



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

# Σύγκριση Μεθόδων Προσομοίωσης και Προστασίας από Αστάθεια Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Γ. Χιονά

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012





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

## Σύγκριση Μεθόδων Προσομοίωσης και Προστασίας από Αστάθεια Τάσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ελένη Γ. Χιονά

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2<sup>η</sup> Ιουλίου 2012.

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταυρούλα Καβατζά  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012



.....

Ελένη Γ. Χιονά

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

Copyright © Ελένη Γ. Χιονά, 2012

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



# Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π. Χαράλαμπο Λάμπρου για την πολύτιμη βοήθεια και τη συμβολή του στην εκπόνηση της εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πολύ συνεργάσιμος, παρά την έλλειψη χρόνου.

Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Βουρνά για την επίβλεψη της εργασίας, την καθοδήγηση και τη βοήθειά του στη διόρθωση των σφαλμάτων της.





# Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζουμε τη σύγκριση δύο μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας τάσης σε συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Τα δυο μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση του ΣΗΕ είναι το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων, που αποτελεί αρκετά λεπτομερή προσέγγιση του συστήματος, και το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης.

Αρχικά αναλύουμε τις δύο μεθόδους προσομοίωσης μαζί με τις συνιστώσες του δικτύου που περιλαμβάνονται στα μοντέλα. Στη συνέχεια περιγράφεται το σύστημα δοκιμών που έχει χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των μεθόδων μαζί με το ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης. Πρόκειται για τη μέθοδο τοπικής ανίχνευσης αστάθειας τάσης (LIVES) που βασίζεται στη λειτουργία των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Το σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο ενσωματώνεται στους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης που τροφοδοτούν τα φορτία του συστήματος και αποτελεί έναν από τους βασικούς μηχανισμούς ρύθμισης τάσης. Για τη σύγκριση των μεθόδων, το σύστημα προσομοιώνεται σε δύο χρονικές κλίμακες με χρήση του προγράμματος Matlab Simulink και με το οιονεί στατικό μοντέλο με χρήση του προγράμματος Wpstab. Με βάση τα αποτελέσματα προσομοίωσης γίνεται η σύγκριση στην απόκριση των δύο μεθόδων και εξάγονται συμπεράσματα για την ακρίβεια και την ορθότητα κάθε μοντέλου, καθώς και για τη λειτουργία του συστήματος προστασίας.

Σε δεύτερο επίπεδο, ασχολούμαστε με τη λειτουργία του μηχανισμού προστασίας από αστάθεια τάσης σε σύστημα με πολλαπλά επίπεδα ΣΑΤΥΦ. Για το σκοπό αυτό εντάξαμε στο σύστημα δοκιμών και ένα δεύτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές των υποσταθμών ΥΥΤ/ΥΤ.

## Λέξεις - Κλειδιά

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ευστάθεια Τάσης, Οιονεί Στατική Προσέγγιση, Συστήματα αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο, Προστασία Συστημάτων από Κατάρρευση Τάσης, Βραχυπρόθεσμα/Μακροπρόθεσμα Μεταβατικά Φαινόμενα



# Abstract

In this diploma thesis we examine the convergence of two methods used for analyzing power systems. For this purpose we use two models, the model of two time scales which constitutes a quite detailed approach of the system and a model based on the quasi steady-state approximation.

Initially we analyze the two simulation methods with the network components, which are included in the simulated models. Then we present the test system which has been used to compare the methods, together with the integrated autonomous protection system against voltage instability. The protection system uses the method of Local Identification of Voltage Emergency Situations, LIVES, based on the operation of load tap changers. Load tap changer controllers are included in the bulk power delivery transformers and are one of the main voltage regulation mechanisms. In order to compare the two simulation methods, we used for the two-time-scale approach the Simulink Matlab environment, while for the QSS the Wpstab program. The comparison between the responses of the two methods is based on the simulation results, and we draw conclusions on the accuracy and the soundness of each model, as well as on the operation of the protection system.

In a second level, we deal with the operation of the protection mechanism against voltage instability in systems with multiple levels of LTCs. For this reason we introduced two levels of LTCs in the test system, connecting the HV/EHV substations.

## Keywords

Power Systems, Voltage Stability, Quasi Steady-State Approximation, Load Tap Changers, Protection against Voltage Instability, Short-term/Long-term dynamics



# Περιεχόμενα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Και Ευστάθεια Τάσης	13
1.2	Προστασία Συστήματος από Αστάθεια Τάσης	14
1.3	Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)	15
1.4	Διαχωρισμός Φαινομένων Αστάθειας Τάσης με βάση τη Χρονική Κλίμακα	17
1.5	Σκοπός και Δομή της Εργασίας	18
2.	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	21
2.1	Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	21
2.1.1	Εξισώσεις πολλαπλών χρονικών κλιμάκων	21
2.1.2	Σύγχρονη Γεννήτρια	23
2.1.3	Έλεγχος Σύγχρονων Μηχανών	27
2.1.4	Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης	29
2.1.5	Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης	30
2.1.6	Μετασηματιστές Μεταβλητής Λήψης	34
2.1.7	Παράσταση Φορτίων	36
2.1.8	Εξισώσεις Δικτύου	37
2.1.9	Προσομοίωση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση του προγράμματος Simulink Matlab	39
2.2	Οιονεί Στατική Προσέγγιση	40
2.2.1	Εξισώσεις δυο χρονικών κλιμάκων	40
2.2.2	Προσομοίωση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση του προγράμματος Wpstab	43
3.	ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	45
3.1	Περιγραφή Συστήματος Δοκιμών	45
3.2	Επίπεδα φόρτισης	48
3.3	Επιμέρους Δεδομένα Συστήματος στα Μοντέλα Προσομοίωσης	49
4.	ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΑΣΗΣ	53
4.1	Συναγερμός (LIVES-Alarm)	53
4.2	Αποκατάσταση Περιοχής Ελέγχου ΣΑΤΥΦ (LTC control range restoration)	55

4.3	Αποκατάσταση Ευστάθειας (LIVES-Restore)	56
4.4	Παράδειγμα λειτουργίας της LIVES στο σύστημα δοκιμών Nordic32	58
5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	61
5.1	Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια	61
5.2	Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια	73
6.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ	81
6.1	Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια	81
6.2	Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια	96
7.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΑΤΥΦ	109
7.1	Δεδομένα συστήματος με την εισαγωγή του δεύτερου επιπέδου	109
7.2	Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια	111
7.3	Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια	123
8.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	137
8.1	Συμπεράσματα	137
8.2	Προοπτικές	139
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	141

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Μετασχηματιστής με ενσωματωμένο μηχανισμό αλλαγής τάσης υπό φορτίο	16
Σχήμα 2.1	Κυκλωματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής	23
Σχήμα 2.2	Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας	26
Σχήμα 2.3	Συστήματα προστασίας σύγχρονης μηχανής	27
Σχήμα 2.4	Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας του ρυθμιστή στροφών γεννήτριας	28
Σχήμα 2.5	Αναλογικός APT	29
Σχήμα 2.6	Ολοκληρωτικός APT	30
Σχήμα 2.7	ΣΠΥ αθροιστικού τύπου	31
Σχήμα 2.8	ΣΠΥ διακοπτικού τύπου	32
Σχήμα 2.9	Κυκλωματικό ισοδύναμο μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης	35
Σχήμα 2.10	Ισοδύναμο π μετασχηματιστή	36
Σχήμα 2.11	Σύστημα συνδεδεμένων ζυγών σε ΣΗΕ	38
Σχήμα 2.12	Προσεγγιστικά μοντέλα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	41
Σχήμα 3.1	Σύστημα δοκιμών Nordic32	47
Σχήμα 4.1	Τάση δευτερεύοντος, κινητός μέσος όρος, τάση αναφοράς, όρια τάσης και λόγος μετασχηματισμού του ζυγού 1041 με ενεργοποίηση της LIVES	58
Σχήμα 4.2	Τάση πρωτεύοντος, κινητός μέσος όρος, τάση αναφοράς, όρια τάσης και λόγος μετασχηματισμού του ζυγού 1041 με ενεργοποίηση της LIVES	60
Σχήμα 5.1	Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g6	63
Σχήμα 5.2	Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g14	64
Σχήμα 5.3	Τερματική Τάση γεννήτριας g6	65
Σχήμα 5.4	Τερματική Τάση γεννήτριας g14	65
Σχήμα 5.5	Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4044	66
Σχήμα 5.6	Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4051	67

<b>Σχήμα 5.7</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού 2031 που βρίσκεται κοντά στην κεντρική περιοχή _	67
<b>Σχήμα 5.8</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 1042 _____	69
<b>Σχήμα 5.9</b>	Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1042 _____	69
<b>Σχήμα 5.10</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4042 _____	70
<b>Σχήμα 5.11</b>	Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4042 _____	70
<b>Σχήμα 5.12</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4047 _____	71
<b>Σχήμα 5.13</b>	: Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4047 _____	71
<b>Σχήμα 5.14</b>	Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g7 _____	74
<b>Σχήμα 5.15</b>	Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g12 _____	75
<b>Σχήμα 5.16</b>	Τερματική Τάση γεννήτριας g7 _____	76
<b>Σχήμα 5.17</b>	Τερματική Τάση γεννήτριας g12 _____	76
<b>Σχήμα 5.18</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4046 _____	77
<b>Σχήμα 5.19</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4043 _____	78
<b>Σχήμα 5.20</b>	Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4043 _____	78
<b>Σχήμα 5.21</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 1044 _____	79
<b>Σχήμα 5.22</b>	Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1044 _____	79
<b>Σχήμα 6.1</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό φορτίου 4047 για το πλήρες μοντέλο με χρήση του Simulink _____	82
<b>Σχήμα 6.2</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό 4047 στο Simulink με εστίαση στο χρόνο σήμανσης του συναγερμού _____	83
<b>Σχήμα 6.3</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό φορτίου 4047 με χρήση του προσεγγιστικού μοντέλου στο Wpstab _____	83
<b>Σχήμα 6.4</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία της LIVES στο ζυγό 4043 (Simulink) _____	86
<b>Σχήμα 6.5</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία της LIVES στο ζυγό 4043 (Wpstab) _____	87
<b>Σχήμα 6.6</b>	Τερματική τάση γεννήτριας g14 _____	90
<b>Σχήμα 6.7</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4043 κεντρικής περιοχής _____	90
<b>Σχήμα 6.8</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4032 _____	91
<b>Σχήμα 6.9</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού 2031 _____	91
<b>Σχήμα 6.10</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4043 _____	93



<b>Σχήμα 6.11</b>	Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 4043	93
<b>Σχήμα 6.12</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 1042	94
<b>Σχήμα 6.13</b>	Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 1042	94
<b>Σχήμα 6.14</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4041	95
<b>Σχήμα 6.15</b>	Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό φορτίου 4041	95
<b>Σχήμα 6.16</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 (Simulink)	98
<b>Σχήμα 6.17</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 (Wpstab)	98
<b>Σχήμα 6.18</b>	Λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 με εστίαση στο σημείο όπου ο αλγόριθμος προσπαθεί να εντοπίσει πιθανή αστάθεια τάσης.	99
<b>Σχήμα 6.19</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4046 (Simulink)	100
<b>Σχήμα 6.20</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4046 (Wpstab)	100
<b>Σχήμα 6.21</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 1041 (Simulink)	101
<b>Σχήμα 6.22</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 1041 (Wpstab)	101
<b>Σχήμα 6.23</b>	Τερματική τάση γεννήτριας g12	105
<b>Σχήμα 6.24</b>	Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4045 κεντρικής περιοχής	105
<b>Σχήμα 6.25</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 1043 μαζί με τα όρια νεκρής ζώνης	106
<b>Σχήμα 6.26</b>	Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1043	106
<b>Σχήμα 6.27</b>	Τάση στο ζυγό φορτίου 4047 με τα όρια λειτουργίας	108
<b>Σχήμα 6.28</b>	Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 4047	108
<b>Σχήμα 7.1</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES-Alarm στο ζυγό 1042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ	113
<b>Σχήμα 7.2</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES-Alarm στο ζυγό 1042 με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ	114
<b>Σχήμα 7.3</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1044 (πρωτεύον, Simulink)	115
<b>Σχήμα 7.4</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1045 (πρωτεύον, Simulink)	115
<b>Σχήμα 7.5</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (δευτερεύον, Simulink)	117

