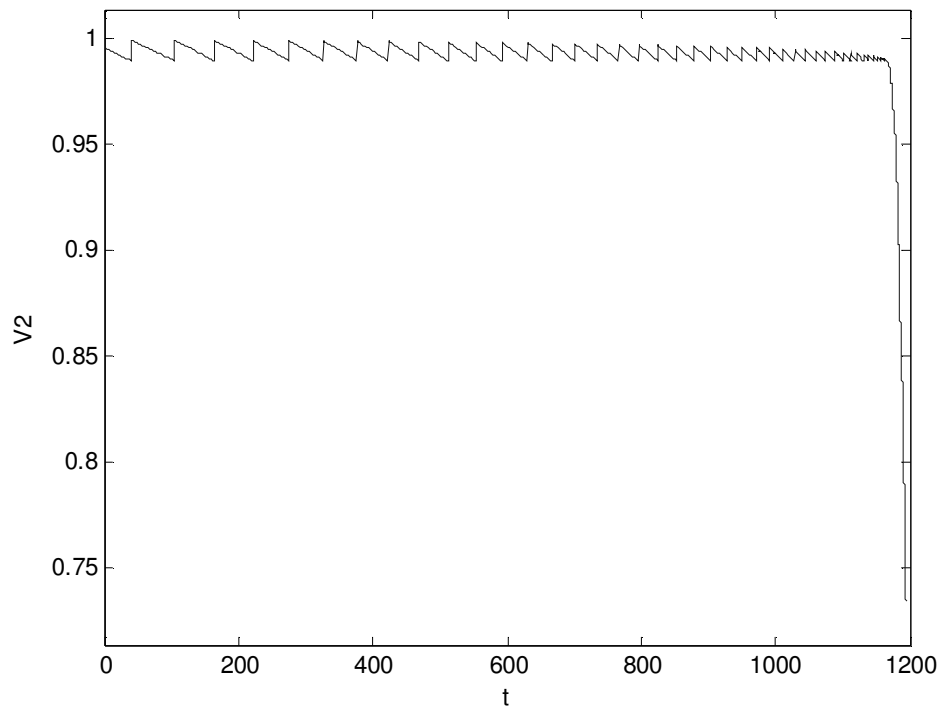
Στις σχέσεις (3.17) και (3.18) το  $k$  αναφέρεται στη χρονική στιγμή του χειρισμού,  $V_{2o}$  είναι η επιθυμητή τιμή της τάσης διανομής, το  $d$  είναι το μισό του εύρους της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ ( $d = 0.01$  α.μ),  $\delta$  είναι το εύρος της νεκρής ζώνης των πυκνωτών ( $\delta = 0.04$  α.μ) και  $Q$  είναι η συνολική άεργος ισχύς στον ζυγό του φορτίου (αυτή που καταναλώνει το φορτίο και αυτή που παρέχουν οι εγκάρσιοι πυκνωτές). Το βήμα μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού είναι  $\Delta r = 0.01$  α.μ. Κάθε βαθμίδα πυκνωτών που συνδέεται έχει τιμή  $\Delta B_C = 0.04$  α.μ. Η χρονική καθυστέρηση των πυκνωτών ισούται με  $T_C = 3$  sec.

Στη προσομοίωση εξετάζονται δύο περιπτώσεις για κάθε συντελεστή ισχύος (0.93 επαγωγικός και 1), στη μια αγνοούνται τα όρια του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ ενώ στην άλλη όχι. Ως ελάχιστο όριο του λόγου μετασχηματισμού ορίστηκε το  $r_{\min} = 0.8$  α.μ, ενώ ως μέγιστο όριο ορίστηκε το  $r_{\max} = 1.2$  α.μ.

### 3.4.1 Ρύθμιση ΣΑΤΥΦ χωρίς διόρθωση συντελεστή ισχύος

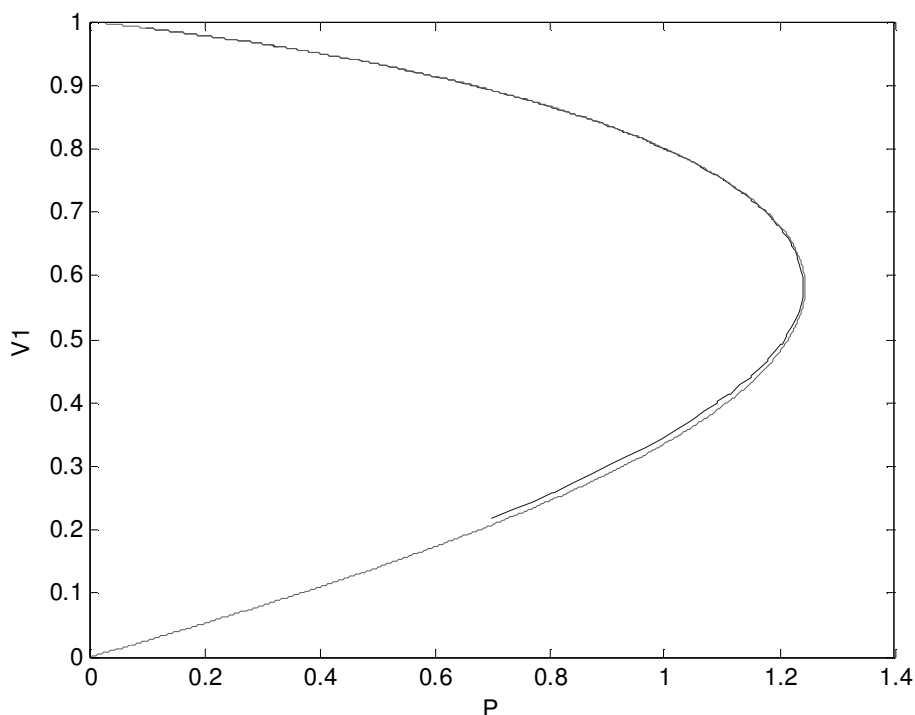
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου το φορτίο αυξάνεται μέχρι να ξεπεραστεί το όριο ευστάθειας και να καταρρεύσει η τάση. Παρακάτω παρουσιάζονται και αναλύονται οι γραφικές παραστάσεις των κυριότερων μεγεθών του δικτύου καθώς μεταβάλλεται το φορτίο.

Η απόκριση της τάσης διανομής  $V_2$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6:



**Σχήμα 3.6** Δευτερεύουσα τάση διανομής με ρύθμιση ΣΑΤΥΦ, χωρίς διόρθωση Σ.Ι (όρια  $r$  αγνοούνται)

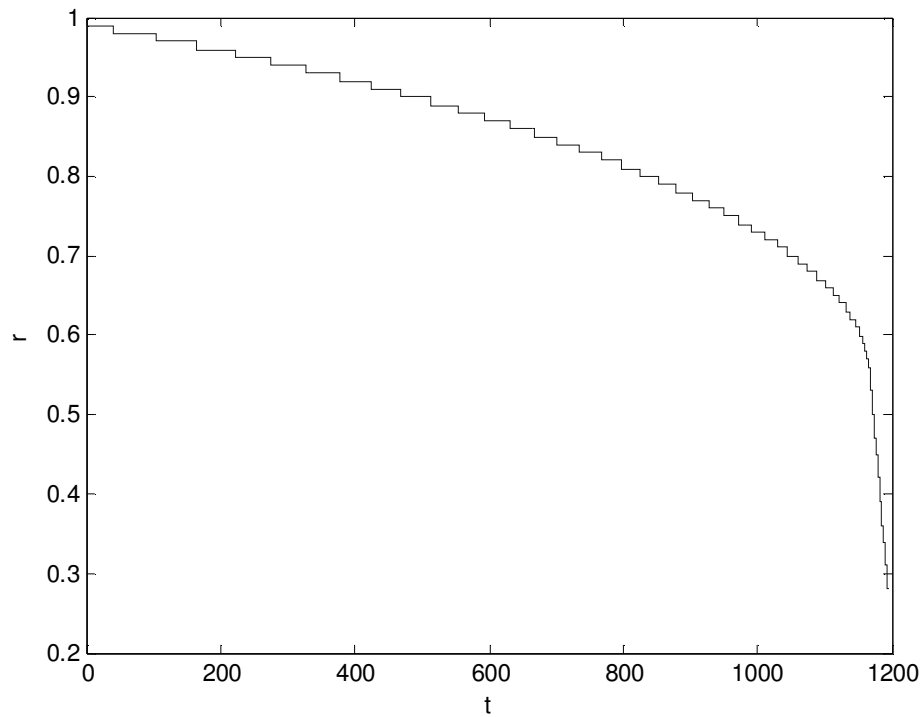
Αφού ξεπεραστεί το όριο ευστάθειας το ΣΑΤΥΦ δε μπορεί να ρυθμίσει τη τάση και η μείωση του λόγου μετασχηματισμού αντί να αυξήσει τη τάση διανομής συντελεί στην κατάρρευσή της.



**Σχήμα 3.7** Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ (όρια r αγνοούνται)

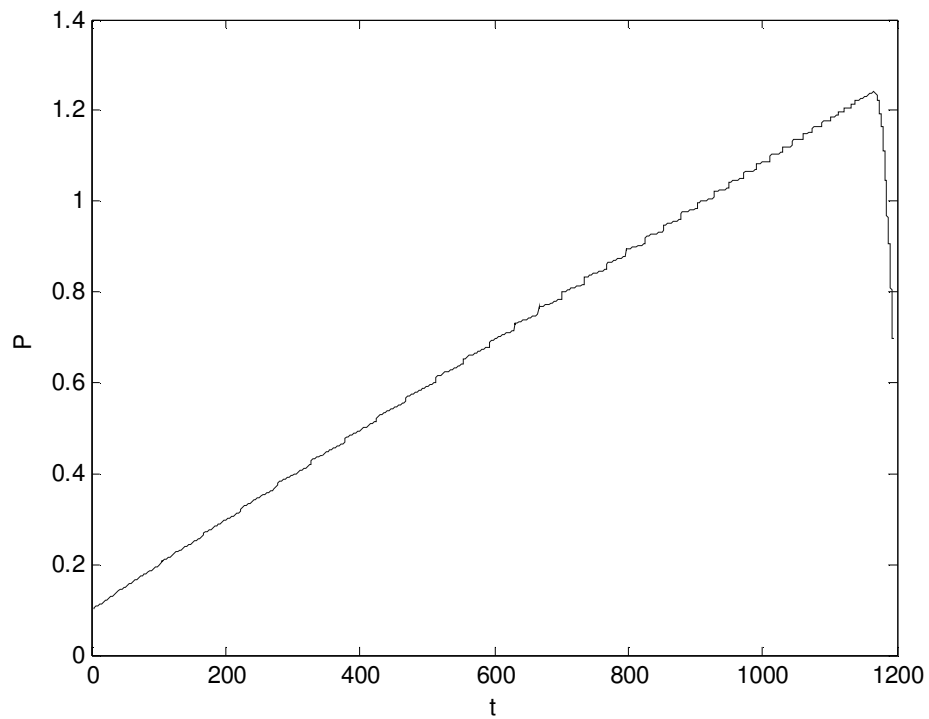
Στο Σχήμα 3.7 παρατηρούμε ότι η καμπύλη P-V<sub>1</sub> της προσομοίωσης δεν ακολουθεί πλήρως την θεωρητική. Πιο συγκεκριμένα κατά τη προσομοίωση η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς που επιτυγχάνεται είναι λίγο μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογισμένη και γενικότερα η καμπύλη PV της προσομοίωσης βρίσκεται πιο μέσα σε σχέση με τη θεωρητική. Αυτό συμβαίνει λόγω της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ, που στη προσομοίωση θεωρήθηκε ίση με  $\pm 0.01$  α.μ. Το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται μόνο όταν το σφάλμα της δευτερεύουσας τάσης ξεπεράσει τα όρια της νεκρής ζώνης. Γι'αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.6, η δευτερεύουσα τάση δεν έχει μονίμως την ιδανική τιμή  $V_{2o}=1$  α.μ όπως έχει υποθεθεί στη θεωρητική ανάλυση, αλλά παρατηρείται μια διακύμανση της μεταξύ των τιμών 0.99 α.μ και 1.0 α.μ. Επιπλέον όσο αυξάνεται το φορτίο και πλησιάζουμε το όριο ευστάθειας, το ΣΑΤΥΦ γίνεται όλο και πιο αναποτελεσματικό στο να κρατήσει την τάση στα επιθυμητά επίπεδα. Έπομένως η ισχύς ( $P=V_2G$ ) στη πλειοψηφία των στιγμών της προσομοίωσης θα είναι μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογισμένη. Η απόκλιση που παρατηρείται μπορεί να μειωθεί αν θεωρήσουμε ότι  $V_{2o}=0.99$  α.μ ( $V_{2o} - d$ ).





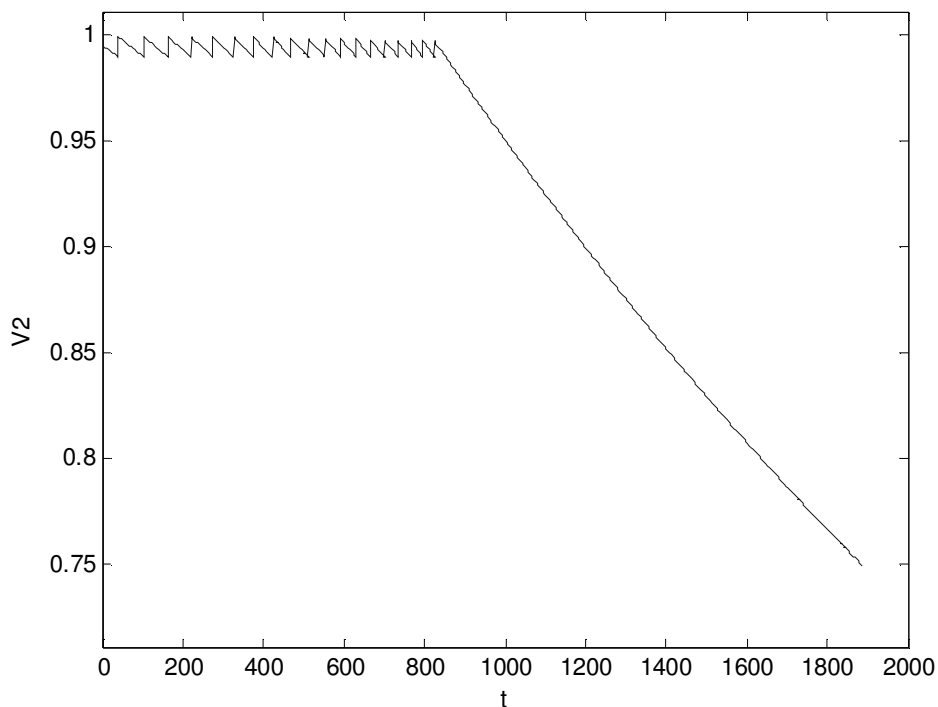
**Σχήμα 3.8** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ (όρια  $r$  αγνοούνται)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω καθώς πλησιάζουμε το όριο ευστάθειας το ΣΑΤΥΦ γίνεται όλο και πιο αναποτελεσματικό στο να ρυθμίσει την τάση, έτσι όσο μεγαλύτερο το φορτίο τόσο πιο πολλές αλλαγές στη λήψη κάνει το ΣΑΤΥΦ. Καθώς η δευτερεύουσα τάση καταρρέει και τείνει στο μηδέν, το ίδιο και ο λόγος μετασχηματισμού τείνει και αυτός στο μηδέν (Σχήμα 3.8).



**Σχήμα 3.9** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ (όρια  $\gamma$  αγνοούνται)

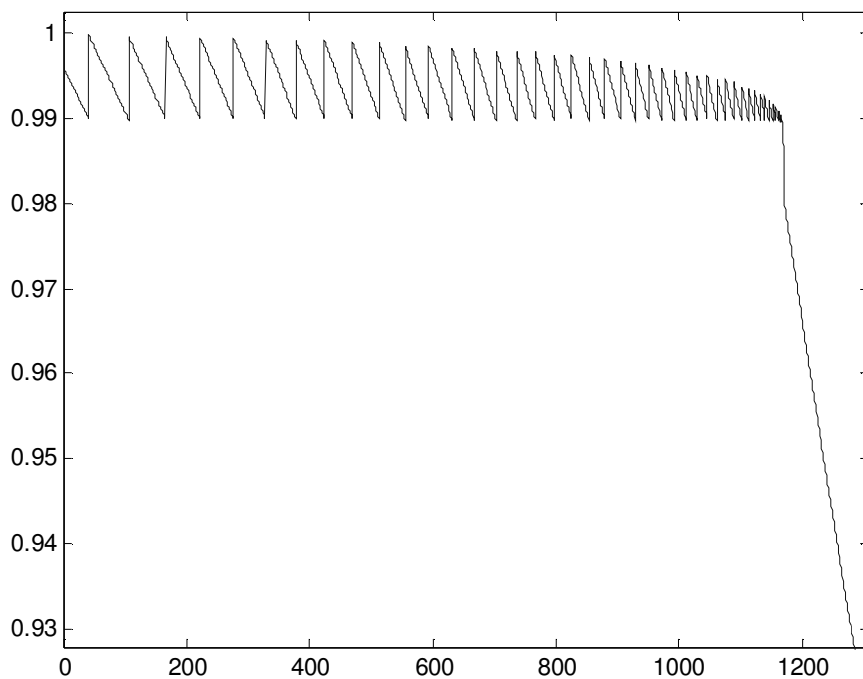
Τα αποτελέσματα που εξετάζονται παρακάτω (Σχήματα 3.10-3.15) είναι ίδια με πριν, μόνο που επιβάλλουμε όρια στη μεταβολή του λόγου μετασηματισμού. Ως κάτω όριο λαμβάνεται το  $\gamma_{\min}=0.8$  α.μ και ως μέγιστο όριο το  $\gamma_{\max}=1.2$  α.μ.



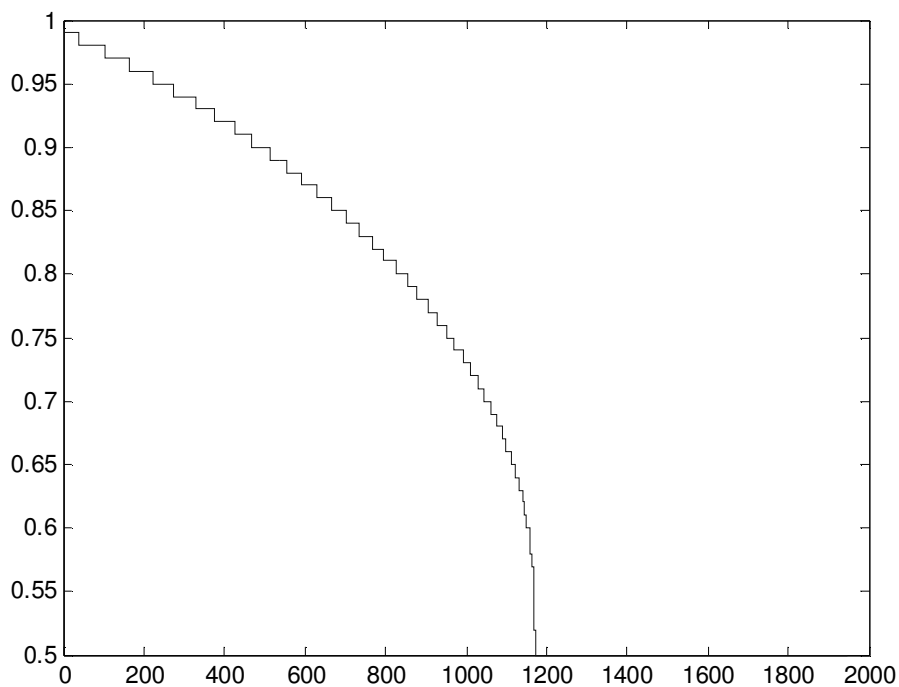
**Σχήμα 3.10** Δευτερεύουσα τάση διανομής με ρύθμιση ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)

Από το Σχήμα 3.10 παρατηρούμε ότι η δευτερεύουσα τάση (τάση διανομής) καταρρέει πολύ νωρίτερα από την προηγούμενη περίπτωση που δεν επιβάλλαμε όρια στο λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ. Αυτό φυσικά συμβαίνει επειδή το όριο που επιβλήθηκε είναι μεγαλύτερο από τη θεωρητικά υπολογισμένη τιμή του λόγου μετασχηματισμού στη μέγιστη ισχύ ( $r_{\max P}=0.64$  α.μ), έτσι το ΣΑΤΥΦ παύει να ρυθμίζει την τάση πολύ νωρίτερα από τη μέγιστη ισχύ με αποτέλεσμα την ταχύτερη κατάρρευση. Για τον ίδιο λόγο, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς που επιτυγχάνεται (Σχήμα 3.15) είναι μικρότερη απ'ότι αν το ΣΑΤΥΦ δεν είχε όρια, ωστόσο και πάλι είναι μεγαλύτερη απ'ότι αν δεν ρυθμιζόνταν καθόλου η τάση ( $P_{\max}=1$  α.μ).

Για λόγους πληρότητας παραθέτουμε στο Σχήμα 3.11 το διάγραμμα της δευτερεύουσας τάσης συναρτήσει του χρόνου στη περίπτωση που το κάτω όριο του λόγου μετασχηματισμού είναι  $r_{\min}=0.5 < r_{\max P}$ .



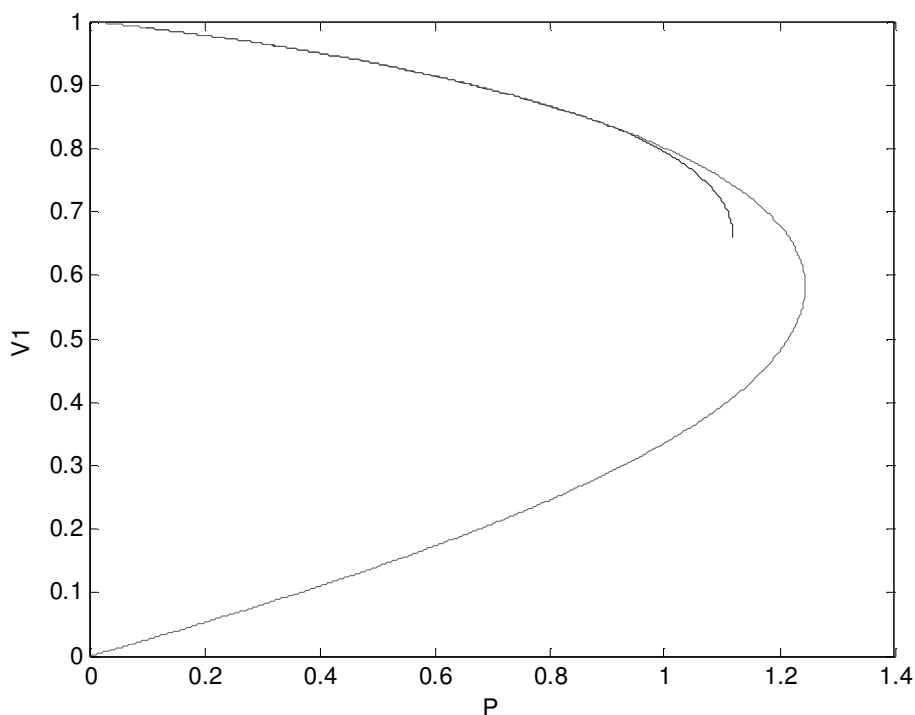
**Σχήμα 3.11** Δευτερεύουσα τάση διανομής με ρύθμιση ΣΑΤΥΦ για  $r_{\min}=0.5 < r_{\max P}$



**Σχήμα 3.12** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ για  $r_{\min}=0.5 < r_{\max P}$

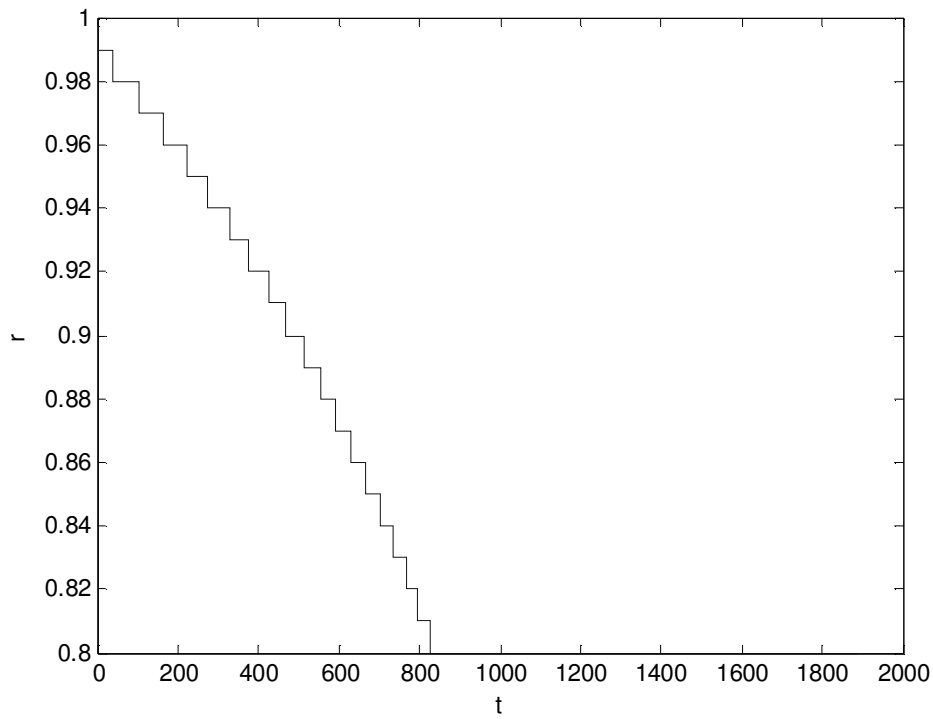
Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.6 και 3.11 παρατηρούμε ότι η τάση καταρρέει την ίδια χρονική στιγμή που θα κατέρρεε αν ο λόγος μετασχηματισμού δεν είχε όρια, κάτι το οποίο αναμέναμε αφού  $r_{\min}=0.5 < r_{\max}$ . Τη χρονική περίοδο από την αρχή της κατάρρευσης μέχρι λίγο πριν τη χρονική στιγμή  $t=1200$  sec, όπου το ΣΑΤΥΦ φτάνει το όριο του σύμφωνα με το Σχήμα 3.12, η κλίση με την οποία πέφτει η τάση είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει επειδή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μετά το όριο ευστάθειας οποιαδήποτε μείωση του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ συνεισφέρει στην κατάρρευση της τάσης. Αφού το ΣΑΤΥΦ φτάσει στο όριο ρύθμισης η κλίση γίνεται μικρότερη, αφού η μόνη πλέον αιτία για την κατάρρευση της τάσης είναι η αύξηση του φορτίου.

