ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση Προσομοίωσης εγκάρσιου στατικού αντισταθμιστή στο πρόγραμμα Matlab

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Η. Λαμπρίδης

Επιβλέπων: Γιώργος Κορρές

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2009

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση Προσομοίωσης εγκάρσιου στατικού αντισταθμιστή στο πρόγραμμα Matlab

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αλέξανδρος Η. Λαμπρίδης

Επιβλέπων: Γιώργος Κορρές

Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Ιουνίου 2009.
Αθήνα, Ιούνιος 2009

.....	.....	.....
Γ. Κορρές	Α.Κλαδάς	Κ.Βουρνάς
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π	Καθηγητής Ε.Μ.Π	Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, Ιούνιος 2009

.....

Αλέξανδρος Η. Λαμπρίδης

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

Copyright © Αλέξανδρος Η. Λαμπρίδης, 2009
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της χρήσης ενός στατικού αέργου αντισταθμιστή για τον έλεγχο της τάσης ενός ζυγού. Σκοπός είναι η ανάλυση της δομής ενός στατικού αέργου αντισταθμιστή μέσω του εργαλείου Simulink του προγράμματος Matlab με τη χρήση δύο μοντέλων του. Το μοντέλοpower_svc υποδεικνύει τον τρόπο λειτουργίας του στατικού αέργου αντισταθμιστή, ενώ το power_svc_1tcr2tscεμφανίζει αναλυτικά τα κυριότερα δομικά στοιχεία του. Με την ολοκλήρωση κάθε μοντέλου, εκτελέστηκε η προσομοίωση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται με γραφικές παραστάσεις. Οι στόχοι της εργασίας ήταν: α) η ανάλυση των δύο μοντέλων του Simulink, και β) η χρήση του power_svc_1tcr3tsc σε ένα σύστημα 14ων ζυγών, προκειμένου να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του κατά την αντιστάθμιση, καθώς και κατά τη διαδικασία του ελέγχου της τάσης στο ζυγό που συνδέθηκε. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή ήταν η ανάλυση των γραφικών παραστάσεων που προέκυψαν από την σύνδεση του στατικού αέργου αντισταθμιστή σε διάφορους ζυγούς του συστήματος και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με στατιστικές μεθόδους με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης τελικής θέσης σύνδεσης του. Χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους (ANOVA) παρατηρήθηκε ότι η τοποθέτηση του SVC στους ζυγούς 14,13,12,3,4,5 δεν επέφερε σημαντική βελτίωση στην αντιστάθμιση.

Λέξεις Κλειδιά

SVC, power_svc, power_svc_1tcr3tsc, Simulink

Abstract

The subject of this thesis is the simulation of the use of a static var compensator in bus voltage regulation. The scope is the analysis of the structure of a SVC with the Matlab Simulink toolbox by the use of two models. The power_svc model indicates the basic functions of a SVC whereas the power_svc_1tcr3tsc model focuses more thoroughly on the inner configuration of its structure. By the end of every analysis, the simulation is ran and the results are presented in graphs. The purpose of the thesis is to (1) analyze the two models of Simulink and (2) use the power_svc_1tcr3tsc in a 14 bus system in order to observe the SVC's reactive compensation as well as the process of bus voltage control. The method used in the application is the analysis of the graphical representations which were the results of the connection of the SVC in various system buses and the comparison of the results with statistical methods with the purpose of deciding the optimal connection point in the circuit. By the methods (ANOVA, Student's test) it was observed that connecting the SVC in buses 14, 13, 12,3,4,5 resulted in no significant difference in the improving the power compensation.

Key Words

SVC, power_svc , power_svc_1tcr3tsc, Simulink

Ευχαριστώ τους ανθρώπους που με βοηθούν ακόμα…..

Πίνακας Περιεχόμενων

1. Εισαγωγή Σελ 10

2. SVC Phasor Model Σελ 23

3. SVC Detailed Model Σελ 41

4. Εφαρμογή Σελ 75

5. Μοντέλα αναπαράσταση SVC σε πρόγραμμα ροής φορτίου Σελ 89

6. Παράρτημα Ι: Ηλεκτρονικά Ισχύος Σελ 101

7. Παράρτημα ΙΙ: Τιμές εφαρμογής Σελ 105

Πίνακας Σχημάτων

Σχ. 1.1 STATCOM Σελ 19

Σχ. 1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη STATCOM Σελ 19

Σχ. 1.3 Διάταξη Στατικού Αέργου Αντισταθμιστή (SVC). Σελ21

Σχ. 1.4 Σύστημα με στατικό άεργο αντισταθμιστή SVC Σελ 23

Σχ. 1.5 Εγκατάσταση SVC υποσταθμού 500KV στην Βραζιλία Σελ 24

Σχ. 1.6 Εγκατάσταση υποσταθμού SVC Σελ 25

Σχ. 2.1 SVC Phasor Model Σελ 28

Σχ. 2.2 3φ προγραμματιζόμενη πηγή Σελ 29

Σχ. 2.3 Παράθυρο παραμέτρων 3φ προγραμματιζόμενης πηγής Σελ 29

Σχ. 2.4 Ισοδύναμη αντίσταση Thevenin Σελ 31

Σχ. 2.5 : Μετατροπή σε συμμετρικές συνιστώσες Σελ 32

Σχ. 2.6 : Σχηματική αναπαράσταση μπλοκ ελεγκτή SVC Σελ 33

Σχ. 2.7 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC Σελ 34

Σχ. 2.8 Υποσύστημα επιλογής λειτουργίας ελεγκτή SVC Σελ 35

Σχ. 2.9 Σημείο διακλάδωσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας Σελ 35

Σχ. 2.10 Επιλογή χρήσης αρνητικής ακολουθίας Σελ 36

Σχ. 2.11 Υποσύστημα καθυστέρησης μεταφοράς σήματος Σελ 36

Σχ. 2.12 Υποσύστημα μετατροπής συμμετρικών συνιστωσών σε ρεύμα γραμμής τριφασικού συστήματος

Σελ 37

Σχ. 2.13 Σημείο μετατροπής σήματος σε ισοδύναμο ρεύμα γραμμής Σελ 38

Σχ. 2.14 Υποσύστημα υπολογισμού ρεύματος φάσης c. Σελ 38

Σχ. 2.15 Συλλογή σημάτων για γραφικούς υπολογισμούς Σελ 39

Σχ. 2.16 Υποσύστημα υπολογισμού δεδομένων σχεδίασης γραφικών παραστάσεων

Σελ 39

Σχ. 2.17 Μοντέλο SVC : Σύστημα παλμογράφου Σελ 40

Σχ. 2.18 Μονάδα επεξεργασίας σήματος Σελ 40

Σχ. 2.19 Παράθυρο παραμέτρων 3φ μετρήσεων Σελ 41

Σχ.2.20 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC (1) Σελ 41

Σχ.2.21 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC (2) Σελ 41

Σχ. 2.22 Γραφική παράσταση μεταβολής της αγωγιμότητας B,B1, του SVC.

Σελ 42

Σχ. 2.23 Γραφική παράσταση μεταβολής της τάσης V,V1 του SVC. Σελ 42

Σχ. 2.24 Χαρακτηριστική I-V του SVC. Σελ 43

Σχ. 3.1 Μπλοκ διάγραμμα δικτύου SVC Detailed Model Σελ 46

Σχ. 3.2 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης Σελ 47

Σχ. 3.3. Παράθυρο παραμέτρων 3φ προγραμματιζόμενης πηγής τάσης Σελ 47

Σχ. 3.4 Ισοδύναμη αντίσταση προς τα ανάντη του ζυγού Σελ 48

Σχ. 3.5 Ωμικό φορτίο Σελ 49

Σχ. 3.6 Παράθυρο παραμέτρων ωμικού φορτίου Σελ 49

Σχ. 3.7 Παράθυρο παραμέτρων μπλοκ 3φ μετρήσεων Σελ 50

Σχ.3.8 Μετασχηματιστής υποβιβασμού Σελ 51

Σχ.3.9 Παράθυρο παραμέτρων μετασχηματιστή (1) Σελ 51

Σχ.3.10 Παράθυρο παραμέτρων μετασχηματιστή (2) Σελ 52

Σχ.3.11 Παράθυρο παραμέτρων μπλοκ 3φ μετρήσεων Σελ 52

Σχ. 3.12 Βαθμίδες αντιστάθμισης Σελ 53

Σχ. 3.13 Υποσύστημα γραφικών παραστάσεων Σελ 53

Σχ. 3.14 Παράθυρο Initial State Settings Σελ 54

Σχ. 3.15 Βαθμίδα πηνίων Σελ 55

Σχ. 3.16 Παράθυρο παραμέτρων βαθμίδας πηνίων Σελ 56

Σχ. 3.17 Κυματομορφή ρεύματος SVC για 3 διαφορετικές γωνίες έναυσης. Σελ 56

Σχ. 3.18 Βαθμίδα πυκνωτών Σελ 59

Σχ. 3.19 Παράθυρο παραμέτρων βαθμίδας πυκνωτών Σελ 59

Σχ.3.20 Εικονίδιο SVC ελεγκτή Σελ 61

Σχ.3.21 Παράθυρο παραμέτρων ελεγκτή SVC Σελ 61

Σχ. 3.22 Μετρητική βαθμίδα ελεγκτή Σελ 61

Σχ.3.23 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή SVC. Σελ 62

Σχ. 3.24 Παράθυρο παραμέτρων μετρητικής βαθμίδας Σελ 63

Σχ. 3.25 Μπλοκ διάγραμμα μετρητικής βαθμίδας Σελ 63

Σχ.3.26 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας Σελ 64

Σχ. 3.27 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας διανομής Σελ 65

Σχ. .3.28 Μπλοκ διάγραμμα μονάδας διανομής Σελ 65

Σχ. 3.29 Υπολογισμός γωνίας έναυσης θυρίστορ βαθμίδας πηνίων Σελ 67

Σχ. 3.30 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας έναυσης Σελ 68

Σχ. 3.31 Μονάδα έναυσης Σελ 68

Σχ. 3.32 Μπλοκ διάγραμμα μονάδας έναυσης Σελ 69

Σχ. 3.33 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας έναυσης θυρίστορ Σελ 69

Σχ. 3.34 Εσωτερικό μονάδας έναυσης Σελ 70

Σχ. 3.35 Μπλοκ διάγραμμα PLL Σελ 70

Σχ. 3.36 BL4 , BL5 Σελ 71

Σχ. 3.37 BL6, BL7, BL8 Σελ 72

Σχ. .3.38 Θύρες εξόδου παλμών έναυσης Σελ 72

Σχ. 3.39 Θύρες εξόδου παλμών προς τις βαθμίδες των θυρίστορ Σελ 73

Σχ. 3.40 Υποσύστημα σχεδίασης γραφικών παραστάσεων Σελ 74

Σχ. 3.41 Γραφική παράσταση τάσης και ρεύματος στη φάση a Σελ 75

Σχ. 3.42 Γραφική παράσταση μεταβολής αέργου ισχύος SVC Σελ 75

Σχ. 3.43 Γραφική παράσταση μετρούμενης τάσης και τάσης αναφοράς Σελ 75

Σχ.3.44 Γραφική παράσταση γωνίας έναυσης TCR Σελ 75

Σχ. 3.45 Γραφική παράσταση πλήθους ενεργοποιημένων βαθμίδων πυκνωτών Σελ 75

Σχ. 4.1 Παράθυρο διαθέσιμων μετρήσεων πολυμέτρου Σελ 78

Σχ. 4.2 Μοντέλο $14^{ων}$ ζυγών στο εργαλείο Simulink του Matlab Σελ 80

Σχ. 4.3 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5 Σελ 81

Σχ. 4.4 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9 Σελ 81

Σχ. 4.5 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14 Σελ 82

Σχ. 4.6 Δίκτυο 14ων ζυγών με το SVC συνδεδεμένο στο ζυγό 14 Σελ 83

Σχ. 4.7 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5 με συνδεδεμένο το SVC Σελ 84

Σχ. 4.8 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9 με συνδεδεμένο το SVC Σελ 85

Σχ. 4.9 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14 με συνδεδεμένο το SVC Σελ 85

Σχ. 4.10 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4 Σελ 87

Σχ. 4.11 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4 Σελ 87

Σχ. 4.12 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4 Σελ 88

Σχ. 4.13 Κυματομορφές SVC Σελ 89

Σχ. 5.1 Σχηματικό διάγραμμα ενός SVC. Σελ 95

Σχ. 5.2 Χαρακτηριστική λειτουργίας SVC. Σελ 96

Σχ. 5.3 Δίκτυο 5 ζυγών Σελ 100

Σχ. 5.4 Αποτελέσματα σύνδεσης του SVC στο ζυγό 4 των 6 μοντέλων. Σελ 100

Σχ. 5.5 Ισοδύναμη επιδεκτικότητα του SVC των 6 μοντέλων Σελ 101

Σχ. 5.6 Γωνία έναυσης των μοντέλων γωνίας έναυσης και συνδυασμένου μοντέλου. Σελ 101

Σχ. 5.7 Τάση και ισοδύναμη επιδεκτικότητα του SVC στα όρια λειτουργίας του.

Σελ 103

Σχ. 5.8 Αριθμός επαναλήψεων υπό διαφορετικά φορτία Σελ 103

Σχ. 1 Κυματομορφές τάσεως και ρεύματος για γωνία έναυσης α Σελ 107

Σχ. 2 Κυματομορφές ρεύματος για γωνίες έναυσης 90^o , 105^o, 140^o Σελ 107

Σχ. 3 Μέθοδος σύνδεσης πυκνωτή σε βαθμίδα SVC. Σελ 108

Σχ. 1 Δεδομένα εφαρμογής SVC. Σελ 110

Σχ. 2 Σελίδα 1 /5 Σελ 111

Σχ. 3 Σελίδα 2 /5 Σελ 112

Σχ. 4 Σελίδα 3 /4 Σελ 113

Σχ. 5 Σελίδα 4 /4 Σελ 114

Πίνακες.

Πιν. 1.1 Οι κυριότερες διατάξεις FACTS Σελ 16

Πιν. 1.2 Συνολική παγκοσμίως εκτιμώμενη εγκατεστημένη ισχύς FACTS Σελ 16

Πιν. 3.1 Ζεύγη τάσης – χρονικών στιγμών μεταβολής της ισοδύναμης πηγής τάσης.

Σελ 55

Πιν. 4.1 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης των ζυγών του δικτύου χωρίς SVC

Σελ 82

Πιν. 4.2 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης ζυγών με σύνδεση SVC στον ζυγό 14

Σελ 86

Πιν. 4.3 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης ζυγών με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4

Σελ 88

Πίν. 4.4 Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα του μέσου της τάσης των ζυγών σε κάθε προσομοίωση

Σελ 91

Πιν. 4.5 Πίνακας αποτελεσμάτων σύνδεσης SVC στους ζυγούς 11,12,13,14,3,4 και 5.

Σελ 92

Πιν. 5.1. Αντιστοιχία μοντέλων στα σχήματα. 6.4 6.5 και 6.6 Σελ 101

Πιν. 5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 6 μοντέλων. Σελ 102

Κεφάλαιο 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Στα περισσότερα διασυνδεδεμένα ΣΗΕ η μεταφερόμενη ισχύς από τις γραμμές περιορίζεται από τη μεταβατική ευστάθεια και την ευστάθεια τάσης. Αυτή η ισχύς όμως ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του συστήματος, μπορεί να φτάσει τα 1000-2000 MW για την ασφαλή λειτουργία μιας γραμμής 500 KV, ενώ το θερμικό της όριο είναι 3000MW. Επομένως αποτελεί μια συνεχή πρόκληση η αύξηση αυτού του ορίου για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των γραμμών, χωρίς βέβαια να διακινδυνεύεται η ασφάλεια και η ευστάθεια του ΣΗΕ.

Στις μέρες μας η ανάγκη αυτή γίνεται επιτακτικότερη, λόγω των δυσκολιών στην επέκταση των δικτύων μεταφοράς, που προκύπτουν από την αδυναμία εύρεσης δρόμων διέλευσης των γραμμών (λόγω των κοινωνικών αντιδράσεων στην αποδοχή της διέλευσης των γραμμών από τις εν λόγω περιοχές), τα υψηλά επιτόκια και την μακροχρόνια απόσβεση των μεγάλων επενδύσεων, παράγοντες που όλο και δυσκολότερα αποδέχεται κάποιος σήμερα στο περιβάλλον της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα πλαίσια της αποδοτικότερης αξιοποίησης των δικτύων μεταφοράς αναπτύχθηκε περί το 1986 η ιδέα των **Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς E.P** (Flexible AC Transmission Systems (FACTS), που αξιοποιώντας την κατάλληλη τεχνολογία ελαχιστοποιούν τη διαφορά μεταξύ του θερμικού ορίου και του ορίου ευστάθειας. Η τεχνολογία που αξιοποιούν βασίζεται στη χρήση αξιόπιστων και μεγάλης ταχύτητας ηλεκτρονικών διακοπτών ισχύος και στους σύγχρονους επεξεργαστές. Επίσης βοήθησε η τεχνολογία οπτικών ινών που επέτρεψε την αποστολή και λήψη σημάτων σε επίπεδα υψηλών τάσεων.

Βεβαίως, βασικότερη όλων υπήρξε η ανάπτυξη τεχνολογίας για την κατασκευή διακοπτικών ηλεκτρονικών στοιχείων με διακοπτική ικανότητα στο επίπεδο των MW.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα ορίζουμε ως Ευέλικτα Συστήματα Μεταφοράς E.P αυτά που ενσωματώνουν στη δομή τους ελεγκτές βασισμένους σε ηλεκτρονικά ισχύος αλλά και άλλους στατικούς ελεγκτές, με στόχο την αύξηση της δυνατότητας ασφαλούς μεταφοράς ισχύος και τη βελτίωση της δυνατότητας ελέγχου. Με την βοήθεια αυτών των ελεγκτών είναι δυνατόν να ρυθμίζονται όλοι οι παράγοντες που εισάγουν τους

περιορισμούς στη ροή ισχύος των γραμμών, δηλαδή η εν σειρά και εγκάρσια σύνθετη αντίσταση και η φασική γωνία. Οι κυριότερες διατάξεις FACTS είναι :

	Διάταξη Ελέγχου	Λειτουργία
1.	Στατικός Αντισταθ-μιστής VAR (Static Var Compensator-SVC)	Έλεγχος Τάσης, Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος, Απόσβεση Ταλαντώσεων, Μεταβατική Ευστάθεια, Ευσταθεια Τάσης
2.	Ελεγχόμενη Αντιστάθ-μιση Σειράς (Thyristor Controlled Series Compensation– TCSC)	Έλεγχος Συνθετης Αντίστα-σης, Έλεγχος Μεταφερόμενης Ισχύος, Απόσβεση Ταλαντώσεων, Μεταβατική Ευστάθεια, Μείωση Ρεύματος Σφάλ-ματος
3.	Διάταξη Απόσβεσης Υποσύγχρονων Ταλα-ντώσεων (NGH-SSR damper)	Απόσβεση Υποσυγχρονων Ταλαντώσεων
4.	Ρυθμιστής Φασικής Γωνίας Ελεγχόμενης με θυρίστορ (Thyristor Controlled Phase Angle Regula-tor -TCPAR ή Thyristor Controlled Phase Shifting Trans-former -TCPST)	Έλεγχος Φασικής Γωνίας, Έλεγχος Μεταφερόμενης Ισχύος, Απόσβεση Ταλαντώσεων. Μεταβατική Ευστάθεια, Ευσταθεια Τάσης
5.	Στατικός Πυκνωτής (Static Condenser - STATCON)	Έλεγχος Τάσης, Αντιστάθ-μιση Αέργου Ισχύος, Απόσβεση Ταλαντώσεων, Ευστάθεια τάσης
6.	Ενοποιημένη Διάταξη Ελέγχου Ισχύος (Unified Power Flow Controller – UPFC)	Έλεγχος Μεταφερόμενης Ενεργού & Αέργου Ισχύος, Αντιστάθμιση Αέργου Ισχύος, Έλεγχος Τάσης, Απόσβεση Ταλαντώσεων, Μεταβατική Ευστάθεια, Μείωση Ρεύματος Σφάλ-ματος
7.	Δυναμική Πεδη Ελεγ-χόμενη με θυρίστορ (Thyristor Controlled Dynamic Brake)	Απόσβεση Ταλαντωσεων, Μεταβατική Ευστάθεια

Πιν. 1.1 Οι κυριότερες διατάξεις FACTS

Ο εκτιμώμενος συνολικός αριθμός εγκατεστημένων μονάδων παγκοσμίως είναι :

Type	Number	Total Installed Power in MVA
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
Series Compensation	700	350.000
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
HVDC VSC B2B	1 + (7 with cable)	900
UPFC	2-3	250

Πιν. 1.2 Συνολική παγκοσμίως εκτιμώμενη εγκατεστημένη ισχύς FACTS

(Πηγή: AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer, 2006)

Η τεχνολογία των FACTS δημιουργεί τις ακόλουθες δυνατότητες για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος:

- Έλεγχο της ισχύος, ώστε οι ροές να είναι βέλτιστες, να γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των γραμμών και να αποφεύγονται ανεπιθύμητες καταστάσεις.
- Φόρτιση των γραμμών μεταφοράς κοντά στα όρια της μόνιμης κατάστασης και των μεταβατικών και δυναμικών καταστάσεων.
- Συγκράτηση των διαδοχικών διακοπών (γραμμών, κλπ.) και περιορισμός της επέκτασης των συνεπειών από πολλαπλά σφάλματα, που μπορούν να οδηγήσουν σε μείζονες ανωμαλίες (σβέσεις).
- Απόσβεση ταλαντώσεων ισχύος, οι οποίες θα μπορούσαν να βλάψουν το δίκτυο και/ή να περιορίσουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος.
- Αναβάθμιση των γραμμών μεταφοράς.
- Έλεγχος τάσης.
- Μείωση εκπομπών flicker.
- Περιορισμός υπερτάσεων.
- Συμβολή στην ευστάθεια της τάσης.

Γενικότερα, η αρχή της κατασκευής ενός νέου δικτύου υψηλότερης τάσης για αντιμετώπιση των αυξημένων μελλοντικών αναγκών φορτίου αναθεωρείται με την εισαγωγή της αναβάθμισης των ορίων φόρτισης σαν εφικτή εναλλακτική λύση.

Η τεχνολογία των FACTS δεν αποτελείται από μία μόνο συσκευή ελέγχου ισχύος, αλλά είναι μια σειρά διατάξεων και συσκευών ελέγχου, που μπορούν να εφαρμοσθούν μεμονωμένα ή συλλογικά κατά συστηματικό τρόπο, για τον έλεγχο των αλληλεπιδρουσών παραμέτρων των δικτύων. Στον παραπάνω πίνακα 1.1 αναγράφονται οι κύριες διατάξεις ελέγχου των FACTS και οι αντίστοιχες λειτουργίες τους:

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 1, υπάρχουν επικαλύψεις στις επιδράσεις των διατάξεων ελέγχου και πρέπει σε κάθε περίπτωση να γίνεται η καταλληλότερη επιλογή. Βασικά, μια διάταξη ελέγχου σειράς παρέχει κυρίως έλεγχο της μεταφερόμενης ισχύος, περισσότερο της ενεργού και μερικώς της αέργου, ενώ μια εγκάρσια διάταξη παρέχει έλεγχο της τάσης και της αέργου ισχύος.

1.2 Δράση των ηλεκτρονικών ελεγκτών ισχύος στα FACTS

Η δημιουργία αποδοτικότερων δικτύων μεταφοράς δεν επιτυγχάνεται με την απλή εφαρμογή ενός συγκεκριμένου ελεγκτή, αλλά είναι το αποτέλεσμα της συλλογικής δράσης πολλών ελεγκτών τοποθετημένων σε διάφορα σημεία του δικτύου για να ελέγχουν τις μεταβλητές που καθορίζουν τη ροή ισχύος στις γραμμές.

Για το λόγο αυτό στο τελικό στάδιο ανάπτυξης του αποδοτικότερου δικτύου ο κεντρικός έλεγχος και συντονισμός όλων των ελεγκτών είναι απαραίτητος για να επιτύχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Άρα οι δυνατότητες για σύνθετο απομακρυσμένο έλεγχο, που παρέχουν αυτοί οι ελεγκτές, είναι μία χρήσιμη ιδιότητα για το παρόν και το μέλλον.

Ταυτόχρονα, για την ελαχιστοποίηση του κόστους των ελεγκτών, πολύ συχνά κάποιο τμήμα τους ελέγχεται από μηχανικούς διακόπτες και το υπόλοιπο από ηλεκτρονικούς διακόπτες. Οι μηχανικοί διακόπτες είναι φθηνότεροι, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις χρειαζόμαστε τη γρήγορη απόκριση των ηλεκτρονικών διακοπτών ισχύος για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Άρα η συνδυασμένη χρήση μηχανικών και ηλεκτρονικών διακοπτών ανατρέπει τους ενδογενείς περιορισμούς που επιβάλλει η ασφαλής λειτουργία των ΣΗΕ με το ελάχιστο κόστος.

Η εγκάρσια χωρητική και επαγωγική αντιστάθμιση, σε μόνιμη σύνδεση ή ελεγχόμενη με μηχανικούς διακόπτες, υπήρξε ο αρχικός τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων αντιστάθμισης της αέργου ισχύος σε συνθήκες υπερφόρτισης ή υποφόρτισης. Αργότερα η ανάπτυξη των ΣΗΕ συνοδεύτηκε από έντονο πρόβλημα ελέγχου της τάσης (συχνές μεγάλες μεταβολές ή ταχύτατες αυξομειώσεις), που οι μηχανικοί διακόπτες δεν μπορούσαν να αντιμετωπίσουν λόγω του περιορισμένου αριθμού ανοιγοκλεισιμάτων που έχουν, της συντήρησης και του σχετικά αργού χρόνου απόκρισης.

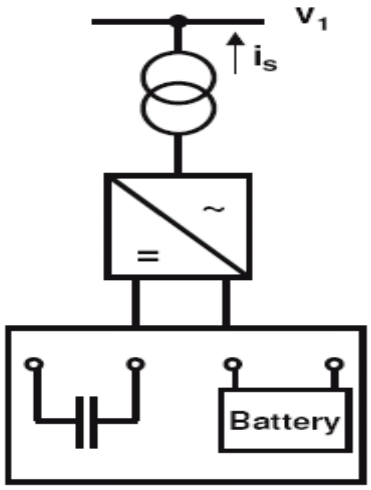
Η χρήση στατικών διακοπτών με θυρίστορ έλυσε αυτά τα προβλήματα και οδήγησε στην ανάπτυξη των στατικών αντισταθμιστών Var (SVC) τη δεκαετία του 60. Ο SVC μπορεί να διατηρεί την τάση εντός των προδιαγραφών στη μόνιμη και δυναμική κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ και μπορεί μερικώς να συμβάλλει στον έλεγχο της ευστάθειας, αλλά δεν μπορεί να ελέγξει τη ροή της πραγματικής ισχύος. Η άεργος ισχύς που αποδίδει είναι ίση με το τετράγωνο της τάσης διαιρεμένη με τη

συνολική μιγαδική αντίσταση του SVC, για αυτό μειώνεται δραστικά κατά τη βύθιση της τάσης, τότε δηλαδή που τη χρειαζόμαστε ιδιαίτερα.

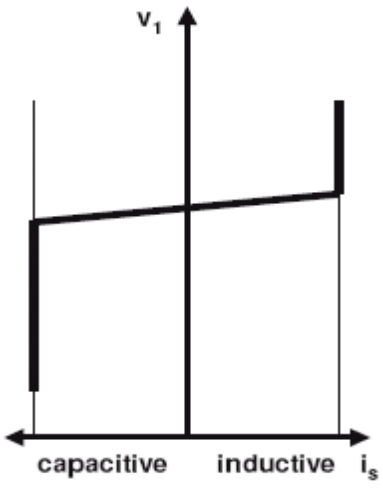
Ο στατικός σύγχρονος αντισταθμιστής (STATCOM), που είναι η εξελιγμένη μορφή του SVC, παρέχει στο μεγαλύτερο μέρος των χαρακτηριστικών του, άεργο ισχύ που είναι ίση με το γινόμενο της τάσης με το ρεύμα. Έτσι όταν βυθίζεται η τάση του, εκμεταλλευόμενος τη δυνατότητα υπερρεύματος που έχει, μπορεί να τροφοδοτεί σημαντικό ποσό αέργου ισχύος.

Επιπλέον, όταν διαθέτει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με πραγματική ισχύ για μικρό χρονικό διάστημα, όπως κάνει ο σύγχρονος αντισταθμιστής (Synchronous Condenser) λόγω της αποθηκευμένης ενέργειας που υπάρχει στα στρεφόμενα μέρη του.

Το μειονέκτημά του προς το παρόν είναι ότι η κατασκευή του απαιτεί τη χρήση ηλεκτρονικών διακοπτικών στοιχείων με δυνατότητες ελέγχου του χρόνου σβέσης, που επί του παρόντος απαιτεί μεγάλη ισχύ χειρισμού, μεγάλη συχνότητα αναβοσβησίματος (στην περιοχή των KHz ώστε να προσφέρονται για εφαρμογή της μεθόδου διαμόρφωσης πλάτους παλμών), μικρές απώλειες και λογικό κόστος.



Σχ. 1.1 STATCOM



Σχ. 1.2 Χαρακτηριστική καμπύλη STATCOM

Μια σημαντική διαφορά από το SVC είναι ότι το STATCOM διατηρεί τις μέγιστες δυνατότητές του σε παραγωγή ρεύματος ακόμα και στην περίπτωση περίπου μηδενικής τάσης του συστήματος (Σχ.1.2).

1.3 Αντικείμενο εργασίας

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η προσομοίωση του ελέγχου της τάσης ζυγού ενός ΣΗΕ μέσω ενός στατικού αέργου αντισταθμιστή (Static Var Compensator (SVC)) που αποτελεί μια μορφή FACTS. Η προσομοίωση γίνεται σε περιβάλλον Matlab και συγκεκριμένα με το εργαλείο Simulink. Το Simulink στις νέες εκδόσεις του περιλαμβάνει μοντέλα που σχετίζονται αποκλειστικά με το SVC. Οι εφαρμογές για το SVC αφορούν ένα σύστημα μεταφοράς με μία προγραμματιζόμενη πηγή, μια γραμμή με σύνθετη αντίσταση Z_{th}, ένα φορτίο και ένα μετασχηματιστή που στο δευτερεύον του τύλιγμα είναι συνδεδεμένο το SVC.

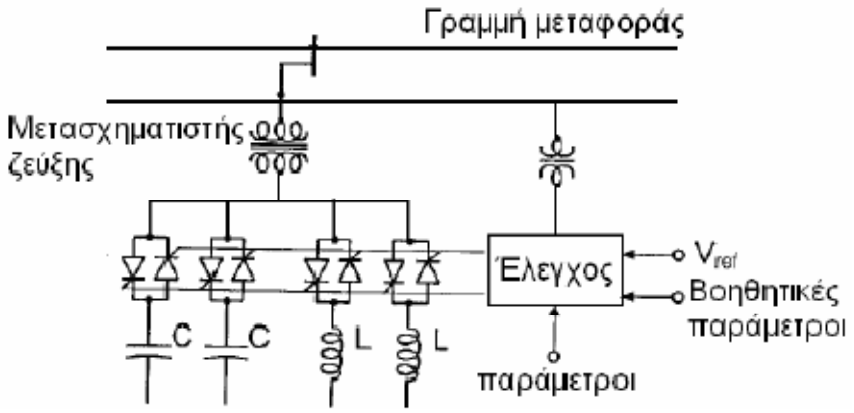
Το SVC Phasor Model παρουσιάζει συνοπτικά την εφαρμογή του και το Detailed Model εμφανίζει αναλυτικά τα δομικά στοιχεία που απαρτίζουν το SVC. Τα δύο μοντέλα δίνουν γραφικά αποτελέσματα, αλλά χρησιμοποιούνται εκτενέστερα εκείνα του δευτέρου μοντέλου. Οι εφαρμογές του Simulink δίνουν αποτελέσματα για τη μεταβολή, τον έλεγχο, τη διατήρηση της τάσης του ζυγού που είναι συνδεδεμένο το SVC, καθώς επίσης και για την αντιστάθμιση αέργου ισχύος στο ζυγό που συνδέεται.

1.4 Στατικός Άεργος Αντισταθμιστής (SVC)

Ο στατικός άεργος αντισταθμιστής ανήκει στην οικογένεια των FACTS. Η διάταξη αυτή (σχήμα 1.3) χρησιμοποιείται κυρίως για τη ρύθμιση της τάσης και τον έλεγχο της αέργου ισχύος του δικτύου και τοποθετείται σαν εγκάρσιο κύκλωμα. Έχει κάποια ικανότητα να ελέγχει την ευστάθεια, αλλά δεν έχει την ικανότητα να ελέγχει τη ροή της ενεργού ισχύος. Σαν ελεγχόμενο εγκάρσιο στοιχείο μπορεί ακόμη να προσφέρει και άλλες υπηρεσίες, όπως οι ακόλουθες:

- Σταθεροποίηση της λειτουργίας, ως αποτέλεσμα βελτίωσης των μεταβατικών χαρακτηριστικών μεταφοράς.
- Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς των συνδέσεων του δικτύου.
- Απόσβεση των διακυμάνσεων της ενεργού ισχύος με κατάλληλη ρύθμιση της αέργου ισχύος, η οποία εγχέεται στο δίκτυο.

- Απόσβεση των υποσύγχρονων συντονισμών.



Σχ. 1.3 Διάταξη Στατικού Αέργου Αντισταθμιστή (SVC).

Οι γραμμές μεταφοράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους να λειτουργούν με την υψηλότερη δυνατή τάση, η οποία θα πρέπει επίσης να είναι σταθερή, δεδομένου ότι υπ' αυτές τις συνθήκες μεγιστοποιείται η ικανότητα μεταφοράς και ελαχιστοποιούνται οι απώλειες.

1.5 Αρχή λειτουργίας του SVC

Το SVC θεωρείται σαν μία σύνθετη αντίσταση με ρυθμιζόμενο ρεύμα αντιστάθμισης. Μπορεί να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ στο σημείο σύνδεσής του. Η εγκάρσια παρεχόμενη αντιστάθμιση είναι συνάρτηση της τάσης της γραμμής. Ένας τυπικός εγκάρσιος αντισταθμιστής αέργου ισχύος αποτελείται από βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενων από θυρίστορ (TSC's Thyristor Switched Capacitors) καθώς και βαθμίδες πηνίων (TCR's Thyristor Controlled Reactors).

Με κατάλληλο έλεγχο των γωνιών έναυσης των θυρίστορ η άεργος ισχύς των SVC μπορεί να μεταβάλλεται, παίρνοντας όλες τις ενδιάμεσες τιμές, από πλήρως χωρητική σε πλήρως επαγωγική μέσα σε λίγους κύκλους της θεμελιώδους συχνότητας. Τα πλεονεκτήματά του είναι: γρήγορος, ακριβής έλεγχος της τάσης και ταχύτατη σύνδεση-αποσύνδεση πυκνωτών χωρίς μεταβατικές υπερτάσεις για αποκατάσταση του συστήματος μετά την εκκαθάριση βραχυκυκλωμάτων.

Η έξοδος του SVC ρυθμίζεται έτσι ώστε να ανταλλάσσει χωρητικό ή επαγωγικό ρεύμα με σκοπό τον έλεγχο συγκεκριμένων παραμέτρων ενός ΣΗΕ. Η ζεύξη και η απόζευξη του SVC γίνεται με ηλεκτρονικά διακοπτικά στοιχεία.

Κάθε βαθμίδα πηνίων εισέρχεται στο σύστημα μέσω θυρίστορ. Ο έλεγχος της αέργου ισχύος της επαγωγικής βαθμίδας γίνεται με τη μεταβολή της γωνίας έναυσης. Δύο θυρίστορ αντιπαράλληλα συνδεδεμένα σε κάθε φάση ελέγχουν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου το ρεύμα που περνά από τη βαθμίδα. Παράλληλα γίνεται έλεγχος της αέργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο. Η άεργος ισχύς μπορεί να μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι την ονομαστική τιμή του SVC.