<b>Σχήμα 7.6</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ στο ζυγό MT 1044 (Simulink) _____	117
<b>Σχήμα 7.7</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (δευτερεύον, Simulink)_____	118
<b>Σχήμα 7.8</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ στο ζυγό MT 1045 (Simulink) _____	118
<b>Σχήμα 7.9</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1044 (Wpstab) _____	120
<b>Σχήμα 7.10</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1045 (Wpstab) _____	120
<b>Σχήμα 7.11</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (Wpstab)_____	121
<b>Σχήμα 7.12</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1044 _____	121
<b>Σχήμα 7.13</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (Wpstab)_____	122
<b>Σχήμα 7.14</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1045 _____	122
<b>Σχήμα 7.15</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ _____	124
<b>Σχήμα 7.16</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ σε μεγέθυνση_____	125
<b>Σχήμα 7.17</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ _____	125
<b>Σχήμα 7.18</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 1042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ _____	126
<b>Σχήμα 7.19</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ σε μεγέθυνση_____	127
<b>Σχήμα 7.20</b>	Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ _____	127
<b>Σχήμα 7.21</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1044 (πρωτεύον, Simulink) _____	128
<b>Σχήμα 7.22</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1045 (πρωτεύον, Simulink) _____	128
<b>Σχήμα 7.23</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (δευτερεύον, Simulink)_____	129
<b>Σχήμα 7.24</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1044 _____	129
<b>Σχήμα 7.25</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (δευτερεύον, Simulink) _____	130
<b>Σχήμα 7.26</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1045 _____	130
<b>Σχήμα 7.27</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1044 (Wpstab) _____	133
<b>Σχήμα 7.28</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό YT 1045 (Wpstab) _____	133
<b>Σχήμα 7.29</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (Wpstab)_____	134
<b>Σχήμα 7.30</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1044(Wpstab) _____	134
<b>Σχήμα 7.31</b>	Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (Wpstab)_____	135
<b>Σχήμα 7.32</b>	Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ YT/MT του ζυγού 1045 (Wpstab) _____	135

# Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 3.1</b>	Δεδομένα Μετασχηματιστών Μεταβλητής Λήψης _____	46
<b>Πίνακας 3.2</b>	Όρια τάσης διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο μοντέλα _____	50
<b>Πίνακας 3.3</b>	Τιμές αντίδρασης μετασχηματιστών διανομής στο Wpstab _____	51
<b>Πίνακας 3.4</b>	Διόρθωση αέργου ισχύος για την ανάλυση του συστήματος με χρήση του προγράμματος Wpstab _____	52
<b>Πίνακας 5.1</b>	Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης γεννητριών(case1) _____	62
<b>Πίνακας 5.2</b>	Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης γεννητριών(case2) _____	74
<b>Πίνακας 6.1</b>	Χρόνοι σήμανσης συναγερμού σε κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης _____	81
<b>Πίνακας 6.2</b>	Χρόνος αποκατάστασης τάσης στα δύο προγράμματα προσομοίωσης _____	84
<b>Πίνακας 6.3</b>	Δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού σε ζυγούς του συστήματος στην οιονεί στατική προσέγγιση με χρήση του Wpstab _____	85
<b>Πίνακας 6.4</b>	Τάσεις αναφοράς ΣΑΤΥΦ μετά τη δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού στο Wpstab _____	85
<b>Πίνακας 6.5</b>	Συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου στο σύστημα στα δύο μοντέλα _____	88
<b>Πίνακας 6.6</b>	Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος υπερδιέγερσης γεννητριών(case1) _____	89
<b>Πίνακας 6.7</b>	Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος υπερδιέγερσης γεννητριών(case2) _____	96
<b>Πίνακας 6.8</b>	Χρόνοι ενεργοποίησης συναγερμού και αποκατάστασης στην προσομοίωση με το Simulink (case2) _____	97
<b>Πίνακας 6.9</b>	Χρόνοι ενεργοποίησης συναγερμού και αποκατάστασης στην προσομοίωση με το Wpstab (case2) _____	97
<b>Πίνακας 6.10</b>	Τελική τάση αναφοράς στους ζυγούς κεντρικής περιοχής του συστήματος που πλήττονται από τη διαταραχή _____	103
<b>Πίνακας 6.11</b>	Συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου στα δυο μοντέλα _____	104
<b>Πίνακας 7.1</b>	Δεδομένα 2 <sup>ο</sup> επιπέδου μετασχηματιστών _____	110
<b>Πίνακας 7.2</b>	Νέα δεδομένα για τους υπάρχοντες μετασχηματιστές διανομής _____	111

<b>Πίνακας 7.3 :</b> Ενεργοποίηση συναγερμού με ένα και δύο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Simulink)	113
<b>Πίνακας 7.4</b> Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Wpstab)	119
<b>Πίνακας 7.5 :</b> Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Simulink)	123
<b>Πίνακας 7.6</b> Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Wpstab)	131

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Και Ευστάθεια Τάσης

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών. Η ηλεκτρική ενέργεια έχει ιδιότητες που την καθιστούν καταλληλότερη μορφή ενέργειας για μαζική κατανάλωση, καθώς μπορεί να αυξηθεί με γοργούς ρυθμούς για να καλύψει ενεργειακές ανάγκες, να μετατραπεί εύκολα σε άλλη μορφή και να μεταφερθεί δια μέσου του συστήματος μεταφοράς σε μεγάλες αποστάσεις. Η ορθή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας εξασφαλίζεται όταν πληρούνται κάποιες βασικές αρχές:

- Η παρεχόμενη τάση στους ζυγούς φορτίων θα πρέπει να βρίσκεται εντός ορίων και κοντά στην ονομαστική τιμή. Τα όρια αυτά είναι ανάλογα του επιπέδου τάσης στο οποίο βρισκόμαστε (π.χ. στη χαμηλή τάση τα όρια αυτά είναι  $\pm 5\%$  της ονομαστικής τιμής).
- Η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος οφείλει να ακολουθεί όμοια συμπεριφορά και να βρίσκεται κοντά στην ονομαστική τιμή, με δυνατότητα απόκλισης  $\pm 0,05\text{Hz}$ .
- Η αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας οφείλει να είναι εξασφαλισμένη σε όλες τις βαθμίδες λειτουργίας του συστήματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνουμε την απαιτούμενη ποιότητα ισχύος προς τους καταναλωτές στο χαμηλότερο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος [2].

Δεδομένου όμως ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συνεχώς αυξάνεται, η εξασφάλιση των παραπάνω προδιαγραφών δεν είναι πάντα εύκολος στόχος. Το σύστημα φτάνει στα όρια φόρτισής του, και πρέπει να βρεθούν εναλλακτικοί τρόποι για να ικανοποιηθεί η ζήτηση ισχύος. Η κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς για την επέκταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο δραστικότερος τρόπος, όμως αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, καθώς συντρέχουν οικονομικοί ή περιβαλλοντολογικοί λόγοι. Επομένως, το υπάρχον σύστημα καλείται να ικανοποιήσει την αυξημένη ζήτηση, κάτι που οδηγεί σε διάφορες μορφές αστάθειας.

Μια σημαντική μορφή αστάθειας αναφέρεται στην τάση των ζυγών φορτίου. Η αυξημένη ζήτηση προκαλεί βύθιση τάσης στους ζυγούς φορτίων, που μπορεί να υπερβαίνει τα όρια του επιτρεπτού. Αυτή η βαθμιαία βύθιση ξεκινά από τους ζυγούς φορτίων όμως μπορεί

να επεκταθεί συνολικά στο σύστημα και να προκαλέσει αστάθεια τάσης. Ένας καλός ορισμός αυτού του φαινομένου παρουσιάζεται στο [1] :

*Η αστάθεια τάσης προκύπτει από την προσπάθεια του φορτίου να αποκαταστήσει την κατανάλωσή του πέρα από την ικανότητα του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ενέργειας.*

Ένα πρόβλημα αστάθειας τάσης μπορεί να προκληθεί από μια ξαφνική αλλαγή στο σύστημα παραγωγής ή μεταφοράς ενέργειας. Αναλογικά με το χρόνο στον οποίο εξελίσσεται το κάθε φαινόμενο, κατατάσσουμε τα δυναμικά φαινόμενα σε χρονικές κλίμακες για να εξετάσουμε τις επιπτώσεις των διαταραχών στο σύστημα. Η αποκατάσταση και επαναφορά του συστήματος σε μία ευσταθή κατάσταση λειτουργίας είναι το ζητούμενο σε αυτές τις περιπτώσεις. Η αποτυχία αυτού μπορεί να οδηγήσει σε αστάθεια, ακόμα και σε κατάρρευση τάσης. Με τον όρο αυτό εννοούμε μία ξαφνική καταστροφική μετάβαση του συστήματος που προκαλείται από αστάθεια που λαμβάνει χώρα σε μικρότερη χρονική κλίμακα από αυτή που μελετάμε και μπορεί να οδηγήσει σε ολική σβέση του συστήματος [1].

Είναι λοιπόν απαραίτητη η ύπαρξη μεθόδων προστασίας ώστε να καθίσταται εφικτή η αποκατάσταση του συστήματος μετά από την εκδήλωση αστάθειας τάσης. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι προστασίας που αναφέρονται στην ενότητα 1.2.

## 1.2 Προστασία Συστήματος από Αστάθεια Τάσης

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.1 έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι για προστασία μετά από μια διαταραχή στο σύστημα, ώστε να αποφευχθεί η κατάρρευση τάσης. Οι σημαντικότερες μέθοδοι είναι οι εξής:

1. *Συσκευές αντιστάθμισης αέργου ισχύος.* Πρόκειται για πυκνωτές και συστήματα ζεύξης που τροφοδοτούν το σύστημα παρέχοντας άεργο ισχύ. Είναι σχεδιασμένα ώστε να λειτουργούν σωστά ακόμα και σε συνθήκες μεγάλης φόρτισης του συστήματος, και αποτελούν κατά βάση μέθοδο πρόληψης και όχι αντιμετώπισης αστάθειας. Παρόλα αυτά σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν συσκευές αντιστάθμισης που χρησιμοποιούνται εφεδρικά.

2. *Εκκίνηση μονάδων.* Σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν πάντα μονάδες παραγωγής ενεργού και αέργου ισχύος οι οποίες μπορούν να ενταχθούν

αυτόματα είτε χειροκίνητα στο σύστημα σε ακραίες περιπτώσεις για την κάλυψη του φορτίου.

3. *Απόρριψη φορτίου.* Σε περιπτώσεις πολύ έντονης αστάθειας τάσης, και ενώ κανένας μηχανισμός δε μπορεί να επαναφέρει το σύστημα σε ευσταθές σημείο λειτουργίας, η απόρριψη φορτίου είναι ο αποτελεσματικότερος τρόπος αποκατάστασης ευσταθούς σημείου ισορροπίας.

Παράλληλα με τις μεθόδους προστασίας έχουν αναπτυχθεί και συστήματα ρύθμισης για τις γεννήτριες και τα φορτία του συστήματος. Τα συστήματα αυτά είναι :

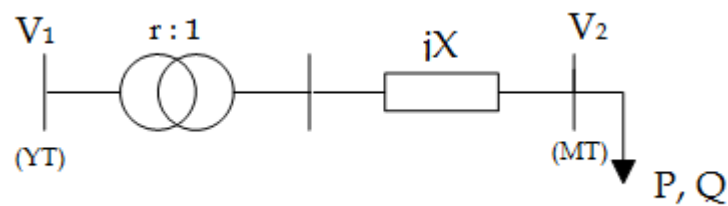
1. *Ρυθμιστές γεννητριών.* Οι γεννήτριες του συστήματος συνοδεύονται από εσωτερικά συστήματα ελέγχου ώστε να διατηρείται η τάση και η συχνότητα σε επίπεδα σταθερής λειτουργίας, ακόμα και μετά από διαταραχή στο σύστημα. Τέτοια είναι ο ρυθμιστής τάσης, το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης της μηχανής, ο ρυθμιστής στροφών και άλλα συστήματα που αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 2.