Παρακάτω συνεχίζουμε με τις γραφικές παραστάσεις για  $0.8 < r < 1.2$  (Σχήματα 3.13-3.15):

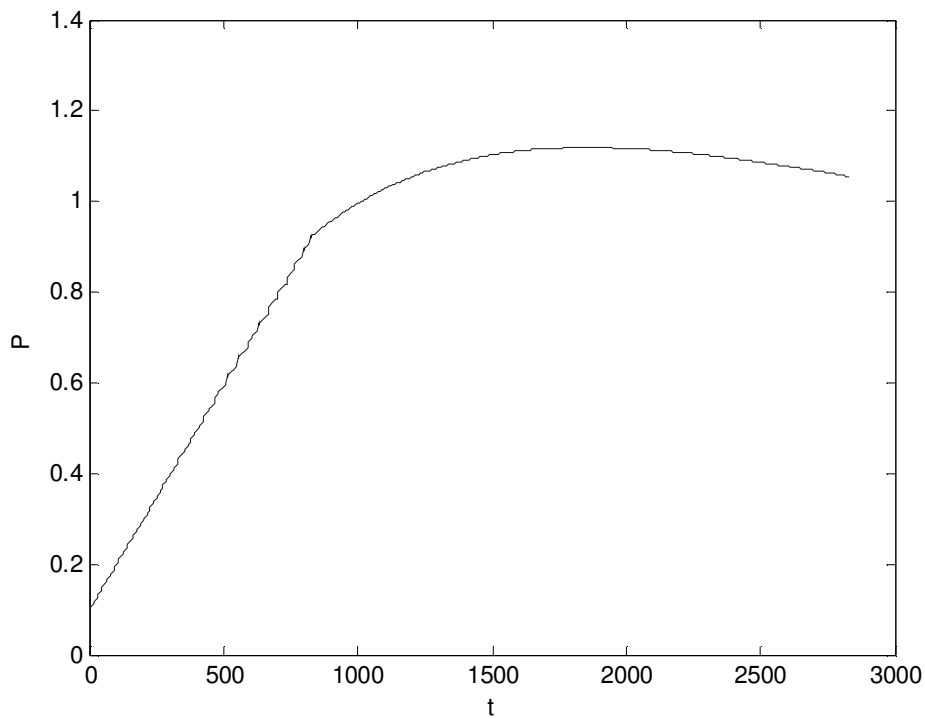


**Σχήμα 3.13** Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μέγιστη ισχύς που επιτυγχάνεται είναι αρκετά μικρότερη της θεωρητικά υπολογισμένης, αφού το κάτω όριο του ΣΑΤΥΦ είναι αρκετά μεγαλύτερο από το  $r_{\max}$ .



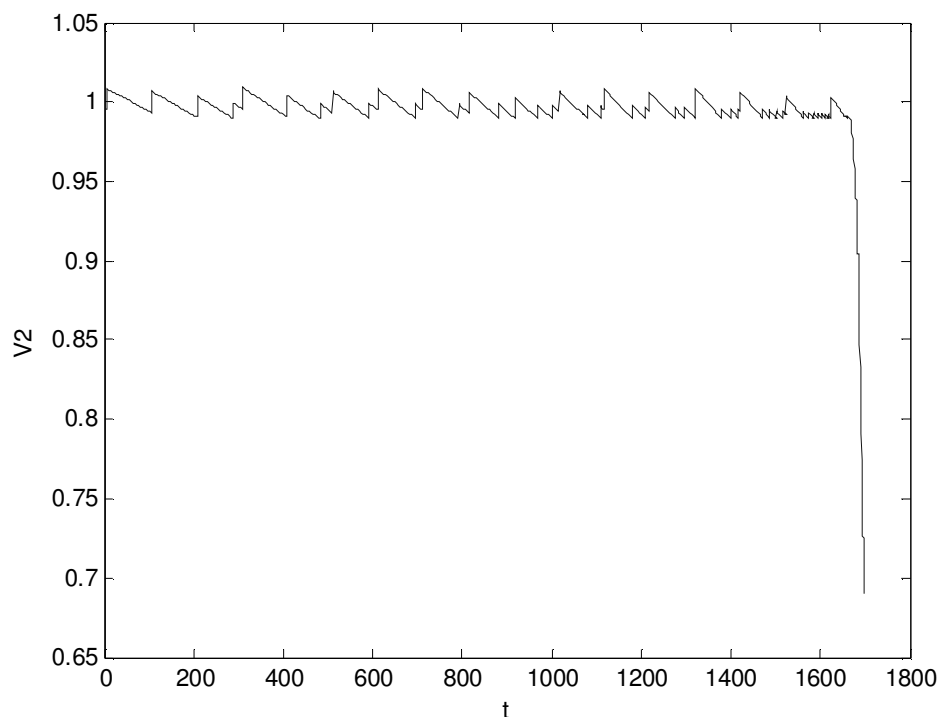
**Σχήμα 3.14** Λόγως μεταβολής μετασχηματιστή για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



**Σχήμα 3.15** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)

### 3.4.2 Ρύθμιση ΣΑΤΥΦ με διόρθωση συντελεστή ισχύος

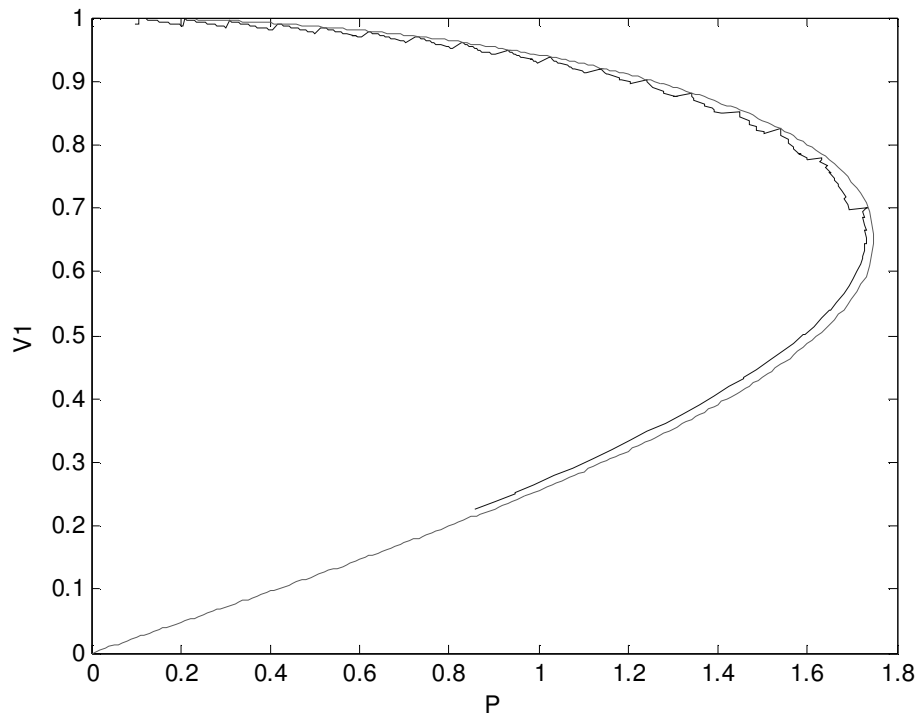
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με το ΣΑΤΥΦ να ρυθμίζει τη τάση διανομής και τις συστοιχίες των πυκνωτών να αντισταθμίζουν το συντελεστή ισχύος σύμφωνα με τη σχέση (3.18).



**Σχήμα 3.16** Δευτερεύουσα τάση διανομής με ρύθμιση ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια  $r$  αγνοούνται)

Στο Σχήμα 3.16 εμφανίζεται η τάση διανομής για ρύθμιση με ΣΑΤΥΦ και διόρθωση του συντελεστή ισχύος.

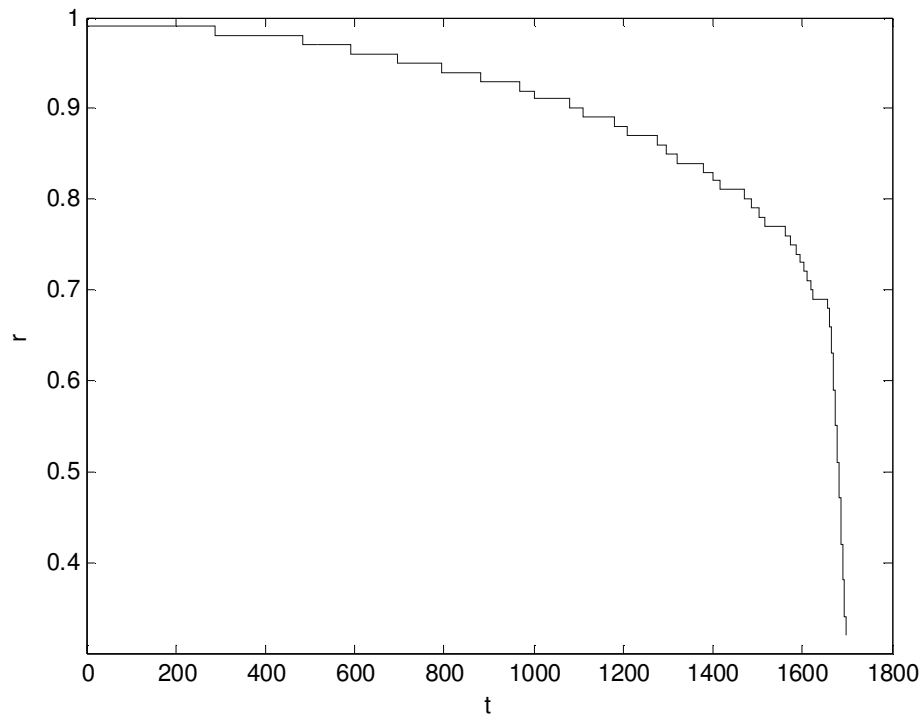
Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.6 και 3.16 παρατηρούμε ότι η κατάρρευση της τάσης πραγματοποιείται αργότερα σε σχέση με την περίπτωση που δεν έχουμε διόρθωση συντελεστή. Αυτό συμβαίνει επειδή όποτε εισάγεται μια βαθμίδα πυκνωτών για να κρατήσει το συντελεστή ισχύος στην επιθυμητή τιμή, παρατηρείται μια αύξηση της τάσης στον ζυγό του φορτίου. Αυτή η αύξηση της τάσης βοηθάει έμμεσα τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ που προσπαθεί να διατηρήσει τη τάση εντός της νεκρής ζώνης καθώς αυξάνεται η ζήτηση του φορτίου.



**Σχήμα 3.17** Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια r αγνοούνται)

Στο Σχήμα 3.17 εμφανίζονται η θεωρητική και η προσομοιωμένη καμπύλη P-V<sub>1</sub>. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17 η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν για συντελεστή ισχύος ίσο με 0.93. Λόγω της ρύθμισης του συντελεστή ισχύος η μόνη άεργος ισχύς που πρέπει να παράσχει το δίκτυο είναι οι άεργες απώλειες στην αντίδραση των γραμμών και στην αντίδραση σκεδάσεως του μετασχηματιστή. Έτσι λόγω της μικρότερης απαιτούμενης αέργου ισχύος η μέγιστη ενεργός ισχύς αυξάνεται.

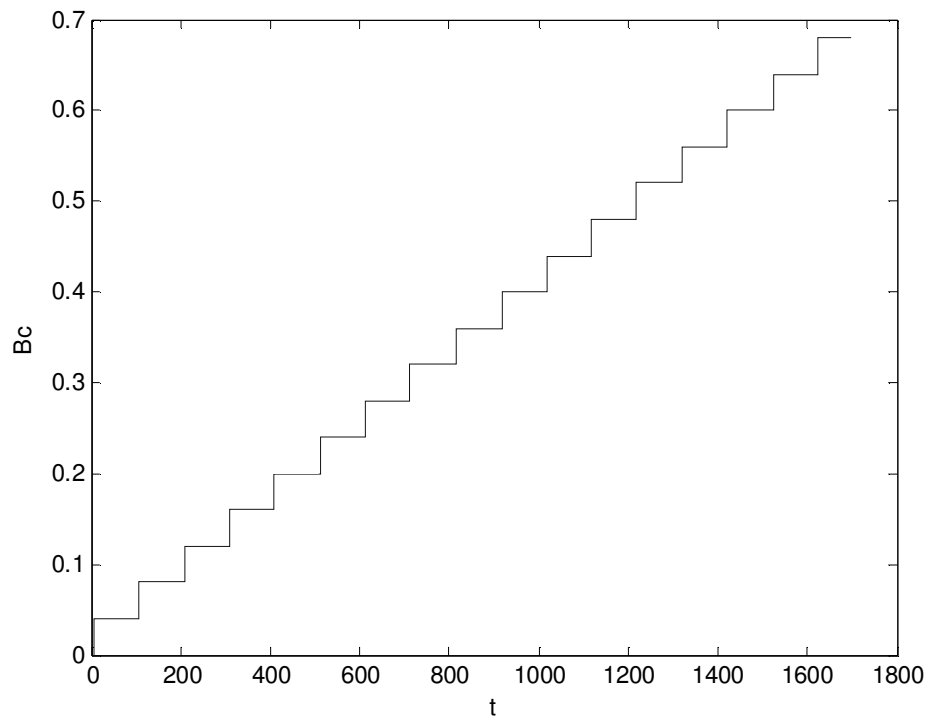




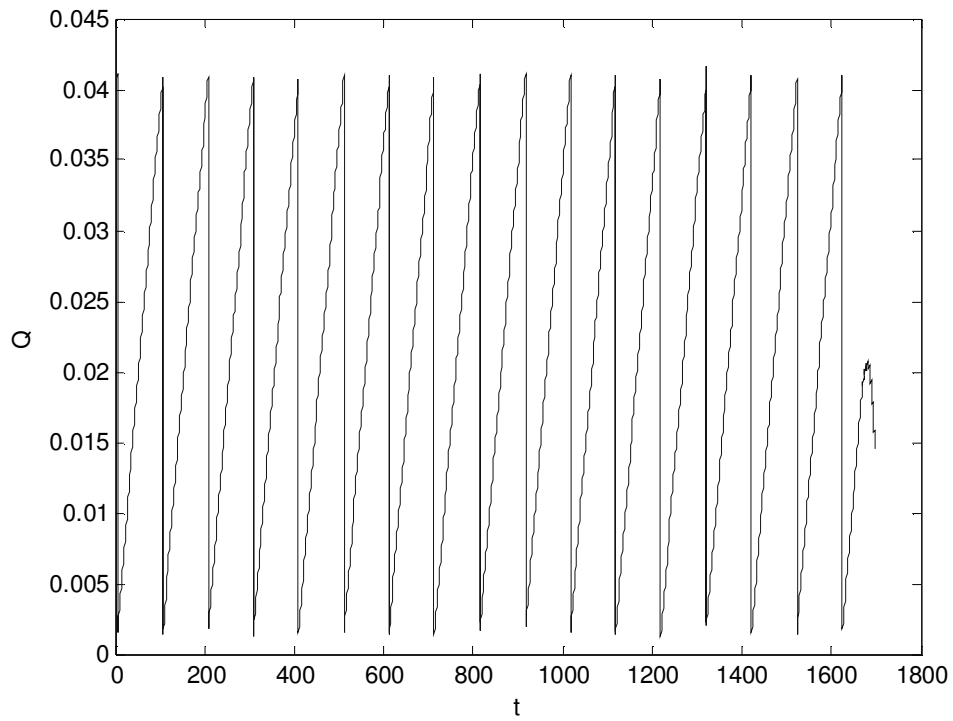
**Σχήμα 3.18** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια  $r$  αγνοούνται)

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.8 και 3.18 παρατηρούμε ότι ο αριθμός των αλλαγών λήψεων του ΣΑΤΥΦ είναι μικρότερος σε σχέση με αυτόν στην περίπτωση που δεν έχουμε αντιστάθμιση του συντελεστή ισχύος. Αυτό συμβαίνει επειδή οι συστοιχίες των πυκνωτών βοηθούν τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Στα Σχήματα 3.19 και 3.20 εμφανίζονται η χωρητική αγωγιμότητα της συστοιχίας πυκνωτών και η άεργος ισχύς του ζυγού διανομής αντίστοιχα.



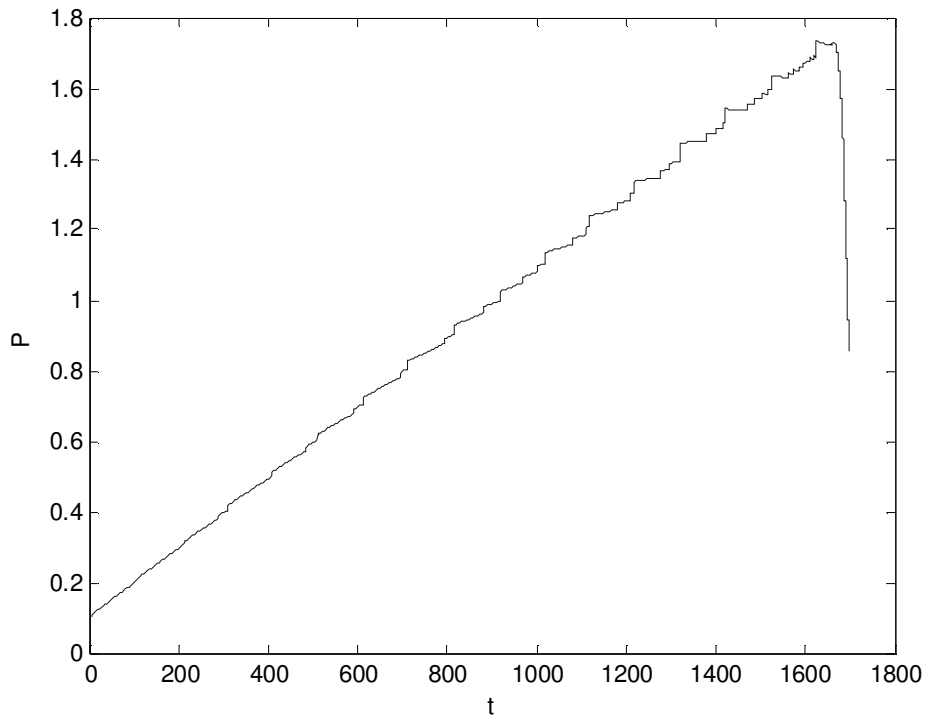
**Σχήμα 3.19** Χωρητική αγωγιμότητα πυκνωτών για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια  $r$  αγνοούνται)



**Σχήμα 3.20** Άεργος ισχύς του ζυγού διανομής για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια  $r$  αγνοούνται)

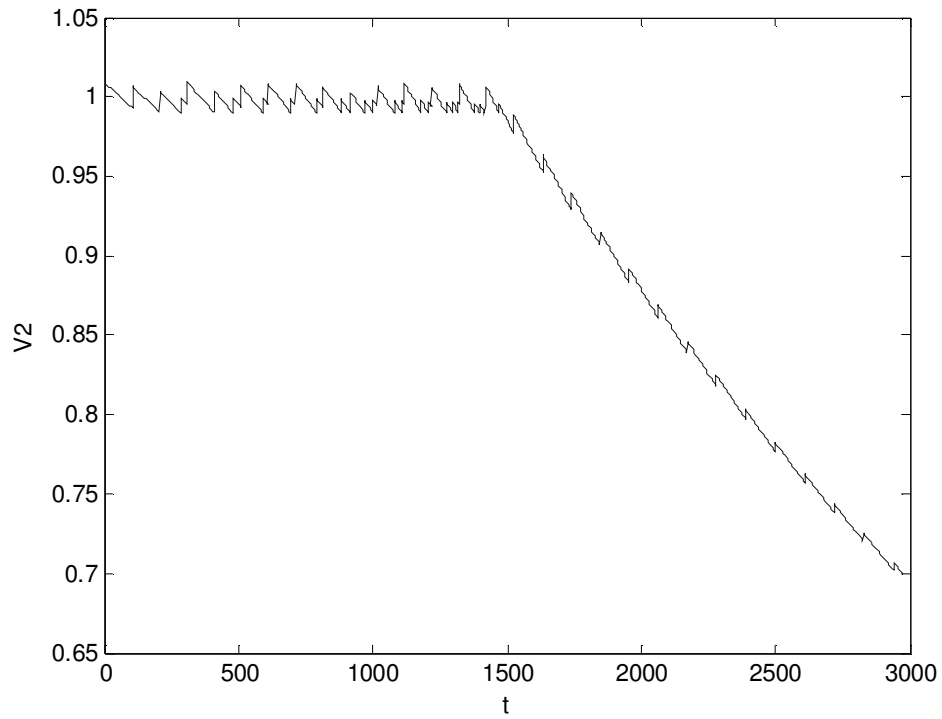
Κάθε βαθμίδα πυκνωτών που συνδέεται έχει χωρητική αγωγιμότητα 0.04 α.μ (Σχήμα 3.19) γι'αυτό η νεκρή ζώνη της αέργου ισχύος του ζυγού κυμαίνεται στη περιοχή τιμών 0-0.04 α.μ. Από το Σχήμα 3.20 φαίνεται ότι μετά τη χρονική στιγμή  $t=1600$  sec η αέργου ισχύς αρχίζει να αυξάνει πάλι πάνω από το μηδέν, ωστόσο πριν προλάβει να ξεπεράσει το όριο της νεκρής ζώνης και να συνδεθεί η επόμενη βαθμίδα πυκνωτών, η τάση καταρρέει, λόγω της αστάθειας του ΣΑΤΥΦ, με αποτέλεσμα να αρχίσει να μειώνεται και η αέργου ισχύς του ζυγού.

Απο το ίδιο σχήμα διαπιστώνουμε και κάτι ακόμη. Επειδή έχουμε υποθέσει ότι οι πυκνωτές έχουν χρονική καθυστέρηση ( $T_C=3$  sec) και μεγάλη νεκρή ζώνη (0.04 α.μ) η επόμενη βαθμίδα πυκνωτών δεν συνδέεται αμέσως μόλις ξεπεραστούν τα όρια της νεκρής ζώνης, αλλά λίγα δευτερόλεπτα αργότερα.