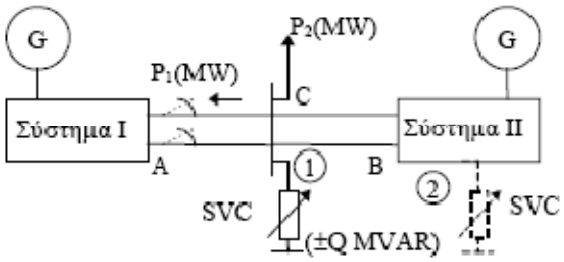
Οι βαθμίδες των πυκνωτών εισέρχονται ξεχωριστά στο σύστημα. Κατά την έναυση των θυρίστορ η τάση των πυκνωτών μπορεί να είναι ίση ή διάφορη της τάσης του συστήματος. Και στις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος φόρτισης των πυκνωτών τείνει στιγμιαία στο άπειρο με αποτέλεσμα να καταστρέφει τα θυρίστορ. Για το λόγο αυτό, κάθε φορά που εισέρχεται μια βαθμίδα πυκνωτών στο σύστημα, ταυτόχρονα η βαθμίδα των πηνίων άγει στο μέγιστό της, ώστε να αντισταθμίσει το μεταβατικό φαινόμενο.

Ρύθμιση της συνολικής αέργου ισχύος γίνεται με τα θυρίστορ της βαθμίδας των πηνίων. Η βαθμίδα των πυκνωτών δεν επιτρέπει τη μεταβολή της αέργου ισχύος που μπορούν να παράγουν. Έτσι, κάθε βαθμίδα πυκνωτών ελέγχεται διακοπτικά και βηματικά ως προς την είσοδο της επόμενης.

Οι πιθανοί συνδυασμοί είναι ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι πυκνωτές και πηνία, ελεγχόμενα πηνία και ηλεκτρονικά ελεγχόμενοι πυκνωτές και πυκνωτές μονίμως εγκατεστημένοι και συνδεδεμένοι που λειτουργούν και ως φίλτρα αρμονικών με ελεγχόμενα πηνία.

1.6 Εφαρμογές SVC

Μια εφαρμογή διατάξεων SVC παρατίθεται στο Σχήμα 1.4. Στο σύστημα του σχήματος, η τάση ελέγχεται στη θέση C (στο κέντρο της γραμμής μεταφοράς I-II) και το σύστημα I είναι πολύ μεγαλύτερο από το II.



Σχ. 1.4 Σύστημα με στατικό άεργο αντισταθμιστή SVC

Ισχύς P1 MW μεταφέρεται από το σύστημα II στο I. Ο SVC μπορεί να διατηρήσει την τάση πρακτικά σταθερή, χωρίς χρονική καθυστέρηση. Μεταβολές της τάσης, οφειλόμενες σε χειρισμούς των διακοπτών μπορούν επίσης να αντισταθμιστούν. Για παράδειγμα, χωρίς SVC, μια διακοπή του ενός κυκλώματος της διπλής γραμμής AC μπορεί να επιφέρει ανύψωση της τάσης περίπου 10%, η οποία θα χρειαστεί πολύ χρόνο μέχρι να αποσβεστεί.

Με τον SVC η υπέρταση περιορίζεται πολύ (ίσως όχι πάνω από 3% σε πολύ μικρή χρονική περιοχή) και η απόσβεσή της επιτυγχάνεται πολύ γρήγορα. Μια τέτοια περίπτωση χειρισμού είναι η απόρριψη φορτίου, με άνοιγμα των διακοπτών της διπλής γραμμής AC στο A, οπότε η τάση χωρίς SVC αναπηδά σημαντικά υψηλότερα, από ότι με την ύπαρξη του SVC. Για τον περιορισμό της ανύψωσης της τάσης στην περίπτωση αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ένα εγκάρσιο πηνίο αντιστάθμισης, αντί του SVC. Στην περίπτωση όμως εκείνη, ο χρόνος ανταπόκρισης θα ήταν μεγαλύτερος από ότι με τον SVC.

Η επίδραση του SVC θα είναι επίσης πολύ σημαντική στην απόσβεση των ταλαντώσεων ισχύος στο δίκτυο μετά την ανωτέρω διακοπή. Το σήμα εισόδου του ελεγχόμενου SVC είναι η εκτιμώμενη κατά προσέγγιση φυσική απόκλιση μεταξύ των συστημάτων I και II, η οποία μπορεί να είναι γνωστή από μια ανάλυση ροών φορτίου.

Στο Σχήμα 1.4 φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή, μια εναλλακτική διάταξη, με δεύτερο SVC στη θέση (2). Η ισχύς των SVC στις θέσεις (1) και (2) μπορεί να προσδιοριστεί κατάλληλα για την επίτευξη βέλτιστου αποτελέσματος.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εγκατεστημένοι σταθμοί SVC ώστε να σχηματίσουμε μία εικόνα των πραγματικών κατασκευών. Εγκαταστάσεις SVC λειτουργούν από το 1960.

Customer:	Enelpower, Brazil
System voltage:	500 kV, 60 Hz
Transformer:	500 / 17,5 kV
Operating range:	- 250 / +250 MVAr
Type:	SVC
Definition of	
SVC branch circuits:	2 x TCR, 1 x TSC, 2 x STF
Thyristor:	5"
Control range of the SVC:	- 250 MVAr (inductive)
	+ 250 MVAr (capacitive)
Valve cooling system:	Single circuit, de-ionized water
Filter frequencies	
(harmonics):	5th, 7th
Valve type:	8 kV light-triggered thyristor
Control system:	SIMADYN D - a modular control system using multi-processor technology using at a speed level

Σχ. 1.5 Εγκατάσταση SVC υποσταθμού 500KV στην Βραζιλία

Customer:	P.T. Perusahaan Listrik Negara (PLN)
System voltage:	150 kV, 50 Hz
Transformer:	150/7.5 kV
Operating range:	50 MVAr up to -25 MVAr (inductive)
Thyristor-controlled reactor (TCR):	75 MVAr
Thyristor-switched capacitor (TSC):	-
Harmonic filters:	50 MVAr (5th)
Thyristor:	100 mm diameter, 4 kA/5.5 kV
Valve cooling system:	single circuit, de-ionized water
Digital control system:	Siemens SIMADYN D
DC power supply system:	battery with open lead acid cells
Thyristor firing, control and monitoring:	fibre optic system

Σχ. 1.6 Εγκατάσταση υποσταθμού SVC

1.8 Συμβατικές μέθοδοι ελέγχου τάσης ζυγού

Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος είναι συχνά ο πιο αποτελεσματικός τρόπος για τη βελτίωση τόσο της ικανότητας μεταφοράς της πραγματικής ισχύος όσο και της ευστάθειας της τάσης. Διακρίνεται στην εν σειρά και εγκάρσια αντιστάθμιση. Επίσης διακρίνεται στην παθητική και ενεργό άεργο αντιστάθμιση, όπου ένα σύστημα ελέγχου με ανατροφοδότηση ρυθμίζει την τάση ή άλλες μεταβλητές.

Συνηθισμένες μορφές αέργου αντιστάθμισης είναι οι εν σειρά πυκνωτές, οι εγκάρσιοι ή παράλληλοι πυκνωτές, οι επαγωγές και οι σύγχρονοι αντισταθμιστές. Επίσης οι μετασχηματιστές ελέγχου του λόγου σπειρών υπό φορτίο χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της τάσης.

Για την πληρέστερη παρουσίαση του ελέγχου της τάσης ζυγού ενός ΣΗΕ κρίνουμε σκόπιμο να αναφέρουμε τους συμβατικούς τρόπους ελέγχου της τάσης.

- Έλεγχος της τάσης με μετασχηματιστή

Το κύριο έργο του μετασχηματιστή είναι να μετασχηματίζει την ηλεκτρική ενέργεια από ένα επίπεδο τάσης σε ένα άλλο. Όταν όμως έχει τη δυνατότητα αλλαγής του ονομαστικού λόγου σπειρών, τότε είναι δυνατόν να αντισταθμίζει μικρές μεταβολές της τάσης από την ονομαστική της τιμή. Υπάρχουν μετασχηματιστές που η αλλαγή αυτή μπορεί να γίνει μόνο όταν είναι εκτός φορτίου και μετασχηματιστές που η αλλαγή του λόγου σπειρών μπορεί να γίνει υπό φορτίο (Load Tap Changer). Στους τελευταίους η αλλαγή μπορεί να γίνεται αυτόματα, όπου ένας ηλεκτρονόμος παρακολουθεί την τάση και όταν αυτή βρεθεί εκτός μίας ζώνης τιμών, ενεργοποιεί το LTC μετά την πάροδο συνήθως 30-60 sec. Η διαδικασία σταματά όταν η τάση βρεθεί εντός ορίων ή όταν φτάσουμε το μέγιστο ή ελάχιστο του λόγου σπειρών.

- Έλεγχος της τάσης με μετασχηματιστή αντιστάθμισης

Για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους μπορεί να είναι επιθυμητή η αύξηση της τάσης σε ενδιάμεσο σημείο της γραμμής και όχι στα άκρα της. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο μετασχηματιστής αντιστάθμισης (booster), που τοποθετείται ως μια επιπλέον συσκευή σε υποσταθμούς ή σαν μία ξεχωριστή συσκευή σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο σημείο της γραμμής.

Κεφάλαιο 2ο

SVC Phasor Model

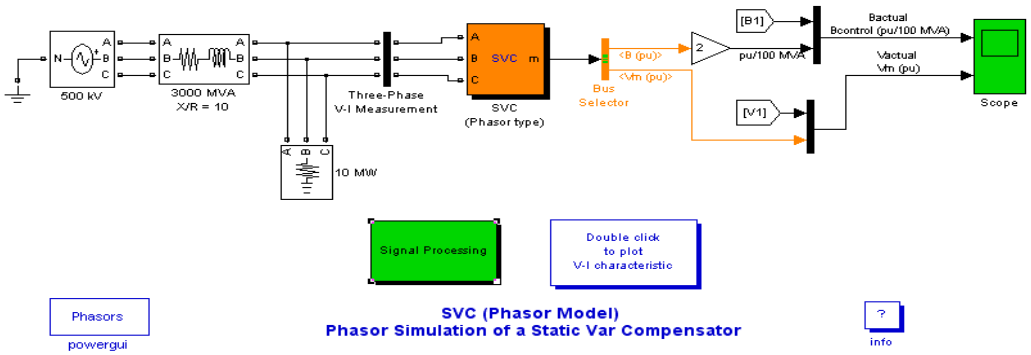
2.1 SVC Phasor Model

Το μοντέλο του SVC Phasor Model είναι το απλουστευμένο μοντέλο που προσομοιώνει τον στατικό άεργο αντισταθμιστή στη δυναμική του συμπεριφορά και παράλληλα παρέχει τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά.

Προσομοίωση

Η παράγραφος αυτή περιγράφει τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για το συγκεκριμένο παράδειγμα κάνοντας χρήση του διαθέσιμου λογισμικού που αναφέρθηκε παραπάνω. Αρχικά τρέχουμε την προσομοίωση power_svc στο command window του Matlab. Εμφανίζεται το μοντέλο του SVC Phasor Model που αποτελείται από τα εξής δομικά στοιχεία:

- 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση
- Μπλοκ μέτρησης 3φ τάσεων και ρευμάτων
- Μπλοκ ελεγκτή SVC
- Ωμικό φορτίο 10 MW
- Παλμογράφος (scope)

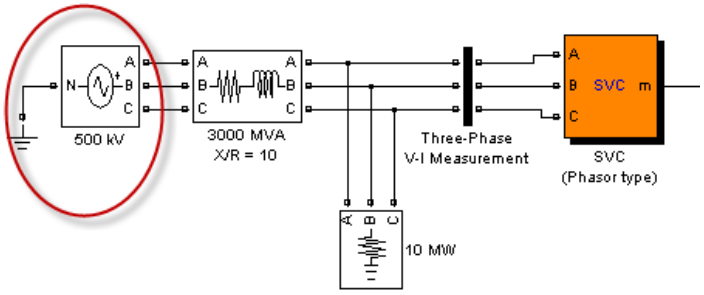


Σχ. 2.1 SVC Phasor Model

2.2 Αναλυτική περιγραφή δομικών στοιχείων

⇒ 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης

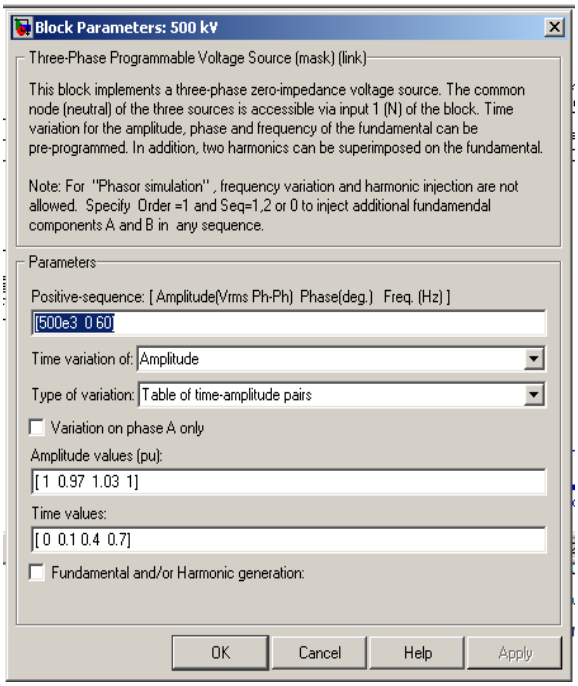
Το μπλοκ αναπαριστά μια 3φ πηγή τάσης με μηδενική εσωτερική σύνθετη αντίσταση. Ο ουδέτερος συνδέεται με τη γη στην είσοδο N .



Σχ. 2.2 3φ προγραμματιζόμενη πηγή

Κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο εμφανίζεται το παράθυρο παραμέτρων της προγραμματιζόμενης πηγής. Ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει το πλάτος, τη φάση και τη θεμελιώδη συχνότητα. Επιπλέον μπορούν να προστεθούν δύο αρμονικές. Στο συγκεκριμένο μοντέλο που γίνεται χρήση φασιθετών δεν είναι δυνατή η μεταβολή της συχνότητας και η έγχυση αρμονικών συνιστωσών.

Οι παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν μόνο κατά τη θετική ακολουθία είναι:



Σχ. 2.3 Παράθυρο παραμέτρων 3φ προγραμματιζόμενης πηγής

- το πλάτος της πολικής τάσης
- η φάση
- η συχνότητα

Για κάθε μία από τις παραπάνω παραμέτρους, δίνεται η δυνατότητα μεταβολής με τους κάτωθι τρόπους:

⇒ Με βηματική μεταβολή

Κατά τη βηματική μεταβολή μπορεί να ρυθμιστεί το πλάτος, το εύρος και η συχνότητα του βήματος καθώς και οι χρονικές στιγμές που θα λάβουν μέρος οι μεταβολές.

- Μεταβολή μοναδιαίας κλίσης

Ρυθμίζεται η κλίση και η χρονική διάρκεια της μεταβολής.

- Διαμόρφωση

Ρυθμίζεται το πλάτος της διαμόρφωσης, η συχνότητα και ο χρόνος που διαρκεί η μεταβολή.

- Κατά ζεύγη χρονικών στιγμών – πλάτους

Το μοντέλο της προσομοίωσης χρησιμοποιεί ζεύγη χρονικών στιγμών - πλάτους. Τέλος παρέχεται η δυνατότητα οι μεταβολές να γίνονται μόνο στη φάση a.

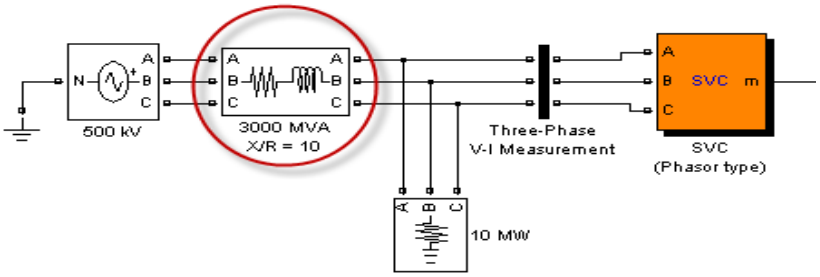
- Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση

Το μπλοκ αναπαριστά την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση προς τα ανάντη του ζυγού σύνδεσης του φορτίου και του SVC. Η σύνθετη αντίσταση του μπλοκ εμφανίζει τις ακόλουθες τιμές:

$$R = \frac{(500 \cdot 10^3)^2}{3000 \cdot 10^6 \cdot 10} = 8{,}33\ Ohm \quad (1)$$

$$X = \frac{(500 \cdot 10^3)^2}{3000 \cdot 10^6} = 83{,}33\ Ohm \quad (2)$$

Όπου S = 3000 MVA, η στάθμη βραχυκύκλωσης προς τα ανάντη του ζυγού



Σχ. 2.4 Ισοδύναμη αντίσταση Thevenin

- Ωμικό φορτίο

Το ωμικό φορτίο είναι σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα με ονομαστική τάση στα 500KV, συχνότητα 60Hz και η ενεργός ισχύς του είναι 10 MW.

- 3φ μπλοκ μετρήσεων (Three Phase V-I Measurement)

Το μπλοκ μετρήσεων δίνει τη δυνατότητα μέτρησης *τάσεως* και *ρεύματος* σε ανά μονάδα τιμές. Για το λόγο αυτό ρυθμίζεται η βασική ισχύς και η βασική τάση του δικτύου. Οι τιμές των μετρήσεων στέλνονται στον ελεγκτή SVC για τον υπολογισμό του επιθυμητού ρεύματος γραμμής.

Η βασική ισχύς για το συγκεκριμένο μπλοκ είναι 100MVA και η βασική τάση είναι 500KV. Το μπλοκ δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης της μορφής του εξερχόμενου σήματος σε καρτεσιανή, πολική ή μορφή μέτρου. Στην εφαρμογή αυτή επιλέγεται η καρτεσιανή μορφή.

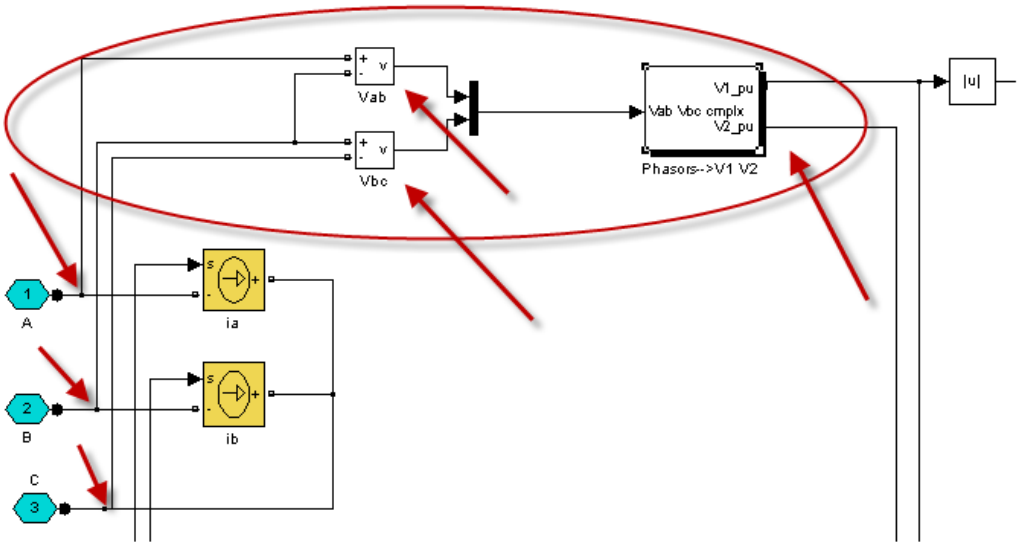
- Μπλοκ SVC ελεγκτή

Το μπλοκ του SVC ελεγκτή φαίνεται στο σχήμα 2.6. Διακρίνονται τα δομικά στοιχεία του ελεγκτή και οι συνδέσεις τους.

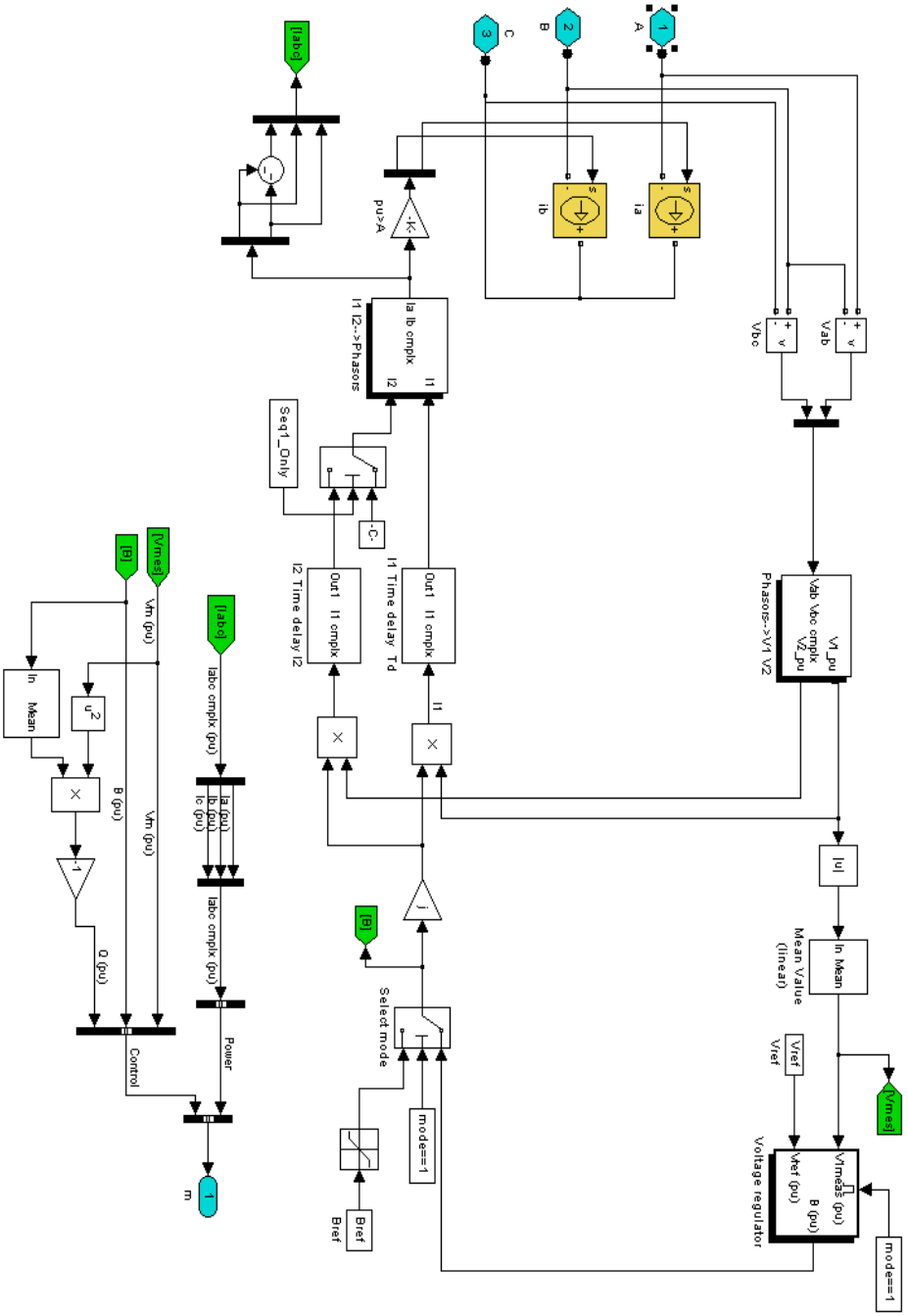
Οι θύρες εισόδου (1,2,3) που αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις της γραμμής καταλήγουν στον ελεγκτή. Από την θύρα 1 αναχωρούν δυο κλάδοι. Ο ένας καταλήγει στο **μπλοκ ελεγχόμενης πηγής ρεύματος** και ο άλλος στο **μπλοκ μέτρησης της τάσης**.

Το μπλοκ ελεγχόμενης πηγής ρεύματος μετατρέπει το εισερχόμενο σήμα του Simulink σε ισοδύναμη πηγή ρεύματος (η είσοδος είναι σε πολική μορφή).

Αρχικά το κύκλωμα, λαμβάνει τις φασικές τάσεις σε καρτεσιανή μορφή, ακολούθως τις μετασχηματίζει σε πολικές V_{ab}, V_{bc} και δίνει ως έξοδο τη συμμετρική συνιστώσα θετικής και αρνητικής ακολουθίας της φάσης a (V_1).



Σχ. 2.5 : Μετατροπή σε συμμετρικές συνιστώσες



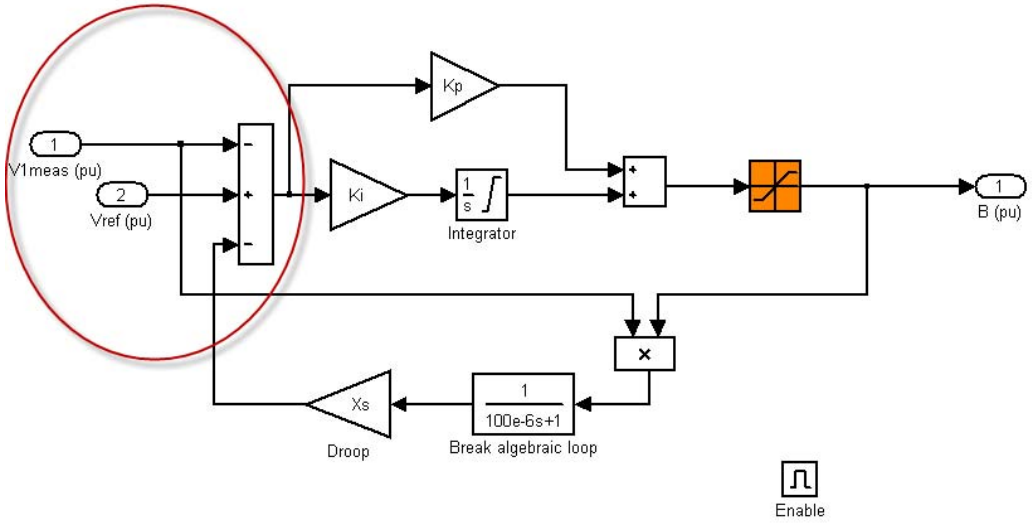
Σχ. 2.6 : Σχηματική αναπαράσταση μπλοκ ελεγκτή SVC

Από την θετική ακολουθία V_1 λαμβάνουμε το μέτρο και στην συνέχεια την μέση τιμή χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα την συνάρτηση Padè, η οποία προσομοιώνει την καθυστέρηση του σήματος εξόδου του μπλοκ για **ένα** κύκλο στην καθορισμένη συχνότητα λειτουργίας.

Το σήμα κατευθύνεται στο υποσύστημα υπολογισμού γραφικών παραστάσεων καθώς επίσης **στον ρυθμιστή τάσης** μαζί με την τάση αναφοράς σε ανά μονάδα τιμή που ρυθμίζει ο χρήστης στο αρχικό παράθυρο παραμετροποίησης του ελεγκτή SVC. Η τάση αναφοράς είναι 1 α.μ.

Ο υπολογισμός της μέσης τιμής γίνεται, γιατί η ενεργός τιμή μεταβάλλεται συνεχώς μέχρι να σταθεροποιηθεί.

Ανοίγοντας το μπλοκ του ρυθμιστή τάσεως παρατηρούμε τα εξής:

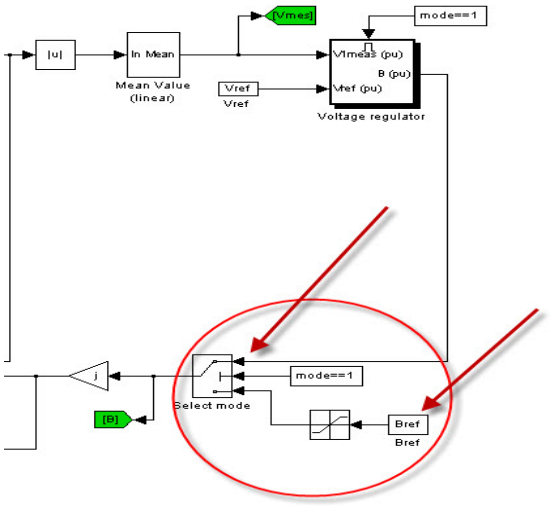


Σχ. 2.7 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC

Ο αθροιστής δέχεται 3 εισόδους. Την μετρούμενη τάση, την τάση αναφοράς και το σήμα ανάδρασης. Το κέρδος του PI ελεγκτή ρυθμίζεται από το παράθυρο παραμετροποίησής του. Οι τιμές είναι: K_p=0 (αναλογικό κέρδος) και Ki=300 (ολοκληρωτικό κέρδος). Το σήμα ανάδρασης δίνεται από το γινόμενο της μετρούμενης τάσης και της τιμής της αγωγιμότητας που στέλνεται ως σήμα για τον έλεγχο της τάσης. Στην συνέχεια, το γινόμενο πολλαπλασιάζεται με τη συνάρτηση μεταφοράς

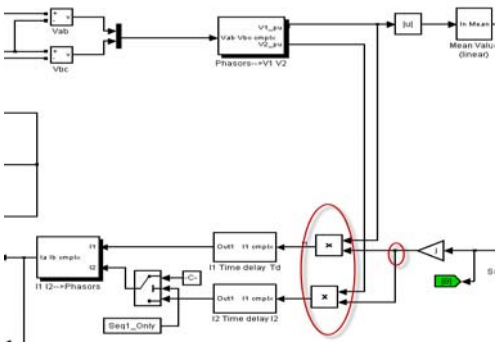
$\frac{1}{100 \cdot 10^{6}s+1,}$ (3) ώστε να μην χρειαστεί να βρεθεί η έξοδος με επαναληπτικό τρόπο και τέλος με την κλίση της χαρακτηριστικής του SVC που ορίζεται από το αρχικό παράθυρο X_s (0,03 α.μ στα 200MVA).

Η επιθυμητή τιμή της αγωγιμότητας οδηγείται σε ένα διακόπτη επιλογής 2 θέσεων όπου από το παράθυρο ρυθμίσεων του SVC ελεγκτή παρέχεται η δυνατότητα προσομοίωσης ελέγχου με μέγεθος αναφοράς την τάση (1 α.μ) ή την αγωγιμότητα (0 α.μ)



Σχ. 2.8 Υποσύστημα επιλογής λειτουργίας ελεγκτή SVC

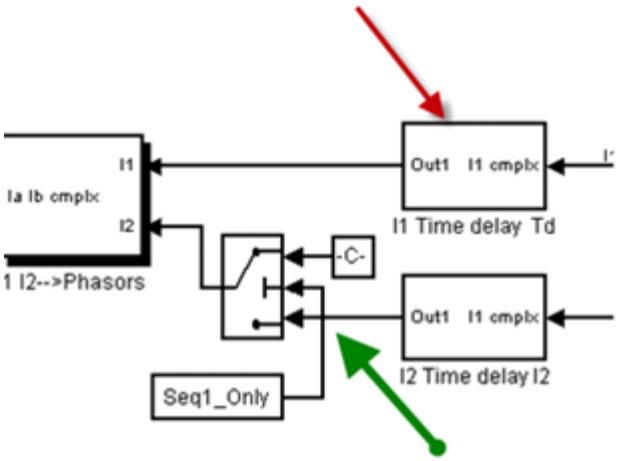
Με την επιλογή της ρύθμισης μέσω της τάσης αναφοράς το σήμα κατευθύνεται προς έναν ενισχυτή με κέρδος j ενώ προηγουμένως στέλνεται το πραγματικό μέρος μέσω της ένδειξης Go to tag σε άλλο σημείο του διαγράμματος. Το σήμα στη συνέχεια διακλαδίζεται σε δύο πολλαπλασιαστές και το κάθε ένα πολλαπλασιάζεται αντίστοιχα με την τάση θετικής και αρνητικής ακολουθίας.



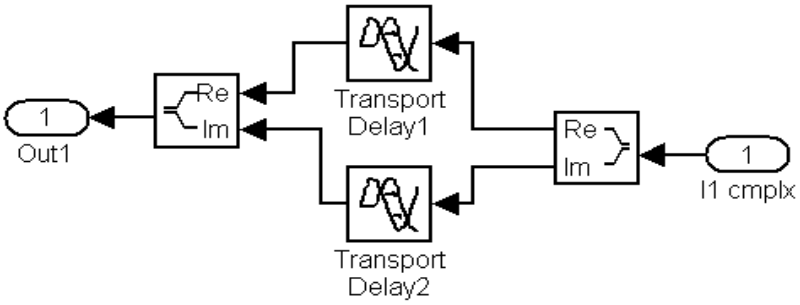
Σχ. 2.9 Σημείο διακλάδωσης θετικής και αρνητικής ακολουθίας

Η δεύτερη διακλάδωση καταλήγει σε ένα μπλοκ που καθυστερεί την είσοδο προκειμένου να προσομοιωθεί η καθυστέρηση έναυσης των θυρίστορ και καταλήγει σε ένα διακόπτη επιλογής 2 θέσεων, όπου επιλέγεται αν θα χρησιμοποιηθεί η αρνητική ακολουθία. Το μοντέλο αυτό δεν την χρησιμοποιεί.

Η πρώτη διακλάδωση περνά από ένα μπλοκ καθυστέρησης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10. Επίσης διακρίνεται η πορεία και της δεύτερης διακλάδωσης .

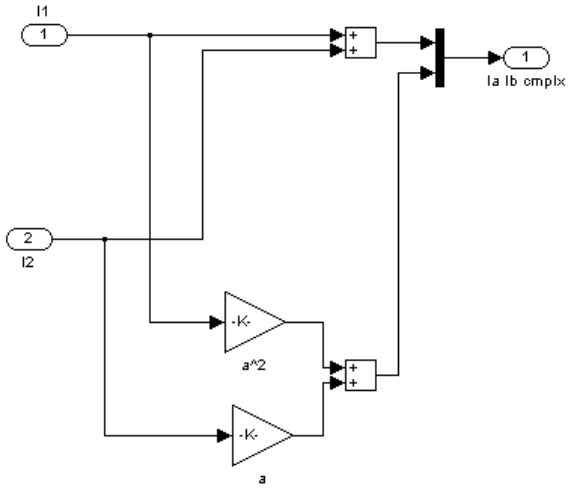


Σχ. 2.10 Επιλογή χρήσης αρνητικής ακολουθίας



Σχ. 2.11 Υποσύστημα καθυστέρησης μεταφοράς σήματος

Το σήμα χωρίζεται σε πραγματικό και φανταστικό και στην συνέχεια τα δύο σήματα καθυστερούνται για το ίδιο χρονικό διάστημα. Το μπλοκ καθυστέρησης δεν δέχεται μιγαδικούς για αυτό χωρίζεται το σήμα. Τέλος μετατρέπεται πάλι σε καρτεσιανή μορφή και οδηγείται στην θύρα εξόδου του μπλοκ.



Σχ. 2.12 Υποσύστημα μετατροπής συμμετρικών συνιστωσών σε ρεύμα γραμμής τριφασικού συστήματος

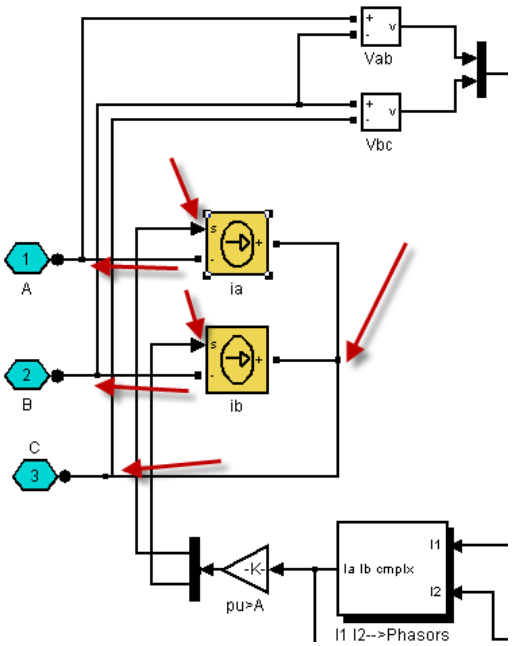
Στις 2 θύρες εισόδου εμφανίζονται η θετική και η αρνητική ακολουθία ρεύματος. Στην συνέχεια, προστίθενται οπότε προκύπτει το ρεύμα της φάσης 1 που καταλήγει σε έναν πολυπλέκτη που συγκεντρώνει άλλο ένα σήμα.

Το δεύτερο σήμα που είναι το ρεύμα της $2^{ης}$ φάσης προέρχεται από ένα αθροιστή που παράγει την ανά μονάδα μιγαδική τιμή της έντασης του ρεύματος της $2^{ης}$ φάσης. Τελικά από το μπλοκ προκύπτουν οι ανά μονάδα τιμές των ρευμάτων στις φάσεις a και b.