2. *Συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ).* Αποκαθιστούν έμμεσα το φορτίο στο ζυγό, μέσω ρύθμισης της τάσης. Το ζητούμενο είναι η διατήρηση της τάσης διανομής σε τιμή κοντά στην ονομαστική. Όταν η τάση σε ένα ζυγό φορτίου μειωθεί εκτός της επιτρεπόμενης ζώνης μετά από κάποια διαταραχή στο σύστημα, ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει, με τέτοιο τρόπο ώστε να αυξήσει την τάση στο ζυγό, και κατ'επέκταση το φορτίο που καταναλώνεται. Σε περιπτώσεις σοβαρής διαταραχής στο σύστημα, όπου η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ δεν είναι αποτελεσματική στην επαναφορά της τάσης εντός επιτρεπτών ορίων, χρησιμοποιείται και η αντίστροφη λειτουργία τους, με μία μέθοδο που αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

### 1.3 Συστήματα Αλλαγής Τάσης υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεγάλοι μετασχηματιστές στους υποσταθμούς διανομής υψηλής/μέσης τάσης είναι συνήθως εφοδιασμένοι με συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Τα ΣΑΤΥΦ είναι αργοί διακριτοί μηχανισμοί που ενσωματώνονται στους μετασχηματιστές ισχύος, και έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν και να ελέγχουν το λόγο μετασχηματισμού των τυλιγμάτων τους, ενώ ο μετασχηματιστής βρίσκεται σε λειτουργία.

Οι μετασχηματιστές ισχύος σε υποσταθμούς υψηλής/μέσης τάσης που έχουν ενσωματωμένο ΣΑΤΥΦ είναι σημαντικοί καθώς καθορίζουν την τάση στην αναχώρηση των δικτύων διανομής (Σχήμα 1.1). Η τάση αυτή καθορίζει την ποιότητα παροχής ισχύος προς τους καταναλωτές του δικτύου. Σε περιπτώσεις ισχυρής φόρτισης του δικτύου, η αυξημένη παροχή ισχύος δημιουργεί πτώσεις τάσης στους ζυγούς του συστήματος, οι οποίες μεταφέρονται και στο επίπεδο διανομής. Αν οι λόγοι μετασχηματισμού παρέμεναν σταθεροί στην ονομαστική τιμή θα είχαμε σαν συνέπεια μη αποδεκτό επίπεδο τάσης στο δίκτυο διανομής.



Σχήμα 1.1 Μετασχηματιστής με ενσωματωμένο μηχανισμό αλλαγής τάσης υπό φορτίο

Ο μηχανισμός των ΣΑΤΥΦ αλλάζει τις ενεργές σπείρες του ενός από τα δύο τριφασικά τυλίγματα του μετασχηματιστή ισχύος. Με τον τρόπο αυτό ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει και επομένως και η ελεγχόμενη τάση. Σκοπός είναι η διατήρηση της τάσης στον ελεγχόμενο ζυγό. Σε περιπτώσεις όμως που έχουμε αστάθεια τάσης στο σύστημα, η αλλαγή λόγου μετασχηματισμού προς όφελος της τάσης στο φορτίο, δημιουργεί μεγαλύτερη μείωση τάσης στους ζυγούς του συστήματος, καθώς το δίκτυο δε μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση ισχύος των φορτίων. Αποτέλεσμα αυτού είναι να επισπεύδεται η αστάθεια τάσης στο σύστημα. Για το λόγο αυτό, έχει αναπτυχθεί η μέθοδος που βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ, και περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.

Η αποκατάσταση φορτίου γίνεται έμμεσα μέσω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ. Με την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού προσπαθούμε να επιτύχουμε αποκατάσταση της τάσης δευτερεύοντος, κοντά στην ονομαστική τιμή της. Μέσω αυτού, η ισχύς που μεταφέρεται στο φορτίο και εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τάση στο ζυγό, αποκαθίσταται.

Το σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο μπορεί να είναι είτε διακριτό είτε συνεχές. Στο διακριτό μοντέλο ΣΑΤΥΦ όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός θεωρούμε ότι ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους  $\Delta r$ . Στην περίπτωση αυτή το σύστημα λειτουργεί μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου. Στο συνεχές μοντέλο κάνουμε την υπόθεση ότι ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ ενός άνω και ενός κάτω ορίου.



Οι μετασχηματιστές με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο, όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται στους υποσταθμούς υψηλής/μέσης τάσης και ελέγχουν την τάση στην αναχώρηση των δικτύων διανομής. Παρόλα αυτά, συναντάμε μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ και σε υποσταθμούς υπερυψηλής/υψηλής τάσης του δικτύου. Στο επίπεδο αυτό, ο μηχανισμός αλλαγής τάσης υπό φορτίο συμβάλλει κατά κύριο λόγο στη βελτίωση του επιπέδου τάσης στην υψηλή τάση και στον έλεγχο της ροής αέργου ισχύος στο δίκτυο. Σε περιπτώσεις μεγάλης φόρτισης, συμβάλλουν στη διατήρηση των τάσεων σε ικανοποιητικά επίπεδα. Πέραν αυτού όμως, η ύπαρξη μετασχηματιστών εξοπλισμένων με σύστημα αλλαγής τάσης σε ανώτερο επίπεδο του συστήματος, μπορεί να αποτελέσει και έναν ακόμα μηχανισμό για ανίχνευση και προστασία του συστήματος από αστάθεια τάσης. Αυτή η λειτουργία μελετάται στο Κεφάλαιο 7 της διπλωματικής εργασίας.

## 1.4 Διαχωρισμός Φαινομένων Αστάθειας Τάσης με βάση τη Χρονική Κλίμακα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν πολλές κατηγορίες φαινομένων που μπορεί να αναπτυχθούν και να προκαλέσουν αστάθεια στο σύστημα, και τα διακρίνουμε με βάση το χρόνο εξέλιξης τους. Τα φαινόμενα αυτά πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά το καθένα και σε συνδυασμό μεταξύ τους, ώστε να κατανοήσουμε το μηχανισμό τους και την επιρροή τους στη λειτουργία του συστήματος.

Για το λόγο αυτό κατατάσσουμε τα δυναμικά φαινόμενα αυτά σε 3 κατηγορίες:

- *Ακαριαία φαινόμενα:* πρόκειται κυρίως για ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και η μελέτη τους δεν μας απασχολεί, καθώς δεν επηρεάζουν την ευστάθεια του συστήματος.
- *Βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα:* εδώ εντάσσουμε φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται όταν συμβεί κάποια διαταραχή στο σύστημα, εντός λίγων δευτερολέπτων.
- *Μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα:* αυτά λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερο χρόνο από τα βραχυπρόθεσμα. Οι διατάξεις ελέγχου αυτών των φαινομένων ενεργοποιούνται συνήθως μετά την ισορροπία των βραχυπρόθεσμων φαινομένων.

Από τις παραπάνω κατηγορίες αυτές που ενδείκνυνται για περαιτέρω μελέτη είναι η 2<sup>η</sup> και η 3<sup>η</sup>, των οποίων οι επιπτώσεις στο σύστημα είναι και οι πιο επώδυνες σε περιπτώσεις αστάθειας τάσης. Στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα δρουν οι ρυθμιστές τάσης και

στροφών, οι κινητήρες επαγωγής, τα συστήματα αντιστάθμισης με ηλεκτρονικά ισχύος. Στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα εντάσσονται η λειτουργία των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο που περιγράφεται στην ενότητα 1.3, τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών, τα συστήματα ζεύξης/απόζευξης στατών πυκνωτών, η αποκατάσταση φορτίων και άλλα.

Στο λεπτομερές μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μελετάμε συνολικά όλα τα μεταβατικά φαινόμενα των χρονικών κλιμάκων που αναφέρθηκαν. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε απλοποιημένα μοντέλα. Το συνηθέστερο και πιο αξιόπιστο μοντέλο είναι το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων, όπου στην ανάλυση του συστήματος λαμβάνουμε υπόψη τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Εάν επιθυμούμε τη μελέτη του συστήματος σε βραχυπρόθεσμη μόνο κλίμακα, μπορούμε να εισάγουμε ένα προσεγγιστικό μοντέλο όπου θεωρούμε ότι τα μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα εξελίσσονται σε μεγαλύτερη χρονική κλίμακα και άρα μπορούν να θεωρηθούν σταθερά σε διάστημα μερικών δευτερολέπτων. Εάν επιθυμούμε αντίστοιχα την ανάλυση του συστήματος σε μακροπρόθεσμη κλίμακα, τότε θεωρούμε ότι κατά την δράση των μηχανισμών αυτών τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας έχουν ήδη εξελιχθεί και έχουν φτάσει σε ισορροπία. Αυτός ο τρόπος ανάλυσης καλείται *‘οιονεί στατική ανάλυση’* και χρησιμοποιείται σε αναλύσεις που αφορούν τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης.

## 1.5 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση δυο μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας τάσης σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για την ανάλυση του συστήματος με χρήση του μοντέλου δύο χρονικών κλιμάκων, και με το μοντέλο της οιονεί στατικής ανάλυσης, που ορίστηκαν στην ενότητα 1.4. Για το σκοπό αυτό, υλοποιείται το μοντέλο ενός δεδομένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση του προγράμματος Matlab Simulink, το οποίο μας παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης συστημάτων σε δύο χρονικές κλίμακες. Το ίδιο σύστημα υλοποιείται και με το πρόγραμμα Wpstab, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο ΣΗΕ [9], και χρησιμοποιεί τη μέθοδο της οιονεί στατικής ανάλυσης για τη προσομοίωση οποιουδήποτε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε επόμενο στάδιο, εξετάζουμε τη λειτουργία ενός μηχανισμού προστασίας από αστάθεια τάσης. Επίσης, τη λειτουργία δυο επιπέδων ΣΑΤΥΦ σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό κάνουμε χρήση του προγράμματος Matlab Simulink στο ήδη υλοποιημένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε και για τη σύγκριση των δύο προγραμμάτων.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά οι δύο μέθοδοι προσομοίωσης με το σύνολο των εξισώσεων που τις διέπουν και παρουσιάζονται οι συνιστώσες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με τον τρόπο που παριστάνονται σε καθένα από τα δυο προγράμματα προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζουμε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, Nordic32, που χρησιμοποιείται ως σύστημα δοκιμών για τη σύγκριση των δυο μεθόδων προσομοίωσης και περιγράφεται αναλυτικά στο [8].

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφουμε το σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης που έχει αναπτυχθεί στις εργασίες [4], [5].

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζουμε τη σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης συστημάτων, με προσομοίωση μιας διαταραχής στο σύστημα δοκιμών. Εξετάζουμε την απόκριση κάθε μοντέλου προσομοίωσης στη διαταραχή που προσομοιώθηκε και αξιολογούμε τη σύγκριση των δύο μεθόδων.

Στο Κεφάλαιο 6 εισάγουμε τη μέθοδο προστασίας από κατάρρευση τάσης στο σύστημα και εξετάζουμε εκ νέου τη σύγκριση των δύο μοντέλων προσομοίωσης στον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου προστασίας.

Στο Κεφάλαιο 7 εξετάζουμε τη λειτουργία του μηχανισμού δυο επιπέδων ΣΑΤΥΦ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκρίνουμε τη συμπεριφορά του ίδιου συστήματος με ύπαρξη ενός και δυο επιπέδων ΣΑΤΥΦ αντίστοιχα για μια δεδομένη διαταραχή, και αξιολογούμε τη χρησιμότητα του μηχανισμού.



## 2. ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με το σύνολο των εξισώσεων που το διέπουν σε όλες τις χρονικές κλίμακες. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή όλων των συνιστωσών του δικτύου και τέλος παρουσιάζεται το απλοποιημένο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης.

### 2.1 Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

#### 2.1.1 Εξισώσεις πολλαπλών χρονικών κλιμάκων

Η πλειοψηφία των δυναμικών συστημάτων μπορεί να περιγραφεί από ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων

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

όπου  $x$  είναι το διάνυσμα κατάστασης  $n \times 1$  του συστήματος και η  $f$  είναι γενικά μία μη γραμμική διανυσματική συνάρτηση του διανύσματος  $x$ . Γνωρίζοντας λοιπόν ένα σύνολο αρχικών συνθηκών  $x(0) = x_0$  μπορούμε να προσδιορίσουμε τη λύση  $x(t)$  εφόσον ικανοποιούνται τα κριτήρια ύπαρξης και μοναδικότητας λύσης.