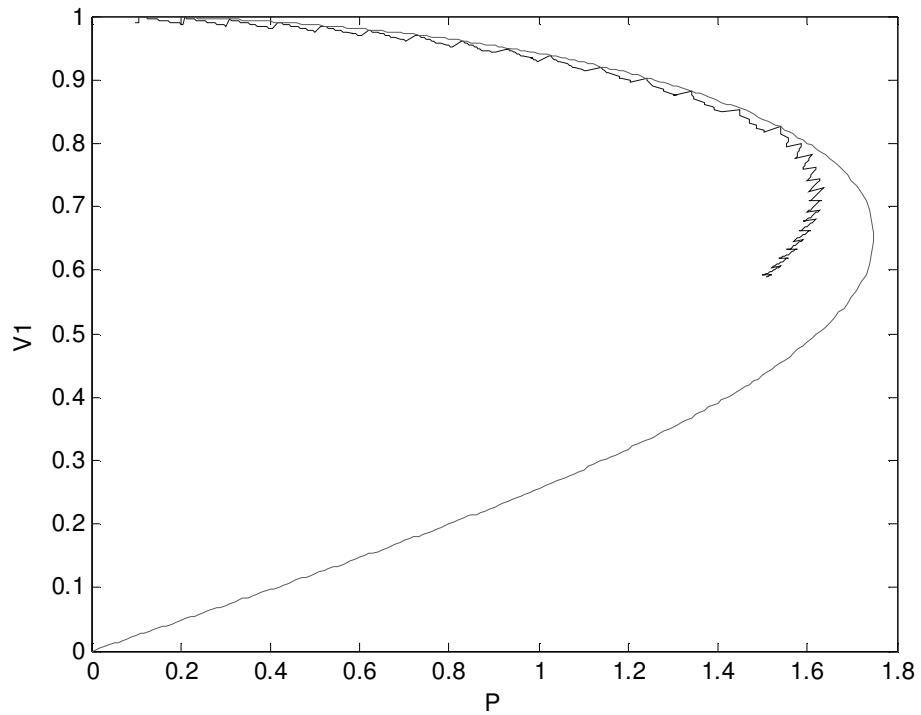


**Σχήμα 3.21** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  (όρια  $r$  αγνοούνται)

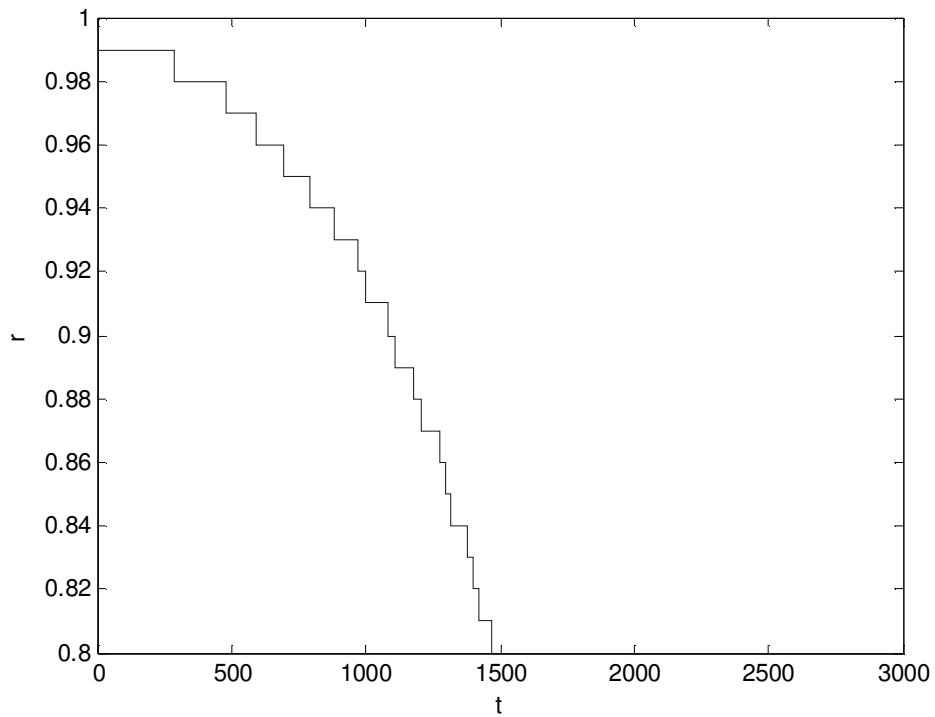
Στα Σχήματα 3.21-3.27 δίνονται οι ίδιες γραφικές με πριν αλλά για επιβολή ορίων στο λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ):



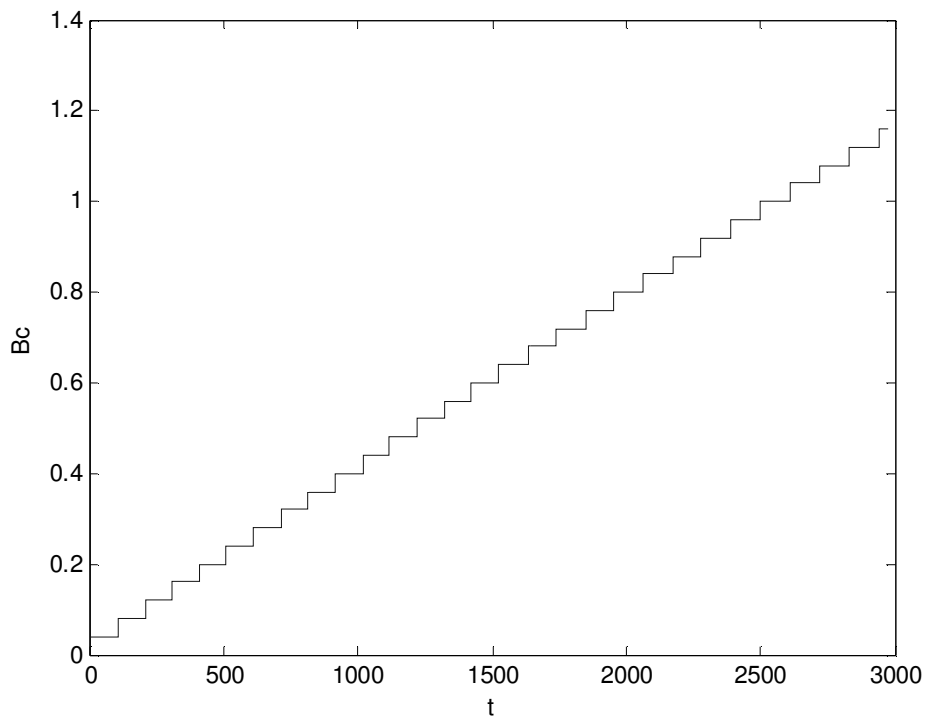
Σχήμα 3.22 Δευτερεύουσα τάση διανομής με ρύθμιση ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



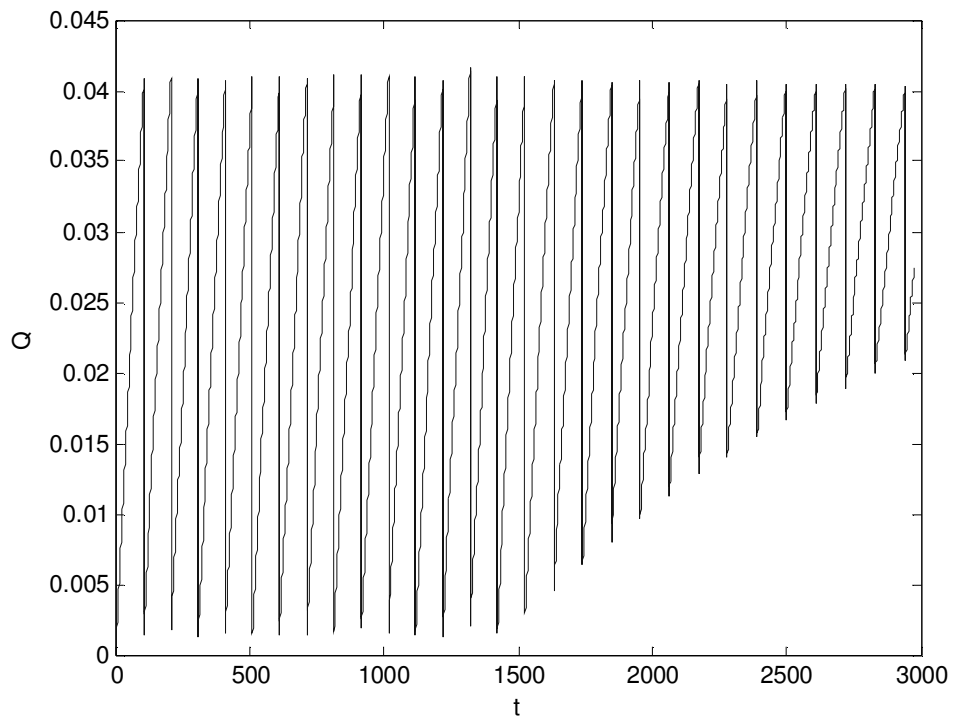
Σχήμα 3.23 Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



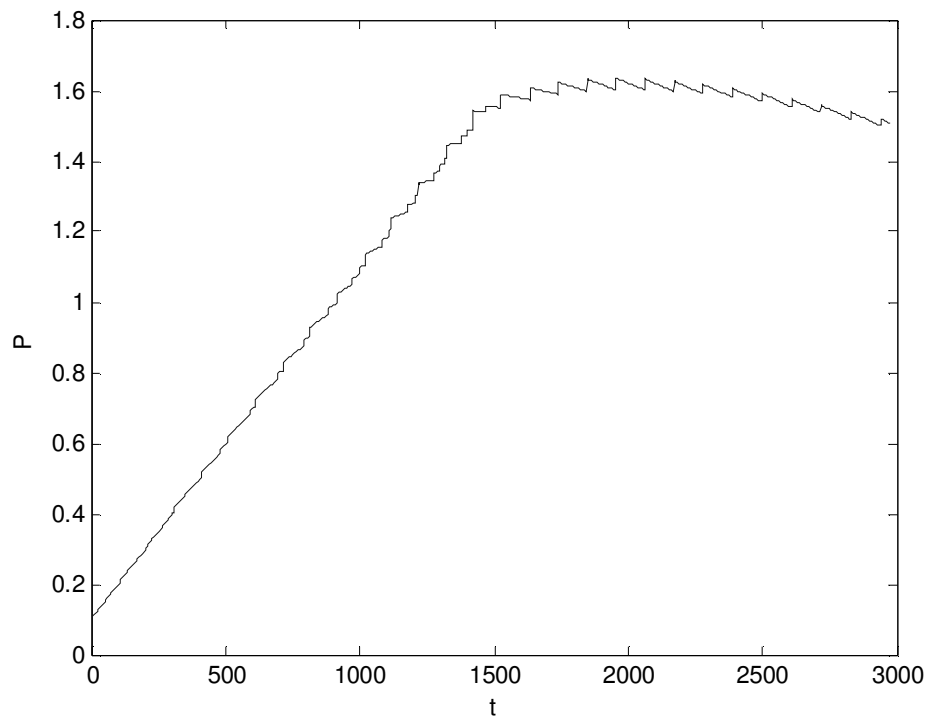
**Σχήμα 3.24** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



**Σχήμα 3.25** Χωρητική αγωγιμότητα πυκνωτών για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



**Σχήμα 3.26** Άεργος ισχύς ζυγού διανομής για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)



**Σχήμα 3.27** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με ΣΑΤΥΦ και  $\cos\phi=1$  ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)

Παρατηρώντας το Σχήμα 3.26 διαπιστώνουμε ότι καθώς η τάση καταρρέει οι εγκάρσιοι πυκνωτές γίνονται λιγότερο αποτελεσματικοί στο να αντισταθμίσουν την άεργο ισχύ. Αυτό συμβαίνει διότι στην ασταθή περιοχή λειτουργίας, μετά την κατάρρευση, η τάση είναι μικρότερη απ'ότι υπό κανονικές συνθήκες, άρα το ρεύμα είναι μεγαλύτερο με αποτέλεσμα οι άεργες απώλειες στη αντίδραση της γραμμής και στην αντίδραση σκεδάσεως του Μ/Σ να είναι αυξημένες και έτσι κάθε βαθμίδα πυκνωτών που συνδέεται δεν επαρκεί για να αντισταθμίσει το ίδιο ικανοποιητικά με πριν, αυτές τις απώλειες.

Από τις προσομοιώσεις των παραγράφων 3.4.1 και 3.4.2 προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 3.3 λαμβάνοντας υπόψη τα όρια του λόγου μετασχηματισμού:

**Πίνακας 3.3** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς με ρύθμιση τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ ( $r_{\min}=0.8$  α.μ,  $r_{\max}=1.2$  α.μ)

<b>Σ.Ι</b>	<b>P<sub>max</sub> (α.μ)</b>	<b>B<sub>CmaxP</sub> (α.μ)</b>	<b>V<sub>2maxP</sub> (α.μ)</b>	<b>Γ<sub>maxP</sub> (α.μ)</b>
0.93	1.12	0	1.0	0.8
1.0	1.67	0.66	1.0	0.8

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 3.2 με αυτές του πίνακα 3.3 διαπιστώνουμε ότι η μέγιστη ισχύς είναι ελαφρώς μικρότερη όταν λαμβάνουμε υπόψη τα όρια του λόγου μετασχηματισμού.





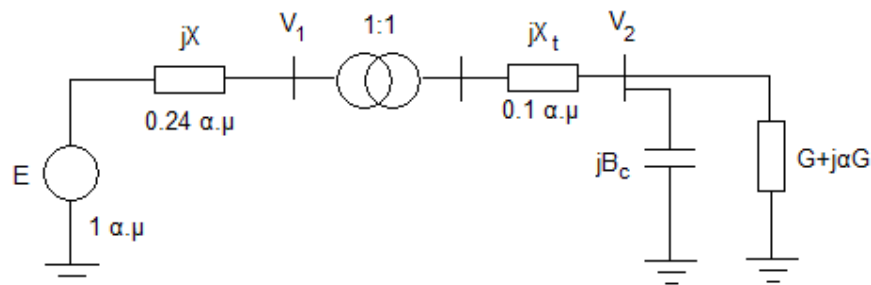
## 4. ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΠΥΚΝΩΤΩΝ / SVC / STATCOM

Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η περίπτωση ελέγχου της δευτερεύουσας τάσης ή τάσης διανομής με τη χρήση αποκλειστικά και μόνο εγκάρσιων πυκνωτών ή συσκευών FACTS (SVC, STATCOM). Το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή είναι απενεργοποιημένο (δηλαδή ο λόγος μετασχηματισμού έχει μονίμως τη τιμή  $r=1$  α.μ).

### 4.1 Ρύθμιση τάσης διανομής με SVC / STATCOM

Το SVC και το STATCOM είναι εγκάρσιοι μηχανισμοί αντιστάθμισης. Στη παρούσα μελέτη το SVC και το STATCOM προσομοιώνονται με απλά μοντέλα, που προκύπτουν από τις χαρακτηριστικές V-Q. Συγκεκριμένα το SVC αντιπροσωπεύεται με μεταβλητή χωρητική αγωγιμότητα λαμβάνοντας υπόψιν τα δύο κύρια χαρακτηριστικά του SVC: το μικρό χρόνο απόκρισης και τη συνεχή χαρακτηριστική λειτουργίας V-Q που αναλύθηκε παραπάνω. Το STATCOM μοντελοποιείται ως μια μεταβλητή πηγή ρεύματος λαμβάνοντας και πάλι υπόψιν το μικρό χρόνο απόκρισης και τη χαρακτηριστική λειτουργίας V-Q.

Το δίκτυο που προσομοιώνεται φαίνεται στο Σχήμα 4.1:



**Σχήμα 4.1** Ακτινικό δίκτυο με Μ/Σ υποβιβασμού, συσκευή αέργου ρύθμισης και φορτίο

Στη περίπτωση που χρησιμοποιείται STATCOM για τον έλεγχο της τάσης οι εγκάρσιοι πυκνωτές που συνδέονται στο ζύγο τάσης  $V_2$  αντικαθίστανται με μια μεταβλητή πηγή ρεύματος. Το ΣΑΤΥΦ σε αυτή τη περίπτωση ελέγχου είναι απενεργοποιημένο ( $r=1$  α.μ).

#### 4.1.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί για SVC

Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα συστήματα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων γενικά είναι της μορφής:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, y, p) \\ 0 &= g(x, y, p)\end{aligned}\quad (4.1)$$

όπου  $x$  το διάνυσμα των μεταβλητών κατάστασης,  $y$  το διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών και  $p$  το διάνυσμα των παραμέτρων του συστήματος.

Το δίκτυο στη συγκεκριμένη περίπτωση, χαρακτηρίζεται από το παρακάτω σύστημα αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων:

$$\dot{B}_C = K(V_{2o} - V_2) - B_C V_2^2 \quad (4.2)$$

$$V_2^2 - \frac{E^2}{(1 - X_o(B_C - aG))^2 + X_o^2 G^2} = 0 \quad (4.3)$$

όπου  $K$  η κλίση της χαρακτηριστικής V-Q του SVC (στην εργασία αυτή θεωρείται ίση με  $K=100$ ),  $B_C$  είναι η χωρητική αγωγιμότητα του SVC,  $V_{2o}$  η τιμή αναφοράς της ρυθμιζόμενης τάσης,  $V_2$  η πραγματική τιμή της ρυθμιζόμενης τάσης για κάθε τιμή του φορτίου,  $X_o$  το άθροισμα της αντίδρασης της γραμμής και της αντίδρασης σκεδάσεως του μετασχηματιστή, και  $G$  η αγωγιμότητα του φορτίου.

Η εξίσωση (4.2) είναι η διαφορική εξίσωση που διέπει τη λειτουργία του SVC, ενώ η εξίσωση (4.3) προκύπτει από την εφαρμογή των νόμων του Kirchhoff στο δίκτυο και δίνει τη δευτερεύουσα τάση στον υποσταθμό διανομής.

Η μεταβλητή κατάστασης του συστήματος είναι η  $B_C$ , η αλγεβρική μεταβλητή είναι η  $V_2$  και παράμετρος η  $G$ .

Στο σημείο ισορροπίας ισχύει:

$$K(V_{2o} - V_2) - B_C V_2^2 = 0 \quad (4.4)$$

$$V_2^2 - \frac{E^2}{(1 - X_o(B_C - aG))^2 + X_o^2 G^2} = 0 \quad (4.5)$$

Η ιακωβιανή του παραπάνω συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$J = \begin{pmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

όπου:

$$f_x = -V_2^2 \quad (4.7)$$

$$f_y = -K - 2B_C V_2 \quad (4.8)$$

$$g_x = V_2^2 (2X_o^2 B_C - 2aX_o^2 G - 2X_o) \quad (4.9)$$

$$g_y = 2V_2 (1 + X_o^2 (B_C^2 + a^2 G^2 - 2aGB_C) - 2X_o (B_C - aG)) + 2V_2 G^2 X_o^2 \quad (4.10)$$

Από τις εξισώσεις (4.4) - (4.10) προκύπτει ότι:

$$\det J = 2V_2^3(-X_o^2G^2(1+a^2) - 2aX_o - 1 + B_C^2X_o^2) + 2V_2^2(-X_o^2aKG + X_o^2KB_C - KX_o) \quad (4.11)$$

Ο μηδενισμός της ορίζουσας (4.11) δίνει τη τιμή της παραμέτρου  $G$  όπου το σύστημα παρουσιάζει σαγματικό κόμβο και άρα έχουμε συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Δηλαδή:

$$2V_2^3(-X_o^2G^2(1+a^2) - 2aX_o - 1 + B_C^2X_o^2) + 2V_2^2(-X_o^2aKG + X_o^2KB_C - KX_o) = 0 \quad (4.12)$$

Από την επίλυση του συστήματος εξισώσεων (4.4), (4.5) και (4.12) και λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση  $P = V_2^2G$  προκύπτουν οι τιμές των μεγεθών του πίνακα 4.1:

**Πίνακας 4.1** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο τάσης μέσω SVC

<b>Σ.Ι</b>	<b>P<sub>max</sub> (α.μ)</b>	<b>B<sub>CmaxP</sub> (α.μ)</b>	<b>V<sub>2maxP</sub> (α.μ)</b>	<b>r<sub>maxP</sub> (α.μ)</b>
0.93	2.83	4.15	0.961	1

Η μέγιστη ισχύς μπορεί να υπολογιστεί και διαφορετικά. Όταν η δευτερεύουσα τάση διανομής  $V_2$  κρατείται σταθερή στη τιμή  $V_o$  τότε η μέγιστη ισχύς δίνεται από το όριο στατικής ευστάθειας για τη γωνία  $\delta$  μεταξύ των δύο σταθερών τάσεων:

$$P_{\max} = \frac{EV_o}{X + X_t} \quad (4.13)$$

Αν αντικαταστήσουμε την  $V_o$  στη σχέση (4.13) με τη τιμή  $V_{2\max P}$  του πίνακα 4.1 τότε προκύπτει η ίδια μέγιστη ισχύς που υπολογίστηκε και παραπάνω.

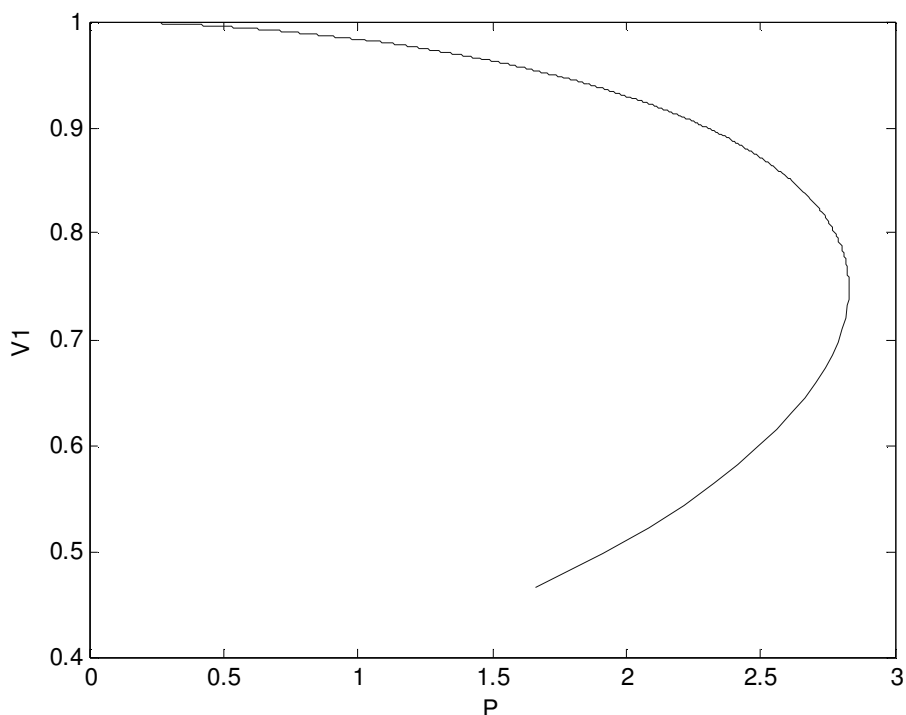
Πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι οι συνθήκες μέγιστης ισχύος συμπίπτουν με το όριο ελεγχιμότητας της τάσεως, πέρα από το οποίο η αύξηση της χωρητικής αγωγιμότητας του SVC δεν επιφέρει αύξηση της δευτερεύουσας τάσεως διανομής. Η συνθήκη ελεγχιμότητας προκύπτει από τη σχέση (4.5) ως:

$$B_C - aG = \frac{1}{X_o} \quad (4.14)$$

και εύκολα επιβεβαιώνεται ότι αντιστοιχεί σε γωνία  $90^\circ$  μεταξύ των δύο σταθερών τάσεων.

Σημειώνεται ότι η χρήση της σχέσης (4.12) είναι απαραίτητη και σε αυτό το τρόπο υπολογισμού της μέγιστης ισχύος, για να προσδιοριστεί η ακριβής τιμή της τάσης  $V_o$  που πρέπει να αντικατασταθεί στη σχέση (4.13).

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η θεωρητικά υπολογισμένη χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> του δικτύου.



Σχήμα 4.2 Θεωρητική χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με SVC

#### 4.1.2 Προσομοίωση για ρύθμιση τάσης με SVC

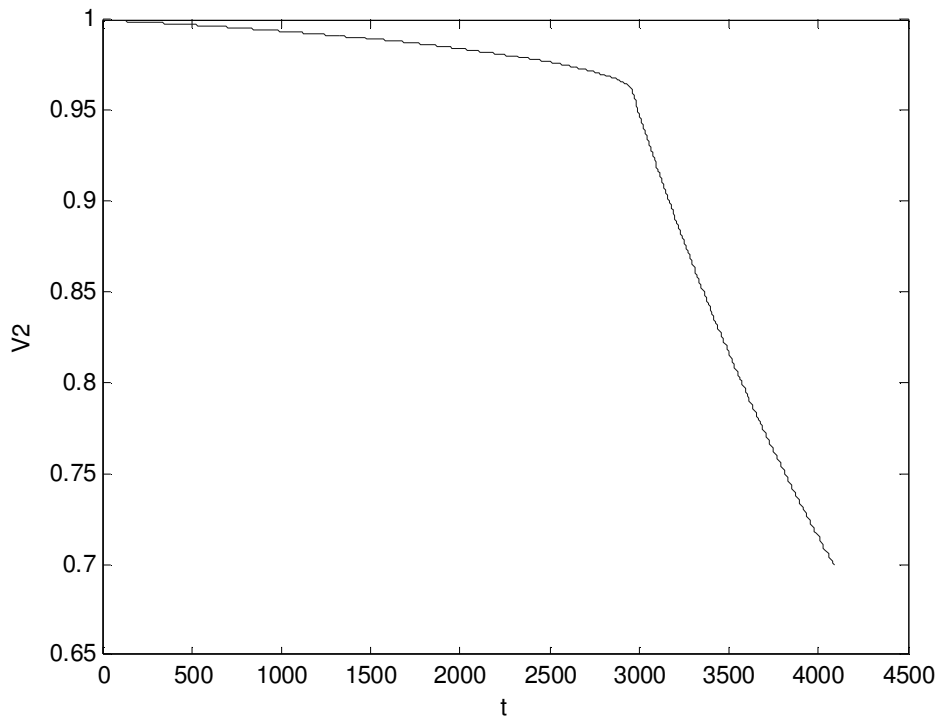
Ο συντελεστής ισχύος του φορτίου στο ζυγό διανομής θεωρείται σταθερός και ίσος με 0.93 επαγωγικός και το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή είναι ανενεργό ( $r=1$  α.μ). Όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις η αύξηση του φορτίου σε σχέση με το χρόνο δίνεται από τη σχέση (4.15):

$$G(t) = G_0(1 + bt) \quad (4.15)$$

όπου  $G_0$  είναι η τιμή του φορτίου τη χρονική στιγμή  $t=0$  και  $b=0.01$  η κλίση με την οποία αυξάνεται το φορτίο.