Οι ανά μονάδα τιμές των ρευμάτων μετατρέπονται σε πραγματικές τιμές αφού πολλαπλασιάζονται με την τιμή του βασικού ρεύματος που προκύπτει από τα βασικά μεγέθη.

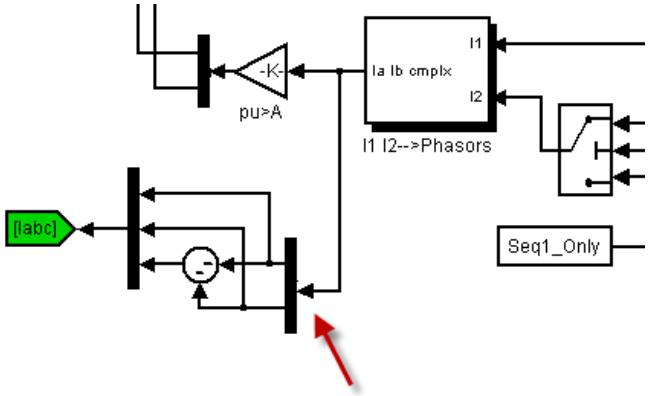
Το κύκλωμα καταλήγει σε 2 ελεγχόμενες πηγές ρεύματος, μία για κάθε ρεύμα φάσης. Οι πηγές ρεύματος μετατρέπουν το εισερχόμενο σήμα σε ισοδύναμο ρεύμα το οποίο στην συνέχεια συνδέεται στον κάθε κόμβο στην είσοδο του μπλοκ ελέγχου του SVC. Με τον τρόπο αυτό τελικά προκύπτει η αντιστάθμιση και η ρύθμιση της τάσης. μέσω της απορρόφηση ή έγχυσης ρεύματος σε κάθε κόμβο.

Στο σχήμα 2.13 φαίνεται το σημείο που προαναφέρθηκε.



Σχ. 2.13 Σημείο μετατροπής σήματος σε ισοδύναμο ρεύμα γραμμής

Πριν την μετατροπή σε φυσικές τιμές οδηγούνται σε ένα αποπολυπλέκτη που συλλέγει τα 2 σήματα για τον υπολογισμό του ρεύματος της φάσης c.

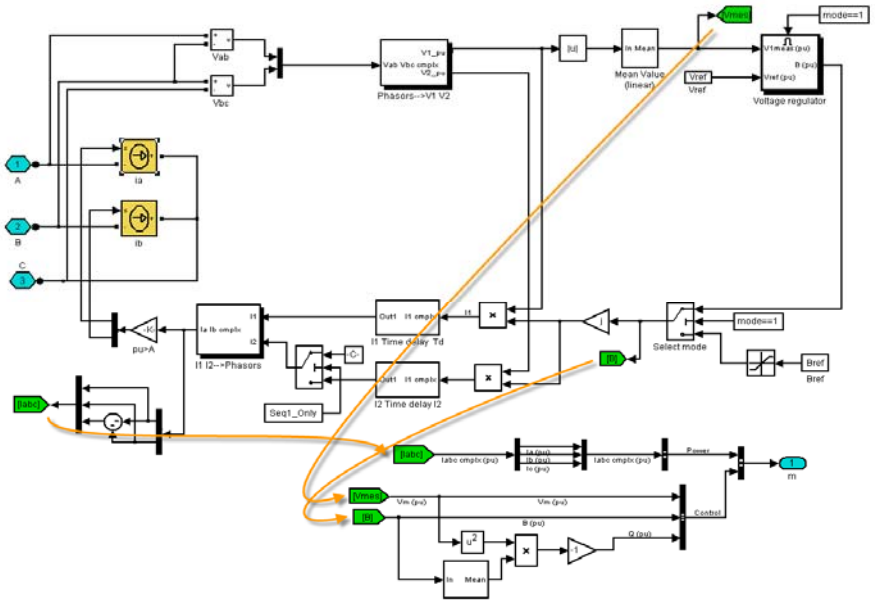


Σχ. 2.14 Υποσύστημα υπολογισμού ρεύματος φάσης c.

Στην συνέχεια τα οδηγεί στο υποσύστημα υπολογισμού γραφικών παραστάσεων μέσω της ένδειξης I_{abc} (Go To Tag).

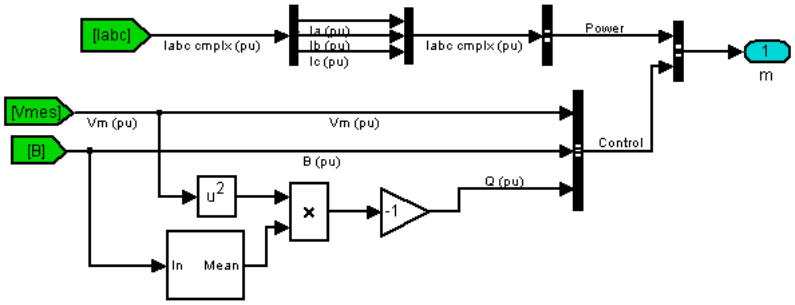
Σε ξεχωριστό σημείο του μπλοκ διαγράμματος καταλήγουν τρία διαφορετικά σήματα. Το 3φ σήμα των ρευμάτων, η φυσική τιμή της θετικής ακολουθίας μιας φάσης

και η τιμή της νέας αγωγιμότητας που προκύπτει από τους προηγούμενους υπολογισμούς.



Σχ. 2.15 Συλλογή σημάτων για γραφικούς υπολογισμούς

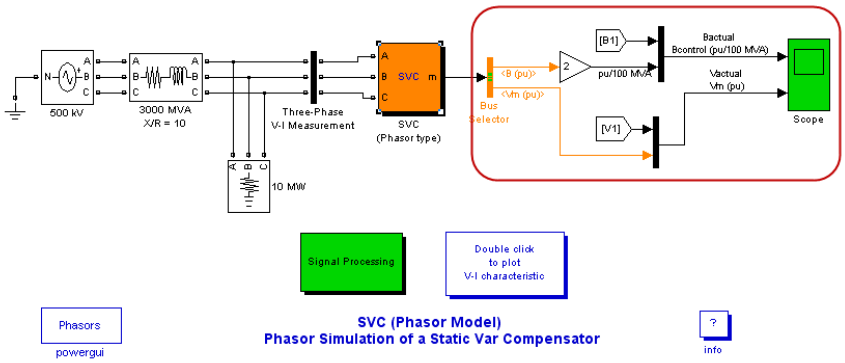
Το υποσύστημα χρησιμοποιείται για να παραχθούν σήματα που θα χρησιμοποιηθούν στην σχεδίαση γραφικών παραστάσεων. Χρειαζόμαστε τις ανά μονάδα τιμές των τριών ρευμάτων, την μετρούμενη τάση θετικής ακολουθίας και την άεργο ισχύ που παράγει ο ελεγκτής SVC. Το σήμα των ρευμάτων χρειάζεται για την περίπτωση που επιθυμούμε την εμφάνιση πληροφοριών ισχύος ενώ από τα σήματα της τάσης και της αέργου ισχύος εμφανίζουμε τις πληροφορίες ελέγχου. Τα δύο τελευταία ρυθμίζονται στο παράθυρο παραμέτρων του ελεγκτή.



Σχ. 2.16 Υποσύστημα υπολογισμού δεδομένων σχεδίασης γραφικών παραστάσεων

Η μετατροπή των σημάτων και η παραγωγή του σήματος της αέργου ισχύος γίνεται με την χρήση του γινομένου του τετραγώνου της τάσεως με την μέση τιμή της αγωγιμότητας για ένα κύκλο (16,6 ms στα 60Hz) ενώ τέλος το -1 αλλάζει την πολικότητα της τιμής ώστε να προκύψει το σωστό αποτέλεσμα (μετατροπή της αντίδρασης σε αγωγιμότητα) .

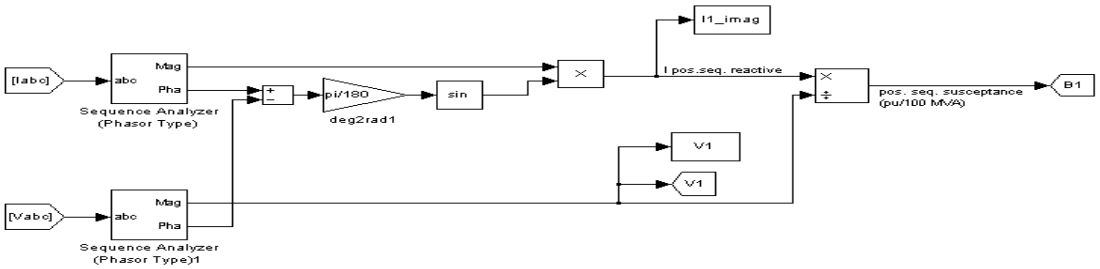
Οδηγούμενοι εκτός του ελεγκτή SVC βλέπουμε το αρχικό μοντέλο:



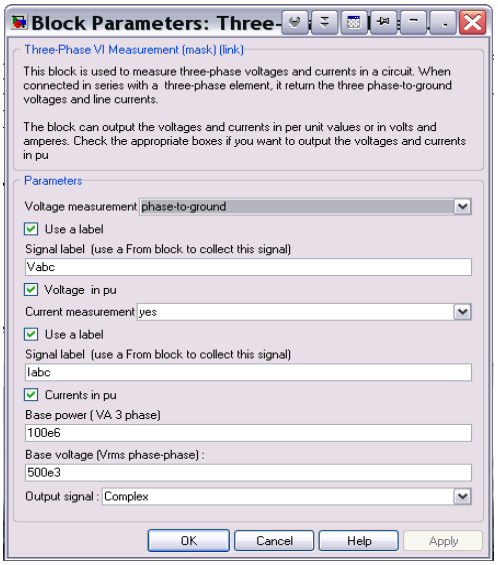
Σχ. 2.17 Μοντέλο SVC : Σύστημα παλμογράφου

Τα εξερχόμενα σήματα διαχωρίζονται και οδηγούνται περαιτέρω, η μεν αγωγιμότητα ώστε να συγκριθεί με το B1, η δε μετρούμενη τάση με την V1.

Οι τιμές του B1 και V1 προκύπτουν από το μπλοκ Signal Processing, το οποίο και παρατίθεται παρακάτω.



Σχ. 2.18 Μονάδα επεξεργασίας σήματος

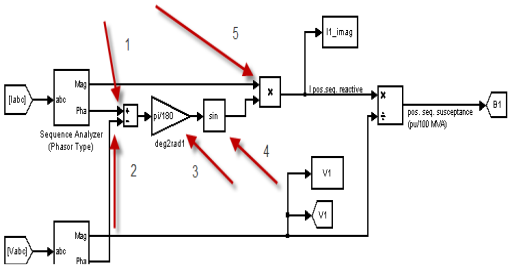


Σχ. 2.19 Παράθυρο παραμέτρων 3φ μετρήσεων

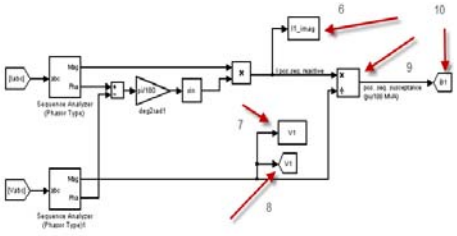
Όπως φαίνεται στο παράθυρο του μπλοκ 3φ μετρήσεων, τα μπλοκ V_{abc} και I_{abc} αντιστοιχούν στις ανά μονάδα τιμές της φασικής τάσεως και ρεύματος γραμμής αντίστοιχα με βασική ισχύ τα 100MVA και βασική τάση 500 KV. Για κάθε ένα από τα στοιχεία αυτά πραγματοποιείται υπολογισμός της θετικής ακολουθίας της φάσης a και έπειτα διαχωρισμός σε πλάτος και φάση.

Το σήμα του πλάτους του ρεύματος οδηγείται σε ένα μπλοκ πολλαπλασιασμού, ενώ η φάση του σε ένα αθροιστή (1) .

Στον αθροιστή οδηγείται επίσης το σήμα τάσης της φάσης a όπου γίνεται αφαίρεση τους (2). Στην συνέχεια το σήμα μετατρέπεται σε μοίρες (3), υπολογίζεται το ημίτονο του (4) και πολλαπλασιάζεται το κάθε αποτέλεσμα με το πλάτος του ρεύματος (5).



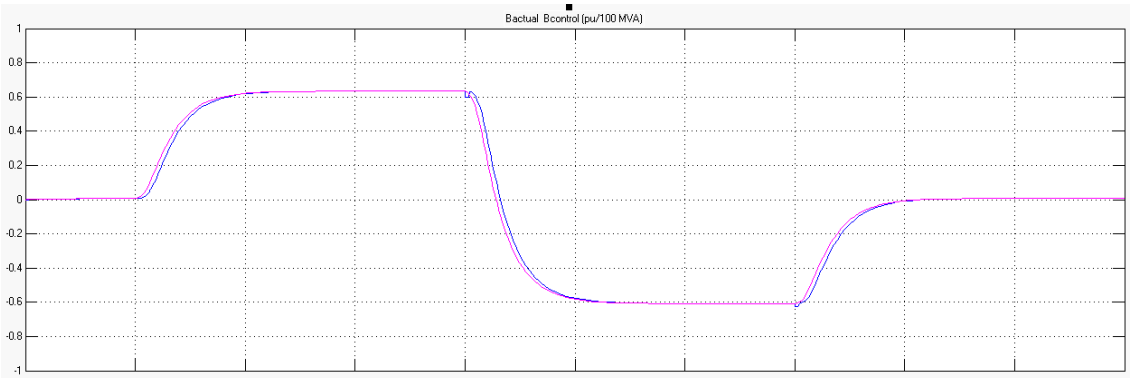
Σχ.2.20 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC (1)



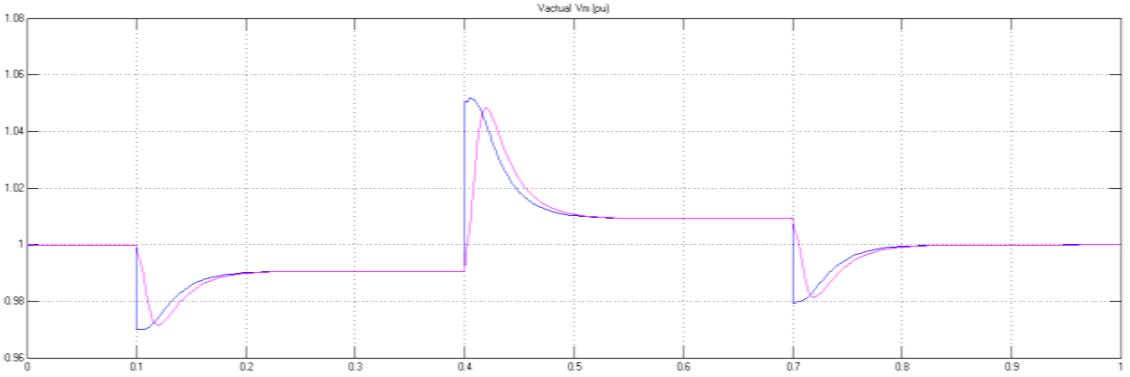
Σχ.2.21 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας SVC (2)

Τελικά λαμβάνουμε την τιμή του φανταστικού μέρους του ρεύματος της θετικής ακολουθίας. Η τιμή καταγράφεται στη χώρο εργασίας (workspace) (6) και ταυτόχρονα οδηγείται σε ένα πολλαπλασιαστή (9). Το σήμα τάσης επίσης καταγράφεται, ενώ αποστέλλεται στον πολυπλέκτη γραφικών παραστάσεων στο συνολικό μπλοκ διάγραμμα του δικτύου (8). Τέλος, το σήμα τάσης οδηγείται σε ένα πολλαπλασιαστή όπου τελικά λαμβάνουμε την αγωγιμότητα θετικής ακολουθίας B1.

Επιστρέφοντας στο μπλοκ διάγραμμα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι στην έξοδο του ελεγκτή SVC, ένας αποπολυπλέκτης διαχωρίζει το σήμα αγωγιμότητας και τάσης τα οποία οδηγούνται σε 2 υποσυστήματα προκειμένου να γίνει η γραφική απεικόνιση τους.



Σχ. 2.22 Γραφική παράσταση μεταβολής της αγωγιμότητας B,B1, του SVC.



Σχ. 2.23 Γραφική παράσταση μεταβολής της τάσης V,V1 του SVC.

Το σήμα της αγωγιμότητας πολλαπλασιάζεται με τη σταθερά 2 διότι η ανά μονάδα τιμές εντός του SVC ελεγκτή γίνονται με βασική ισχύ το 200MVA. Η μετατροπή αυτή επιτρέπει τη σύγκριση των τιμών αγωγιμοτήτων B και B1 σε όμοια βάση ισχύος (100MVA).

Στο scope (παλμογράφος) εισέρχονται τελικά 4 σήματα και λαμβάνουμε 2 γραφικές παραστάσεις (σχήμα 2.22, 2.23)

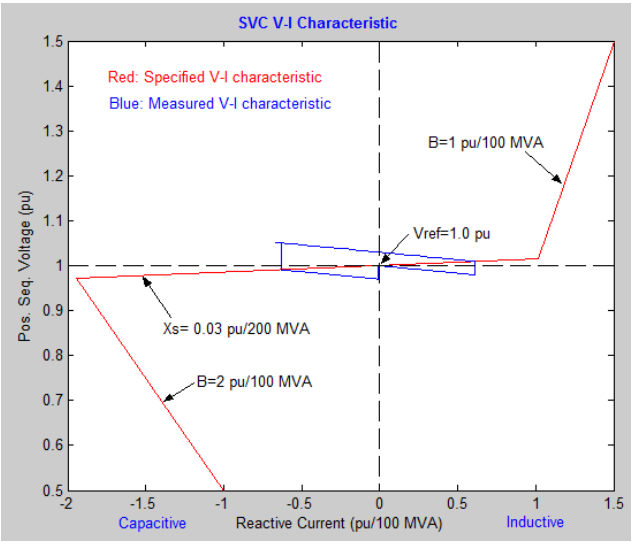
Το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στα σήματα ελέγχου ενώ το μπλε στις μετρήσεις που λαμβάνονται από το 3φ μπλοκ μετρήσεων στην είσοδο του SVC ελεγκτή.

Στο σχήμα 2.17 με το μωβ χρώμα παριστάνεται η τιμή της αγωγιμότητας που υπολογίζεται από τον ελεγκτή, (B) και με το μπλε από το υποσύστημα υπολογισμών (B1). Οι μεταβολές συμβαίνουν τις χρονικές στιγμές που έχουν ορισθεί στο παράθυρο της προγραμματιζόμενης πηγής τάσης (σχήμα 2.3).

Στο υποσύστημα υπολογισμών δεν υπεισέρχεται κανενός είδους καθυστέρηση σε αντίθεση με τον υπολογισμό της αγωγιμότητας όπου στον ελεγκτή εμφανίζονται δύο συναρτήσεις μεταφοράς που εισάγουν καθυστέρηση στους υπολογισμούς και την μεταφορά του σήματος στο υποσύστημα των γραφικών παραστάσεων.

Στο σχήμα 2.18 παρατηρούμε επίσης μια χρονική διαφορά στην γραφική απεικόνιση της τάσης της φάσης a. Η διαφορά είναι ότι η τάση V_{actual} (μωβ χρώμα) προέρχεται από το υποσύστημα επεξεργασίας σήματος και αντιστοιχεί στην θετική ακολουθία της φάσης a. Η τάση V_m προέρχεται από τον ελεγκτή SVC και αντιστοιχεί στην μέση τιμή του πλάτους της θετικής ακολουθίας της φάσης a.

Συμπεραίνουμε ότι η μέθοδος που χρησιμοποιεί ο ελεγκτής για να μετρήσει την μεταβολή της τάσης είναι πολύ πιο ταχύς από την απλή μετατροπή σε συμμετρικές συνιστώσες των φάσεων. Αυτό είναι απαραίτητο στοιχείο για την ακρίβεια της διόρθωσης της τάσης μέσω της χρήσης ενός SVC και συνήθης τακτική μέτρησης σε τέτοιου είδους εφαρμογές.



Σχ. 2.24 Χαρακτηριστική I-V του SVC.

Επιλέγοντας το εικονίδιο ‘Double click to plot V-I characteristics’ εμφανίζεται η χαρακτηριστική του σχήματος 2.19

Η κλίση της χαρακτηριστικής εντός της γραμμικής περιοχής είναι

$$K_{sl} = \frac{\Delta V}{V_r}\ \alpha.\mu, \quad (4)$$

όπου ΔV η μεταβολή της τάσης στο διάστημα μέγιστης ισχύος. (η μέγιστη ισχύς στην προσομοίωση είναι 200MVar ίση με την ονομαστική ισχύ του SVC) και V_r η ονομαστική τάση του SVC (16KV).

Συνήθως η κλίση παριστάνεται με την ισοδύναμη αντίσταση $X_{sl} = K_{sl}$ σε α.μ με μία τυπική τιμή που κυμαίνεται περίπου στο 3-5%.

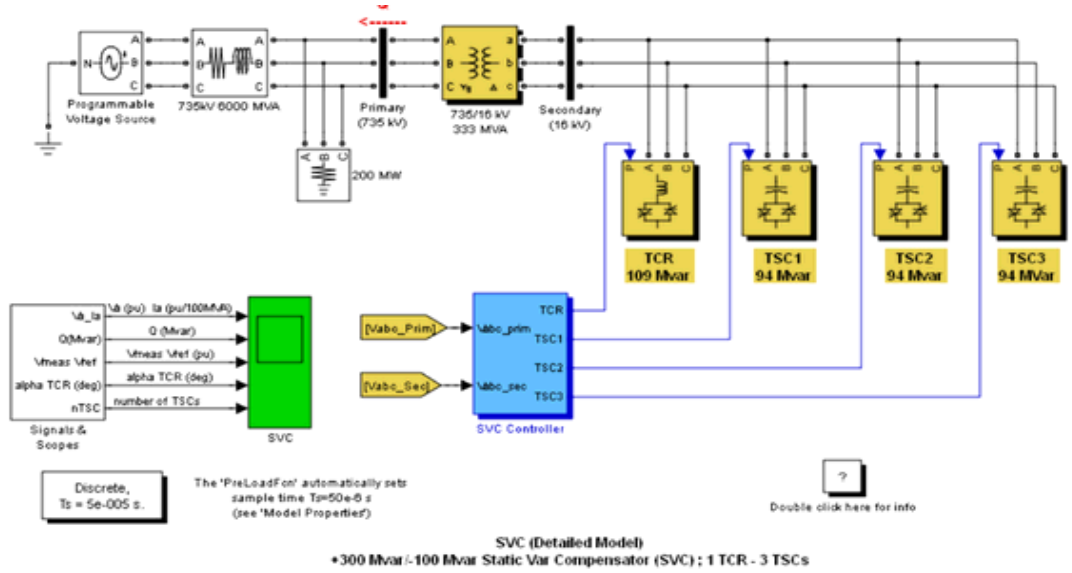
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

SVC DETAILED MODEL

Κεφάλαιο 3

1.1 Περιγραφή μοντέλου

Το μοντέλο αποτελείται από ένα ελεγκτή SVC μέγιστης αέργου ισχύος 300 MVAR. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού 735KV/16KV, 333MVA, 60Hz, μία βαθμίδα πηνίων ελεγχόμενων από θυρίστορ ισχύος 109MVAR, 3 βαθμίδες πυκνωτών ελεγχόμενων από θυρίστορ ισχύος 94 MVAR και συνολικής ισχύος 282 MVAR.



Σχ. 3.1 Μπλοκ διάγραμμα δικτύου SVC Detailed Model

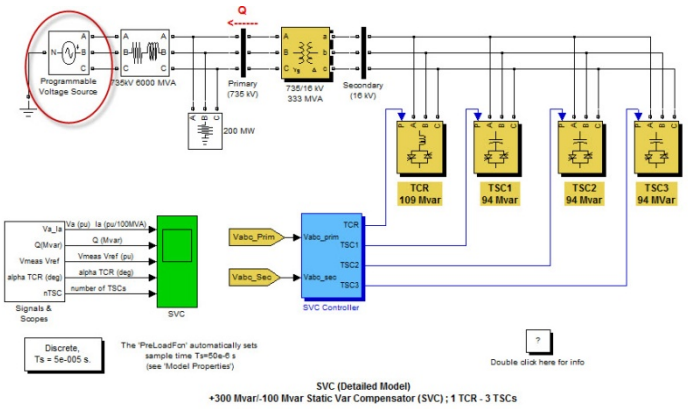
Κατά τη ζεύξη και απόζευξη των πυκνωτών επιτυγχάνεται μια διακριτή μεταβολή της αέργου ισχύος του δευτερεύοντος από το μηδέν ως 282 MVAR χωρητικής συμπεριφοράς με βήματα των 94 MVAR, ενώ έλεγχος της φάσης των θυρίστορ των πηνίων επιτρέπει συνεχή μεταβολή από το μηδέν μέχρι τα 109 MVAR επαγωγικά.

Λαμβάνοντας υπόψη την αντίδραση διαρροής του μετασχηματιστή (15%), η ισοδύναμη αγωγιμότητα του SVC όταν την ‘βλέπουμε’ από το πρωτεύον μπορεί να μεταβάλλεται από το -1,04 α.μ/100MVA (πλήρως επαγωγικό) μέχρι τα +3,23 α.μ/100MVA (πλήρως χωρητικό). Ο ελεγκτής SVC παρακολουθεί την τάση του πρωτεύοντος και στέλνει κατάλληλους παλμούς στα 24 θυρίστορ (6 θυρίστορ ανά βαθμίδα) προκειμένου να διατηρήσει τον απαιτούμενη αγωγιμότητα που χρειάζεται ο ρυθμιστής τάσης.

1.2 Ανάλυση δομικών στοιχείων προσομοίωσης

⇒ 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης

Η πηγή τάσης παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα ρύθμισης της συμπεριφορά της προσομοιώνοντας τις μεταβολές του δικτύου προς τα ανάντη του ζυγού.

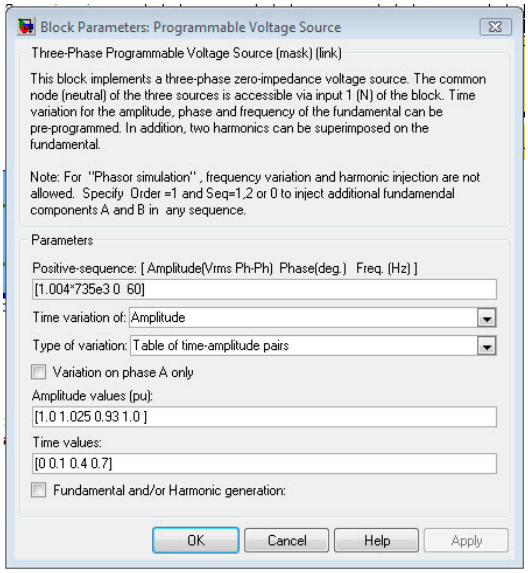


Σχ. 3.2 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης

Τα χαρακτηριστικά της πηγής φαίνονται στο σχήμα 3.3. Η τάση και η συχνότητα είναι ρυθμισμένες αρχικά στα :

$$V = 1.004 \cdot 735 \text{ KV} \quad (1)$$

$$f = 60\,Hz \quad (2)$$



Σχ. 3.3. Παράθυρο παραμέτρων 3φ προγραμματιζόμενης πηγής τάσης

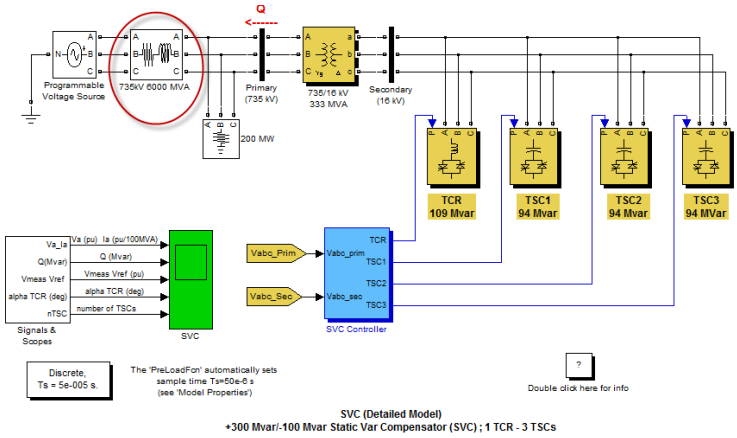
Η ρύθμιση γίνεται σε αυτή την τιμή ώστε στο άκρο της γραμμής η τάση του φορτίου τη χρονική στιγμή t =0 να είναι 735 KV.

Το πλάτος της τάσης μεταβάλλεται με βάση τις τιμές του πίνακα στο παράθυρο παραμέτρων της πηγής. Μπορεί επίσης, να μεταβάλλεται μόνο μία φάση ενώ μπορούμε να ρυθμίσουμε την έγχυση αρμονικών. Ο ουδέτερος της πηγής είναι γειωμένος.

⇒Ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση

Η ισχύς βραχυκύκλωσης του συστήματος στον ζυγό σύνδεσης με την πηγή είναι :

$$S_{sc} = 6000\text{MVA} \quad (3)$$



Σχ. 3.4 Ισοδύναμη αντίσταση προς τα ανάντη του ζυγού

Ο λόγος της επαγωγικής προς την ωμική αντίσταση είναι 10 προς 1.

Έτσι προκύπτει ότι:

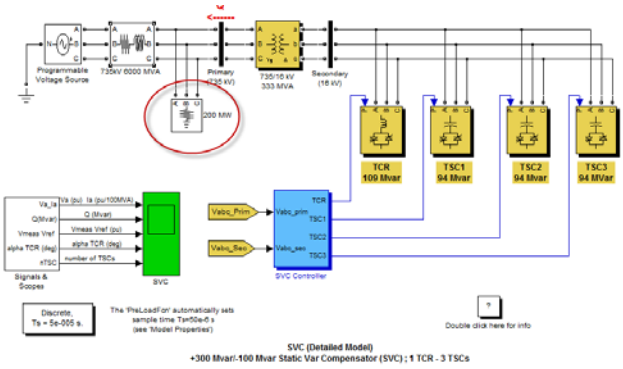
$$R = \frac{(735 \cdot 10^3)^2}{6000 \cdot 10^6 \cdot 10} = 9{,}00375\ \Omega \quad (4)$$

$$X = 90{,}0375\ \Omega \quad (5)$$

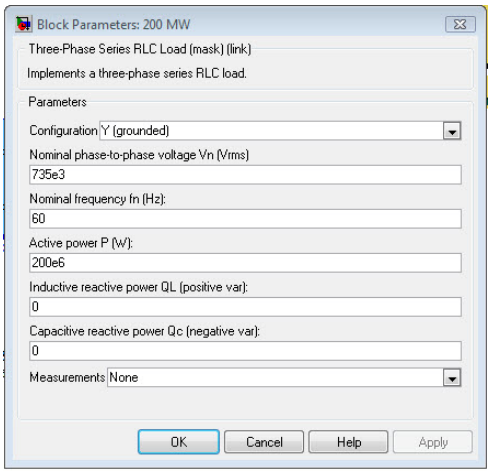
$$L = \frac{90{,}0375}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 0{,}23895\ H \quad (6)$$

⇒ Ωμικό φορτίο

Η ενεργός ισχύς του ωμικού φορτίου είναι 200 MW, σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα, με ονομαστική τάση 735KV και συχνότητα 60Hz.



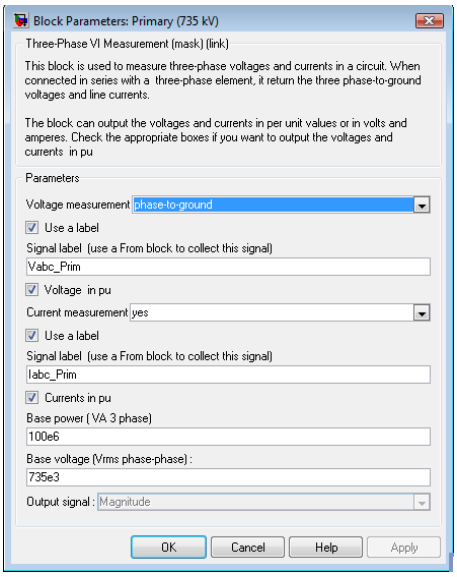
Σχ. 3.5 Ωμικό φορτίο



Σχ. 3.6 Παράθυρο παραμέτρων ωμικού φορτίου

⇒ Μπλοκ 3φ μετρήσεων πρωτεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή

Το μπλοκ μετράει σε κάθε φάση την ανά μονάδα τιμή της τάσης και του ρεύματος και αποστέλλει τις μετρήσεις σε κατάλληλα σημεία του μοντέλου για επεξεργασία. Η βασική τάση είναι 735KV και η βασική ισχύς είναι 100MVA.



Σχ. 3.7 Παράθυρο παραμέτρων μπλοκ 3φ μετρήσεων

⇒ Μετασχηματιστής υποβιβασμού

Το παράθυρο παραμέτρων του μετασχηματιστή έχει ως εξής: Πρώτα επιλέγεται το τύλιγμα του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Προκειμένου να αποφευχθεί η εμφάνιση 3ων αρμονικών στο δίκτυο, επιλέγεται το δευτερεύον σε συνδεσμολογία τριγώνου, ενώ το πρωτεύον σε σύνδεση αστέρα.

Το παραπάνω είναι συνήθης τακτική στους μετασχηματιστές που χρησιμοποιούνται σε παρόμοιες εφαρμογές. Επίσης δίνεται η δυνατότητα επιλογής πραγματικού πυρήνα με την εμφάνιση κορεσμού. Οι παράμετροι που επιλέγονται είναι :.

$$S = 333\text{MVA} \quad (7)$$

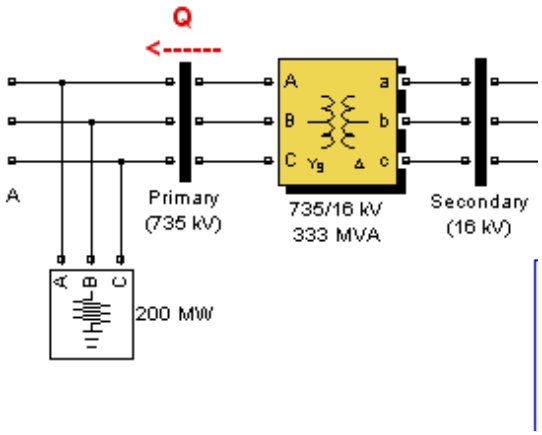
$$f = 60\text{Hz} \quad (8)$$

$$V = 735\text{KV} \quad (9)$$

$$R\pi = \frac{0{,}15}{30 \cdot 2} = 0{,}0025\ \Omega \quad (10)$$

όπου η τιμή 0,15 αντιστοιχεί στην ανά μονάδα τιμή της αντίδρασης διαρροής του μετασχηματιστή, η τιμή 1/30 είναι ο λόγος της επαγωγικής προς την ωμική αντίσταση και η τιμή 0,5 χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει την συνολική ωμική αντίσταση στα

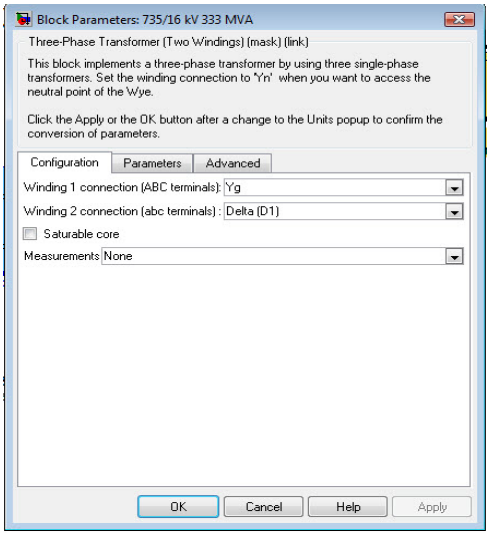
δύο τυλίγματα του μετασχηματιστή. Ομοίως, για την ανά μονάδα τιμή της αυτεπαγωγής ο διαχωρισμός πρωτεύοντος και δευτερεύοντος είναι 0,7 και 0,3 αντίστοιχα.