Για την περιγραφή ορισμένων συστημάτων όμως, δεν αρκεί το παραπάνω σύνολο διαφορικών εξισώσεων. Συχνά χρειάζονται και αλγεβρικές εξισώσεις που λειτουργούν ως περιορισμοί μεταβλητών που υπεισέρχονται στο σύστημα. Έχουμε λοιπόν συνολικά ένα σύστημα αλγεβρικών και διαφορικών εξισώσεων το οποίο και χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στις εξισώσεις αυτές περιλαμβάνονται:

➤ Εξισώσεις δικτύου που αφορούν την απόκριση του συστήματος στιγμιαία σε οποιαδήποτε μεταβολή. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να αφορούν ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρά χρονικά διαστήματα και για το λόγο αυτό τα θεωρούμε ακαριαία στην ανάλυση του συστήματος. Χρησιμοποιούμε δηλαδή τις εξισώσεις ισορροπίας που τα διέπουν που κατά κύριο λόγο είναι νόμοι Kirchhoff ή το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα. Οι εξισώσεις αυτές είναι αλγεβρικές και αναφέρονται συνήθως ως 'ακαριαία φαινόμενα'

- Εξισώσεις που περιγράφουν τις γρήγορες δυναμικές του συστήματος που είναι διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης με σχετικά μικρές σταθερές χρόνου. Εντάσσουμε στη κατηγορία αυτή φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα όταν συμβεί κάποια διαταραχή στο σύστημα, εντός λίγων δευτερολέπτων. Σε αυτές περιλαμβάνονται εξισώσεις σύγχρονων γεννητριών, ρυθμιστών, κινητήρων επαγωγής, ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται ως 'βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα'
- Εξισώσεις που περιγράφουν αργές δυναμικές του συστήματος. Εδώ εντάσσουμε φαινόμενα που εξελίσσονται μετά από κάποια διαταραχή αλλά σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο από τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Περιλαμβάνονται εξισώσεις λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, εξισώσεις συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών, παθητικών στοιχείων αντιστάθμισης, αποκατάσταση δυναμικών φορτίων, μηχανισμοί ζεύξης. Αποτελούνται από διαφορικές εξισώσεις με μεγάλες χρονικές σταθερές για τα δυναμικά φαινόμενα και εξισώσεις διαφορών για τα φαινόμενα που μεταβάλλονται σε διακριτές χρονικές στιγμές.

Επομένως το αναλυτικό μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πολλαπλών χρονικών κλιμάκων μπορεί να περιγραφεί από το σύνολο των εξισώσεων

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.2)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.3)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.4)$$

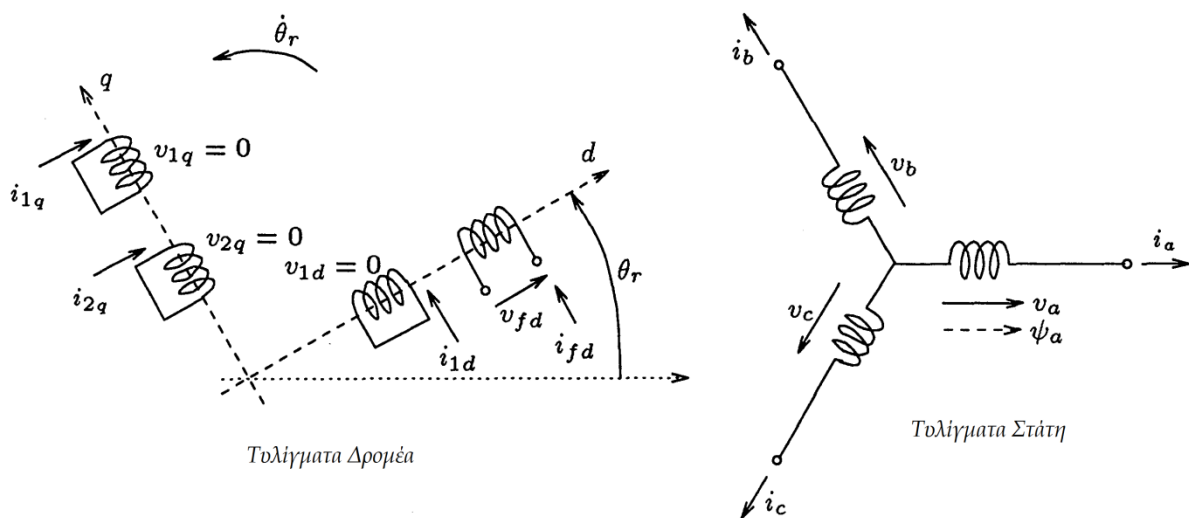
$$\mathbf{z}_d(\mathbf{k} + \mathbf{1}) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(\mathbf{k})) \quad (2.5)$$

όπου με  $\mathbf{x}$  συμβολίζουμε το διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης του συστήματος,  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα αλγεβρικών μεταβλητών του συστήματος,  $\dot{\mathbf{z}}_c$  είναι οι μεταβλητές των συνεχών μακροπρόθεσμων φαινομένων και  $\mathbf{z}_d$  οι μεταβλητές των διακριτών μακροπρόθεσμων φαινομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε αναλυτικά κάθε συνιστώσα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με τις εξισώσεις που διέπουν τη λειτουργία της και χρησιμοποιούνται στο μοντέλο που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.2)-(2.5). Αναλύουμε το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας μαζί με τα συστήματα προστασίας της, το μοντέλο μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, τον τρόπο παράστασης των φορτίων καθώς και τις εξισώσεις δικτύου που στο σύνολό τους εμπεριέχονται στις (2.2).

### 2.1.2 Σύγχρονη Γεννήτρια

Το μοντέλο μιας σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Το κύκλωμα του στάση περιλαμβάνει τριφασικά τυλίγματα με τάσεις  $v_a, v_b, v_c$  και ρεύματα  $i_a, i_b, i_c$  αντίστοιχα. Όσον αφορά τη ροή ισχύος υιοθετούμε τη σύμβαση γεννήτριας που φαίνεται στο σχήμα. Ως ορθό άξονα (*direct d*) ορίζουμε αυτόν του πεδίου διέγερσης. Ο εγκάρσιος άξονας (*quadrature q*) προπορεύεται κατά  $90^\circ$ . Τα τυλίγματα με την ένδειξη  $1d$  και  $1q$  παριστάνουν την απόσβεση στον ορθό και εγκάρσιο άξονα, και το  $2q$  παριστάνει τα δινορεύματα για μηχανές κυλινδρικού δρομέα. Όλα τα τυλίγματα είναι βραχυκυκλωμένα εκτός από αυτά του πεδίου διέγερσης.



Σχήμα 2.1 Κυκλωματικό διάγραμμα σύγχρονης μηχανής

Για να εξάγουμε το μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της γεννήτριας, θεωρούμε κάποιες παραδοχές:

- Αμελητέα μαγνητική υστέρηση και κορεσμό.
- Τα τυλίγματα του δρομέα είναι συμμετρικά και δεν υπάρχει αλληλεπαγωγή μεταξύ ορθού και εγκάρσιου άξονα.
- Τα παραγόμενα μαγνητικά πεδία έχουν ημιτονοειδή κατανομή στο διάκενο.
- Η περιστροφική κίνηση της μηχανής χαρακτηρίζεται από τη γωνία  $\theta_r$ , μεταξύ του ορθού άξονα της μηχανής και της φάσης  $a$  του στάτη. Όταν η μηχανή στρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα η γωνία  $\theta_r$  δίνεται από τη σχέση :

$$\theta_r = \omega_0 t + \theta_r^0 \quad (2.6)$$

όπου  $\theta_r^0$  εκφράζει την αρχική θέση του άξονα.

Για να μελετήσουμε τη σύγχρονη γεννήτρια και να εξάγουμε τις εξισώσεις λειτουργίας της χρησιμοποιούμε το μετασχηματισμό Park. Με βάση αυτό το μαθηματικό εργαλείο, οι εξισώσεις τάσεων στα τυλίγματα του στάτη απλοποιούνται σε μεγάλο βαθμό, και είναι οι εξής:

$$v_d = -R_a i_d - \dot{\theta}_r \psi_q + \dot{\psi}_d \quad (2.7)$$

$$v_q = -R_a i_q - \dot{\theta}_r \psi_d + \dot{\psi}_q \quad (2.8)$$

$$v_o = -R_a i_o + \dot{\psi}_o \quad (2.9)$$

Για τα τυλίγματα του δρομέα οι εξισώσεις τάσεων, είναι οι εξής:

$$v_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \dot{\psi}_{fd} \quad (2.10)$$

$$0 = R_{1d} i_{1d} + \dot{\psi}_{1d} \quad (2.11)$$

$$0 = R_{1q} i_{1q} + \dot{\psi}_{1q} \quad (2.12)$$

$$0 = R_{2q} i_{2q} + \dot{\psi}_{2q} \quad (2.13)$$

Για την ανάλυση ευστάθειας, το μοντέλο γεννήτριας που χρησιμοποιούμε είναι ακόμα πιο απλοποιημένο, καθώς δεν ενδιαφέρει η ακριβής ανάλυση, αλλά μία εκτίμηση της απόσβεσης που οφείλεται στη μηχανή, και ειδικότερα στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις. Χρησιμοποιούμε λοιπόν το μοντέλο τρίτης τάξεως της γεννήτριας.

Για να εφαρμόσουμε το μοντέλο αυτό γίνονται και οι εξής επιπλέον παραδοχές:

- Παραλείπουμε τα τυλίγματα απόσβεσης
- Αμελούνται όλες οι τάσεις μετασχηματιστή του στάτη και στα δύο κάθετα τυλίγματα  $\dot{\psi}_d, \dot{\psi}_q$ , καθώς και η ωμική αντίσταση του στάτη  $R_a$ .
- Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα θεωρείται σταθερή και κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής.
- Με βάση αυτά, οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας είναι οι εξής:



$$\text{εξίσωση ταχύτητας} \quad \dot{\delta} = \omega_0 \Delta\omega \quad (2.14)$$

$$\text{εξίσωση επιτάχυνσης} \quad \dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - P_g - D_g \Delta\omega] \quad (2.15)$$

$$\text{εξίσωση πεδίου διέγερσης} \quad T'_{do} \dot{E}'_q = E_f - E_q \quad (2.16)$$

όπου

$H$  η ανηγμένη σταθερά αδρανείας

$P_m$  η μηχανική ισχύς στον άξονα της μηχανής

$P_g$  η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς στο σύστημα

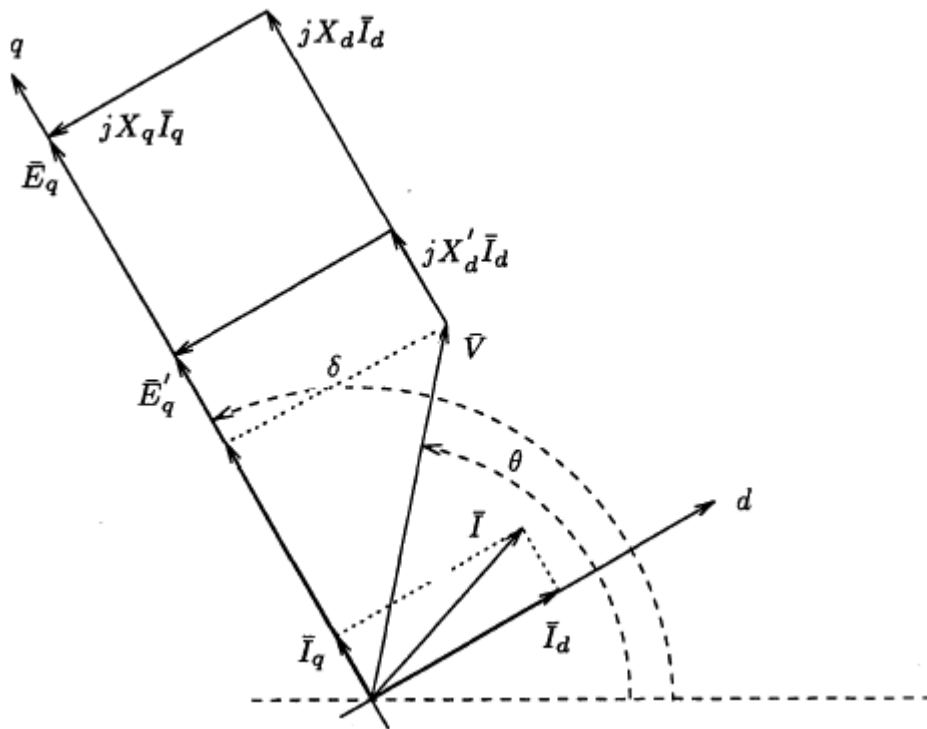
$D_g$  ο συντελεστής απόσβεσης

$T'_{do}$  η σταθερά χρόνου ανοιχτοκύκλωσης

$E_f$  ΗΕΔ διέγερσης, ανάλογη με την τάση  $v_{fd}$

$E_q$  ΗΕΔ ανάλογη του ρεύματος διέγερσης  $i_{fd}$ . Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας της μηχανής και σε ανά μονάδα σύστημα έχουμε  $E_q = I_{fd}$ .