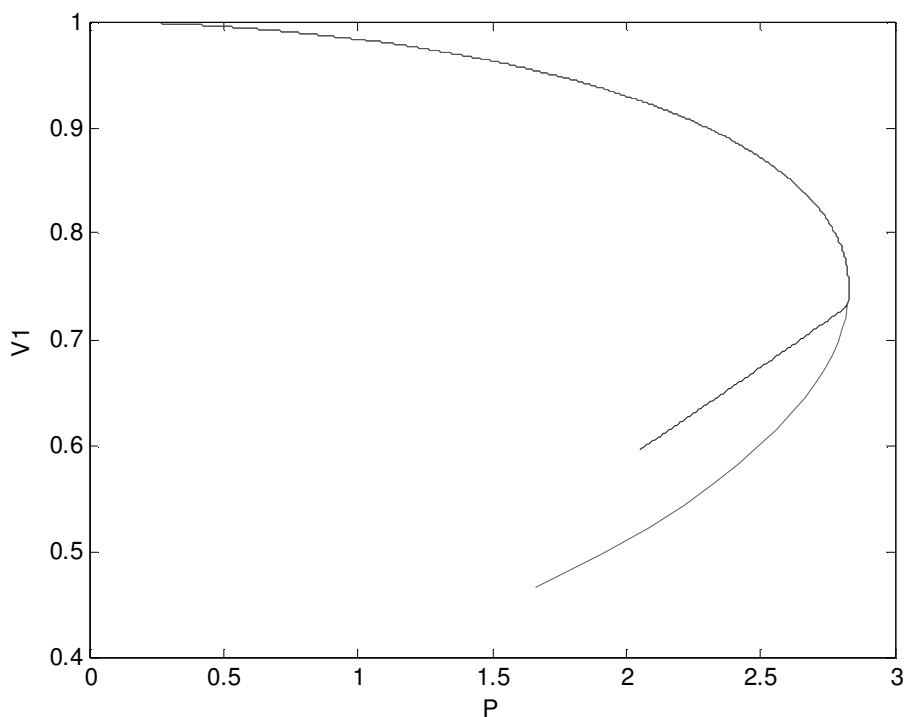
Στη προσομοίωση θεωρήσαμε ότι το SVC βρίσκεται σε ισορροπία ( $\dot{B}_C = 0 \Rightarrow K(V_{2o} - V_2) - V_2^2 B_C = 0$ ), αφού αυτό που εξετάζουμε είναι η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης και η χρονική σταθερά του SVC είναι πολύ μικρή. Ως μέγιστη χωρητικότητα του SVC θεωρήθηκε η χωρητικότητα που αντιστοιχεί στη θεωρητικά υπολογισμένη ( $B_{c \max} = 4.15$  α.μ)

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:



**Σχήμα 4.3** Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση με SVC

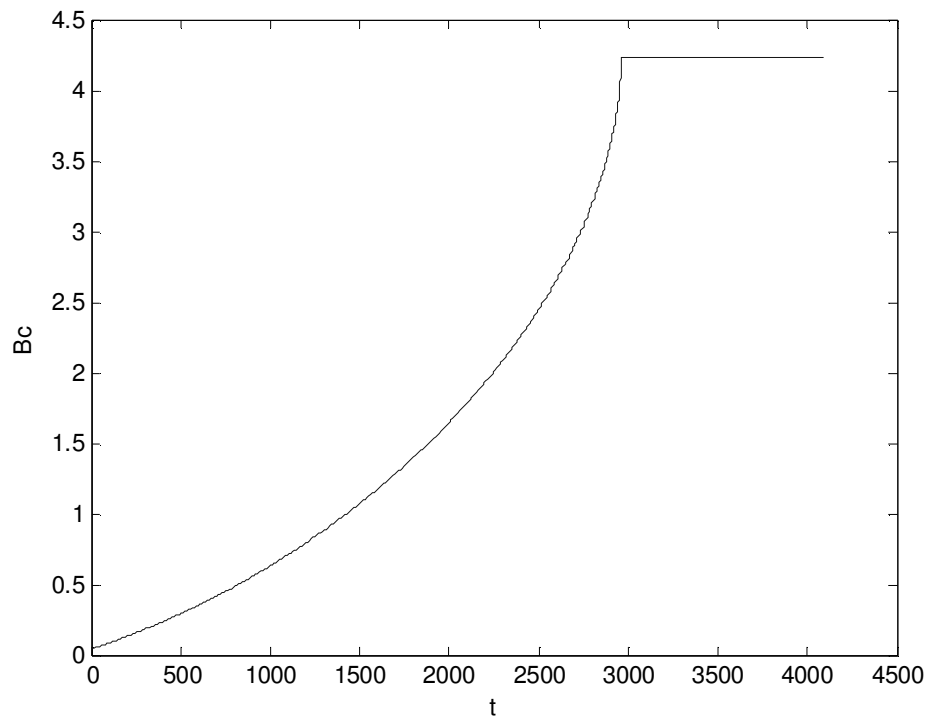
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.3, το SVC ρυθμίζει τη τάση με συνεχή τρόπο και όχι διακριτό όπως ο εγκάρσιος πυκνωτής. Επίσης παρατηρούμε ότι η δευτερεύουσα τάση δεν συγκρατείται ακριβώς στη τάση αναφοράς, αλλά φθίνει με μια μικρή κλίση και φτάνει τη τιμή  $V_2=0.961$  α.μ λίγο πριν τη κατάρρευση. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στη κλίση  $K$  της χαρακτηριστικής λειτουργίας  $Q-V$  του SVC, όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.3.2.



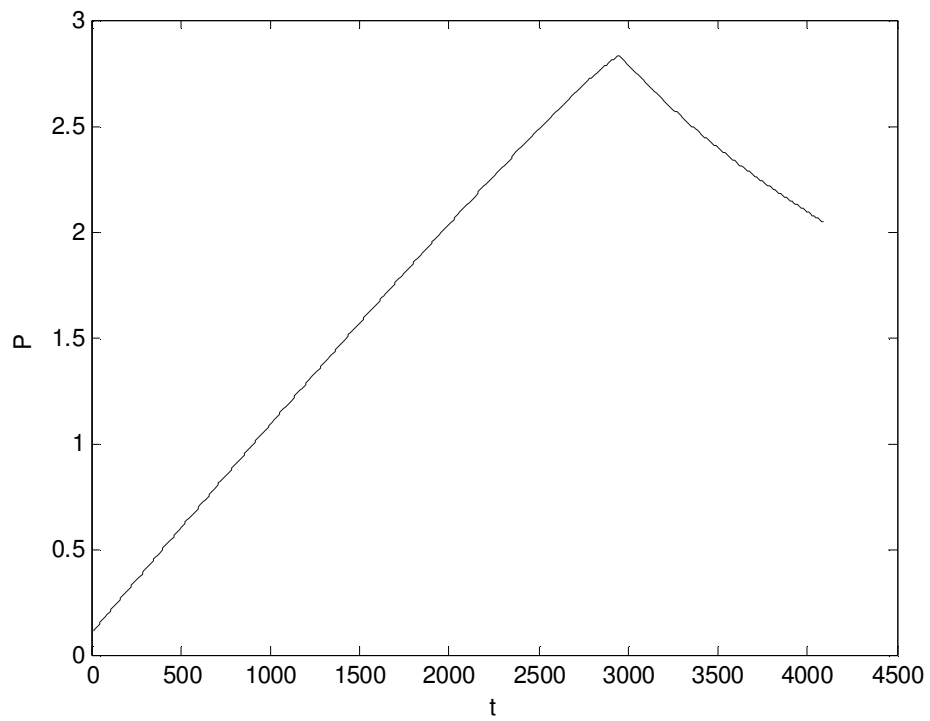
**Σχήμα 4.4** Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 για ρύθμιση τάσης με SVC

Στο Σχήμα 4.4 παρατηρούμε ότι η θεωρητική και η προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 ταυτίζονται μέχρι το σημείο κατάρρευσης της τάσης. Αυτό φυσικά οφείλεται στη γρήγορη απόκριση του SVC (το SVC είναι πολύ πιο γρήγορος μηχανισμός ρύθμισης από τις συστοιχίες πυκνωτών ή το ΣΑΤΥΦ) και τη συνεχή λειτουργία του, αλλά και στο ότι κατά τη θεωρητική μελέτη δε θεωρείται ότι η τάση διατηρείται μονίμως στην ιδανική τιμή ρύθμισης  $V_2=1$  α.μ, αλλά ελήφθη υπόψιν η κλίση  $K$  της χαρακτηριστικής λειτουργίας του SVC.

Στο Σχήμα 4.5 παρατηρούμε ότι μόλις φτάσουμε στο σημείο μέγιστης μεταφοράς ισχύος, το οποίο ταυτίζεται με το σημείο απώλειας ελέγχου της τάσης από το SVC σταματά να αυξάνεται η τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας του SVC και άρα αυτό συμπεριφέρεται ως ένας σταθερός πυκνωτής με τιμή  $B_C=B_{C_{\max P}}$ . Η επίδραση της σταθερής χωρητικής αγωγιμότητας φαίνεται στο σχήμα 4.4. Όπως φαίνεται μετά την επίτευξη της μέγιστης ισχύος η χαρακτηριστική P-V1 της προσομοίωσης παύει να ακολουθεί τη θεωρητική, όπου θεωρείται ότι η τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας εξακολουθεί να μεταβάλλεται. Μετά την επίτευξη της μέγιστης ισχύος η πρωτεύουσα τάση  $V_1$  του μετασχηματιστή καταρρέει, ωστόσο από τη χαρακτηριστική P-V1 της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι η τάση μειώνεται γραμμικά με μικρότερο ρυθμό απ'ότι αν εξακολουθούσε να αυξάνεται τη τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας του SVC.



**Σχήμα 4.5** Χωρητική αγωγιμότητα SVC



**Σχήμα 4.6** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με SVC

### 4.1.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί για STATCOM

Η ανάλυση για το STATCOM είναι παρόμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε στη παράγραφο 4.1.1 για το SVC.

Το σύστημα των αλγεβρικών-διαφορικών εξισώσεων του δικτύου είναι:

$$\dot{I}_C = K(V_{2o} - V_2) - V_2 I_C \quad (4.16)$$

$$V_2^2((1 + aGX_o)^2 + G^2 X_o^2) - 2X_o(1 + aGX_o)I_C V_2 + I_C^2 X_o^2 - E^2 = 0 \quad (4.17)$$

και στο σημείο ισορροπίας ισχύει:

$$K(V_{2o} - V_2) - V_2 I_C = 0 \quad (4.18)$$

$$V_2^2((1 + aGX_o)^2 + G^2 X_o^2) - 2X_o(1 + aGX_o)I_C V_2 + I_C^2 X_o^2 - E^2 = 0 \quad (4.19)$$

Η ιακωβιανή προκύπτει από την εξίσωση (4.6) και ισχύει:

$$f_x = -V_2 \quad (4.20)$$

$$f_y = -K - I_C \quad (4.21)$$

$$g_x = 2X_o^2 I_C - 2X_o(1 + aGX_o)V_2 \quad (4.22)$$

$$g_y = 2V_2((1 + aGX_o)^2 + G^2 X_o^2) - 2X_o(1 + aGX_o)I_C \quad (4.23)$$

Τελικά η ιακωβιανή δίνεται από τη σχέση:

$$\det J = -V_2^2(1 + aGX_o)^2 - X_o^2 G^2 V_2^2 + KX_o^2 I_C - KX_o(1 + aGX_o)V_2 + X_o^2 I_C^2 \quad (4.24)$$

Η συνθήκη που ισχύει στο σαγματικό σημείο είναι:

$$-V_2^2(1 + aGX_o)^2 - X_o^2 G^2 V_2^2 + KX_o^2 I_C - KX_o(1 + aGX_o)V_2 + X_o^2 I_C^2 = 0 \quad (4.25)$$

Επιλύοντας το σύστημα των εξισώσεων (4.16), (4.17) και (4.25) και για  $P = V_2^2 G$  προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 4.2:

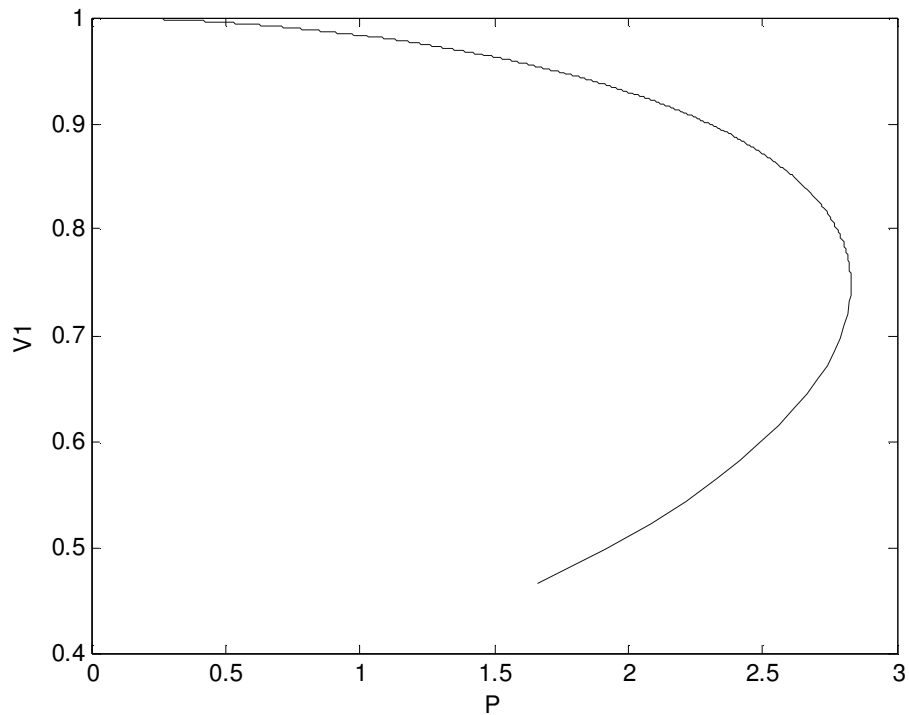
**Πίνακας 4.2** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο τάσης μέσω STATCOM

<b>Σ.Ι</b>	<b>P<sub>max</sub> (α.μ)</b>	<b>B<sub>CmaxP</sub> (α.μ)</b>	<b>V<sub>2maxP</sub> (α.μ)</b>	<b>Γ<sub>maxP</sub> (α.μ)</b>
0.93	2.83	4.15	0.961	1

Το STATCOM προσομοιώνεται ως μια μεταβλητή πηγή ρεύματος και επομένως από τη σχέση (4.18) υπολογίζεται το χωρητικό ρεύμα αντιστάθμισης στη μέγιστη ισχύ. Το μέγεθος B<sub>CmaxP</sub> του πίνακα 4.2 υπολογίζεται από τη σχέση B<sub>CmaxP</sub>=I<sub>CmaxP</sub>/V<sub>2maxP</sub>.

Στο Σχήμα 4.7 φαίνεται η θεωρητικά υπολογισμένη χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> του συστήματος για έλεγχο τάσης με STATCOM:





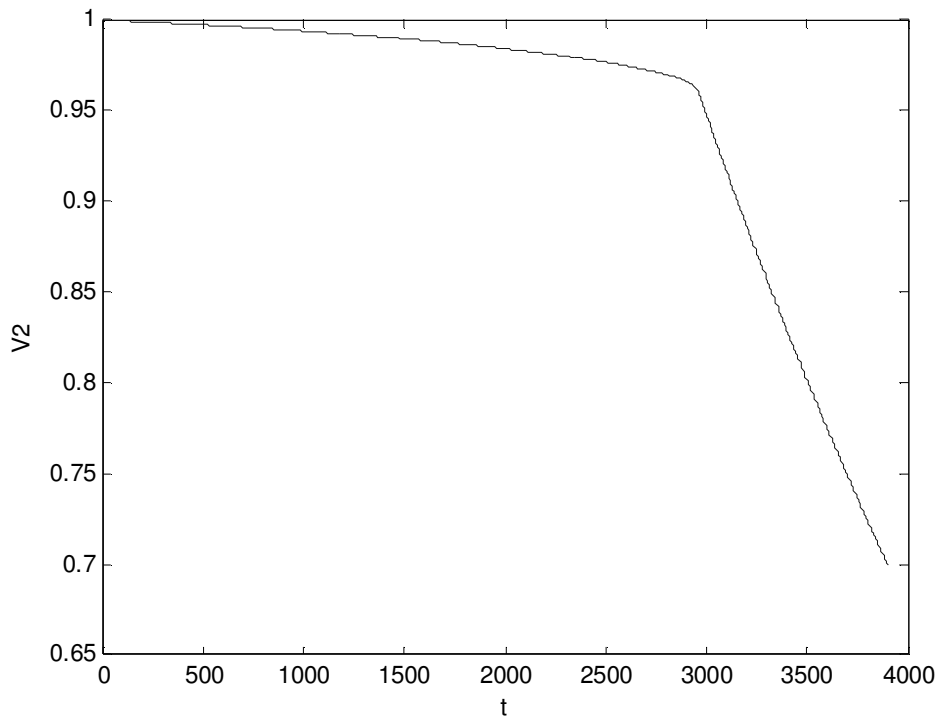
**Σχήμα 4.7** Θεωρητική χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με STATCOM

#### 4.1.4 Προσομοίωση για ρύθμιση τάσης με STATCOM

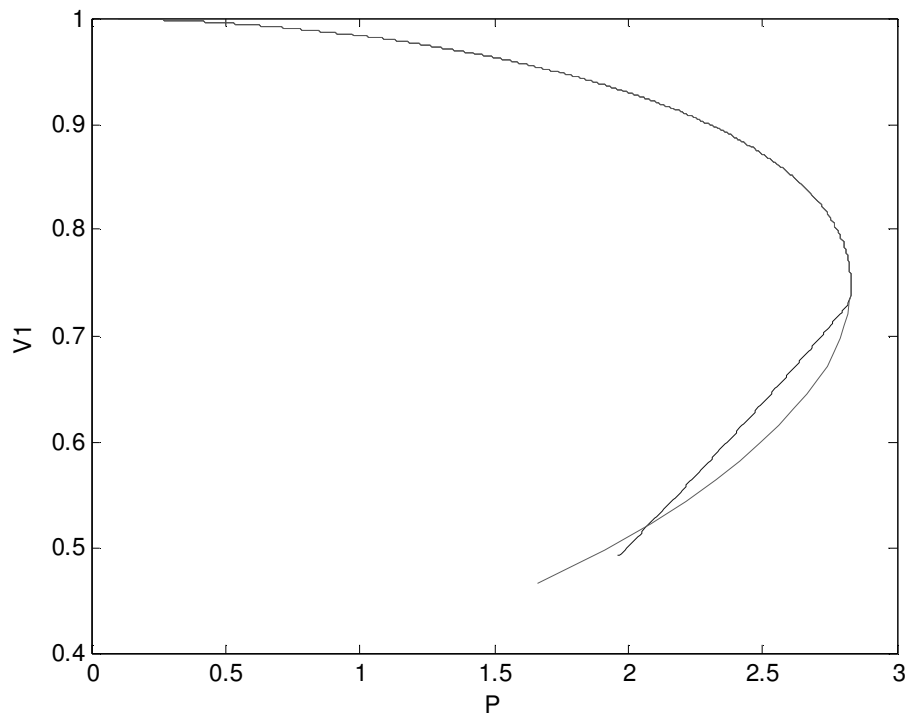
Το φορτίο μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (4.14), ενώ ο συντελεστής ισχύος στο ζυγό διανομής είναι σταθερός και ίσος με 0.93 (επαγωγικός).

Στη προσομοίωση θεωρείται ότι το STATCOM είναι μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από μετατροπέα. Όπως και στη περίπτωση του SVC θεωρείται ότι το STATCOM βρίσκεται σε ισορροπία ( $K(V_{2o} - V_2) - V_2 I_C = 0$ ), ενώ το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή είναι ανενεργό ( $r=1$  α.μ μονίμως).

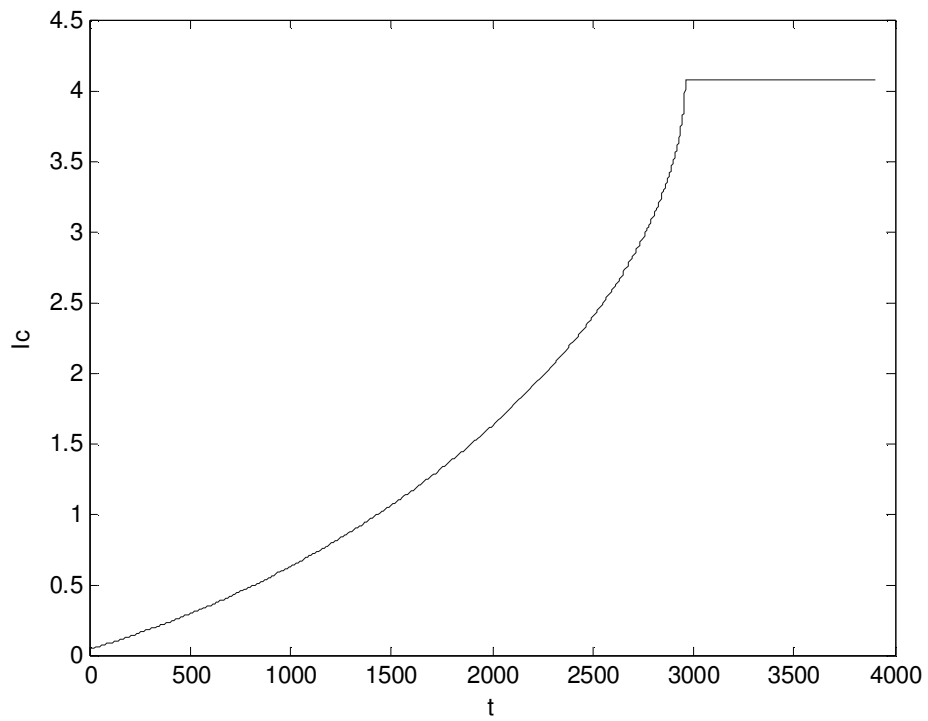
Στα σχήματα 4.8-4.11 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:



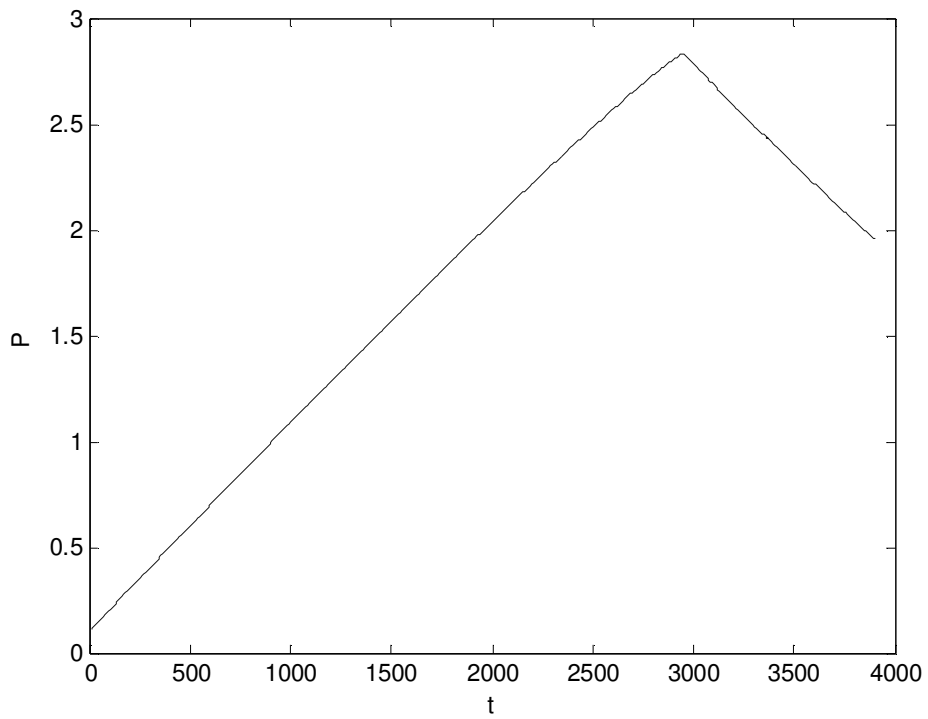
Σχήμα 4.8 Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση με STATCOM



Σχήμα 4.9 Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V1 για ρύθμιση τάσης με STATCOM



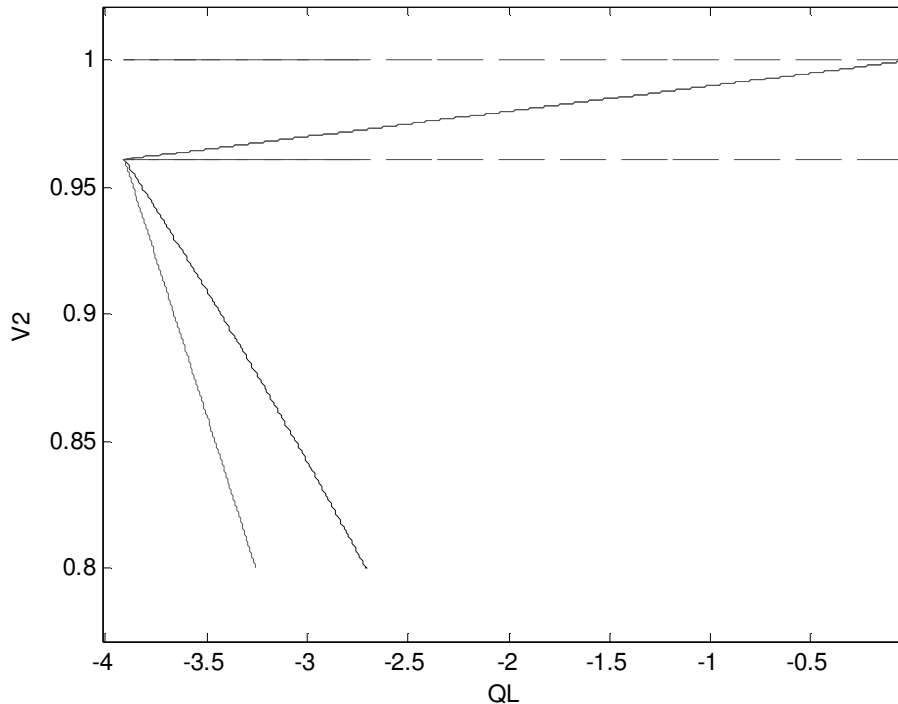
**Σχήμα 4.10** Χωρητικό ρεύμα STATCOM



**Σχήμα 4.11** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με STATCOM

Συγκρίνοντας τις αποκρίσεις για χρήση SVC και STATCOM παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Όσα ειπώθηκαν στην ανάλυση της αντιστάθμισης με SVC, ισχύουν και σε αυτήν τη περίπτωση.

Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές V-Q του SVC και του STATCOM:



Σχήμα 4.12 Χαρακτηριστικές V-Q SVC και STATCOM

Από το Σχήμα 4.12 παρατηρούμε ότι στη γραμμική περιοχή λειτουργίας το SVC και το STATCOM έχουν την ίδια χαρακτηριστική αφού θεωρήσαμε την ίδια κλίση  $K$  στις σχέσεις 4.4 και 4.16. Η πάνω διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά τη τάση αναφοράς  $V_{20}$ , ενώ η κάτω τη τιμή της τάσης του ζυγού διανομής για μέγιστη άεργο αντιστάθμιση.

## 4.2 Ρύθμιση τάσης διανομής με συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών

Το δίκτυο το οποίο εξετάστηκε στη παρούσα παράγραφο είναι ίδιο με εκείνο του σχήματος 4.1. Το ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ είναι απενεργοποιημένο ( $r=1$  α.μ). Οι συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών συνδέονται στην πλευρά του δευτερεύοντος του Μ/Σ, για τον έλεγχο της δευτερεύουσας τάσης διανομής. Ο τρόπος με τον οποίο οι πυκνωτές αντισταθμίζουν τη τάση αλλά και η λογική με την οποία συνδέονται/αποσυνδέονται οι συστοιχίες των πυκνωτών έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.