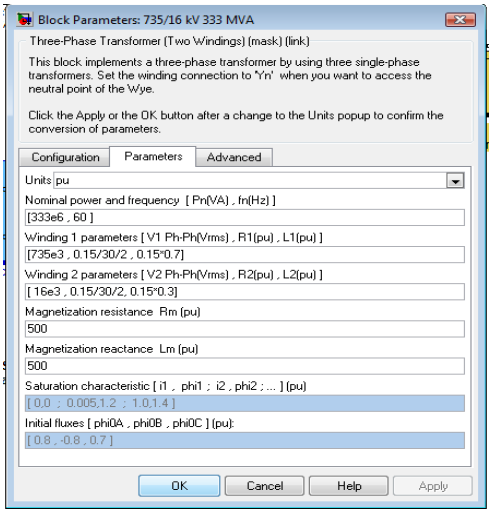
Σχ.3.8 Μετασχηματιστής υποβιβασμού

Δίνονται οι τιμές:

$$R_m = 500\ \alpha.\mu,\ (11) \quad L_m = 500\ \alpha.\mu\ ,(12)$$



Σχ.3.9 Παράθυρο παραμέτρων μετασχηματιστή (1)

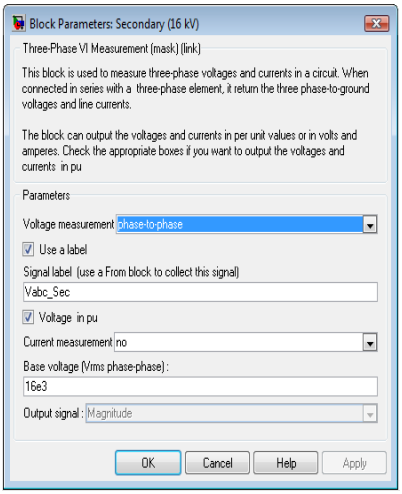


Σχ.3.10 Παράθυρο παραμέτρων μετασχηματιστή (2)

Δίνεται δυνατότητα προσομοίωσης του κορεσμού του πυρήνα του μετασχηματιστή καθώς επίσης και η αρχικοποίησης τιμών της μαγνητικής ροής.

⇒ Μπλοκ 3φ μετρήσεων του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή

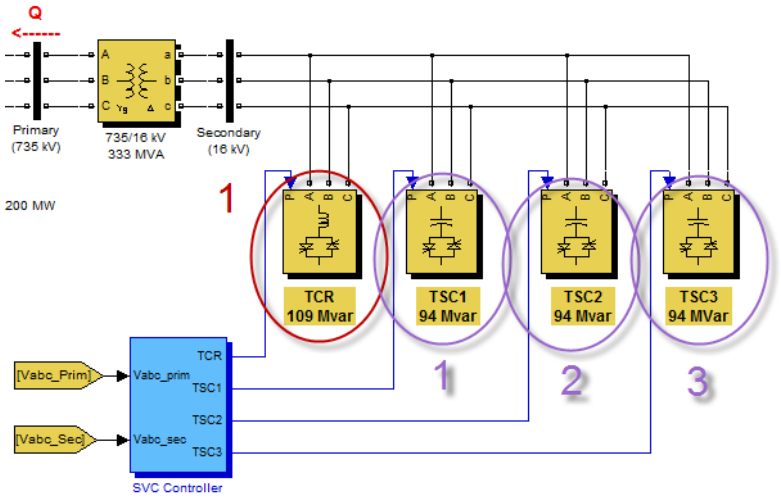
Ομοίως γίνονται μετρήσεις μόνο για τις τρεις πολικές τάσεις, υπολογίζονται οι ανά μονάδα τιμές με βασική τάση την πολική του δευτερεύοντος τυλίγματος και αποστέλλονται σε άλλο σημείο του μπλοκ διαγράμματος για χρήση των τιμών σε υπολογισμούς. Τα σήματα είναι σε πολική μορφή.



Σχ.3.11 Παράθυρο παραμέτρων μπλοκ 3φ μετρήσεων

⇒ Ελεγκτής SVC και βαθμίδες αντιστάθμισης

Οι βαθμίδες διακρίνονται σε επαγωγικές και χωρητικές. Αποτελούνται από μία βαθμίδα πηνίων και τρεις πυκνωτών. Ακολουθεί το διάγραμμα της διάταξης τους (σχήμα 3.12).

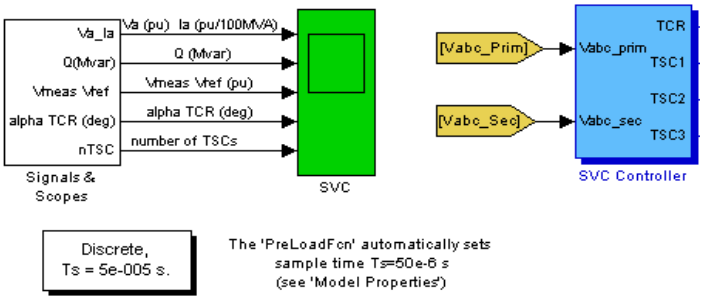


Σχ. 3.12 Βαθμίδες αντιστάθμισης

Διακρίνεται ο ελεγκτής SVC (SVC Controller) που αποτελεί την ‘καρδιά’ του συστήματος ελέγχου της τάσης του ζυγού σύνδεσης.

⇒ Σήματα και γραφικές παραστάσεις.

Στο σχήμα 3.13 απεικονίζεται το μπλοκ στο οποίο καταλήγουν οι μετρήσεις (τάση, ρεύμα, χρονικές στιγμές μεταβολής της γωνίας έναυσης των θυρίστορ) προκειμένου να παρασταθούν γραφικά τα δεδομένα.



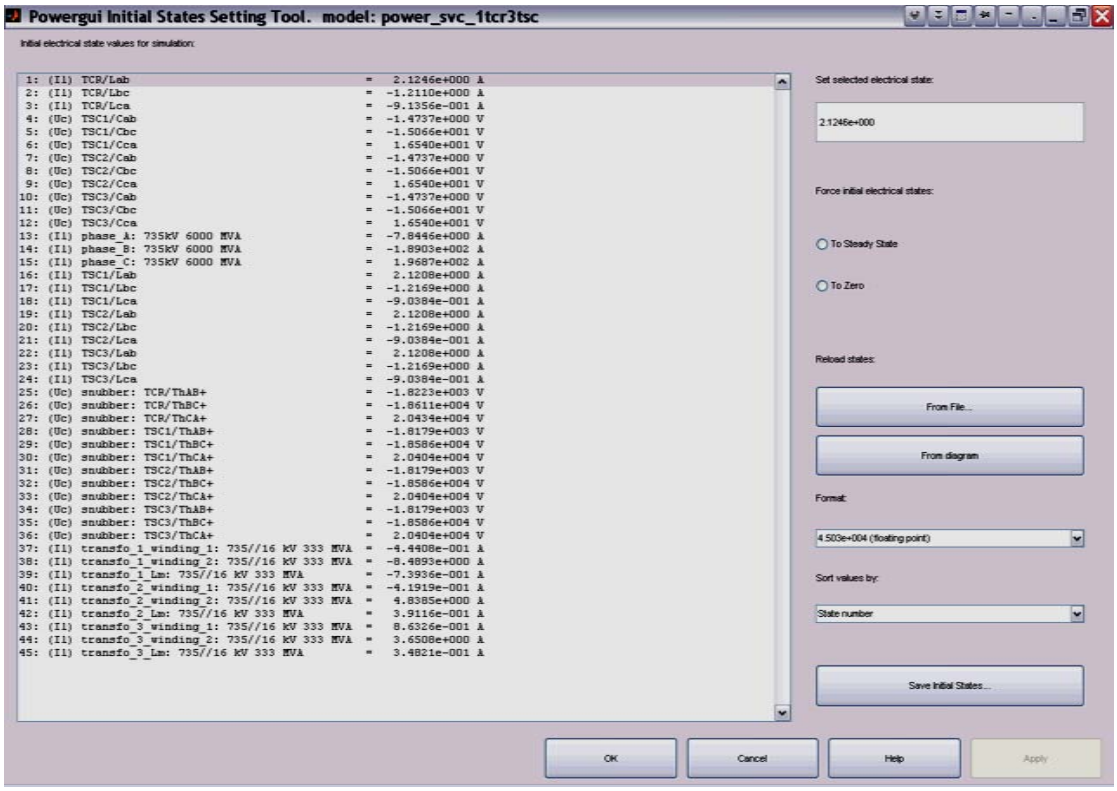
Σχ. 3.13 Υποσύστημα γραφικών παραστάσεων

Η επεξεργασία των σημάτων γίνεται με διακριτή μέθοδο. Αυτό ρυθμίζεται στο μπλοκ που αντιστοιχεί στους απαραίτητους υπολογισμούς ισχύος και συμπεριλαμβάνεται σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης ηλεκτρικών δικτύων.

Η περίοδος δειγματοληψίας είναι :

$$\mathrm{Ts} = 5 \cdot 10^{-005}\, sec \quad (13)$$

Οι αρχικές συνθήκες τάσης και ρεύματος του κυκλώματος, εμφανίζονται επιλέγοντας την λειτουργία Initial States Setting (σχήμα 3.14)



Σχ. 3.14 Παράθυρο Initial State Settings

⇒ Δομική ανάλυση συστήματος

- 3φ προγραμματιζόμενη πηγή τάσης.

Η πηγή τάσης μεταβάλλει την τάση στα άκρα της σύμφωνα με τον πίνακα 3.1

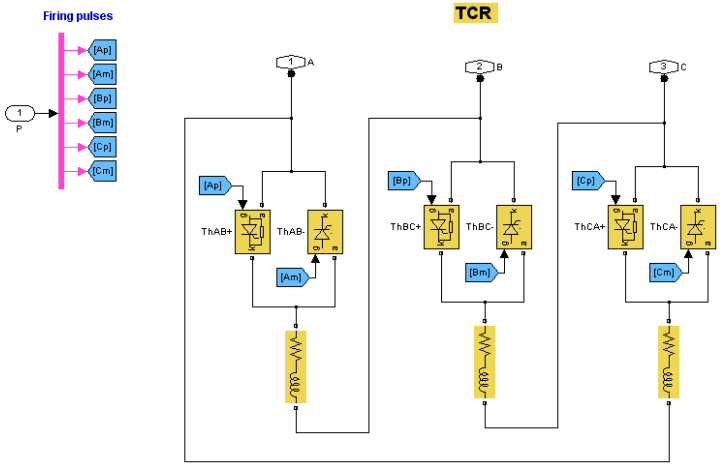
Τάση (α.μ)	Χρονική στιγμή
1	0
1,025	0,1
0,93	0,4
1,0	0,7

Πιν. 3.1 Ζεύγη τάσης – χρονικών στιγμών μεταβολής της ισοδύναμης πηγής τάσης.

Η προσομοίωση ξεκινά με την ονομαστική τάση στην ισοδύναμη πηγή. Την χρονική στιγμή 0,1 s η πηγή αποκτά την τιμή 1,025 α.μ. Διαρκεί για 0,3 s και στην συνέχεια πέφτει στο 0,93 α.μ. Τέλος, τη χρονική στιγμή 0,7 s ανεβαίνει και σταθεροποιείται στο 1 α.μ μέχρι το 1 s που τερματίζει η προσομοίωση.

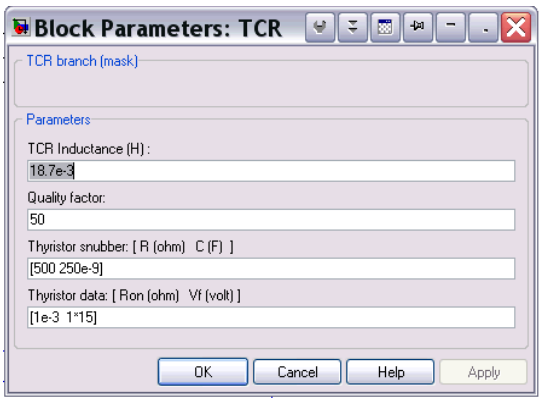
- Βαθμίδα πηνίων (Thyristor Controlled Reactor)

Η βαθμίδα των πηνίων φαίνεται στο σχήμα 3.15. Η θύρα εισόδου σημάτων του Simulink συλλέγει τους παλμούς έναυσης από τον ελεγκτή SVC και τους στέλνει στα θυρίστορ κάθε φάσης.



Σχ. 3.15 Βαθμίδα πηνίων

Η αρχή λειτουργίας της βαθμίδας των πηνίων έχει ως εξής: Η βαθμίδα είναι συνδεδεμένη σε τρίγωνο. Άρα κάθε φάση έχει την πολική τάση που ασκείται από τον μετασχηματιστή δηλαδή 16KV. Κάθε φάση αποτελείται από δύο θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα και από ένα μπλοκ που περιλαμβάνει μία αυτεπαγωγή και μία ωμική αντίσταση.

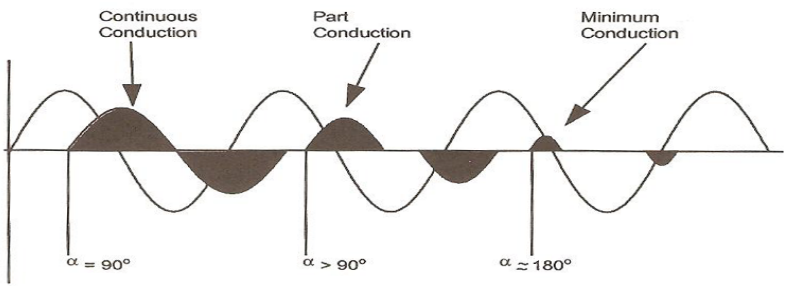


Σχ. 3.16 Παράθυρο παραμέτρων βαθμίδας πηνίων

Λόγω της επαγωγικής συμπεριφοράς της βαθμίδας η τάση στα άκρα της φάσης προηγείται του διανύσματος του ρεύματος κατά περίπου 90^o αφού η επαγωγική αντίσταση είναι πολύ μεγαλύτερη από την ωμική(σχήμα 3.16). Υπολογίζοντας την επαγωγική αντίσταση του στοιχείου βρίσκουμε ότι

$$X_l = 7{,}049\ \Omega \quad (14)$$

Εν συνεχεία ο συντελεστής ποιότητας που ορίζεται ως ο λόγος της επαγωγικής αντίστασης προς την ωμική είναι ίσος με 50. Άρα η ωμική αντίσταση είναι πολύ μικρότερη με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του στοιχείου να είναι ως επί το πλείστον επαγωγική. Έτσι, διατηρώντας μια γωνία έναυσης στα θυρίστορ περίπου 90^o να έχουμε πλήρη αγωγή. (*Η γωνία μηδενίζεται στο σημείο μηδενισμού της πολικής τάσης*.). Για γωνία έναυσης 90^o, θα έχουμε την πλήρη κυματομορφή του ρεύματος(σχήμα 3.17, $\alpha=90^o$). Σε αυτή την περίπτωση η βαθμίδα των πηνίων η οποία λειτουργεί συμμετρικά με ίδια γωνία έναυσης για κάθε φάση, θα είναι πλήρως επαγωγική απορροφώντας δηλαδή και την μέγιστη δυνατή άεργο ισχύ από το σύστημα.



Σχ. 3.17 Κυματομορφή ρεύματος SVC για 3 διαφορετικές γωνίες έναυσης.

Η μέγιστη άεργος ισχύς της βαθμίδας πηνίων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο αντικαθιστώντας την ονομαστική τάση και την επαγωγική αντίσταση του πηνίου ανά φάση.

$$Q = \frac{3 \cdot V^2}{X_l} \quad (15)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{16^2}{7.049} = 108.94\ MVAR \quad (16)$$

Με τον τρόπο αυτό πετυχαίνουμε την μείωση της τάσης σε περίπτωση υπέρτασης. Στην περίπτωση που δεν επιθυμούμε την συνολική άεργο ισχύ απορρόφησης αλλά ένα ποσοστό της τότε αυξάνουμε την γωνία έναυσης. Έτσι, όσο αυξάνουμε την γωνία έναυσης τόσο μειώνουμε και την άεργο ισχύ απορρόφησης. Η άεργος ισχύς που απορροφάται εξαρτάται από την τιμή της έντασης του ρεύματος που διαρρέει την κάθε φάση. Αυξάνοντας την γωνία έναυσης (σχήμα 3.17,α>90^o) μειώνεται η ενεργός τιμή του ρεύματος για την περίοδο της θεμελιώδους συχνότητας.

Εάν η γωνία έναυσης είναι μικρότερη των 90^o δεν θα έχουμε αγωγή των θυρίστορ. αφού η γωνία του συντελεστή ισχύος της βαθμίδας των πηνίων είναι περίπου 90^o .

Θεωρητικά, οι τύποι που χρησιμοποιούνται προκειμένου να υπολογίσουμε την γωνία έναυσης, αγωγής και σβέσης των θυρίστορ είναι :

Αρχικά, για ένα ωμικό, επαγωγικό φορτίο κατά την αγωγή έχουμε ότι ισχύει :

$$L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i = \sqrt{2} \cdot V_m \sin \omega t \quad (17)$$

$$\iota = \frac{\sqrt{2} \cdot V_m}{|Z| \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{\left(\frac{R}{L}\right) \cdot \left(\frac{\alpha}{\omega} - t\right)} \right]} \quad (18)$$

Όπου :

$$\varphi = \arctan(\omega L / R), \quad (19)$$

α : γωνία έναυσης του θυρίστορ κατά την θετική ημιπερίοδο ,

$$|Z| = [R^2 + (\omega L)^2]^{1/2} \quad (20)$$

Παρατηρούμε ότι το ρεύμα αποτελείται από δύο συνιστώσες. Μία ημιτονοειδή και μία εκθετική που φθίνει με την σταθερά χρόνου L/R. Για να υπολογίσουμε την γωνία σβέσης των θυρίστορ που μας ενδιαφέρει, πρέπει να μηδενιστεί η παραπάνω εξίσωση

$$i = 0 = \frac{\sqrt{2}\cdot V_m}{|Z|\cdot\left[\sin(\beta-\varphi)-\sin(\alpha-\varphi)\cdot e^{\left(\frac{R}{L}\right)\cdot\left(\frac{\alpha-\beta}{\omega}\right)}\right]} \quad (21)$$

Ενώ η γωνία αγωγής βρίσκεται από την διαφορά

$$\gamma = \beta - \alpha \quad (22)$$

Στην προκειμένη περίπτωση μας ενδιαφέρει το ρεύμα που προκύπτει κατά την αγωγή. Από το ρεύμα μπορεί να προκύψει η άεργος ισχύς από το γινόμενο της τάσης του ζυγού σε κάθε φάση.

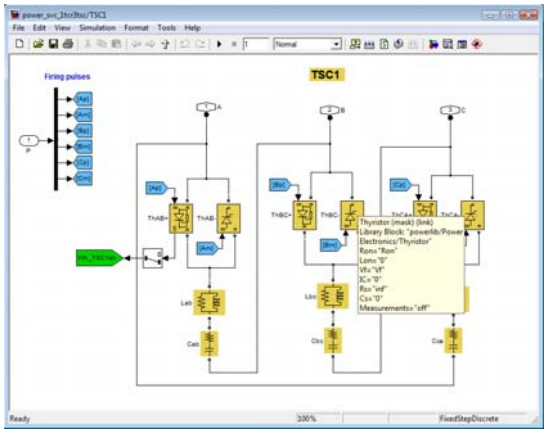
Απαραίτητο στοιχείο για τον υπολογισμό της τάσης είναι επίσης η γωνία αγωγής.

Ο ελεγκτής μετράει την τάση του ζυγού, έχοντας στην μνήμη την τάση αναφοράς και υπολογίζει την διαφορά τους. Υπολογίζει την νέα τιμή της αγωγιμότητας και στέλνει τους κατάλληλους παλμούς στα θυρίστορ.

Τα παραπάνω ισχύουν μόνο όταν η τάση βρίσκεται εντός των ορίων της γραμμικής περιοχής. Σε κάθε άλλη περίπτωση λειτουργεί σαν ένας σταθερός πυκνωτής ή πηνίο (τρεις βαθμίδες πυκνωτών παράλληλα ή μία βαθμίδα πηνίων).

Στο παράθυρο παραμέτρων επίσης διακρίνουμε τις τιμές του απαγωγού του θυρίστορ, την ωμική αντίσταση και την πτώση τάσης στα άκρα του σε περίπτωση αγωγής. Οι απαγωγοί αποτελούνται από ένα κύκλωμα RC που με την σύνδεση ενός επαγωγικού φορτίου τελικά δημιουργείται ένα κύκλωμα RLC. Με κατάλληλους υπολογισμούς των R, C, μειώνουμε την πιθανότητα λανθασμένης έναυσης των θυρίστορ που οφείλονται στον υπέρμετρο ρυθμό αύξησης της τάσης στα άκρα τους λόγω μεταβατικών φαινόμενων. Δεν είναι απαραίτητο να τοποθετηθούν απαγωγοί σε κάθε θυρίστορ αφού λόγω συνδεσμολογίας το κύκλωμα προστατεύεται από την ορθή αλλά και την ανάστροφη τάση (σχήμα 3.15).

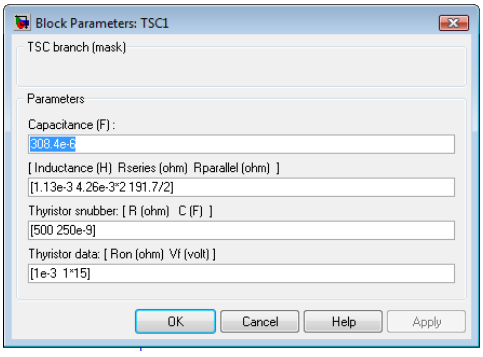
- Βαθμίδα πυκνωτών



Σχ. 3.18 Βαθμίδα πυκνωτών

Οι τρεις βαθμίδες πυκνωτών είναι όμοιες. Κάθε μία αποτελείται από μία θύρα εισόδου σημάτων των παλμών έναυσης από τον ελεγκτή SVC, και μία συνδεσμολογία τριγώνου σε κάθε φάση της οποίας συνδέεται ένας πυκνωτής και δύο αντιπαράλληλα θυρίστορ(σχήμα 3.18). Στην θύρα εισόδου βλέπουμε έξι διαφορετικά σήματα τα οποία ανά δύο αντιστοιχούν σε κάθε φάση ενώ το κάθε ένα αντιστοιχεί στην έναυση για κάθε ημιπερίοδο της πολικής τάσης στα άκρα του.

Μια **ειδοποιός** διαφορά από το TCR είναι ότι η βαθμίδα πυκνωτών δεν ελέγχεται με την γωνία έναυσης ώστε να έχουμε συνεχή αυξομείωση του ρεύματος. Η κάθε βαθμίδα συνδέεται ή αποσυνδέεται από το σύστημα. Η ζεύξη των πυκνωτών συνοδεύεται με την άμεση φόρτιση τους αποκτώντας την εκάστοτε πολική τάση των άκρων τους, πράγμα που σημαίνει απότομη μεταβολή του ρεύματος τους στο ρεύμα μόνιμης κατάστασης και άμεση καταστροφή των θυρίστορ αφού ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος που μπορούν να υποστούν είναι περιορισμένος και όχι άπειρος όπως συμβαίνει με τη φόρτιση των πυκνωτών.



Σχ. 3.19 Παράθυρο παραμέτρων βαθμίδας

Ο έλεγχος της βαθμίδας των πυκνωτών σε συνδυασμό με τη βαθμίδα πηνίου είναι ικανός να παρέχει πλήρη έλεγχο του συνολικού ρεύματος του SVC.

Στο σχήμα 3.19 φαίνονται οι τιμές των στοιχείων της βαθμίδας.

Η αυτεπαγωγή προστίθεται ως στοιχείο της βαθμίδας ώστε να αντισταθμίσει την απότομη μεταβολή του ρεύματος στο κύκλωμα των πυκνωτών και να προστατέψει την λειτουργία των θυρίστορ.

$X = X_L - X_C$ (23)

$X_l = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1.13 \cdot 10^{-3} = 0.426$ *(24)*

$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 308.4 \cdot 10^{-6}} = 8.6011\,\Omega$ *(25)*

$X = 0.426 - 8.6011 = -8.175$ *(26)*

Κάθε φάση σύμφωνα με τον τύπο υπολογισμού της αέργου ισχύος μπορεί να παρέχει :

$Q_c = \frac{{V_r}^2}{X} = \frac{16^2}{8.175} = 31.31 MVAr$ *ανά φάση.* *(27)*

Η 3φ άεργος ισχύς είναι:

$Q_{\beta\alpha\theta} = 93.94 MVAr$ *(28)*

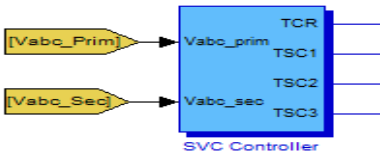
Ο συνολικός έλεγχος της αέργου ισχύος του στατικού εγκάρσιου αντισταθμιστή γίνεται με την προσθήκη ή αφαίρεση της κάθε βαθμίδας των πυκνωτών και με τον συνεχή έλεγχο ρεύματος μέσω της βαθμίδας του πηνίου.

Ο έλεγχος τελικά γίνεται με το διανυσματικό άθροισμα στον κόμβο κάθε φάσης που είναι συνδεδεμένη με το δευτερεύον του μετασχηματιστή.

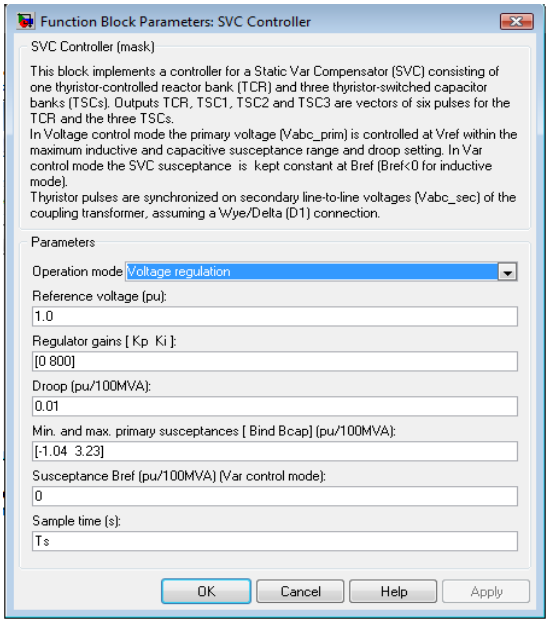
Μετά την ανάλυση των βαθμίδων πυκνωτών και πηνίων ακολουθεί το εσωτερικό του ελεγκτή SVC προκειμένου να αναλυθεί η μέθοδος προσδιορισμού της στιγμιαίας γωνίας έναυσης και των χρονικών στιγμών που δίνονται οι παλμοί στις βαθμίδες.

- Ελεγκτής SVC

Ο ελεγκτής SVC και το παράθυρο παραμέτρων του φαίνονται παρακάτω.

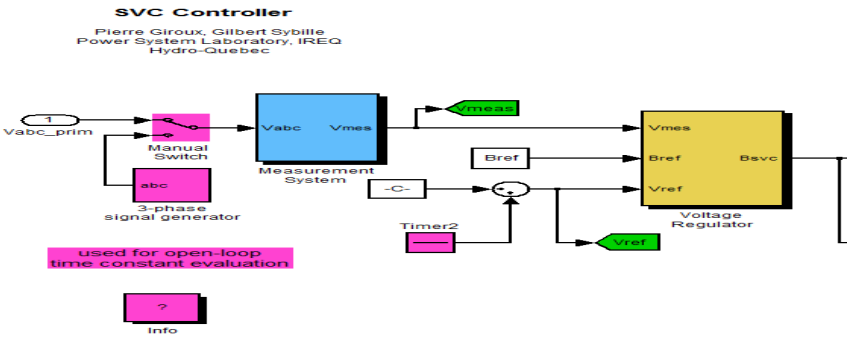


Σχ.3.20 Εικονίδιο SVC ελεγκτή



Σχ.3.21 Παράθυρο παραμέτρων ελεγκτή SVC

Στο παράθυρο παραμέτρων παρατηρούμε ότι λειτουργεί ως ρυθμιστής τάσης.

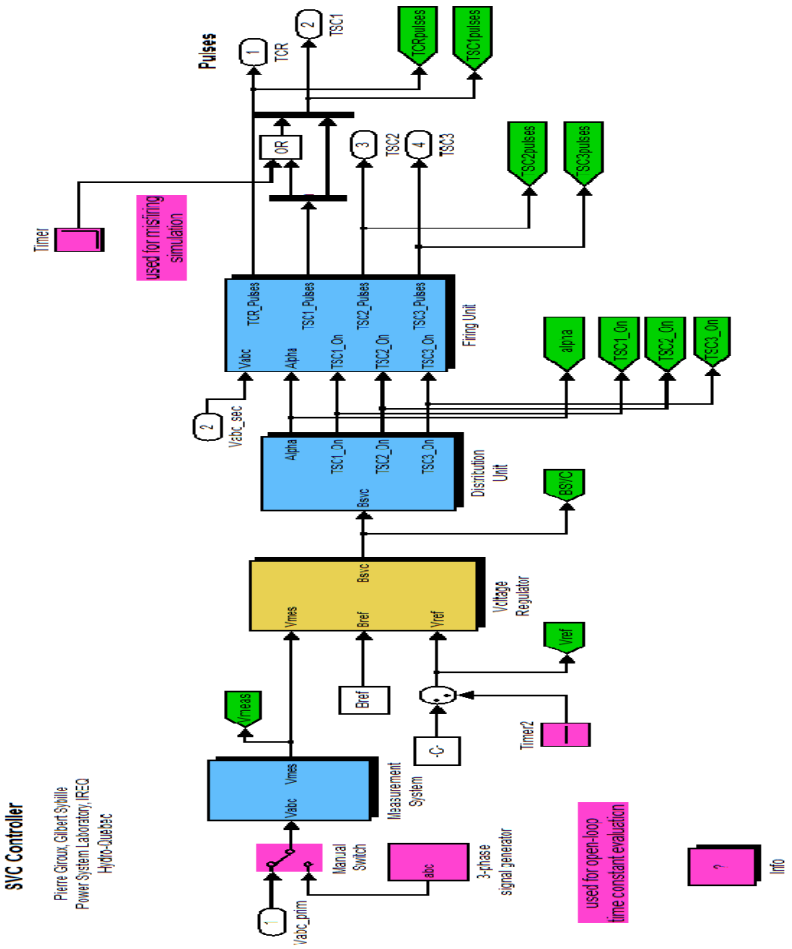


Σχ. 3.22 Μετρητική βαθμίδα ελεγκτή

Μια παρεμφερής λειτουργία είναι να παρέχει ή να απορροφά άεργο ισχύ στο σύστημα που είναι συνδεδεμένο σε σύγκριση με μία τιμή αναφοράς. Η τάση αναφοράς είναι 1 α.μ, τα κέρδη του διαφοριστή (K_p)και του ολοκληρωτή(K_p) είναι 0 και 800 αντίστοιχα, η κλίση της χαρακτηριστικής του SVC είναι 0,01 α.μ / 100MVA, η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της αγωγιμότητας είναι -1,04 και +3,23 α.μ/ 100MVA η αγωγιμότητα αναφοράς είναι 0. Ο χρόνος δειγματοληψίας ορίζεται από άλλο μπλοκ εξωτερικά, το Powergui (Power Graphic User Interface) που αναλύθηκε πρωτύτερα.

Στο μπλοκ του ελεγκτή SVC καταφθάνουν δύο σήματα ελέγχου του Simulink που αντιστοιχούν στις α.μ τιμές των τάσεων στα άκρα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή. Τα σήματα είναι απαραίτητα για τους εσωτερικούς υπολογισμούς.

Προχωρώντας στο εσωτερικό του SVC παρατηρούμε :

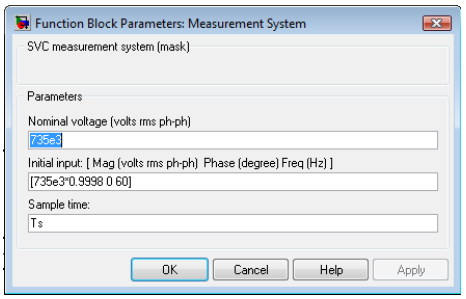


Σχ.3.23 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή SVC.

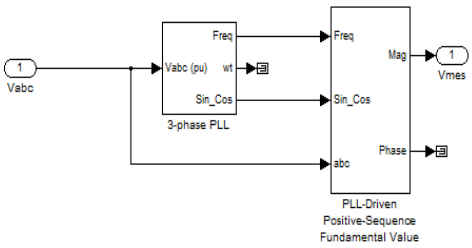
Αρχικά παρατηρούμε την θύρα εισόδου των σημάτων τάσης του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Οι τρεις τάσεις σε ανά μονάδα τιμές των φασικών μεγεθών οδηγούνται σε ένα χειροκίνητο μεταγωγικό διακόπτη που έχει ως δεύτερη είσοδο μία 3φ γεννήτρια σημάτων.

Στην συνέχεια, ακολουθεί η μετρητική βαθμίδα του ελεγκτή. Στο παράθυρο παραμέτρων του ρυθμίζονται η ονομαστική τάση, οι αρχικές συνθήκες λειτουργίας και η περίοδος δειγματοληψίας.

Στο εσωτερικό της μετρητικής διάταξης.(σχήμα 3.24). παρατηρούμε την θύρα εισόδου που μεταφέρει τα σήματα των $3^{ων}$ τάσεων του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή. Το σήμα οδηγείται σε δύο μπλοκ. Το μπλοκ PLL(Phase Locked Loop) χρησιμοποιείται για να συγχρονιστεί πάνω σε μεταβλητές συχνότητες και ημιτονοειδή σήματα. Διαχωρίζονται οι πληροφορίες που μεταφέρονται σε συχνότητα και πλάτος. Τα δύο σήματα στην συνέχεια κατευθύνονται σε ένα μπλοκ που οδηγείται από ένα PLL θετικής ακολουθίας της θεμελιώδους συχνότητας. Σαν είσοδοι δίνονται η συχνότητα εξόδου από το PLL, το ημίτονο και συνημίτονο με την θεμελιώδη συχνότητα και τα πλάτη των τάσεων. Στην έξοδο λαμβάνουμε την μετρούμενη τάση.



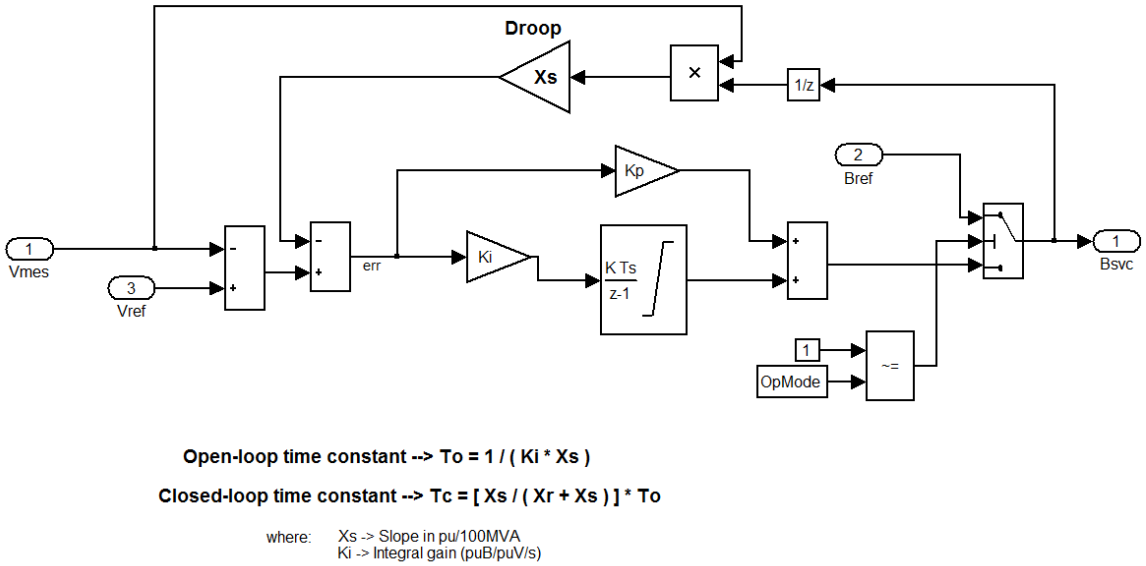
Σχ. 3.24 Παράθυρο παραμέτρων μετρητικής βαθμίδας



Σχ. 3.25 Μπλοκ διάγραμμα μετρητικής βαθμίδας

Το σήμα μετρούμενης τάσης οδηγείται με την λειτουργία Go To Tag στο υποσύστημα σχεδίασης γραφικών παραστάσεων ενώ ταυτόχρονα κατευθύνεται στον ρυθμιστή τάσης .