Το αντίστοιχο διανυσματικό διάγραμμα της μηχανής φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2 Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας

Εκτός από τις 3 διαφορετικές εξισώσεις (2.14)-(2.16), χρειάζονται και οι εξισώσεις της παρεχόμενης ενεργού και αέργου ισχύος της γεννήτριας προς το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας:

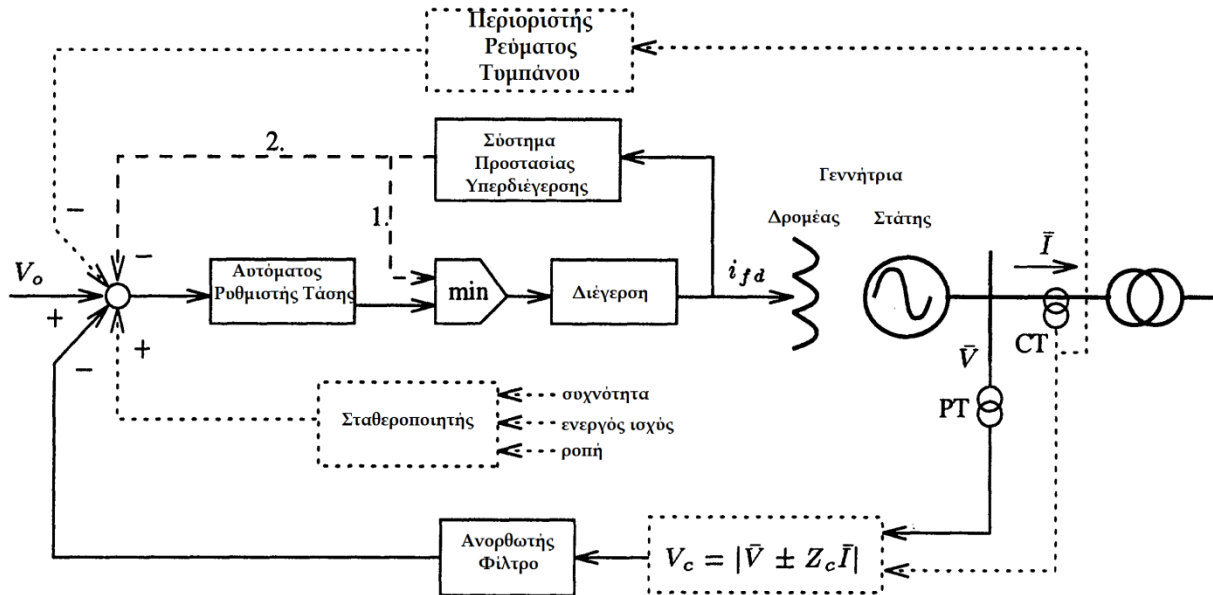
$$P = \frac{E_q V}{X_d} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2(\delta - \theta) \quad (2.17)$$

$$Q = \frac{E_q V}{X_d} \cos(\delta - \theta) - V^2 \left( \frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_q} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_d} \right) \quad (2.18)$$

Ο έλεγχος τάσης και παρεχόμενης ισχύος στο σύστημα γίνεται μέσω ρυθμιστών. Υπάρχουν δυο είδη ρυθμιστών στις σύγχρονες γεννήτριες : ρυθμιστής στροφών και ρυθμιστής τάσης. Υπάρχει επίσης και σύστημα προστασίας του τυλίγματος διέγερσης που ονομάζεται σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, το οποίο έχει στόχο να μειώνει το ρεύμα του πεδίου όταν αυτό υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή. Στην επόμενη ενότητα αυτά τα συστήματα αναλύονται περισσότερο.

### 2.1.3 Έλεγχος Σύγχρονων Μηχανών

Στο Σχήμα 2.3 φαίνονται κάποια από τα συστήματα ελέγχου και προστασίας της σύγχρονης μηχανής.



Σχήμα 2.3 Συστήματα προστασίας σύγχρονης μηχανής

Τα συστήματα αυτά είναι :

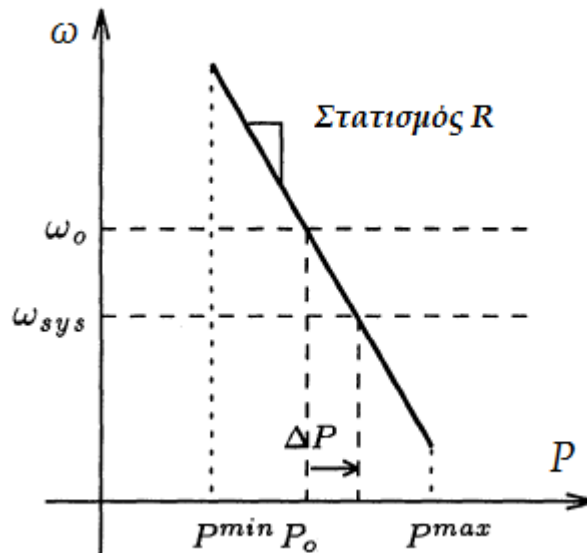
*Σταθεροποιητής* του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (PSS) : στη μόνιμη κατάσταση ο σταθεροποιητής δεν επιδρά στο σύστημα. Επιδρά στη μεταβατική απόκριση της μηχανής, αυξάνοντας τη ροπή απόσβεσης των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων.

*Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης* : ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης εξασφαλίζει σχεδόν σταθερή τάση ακροδεκτών στην έξοδο της γεννήτριας. Η λειτουργία του θα αναλυθεί στη συνέχεια.

*Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης* : το ρεύμα διέγερσης της μηχανής δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα. Υπάρχει ένα άνω όριο, ώστε να εξασφαλίζεται καλή λειτουργία της μηχανής και να μην υπάρχει πιθανότητα υπερθέρμανσης, λόγω αυξημένων απωλειών στο τύλιγμα διέγερσης. Η λειτουργία του ΣΠΥ περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω.

*Περιοριστής Ρεύματος Τυμπάνου* : ομοίως με το τύλιγμα διέγερσης, έτσι και για το τύλιγμα του στάτη πρέπει να υπάρχει περιορισμός στο ρεύμα τυμπάνου, ώστε να αποφύγουμε την πιθανότητα υπερθέρμανσης.

Ένα σύστημα ελέγχου που δεν φαίνεται στο Σχήμα 2.3 είναι ο ρυθμιστής στροφών της γεννήτριας. Μέσω αυτού καθορίζεται η αποδιδόμενη προς το σύστημα ηλεκτρική ισχύς της γεννήτριας. Ρόλος του είναι να διατηρεί τη ταχύτητα περιστροφής κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα. Οι ρυθμιστές στροφών είναι αναλογικοί, και ακολουθούν τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας που φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας του ρυθμιστή στροφών μιας γεννήτριας

Η αρνητική κλίση της χαρακτηριστικής φορτίου-συχνότητας ονομάζεται στατισμός της γεννήτριας,  $R$ , και ορίζεται ως εξής:

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \quad (2.19)$$

Ο όρος  $1/R$  εκφράζει τον συντελεστή συμμετοχής της γεννήτριας στις μεταβολές φορτίου του συστήματος. Ειδικότερα, γεννήτριες με μειωμένο στατισμό συνεισφέρουν περισσότερο στις αλλαγές φορτίου.

Γενικά, στην ανάλυση ευστάθειας τάσεως ενός συστήματος, θεωρούμε ότι ο ρυθμιστής στροφών είναι σε ισορροπία και ακολουθεί τη χαρακτηριστική μονίμου καταστάσεως του Σχήματος 2.4.

### 2.1.4 Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης εξασφαλίζει σχεδόν σταθερή τάση ακροδεκτών στην έξοδο της γεννήτριας όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Η τιμή της τάσης πρέπει να διατηρείται κοντά στην επιθυμητή. Με βάση το Σχήμα 2.3, ο APT παίρνει ως είσοδο τη διαφορά  $V_o - V_t$ , όπου  $V_o$  η τάση αναφοράς και  $V_t$  η τάση στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Ενδέχεται η τάση ακροδεκτών να μην εισάγεται απευθείας στο ρυθμιστή αλλά να προσαρμόζεται με μια αντίσταση αντιστάθμισης  $Z_c$ . Αν η διαφορά μεταξύ τους είναι μεγαλύτερη (κατά απόλυτη τιμή) από την προβλεπόμενη απόκλιση για την τάση εξόδου της γεννήτριας, τότε η τάση διέγερσης μεταβάλλεται ανάλογα ώστε να μειωθεί το σφάλμα.

Εξετάζουμε στη συνέχεια δύο είδη αυτόματου ρυθμιστή τάσεως. Τον αναλογικό APT και τον ολοκληρωτικό APT.

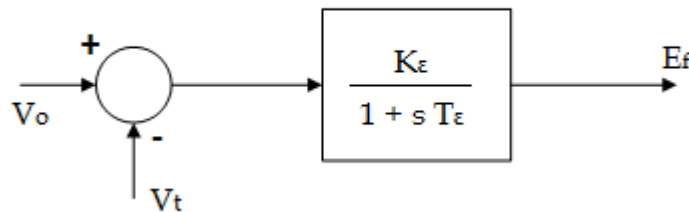
Ο αναλογικός APT έχει το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 2.5, με εξίσωση λειτουργίας:

$$T_E \dot{E}_f = K_E [V_o - V_t] - E_f \quad (2.20)$$

και στη μόνιμη κατάσταση:

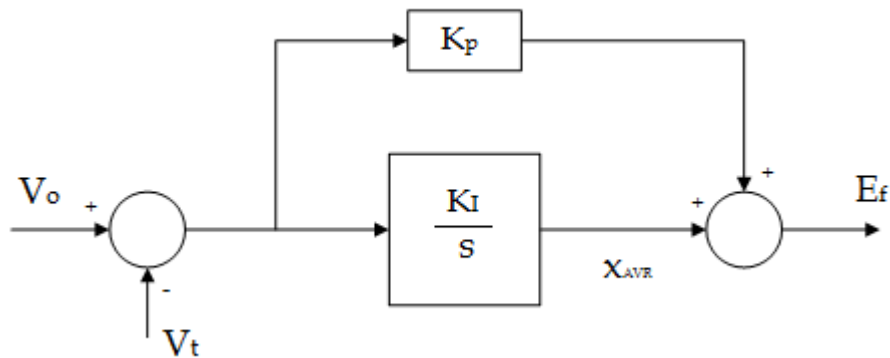
$$E_f = K_E (V_o - V_t) \quad (2.21)$$

όπου το κέρδος  $K_E$  έχει συνήθως μεγάλη τιμή.



Σχήμα 2.5 Αναλογικός APT

Για τον ολοκληρωτικό APT έχουμε το διάγραμμα του Σχήματος 2.6,



Σχήμα 2.6 Ολοκληρωτικός APT

με εξίσωση λειτουργίας:

$$E_f = K_P(V_o - V_t) + x_{AVR} \quad (2.22)$$

και

$$\dot{x}_{AVR} = K_I(V_o - V_t) \quad (2.23)$$

και στη μόνιμη κατάσταση έχουμε :

$$V_t = V_o \quad (2.24)$$

δηλαδή το σφάλμα στην τάση εξόδου μηδενίζεται στη μόνιμη κατάσταση.