Ακολουθούν η θεωρητική μελέτη του δικτύου και η προσομοίωση του. Στη προσομοίωση θεωρούμε ότι το φορτίο αυξάνεται με τον ίδιο τρόπο που αυξανόταν

στο προηγούμενο σενάριο ελέγχου της τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ, μέχρις ότου ξεπεραστεί το όριο ευστάθειας και η τάση καταρρεύσει.

#### 4.2.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί είναι παρόμοιοι με αυτούς της παραγράφου 4.1.1. Δεδομένου ότι ο πυκνωτής κρατάει την τάση στο ζυγό του φορτίου σταθερή και ίση με  $V_{20}$  η μέγιστη ισχύς που απορροφάται από το φορτίο δίνεται από το όριο στατικής ευστάθειας του συστήματος από τη σχέση (4.13).

Η τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας για τη μέγιστη ισχύ δίνεται από το όριο ελεγχιμότητας της τάσης σύμφωνα με τη σχέση (4.14).

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (4.13) και (4.14) τις τιμές των μεγεθών ( $E=1$  α.μ,  $V_{20}=1$  α.μ,  $\alpha=0.3952$ ,  $X=0.24$  α.μ,  $X_t=0.1$  α.μ) προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 4.3.

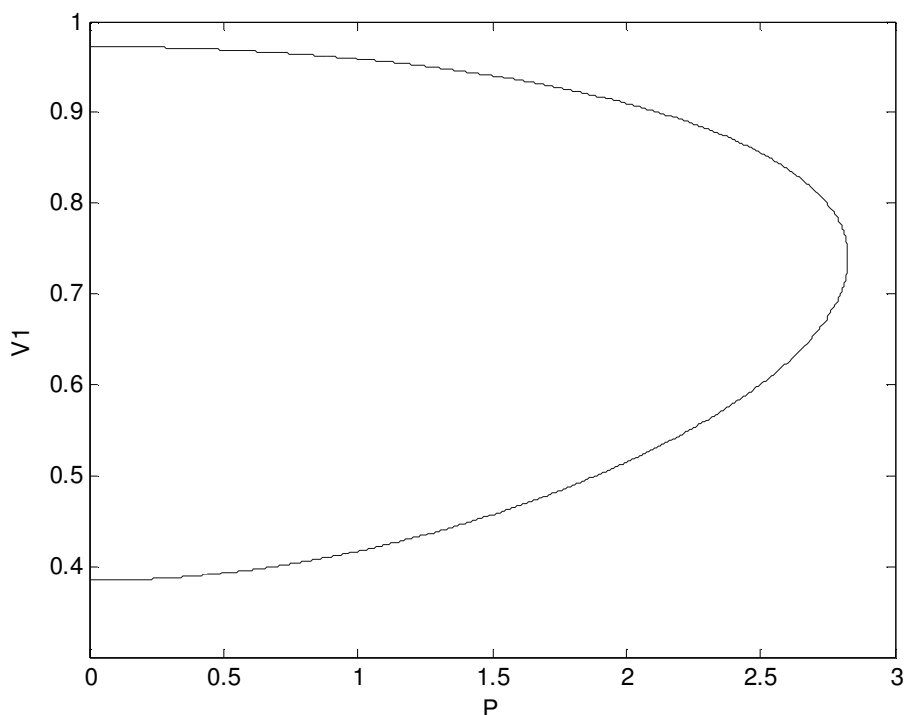
Για λόγους σύγκρισης με το SVC θα ξανακάνουμε τους θεωρητικούς υπολογισμούς θεωρώντας ότι οι πυκνωτές κρατάνε τη τάση στην τιμή  $V_{20}=0.961$  α.μ, ίση δηλαδή με τη τιμή της δευτερεύουσας τάσης διανομής για μέγιστη χωρητική αντιστάθμιση του SVC.

**Πίνακας 4.3** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο τάσης μέσω εγκάρσιων πυκνωτών

$\Sigma I$	$P_{\max}$ (α.μ)	$B_{C_{\max P}}$ (α.μ)	$V_{2_{\max P}}$ (α.μ)	$\Gamma_{\max P}$ (α.μ)
0.93	2.94	4.10	1.0	1
0.93	2.83	4.15	0.961	1

Συγκρίνοντας τις τιμές του πίνακα 4.2 με αυτές του πίνακα 4.3 για  $V_{2_{\max P}}=0.961$  α.μ παρατηρούμε ότι η μέγιστη ισχύς προκύπτει ίδια είτε χρησιμοποιούμε SVC είτε χρησιμοποιούμε συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών για τον έλεγχο της τάσης.

Στο σχήμα 4.13 φαίνεται η θεωρητικά υπολογισμένη χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> του συστήματος για  $V_{2_{\max P}}=1.0$  α.μ:



Σχήμα 4.13 Θεωρητική χαρακτηριστική P-V1 για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές

#### 4.2.2 Προσομοίωση για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές

Το φορτίο, όπως και στη περίπτωση ελέγχου της τάσης με SVC/STATCOM θεωρούμε ότι μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (4.14).

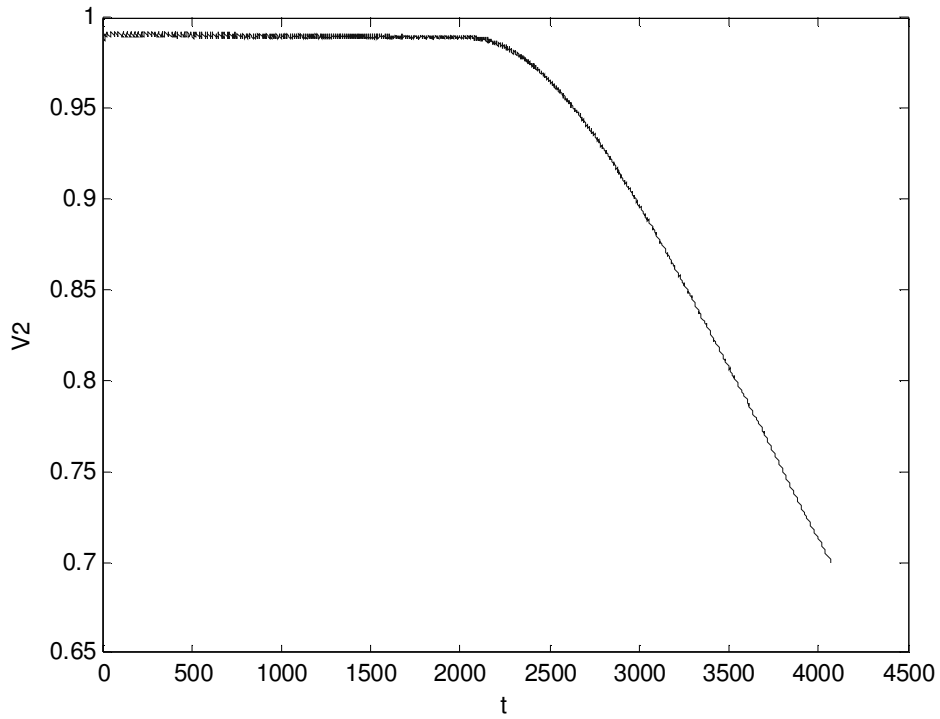
Δε χρειάζεται χωριστή ρύθμιση συντελεστή ισχύος, άρα ο συντελεστής ισχύος του ζυγού του φορτίου είναι ίσος με 0.93 (επαγωγικός). Το ΣΑΤΥΦ του Μ/Σ είναι ανενεργό ( $r=1$ ). Η μέγιστη τιμή της χωρητικής αγωγιμότητας λαμβάνεται ίση με τη θεωρητικά υπολογισμένη, δηλαδή  $B_{c \max P}=4.10$  α.μ.

Η σύνδεση και αποσύνδεση των πυκνωτών ακολουθεί την παρακάτω λογική:

$$\begin{aligned}
 B_{Ck+1} &= B_{Ck} + \Delta B_C & \text{αν } V_2 < V_{2o} + d \text{ και } B_{Ck} < B_{C \max} \\
 B_{Ck+1} &= B_{Ck} - \Delta B_C & \text{αν } V_2 > V_{2o} - d \text{ και } B_{Ck} > 0 \\
 B_{Ck+1} &= B_{Ck} & \text{διαφορετικά}
 \end{aligned}
 \tag{4.26}$$

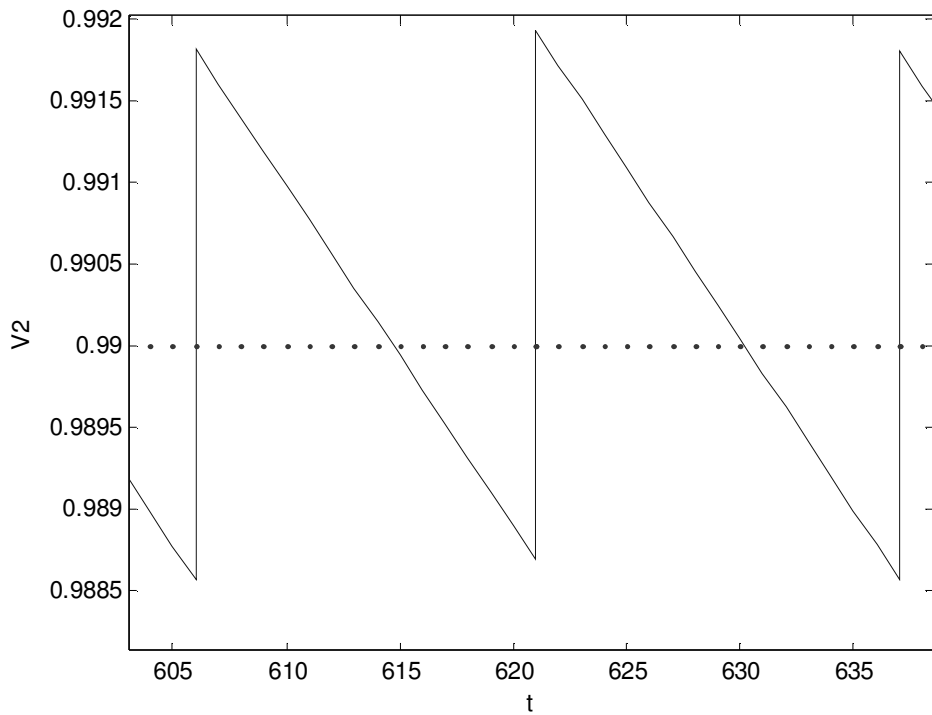
Όπου  $\Delta B_C=0.01$  α.μ,  $V_{2o}=1$  α.μ,  $d=0.01$  α.μ και  $B_{C \max}=B_{C \max P}=4.1$  α.μ  
 Η χρονική καθυστέρηση σύνδεσης των πυκνωτών λαμβάνεται ίση με  $T_C=6$  sec.

Στα σχήματα 4.13-4.18 δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:



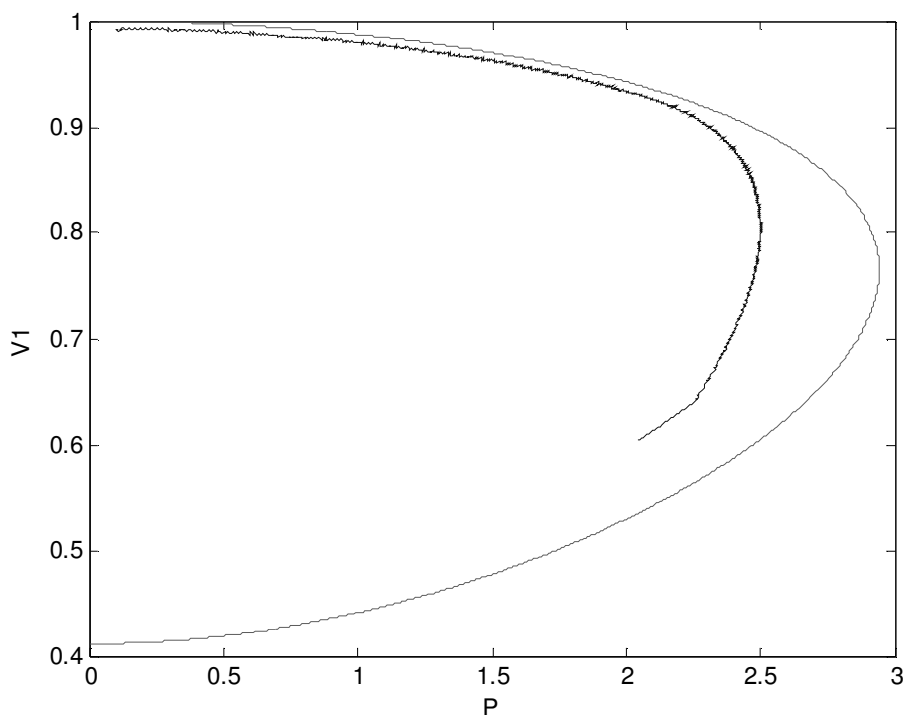
**Σχήμα 4.14** Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση με πυκνωτές

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται με περισσότερη λεπτομέρεια η δευτερεύουσα τάση συναρτήση του χρόνου, λίγο πριν καταρρεύσει.



**Σχήμα 4.15** Λεπτομέρεια δευτερεύουσας τάσης διανομής για ρύθμιση με πυκνωτές

Από τα σχήματα 4.14 και 4.15 παρατηρούμε ότι παρότι το κάτω όριο της νεκρής ζώνης της ρύθμισης των πυκνωτών είναι το 0.99 α.μ, οι πυκνωτές δεν ενεργοποιούνται αμέσως μόλις η τάση πέσει κάτω από αυτή τη τιμή. Αυτή η καθυστέρηση οφείλεται στη χρονική σταθερά σύνδεσης των πυκνωτών, η οποία είναι ίση με  $T_C=6$  sec όπως αναφέρθηκε στην αρχή της παραγράφου.

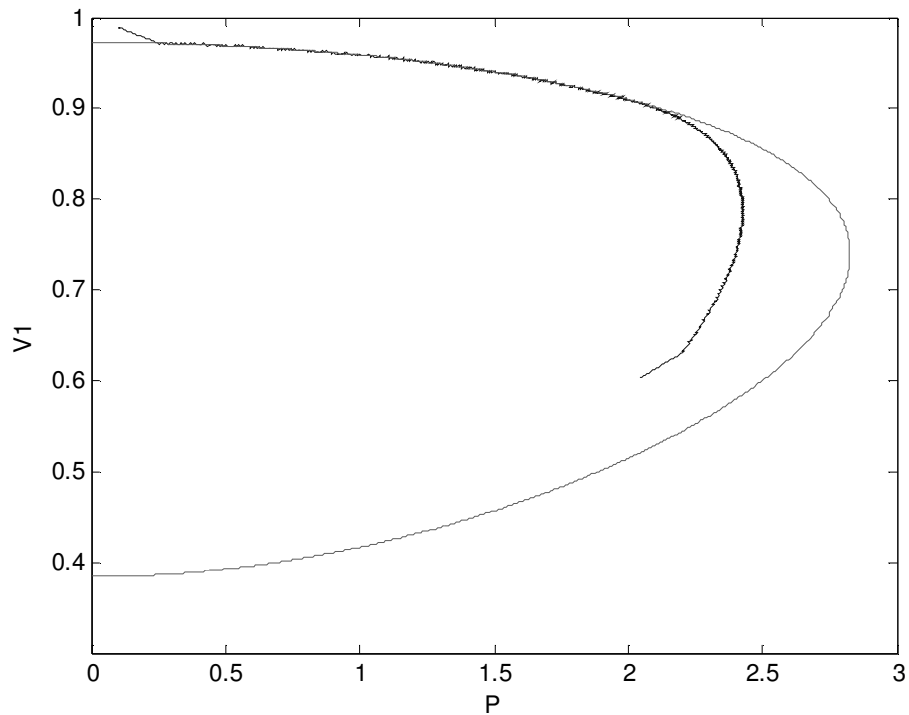


**Σχήμα 4.16** Θεωρητική και προσομοιωμένη καμπύλη P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές

Κατά την ευσταθή λειτουργία η δευτερεύουσα τάση πέφτει κάτω από το ελάχιστο όριο της νεκρής ζώνης (0.99 α.μ) μέχρι να συνδεθεί η επόμενη βαθμίδα πυκνωτών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η μέγιστη ισχύς στη προσομοίωση να είναι μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογισμένη όπου θεωρούμε ότι η δευτερεύουσα τάση διατηρείται σταθερή καθόλη τη διάρκεια στη τιμή  $V_{20}=1$  α.μ. Επίσης επειδή ο μέγιστος ρυθμός με τον οποίο συνδέονται οι πυκνωτές είναι σταθερός ( $\Delta B_C/\Delta T_C$ ), όταν ο ρυθμός πτώσης της τάσης μεγαλώνει καθώς το σύστημα πλησιάζει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, οι συστοιχίες των πυκνωτών δεν επαρκούν για να κρατήσουν τη τάση του ζυγού διανομής με αποτέλεσμα να μη μπορεί να επιτευχθεί το θεωρητικό μέγιστο.

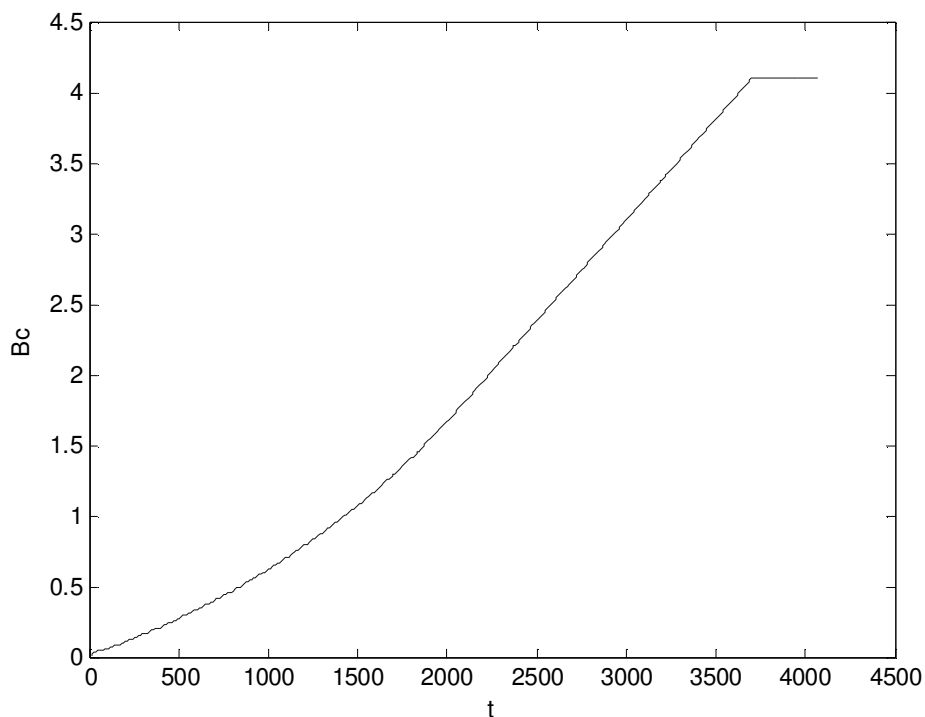
Για λόγους σύγκρισης με το SVC παρατίθεται η θεωρητική και η προσομοιωμένη χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> του δικτύου για έλεγχο της δευτερεύουσας τάσης διανομής στη τιμή  $V_{20}=0.961$  α.μ (Σχήμα 4.17):





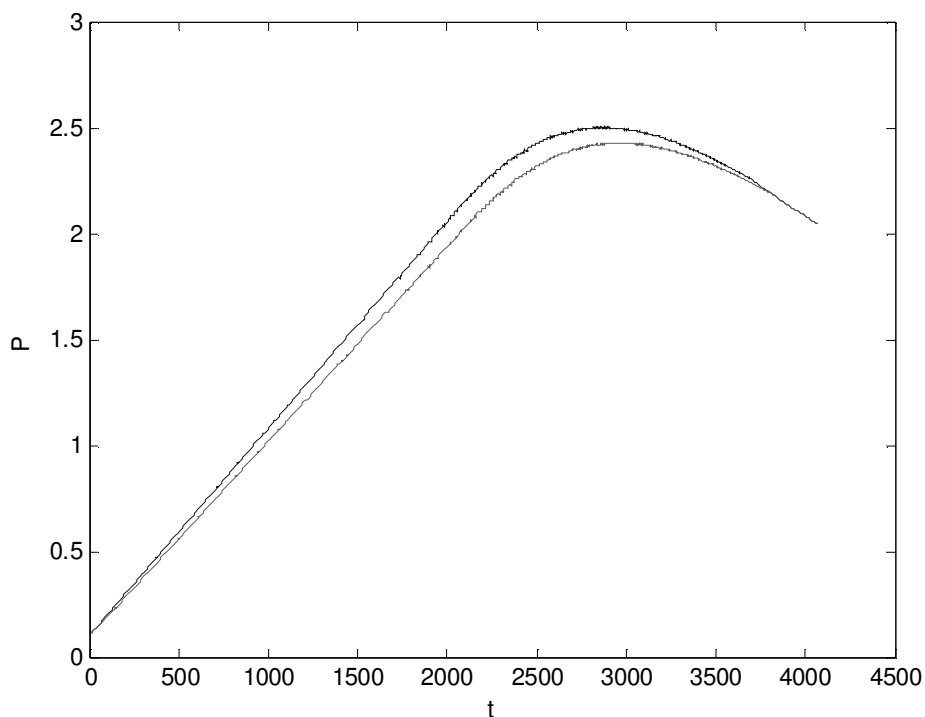
**Σχήμα 4.17** Θεωρητική και προσομοιωμένη χαρακτηριστική P-V<sub>1</sub> για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές και V<sub>20</sub>=0.961 α.μ

Από τα σχήματα 4.17 και 4.4 παρατηρούμε ότι η μέγιστη θεωρητική ισχύς είναι ίδια με αυτήν για έλεγχο τάσης με SVC, κάτι που διαπιστώθηκε και στη θεωρητική ανάλυση της παραγράφου 4.2.1. Ωστόσο παρατηρούμε ότι στη πράξη η μέγιστη ισχύς είναι αρκετά μικρότερη για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, σε αντίθεση με το SVC που λόγω της συνεχούς και ακαριαίας λειτουργίας του είναι δυνατή η επίτευξη της θεωρητικής μέγιστης ισχύος.



**Σχήμα 4.18** Χωρητική αγωγιμότητα πυκνωτών

Η τιμή  $B_{c_{\max P}}=4.10$  α.μ είναι η τιμή που έχει η χωρητική αγωγιμότητα των πυκνωτών ρύθμισης στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς. Αυτή είναι και η μέγιστη τιμή πυκνωτών που εγκαθίσταται στον ζυγό. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18, δεν συνδέεται καμία επιπλέον συστοιχία πυκνωτών μόλις επιτευχθεί η τιμή  $B_{c_{\max P}}$ . Φυσικά η τιμή αυτή επιτυγχάνεται στη πράξη, μετά την επίτευξη της μέγιστης ισχύος, αφού όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω της νεκρής ζώνης και του σταθερού ρυθμού αύξησης της χωρητικής αγωγιμότητας η δευτερεύουσα τάση δεν συγκρατείται μόνιμως στη τιμή  $V_{2o}=1$  α.μ κατά τη προσομοίωση.



**Σχήμα 4.19** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση τάσης με πυκνωτές για  $V_{20}=1$  α.μ και  $V_{20}=0.961$  α.μ

Στο σχήμα 4.19 παρουσιάζεται για λόγους σύγκρισης η μέγιστη ισχύς για τάση αναφοράς  $V_{20}=1.0$  α.μ και  $V_{20}=0.961$  α.μ.

Από τα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 4.4:

**Πίνακας 4.4** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο τάσης με πυκνωτές (αποτελέσματα προσομοίωσης)

$\Sigma.I$	$P_{\max}$ (α.μ)	$B_{C\max P}$ (α.μ)	$V_{2\max P}$ (α.μ)	$\Gamma_{\max P}$ (α.μ)
0.93	2.50	2.91	0.917	1

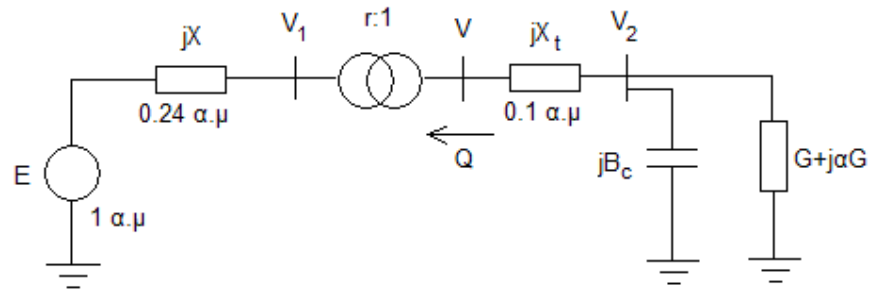


## 5. ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑΣ (ΥΤ) ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ (ΜΤ) ΤΑΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται μια διαφορετική λογική ελέγχου. Η τάση στην πλευρά της διανομής ελέγχεται μέσω του ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή υποβιβασμού ενώ ταυτόχρονα ελέγχεται και η τάση στην πλευρά της μεταφοράς. Παρκάτω εξετάζονται λεπτομερώς δυο διαφορετικές υλοποιήσεις της παραπάνω λογικής ελέγχου.

### 5.1 Ρύθμιση ΥΤ μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ

Το δίκτυο που εξετάζεται σε αυτή τη παράγραφο φαίνεται στο Σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1 Ακτινικό δίκτυο με Μ/Σ υποβιβασμού με ΣΑΤΥΦ, συσκευή αέργου ρύθμισης και φορτίο

Η δευτερεύουσα τάση ελέγχεται μέσω του μεταβλητού λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ. Ο έλεγχος της πρωτεύουσας τάσης γίνεται μέσω συστοιχίας εγκάρσιων πυκνωτών που είναι συνδεδεμένοι, όπως φαίνεται στο σχήμα, στη πλευρά της διανομής.