Ο ρυθμιστής δεν επιδέχεται ρυθμίσεις αφού οι παράμετροι του δίνονται στο παράθυρο παραμέτρων του ελεγκτή SVC. Το εσωτερικό του έχει ως εξής :



Σχ.3.26 Υποσύστημα υπολογισμού αγωγιμότητας

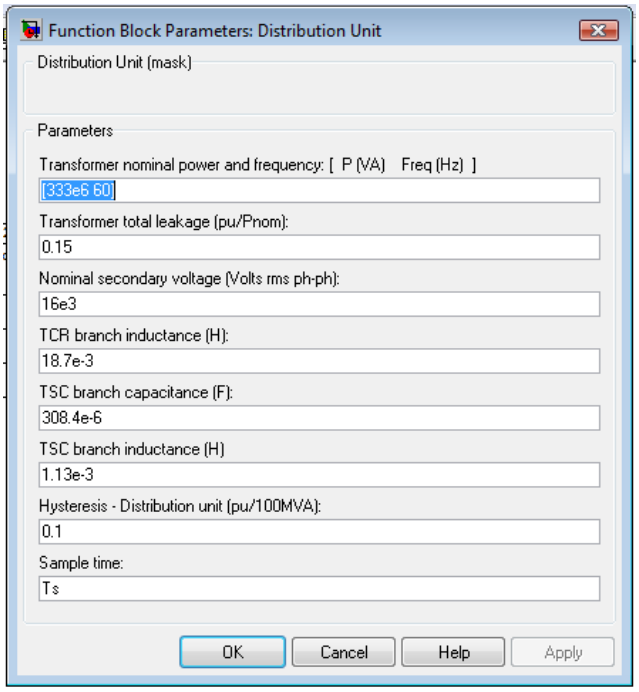
Η καρδιά του ρυθμιστή τάσης είναι ο PI Controller (αναλογικός – ολοκληρωτικός ελεγκτής). Η μετρούμενη τάση του πρωτεύοντος οδηγείται σε ένα αθροιστή μαζί με την τάση αναφοράς.

Επίσης το ίδιο σήμα οδηγείται και σε ένα πολλαπλασιαστή. Η διαφορά καταλήγει σε ένα δεύτερο αθροιστή που καταλήγει και το γινόμενο της μετρούμενης τάσης με την υπολογισμένη αγωγιμότητα της εξόδου του μπλοκ που θα δοθεί ως εντολή στον ελεγκτή SVC. Ο όρος 1/z αντιστοιχεί σε καθυστέρηση ενός κύκλου. Μετά πολλαπλασιάζεται με την κλίση του SVC, Xs. Με την διαφορά λαμβάνουμε το εκάστοτε σφάλμα που χρειάζεται για τον PI Controller. Στην συνέχεια το σήμα πολλαπλασιάζεται με τα κέρδη Kp και Ki όπου στην συνέχεια ολοκληρώνεται για να υπολογιστεί η τιμή της αγωγιμότητας.

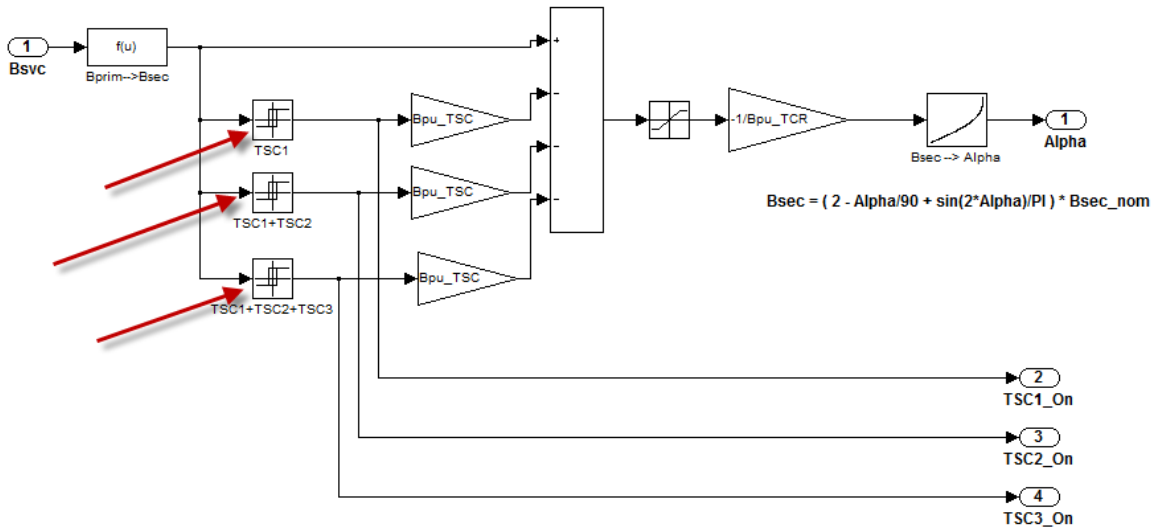
Τα αποτελέσματα αφαιρούνται σε ένα αθροιστή και οδηγούνται σε ένα διακόπτη 2 θέσεων. Στην μία θέση έχουμε την χρήση του ελεγκτή ενώ στην άλλη θέση ο έλεγχος γίνεται με βάση μια αγωγιμότητα αναφοράς.

Το μπλοκ διάγραμμα παράγει στην έξοδο του ένα σήμα που αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα που θα δοθεί στο επόμενο μπλοκ προκειμένου να υπολογισθούν οι γωνίες έναυσης των θυρίστορ για την βαθμίδα των πηνίων και των πυκνωτών.

- Μονάδα Διανομής - Distribution Unit



Σχ. 3.27 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας διανομής



Σχ. .3.28 Μπλοκ διάγραμμα μονάδας διανομής

Στο σχήμα 3.27 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που χρειάζονται για τους υπολογισμούς στο εσωτερικό της μονάδας διανομής.

Ζητούνται τα χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή, των βαθμίδων των πηνίων και πυκνωτών, η τιμή της υστέρησης και τέλος η περίοδος δειγματοληψίας τα οποία έχουν δοθεί και πρωτύτερα.

Συνεχίζοντας στο μπλοκ διάγραμμα βλέπουμε την είσοδο που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη αγωγιμότητα που έχει υπολογισθεί με βάση το επίπεδο της τάση του ζυγού στο πρωτεύον του μετασχηματιστή. Πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη και η αντίδραση σκέδασης του μετασχηματιστή καθώς έχουμε κι εκεί απώλειες.

Επιλέγοντας το εικονίδιο $B_{prim} \Rightarrow B_{sec}$ έχουμε την εξής εξίσωση μετατροπής

$$B_{sec} = \frac{B_{prim}}{(1 + B_{prim} \cdot X_{tr} \cdot 100 \cdot 10^{8} \cdot P_{nom_xfo})}, \quad (29)$$

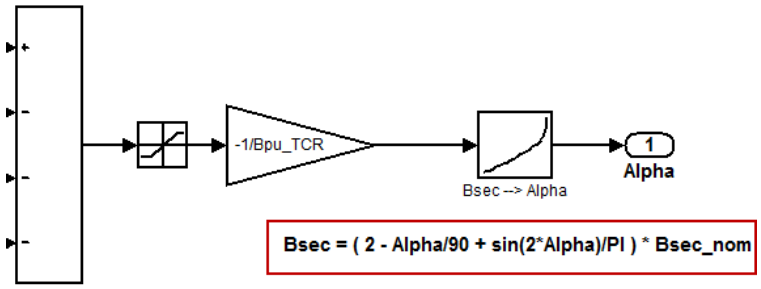
B_{prim} : αγωγιμότητα πριν τον μετασχηματιστή

B_{sec}: αγωγιμότητα που περιλαμβάνει τις απώλειες του μετασχηματιστή

Στο σχήμα 3.28 διακρίνονται 3 ηλεκτρονόμοι. Κάθε ένας αντιστοιχεί και στην ενεργοποίηση μιας βαθμίδας πυκνωτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της επιθυμητής αγωγιμότητας ενεργοποιείται και η επόμενη βαθμίδα μέχρι το ανώτατο όριο και των τριών. Όταν εισέρχεται η επόμενη βαθμίδα η προηγούμενη παραμένει εντός του συστήματος.

Κάθε ηλεκτρονόμος ενεργοποιείται με ένα κατώτατο όριο τιμής ενώ απενεργοποιείται με μια μικρή διαφορά από το κατώτατο όριο που είναι ανάλογη της υστέρησης (παράμετρος που ζητείται στο παράθυρο παραμέτρων)

Στην συνέχεια η έξοδος του κάθε ηλεκτρονόμου διακλαδίζεται κατευθυνόμενο είτε σε ένα αθροιστή μέσω ενός πολλαπλασιαστή για την μετατροπή της εξόδου του ηλεκτρονόμου σε ισοδύναμη τιμή αγωγιμότητας και παράλληλα σε μία αντίστοιχη θύρα εξόδου. Οι 3 έξοδοι αντιστοιχούν στις εντολές ενεργοποίησης των βαθμίδων των πυκνωτών.



Σχ. 3.29 Υπολογισμός γωνίας έναυσης θυρίστορ βαθμίδας πηνίων

Ο αθροιστής συλλέγει τα τέσσερα σήματα και αφαιρεί το κάθε ενεργό σήμα από την υπολογισμένη αγωγιμότητα. Το αποτέλεσμα του αθροιστή οδηγείται μέσω ενός μπλοκ κορεσμού που οριοθετεί τη μέγιστη μηδέν και ελάχιστη τιμή, την μέγιστη απόλυτη τιμή της βαθμίδας των πηνίων.

Έπειτα το αποτέλεσμα διαιρείται ώστε να έχουμε ένα ποσοστό επί της μέγιστης τιμής και μετατρέπεται σε αντίστοιχη γωνία έναυσης των θυρίστορ στην βαθμίδα των πηνίων μέσω της σχέσης στο σχήμα 3.29. Το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται διότι το αποτέλεσμα του αθροιστή σε κάθε περίπτωση προκύπτει αρνητικό. Είτε χρησιμοποιείται μόνο το TCR ή όταν ενεργοποιούνται και οι βαθμίδες των πυκνωτών.

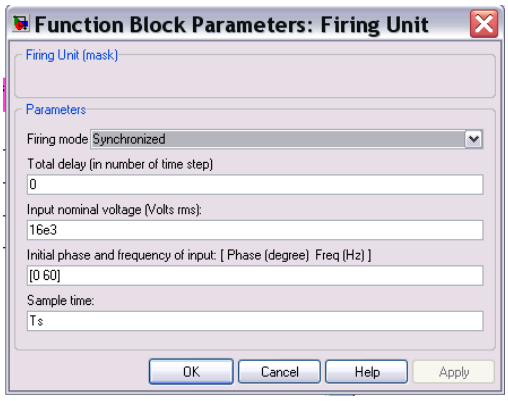
Η σχέση αναλύεται ως εξής:

$$B_{TCR} = [2(\pi - \alpha) + \sin 2a\ ] / \pi \quad (30)$$

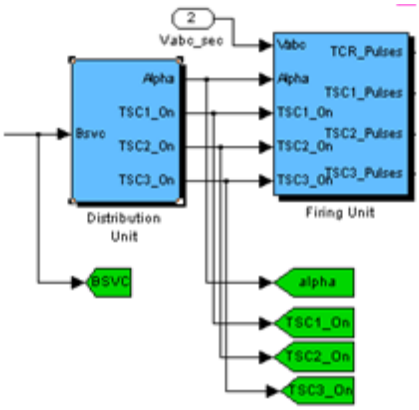
Οι τιμές που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση δίνονται από ένα συγκεντρωτικό πίνακα ζευγών αγωγιμότητας - γωνιών έναυσης.

- Μονάδα Έναυσης – Firing Unit

Τα σήματα παλμών των βαθμίδων στέλνονται στο υποσύστημα σχεδίασης ενώ παράλληλα προχωρούν στην μονάδα έναυσης των θυρίστορ στις βαθμίδες αντιστάθμισης.



Σχ. 3.30 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας έναυσης



Σχ. 3.31 Μονάδα έναυσης

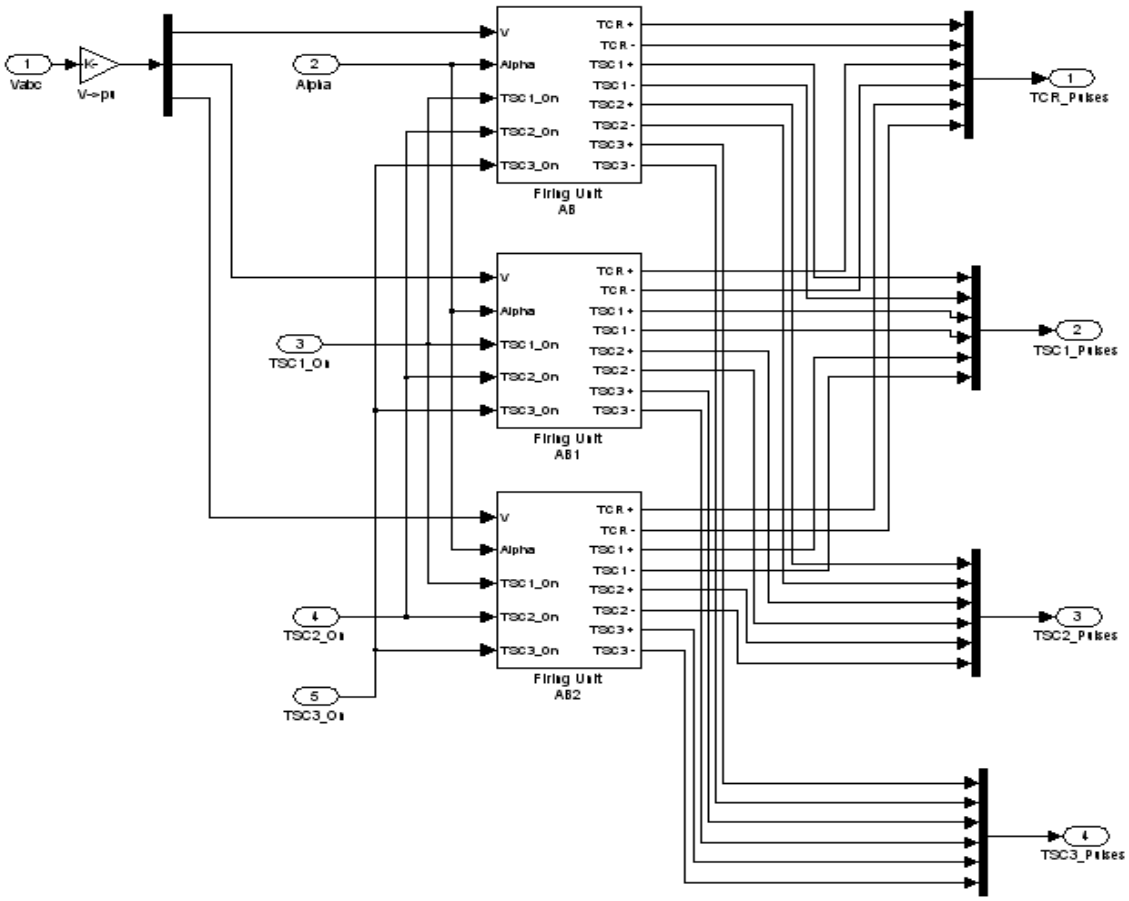
Επίσης στη μονάδα αποστέλλεται και η τιμή της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος του μετασχηματιστή.

Οι παράμετροι ρύθμισης είναι η μέθοδος έναυσης, που είναι συγχρονισμένος ή συνεχής, η χρονική καθυστέρηση της έναυσης, η ονομαστική τάση εισόδου, η αρχική φάση και συχνότητα και τέλος η περίοδος δειγματοληψίας.

Στο σχήμα 3.31 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα της μονάδας έναυσης.

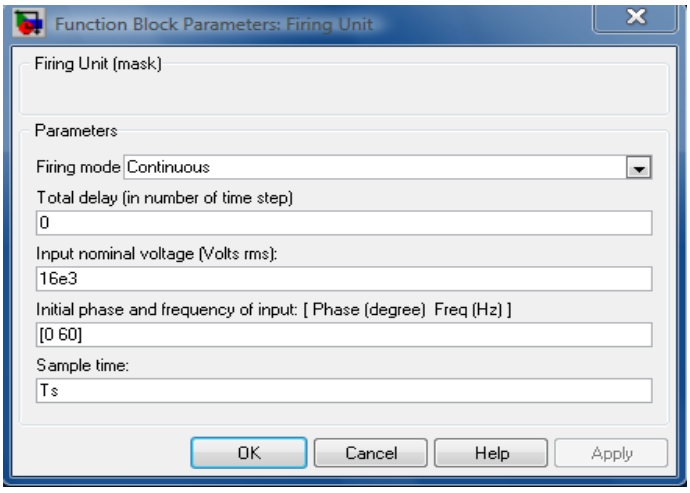
Το σήμα της τάσης του δευτερεύοντος τυλίγματος μετατρέπεται σε ανά μονάδα τιμή και στην συνέχεια στέλνεται στις υπόλοιπες 3 μονάδες έναυσης που αντιστοιχεί για κάθε φάση. Κάθε μονάδα δίνει αποτέλεσμα για την έναυση κάθε ζεύγους θυρίστορ για μία φάση για όλες τις βαθμίδες του SVC. Για αυτό παρατηρούμε 3 μονάδες και 4 θύρες εξόδου.

Κάθε φάση έχει ως είσοδο την τάση δευτερεύοντος, την γωνία έναυσης του TCR και τον παλμό έναυσης κάθε βαθμίδας πυκνωτή.



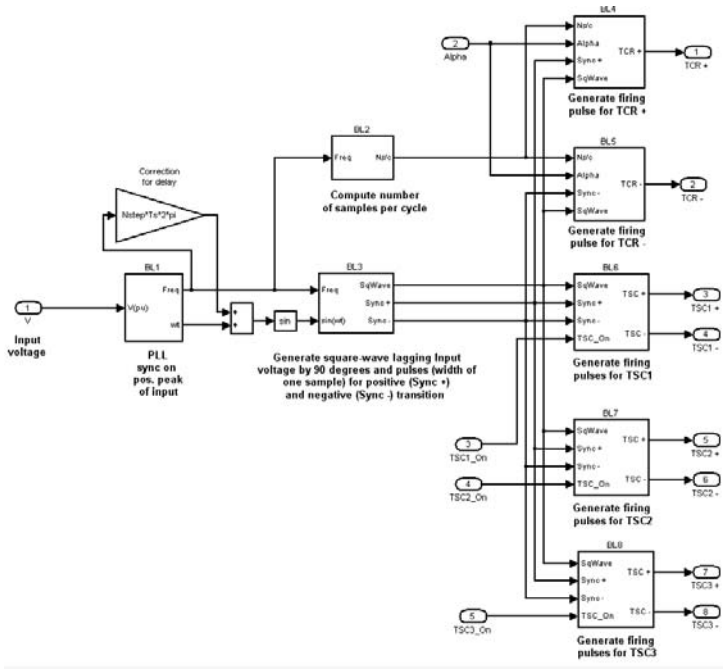
Σχ. 3.32 Μπλοκ διάγραμμα μονάδας έναυσης

Επιλέγοντας ένα εικονίδιο βλέπουμε το παράθυρο παραμέτρων στο σχήμα 3.32

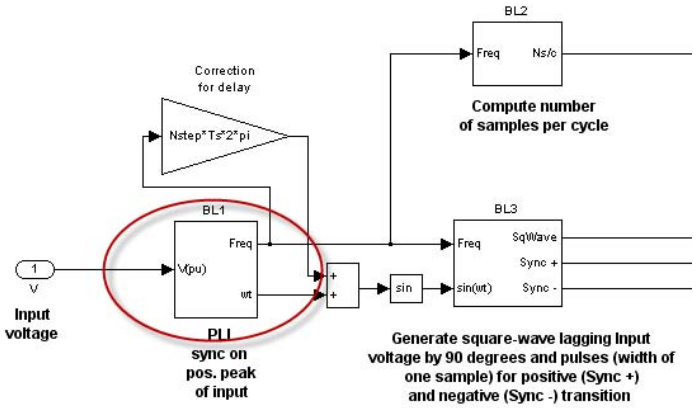


Σχ. 3.33 Παράθυρο παραμέτρων μονάδας έναυσης θυρίστορ

Οι ρυθμίσεις των τριών μονάδων διαφέρουν στην διαφορά φάσης του τριφασικού συστήματος.



Σχ. 3.34 Εσωτερικό μονάδας έναυσης



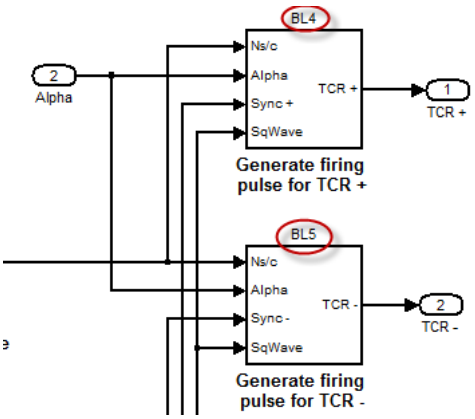
Σχ. 3.35 Μπλοκ διάγραμμα PLL

Το σήμα εισόδου της τάσης οδηγείται σε ένα PLL (Phase Locked Loop) δηλαδή σε ένα μπλοκ που ακολουθεί τη μέση τιμή της μετρούμενης συχνότητας του εισερχόμενου σήματος.

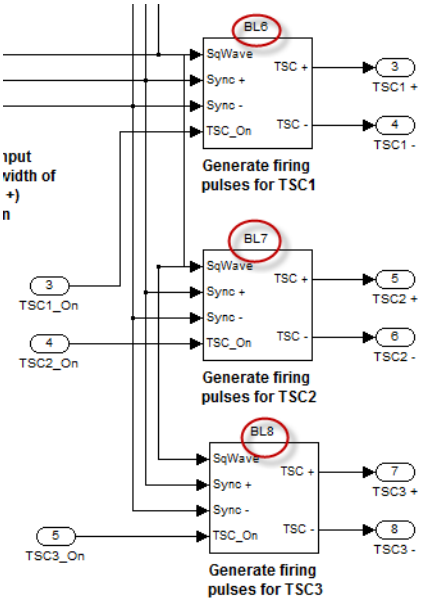
Το Phase Locked Loop (PLL) είναι ένας μηχανισμός αυτομάτου ελέγχου που σκοπό έχει να εντοπίζει την συχνότητα και φάση ενός σήματος στην είσοδο του. Λόγω μεταβολών στην συχνότητα και φάση της τάσης του συστήματος είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός που κάθε στιγμή να εξασφαλίζει την κατάλληλη χρονική στιγμή εναύσεων των θυρίστορ. Λαμβάνει ως είσοδο την τάση αλλά και την καθυστέρηση που εδώ είναι μηδενική. Ως έξοδο έχουμε την συχνότητα που μπορεί να μεταβάλλεται σε ένα σύστημα μεταφοράς καθώς και την φάση της τάσης

Στην συνέχεια τα σήματα δίνονται στα επόμενα 5 μπλοκ που τα BL4,BL5 αντιστοιχούν στην θετική και αρνητική ημιπερίοδο του TCR ενώ τα BL6,BL7,BL8 αντιστοιχούν στις 3 βαθμίδες των πυκνωτών.

Τα BL4, BL5 έχουν 3 κοινά σήματα στην είσοδο τους ενώ διαφέρουν στον συγχρονισμό της ημιπεριόδου. Τα Sync+ και Sync- είναι μοναδιαία σήματα που δίνονται τις κατάλληλες χρονικές στιγμές.



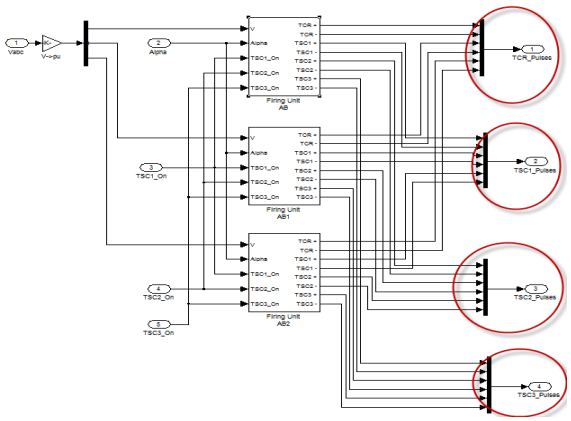
Σχ. 3.36 BL4 , BL5



Σχ. 3.37 BL6, BL7, BL8

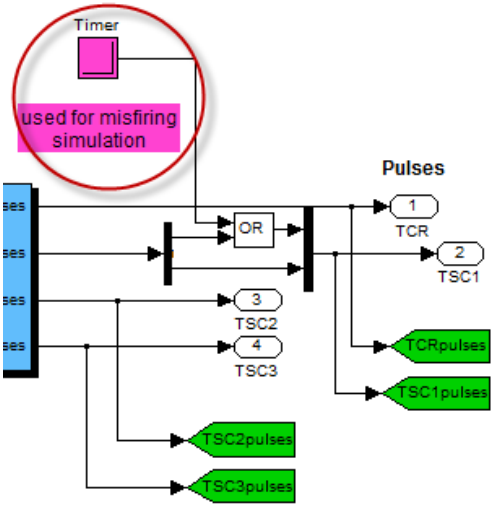
Τα δύο μπλοκ BL4, BL5 δίνουν ως αποτέλεσμα τον παλμό έναυσης στα θυρίστορ του TCR σε κάθε ημιπερίοδο ενώ τα υπόλοιπα παράγουν τους παλμούς έναυσης για την ενεργοποίηση των βαθμίδων των πυκνωτών που γίνεται πάντα σε καθορισμένη γωνία.

Επιστρέφοντας στο μπλοκ διάγραμμα (σχήμα 3.38) παρατηρούμε ότι έχουμε την συλλογή των παλμών έναυσης των θυρίστορ για κάθε βαθμίδα ξεχωριστά σε τέσσερις θύρες εξόδου με την κάθε μία να περιλαμβάνει τα σήματα και για τις τρεις φάσεις.



Σχ. .3.38 Θύρες εξόδου παλμών έναυσης

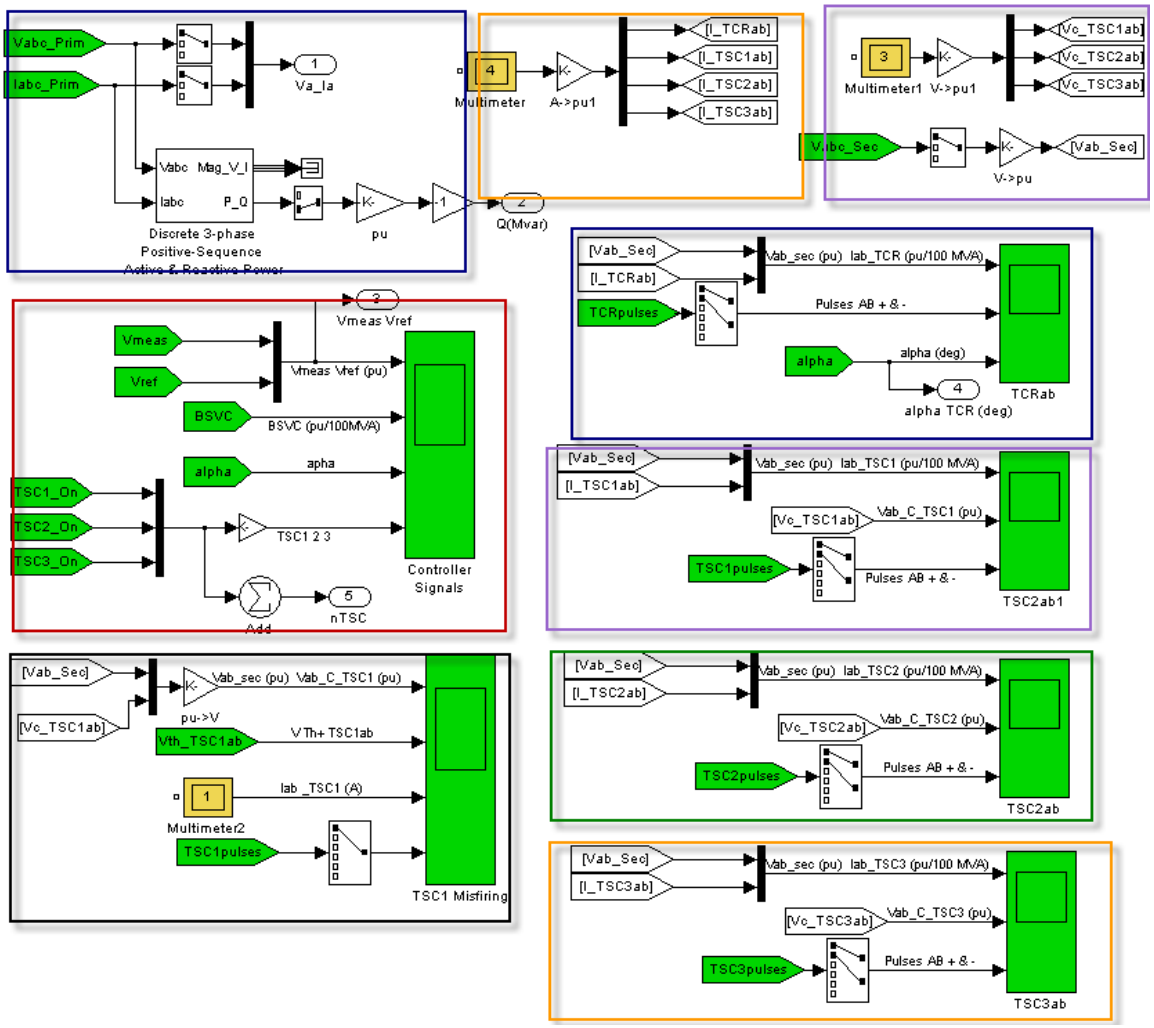
- Μονάδα Καταγραφής και Γραφικών Παραστάσεων



Σχ. 3.39 Θύρες εξόδου παλμών προς τις βαθμίδες των θυρίστορ

Τα σήματα οδηγούνται σε θύρες που καταλήγουν είτε στα θυρίστορ ή στο υποσύστημα σχεδίασης προκειμένου να παρασταθούν γραφικά τα δεδομένα και οι υπολογισμοί.

Το κυκλωμένο μπλοκ χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του μοντέλου όταν ένα θυρίστορ αποτυγχάνει στην έναυση του.



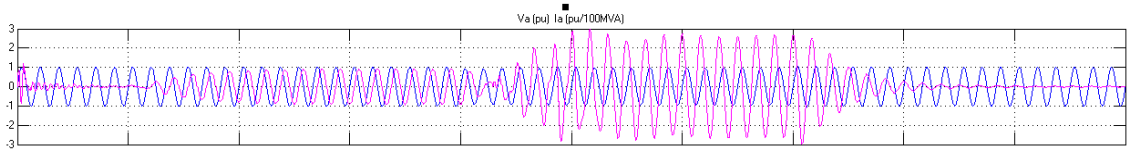
Σχ. 3.40 Υποσύστημα σχεδίασης γραφικών παραστάσεων

Στο υποσύστημα σχεδίασης συγκεντρώνονται τα σήματα που είτε είναι τιμές αναφοράς ή υπολογίζονται στις μονάδες του ελεγκτή SVC.

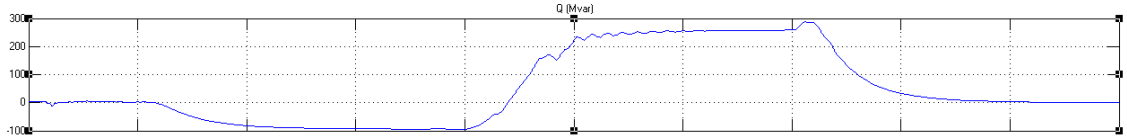
Τα σήματα εισόδου στους παλμογράφους δίνονται από πολύμετρα είτε από συνδυασμό μπλοκ στην περίπτωση υπολογισμού της ενεργού και αέργου ισχύος.

Στις μονάδες που αναλύσαμε προηγουμένως υπήρχαν θύρες οι οποίες έστελναν διάφορους υπολογισμούς στο υποσύστημα σχεδίασης γραφικών παραστάσεων. Οι υπολογισμοί παριστάνονται γραφικά στην κατάλληλη θέση προκειμένου να έχουμε οπτικό συμπέρασμα ή ακόμα και σύγκριση μεταξύ καταστάσεων.

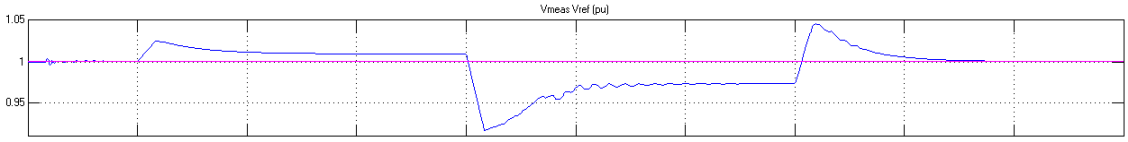
‘Τρέχοντας την προσομοίωση για χρόνο t = 1 sec λαμβάνουμε τις παρακάτω κυματομορφές.



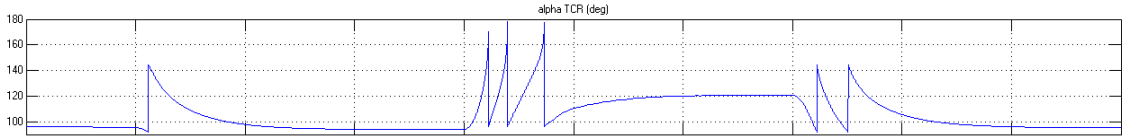
Σχ. 3.41 Γραφική παράσταση τάσης και ρεύματος στη φάση a



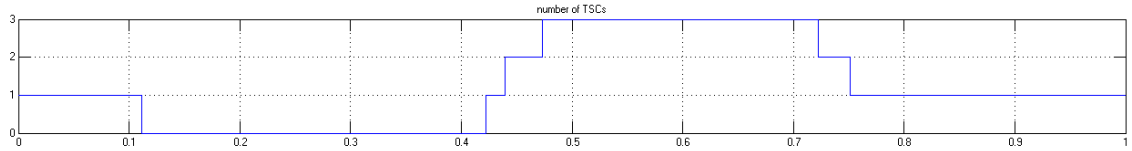
Σχ. 3.42 Γραφική παράσταση μεταβολής αέργου ισχύος SVC



Σχ. 3.43 Γραφική παράσταση μετρούμενης τάσης και τάσης αναφοράς



Σχ.3.44 Γραφική παράσταση γωνίας έναυσης TCR



Σχ. 3.45 Γραφική παράσταση πλήθους ενεργοποιημένων βαθμίδων πυκνωτών

Στο σχήμα 3.41 παρατηρούμε τη στιγμιαία τιμή της τάσης της φάσης a (μπλε χρώμα) και του ρεύματος γραμμής (μωβ χρώμα). Οι έντονες μεταβολές του ρεύματος αναπαριστούν την αντίδραση του SVC στις μεταβολές της τάσης.

Στο σχήμα 3.42 φαίνεται η μεταβολή της αέργου ισχύος. Αρχικά η άεργος ισχύς είναι μηδενική. Κατά την αύξηση της τάσης (t=0,1 s) η άεργος ισχύς γίνεται αρνητική

(Q ∼ -100VAR) και μετά τη χρονική στιγμή t=0,4 s αρχίζει να αυξάνει και τελικά λαμβάνει θετική τιμή λόγω της μεταβολής της τάσης που πέφτει στο 0,93 α.μ. (παραγωγή αέργου ισχύος). Τέλος, κατά την τελευταία μεταβολή της τάσης (1 α.μ), η άεργος ισχύς του SVC μηδενίζεται.

Στο σχήμα 3.43 φαίνεται η μεταβολή της ενεργού τιμής της μετρούμενης τάσης η οποία λαμβάνει τις προκαθορισμένες τιμές της προγραμματιζόμενης πηγής. Επίσης φαίνεται και η τάση αναφοράς.

Στο σχήμα 3.44 παρατηρούμε ότι όταν εισέρχεται στο σύστημα μια νέα βαθμίδα πυκνωτών, η γωνία έναυσης του TCR μειώνεται απότομα (μέγιστη επαγωγική συμπεριφορά) προκειμένου να επαναρυθμιστεί η ακριβής τιμή της συνολικής αγωγιμότητας του SVC.