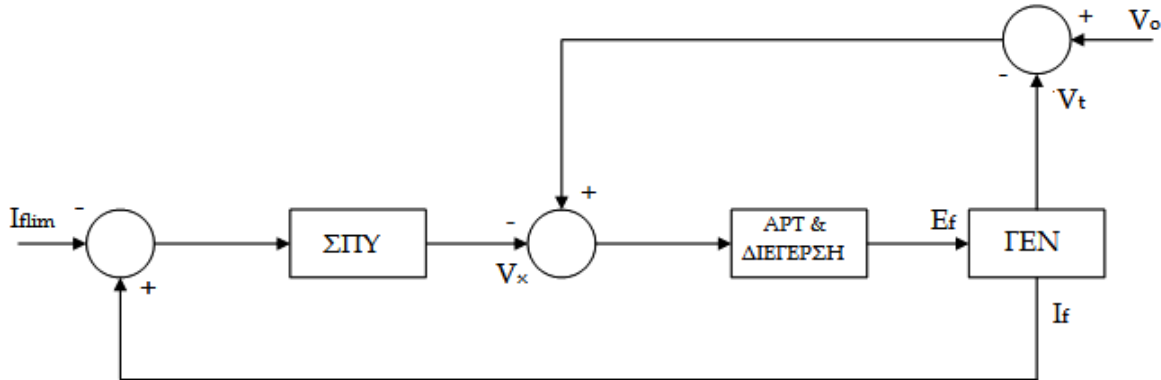
### 2.1.5 Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης

Τα συστήματα υπερδιέγερσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- ΣΠΥ αθροιστικού τύπου
- ΣΠΥ διακοπτικού τύπου

και κάθε ένα από αυτά μπορεί να υλοποιείται με αναλογικό ή ολοκληρωτικό ρυθμιστή.

Για το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης αθροιστικού τύπου το δομικό διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7 ΣΠΥ αθροιστικού τύπου

Η έξοδος του ΣΠΥ,  $V_x$ , προστίθεται στην είσοδο του αυτόματου ρυθμιστή τάσης, ο οποίος είναι μόνιμα ενεργοποιημένος. Όταν το ΣΠΥ είναι ενεργοποιημένο και με χρήση αναλογικού ρυθμιστή τάσης, η εξίσωση (2.20) της τάσης εξόδου σε συνάρτηση με την τάση διέγερσης γίνεται:

$$T_E \dot{E}_f = K_E [V_0 - V_c - V_x] - E_f \quad (2.25)$$

Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αναλογικό ρυθμιστή στο ΣΠΥ:

$$\frac{V_x}{I_f - I_{flim}} = K_x \quad (2.26)$$

όπου η σχέση (2.25) τροποποιείται ως εξής:

$$T_E \dot{E}_f = K_E [V_0 - V_c - K_x (I_f - I_{flim})] - E_f \quad (2.27)$$

Επομένως, στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε:

$$E_f = I_f = \frac{K_E}{1 + K_E K_x} (K_x I_{flim} + V_0 - V_c) \quad (2.28)$$

Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εξισώσεις, αν χρησιμοποιήσουμε αναλογικό ρυθμιστή πρέπει να επιβάλλουμε στο ρεύμα διέγερσης μια τιμή λίγο μεγαλύτερη από το επιτρεπόμενο όριο, καθώς έχουμε ένα μόνιμο σφάλμα στην τάση  $E_f$  και άρα στο ρεύμα διέγερσης. Το σφάλμα αυτό αυξάνεται με τον περιορισμό της διέγερσης.

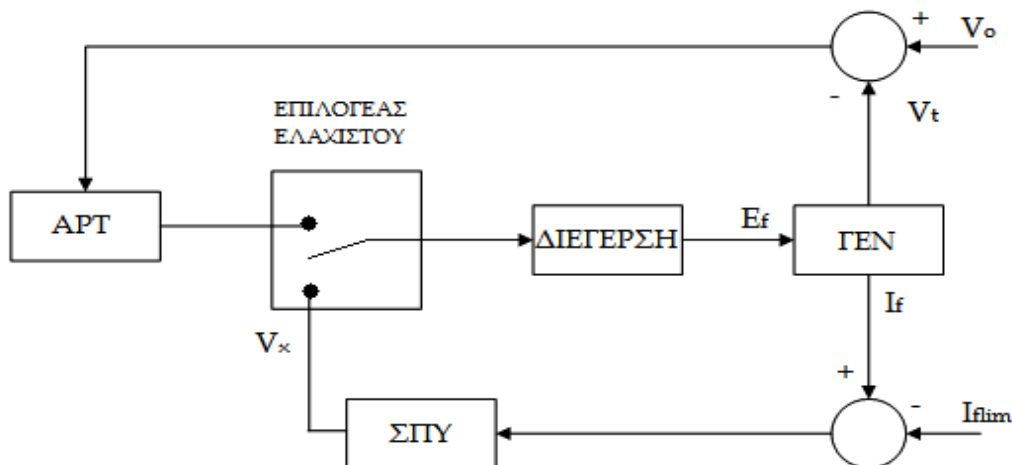
Εναλλακτικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ολοκληρωτικό ρυθμιστή:

$$T \dot{V}_x = E_f - E_{flim} \quad (2.29)$$

όπου στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε  $I_f = I_{flim}$  και προκύπτει:

$$E_f = I_f = K_E (V_0 - V_c) - V_x \quad (2.30)$$

Το δομικό διάγραμμα για το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης διακοπτικού τύπου φαίνεται στο Σχήμα (2.8).



Σχήμα 2.8 ΣΠΥ διακοπτικού τύπου

Στην περίπτωση αυτή, όταν είναι ενεργοποιημένο το ΣΠΥ παρακάμπτουμε τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης. Για να ενεργοποιηθεί το ΣΠΥ η τάση διέγερσης που ζητάει ο ΑΡΤ πρέπει να έχει μία τιμή μεγαλύτερη του επιτρεπτού ορίου ρεύματος διέγερσης,  $E_{f0}$ . Τότε η είσοδος του περιοριστή αλλάζει και αντί για το σφάλμα στην τάση εξόδου, δέχεται ως είσοδο την



έξοδο του ΣΠΥ,  $V_x$ . Η εξίσωση του συστήματος διέγερσης για τη λειτουργία του ΣΠΥ είναι η εξής:

$$T_E \dot{E}_f = (E_{fo} - E_f) - V_x \quad (2.31)$$

Και σε αυτή την περίπτωση έχουμε υλοποίηση του συστήματος με αναλογικό ρυθμιστή όμοιο με αυτόν του ΣΠΥ αθροιστικού τύπου και η σχέση (2.31) γίνεται:

$$T_E \dot{E}_f = (E_{fo} - E_f) - K_x (I_f - I_{flim}) \quad (2.32)$$

Στην περίπτωση ΣΠΥ διακοπτικού τύπου, το κέρδος  $K_x$  πρέπει να έχει μεγάλη τιμή γιατί παρακάμπτεται ο ΑΡΤ.

Στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, όπου  $E_f = I_f$ :

$$I_f - I_{flim} = \frac{E_{fo} - I_{flim}}{K_x + 1} \quad (2.33)$$

δηλαδή το σφάλμα μόνιμης κατάστασης είναι ανάλογο της αρχικής διέγερσης και ανεξάρτητο της πτώσης τάσης.

Μπορούμε κι εδώ να χρησιμοποιήσουμε εναλλακτικά ελεγκτή ΡΙ με ολοκληρωτικό παράγοντα  $x = 1/sT_x$ , με  $T_x$  μια χρονική σταθερά. Τότε θα έχουμε

$$T_x \dot{x} = I_f - I_{flim} \quad (2.34)$$

και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας η σχέση (2.33) γίνεται:

$$E_f = I_f = \frac{E_{fo} + K_x I_{flim} - x}{K_x + 1} \quad (2.35)$$

Όπου φαίνεται ότι το αναλογικό κομμάτι του ελεγκτή περιορίζει το ρεύμα πεδίου εντός ορίων, ενώ το ολοκληρωτικό κομμάτι προσπαθεί να διατηρήσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης κοντά στο μηδέν. Σημειώνουμε ότι απαιτείται μεγάλο κέρδος  $K_x$  ώστε να έχουμε άμεση απόκριση του πεδίου διέγερσης στην περίπτωση αυτή. Ομοίως και η σταθερά χρόνου  $T_x$  οφείλει να έχει μεγάλη τιμή, για λόγους ευστάθειας του συστήματος.

### 2.1.6 Μετασχηματιστές Μεταβλητής Λήψης

Οι μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης (load tap changers, LTC) χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των φορτίων στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και είναι εφοδιασμένοι με μηχανισμό αλλαγής τάσης υπό φορτίο. Επιτυγχάνουν δηλαδή ρύθμιση τάσης στους ζυγούς φορτίων χωρίς διακοπή φορτίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή λήψης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Η αλλαγή λήψης είναι διακριτός μηχανισμός που μεταβάλλεται κατά ένα βήμα τη φορά, όταν η τάση στον ελεγχόμενο ζυγό βγει εκτός προκαθορισμένων ορίων. Θεωρούμε δηλαδή μία νεκρή ζώνη ( $V_{min}, V_{max}$ ) εντός της οποίας η τάση είναι αποδεκτή, και οι μετασχηματιστές λειτουργούν με σταθερή λήψη. Με βάση αυτό, ορίζουμε :

$$\text{μισό εύρος νεκρής ζώνης} \quad d = \frac{V_{max} - V_{min}}{2} \quad (2.36)$$

$$\text{κέντρο νεκρής ζώνης} \quad V_m = \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \quad (2.37)$$

Οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες λειτουργεί το σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) είναι:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (2.38)$$

όπου  $\Delta T_k$  είναι η χρονική καθυστέρηση μεταξύ δύο διαδοχικών αλλαγών του ΣΑΤΥΦ. Η χρονική καθυστέρηση αυτή περιλαμβάνει το χρόνο που απαιτείται για τη μεταβολή της λήψης, το χρόνο απόκρισης του συστήματος στη μεταβολή, καθώς και μία χρονική καθυστέρηση ώστε να αποφεύγεται η άσκοπη ενεργοποίηση του ΣΑΤΥΦ σε περιπτώσεις ταλαντώσεων ή μεταβατικών διαταραχών που αποκαθίστανται χωρίς τη χρήση ΣΑΤΥΦ. Για το λόγο αυτό, στα περισσότερα συστήματα ο χρόνος πρώτης ενεργοποίησης του

ΣΑΤΥΦ διαφέρει από το χρόνο καθυστέρησης μεταξύ διαδοχικών αλλαγών. Κατά την πρώτη ενεργοποίηση, η τάση στο ζυγό φορτίου θα πρέπει να παραμείνει εκτός της νεκρής ζώνης σε όλο το χρονικό διάστημα μέχρι την ενεργοποίηση. Έχουμε λοιπόν

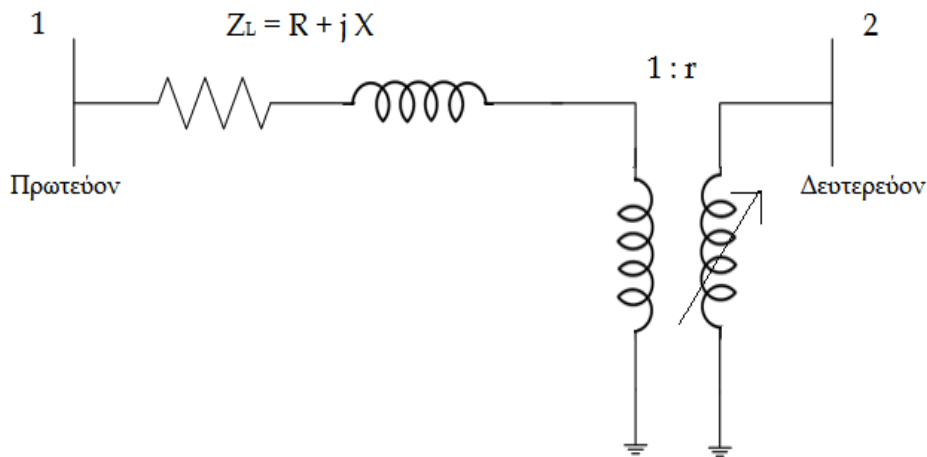
$$\Delta T_k = T_{do} \frac{d}{|V_t - V_m|} + T_{fo} + T_m \quad (2.39)$$

όπου  $T_{do}$  είναι η μέγιστη χρονική καθυστέρηση αντίστροφου χρόνου,  $T_{fo}$  είναι η σταθερή συνιστώσα καθυστέρησης και  $T_m$  είναι ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει η μεταβολή της λήψης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή.