Ακολουθούν η θεωρητική ανάλυση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτού του σεναρίου ελέγχου.

#### 5.1.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί

Έστω  $V$  η ανηγμένη ως προς το δευτερεύον τάση  $V_1$ . Εάν θεωρήσουμε ότι η δευτερεύουσα τάση  $V_2$  διατηρείται σταθερή στη τιμή  $V_{20}$  τότε η  $V$  δίνεται από τη γνωστή διτετράγωνη εξίσωση:

$$V^4 + (2QX_t - V_{20}^2)V^2 + X_t^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (5.1)$$

όπου  $V = V_1/r$ .

Θεωρώντας ότι η πρώτευουσα τάση ελέγχεται από τους πυκνωτές στη τιμή  $V_{1o}$  και άρα είναι γνωστή και θεωρώντας  $\angle V_1 = 0^\circ$  ισχύει:

$$Q = \frac{V_{1o}^2 - EV_{1o} \cos \delta}{X} \quad (5.2)$$

$$P = \frac{EV_{1o}}{X} \sin \delta \quad (5.3)$$

όπου  $\delta$  η γωνία της τάσης  $E$  ως προς τη τάση  $V_1$ .

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς υπολογίζεται από το μηδενισμό της διακρίνουσας της εξίσωσης (5.1):

$$\Delta = 0 \Rightarrow V_{2o}^4 - 4X_t^2 P^2 - 4V_{2o}^2 QX_t = 0 \quad (5.4)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (5.2) έως (5.4) και κάνοντας χρήση της γνωστής τριγωνομετρικής ταυτότητας  $\sin^2 \theta = 1 - \cos^2 \theta$  προκύπτει η παρακάτω δευτεροβάθμια εξίσωση ως προς  $\cos \delta$ :

$$\frac{4X_t^2 E^2 V_{1o}^2}{X^2} \cos^2 \delta + \frac{4V_{2o}^2 V_{1o} E X_t}{X} \cos \delta + V_{2o}^4 - \frac{4X_t^2 E^2 V_{1o}^2}{X^2} - \frac{4V_{2o}^2 V_{1o} X_t}{X} = 0 \quad (5.5)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στο σχήμα 5.1 στη παραπάνω εξίσωση και επιλύοντας την προκύπτει μια μόνο δυνατή λύση,  $\cos \delta_{\max P} = 0.645$  που αντιστοιχεί στη γωνία  $\delta_{\max P} = 49.8^\circ$ . Προφανώς το όριο αυτό είναι πιο περιοριστικό από το όριο  $\delta = 90^\circ$  στη σχέση (5.3).

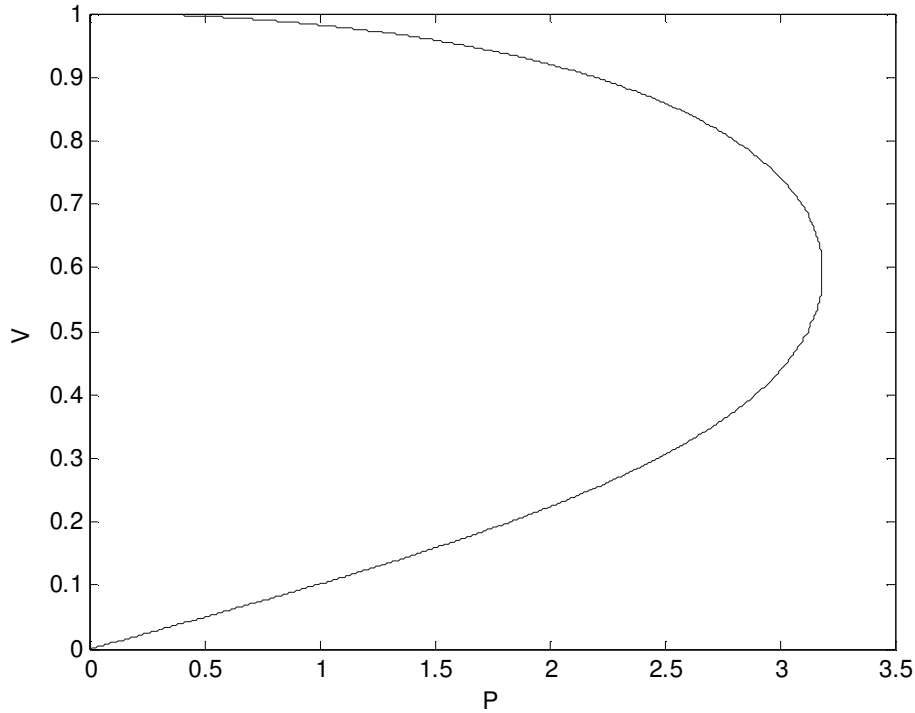
Επιλύοντας τώρα την εξίσωση (5.1) προκύπτει η σχέση:

$$V = \frac{V_{1o}}{r} = \sqrt{\frac{V_{2o}^2 - 2QX_t \pm \sqrt{V_{2o}^4 - 4X_t^2 P^2 - 4V_{2o}^2 QX_t}}{2}} \quad (5.6)$$

κρατώντας τη λύση που αντιστοιχεί σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας (λύση με το “+”) και λύνοντας ως προς  $r$  προκύπτει:

$$r = \frac{V_{1o}}{\sqrt{\frac{V_{2o}^2 - 2QX_t + \sqrt{V_{2o}^4 - 4X_t^2 P^2 - 4V_{2o}^2 QX_t}}{2}}} \quad (5.7)$$

Από την εξίσωση (5.6) προκύπτει η θεωρητική καμπύλη P-V (σχήμα 5.2), όπου  $V = V_{1o}/r$ :



**Σχήμα 5.2** Θεωρητική καμπύλη P-V για ρύθμιση YT μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ

Τέλος από το ισοζύγιο αέργου ισχύος πριν και μετά τον μετασχηματιστή υποβιβασμού έχουμε:

$$\frac{EV_{1o} \cos \delta - V_{1o}^2}{X} = aP - V_{2o}^2 B_C + r^2 I^2 X_t \Rightarrow B_C = \frac{1}{V_{2o}^2} \left( aP + r^2 I^2 X_t + \frac{V_{1o}^2 - EV_{1o} \cos \delta}{X} \right) \quad (5.8)$$

$$\text{όπου } \tilde{I} = \frac{\tilde{E} - \tilde{V}_{1o}}{jX} \Rightarrow I^2 = \frac{(E \cos \delta - V_{1o})^2 + E^2 \sin^2 \delta}{X^2} \quad (5.9)$$

Από τις σχέσεις (5.7), (5.8) και τη σχέση (5.3) για  $\delta = \delta_{\max P}$  προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.1:

**Πίνακας 5.1** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο πρωτεύουσας τάσης μέσω πυκνωτή συνδεδεμένου στη MT και έλεγχο δευτερεύουσας τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ

Σ.Ι	$P_{\max} (\alpha.\mu)$	$B_{C\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{1\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{2\max P} (\alpha.\mu)$	$r_{\max P} (\alpha.\mu)$
0.93	3.18	5.88	1.0	1.0	1.6

Η μέγιστη ισχύς του πίνακα 5.1 δε μπορεί να επιτευχθεί στη πράξη αφού απαιτείται μια πολύ μεγάλη τιμή λόγου μετασχηματισμού, λόγω της μεγάλης πτώσης τάσης που προκαλείται από τη μεταφορά μεγάλης τιμής αέργου ισχύος μέσω της αντίδρασης σκέδασης του μετασχηματιστή. Επίσης λόγω της χρονικής καθυστέρησης των

πυκνωτών και του περιορισμένου ρυθμού  $\Delta B_C/T_C$ , η τιμή της πρωτεύουσας τάσης του μετασχηματιστή δε μπορεί να διατηρηθεί στην επιθυμητή τιμή της έως ότου επιτευχθεί η μέγιστη ισχύς.

Ένα πιο ρεαλιστικό όριο βρίσκεται μέσω της προσομοίωσης που ακολουθεί.

### 5.1.2 Προσομοίωση ρύθμισης YT μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμισης MT μέσω ΣΑΤΥΦ

Το δίκτυο που προσομοιώθηκε φαίνεται στην αρχή της παραγράφου 5.1. Ο συντελεστής ισχύος στον ζυγό του φορτίου είναι σταθερός και ίσος με 0.93 (επαγωγικός). Το φορτίο σε σχέση με το χρόνο μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση (5.10):

$$G(t) = G_o (1 + bt) \quad (5.10)$$

όπου η κλίση με την οποία αυξάνεται το φορτίο είναι ίση με  $b=0.01$ .

Η σύνδεση και αποσύνδεση των πυκνωτών ακολουθεί την παρακάτω λογική:

$$\begin{aligned} B_{Ck+1} &= B_{Ck} + \Delta B_C & \text{αν } V_2 < V_{2o} + d \\ B_{Ck+1} &= B_{Ck} - \Delta B_C & \text{αν } V_2 > V_{2o} - d \\ B_{Ck+1} &= B_{Ck} & \text{διαφορετικά} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Όπου  $\Delta B_C=0.01$  α.μ και  $V_{2o}=1$  α.μ,  $d=0.01$  α.μ. Η χρονική καθυστέρηση των πυκνωτών είναι ίση με  $T_C=6$  sec.

Τέλος ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση:

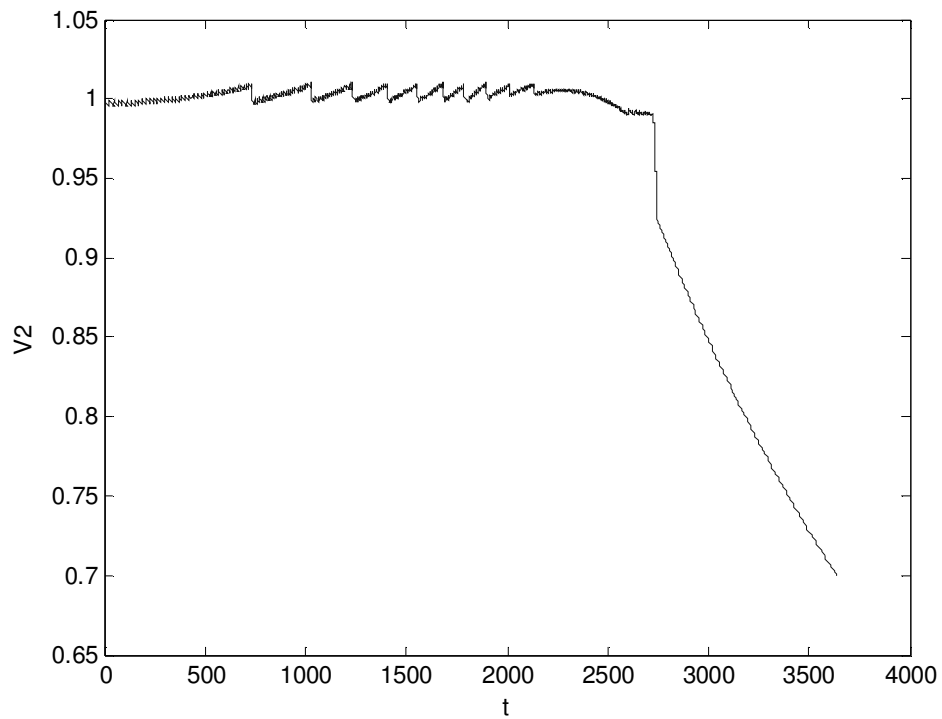
$$\begin{aligned} r_{k+1} &= r_k + \Delta r & \text{εάν } V_2 > V_{2o} + d \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_{k+1} &= r_k - \Delta r & \text{εάν } V_2 > V_{2o} - d \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_{k+1} &= r_k & \text{διαφορετικά} \end{aligned} \quad (5.12)$$

Όπου το  $k$  αναφέρεται στη χρονική στιγμή του χειρισμού,  $V_{2o}$  είναι η επιθυμητή τιμή της τάσης διανομής το  $d$  είναι το εύρος της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ ( $d = 0.01$  α.μ) και  $r_{\max}$  και  $r_{\min}$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή του λόγου μετασχηματισμού με τιμές 1.2 α.μ και 0.8 α.μ αντίστοιχα.

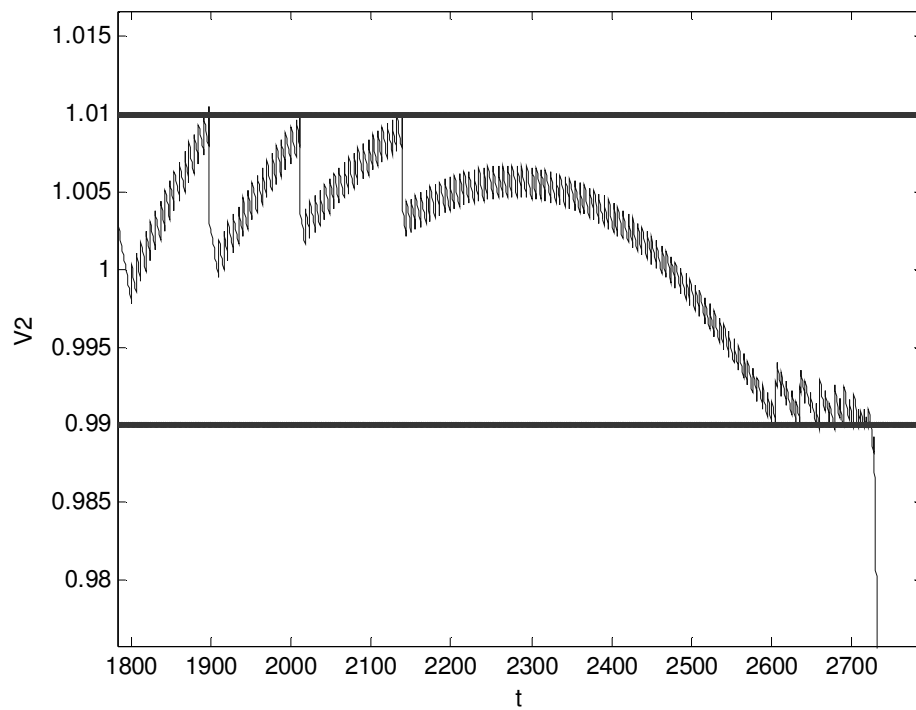
Στα Σχήματα 5.3-5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη περίπτωση επιβολής ορίων στο λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ και στη χωρητική αγωγιμότητα.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζεται η δευτερεύουσα τάση διανομής συναρτήσει του χρόνου για ρύθμιση της μέσω ΣΑΤΥΦ, ενώ στο Σχήμα 5.4 εμφανίζεται με περισσότερη λεπτομέρεια τμήμα του Σχήματος 5.3 λίγο πριν τη κατάρρευση.



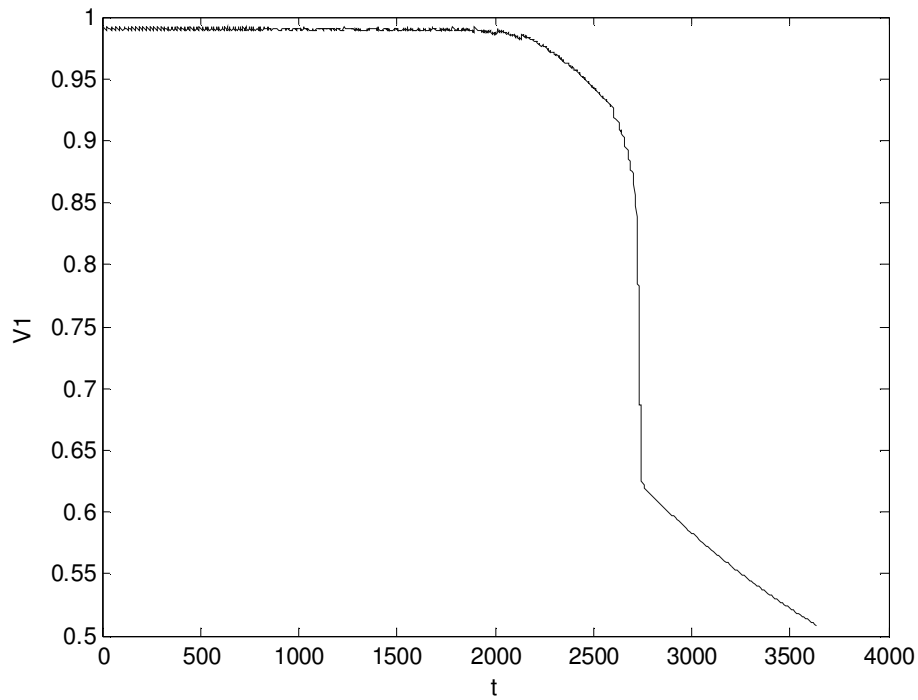


**Σχήμα 5.3** Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση μέσω ΣΑΤΥΦ και ρύθμιση ΥΤ μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής

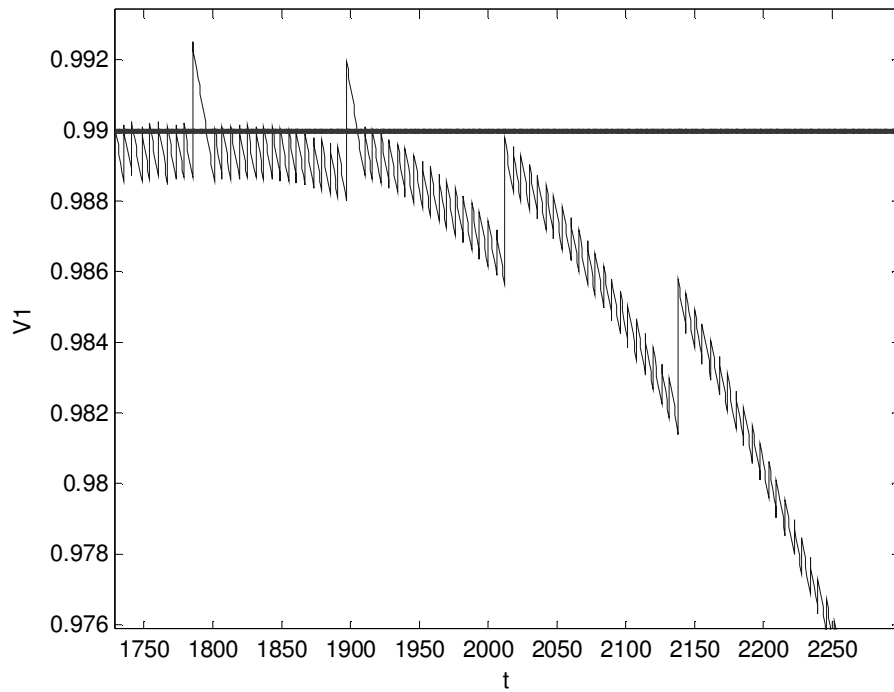


**Σχήμα 5.4** Λεπτομέρεια δευτερεύουσας τάσης διανομής

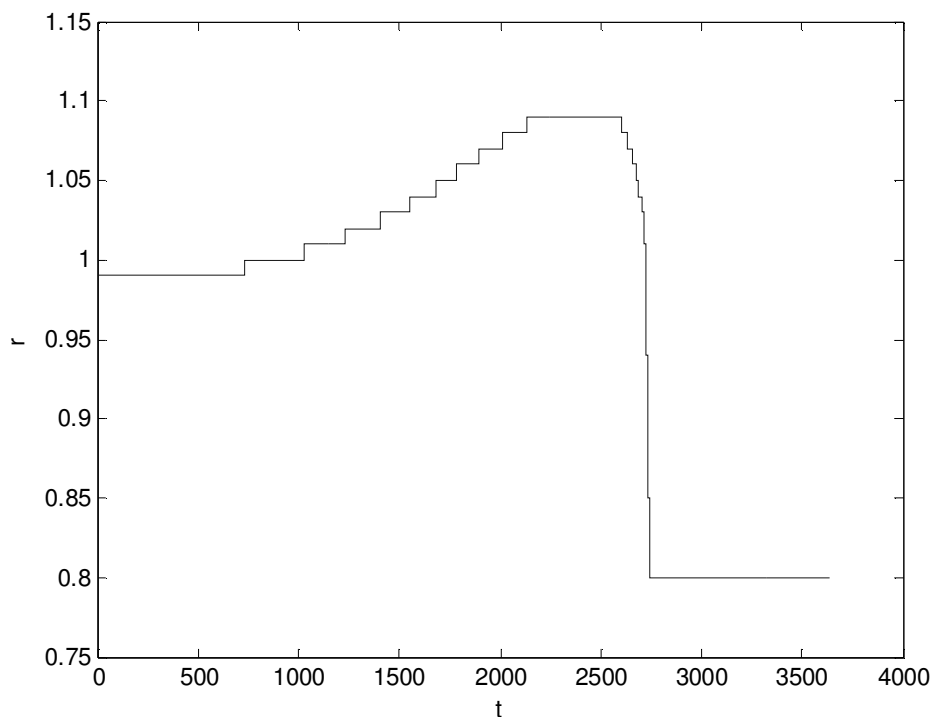
Στο Σχήμα 5.5 εμφανίζεται η πρωτεύουσα τάση του μετασχηματιστή για έλεγχο μέσω πυκνωτών. Το Σχήμα 5.6 εμφανίζει με περισσότερη λεπτομέρεια τμήμα του Σχήματος 5.5.



**Σχήμα 5.5** Πρωτεύουσα τάση για ρύθμιση μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ



**Σχήμα 5.6** Λεπτομέρεια πρωτεύουσας τάσης συναρτήσει του χρόνου

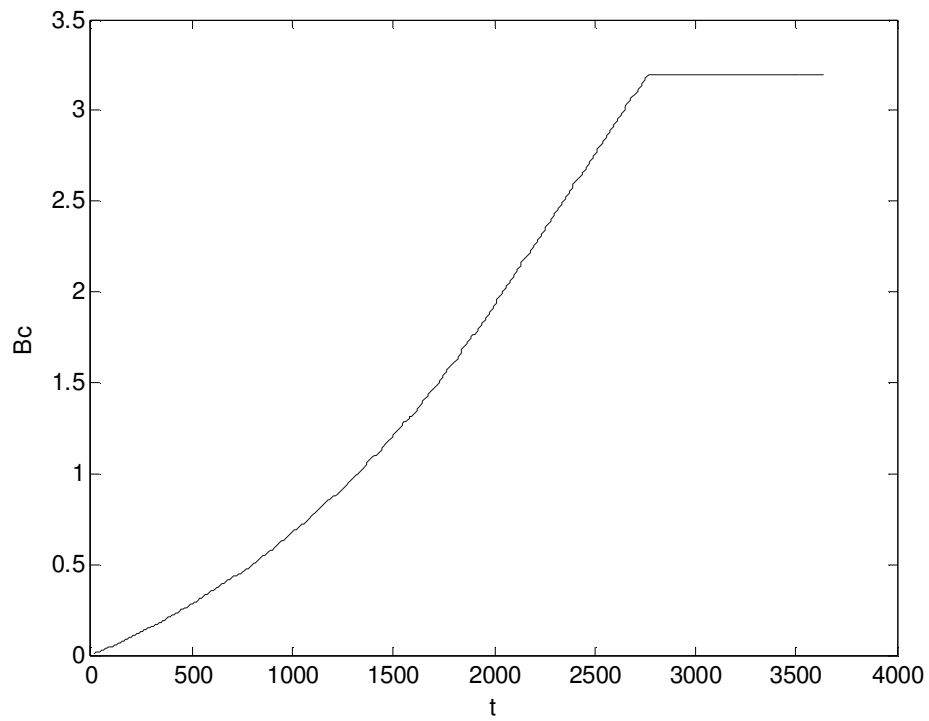


**Σχήμα 5.7** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή συναρτήσει του χρόνου

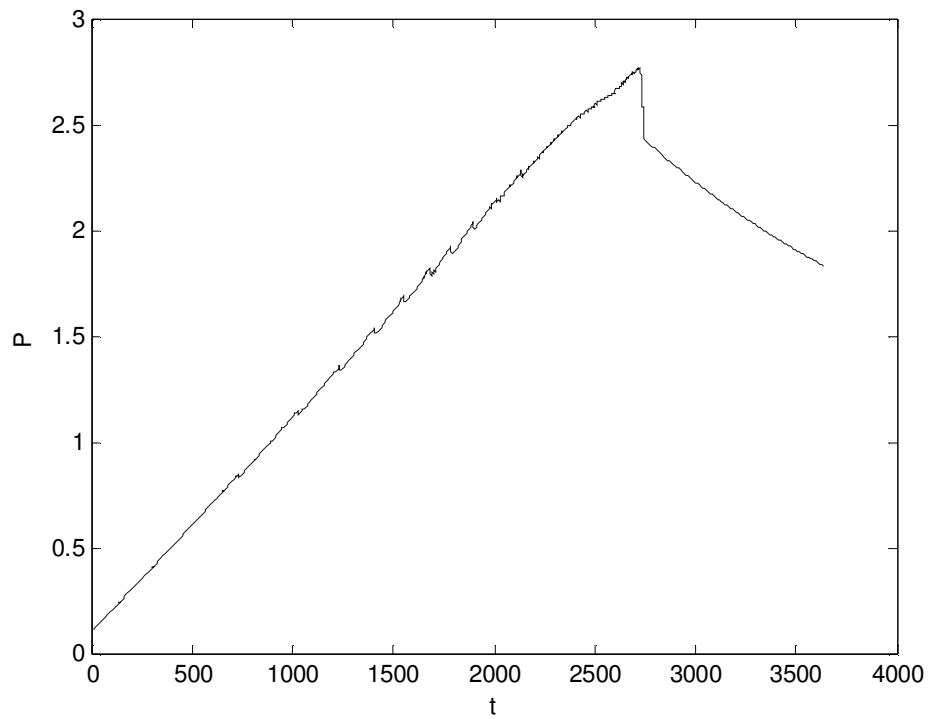
Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή συναρτήσει του χρόνου.