Στο σχήμα 3.45 παρατηρούμε ότι κατά την ηρεμία (V_{meas} = 1 α.μ) μία βαθμίδα TSC βρίσκεται εντός του συστήματος και η γωνία έναυσης είναι περίπου 90^o (σχήμα 3.44). Τη χρονική στιγμή t=0,1 s η τάση γίνεται 1,025 α.μ. Το μοναδικό TSC αποζευγνύεται και η γωνία έναυσης απότομα αυξάνει και στην συνέχεια μειώνεται ώστε να σταθεροποιηθεί στις 90^o (πλήρης αγωγή). Τη χρονική στιγμή t=0,4 s η τάση πέφτει στο 0,93 α.μ, οπότε απαιτείται παραγωγή αέργου ισχύος. Η γωνία έναυσης αυξάνει μέχρι τη μέγιστη τιμή έπειτα εισέρχεται ένα TSC εντός και ταυτόχρονα η γωνία έναυσης μειώνεται στις 90^o. Αμέσως η γωνία έναυσης αυξάνει πάλι.

Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να εισέλθουν και τα τρία TSC και η γωνία έναυσης να σταθεροποιηθεί στις 120^o.Μετά τη χρονική στιγμή t=0,7s με παρόμοια διαδικασία η τάση στα άκρα του SVC γίνεται 1 α.μ , η άεργος ισχύς μηδενίζεται, η γωνία έναυσης σταθεροποιείται στις 90^o και το πλήθος των TSC εντός του συστήματος είναι ένα.

Η παραπάνω διαδικασία αποτελεί τα βήματα που λαμβάνουν μέρος για τον έλεγχο της τάσης του ζυγού με το SVC.

Κεφάλαιο 4ο

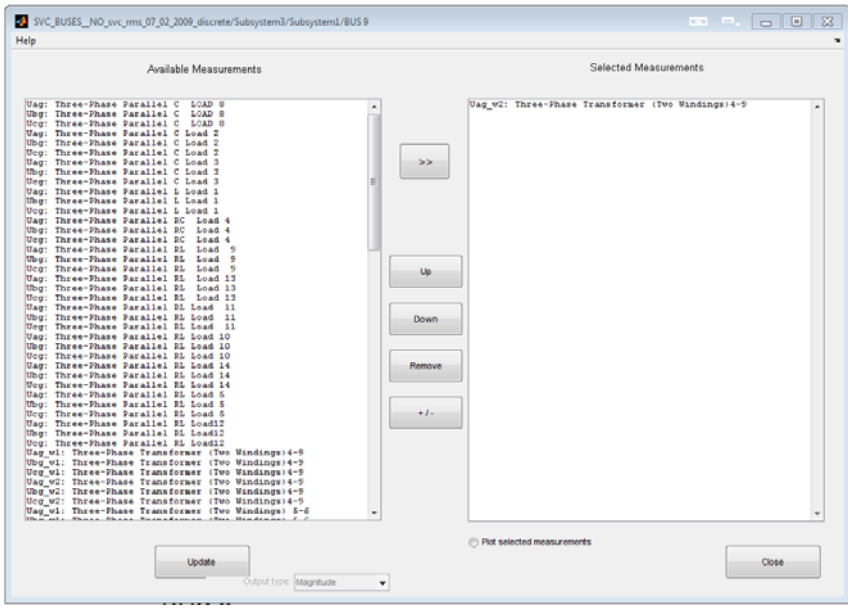
Εφαρμογή

Εφαρμογή

Στο παρών κεφάλαιο εφαρμόζεται η σύνδεση ενός SVC σε ένα σύστημα 14ων ζυγών που αποτελείται από

- δύο άπειρους ζυγούς στα 132 kV
- επαγωγικά φορτία
- χωρητική αντιστάθμιση σε επιλεγμένους ζυγούς
- τρείς μετασχηματιστές για τον υποβιβασμό της τάσης στα 16 kV
- γραμμές μεταφοράς *

Στο σχήμα 4.2 φαίνεται το μπλοκ διάγραμμα του δικτύου. Τα σήματα τάσης των ζυγών καθώς και τα ρεύματα των γραμμών στέλνονται στο υποσύστημα σχεδίασης γραφικών παραστάσεων. Για κάθε ζυγό και γραμμή μεταφοράς χρησιμοποιείται ένα πολύμετρο που λαμβάνει τα απεσταλμένα σήματα (σχήμα 4.1).



Σχ. 4.1 Παράθυρο διαθέσιμων μετρήσεων πολυμέτρου

Οι στιγμιαίες τιμές που λαμβάνει το υποσύστημα μετατρέπονται σε ενεργές.

* Στο παράρτημα δίνονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του δικτύου.

Εφαρμογή

Η ανάλυση του κυκλώματος γίνεται σε διακριτό χρόνο με περίοδο δειγματοληψίας T_s = 0.0005 sec. Η περίοδος διαρκεί τόσο ώστε τα μεταβατικά φαινόμενα να είναι εμφανή στον παλμογράφο.

Με την χρήση του παλμογράφου παρατηρούμε την κυματομορφή της τάσης του ζυγού του SVC και των υπολοίπων ζυγών του δικτύου κατά τις χρονικές στιγμές της έναυσης των θυρίστορ καθώς και την μεταβολή της αγωγιμότητας του SVC.

Η εφαρμογή έχει ως στόχο την παρατήρηση όλων των ζυγών ενός δικτύου μέσω του παλμογράφου, την σύνδεση του SVC σε διαφορετικούς ζυγούς και την παρατήρηση τους στον έλεγχο της τάσης και την επιλογή (εάν είναι δυνατό) του κατάλληλου ζυγού για την σύνδεση του με βασικό κριτήριο την βέλτιστη αντιστάθμιση σε επιλεγμένους ζυγούς του κυκλώματος. Το κριτήριο σύγκρισης γίνεται με το Student's test στο λογισμικό Excel 2007. Η μέθοδος συγκρίνει τις τιμές δύο πειραμάτων προκειμένου να αποφανθεί εάν οι τιμές είναι στατιστικά ανεξάρτητες.

Αναλύοντας το δίκτυο του σχήματος 4.2 έχουμε:

- Δύο πηγές τάσης στους ζυγούς 1, 2 με λόγο $\frac{X}{R} = \frac{10}{1}$.
- Γραμμές μεταφοράς

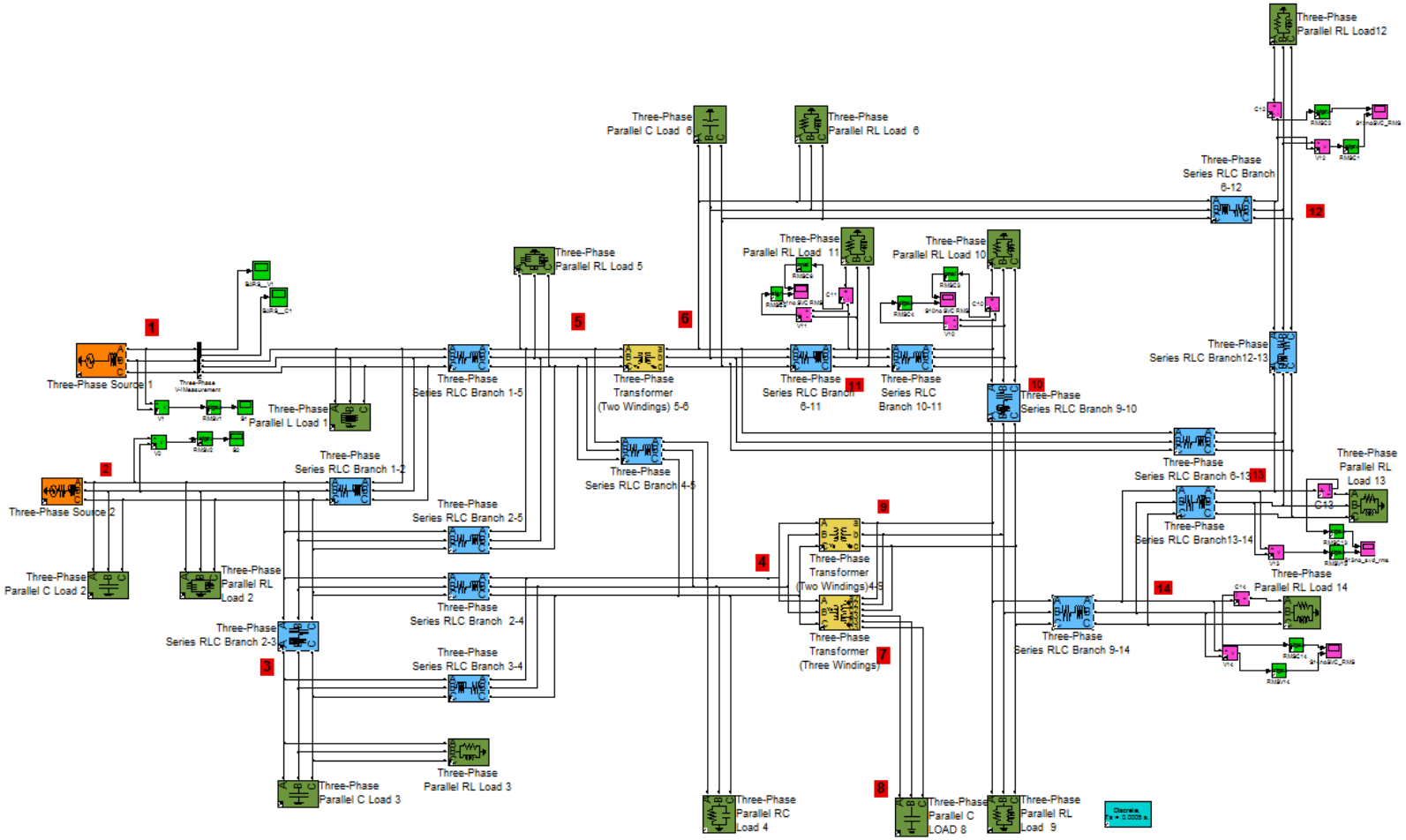
Στον ζυγό 3 υπάρχει χωρητική αντιστάθμιση και επαγωγικό φορτίο.

Στους ζυγούς 4 και 5 συνδέονται μετασχηματιστές. Στον ζυγό 5 ο Μ/Σ είναι 132KV/16KV,50Hz,200MVA με πρωτεύον και δευτερεύον τύλιγμα σε συνδεσμολογία γειωμένου αστέρα ενώ στον ζυγό 4 συνδέονται δύο Μ/Σ. Ο ένας είναι 132KV/16KV ενώ ο άλλος έχει τρία τυλίγματα όπου τα δευτερεύοντα είναι στην ίδια τάση 16KV.

Σε κάθε ζυγό της μέσης τάσης συνδέονται επαγωγικά φορτία ενώ ο ζυγός 6,7 έχουν συνδεδεμένη χωρητική αντιστάθμιση. Αρχικά τρέχουμε την προσομοίωση του μοντέλου των 14ων ζυγών για χρόνο $t_{προσ}$ = 5 sec.

Στην προσομοίωση που ακολουθεί χρησιμοποιείται η μέθοδος μεταβλητού βήματος ode45. Η μέθοδος ode (ordinary differential equations) αντιστοιχεί σε μέθοδο επίλυσης συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Η ode45 χρησιμοποιεί τη μέθοδο Runge-Kutta η οποία είναι διαδεδομένη σε χρήση στους υπολογιστές.

.

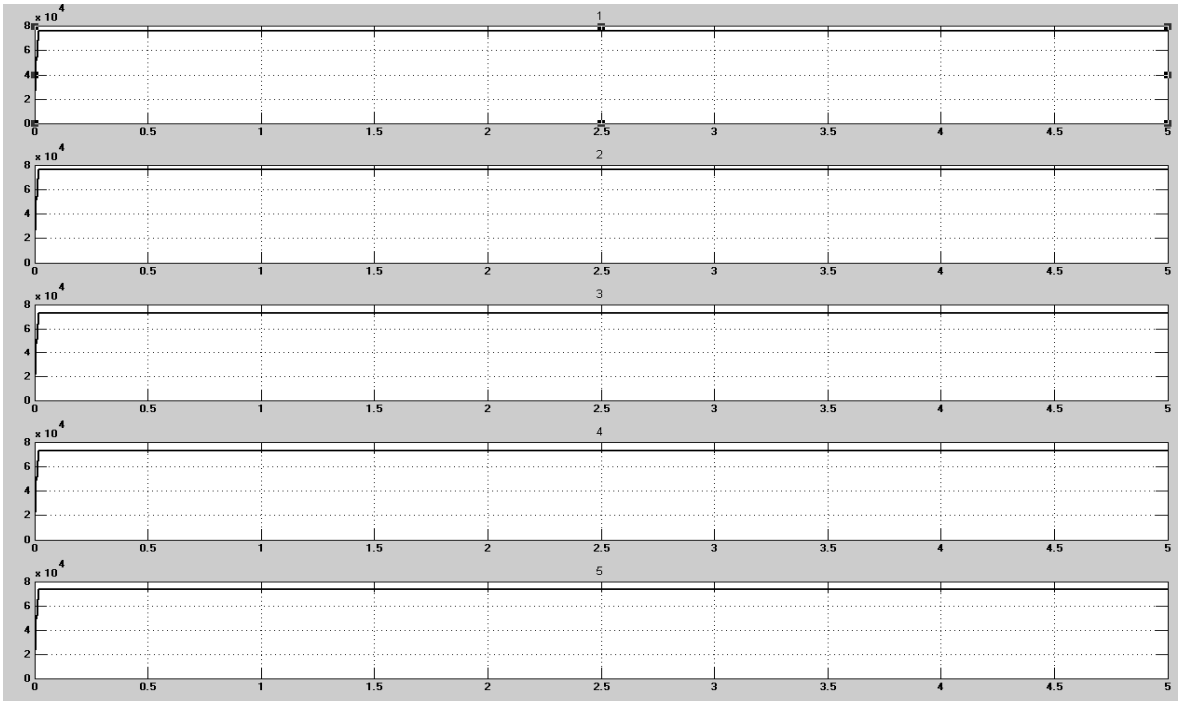


Σχ. 4.2 Μοντέλο 14^{ων} ζυγών στο εργαλείο Simulink του Matlab

Εφαρμογή

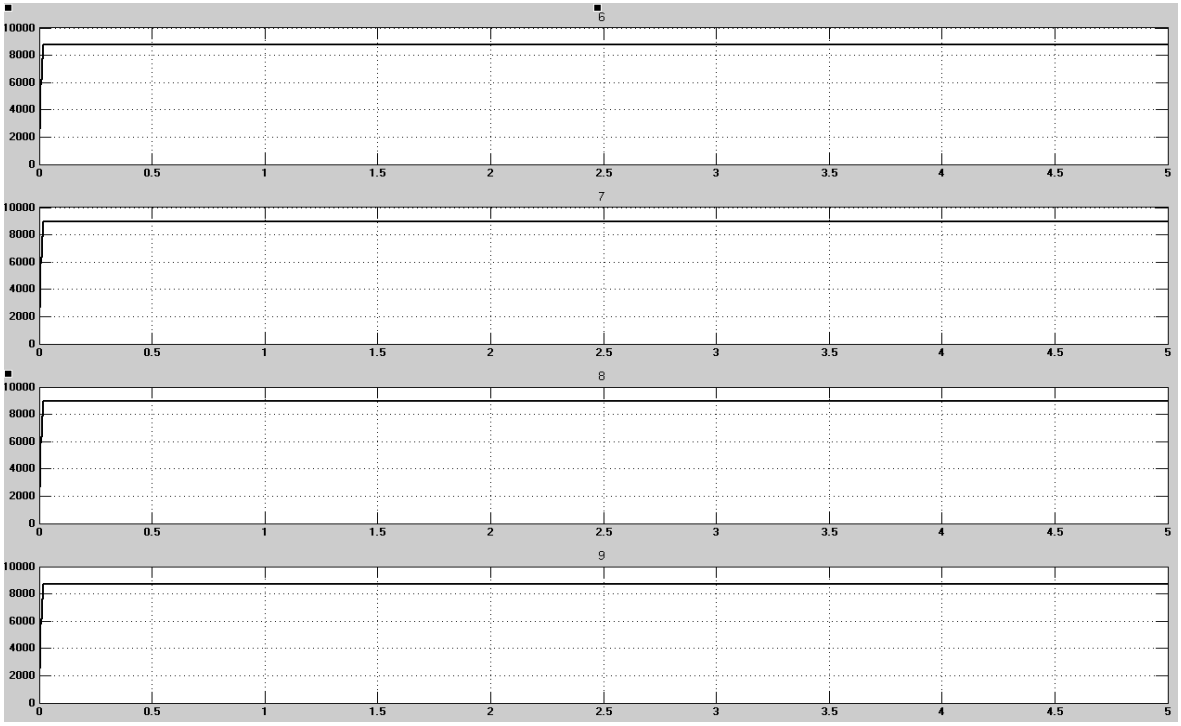
‘Τρέχοντας’ την προσομοίωση για 5 s χωρίς να έχουμε συνδέσει το SVC βλέπουμε τις παρακάτω κυματομορφές στον παλμογράφο.

Ζυγοί 1-5



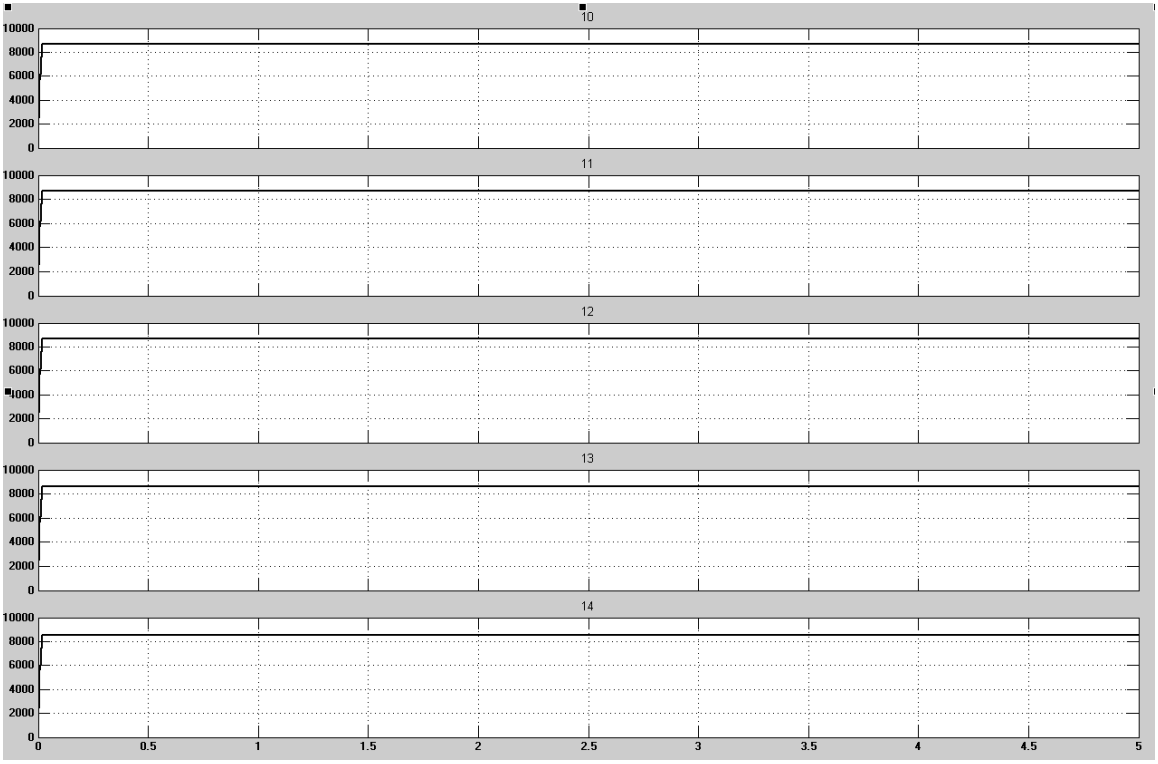
Σχ. 4.3 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5

Ζυγοί 6-9



Σχ. 4.4 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9

ΖΥΓΟΙ 10-14



Σχ. 4.5 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14

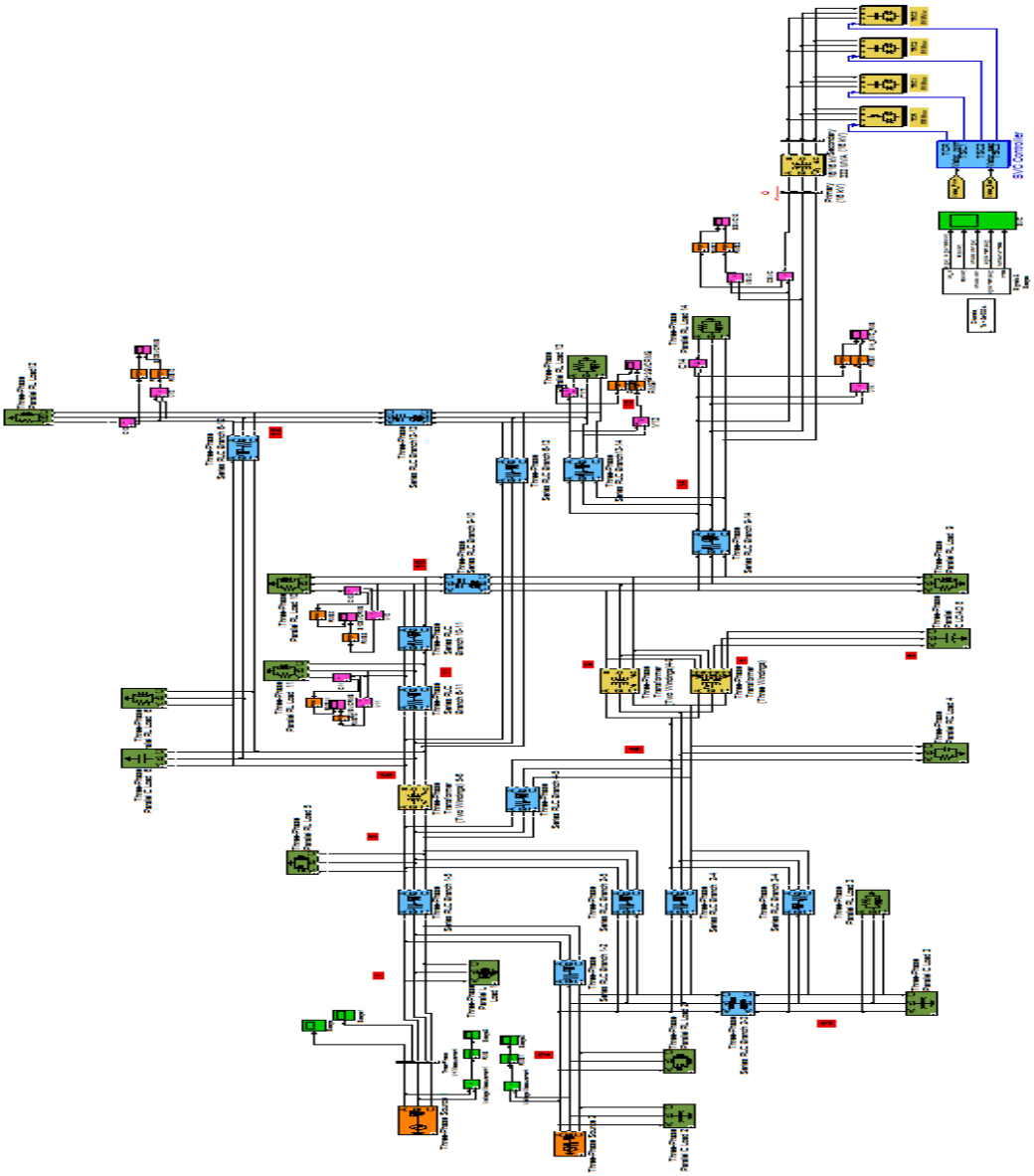
Από τις παραπάνω κυματομορφές καταγράφουμε τις τάσεις μόνιμης κατάστασης των ζυγών στον παρακάτω πίνακα .

Ζυγός	Φασική τάση rms (VOLT)	Τιμή τάσης ζυγού (α.μ)
1	75940	0,99645408
2	76000	0,99724137
3	72520	0,95157822
4	72800	0,95525226
5	73280	0,96155063
6	8787	0,95122065
7	8927	0,9663761
8	8927	0,9663761
9	8692	0,9409366
10	8640	0,93530744
11	8681	0,93974582
12	8654	0,93682298
13	8615	0,93260111
14	8499	0,92004374

Π.4.1 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης των ζυγών του δικτύου χωρίς SVC

Παρατηρούμε ότι ο ζυγός 14 εμφανίζει την μεγαλύτερη πτώση τάσης. Στην εφαρμογή θα συνδέσουμε SVC στους ζυγούς 14,13,12,11,3,4 και 5. Οι ζυγοί 14 ως 11 είναι συνδεδεμένοι στη μέση τάση ενώ οι ζυγοί 3, 4 και 5 στην υψηλή τάση.

Στα άκρα του ζυγού 14 συνδέουμε το στατικό άεργο αντισταθμιστή όπως στο αναλυτικό μοντέλο του τρίτου κεφάλαιο με ισχύ +300MVAR / -100MVAR. Με την σύνδεση του SVC στον ζυγό 14 το κύκλωμα έχει την εικόνα του σχήματος 4.6.

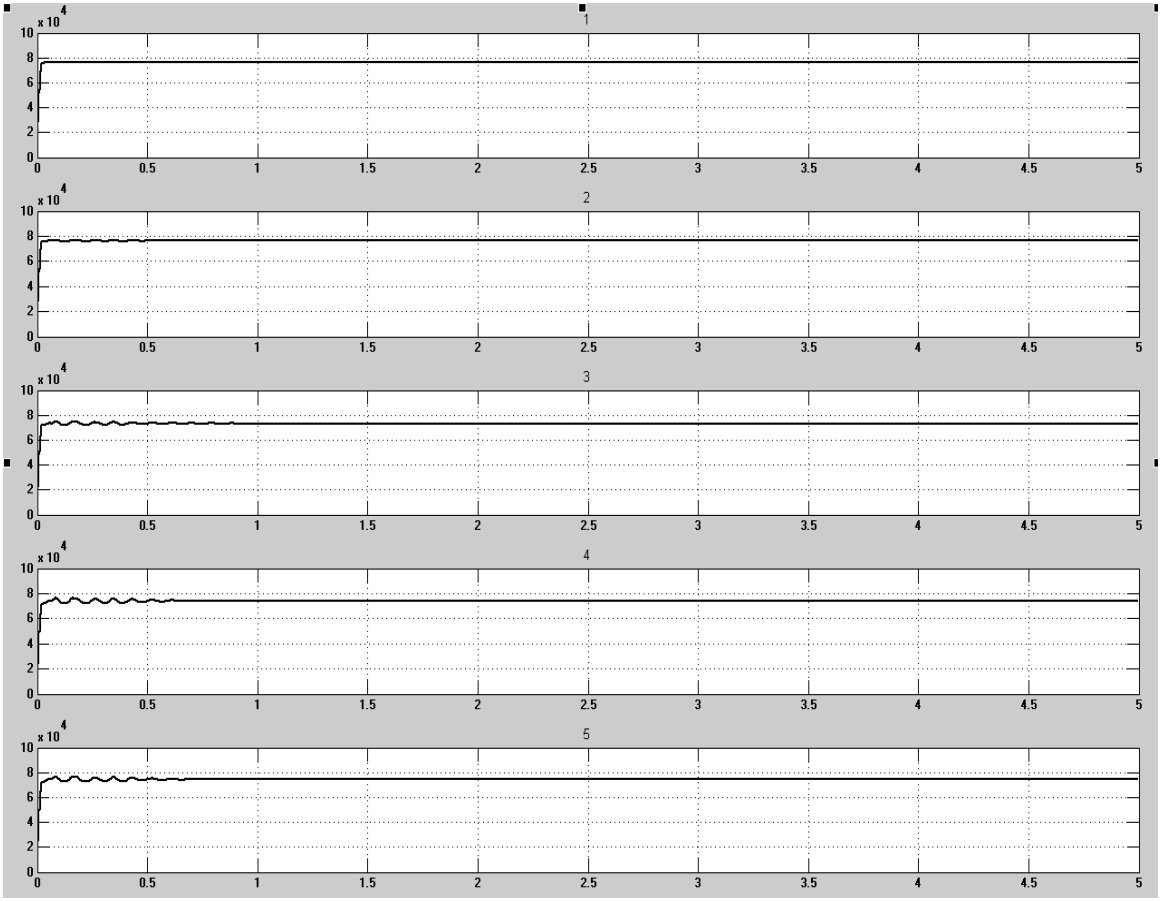


Σχ. 4.6 Δίκτυο 14ων ζυγών με το SVC συνδεδεμένο στο ζυγό 14

Η πολική τάση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή του SVC ρυθμίζεται στα 16 KV με τον μετασχηματιστή να χρησιμεύει για την μετατροπή από αστέρα σε τρίγωνο. Επίσης ρυθμίζονται οι παράμετροι στα μπλοκ μέτρησης για την βασική ισχύ και τάση.

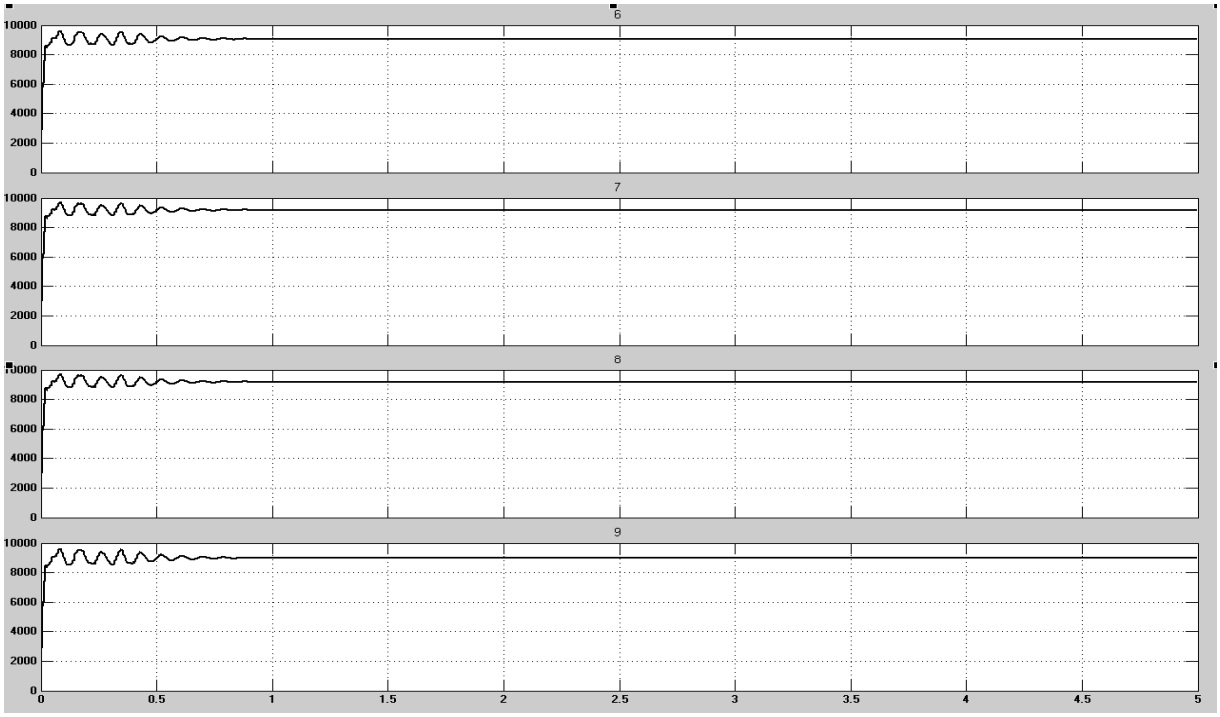
Τέλος στο εσωτερικό του ελεγκτή του SVC ρυθμίζονται οι παράμετροι ώστε να αντιστοιχούν σε σύνδεση με ζυγό μέσης τάσης 16KV συχνότητας 50 Hz.Τρέχουμε την προσομοίωση για 5 sec και λαμβάνουμε τις παρακάτω κυματομορφές.

ΖΥΓΟΙ 1-5



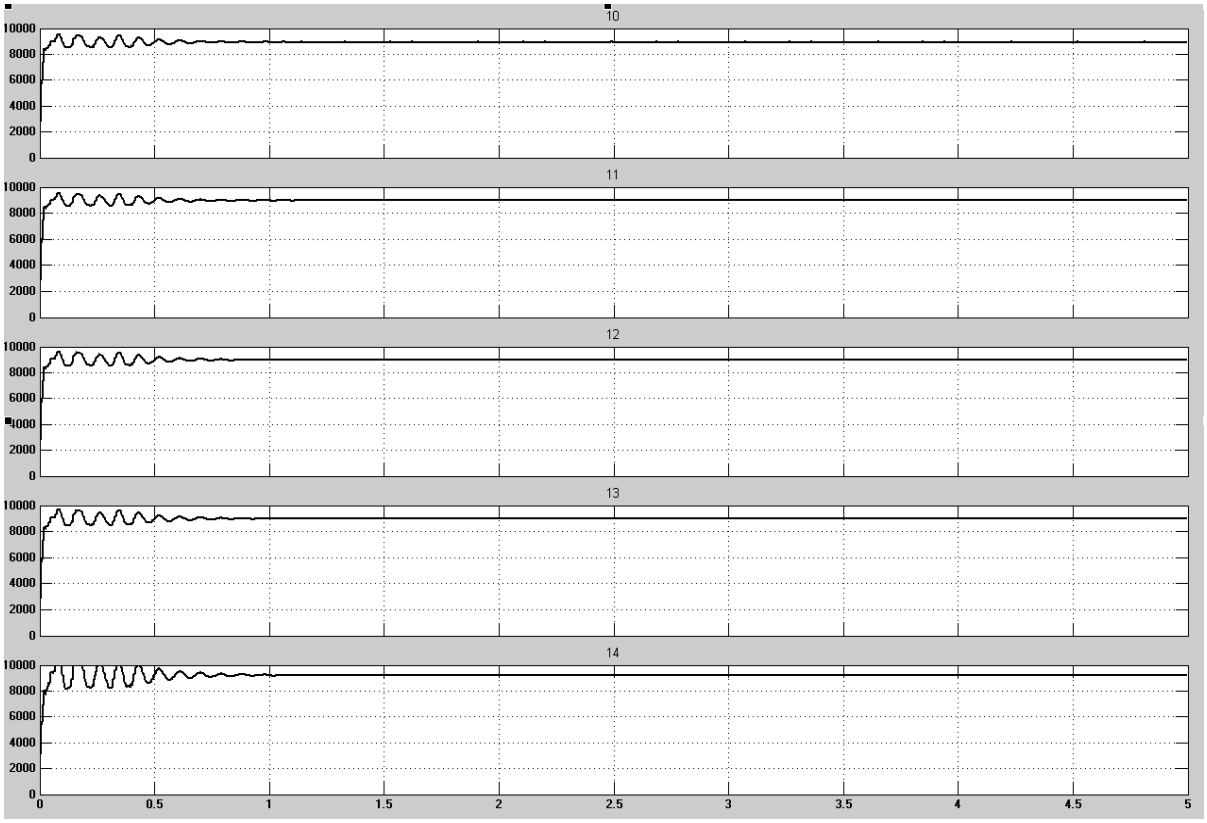
Σχ. 4.7 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5 με συνδεδεμένο το SVC

ΖΥΓΟΙ 6-9



Σχ. 4.8 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9 με συνδεδεμένο το SVC

ΖΥΓΟΙ 10-14



Σχ. 4.9 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14 με συνδεδεμένο το SVC

Εφαρμογή

Από τις κυματομορφές παρατηρούμε μία διακύμανση που οφείλεται στον PI Controller του SVC. Στους ζυγούς της υψηλής τάσης η διακύμανση είναι πιο μικρή.