Αν τώρα θεωρήσουμε ως  $\Delta r$  τη μεταβολή της λήψης σε μια χρονική στιγμή και  $r_{min}, r_{max}$  τα όρια λήψης, τότε:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r \leq r_{max}, & V_t > V_m + d \\ r_k - \Delta r \geq r_{min}, & V_t < V_m - d \\ r_k, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.40)$$

Το μονοφασικό ισοδύναμο του μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

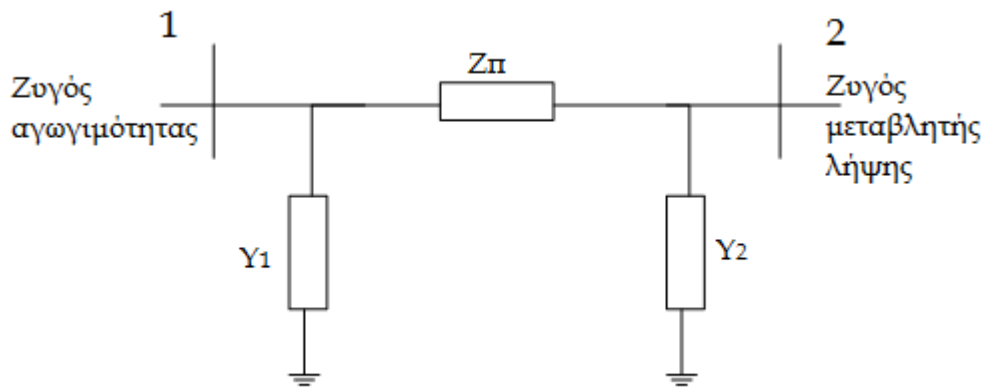


Σχήμα 2.9 Κυκλωματικό ισοδύναμο μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης

Συνηθέστερα, η μεταβλητή λήψη είναι από την πλευρά υψηλής τάσης, όπου το ρεύμα είναι μικρότερο και το τυλίγμα περιέχει περισσότερες σπείρες για ακριβέστερη ρύθμιση

τάσης. Στην εργασία αυτή όμως και στο σύστημα που μελετάται, έχει θεωρηθεί ότι η λήψη είναι από την πλευρά χαμηλής τάσης. Σε κάθε περίπτωση, η τάση που ελέγχεται και ρυθμίζεται είναι αυτή στο ζυγό φορτίου.

Για την ανάλυση του κυκλώματος του μετασχηματιστή χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα π που φαίνεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10 Ισοδύναμο π μετασχηματιστή

Στο κύκλωμα του Σχήματος 2.10 οι παράμετροι που εμφανίζονται έχουν τιμή:

$$Z_{\pi} = rZ_L \quad (2.41)$$

$$Y_1 = \frac{1}{Z_L} \frac{r-1}{r} \quad (2.42)$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_L} \frac{1-r}{r^2} = -\frac{1}{r} Y_1 \quad (2.43)$$

### 2.1.7 Παράσταση Φορτίων

Η συνολική κατανάλωση ισχύος σε ένα ζυγό είναι αποτέλεσμα όλων των συνδεδεμένων σε αυτόν φορτίων. Η στιγμιαία κατανάλωση κάθε φορτίου χωριστά είναι συνάρτηση της τάσης στο ζυγό διασύνδεσης, της συχνότητας του δικτύου και της συνολικής ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος των φορτίων. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, θεωρούμε ότι η συχνότητα του δικτύου είναι σταθερή και δεν επηρεάζει την κατανάλωση ισχύος των

φορτίων. Σε πλήρη περιγραφή, η κατανάλωση ισχύος σε ένα φορτίο προκύπτει από τις σχέσεις:

$$P_L = P(V, z_P) \quad (2.44)$$

$$Q_L = Q(V, z_Q) \quad (2.45)$$

όπου  $z_P, z_Q$  είναι οι μεταβλητές ζήτησης ενεργού και αέργου ισχύος αντιστοίχως.

Το συνηθέστερο μοντέλο φορτίου που χρησιμοποιείται και στην παρούσα ανάλυση, είναι το εκθετικό φορτίο, με γενική μορφή:

$$P_L = z_P P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^a \quad (2.46)$$

$$Q_L = z_Q Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^b \quad (2.47)$$

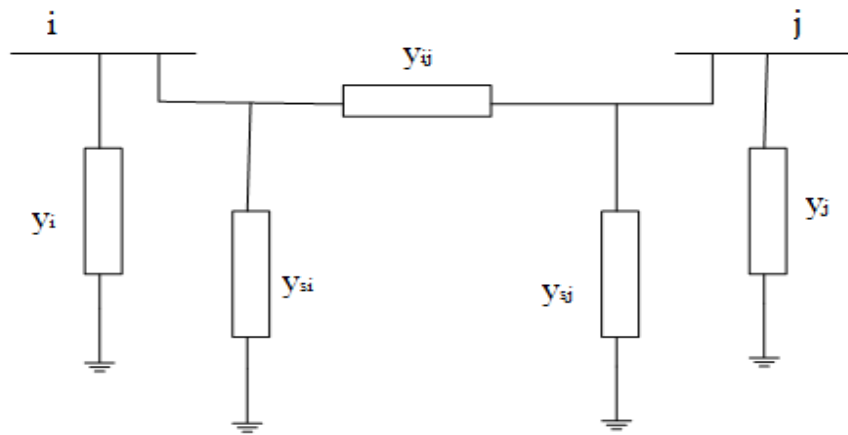
όπου  $a, b$  είναι εκθέτες εξαρτώμενοι από τον τύπο του φορτίου. Για δεδομένες τιμές των  $a, b$  μπορούμε να κατατάξουμε τα εκθετικά φορτία σε:

- $a = b = 0$  φορτία σταθερής ισχύος
- $a = b = 1$  φορτία σταθερού ρεύματος
- $a = b = 2$  φορτία σταθερής αγωγιμότητας

Οι εκθέτες αυτοί καθορίζουν και την ευαισθησία του φορτίου σε μεταβολές της τάσης. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του εκθέτη, τόσο πιο ευαίσθητο είναι το φορτίο σε αυξομειώσεις της τάσης.

### 2.1.8 Εξισώσεις Δικτύου

Ένα τοπικό τμήμα δυο ζυγών ενός ΣΗΕ απεικονίζεται στο Σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11 Σύστημα συνδεδεμένων ζυγών σε ΣΗΕ

Για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούμενο από  $n$  ζυγούς, λαμβάνουμε τις εξισώσεις δικτύου σε μητρική μορφή:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \vdots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & Y_{ij} & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \vdots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

με  $\tilde{I}$  το διάνυσμα εγχόσεων ρεύματος σε κάθε ζυγό,  $\tilde{V}$  το διάνυσμα τάσεων στους ζυγούς και  $Y$  η μήτρα αγωγιμοτήτων του συστήματος με στοιχεία:

$$Y_{ij} = -y_{ij} = Y_{ji} \quad , \quad Y_{ii} = y_i + y_{ij} + y_s$$

όπου  $y_i = g_i + jb_i$  η αγωγιμότητα του στοιχείου.

Αν τα εγγεόμενα ρεύματα είναι γνωστά, τότε πρόκειται για σύστημα  $n$  μιγαδικών εξισώσεων, από το οποίο μπορούμε να προσδιορίσουμε τις τάσεις στους ζυγούς. Επειδή όμως το διάνυσμα  $\tilde{I}$  είναι άγνωστο, θεωρούμε την αντικατάσταση

$$\tilde{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} \quad (2.49)$$

όπου τα  $P, Q$  είναι γνωστά για τους ζυγούς φορτίου, ενώ για τους ζυγούς παραγωγής έχουμε ως δεδομένα τα  $P, V$ . Αντικαθιστώντας και διαχωρίζοντας τις εξισώσεις σε πραγματικά και φανταστικά μέρη, προκύπτουν  $2n$  εξισώσεις για τον προσδιορισμό των

αγνώστων στοιχείων στο συνολικό σύστημα, οι οποίες περιλαμβάνονται στο σύνολο των εξισώσεων (2.2).

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να υλοποιήσουμε το πλήρες μοντέλο για την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση του προγράμματος Simulink Matlab.

### **2.1.9 Προσομοίωση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση του προγράμματος Simulink Matlab**

Με βάση τα προηγούμενα μπορούμε να υλοποιήσουμε το μοντέλο κάθε συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση του προγράμματος Simulink Matlab. Το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε οποιοδήποτε ΣΗΕ με χρήση δύο χρονικών κλιμάκων καθώς συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Έχουμε δηλαδή ένα μοντέλο που προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το πλήρες μοντέλο ενός ΣΗΕ.

Το δίκτυο αναπαριστάται με τις εξισώσεις που περιγράφηκαν στη παράγραφο 2.1.8. Οι γεννήτριες του συστήματος είναι σύγχρονες με 4 τυλίγματα και αναπαριστώνται με βάση το μετασχηματισμό Park και τις εξισώσεις που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1.2. Οι γεννήτριες περιλαμβάνουν αυτόματο ρυθμιστή τάσης, σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης και ρυθμιστή στροφών όπως αυτοί περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.1.3. Συνήθως υλοποιούμε αυτόματο ρυθμιστή τάσης με ολοκληρωτικό παράγοντα (Σχήμα 2.6). Το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης είναι διακοπτικού τύπου με χρήση αναλογικού ρυθμιστή (Σχήμα 2.8 με αντίστοιχη εξίσωση λειτουργίας την (2.32) και εξίσωση ισορροπίας την (2.33) αντίστοιχα). Τα φορτία του συστήματος θεωρείται ότι ακολουθούν το εκθετικό μοντέλο που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.46) και (2.47) που αναφέρονται στην παράγραφο 2.1.7. Τροφοδοτούνται από μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης που μοντελοποιούνται βάσει των εξισώσεων που αναλύονται στην παράγραφο 2.1.6. Τέλος, σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας θεωρούμε ότι έχουμε και πυκνωτές για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.