Στο Κεφάλαιο 3 όπου εξετάστηκε η περίπτωση ελέγχου της τάσης με χρήση ΣΑΤΥΦ φάνηκε ότι ο λόγος μετασχηματισμού  $\gamma$  ακολουθούσε μια φθίνουσα πορεία καθώς ο χρόνος και άρα το φορτίο αύξανε. Αυτό συνέβαινε γιατί μαζί με το φορτίο αύξανε και η πτώση τάσης και επομένως για να διατηρηθεί η δευτερεύουσα τάση στην επιθυμητή τιμή το ΣΑΤΥΦ έπρεπε να μειώνει συνεχώς το λόγο μετασχηματισμού. Στη παρούσα περίπτωση παρατηρούμε στο Σχήμα 5.7 ότι ο λόγος μετασχηματισμού αρχικά αυξάνεται και στη συνέχεια μειώνεται. Η αρχική αύξουσα πορεία οφείλεται στην αύξηση της τάσης λόγω της σύνδεσης συστοιχιών πυκνωτών για τον έλεγχο της πρωτεύουσας τάσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3 και ειδικά στο Σχήμα 5.4 κάθε φορά που συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών εκτός από τη πρωτεύουσα τάση, αυξάνεται και η δευτερεύουσα και μόλις αυτή φτάσει το άνω όριο της νεκρής ζώνης, το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή αναγκάζεται να αυξήσει το λόγο μετασχηματισμού ώστε να τη κρατήσει εντός των ορίων της νεκρής ζώνης.

Καθώς η μεταφερόμενη ισχύς του δικτύου πλησιάζει τη μεγιστη τιμή της, η επίδραση των πυκνωτών στη τάση φθίνει και ο περιορισμένος ρυθμός μεταβολής  $\Delta B_C/T_C$  δεν επιτρέπει να διατηρηθεί σταθερή η  $V_1$ , με αποτέλεσμα η κατεύθυνση μεταβολής του λόγου μετασχηματισμού να αλλάξει, δηλαδή αρχίζει να μειώνεται έως ότου φτάσει το ελάχιστο όριο του ( $\gamma_{\min}=0.8$  α.μ).



**Σχήμα 5.8** Χωρητική αγωγιμότητα πυκνωτών



**Σχήμα 5.9** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση ΥΤ μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά διανομής και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ

Από τα Σχήματα 5.4 και 5.9 παρατηρούμε ότι η δευτερεύουσα τάση του μετασχηματιστή καταρρέει με την επίτευξη της μέγιστης ισχύος, από το Σχήμα 5.5 ωστόσο διαπιστώνουμε ότι η πρωτεύουσα τάση του μετασχηματιστή βρίσκεται εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης αρκετά πριν από την επίτευξη της μέγιστης ισχύος παρότι από το Σχήμα 5.8 φαίνεται ότι οι πυκνωτές συνεχίζουν να ρυθμίζουν. Αυτός είναι και ένας από τους κυριότερους λόγους που η επίτευξη της θεωρητικής μέγιστης ισχύος είναι αδύνατη, αφού στη θεωρητική ανάλυση θεωρείται ότι η πρωτεύουσα τάση διατηρείται στην επιθυμητή τιμή μέχρι η κατανάλωση ενεργού ισχύος να φτάσει τη μέγιστη τιμή της. Όπως προαναφέρθηκε ο λόγος για αυτήν την πρόωρη κατάρρευση της πρωτεύουσας τάσης  $V_1$  είναι ότι ο ρυθμός παροχής αέργου αντιστάθμισης από τους εγκάρσιους πυκνωτές στη διανομή είναι αρκετά πιο αργός απ' ότι ο ρυθμός αύξησης της ζήτησης αέργου ισχύος από τον ζυγό τάσεως  $V_1$ , που ελέγχεται από τους πυκνωτές, λόγω της χρονικής καθυστέρησης των πυκνωτών ( $T_C=6 \text{ sec}$ ).

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτουν οι ρεαλιστικές τιμές για τη μέγιστη ισχύ και τα υπόλοιπα σχετικά μεγέθη. Φυσικά αν αντί για πυκνωτές χρησιμοποιηθεί SVC ή STATCOM στο δευτερεύον, το θεωρητικό όριο μπορεί να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. :

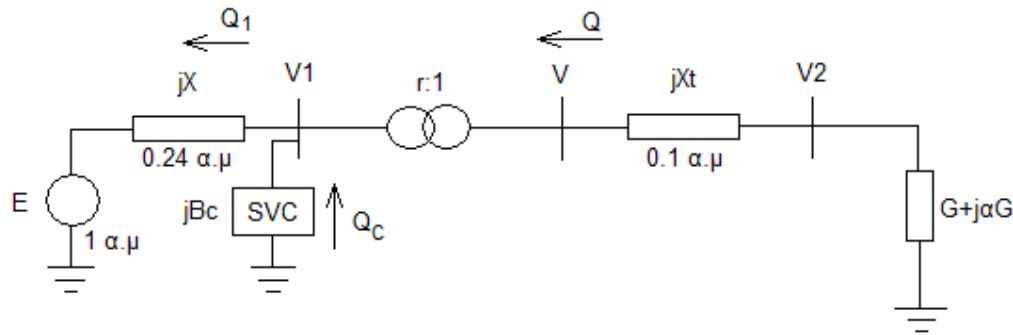
**Πίνακας 5.2** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο πρωτεύουσας τάσης μέσω πυκνωτή συνδεδεμένου στη MT και έλεγχο δευτερεύουσας τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ (αποτελέσματα προσομοίωσης)

$\Sigma.I$	$P_{\max} (\alpha.\mu)$	$B_{C\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{1\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{2\max P} (\alpha.\mu)$	$r_{\max P} (\alpha.\mu)$
0.93	2.77	3.14	0.99	0.81	0.97

## 5.2 Ρύθμιση YT μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ

Σε αυτή τη παράγραφο και πάλι έχουμε έλεγχο πρωτεύουσας και δευτερεύουσας τάσης, ωστόσο ο έλεγχος της πρωτεύουσας τάσης γίνεται με χρήση SVC το οποίο είναι συνδεδεμένο στον υποσταθμό υποβιβασμού, από τη πλευρά της υψηλής τάσης. Τα αποτελέσματα σε σχέση με τη παράγραφο 5.1 διαφέρουν κυρίως λόγω της ακαριαίας λειτουργίας του SVC σε σχέση με τις συστοιχίες εγκάρσιων πυκνωτών και λόγω της θέσης που είναι τοποθετημένη η άεργος αντιστάθμιση, αφού παρέχεται απευθείας στο ζυγό του οποίου ελέγχει τη τάση.

Το μονογραμμικό σχέδιο του δικτύου που εξετάστηκε φαίνεται στο Σχήμα 5.10:



Σχήμα 5.10 Ακτινικό δίκτυο με Μ/Σ υποβιβασμού με ΣΑΤΥΦ, συσκευή αέργου ρύθμισης και φορτίο

### 5.2.1 Θεωρητικοί υπολογισμοί

Το δίκτυο του Σχήματος 5.10, όπως και αυτό του Σχήματος 5.1, μπορεί να χωριστεί σε δύο υποδίκτυα. Το πρώτο περιλαμβάνει το δίκτυο υψηλής τάσης, ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει την αντίδραση σκεδάσεως ανηγμένη στη μέση τάση. Κάθε υποδίκτυο έχει τη δική του μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, η μικρότερη από τις οποίες αποτελεί τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συνολικού δικτύου.

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του υποδικτύου υψηλής τάσης δίνεται από τη σχέση:

$$P_{\max 1} = \frac{EV_1}{X} \quad (5.13)$$

Η σχέση (5.1) της προηγούμενης ενότητας 5.1.1 εξακολουθεί να ισχύει, αλλά τώρα η ροή αέργου ισχύος  $Q$  είναι:

$$Q = \frac{V_1 - EV_1 \cos \delta}{X} - Q_c \quad (5.14)$$

όπου

$$Q_c = B_c V_1^2 = K(V_{1o} - V_1) \quad (5.15)$$

Αυτό έχει ως συνέπεια η διακρίνουσα της σχέσης (5.1) να μη μηδενίζεται αφού η σχέση (5.5) δεν έχει τώρα λύση. Έτσι η μέγιστη ισχύς δίνεται από τα όρια στατικής ευστάθειας του συστήματος.

Στους θεωρητικούς υπολογισμούς για τον προσδιορισμό της μέγιστης ισχύος, η τιμή της πρωτεύουσας τάσης  $V_1$  ισούται με τη τιμή της πρωτεύουσας τάσης που προκύπτει από τη  $V$ - $Q$  χαρακτηριστική του SVC για μέγιστη άεργη αντιστάθμιση. Για τον υπολογισμό της  $V_{1\max P}$  χρησιμοποιούμε τη σχέση που διέπει τη λειτουργία του SVC στη κατάσταση ισορροπίας για συνθήκες μέγιστης ισχύος ( $B_C = B_{C\max P}$ ):

$$V_1^2 B_C = K(V_{1o} - V_1) \quad (5.16)$$

Ο υπολογισμός της χωρητικής αγωγιμότητας αντιστάθμισης στη μέγιστη ισχύ προκύπτει από το ισοζύγιο αέργου ισχύος για συνθήκες μέγιστης ισχύος ( $\delta=90^\circ$ ,  $V_1=V_{1\max P}$ ):

$$\frac{EV_1 \cos \delta - V_1^2}{X} + V_1^2 B_C = I^2 X_t + aP \quad (5.17)$$

όπου το ρεύμα  $I$  δίνεται από τη σχέση (5.18):

$$I = \sqrt{\frac{P^2(1+a^2)}{V_2^2}} \quad (5.18)$$

Για τον υπολογισμό του λόγου μετασχηματισμού  $r$  στη μέγιστη ισχύ, χρησιμοποιούμε την διτετράγωνη εξίσωση:

$$(V_1/r)^4 + (2QX_t - V_{2o}^2)(V_1/r)^2 + X_t^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (5.19)$$

όπου το  $P_{\max}$  δίνεται από τη σχέση (5.13) και το  $Q$  από τη σχέση (5.14)

Επιλύοντας τη σχέση (5.17) ως προς  $V_{1\max P}/r$  έχουμε:

$$\frac{V_1}{r} = \sqrt{\frac{V_{2o}^2 - 2QX_t \pm \sqrt{V_{2o}^2 - 4V_{2o}^2 QX_t - 4X_t^2 P^2}}{2}} \quad (5.20)$$

Από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (5.13), (5.16), (5.17), (5.18) και (5.20) προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.3:

**Πίνακας 5.3** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο πρωτεύουσας τάσης μέσω SVC συνδεδεμένου στην YT και έλεγχο δευτερεύουσας τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ

$\Sigma.I$	$P_{\max} (\alpha.\mu)$	$B_{C\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{1\max P} (\alpha.\mu)$	$V_{2\max P} (\alpha.\mu)$	$r_{\max P} (\alpha.\mu)$
0.93	3.88	7.94	0.93	1.0	0.77

Από τις τιμές του πίνακα 5.3 διαπιστώνουμε ότι στη μέγιστη ισχύ ο λόγος μετασχηματισμού παίρνει την τιμή  $r_{\max P}=0.77$  α.μ η οποία είναι λίγο μικρότερη από την ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει στη πράξη ο λόγος μετασχηματισμού ενός ΣΑΤΥΦ. Από τις προσομοιώσεις θα βρεθούν οι αντίστοιχες τιμές των μεγεθών του πίνακα 5.3 για  $r_{\max P}=0.8$  α.μ. Οι τιμές αυτές βέβαια δεν θα διαφέρουν αισθητά από τις θεωρητικά υπολογισμένες.

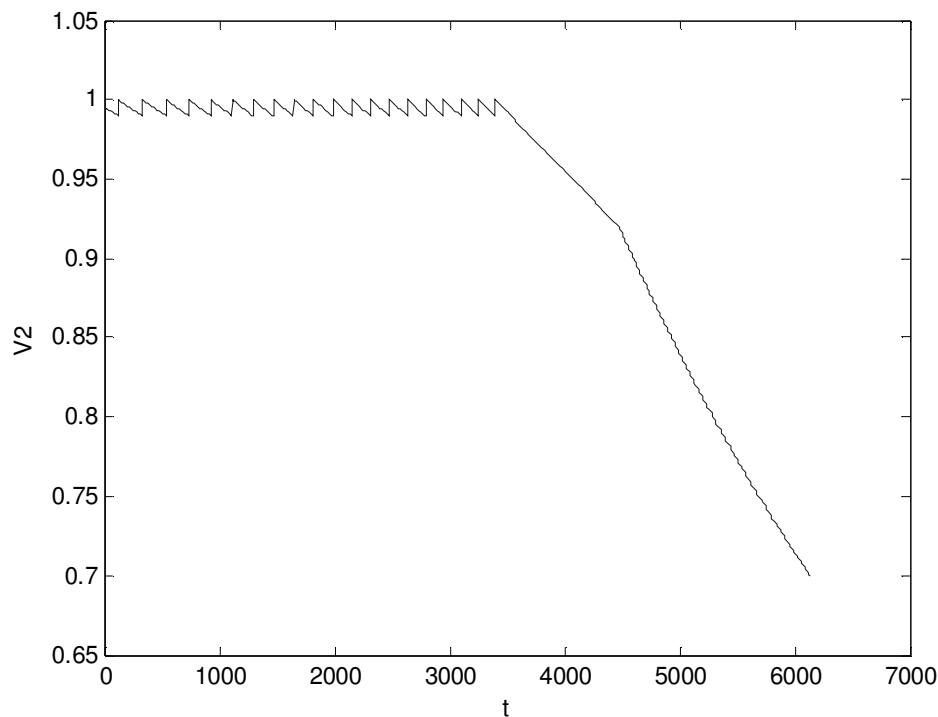
## 5.2.2 Προσομοίωση για ρύθμιση YT μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ

Όπως και στο σενάριο ελέγχου της παραγράφου 5.1 ο συντελεστής ισχύος του ζυγού του φορτίου θεωρείται σταθερός και ίσος με 0.93 (επαγωγικός). Η μεταβολή του φορτίου ακολουθεί τη σχέση (5.10). Η συμπεριφορά του SVC υπακούει στη σχέση ισορροπίας του, μιας και εξετάζουμε ευστάθεια τάσης μακράς διάρκειας:

$$\dot{B}_C = 0 \Rightarrow K(V_{2o} - V_2) - V_2^2 B_C = 0 \quad (5.21)$$

Η μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ για τον έλεγχο της δευτερεύουσας τάσης διανομής υπακούει στη σχέση (5.12).

Στα Σχήματα 5.11-5.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης:

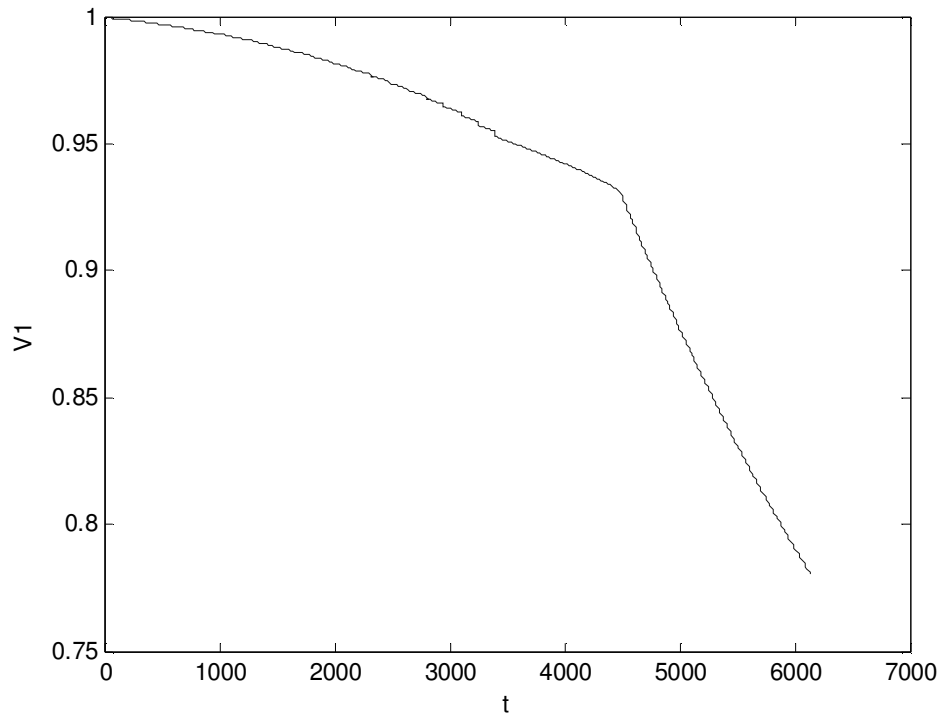


**Σχήμα 5.11** Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση μέσω ΣΑΤΥΦ και ρύθμιση YT μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς

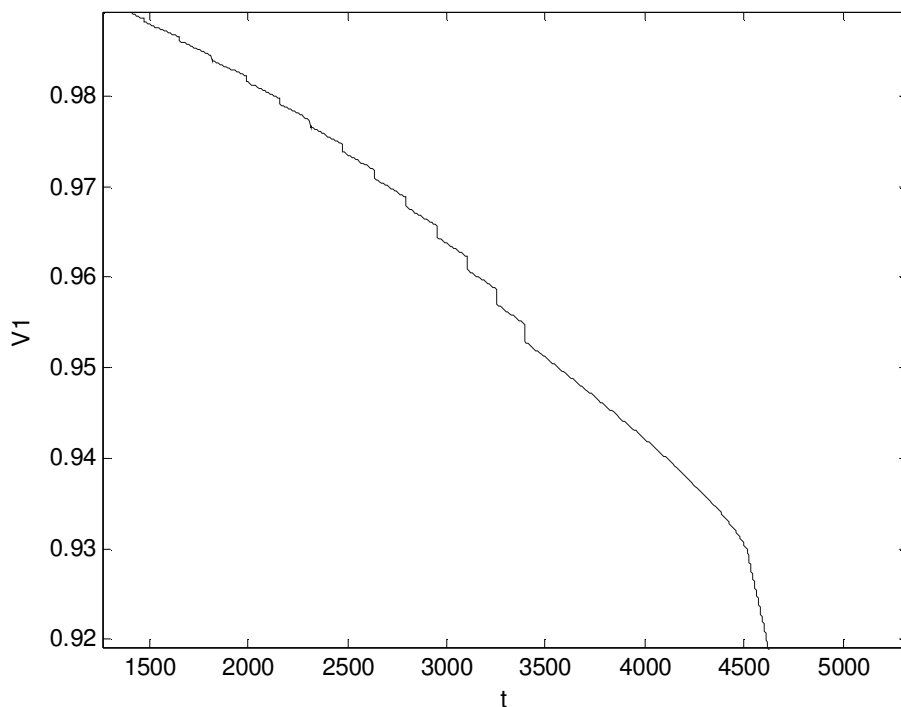
Από τα Σχήματα 5.11 και 5.16 παρατηρούμε ότι η δευτερεύουσα τάση διανομής αρχίζει να καταρρέει πριν επιτευχθεί η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Αυτό συμβαίνει επειδή ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φτάνει την ελάχιστη τιμή του (0.8 α.μ) πριν την μέγιστη ισχύ, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δευτερεύουσα τάση διανομής να πάψει να ρυθμίζεται προτού το σύστημα φτάσει τα όρια ευστάθειας του.



Επίσης από τα Σχήματα 5.11 και 5.15 παρατηρούμε ότι μόλις η χωρητική αγωγιμότητα του SVC φτάσει τη μέγιστη τιμή του ο ρυθμός μείωσης της δευτερεύουσας τάσης διανομής γίνεται πιο απότομος. Ο λόγος για αυτή τη συμπεριφορά είναι ότι, ενώ το SVC χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της πρωτεύουσας τάσης του μετασχηματιστή, η αύξηση της χωρητικής αγωγιμότητας του αυξάνει γενικά τις τάσεις του δικτύου με αποτέλεσμα να επωφελείται και η δευτερεύουσα τάση διανομής από αυτήν την αύξηση.



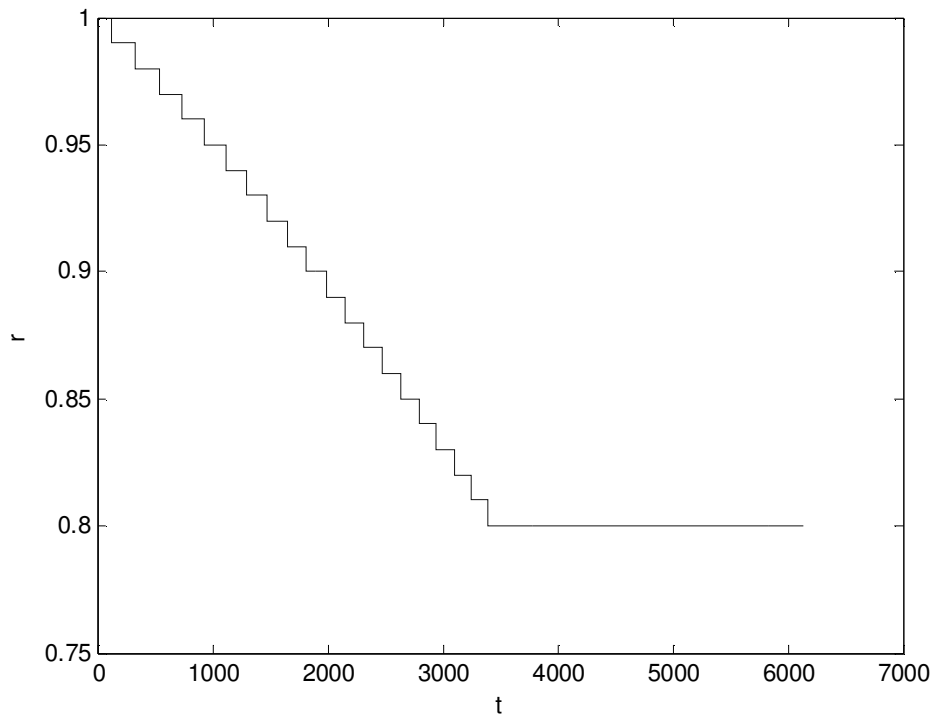
**Σχήμα 5.12** Πρωτεύουσα τάση για ρύθμιση μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ



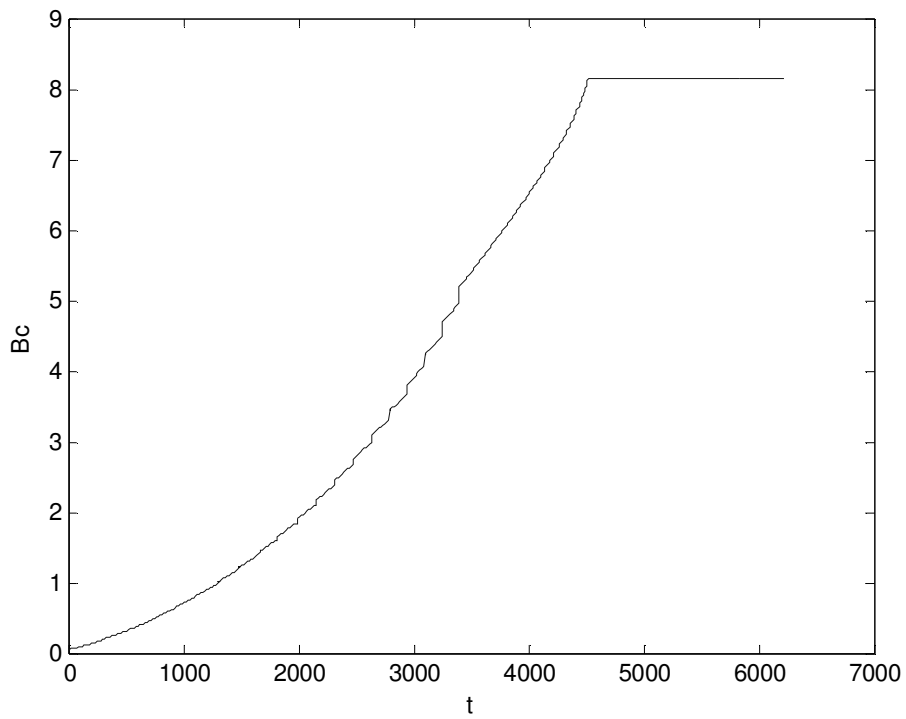
**Σχήμα 5.13** Λεπτομέρεια πρωτεύουσας τάσης

Στο Σχήμα 5.13 παρατηρούμε ότι παρότι το SVC ρυθμίζει με συνεχή τρόπο την πρωτεύουσα τάση, αυτή παρουσιάζει κάποιες διακριτές μεταβολές. Αυτές οι μεταβολές οφείλονται στη διακριτή λειτουργία του ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ στη προσπάθεια του να αυξήσει τη δευτερεύουσα τάση διανομής μειώνει το λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή σε διακριτά βήματα με αποτέλεσμα να μειώνεται η πρωτεύουσα τάση σε κάθε μείωση του λόγου μετασχηματισμού.

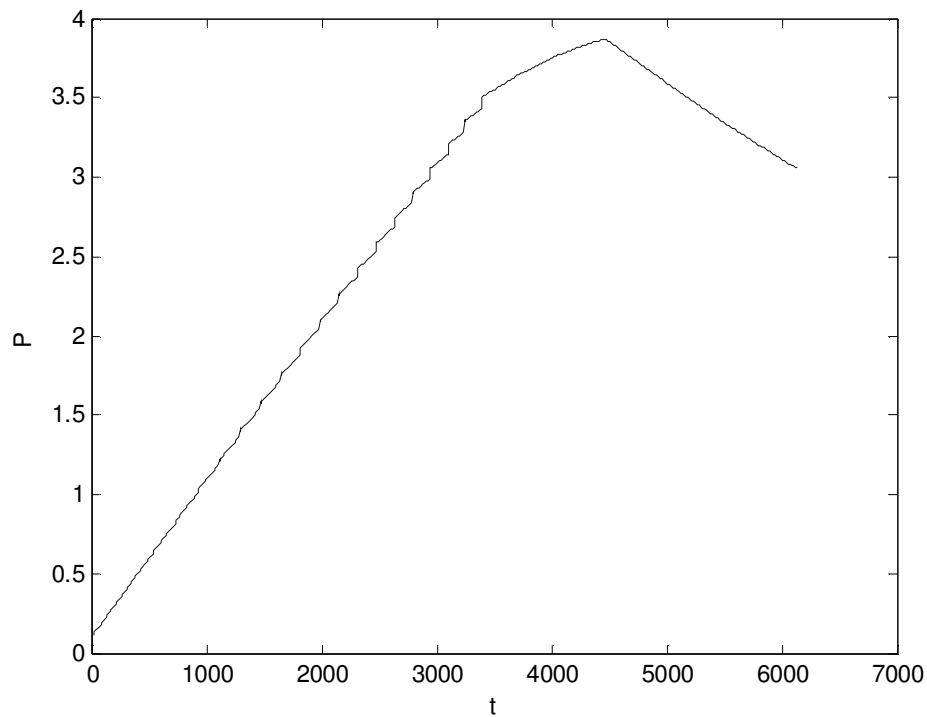
Μόλις η χωρητική αγωγιμότητα του SVC φτάσει τη μέγιστη τιμή της η πρωτεύουσα τάση πάει να ρυθμίζεται και καταρρέει.