Από τις γραφικές παραστάσεις λαμβάνουμε τις παρακάτω τιμές

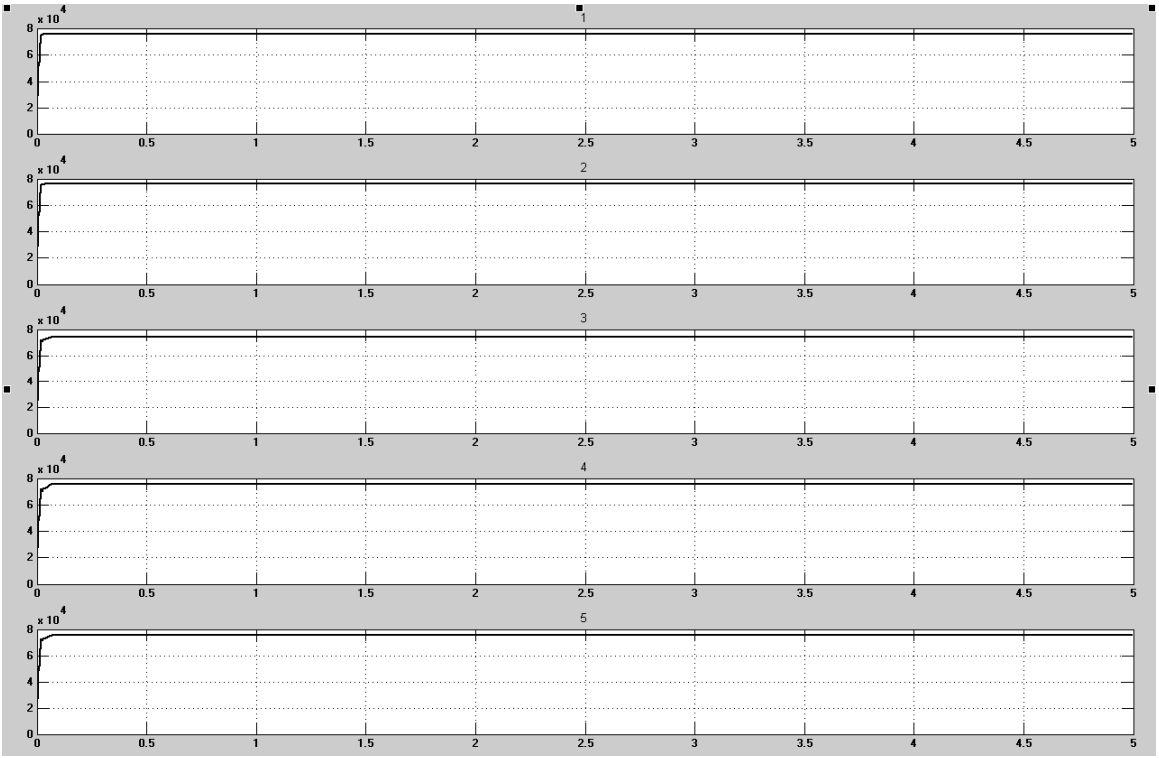
Ζυγός	Τάση ζυγού σε α.μ. χωρίς το SVC	Τάση ζυγού σε α.μ. με το SVC συνδεδεμένο στον ζυγό 14
1	0,9964540	0,9977662
2	0,9972413	0,9998656
3	0,9515782	0,9581390
4	0,9552522	0,9715230
5	0,9615506	0,9748034
6	0,9512206	0,9813150
7	0,9663761	0,9948466
8	0,9663761	0,9948466
9	0,9409366	0,9722217
10	0,9353074	0,9659430
11	0,9397458	0,9690824
12	0,9368229	0,9703814
13	0,9326011	0,9708144
14	0,9200437	0,9956044

Π.4.2 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης ζυγών με σύνδεση SVC στον ζυγό 14

Είναι προφανές ότι με την σύνδεση του SVC στον ζυγό 14 αυξάνεται το επίπεδο της τάσης στα άκρα του με τιμή 0,995 α.μ καθώς και στους υπόλοιπους ζυγούς στην πλευρά της υψηλής τάσης.

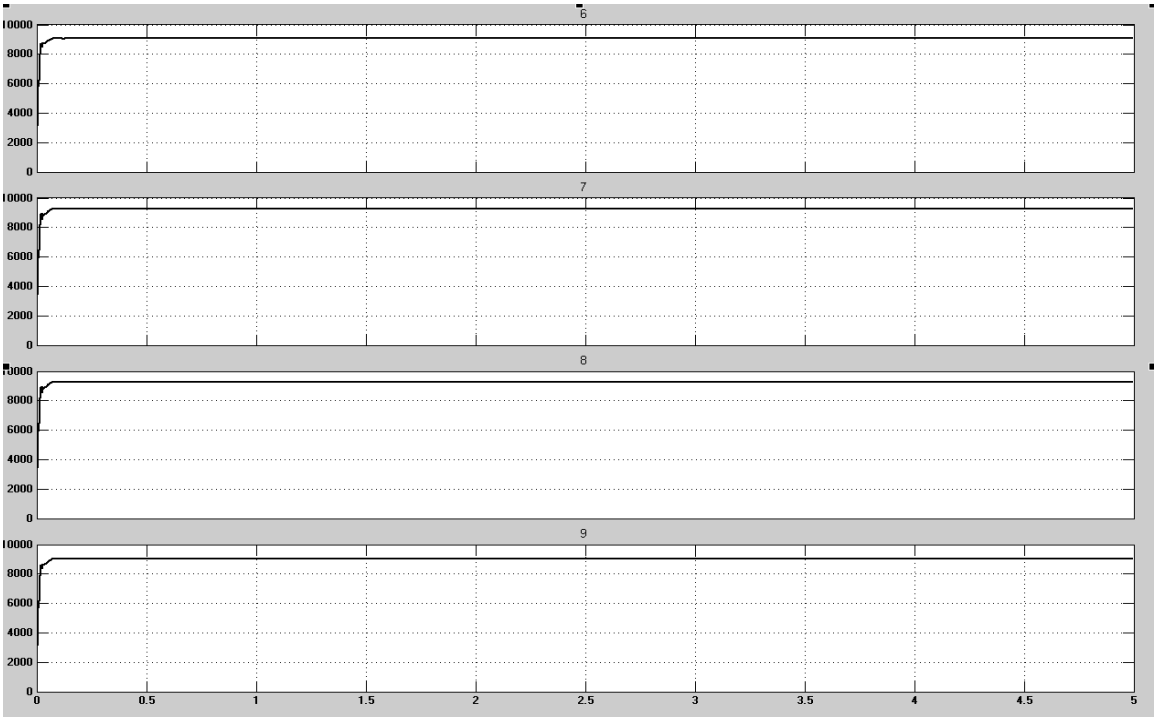
Στην συνέχεια εκτελούμε την ίδια διαδικασία στον ζυγό 4 που βρίσκεται στην πλευρά της μέσης τάσης.

ΖΥΓΟΙ 1-5



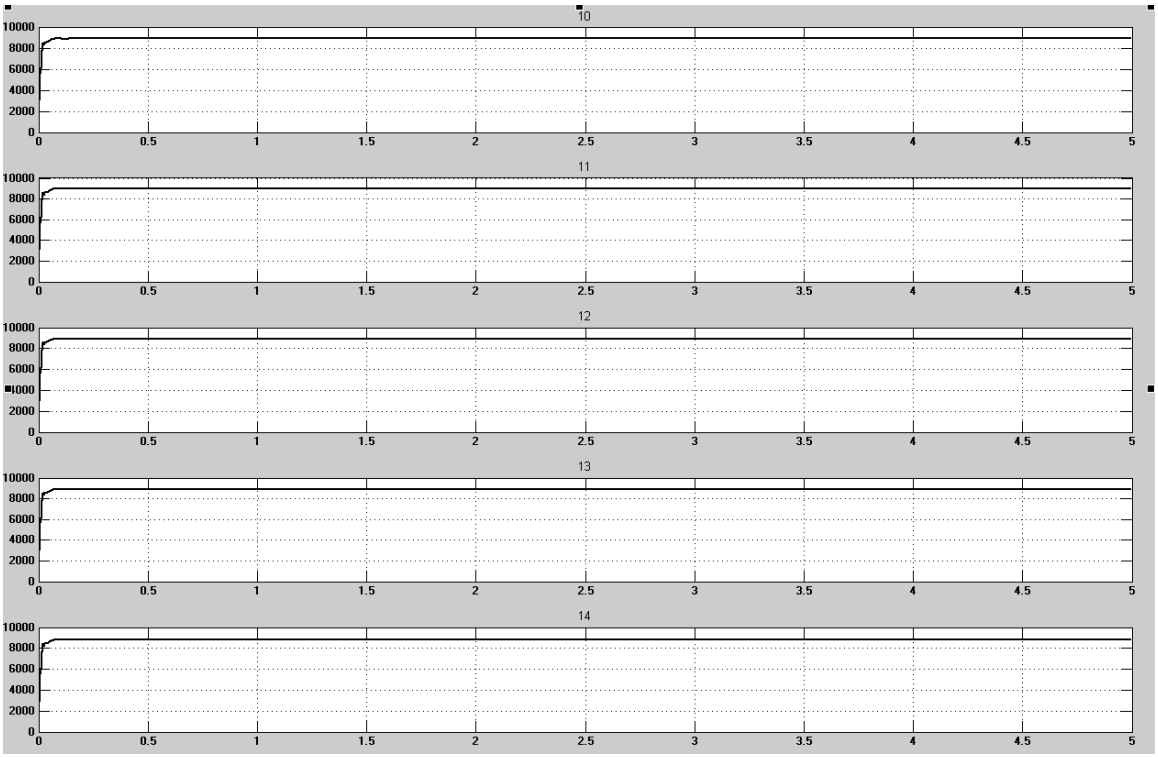
Σχ. 4.10 Κυματομορφές τάσης ζυγών 1 ως 5 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4

ΖΥΓΟΙ 6-9



Σχ. 4.11 Κυματομορφές τάσης ζυγών 6 ως 9 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4

ΖΥΓΟΙ 10-14



Σχ. 4.12 Κυματομορφές τάσης ζυγών 10 ως 14 με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4

Από τις παραπάνω κυματομορφές, προκύπτει ο παρακάτω πίνακας που περιλαμβάνει τις ανά μονάδα τιμές τάσης του κάθε ζυγού σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές χωρίς την σύνδεση SVC.

Ζυγός	Τάση ζυγού σε α.μ χωρίς τη σύνδεση SVC	Τάση ζυγού σε α.μ με σύνδεση SVC στον ζυγό 4
1	0,99645407	0,99855353
2	0,99724137	1,00314609
3	0,95157821	0,97427857
4	0,95525226	0,99396097
5	0,96155063	0,99015571
6	0,95122065	0,98185630
7	0,96637609	1,00437296
8	0,96637609	1,00458946
9	0,94093660	0,97752617
10	0,93530743	0,97059797
11	0,93974581	0,97254652
12	0,93682298	0,96745862
13	0,93260110	0,96399452
14	0,92004373	0,95392698

Πιν 4.3 Πίνακας τιμών τάσης μόνιμης κατάστασης ζυγών με συνδεδεμένο το SVC στο ζυγό 4

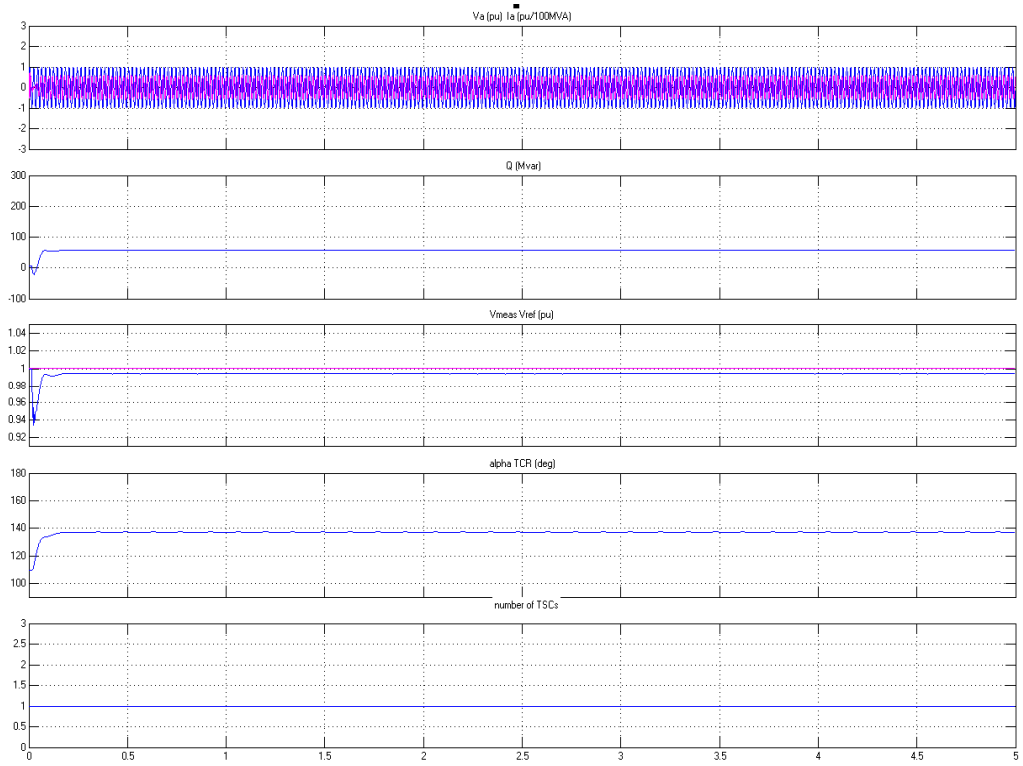
- Συμπέρασμα εφαρμογής

Αφού εξετάστηκε κάθε επίπεδο τάσης του μοντέλου εκτελούμε τη διαδικασία για τους υπόλοιπους ζυγούς και καταλήγουμε στον πίνακα Π.4.5 που μας πληροφορεί για την διόρθωση της τάσης σε κάθε ζυγό ανάλογα με το σημείο σύνδεσης του αέργου στατικού αντισταθμιστή. Οι τιμές συγκρίνονται με τις αρχικές όπου το δίκτυο δεν περιλαμβάνει αντιστάθμιση αέργου ισχύος .

Λαμβάνουμε τις μετρούμενες τιμές μεταφέροντας τες στο λογισμικό Excel και τρέχουμε τις τιμές που λαμβάνουμε για όλους τους ζυγούς συγκρίνοντας τες κατά ζεύγη με τη μέθοδο Student's test και συνολικά με τη μέθοδο ANOVA.

Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι και με τις δύο μεθόδους με α = 0,05 κανένας ζυγός δεν είναι στατιστικά διαφορετικός από κάποιον άλλον εκτός από τον ζυγό 11 ο οποίος είναι φανερό ότι είναι η χειρότερη περίπτωση σύνδεσης του SVC. Επομένως η ανάλυση αυτή δεν αναδεικνύει κάποια βέλτιστη θέση παρά μόνο μία χείριστη.

Άρα χρειάζεται λεπτομερέστερη μελέτη για την επιλογή της βέλτιστης θέσης σύνδεσης με το SVC χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα ροής φορτίου.



Σχ. 4.13 Κυματομορφές SVC

Εφαρμογή

Στο σχήμα 4.13 κατά σειρά απεικονίζονται η φασική τάση και το ρεύμα στην έξοδο του SVC (1), η μεταβολή της αέργου ισχύος(2) που προσδίδει ή απορροφά, η μετρούμενη τάση(3) και η τάση αναφοράς, η γωνία έναυσης των θυρίστορ(4) που είναι ίδια για κάθε φάση και τέλος ο αριθμός των χωρητικών βαθμίδων(5) που βρίσκονται σε λειτουργία κάθε στιγμή κατά την προσομοίωση.

Αναλύοντας τις γραφικές παραστάσεις της πρώτης προσομοίωσης παρατηρούμε μια μεγάλη διακύμανση της τάσης που μειώνεται αισθητά στο χρόνο t=0.5s και σταθεροποιείται μετά το πρώτο δευτερόλεπτο. Αυτό οφείλεται στην διαδικασία του ελεγκτή να διορθώσει την τάση και να την ανυψώσει στην τάση αναφοράς. Η διαδικασία αυτή περνάει από τον PI ελεγκτή ο οποίος λαμβάνει τη διαφορά της τάσης από την τάση αναφοράς και ολοκληρώνει τη διαφορά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η αστάθεια να είναι ελεγχόμενη λόγω των κατάλληλων επιλογών του κάθε ελεγκτή και επίσης να διαρκεί λιγότερο χρόνο από άλλες μεθόδους συμβατικής αντιστάθμισης που προαναφέρθηκαν όπου ο χρόνος αντίδρασης τους είναι σημαντικά μεγαλύτερος. Σε κάθε γραφική παρατηρούμε ότι ο χρόνος σταθεροποίησης της τάσης του ζυγού και κατά συνέπεια του συστήματος είναι περίπου 2 κύκλοι (40ms).

Το SVC κατά την έναρξη της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι έχει εντός του συστήματος μία χωρητική βαθμίδα και την γωνία έναυσης του TCR στις 110^{o} . Αυτό σημαίνει ότι είναι ρυθμισμένο κατά την ηρεμία να έχει εντός μία βαθμίδα πυκνωτών πάντα και να την αντισταθμίζει με τα πηνία, αντί να απενεργοποιεί πλήρως τις χωρητικές βαθμίδες και να διατηρεί την γωνία έναυσης στις 180^{o} .

ΖΥΓΟΣ	14	13	12	11	3	4	5
1	0,0022338	0,0021025	0,0027586	0,0034147	0,0020501	0,0014465	0,0007904
2	0,0001343	0,0001281	0,001184	0,0024962	0,0017158	0,0031461	0,0022276
3	0,041861	0,038843	0,0415986	0,0473721	0,0044119	0,0257214	0,0328071
4	0,028477	0,0287394	0,0334632	0,0429107	0,0292905	0,006039	0,0188982
5	0,0251966	0,0212601	0,0261151	0,0362187	0,0264956	0,0098443	0,0051205
6	0,018685	0,0080762	0,0205253	0,0446657	0,0360055	0,0181437	0,0177107
7	0,0051533	0,0121898	0,0177107	0,0307011	0,018252	0,004373	0,0066689
8	0,0051533	0,0121898	0,0177107	0,0307011	0,018252	0,0045895	0,0066689
9	0,0277782	0,0350312	0,0414181	0,0557076	0,044341	0,0224738	0,0323249
10	0,0340569	0,0361137	0,044341	0,0598212	0,0504031	0,029402	0,0373045
11	0,0309176	0,0247471	0,0339487	0,0523517	0,0467225	0,0274535	0,0311341
12	0,0296185	0,0075349	0,0007149	0,0590634	0,0504031	0,0325414	0,0327579
13	0,0291855	0,0010397	0,0269122	0,0635018	0,0548415	0,0360055	0,0374128
14	0,0043955	0,0373045	0,0540838	0,0762757	0,0662081	0,046073	0,0522434
Μέση τιμή	0,0202033	0,01895	0,0258918	0,0432287	0,0320995	0,0190895	0,0224336
Τυπικό σφάλμα του μέσου	0,0035905	0,0037249	0,004338	0,0054841	0,005414	0,003695	0,0041834

Πίν. 4.4 Μέση τιμή και τυπικό σφάλμα του μέσου της τάσης των ζυγών σε κάθε προσομοίωση

Τα αποτελέσματα του πίνακα 4.4 είναι οι απόλυτες τιμές της διαφοράς κάθε τιμής τάσης κάθε ζυγού από την μονάδα. Η τάση αναφοράς είναι το 1 α.μ οπότε με τον τρόπο αυτό υπολογίζουμε την διαφορά από την τάση αναφοράς. Στην συνέχεια υπολογίζουμε την μέση τιμή και το τυπικό σφάλμα της μέσης τιμής των αποτελεσμάτων κάθε προσομοίωσης.

ΖΥΓΟΣ	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΧΩΡΙΣ SVC (RMS VOLTS)	ΤΑΣΗ ΖΥΓΟΥ ΣΕ PU	ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΤΟΝ ΖΥΓΟ :						
			14	13	12	11	3	4	5
1	75940	0.996454078	0.997766238	0.997897454	0.997241374	0.996585294	0.99794994	0.998553534	0.999209614
2	76000	0.997241374	0.999865693	1.000128125	0.998815966	0.997503806	1.001715839	1.003146093	1.002227581
3	72520	0.951578216	0.958139015	0.961156982	0.958401447	0.952627944	0.995588053	0.974278579	0.967192917
4	72800	0.955252264	0.971523044	0.971260612	0.966536837	0.957089287	0.970709505	0.993960975	0.98110181
5	73280	0.96155063	0.974803443	0.978739922	0.973884931	0.963781302	0.973504405	0.990155712	0.994879487
6	8787	0.951220653	0.981315036	0.991923847	0.979474732	0.955334274	0.963994528	0.981856302	0.982289314
7	8927	0.966376097	0.994846683	0.987810226	0.982289314	0.969298933	0.981748048	1.004372962	0.993331138
8	8927	0.966376097	0.994846683	0.987810226	0.982289314	0.969298933	0.981748048	1.004589468	0.993331138
9	8692	0.940936601	0.972221769	0.964968806	0.958581869	0.94429245	0.955659033	0.977526175	0.967675136
10	8640	0.935307436	0.965943085	0.963886274	0.955659033	0.940178829	0.949596855	0.970597971	0.962695489
11	8681	0.939745816	0.969082427	0.975252858	0.966051338	0.947648298	0.953277463	0.972546528	0.96886592
12	8654	0.936822981	0.970381465	0.992465113	0.999285063	0.940936601	0.949596855	0.967458629	0.967242123
13	8615	0.932601107	0.970814478	0.998960303	0.973087794	0.936498221	0.945158475	0.963994528	0.962587236
14	8499	0.920043738	0.995604455	0.962695489	0.945916247	0.923724346	0.933791892	0.953926982	0.947756551

Π.4.5 Πίνακας αποτελεσμάτων σύνδεσης SVC στους ζυγούς 11,12,13,14,3,4 και 5.

Κεφάλαιο 5

Μοντέλα αναπαράστασης SVC σε πρόγραμμα ροής φορτίου

Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιούν ημιαγωγούς υψηλής ισχύος για να ελέγξουν τη ροή αέργου ισχύος και κατ ‘ επέκταση τη ροή ενεργού ισχύος σε ένα σύστημα μεταφοράς ώστε η ισχύς εναλλασσομένου ρεύματος να μεταφέρεται σε όσο γίνεται μεγαλύτερες αποστάσεις. Στις μέρες μας τα FACTS χρησιμοποιούνται και σε συστήματα διανομής υψηλής τάσεως.

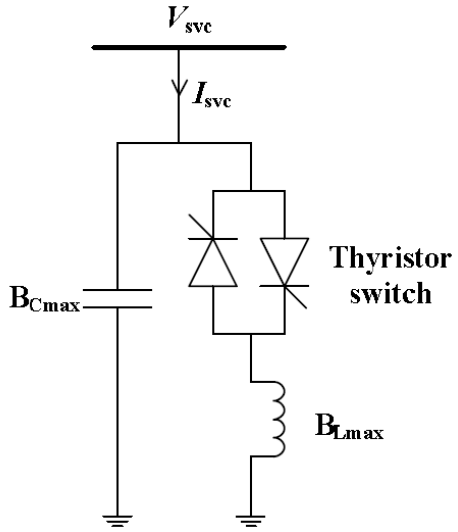
Η πιο συνηθισμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την ανάλυση ΣΗΕ κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας είναι η μέθοδος Newton-Raphson. Σε συστήματα που περιλαμβάνουν και ελεγκτές FACTS είναι επιτακτική η ακριβής αναπαράσταση των συσκευών τους ώστε να αποφασισθεί τόσο η κατάλληλη θέση σύνδεσης τους και η δυνατότητα ισχύος τους αλλά και για να μελετηθεί η επίδραση τους στη ροή φορτίου του συστήματος και στην τάση των ζυγών σε κανονικές και μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Επιπρόσθετα, τα μοντέλα μόνιμης κατάστασης των FACTS σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των ροών φορτίου παρέχουν τις αρχικές συνθήκες για την ανάλυση ΣΗΕ αρμονικών και θεμάτων ευστάθειας λόγω μικρών ή μεγάλων διαταραχών. Υπάρχουν λοιπόν διάφορα μοντέλα μόνιμης κατάστασης για τα FACTS.

Στην περίπτωση του SVC είναι διαθέσιμα κυρίως 3 αποδεκτά μοντέλα μόνιμης κατάστασης, το μοντέλο πηγής-σταθερής επιδεκτικότητας, το μοντέλο της ολικής επιδεκτικότητας και το μοντέλο της γωνίας έναυσης.

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται εστίαση των μοντέλων μόνιμης κατάστασης του SVC για τους υπολογισμούς ροής φορτίου.

Ένα απλό SVC αποτελείται από μόνιμους πυκνωτές και από πηνία ελεγχόμενα από θυρίστορ (FC-TCR). Παρόλα αυτά, το παράδειγμα που χρησιμοποιείται για το μοντέλο αναπαράστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τα άλλα είδη SVC.

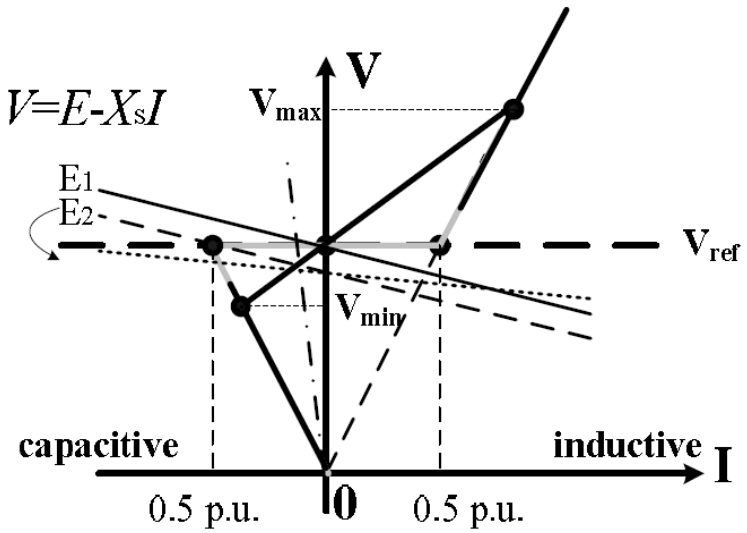


Σχ. 5.1 Σχηματικό διάγραμμα ενός SVC.

Η χαρακτηριστική τάσης – ρεύματος μόνιμης κατάστασης λειτουργίας του SVC φαίνεται στο σχήμα 5.2. όπου το E και X_s είναι η ισοδύναμη πηγή Thevenin και η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thevenin του δικτύου. Στην πράξη το SVC ελέγχει την τάση ενός ζυγού μεταξύ περιοχών λειτουργίας μέσω της κλίσης της χαρακτηριστικής. Η κλίση του σχήματος 5.2 είναι διευρυμένη προκειμένου να φαίνεται ξεκάθαρα η σημασία της. Κανονικά η κλίση κυμαίνεται από το 1 ως το 5% σε πραγματικές εφαρμογές.

Με τον τρόπο αυτό έχουμε ένα εύρος λειτουργίας της τάσης του ζυγού που είναι συνδεδεμένο το SVC. Το εύρος αυτό προσδίδει:

- Μικρότερη βαθμονόμηση των πυκνωτών για συγκεκριμένη δυνατότητα ισχύος ενός SVC.
- Όταν η ισοδύναμη τάση Thevenin μειωθεί λόγω αυξημένης φόρτισης τότε η μεταβολή της αγωγιμότητας του SVC δεν μεταβάλλεται τόσο έντονα
- Αν η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση Thevenin του δικτύου μειωθεί περισσότερο (σχήμα 5.2 (γραμμή από διαδοχικά σημεία) τότε είναι εύκολο το SVC να βρεθεί εκτός των ορίων λειτουργίας. Στην περίπτωση της χρήσης ενός SVC με έλεγχο υπό κλίση η περιοχή λειτουργίας διευρύνεται ώστε να συμπεριλάβει και τις μεταβολές (ως ένα βαθμό) της σύνθετης αντίστασης. Παραμένοντας το SVC εντός των περιοχών λειτουργίας δύναται να συμμετέχει ενεργά στην βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός δικτύου.



Σχ. 5.2 Χαρακτηριστική λειτουργίας SVC.

Με βάση τα παραπάνω, μια ακριβής αναπαράσταση του ελέγχου του SVC υπό μία μικρή κλίση κατά την μόνιμη κατάσταση είναι επιτακτική, ιδιαίτερα κατά τη λειτουργία κοντά στα όρια του.

Επίσης, απαραίτητη είναι και η ακριβής αναπαράσταση της αγωγιμότητας και κατ' επέκταση της γωνίας έναυσης του SVC για την ανάλυση των αρμονικών κατά τη χρήση του σε ένα ΣΗΕ.

1. Μοντέλο πηγής- σταθερής επιδεκτικότητας.

Κατά τη λειτουργία του SVC εντός των ορίων του η σχέση μεταξύ της εγχεόμενης αέργου ισχύος και της τάσης του ζυγού που συνδέεται ακολουθεί την χαρακτηριστική του σχήματος 5.2. Εντός των ορίων λειτουργίας συμπεριφέρεται σαν μία σταθερή επιδεκτηκότητα (B_{svc}) και η εγχεόμενη άεργος ισχύς είναι ανάλογη του τετραγώνου της τάσης του ζυγού σύνδεσης του. Έτσι το SVC δεν μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα ζυγό PV με σταθερά όρια αέργου ισχύος. Το μοντέλο της χρήσης του SVC με την κλίση της χαρακτηριστικής λειτουργίας είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε ασθενή δίκτυα.

Η αναπαράσταση της κλίσης σε αυτό το μοντέλο γίνεται με την εμφάνιση ενός επικουρικού ζυγού διαχωριζόμενου από τον ζυγό υψηλής τάσης από μία σύνθετη αντίσταση ίση με την ανά μονάδα τιμή της κλίσης της χαρακτηριστικής του SVC. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο σε ένα πρόγραμμα υπολογισμού ροής φορτίου μόνο εντός των ορίων λειτουργίας του. Εκτός των ορίων αναπαρίσταται σαν μία σταθερή σύνθετη αντίσταση. Στην πρώτη περίπτωση χρειάζονται 2 ή 3 ζυγοί

(προστίθεται ένας λόγω της ύπαρξης μετασχηματιστή υποβιβασμού) ενώ στην 2η μόνο ένας ζυγός.

Κατά τη μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας του SVC χρειάζεται να μεταβληθούν και τα στοιχεία των πινάκων της ροής φορτίου.

Η μέθοδος λοιπόν είναι ανεπαρκής διότι θα πρέπει να ελέγχονται πάντα τα όρια λειτουργίας του και να ανασυντάσσονται οι πίνακες που χρησιμοποιούνται κατά τη ροή φορτίου.

2. Το μοντέλο ολικής επιδεκτικότητας και γωνίας έναυσης

Το μοντέλο ολικής επιδεκτικότητας υποθέτει σταθερή τάση στον ζυγό σύνδεσης του SVC όταν αυτή βρίσκεται εντός των ορίων λειτουργίας του. Άρα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας ζυγός PV. Παρόλα αυτά αντί να απαλοιφθεί μία τάξη στον Ιακωβιανό πίνακα (λόγω της ύπαρξης του ζυγού PV), προστίθεται μια ακόμα σχέση μεταξύ της εγχεόμενης αέργου ισχύος και της σύνθετης επιδεκτικότητας του.

$$\Delta Q_{svc}^{k} = \left(\frac{\partial Q_{SVC}}{\partial B_{SVC}}\right)^{k} \cdot \Delta B_{SVC} \qquad (1)$$

Όπου k ο αριθμός επανάληψης και

$$\left(\frac{\partial Q_{SVC}}{\partial B_{SVC}}\right)^{\kappa} = \left({V_{SVC}}^{k}\right)^{2} = \frac{{Q_{SVC}}^{k}}{{B_{SVC}}^{k}} \qquad (2)$$

Με τον τρόπο αυτό η επιδεκτικότητα του SVC B_{SVC} γίνεται η μεταβλητή κατάστασης στη θέση της τάσης και έτσι ο ζυγός του SVC ονομάζεται ζυγός PVB. Η στήλη της Ιακωβιανής με τις μερικές παραγώγους σε σχέση με την τάση του ζυγού του SVC τίθεται ως μηδενική εκτός από εκείνη που αντικαθίσταται από την εξίσωση (2), στην σειρά που αντιστοιχεί στην άεργο ισχύ του SVC. Επιπλέον, η υπολογισμένη άεργος ισχύς ${Q_{svc}}^{k}$ πρέπει να αφαιρεθεί από τον όρο της αντίστοιχης ισχύος.

Όταν το SVC αγγίζει τα όρια λειτουργίας του, ο ζυγός PVB μετατρέπεται σε ζυγός PQ. Δηλαδή το SVC αποκτά σταθερή σύνθετη αγωγιμότητα και η Ιακωβιανή δεν χρειάζεται μετατροπή όπως εντός των ορίων λειτουργίας.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν απαιτούνται παραπάνω ζυγοί για την αναπαράσταση του SVC εντός και εκτός των ορίων λειτουργίας.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η υπόθεση της σταθερής τάσης στα άκρα του SVC που μπορεί να επιφέρει ανακρίβεια στους τελικούς υπολογισμούς της επιδεκτικότητας.

Το μοντέλο της γωνίας έναυσης μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του προηγούμενου μοντέλου με την διαφορά ότι η γωνία έναυσης είναι η μεταβλητή κατάστασης. Αυτό είναι εύχρηστο για την ανάλυση αρμονικών στο δίκτυο. Η Ιακωβιανή που συνδέει την μερική παράγωγο της άεργου ισχύος σε σχέση με την γωνία έναυσης είναι η :

$$\Delta Q_{SVC}{}^{k} = \left(\frac{\partial Q_{SVC}}{\partial a_{SVC}}\right)^{k} \cdot \Delta \alpha_{\mathrm{SVC}}{}^{\kappa}, \qquad (3)$$

Όπου α_{SVC} η γωνία έναυσης του SVC και

$$\left(\frac{\partial Q_{SVC}}{\partial a_{SVC}}\right)^{k} = \frac{2\cdot\left(V_{SVC}{}^{k}\right)^{2}\cdot\left(\cos\left(2\cdot a_{SVC}{}^{k}\right)-1\right)}{\left(\pi\cdot X_{Lmax}\right)} \qquad (4)$$

Όπου X_{Lmax} η ωμική αντίσταση του πηνίου του SVC.

Η ισοδύναμη επιδεκτικότητα υπολογίζεται ως εξής :

$$B_{SVC}{}^{k} = \frac{1}{X_{Cmax}} - \frac{\left[2\cdot\left(\pi - \alpha_{SVC}{}^{k}\right)+\sin\left(2\cdot a_{SVC}{}^{k}\right)\right]}{\pi\cdot X_{Lmax}} \qquad (5)$$

Όπου X_{Cmax} η ωμική αντίσταση του πυκνωτή του SVC.

Το μοντέλο μπορεί να περιέχει και μετασχηματιστή υποβιβασμού προσθέτοντας την ωμική αντίσταση του στην ισοδύναμη αντίσταση του SVC.

3. Το χαρακτηριστικό μοντέλο

Το χαρακτηριστικό μοντέλο βασίζεται στην γραμμικότητα της χαρακτηριστικής του SVC. Επίσης υποθέτει ότι το SVC είναι μία μεταβλητή επιδεκτηκότητα. Αντί να μεταβάλλει την Ιακωβιανή, μεταβάλλει την τιμή της αντίστοιχης επιδεκτικότητας στη μήτρα αγωγιμοτήτων. Η μεταβολή της την κ-ιοστή επανάληψη υπολογίζεται ως εξής :

$$\Delta B_{SVC}{}^{k} = \frac{\left(V_{SVC}{}^{k} - V_{ref}\right)}{\left(s\cdot V_{SVC}{}^{k}\right) - B_{SVC}{}^{k}} \qquad (6)$$

Όπου s η κλίση της χαρακτηριστικής του SVC.

Η επιδεκτικότητα του SVC στην επόμενη επανάληψη είναι :

$$B_{SVC}{}^{k+1} = B_{SVC}{}^{k} + \Delta B_{SVC}{}^{k} \qquad (7)$$

Όταν το SVC αγγίζει τα όρια λειτουργίας η επιδεκτικότητα σταθεροποιείται στη μέγιστη επαγωγική ή χωρητική τιμή της.

Η μέθοδος αυτή απαιτεί μόνο ένα ζυγό. Παρόλα αυτά το μειονέκτημα της είναι ότι χρειάζεται πολλές επαναλήψεις όπως επίσης και ότι δεν είναι ομαλή σε μεταβολές του συστήματος.

4. Συνδυασμένο μοντέλο

Το πρώτο συνδυασμένο μοντέλο βασίζεται στο μοντέλο της ολικής επιδεκτικότητας. Παρόλα αυτά, αντί να υποτίθεται σταθερή τάση του ζυγού του SVC εντός των ορίων λειτουργίας, ανανεώνει την τιμή της τάσης ανάλογα με την κλίση της χαρακτηριστικής του αφού ανανεωθεί η τιμή της επιδεκτικότητας.