**Σχήμα 5.14** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση ΥΤ μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ



**Σχήμα 5.15** Χωρητική αγωγιμότητα SVC



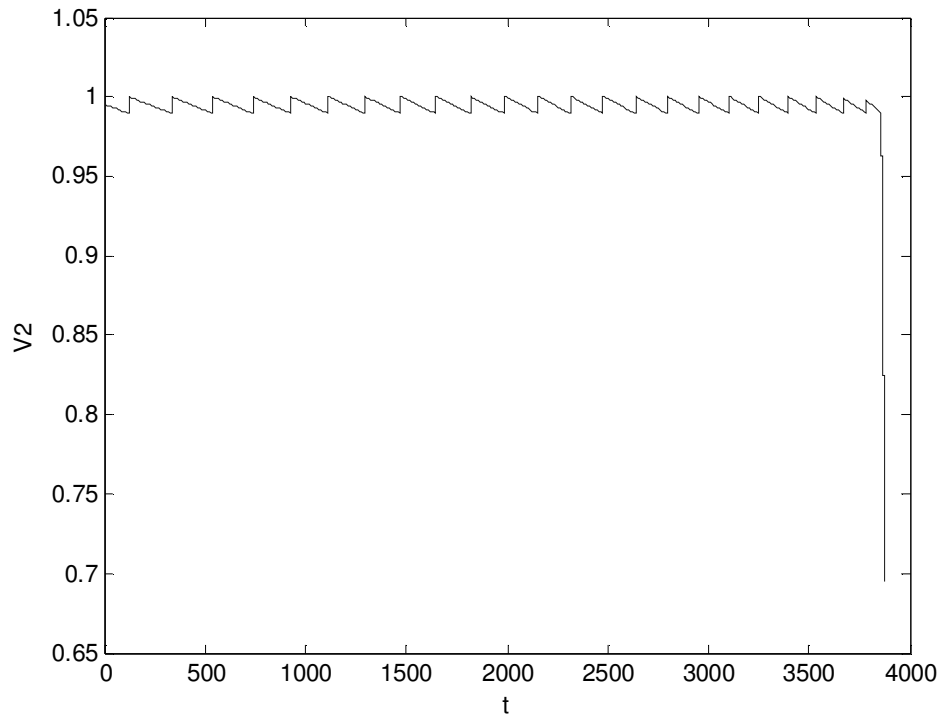
**Σχήμα 5.16** Ενεργός ισχύς για ρύθμιση YT μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση MT μέσω ΣΑΤΥΦ

Από την παραπάνω προσομοίωση προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 5.4:

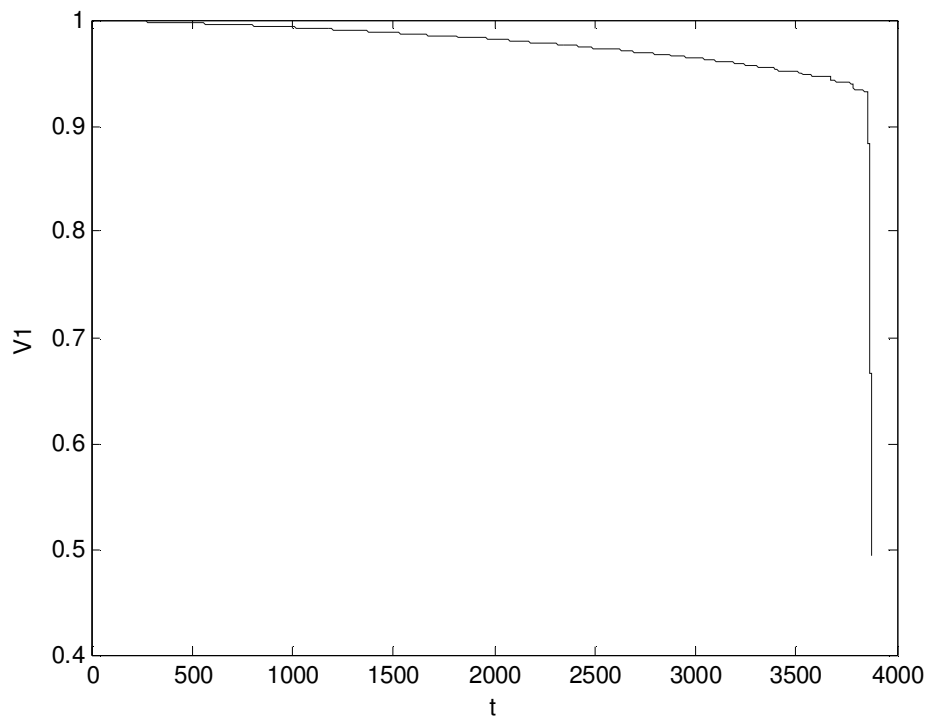
**Πίνακας 5.4** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για έλεγχο πρωτεύουσας τάσης μέσω SVC συνδεδεμένου στην YT και έλεγχο δευτερεύουσας τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ (αποτελέσματα προσομοίωσης)

<b>Σ.Ι</b>	<b><math>P_{\max}</math> (α.μ)</b>	<b><math>B_{C\max P}</math> (α.μ)</b>	<b><math>V_{1\max P}</math> (α.μ)</b>	<b><math>V_{2\max P}</math> (α.μ)</b>	<b><math>\Gamma_{\max P}</math> (α.μ)</b>
0.93	3.87	8.14	0.915	0.93	0.8

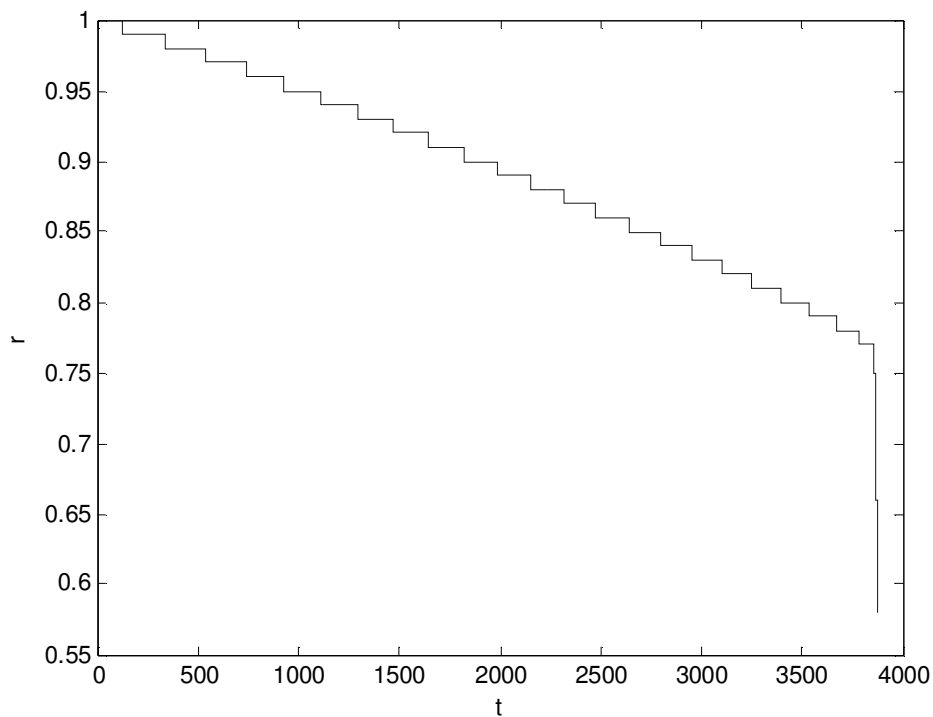
Στα Σχήματα 5.17-5.20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση που δεν επιβάλλονται όρια στο λόγο μετασχηματισμού του μετασχηματιστή.



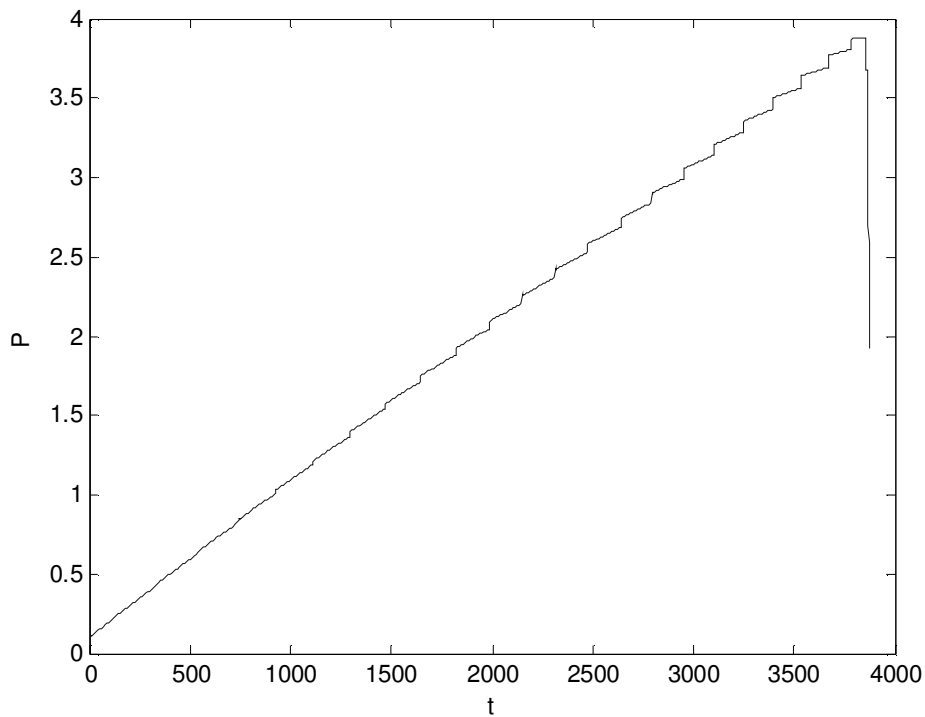
**Σχήμα 5.17** Δευτερεύουσα τάση διανομής για ρύθμιση μέσω ΣΑΤΥΦ και ρύθμιση ΥΤ μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς (όρια  $r$  αγνοούνται)



**Σχήμα 5.18** Πρωτεύουσα τάση για ρύθμιση μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ (όρια  $r$  αγνοούνται)



**Σχήμα 5.19** Λόγος μετασχηματισμού μετασχηματιστή για ρύθμιση ΥΤ μέσω SVC συνδεδεμένου στη πλευρά της μεταφοράς και ρύθμιση ΜΤ μέσω ΣΑΤΥΦ (όρια  $r$  αγνοούνται)



**Σχήμα 5.20** Ενεργός ισχύς συναρτήσει του χρόνου (όρια  $r$  αγνοούνται)

Από τα Σχήματα 5.17 έως 5.20 διαπιστώνουμε ότι οι τιμές του πίνακα 5.3 επαληθεύονται. Επιπλέον διαπιστώνουμε ότι σε αντίθεση με τη περίπτωση που επιβλήθηκαν όρια στο λόγο μετασχηματισμού, χωρίς την επιβολή ορίων η δευτερεύουσα τάση καταρρέει με την επίτευξη της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και όχι νωρίτερα.

Ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά στα θεωρητικά αποτελέσματα είναι ότι το SVC λειτουργεί σχεδόν ακαριαία και επομένως ο ρυθμός παροχής αέργου αντιστάθμισης είναι ίσος με τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης αέργου ισχύος από τον ζυγό του οποίου η τάση ελέγχεται από το SVC.





## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 6.1 Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της παρούσας εργασίας εξετάστηκαν συμβατικά και εναλλακτικά σενάρια για τον έλεγχο της τάσης σε υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και συντελεστή ισχύος σε ακτινικό δίκτυο. Αρχικά παρουσιάστηκε η περίπτωση ενός ακτινικού δικτύου χωρίς κανέναν έλεγχο τάσης ή συντελεστή ισχύος, ώστε να καθοριστούν τα βασικά μεγέθη για τη σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου. Κατά τη θεωρητική μελέτη κάθε σεναρίου θεωρήθηκε ότι το ΣΑΤΥΦ και οι εγκάρσιοι πυκνωτές (όπου χρησιμοποιήθηκαν) λειτουργούσαν με συνεχή τρόπο και με μηδενικό εύρος νεκρής ζώνης. Αυτό έγινε κυρίως για να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί. Στις προσομοιώσεις ωστόσο δεν έγινε κάτι τέτοιο. Για τη προσομοίωση της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ χρησιμοποιήθηκε το διακριτό μοντέλο που παρουσιάστηκε στη παράγραφο 2.2. Ομοίως οι εγκάρσιοι πυκνωτές κατά τις προσομοιώσεις μοντελοποιήθηκαν με το διακριτό μοντέλο της παραγράφου 2.3.1. Το SVC και το STATCOM λόγω της ακαριαίας λειτουργίας του μοντελοποιήθηκαν ως συσκευές με συνεχή συμπεριφορά, με βάση τις V-Q χαρακτηριστικές τους που παρουσιάστηκαν στη παράγραφο 2.3.2. Επιπλέον σημειώνεται ότι για λόγους απλοποίησης του εξεταζόμενου συστήματος έγινε διαχωρισμός χρονικών κλιμάκων. Με άλλα λόγια, θεωρήθηκε ότι το SVC και το STATCOM βρίσκονταν σε κατάσταση ισορροπίας αφού στην παρούσα εργασία δεν ασχοληθήκαμε με τις βραχυπρόθεσμες επιπτώσεις αυτών των μηχανισμών στο δίκτυο. Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν στη MATLAB.

Στη κεφάλαια 3, 4, και 5 παρουσιάστηκαν τα διάφορα σενάρια ελέγχου. Αρχικά εξετάστηκε το συμβατικό σενάριο ελέγχου της τάσης με ΣΑΤΥΦ με και χωρίς έλεγχο του συντελεστή ισχύος. Παρατηρήθηκε ότι χωρίς έλεγχο του συντελεστή ισχύος έχουμε μια αύξηση της μεταφερόμενης ισχύος κατά 25% σε σχέση με τη περίπτωση μη ελέγχου της τάσης, ενώ για τη περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος η παρατηρούμενη αύξηση ήταν της τάξης του 75%. Φυσικά στη πράξη αυτή η αύξηση ήταν μικρότερη λόγω των ορίων στη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ.

Στη συνέχεια εξετάστηκε η περίπτωση ελέγχου της τάσης διανομής με χρήση εγκάρσιων πυκνωτών. Το ΣΑΤΥΦ θεωρήθηκε ότι ήταν απενεργοποιημένο. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση εγκάρσιων πυκνωτών για τον έλεγχο της τάσης και όχι του συντελεστή ισχύος επιφέρει μεγαλύτερη αύξηση στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του δικτύου. Για την υλοποίηση του σεναρίου αυτού απαιτούνται μικρότερες βαθμίδες απ'ότι για τον έλεγχο του συντελεστή ισχύος, ώστε η νεκρή ζώνη των πυκνωτών να είναι ίδια με τη νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ.

Το επόμενο σενάριο που εξετάστηκε ήταν ο έλεγχος της τάσης διανομής με αντικατάσταση των εγκάρσιων πυκνωτών με SVC. Όσον αφορά τους θεωρητικούς υπολογισμούς η αύξηση στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ ήταν ίδια με τη περίπτωση ελέγχου της τάσης με εγκάρσιους πυκνωτές. Ωστόσο στη πράξη η συμπεριφορά του SVC ήταν πολύ καλύτερη, επιτυγχάνοντας τη θεωρητική μέγιστη ισχύ, λόγω της συνεχούς και γρήγορης λειτουργίας του. Οι πυκνωτές λόγω της χρονικής

καθυστερήσης στη λειτουργία τους δεν ήταν σε θέση να επιτύχουν στη πράξη το θεωρητικό μέγιστο. Η συμπεριφορά του STATCOM ήταν ακριβώς ίδια με αυτή του SVC.

Τέλος το κεφάλαιο 5 εξετάζει τη περίπτωση του ταυτόχρονου ελέγχου της πρωτεύουσας και δευτερεύουσας τάσης του μετασχηματιστή με δύο διαφορετικά σενάρια. Και στις δύο περιπτώσεις ο έλεγχος της δευτερεύουσας τάσης διανομής γίνεται μέσω του ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή. Στη πρώτη περίπτωση ο έλεγχος της πρωτεύουσας τάσης γίνεται με χρήση εγκάρσιων πυκνωτών που συνδέονται στη μεριά της μέσης τάσης. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν μια αύξηση στη μεταφερόμενη ισχύ της τάξης του 218%. Αυτή η αύξηση ωστόσο δε μπορεί να επιτευχθεί στη πράξη εξαιτίας της αργής απόκρισης των πυκνωτών και κυρίως εξαιτίας των ορίων στη μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ. Η προσομοίωση δίνει τη πραγματική μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και όπως προκύπτει η αύξηση είναι μικρότερη από αυτή που επιτυγχάνεται στη περίπτωση ελέγχου μόνο της δευτερεύουσας τάσης διανομής με εγκάρσιους πυκνωτές, SVC και STATCOM.

Για το λόγο αυτό εξετάζεται η περίπτωση ελέγχου της πρωτεύουσας τάσης με χρήση SVC συνδεδεμένου στη μεριά της υψηλής τάσης. Αυτό το σενάριο ελέγχου έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα απ'όλα τα σενάρια όσον αφορά την αύξηση στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ. Η αύξηση στη μεταφερόμενη ισχύ, σύμφωνα με τους θεωρητικούς υπολογισμούς ήταν της τάξης του 288%. Στη πράξη η μεταφερόμενη ισχύς ήταν ελάχιστα μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογισμένη λόγω πάλι των ορίων στο λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ.

Πρέπει να αναφέρουμε ότι παρ'ότι τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν και κυρίως το τελευταίο αυξάνουν πολύ τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ απαιτούν μεγάλες ποσότητες αέργου αντιστάθμισης, πολύ μεγαλύτερες από τη περίπτωση ελέγχου του συντελεστή ισχύος. Αυτή η άεργος αντιστάθμιση σε περίπτωση που προέλθει από συστοιχίες πυκνωτών ή συσκευών FACTS ενδέχεται να είναι μια οικονομικά ασύμφορη λύση. Ωστόσο ενεργά φορτία με μετατροπείς ισχύος καθώς και διεσπαρμένοι παραγωγοί που συνδέονται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος είναι σε θέση να παράσχουν αυτές τις ποσότητες αέργου ισχύος με μικρή οικονομική επιβάρυνση κάνοντας εφικτή την υλοποίηση των σεναρίων που εξετάστηκαν παραπάνω.

Στον πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της εργασίας:

**Πίνακας 6.1** Μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για όλα τα σενάρια ελέγχου της τάσης

Περίπτωση	Σ.Ι	$P_{\max}$ (α.μ)	$B_{C\max P}$ (α.μ)	$V_{2\max P}$ (α.μ)	$V_{1\max P}$ (α.μ)	$\Gamma_{\max P}$ (α.μ)
<b>Χωρίς ΣΑΤΥΦ</b>	0.93	1.0	0	0.605	-	1.0
	1.0	1.47	1.16	0.707	-	1.0
<b>Με ΣΑΤΥΦ</b>	0.93	1.24	0	1.0	-	0.64
	0.93	1.12	0	1.0	-	0.8
	1.0	1.75	0.69	1.0	-	0.7
	1.0	1.67	0.66	1.0	-	0.8
<b>SVC</b>	0.93	2.83	4.15	0.961	-	1.0
<b>STATCOM</b>	0.93	2.83	4.15	0.961	-	1.0

<b>Εγκάρσιοι πυκνωτές</b>	0.93	2.94	4.10	1.0	-	1.0
	0.93	2.83	4.15	0.961	-	1.0
<b>Εγκάρσιοι πυκνωτές και ΣΑΤΥΦ</b>	0.93	3.18	5.88	1.0	1.0	1.6
	0.93	2.77	3.14	0.99	0.81	0.97
<b>SVC και ΣΑΤΥΦ</b>	0.93	3.88	7.94	1.0	0.93	0.77
	0.93	3.87	8.14	0.915	0.93	0.8

## 6.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Όπως είναι φανερό υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας εργασίας σε μελλοντική έρευνα.

Καταρχάς στη παρούσα εργασία εξετάστηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο, στη πράξη όμως τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά πιο πολύπλοκα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων λοιπόν μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων ελέγχου που εξετάστηκαν. Ρεαλιστικότερα αποτελέσματα λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν αν η μελέτη της παρούσας εργασίας πραγματοποιηθεί σε ένα μη ακτινικό δίκτυο.

Επίσης στην παράγραφο 3.4.2 όπου εξετάζεται η περίπτωση ρύθμισης της τάσης διανομής μέσω ΣΑΤΥΦ και ρύθμισης του συντελεστή ισχύος μέσω πυκνωτών, οι διαφορετικές χρονικές κλίμακες των συσκευών ρύθμισης δεν λήφθηκαν υπόψη. Σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εξεταστεί ο διαχωρισμός των χρονικών κλιμάκων σύμφωνα με τη μέθοδο που παρουσιάζεται στη παράγραφο 2.1.6.

Επιπλέον στα κεφάλαια 4 και 5 όπου εξετάστηκε η χρήση συσκευών FACTS (SVC και STATCOM) για τη ρύθμιση της τάσης θεωρήθηκε ότι η κλίση της χαρακτηριστικής V-Q αυτών των συσκευών παρέμενε σταθερή ( $K=100$ ). Αυτό δεν ισχύει απόλυτα. Οι συσκευές SVC και STATCOM στη πράξη έχουν μια μέγιστη αντισταθμιστική ισχύ, για να επιτευχθεί λοιπόν η υπολογισμένη άεργη αντισταθμιστική των διαφόρων μεθόδων ρύθμισης είναι πιθανό να χρειαστεί να συνδεθούν παράλληλα παραπάνω από μία συσκευές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κλίση της συνολικής χαρακτηριστικής V-Q να μεταβληθεί σε σχέση με τη κλίση για μια συσκευή. Μια αναλυτικότερη μελέτη θα πρέπει λοιπόν να λάβει υπόψη τον παραπάνω παράγοντα.

Τέλος στη παράγραφο 5.1 εξετάστηκε το σενάριο ρύθμισης της υψηλής τάσης μέσω πυκνωτών συνδεδεμένων στη πλευρά της διανομής και ρύθμισης της μέσης τάσης μέσω ΣΑΤΥΦ. Όπως διαπιστώθηκε λόγω της χρονικής καθυστέρησης των πυκνωτών η θεωρητικά υπολογισμένη μέγιστη ισχύς είναι αδύνατο να επιτευχθεί. Για λόγους πληρότητας θα μπορούσε λοιπόν να εξεταστεί σε μελλοντική έρευνα η περίπτωση αντικατάστασης των πυκνωτών με SVC που έχουν σχεδόν ακαριαία απόκριση και να επαληθευθεί στη πράξη η θεωρητικά υπολογισμένη μέγιστη ισχύς.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Β. Κ. Παπαδιά, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής ενέργειας”, Τόμος Ι Αθήνα 1985.
2. Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα 2001.
3. Ν. Σακελλαρίδης, “Εφαρμογές μη γραμμικής δυναμικής στην ανάλυση ευστάθειας τάσης”, Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αθήνα 2010
4. Β. Κ. Παπαδιά, Κ. Βουρνά, “Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έλεγχος συχνότητας και τάσεως”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
5. Γ. Κορρές, “Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς”, Αθήνα 2007
6. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D. ,D’haeseleer W., Belmans R., “DISTRIBUTED GENERATION: DEFINITION, BENEFITS AND ISSUES”, K.U.Leuven - Energy Institute (2003)
7. Yong Hua Song, Allan T Johns , Flexible AC Transmission Systems, IEE Power and Energy series (1999)
8. Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, “Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control”, Springer (2006)
9. C. D. Vournas, N. G. Sakellaridis , J. Kabouris, “Investigation of capacitor switching strategies in HV/MV substations” IEEE/PES 2006 General Meeting, Montreal (2006).
10. P. Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, 1996.
11. C. W. Taylor, “Power System Voltage Stability”, EPRI/McGraw Hill (1994).
12. Pertti Järventausta, Sami Repo, Antti Rautiainen, Jarmo Partanen, “Smart grid power system control in distributed generation environment” European SmartGrids Technology Platform.
13. [www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf](http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf).
14. F. Paul de Mello, “Solid-state technology: Enhancing power system equipment”, IEEE Power & Energy magazine, (2005)
15. Hui Ye, A. N. Michel, “Stability Theory for Hybrid Dynamical Systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, No 4, April 1998.
16. M. Noroozian, “SVC modeling in power systems” ABB Power systems AB Reactive power compensation division

17. Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugui, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems" IEEE Press (2000)
18. Peças Lopes, J. A., Mendonça, A., Fonseca, N., Seca, L., L. A., "Voltage and Reactive Power Control Provided by DG Units", CIGRE Symposium "Power Systems with Dispersed Generation", Athens, Greece, 13-16th April, 2005
19. T. Van Cutsem, C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Springer, 2008.