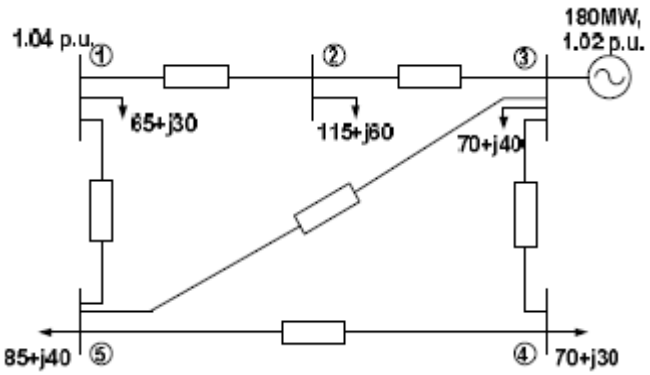
$$V_{SVC}{}^{k} = \frac{V_{ref}}{(1 - s \cdot B_{SVC}{}^{k})} \qquad (8)$$

Το συνδυασμένο μοντέλο διατηρεί το πλεονέκτημα του μοντέλου της ολικής επιδεκτικότητας όπως είναι η χρήση ενός μόνο ζυγού εντός και εκτός ορίων λειτουργίας όπως επίσης και της σταθερότητας του για την ταχύτητα σύγκλισης. Επιπρόσθετα, δίνει πιο ακριβείς τιμές αφού ανανεώνει και την τιμή της τάσης του ζυγού του SVC.

Το 2^{ο} συνδυασμένο μοντέλο συνδυάζει την γωνία έναυσης με το χαρακτηριστικό μοντέλο. Η προσέγγιση είναι παρόμοια με το πρώτο μοντέλο όπως για παράδειγμα η ανανέωση της τιμής της τάσης του ζυγού.

- Σύγκριση μοντέλων SVC.

Μια απλή προσομοίωση των 6 μοντέλων σε δίκτυο 5 ζυγών φαίνεται στο σχήμα 6.3.

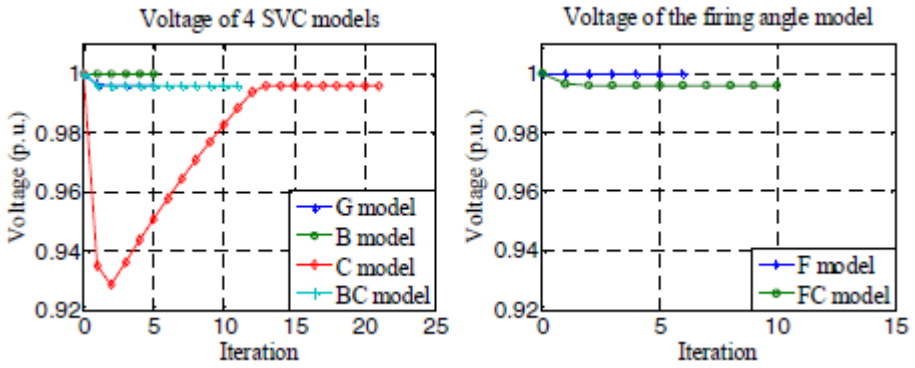


Σχ. 5.3 Δίκτυο 5 ζυγών

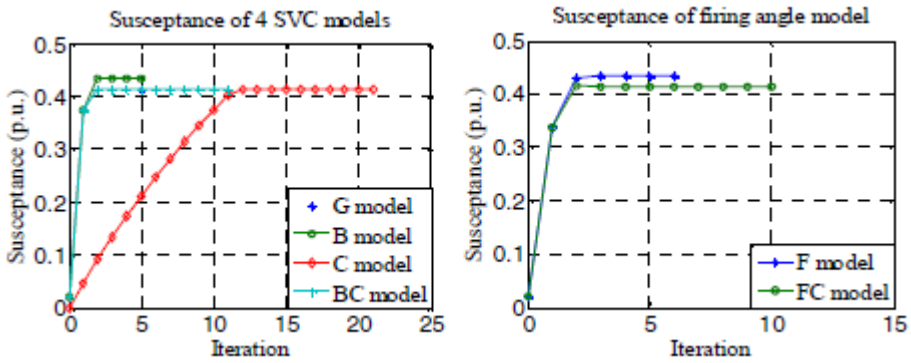
Το πρόγραμμα προσομοίωσης συγκλίνει σε 5 επαναλήψεις με την μέγιστη απόκλιση ισχύος στο 10^{-12} . Η ληφθείσα τάση του ζυγού 4 είναι 0,92 α.μ. Προκειμένου να διορθώσουμε την τάση του χρησιμοποιείται ένα SVC στον ίδιο ζυγό. Οι μέγιστες τιμές επιδεκτικότητας είναι -3,472 αμ και 0,935 αμ αντίστοιχα. Η κλίση του SVC είναι 1%. Η δυνατότητα του SVC στον ζυγό 4 είναι να διορθώνει την τάση μεταξύ των ορίων 0,991 ως 1,036 αμ.

- Εντός των ορίων λειτουργίας.

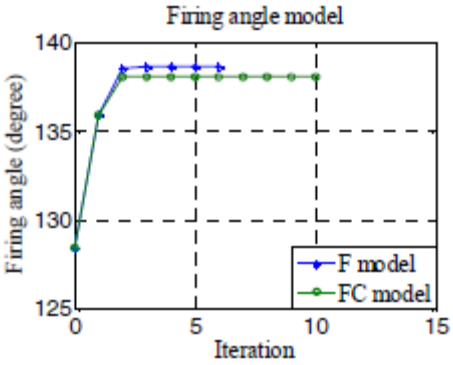
Στα σχήματα 5.4 βλέπουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μετά την σύνδεση του SVC στον ζυγό 4 για τα 6 διαφορετικά μοντέλα αναπαράστασης του SVC σε πρόγραμμα ροής φορτίου.



Σχ. 5.4 Αποτελέσματα σύνδεσης του SVC στο ζυγό 4 των 6 μοντέλων.



Σχ. 5.5 Ισοδύναμη επιδεκτικότητα του SVC των 6 μοντέλων



Σχ. 5.6 Γωνία έναυσης των μοντέλων γωνίας έναυσης και συνδυασμένου μοντέλου.

Στα σχήματα η αντιστοιχία των μοντέλων εξηγείται στον πίνακα Π. 6.1

Μοντέλο	Ονομασία
Πηγή τάσης-σταθερή επιδεκτικότητα	G Model
Ολική επιδεκτικότητα	B Model
Γωνίας έναυσης	F Model
Χαρακτηριστικό μοντέλο	C Model
Συνδυασμένο μοντέλο (ολικής επιδεκτικότητας)	BC Model
Συνδυασμένο μοντέλο (γωνίας έναυσης)	FC Model

Πιν. 5.1. Αντιστοιχία μοντέλων στα σχήματα. 6.4 6.5 και 6.6

	G model	B model	F model	C model	BC model	FC model
V_4	0.996	1	1	0.996	0.996	0.996
B_{svc} (α_{svc})	0.414	0.435	0.435 (138.63^0)	0.414	0.414	0.414 (138.02^0)
Iteration	5	5	6	21	11	10

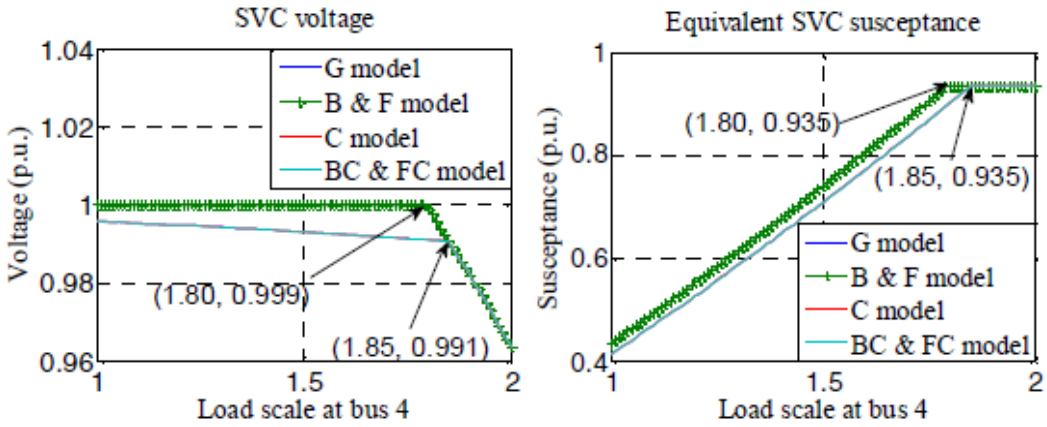
Πιν.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης 6 μοντέλων.

Καθώς το SVC λειτουργεί εντός των ορίων λειτουργίας του, στην χωρητική περιοχή συγκεκριμένα, το μοντέλο της ισοδύναμης πηγής παρέχει ακριβή αποτελέσματα που μπορούν να θεωρηθούν ως τιμές αναφοράς για τα επόμενα μοντέλα (0,414 αμ). Τα επόμενα 2 μοντέλα δίνουν ίδιες τιμές λόγω του ότι θεωρούν σταθερή την τάση του ζυγού σύνδεσης (0,435 αμ). Άρα το μοντέλο B και F δεν ανταποκρίνονται με ακρίβεια. Όλα τα υπόλοιπα δίνουν τις ίδιες τιμές επιδεκτικότητας.

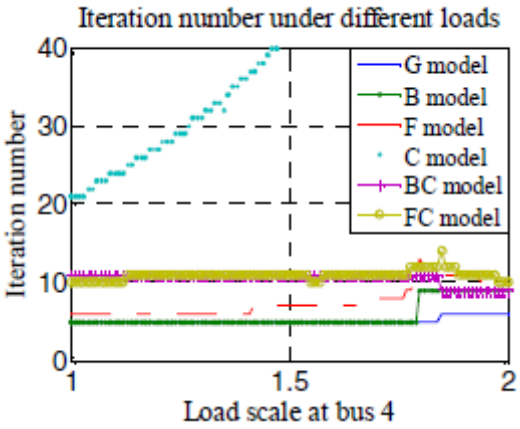
Όσον αφορά την ταχύτητα σύγκλισης, το μοντέλο της ισοδύναμης πηγής συγκλίνει σε 5 επαναλήψεις. Είναι η πιο γρήγορη μέθοδος και ταυτόχρονα η πιο ακριβής. Αντίθετα το χαρακτηριστικό μοντέλο συγκλίνει σε 21 επαναλήψεις. Η χαμηλή ταχύτητα σύγκλισης του οφείλεται στο ότι η μεταβολή της επιδεκτικότητας εξαρτάται από τη γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης και της επιδεκτικότητας με αποτέλεσμα να μειώνει τον ρυθμό σύγκλισης της μεθόδου Newton-Raphson. Στα 2 συνδυασμένα μοντέλα αυτό δεν συμβαίνει με αποτέλεσμα να συγκλίνουν γρηγορότερα στις 10 και 11 επαναλήψεις.

- Όρια λειτουργίας του SVC.

Διπλασιάζοντας το φορτίο στο ζυγό 3 κατά 1% της βασικής ισχύος σε κάθε βήμα λαμβάνουμε τα σχήματα 5.7 και 5.8.



Σχ. 5.7 Τάση και ισοδύναμη επιδεκτικότητα του SVC στα όρια λειτουργίας του.



Σχ. 5.8 Αριθμός επαναλήψεων υπό διαφορετικά φορτία

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7 τα μοντέλα ολικής επιδεκτικότητας και γωνίας έναυσης αγγίζουν τα όρια χωρητικής συμπεριφοράς του SVC όταν το φορτίο γίνεται ίσο με (126 +j54)MVA ενώ ταυτόχρονα η τάση αρχίζει να πέφτει από την τιμή 1 α.μ. Αντίθετα όλα τα υπόλοιπα μοντέλα αγγίζουν το όριο λειτουργίας του όταν το φορτίο γίνεται ίσο με (129,5+j55,5)MVA. Αυτό οφείλεται στην υπόθεση σταθερής τιμής τάσης του ζυγού του SVC.

Όσον αφορά την ταχύτητα σύγκλισης παρόλο που πάλι το μοντέλο της ισοδύναμης πηγής παρέχει το γρηγορότερο αποτέλεσμα αξίζει να σημειωθεί ότι θα πρέπει να μεταβληθούν οι εξισώσεις της ροής φορτίου για την εφαρμογή του. Τα υπόλοιπα συγκλίνουν με διαφορετικούς ρυθμούς χωρίς να αλλαχθεί κάτι στις εξισώσεις ροής φορτίου. Αξιοσημείωτη είναι η ταχύτητα σύγκλισης του χαρακτηριστικού μοντέλου που μειώνεται εκθετικά και τελικά γίνεται μη αποδεκτή. Τα άλλα δύο συνδυασμένα μοντέλα συγκλίνουν σε ικανοποιητική ταχύτητα.

Συμπέρασμα.

Αναλύθηκε η προσομοίωση ενός δικτύου με 5 ζυγούς όπου σε ένα ζυγό συνδέθηκε ένα SVC και εξετάστηκε η χρήση 6 διαφορετικών μοντέλων αναπαράστασης του σε πρόγραμμα υπολογισμού ροής φορτίου.

Αρχικά καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο ισοδύναμης πηγής τάσης ενώ καταλήγει γρήγορα και με ακρίβεια σε μία τελική τιμή, είναι δύσχρηστο καθώς σε περιοχές λειτουργίας εκτός των ορίων του SVC απαιτείται επαναπροσδιορισμός των εξισώσεων ροής φορτίου αφού μειώνεται ο αριθμός των ζυγών.

Το μοντέλο ολικής επιδεκτικότητας και γωνίας έναυσης χρησιμοποιώντας την επιδεκτικότητα και την γωνία έναυσης ως μεταβλητή κατάστασης δίνουν αποτελέσματα και στις δύο περιοχές λειτουργίας του SVC. Το τίμημα όμως είναι η υπόθεση της σταθερής τιμής της τάσης του ζυγού με αποτέλεσμα ένα βαθμό ανακρίβειας στα αποτελέσματα.

Επίσης το χαρακτηριστικό μοντέλο παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα εντός των ορίων ενώ εκτός δεν είναι αποδεκτό αφού δεν συγκλίνει σε κάποια λύση λόγω της εκθετικής αύξησης των επαναλήψεων που απαιτούνται.

Τελικά, τα αποδεκτά μοντέλα του συνδυασμένου μοντέλου ολικής επιδεκτικότητας και γωνίας έναυσης παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα και σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του SVC τόσο κατά την ακρίβεια της υπολογιζόμενης τιμής όσο και κατά την ταχύτητα σύγκλισης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

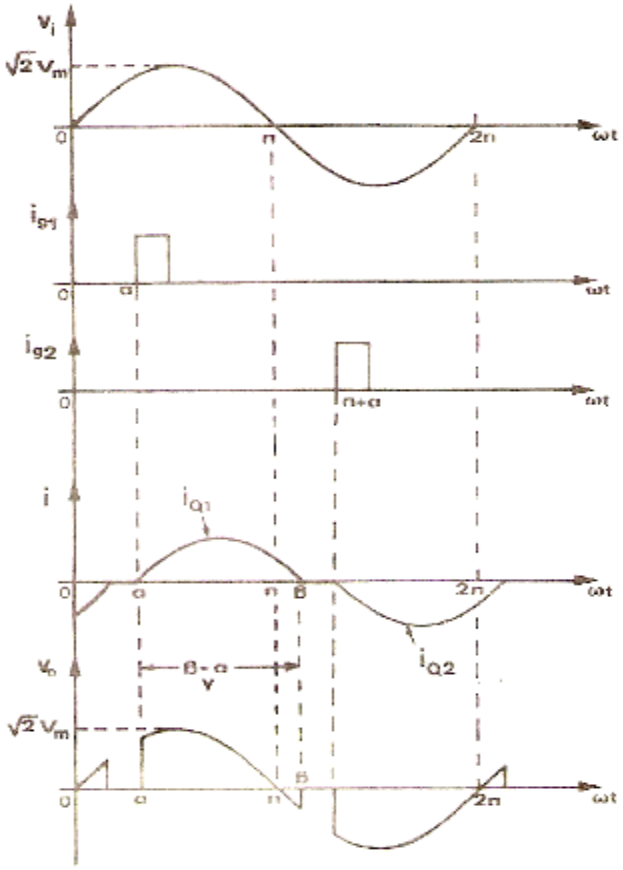
Ανάλυση ηλεκτρονικών ισχύος SVC

Κάθε βαθμίδα του στατικού αέργου αντισταθμιστή αποτελείται από ηλεκτρονικές βαλβίδες που ελέγχουν τη ροή του ρεύματος στο εσωτερικό του.

Η γωνία έναυσης των θυρίστορ στην επαγωγική βαθμίδα μεταβάλλεται από 90 ως 180^{o} ανάλογα με την επιθυμητή τιμή που υπολογίζεται από τις διατάξεις υπολογισμού.

Στην επαγωγική βαθμίδα έχουμε συνδεδεμένα πηνία ενώ υπάρχει και μια μικρή ωμική αντίσταση λόγω των συνδέσεων μεταξύ των συσκευών.

Σε μία τέτοια συνδεσμολογία όπου επικρατεί η επαγωγική αντίσταση όταν εφαρμόζεται μία τάση στα άκρα της, το ρεύμα καθυστερεί σε σχέση με την τάση με μία διαφορά φάσης περίπου 90^{o} . Αυτό φαίνεται στο σχήμα 1.



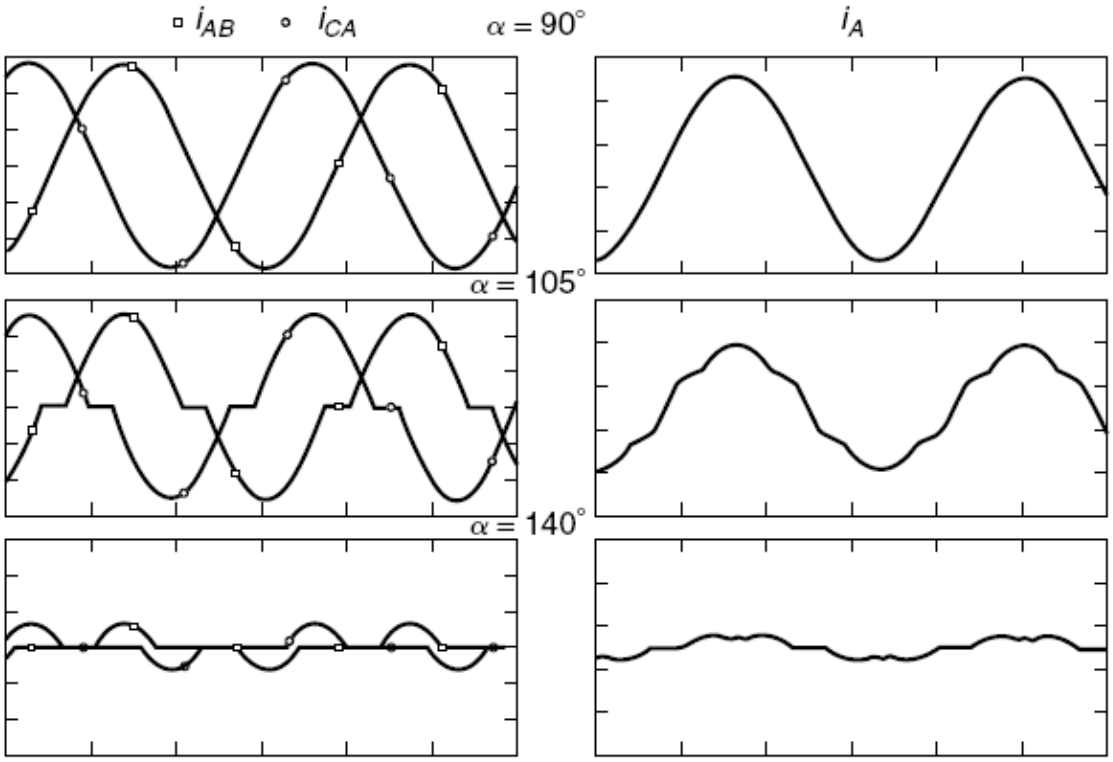
Σχ. 1 Κυματομορφές τάσεως και ρεύματος για γωνία έναυσης α

Κάθε φάση επαγωγικής και χωρητικής βαθμίδας περιλαμβάνει 2 θυρίστορ συνδεδεμένα αντιπαράλληλα. Κάθε παλμός έναυσης δίνεται ανάλογα με την πολικότητα της τάσης σε κάθε ημιπερίοδο. Αν ο παλμός έναυσης δοθεί χρονική στιγμή που η τάση στα άκρα του θυρίστορ είναι ανάστροφη τότε το θυρίστορ δεν αλλάζει την κατάσταση του με αποτέλεσμα να μην άγει.

Αντίθετα αν δοθεί σε χρονική στιγμή ορθής πόλωσης τότε το θυρίστορ αλλάζει κατάσταση και αρχίζει να άγει και το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζουμε το ρεύμα και κατ' επέκταση την ισχύ της επαγωγικής βαθμίδας. Η χρονική διάρκεια που θα έχουμε αγωγή των θυρίστορ εξαρτάται από την γωνία α και β . Η γωνία α είναι η γωνία έναυσης ενώ β ονομάζεται η γωνία σβέσης και εξαρτάται από το φορτίο, την συχνότητα και την γωνία έναυσης σύμφωνα με τον τύπο.

$$i = 0 = [\sin(\beta - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)\exp\left(\frac{\left(\frac{R}{L}\right)(\alpha-\beta)}{\omega}\right)] \quad (1)$$

Η μέτρηση της γωνίας α ξεκινάει από το σημείο που η πολική τάση στα άκρα του ενός θυρίστορ μηδενίζεται.

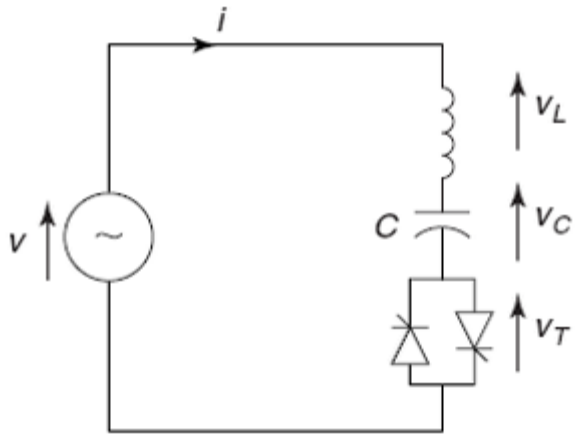


Σχ. 2 Κυματομορφές ρεύματος για γωνίες έναυσης 90^o , 105^o, 140^o

Στο σχήμα 2 βλέπουμε την μεταβολή της κυματομορφής του πολικού ρεύματος και του ρεύματος γραμμής για διάφορες γωνίες έναυσης των θυρίστορ του TCR . Φαίνονται καθαρά οι αρμονικές καθώς αυξάνει η γωνία.

Στην περίπτωση του TSC όπου ο πυκνωτής εισέρχεται στο σύστημα χωρίς μεταβολή στην γωνία έναυσης τότε λόγω της απότομης αύξησης του ρεύματος στην χωρητική βαθμίδα είτε για να φορτίσει ο πυκνωτής και να εξισωθεί η τάση του με την

τάση στα άκρα του ή αν είναι ίση τότε το ρεύμα στιγμιαία γίνεται ίσο με το ρεύμα μόνιμης κατάστασης, τοποθετείται σε σειρά και μία μικρή αυτεπαγωγή για την ελάττωση του ρυθμού αύξησης του ρεύματος. Ο μεγάλος ρυθμός αύξησης του ρεύματος είναι ικανός να καταστρέψει τα θυρίστορ. Με αυτό τον τρόπο η συνδεσμολογία θα είναι όπως το σχήμα 3.



Σχ. 3 Μέθοδος σύνδεσης πυκνωτή σε βαθμίδα SVC.

Παράρτημα ΙΙ

Τιμές μοντέλου εφαρμογής

Στο σχήμα 1 ακολουθούν τα δεδομένα πάνω στα οποία βασίστηκε η εφαρμογή. Περιλαμβάνει τις τιμές των στοιχείων του δικτύου. Η τιμή της ισχύος του SVC είναι αυτούσια με του μοντέλου power_svc_1tcr3tsc.

```
 08/19/93 UW ARCHIVE           100.0  1962 W IEEE 14 Bus Test Case
BUS DATA FOLLOWS                            14 ITEMS
   1 Bus 1     HV  1  1  3 1.060    0.0      0.0      0.0    232.4   -16.9     0.0 1.060     0.0     0.0   0.0   0.0        0
   2 Bus 2     HV  1  1  2 1.045   -4.98     21.7     12.7     40.0    42.4     0.0 1.045    50.0   -40.0   0.0   0.0        0
   3 Bus 3     HV  1  1  2 1.010  -12.72     94.2     19.0      0.0    23.4     0.0 1.010    40.0     0.0   0.0   0.0        0
   4 Bus 4     HV  1  1  0 1.019  -10.33     47.8     -3.9      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
   5 Bus 5     HV  1  1  0 1.020   -8.78      7.6      1.6      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
   6 Bus 6     LV  1  1  2 1.070  -14.22     11.2      7.5      0.0    12.2     0.0 1.070    24.0    -6.0   0.0   0.0        0
   7 Bus 7     ZV  1  1  0 1.062  -13.37      0.0      0.0      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
   8 Bus 8     TV  1  1  2 1.090  -13.36      0.0      0.0      0.0    17.4     0.0 1.090    24.0    -6.0   0.0   0.0        0
   9 Bus 9     LV  1  1  0 1.056  -14.94     29.5     16.6      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.19       0
  10 Bus 10    LV  1  1  0 1.051  -15.10      9.0      5.8      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
  11 Bus 11    LV  1  1  0 1.057  -14.79      3.5      1.8      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
  12 Bus 12    LV  1  1  0 1.055  -15.07      6.1      1.6      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
  13 Bus 13    LV  1  1  0 1.050  -15.16     13.5      5.8      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
  14 Bus 14    LV  1  1  0 1.036  -16.04     14.9      5.0      0.0     0.0     0.0 0.0       0.0     0.0   0.0   0.0        0
-999
BRANCH DATA FOLLOWS                         20 ITEMS
   1    2  1  1 1 0  0.01938   0.05917    0.0528    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   1    5  1  1 1 0  0.05403   0.22304    0.0492    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   2    3  1  1 1 0  0.04699   0.19797    0.0438    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   2    4  1  1 1 0  0.05811   0.17632    0.0340    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   2    5  1  1 1 0  0.05695   0.17388    0.0346    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   3    4  1  1 1 0  0.06701   0.17103    0.0128    0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   4    5  1  1 1 0  0.01335   0.04211    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   4    7  1  1 1 0  0.0       0.20912    0.0       0    0    0    0 0  0.978     0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   4    9  1  1 1 0  0.0       0.55618    0.0       0    0    0    0 0  0.969     0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   5    6  1  1 1 0  0.0       0.25202    0.0       0    0    0    0 0  0.932     0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   6   11  1  1 1 0  0.09498   0.19890    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   6   12  1  1 1 0  0.12291   0.25581    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   6   13  1  1 1 0  0.06615   0.13027    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   7    8  1  1 1 0  0.0       0.17615    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   7    9  1  1 1 0  0.0       0.11001    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   9   10  1  1 1 0  0.03181   0.08450    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
   9   14  1  1 1 0  0.12711   0.27038    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
  10   11  1  1 1 0  0.08205   0.19207    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
  12   13  1  1 1 0  0.22092   0.19988    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
  13   14  1  1 1 0  0.17093   0.34802    0.0       0    0    0    0 0  0.0       0.0 0.0     0.0     0.0   0.0   0.0
-999
LOSS ZONES FOLLOWS                    1 ITEMS
  1 IEEE 14 BUS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS                 1 ITEMS
 1    2 Bus 2     HV    0.0  999.99  IEEE14  IEEE 14 Bus Test Case
-9
TIE LINES FOLLOWS                     0 ITEMS
-999
END OF DATA
```

Σχ. 1 Δεδομένα εφαρμογής SVC.

Στα παρακάτω σχήματα ακολουθεί η απαραίτητη περιγραφή για τα δεδομένα του σχήματος 1 .

Partial Description of the IEEE Common Data Format for the
Exchange of Solved Load Flow Data

The complete description can be found in the paper "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, _IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems_, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pp. 1916-1925.

The data file has lines of up to 128 characters. The lines are grouped into sections with section headers. Data items are entered in specific columns. No blank items are allowed, enter zeros instead. Floating point items should have explicit decimal point. No implicit decimal points are used.

Data type codes: A - Alphanumeric (no special characters)
I - Integer
F - Floating point
* - Mandatory item

Title Data
==========

First card in file.

Columns 2- 9 Date, in format DD/MM/YY with leading zeros. If no date provided, use 0b/0b/0b where b is blank.

Columns 11-30 Originator's name (A)

Columns 32-37 MVA Base (F*)

Columns 39-42 Year (I)

Column 44 Season (S - Summer, W - Winter)

Column 46-73 Case identification (A)

Bus Data *
==========

Section start card *:

Columns 1-16 BUS DATA FOLLOWS (not clear that any more than BUS in 1-3 is significant) *

Columns ?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Bus data cards *:

Columns 1- 4 Bus number (I) *
Columns 7-17 Name (A) (left justify) *
Columns 19-20 Load flow area number (I) Don't use zero! *
Columns 21-23 Loss zone number (I)

Σχ. 2 Σελίδα 1 /5

```
Columns 25-26   Type (I) *
                 0 - Unregulated (load, PQ)
                 1 - Hold MVAR generation within voltage limits, (PQ)
                 2 - Hold voltage within VAR limits (gen, PV)
                 3 - Hold voltage and angle (swing, V-Theta) (must always
                      have one)
Columns 28-33   Final voltage, p.u. (F) *
Columns 34-40   Final angle, degrees (F) *
Columns 41-49   Load MW (F) *
Columns 50-59   Load MVAR (F) *
Columns 60-67   Generation MW (F) *
Columns 68-75   Generation MVAR (F) *
Columns 77-83   Base KV (F)
Columns 85-90   Desired volts (pu) (F) (This is desired remote voltage if
                this bus is controlling another bus.
Columns 91-98   Maximum MVAR or voltage limit (F)
Columns 99-106  Minimum MVAR or voltage limit (F)
Columns 107-114 Shunt conductance G (per unit) (F) *
Columns 115-122 Shunt susceptance B (per unit) (F) *
Columns 124-127 Remote controlled bus number

Section end card:
-----------------

Columns  1- 4   -999

Branch Data *
=============

Section start card *:
---------------------

Columns  1-16   BRANCH DATA FOLLOWS (not clear that any more than BRANCH
                is significant) *

Columns 40?- ?  NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Branch data cards *:
--------------------

Columns  1- 4   Tap bus number (I) *
                 For transformers or phase shifters, the side of the model
                 the non-unity tap is on
Columns  6- 9   Z bus number (I) *
                 For transformers and phase shifters, the side of the model
                 the device impedance is on.
Columns 11-12   Load flow area (I)
Columns 13-14   Loss zone (I)
Column  17      Circuit (I) * (Use 1 for single lines)
Column  19      Type (I) *
                 0 - Transmission line
                 1 - Fixed tap
                 2 - Variable tap for voltage control (TCUL, LTC)
                 3 - Variable tap (turns ratio) for MVAR control
```

Σχ. 3 Σελίδα 2 /5

```
                 4 - Variable phase angle for MW control (phase shifter)
Columns 20-29    Branch resistance R, per unit (F) *
Columns 30-40    Branch reactance X, per unit (F) * No zero impedance lines
Columns 41-50    Line charging B, per unit (F) * (total line charging, +B)
Columns 51-55    Line MVA rating No 1 (I) Left justify!
Columns 57-61    Line MVA rating No 2 (I) Left justify!
Columns 63-67    Line MVA rating No 3 (I) Left justify!
Columns 69-72    Control bus number
Column  74       Side (I)
                  0 - Controlled bus is one of the terminals
                  1 - Controlled bus is near the tap side
                  2 - Controlled bus is near the impedance side (Z bus)
Columns 77-82    Transformer final turns ratio (F)
Columns 84-90    Transformer (phase shifter) final angle (F)
Columns 91-97    Minimum tap or phase shift (F)
Columns 98-104   Maximum tap or phase shift (F)
Columns 106-111 Step size (F)
Columns 113-119 Minimum voltage, MVAR or MW limit (F)
Columns 120-126 Maximum voltage, MVAR or MW limit (F)

Section end card:
-----------------

Columns  1- 4    -999

Loss Zone Data
==============

Section start card
------------------

Columns  1-16    LOSS ZONES FOLLOWS (not clear that any more than LOSS
                 is significant)

Columns 40?- ?   NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Loss Zone Cards:
----------------

Columns  1- 3    Loss zone number  (I)
Columns  5-16    Loss zone name (A)

Section end card:
-----------------

Columns  1- 3    -99

Interchange Data *
==================

Section start card
------------------

Columns  1-16    INTERCHANGE DATA FOLLOWS (not clear that any more than
```

Σχ. 4 Σελίδα 3 /4

```
                First word is significant):
Columns 40?- ?  NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Interchange Data Cards *:
-------------------------

Columns  1- 2   Area number (I) no zeros! *
Columns  4- 7   Interchange slack bus number (I) *
Columns  9-20   Alternate swing bus name (A)
Columns 21-28   Area interchange export, MW (F) (+ = out) *
Columns 30-35   Area interchange tolerance, MW (F) *
Columns 38-43   Area code (abbreviated name) (A) *
Columns 46-75   Area name (A)

Section end card:
-----------------

Columns  1- 2   -9

Tie Line Data
=============

Section start card
------------------

Columns  1-16   TIE LINES FOLLOW (not clear that any more than TIE
                is significant)

Columns 40?- ?  NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Tie Line Cards:
---------------

Columns  1- 4   Metered bus number (I)
Columns  7-8    Metered area number (I)
Columns  11-14  Non-metered bus number (I)
Columns  17-18  Non-metered area number (I)
Column   21     Circuit number

Section end card:
-----------------

Columns  1- 3   -999
```

Βιβλιογραφία

1. Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου Richard C. Dorf , Robert H. Bishop 9η έκδοση
2. Control Systems Engineering Norman S. Nise 2nd edition
3. Σημειώσεις Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς, Γιώργος Κορρές Αναπληρωτής Καθηγητής, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006
4. Ηλεκτρικές Μηχανές Μέρος Β' Μόνιμη Κατάσταση Ι.Α ΤΕΓΟΠΟΥΛΟΣ Καθηγητή Ε.Μ. Πολυτεχνείου
5. SIM POWER SYSTEMS TM 5 USERS GUIDE Hydro Quebec Matlab Simulink
6. Thyristor-based Facts Controllers For Electrical Transmission Systems, R. Mohan Mathur , Rajiv K. Varma, IEEE Press , Wiley Interscience 2002
7. Power Systems (The Electric Power Engineering) , Leonard L. Grigsby , CRC Press,2007
8. Ανάλυση, έλεγχος και ευστάθεια συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, Νικόλαος Α. Βωβός Καθηγητής Τ.Η.Μ.Τ.Υ. Πανεπιστημίου Πατρών, Εκδόσεις ΖΗΤΗ , Θεσσαλονίκη 2001
9. Modelling and simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS controllers,, Sameh Kamel Mena Kodsi, IEEE Student Member, Claudio A. Canizares, IEEE Senior Member, Technical report 2003-3
10. Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, Springer 2006
11. Power System Stability and Control, Prabha Kundur, CRC, 2007-05-11
12. Ηλεκτρονικά ισχύος, Στέφανος Ν. Μανιάς, Καθηγητής ΕΜΠ, Τόμος Πρώτος , Πέμπτη έκδοση, Εκδόσεις Συμεών, 2000
13. Γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, Βασίλειος Κ. Παπαδιάς. Καθηγητού ΕΜΠ. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1999
14. Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος ΙΙ. Ασύμμετρες και μεταβατικές καταστάσεις , Αθήνα 1993
15. Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, Τόμος Ι. Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, Αθήνα 1985
16. Flexible ac transmission systems (FACTS), Yong Hua Song & Allan T Johns

17. Static Var Compensator (SVC) modeling and analysis Techniques by Matlab, Tariq Masood. Ch, Dr Abdel-Aty Edris, Pro. Dr. RK Aggarwal , PSC 2006 13-15 Nov. 2006 Tehran-Iran
18. Comparison of steady-state SVC models in load flow calculations, Peiyuan Chen, Zhe Chen , Bak-Jensen, B.1-4 Sep 2008, IEEE, ISBN : 978-1-4244-3294-3