## 2.2 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

### 2.2.1 Εξισώσεις δυο χρονικών κλιμάκων

Το μοντέλο που περιγράφηκε παραπάνω, αποτελεί τον πληρέστερο τρόπο αναπαράστασης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που το λεπτομερές μοντέλο μπορεί να αντικατασταθεί από ένα απλοποιημένο, για πιο εύκολη ανάλυση του συστήματος. Όταν επιθυμούμε την ανάλυση του συστήματος σε βραχυπρόθεσμη μόνο κλίμακα, μπορούμε να θεωρήσουμε τις μακροπρόθεσμες μεταβλητές σταθερές, και να λάβουμε το απλοποιημένο σύστημα αλγεβρικών - διαφορικών εξισώσεων

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.50)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.51)$$

Το σύστημα αυτό αναφέρεται ως προσεγγιστικό σύστημα ανάλυσης στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα. Αντίθετα, όταν θέλουμε να μελετήσουμε το σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα θεωρούμε τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα έχουν ήδη εξελιχθεί και φτάσει σε ισορροπία. Τότε, το απλοποιημένο μοντέλο μελέτης του συστήματος περιγράφεται από τις εξισώσεις

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.52)$$

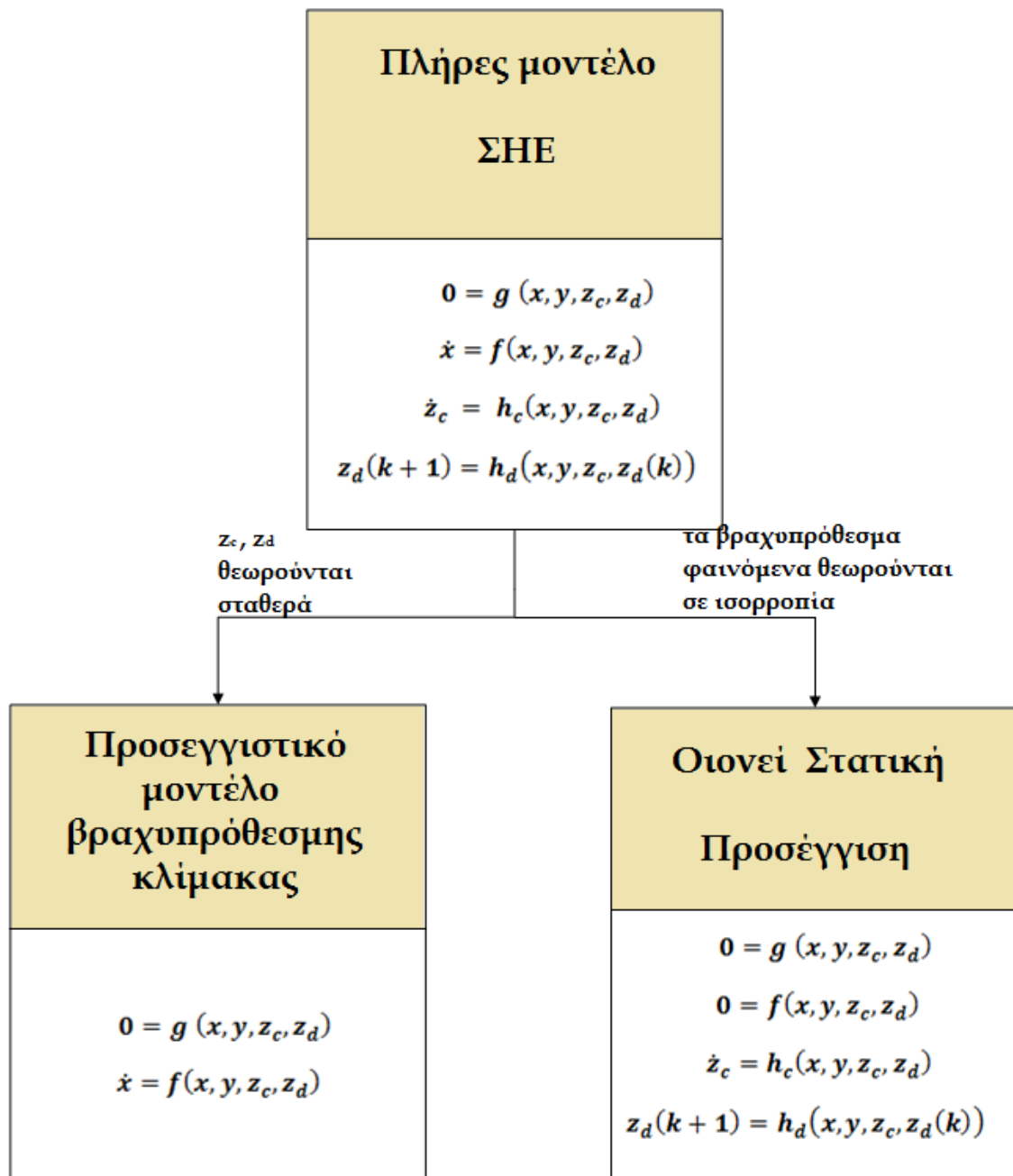
$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.53)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.54)$$

$$\mathbf{z}_d(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(\mathbf{k})) \quad (2.55)$$

και αναφέρεται ως οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα. Συνολικά, τα μοντέλα ανάλυσης συστημάτων φαίνονται στο Σχήμα 2.12.





Σχήμα 2.12 Προσεγγιστικά μοντέλα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η οιονεί στατική προσέγγιση όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αφορά στη χρήση ενός απλούστερου μοντέλου για την ανάλυση των φαινομένων μακροπρόθεσμης κλίμακας, όπου τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας θεωρείται ότι είναι σε ισορροπία.

Για την ανάλυση του συστήματος με τη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούμε τα μοντέλα που περιγράφηκαν προηγουμένως για τις γεννήτριες, τα συστήματα προστασίας, τους

μετασχηματιστές και τα φορτία. Αναλυτικά, οι αλλαγές που προκύπτουν με αυτή τη μέθοδο ανάλυσης διατυπώνονται στη συνέχεια.

Θεωρούμε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με  $N$  ζυγούς φορτίου,  $G$  ζυγούς παραγωγής και ένα ζυγό αναφοράς. Ποιοτικά οι εξισώσεις που προκύπτουν από το μοντέλο οιονεί στατικής προσέγγισης για το σύστημα είναι:

### *Εξισώσεις ισορροπίας για τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας*

Όσον αφορά τους ζυγούς φορτίου, έχουμε  $2N+1$  αλγεβρικές μεταβλητές που απαρτίζονται από:

$N$  μέτρα τάσεων  $V$  για όλους τους ζυγούς,  $N$  φασικές γωνίες των τάσεων όλων των ζυγών και τη συχνότητα  $\omega_{\text{sys}}$  του συστήματος.

Από τη ροή φορτίου για κάθε ζυγό χωριστά προκύπτουν οι εξισώσεις του δικτύου όπως περιγράφηκαν παραπάνω, σε μητρική μορφή:

$$\tilde{I} = Y\tilde{V} \quad (2.56)$$

και διαχωρίζονται με βάση τη σχέση (2.49) σε εξισώσεις έγχυσης ενεργού και αέργου ισχύος. Επομένως, οι εξισώσεις ισορροπίας περιλαμβάνουν  $N$  εξισώσεις ενεργού ισχύος και  $N$  εξισώσεις αέργου ισχύος για το σύστημα με βάση αυτό το διαχωρισμό. Συμπληρωματικά, για την επίλυση των εξισώσεων πρέπει να υπολογίσουμε όλες τις φασικές γωνίες των τάσεων του συστήματος με κοινή αναφορά. Θεωρούμε λοιπόν για το ζυγό αναφοράς του συστήματος:

$$V_r = V_r^0 \quad (2.57)$$

$$\theta_r = 0 \quad (2.58)$$

Όσον αφορά τις γεννήτριες του συστήματος, οι μεταβλητές κατάστασης είναι η ΗΕΔ διέγερσης,  $E_f$ , η μεταβατική ΗΕΔ,  $E_q$  και η γωνία του δρομέα,  $\delta$ , με τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας από τη ροή φορτίου για τους  $G$  ζυγούς γεννητριών.

Προκύπτουν δηλαδή συνολικά  $2N+3G+1$  εξισώσεις ισορροπίας.

Αν αμελήσουμε τον κορεσμό της γεννήτριας προκύπτει ότι  $E_f = E_q$ , οπότε η μία μεταβλητή απαλείφεται. Συμπληρωματικά, αν θεωρήσουμε ότι τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα έχουν έρθει σε ισορροπία και ο APT είναι σε ισορροπία καθώς οι τάσεις στους ζυγούς γεννητριών έχουν αποκατασταθεί εντός επιτρεπών ορίων, μπορούμε να

αμελήσουμε και την  $E_q$ . Και τελικά, προκύπτει μία μόνο εξίσωση ισορροπίας για τους ζυγούς παραγωγής που περιλαμβάνει τη γωνία δρομέα  $\delta$ .

Επομένως, με τη μείωση των μεταβλητών κατάστασης προκύπτουν  $2N+G+1$  εξισώσεις ισορροπίας για το σύστημα.

### *Εξισώσεις μακροπρόθεσμων φαινομένων*

Στις εξισώσεις ισορροπίας που περιγράφηκαν παραπάνω πρέπει να προσθέσουμε και τις διαφορικές εξισώσεις που προκύπτουν από τα μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Οι μεταβλητές κατάστασης στην περίπτωση αυτή είναι:

Μία μεταβλητή κατάστασης για κάθε γεννήτρια που δηλώνει την ενεργοποίηση ή μη του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης. Όσο η γεννήτρια λειτουργεί με ΗΕΔ διέγερσης εντός επιτρεπτών ορίων, οι διαταραχές στα επίπεδα τάσης εξόδου είναι φαινόμενα που εντάσσονται στις εξισώσεις ισορροπίας βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Όταν όμως το ρεύμα διέγερσης ξεπεράσει το επιτρεπτό όριο και ενεργοποιηθεί το ΣΠΥ, η δυναμική αυτή συμπεριφορά εντάσσεται πλέον στη μακροπρόθεσμη κλίμακα.

Οι λόγοι μετασχηματισμού των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης,  $r$ . Από εδώ προκύπτουν ισάριθμες εξισώσεις με το σύνολο των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης του συστήματος.

Οι παραπάνω μεταβλητές είναι διακριτές και εντάσσονται σε εξισώσεις διαφορών που συμπεριλαμβάνονται στο συνολικό μοντέλο της οιονεί στατικής ανάλυσης.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, έχει αναπτυχθεί το απλοποιημένο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την ανάλυση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση του προγράμματος *Wpstab*.

### **2.2.2 Προσομοίωση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση του προγράμματος *Wpstab***

Με χρήση των εξισώσεων που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα υλοποιούμε στο *Wpstab* κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρόγραμμα αυτό προσομοιώνουμε οποιοδήποτε ΣΗΕ με χρήση του μοντέλου της οιονεί στατικής ανάλυσης, στη

μακροπρόθεσμη δηλαδή χρονική κλίμακα. Πρόκειται για ένα μοντέλο αρκετά απλοποιημένο σε σχέση με το πλήρες.

Για τις σύγχρονες γεννήτριες του συστήματος χρησιμοποιείται το μοντέλο τρίτης τάξης. Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης μπορεί να είναι είτε αναλογικός είτε ολοκληρωτικός. Για την υλοποίηση του χρησιμοποιούμε την αντίστοιχη εξίσωση ισορροπίας (2.21) ή (2.24). Το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης μπορεί να είναι κάποιο από τα μοντέλα που αναλύθηκαν στην παράγραφο 2.1.5 με τις αντίστοιχες διαφορικές εξισώσεις για τη λειτουργία του. Στη μακροπρόθεσμη κλίμακα οι μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης ακολουθούν το μοντέλο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1.6 και περιγράφονται από τις αντίστοιχες εξισώσεις διαφορών. Τέλος τα φορτία του συστήματος είναι εκθετικά.

Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις και εξισώσεις διαφορών των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή σε διακριτές μεταβλητές (ή σε παραμέτρους του συστήματος).

### 3. ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζουμε αναλυτικά το σύστημα δοκιμών Nordic32 που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση και των δύο μεθόδων ανάλυσης ΣΗΕ. Παρουσιάζουμε τη δομή του συστήματος, τα στοιχεία που το αποτελούν, τα δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος στο σύστημα καθώς και τις επιμέρους τροποποιήσεις που χρειάστηκε να πραγματοποιηθούν για την ανάλυση του συστήματος με τις μεθόδους που περιγράφηκαν προηγουμένως.

#### 3.1 Περιγραφή Συστήματος Δοκιμών

Όπως έχει ήδη διατυπωθεί, ζητούμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό έχουμε θεωρήσει ένα δεδομένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο και αναλύουμε με κάθε μοντέλο προσομοίωσης χωριστά και συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Πρόκειται για το σύστημα δοκιμών Nordic32 που περιγράφεται αναλυτικά στο [8]. Το σύστημα φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Περιλαμβάνει 52 ζυγούς υπερυψηλής και υψηλής τάσης, 19 σύγχρονες γεννήτριες και έναν σύγχρονο πυκνωτή. Οι ζυγοί μέσης τάσης δεν φαίνονται στο σχήμα για λόγους σαφήνειας. Πρόκειται για 22 ζυγούς φορτίου συνοδευόμενους από μετασχηματιστές διανομής. Έχουμε θεωρήσει αναπαράσταση των φορτίων με χρήση του εκθετικού μοντέλου για την εξάρτηση των φορτίων από την τάση, με εκθέτες  $a = 1$  για την ενεργό ισχύ και  $b = 2$  για την άεργο ισχύ, όπως διατυπώθηκε και στην παράγραφο 2.1.7.

Όσον αφορά τις γεννήτριες του συστήματος, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, με χρήση αυτόματου ρυθμιστή τάσης ολοκληρωτικού τύπου (Σχήμα 2.6) που στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται από σταθερή τάση

$$V = V_{ref} \quad (3.1)$$

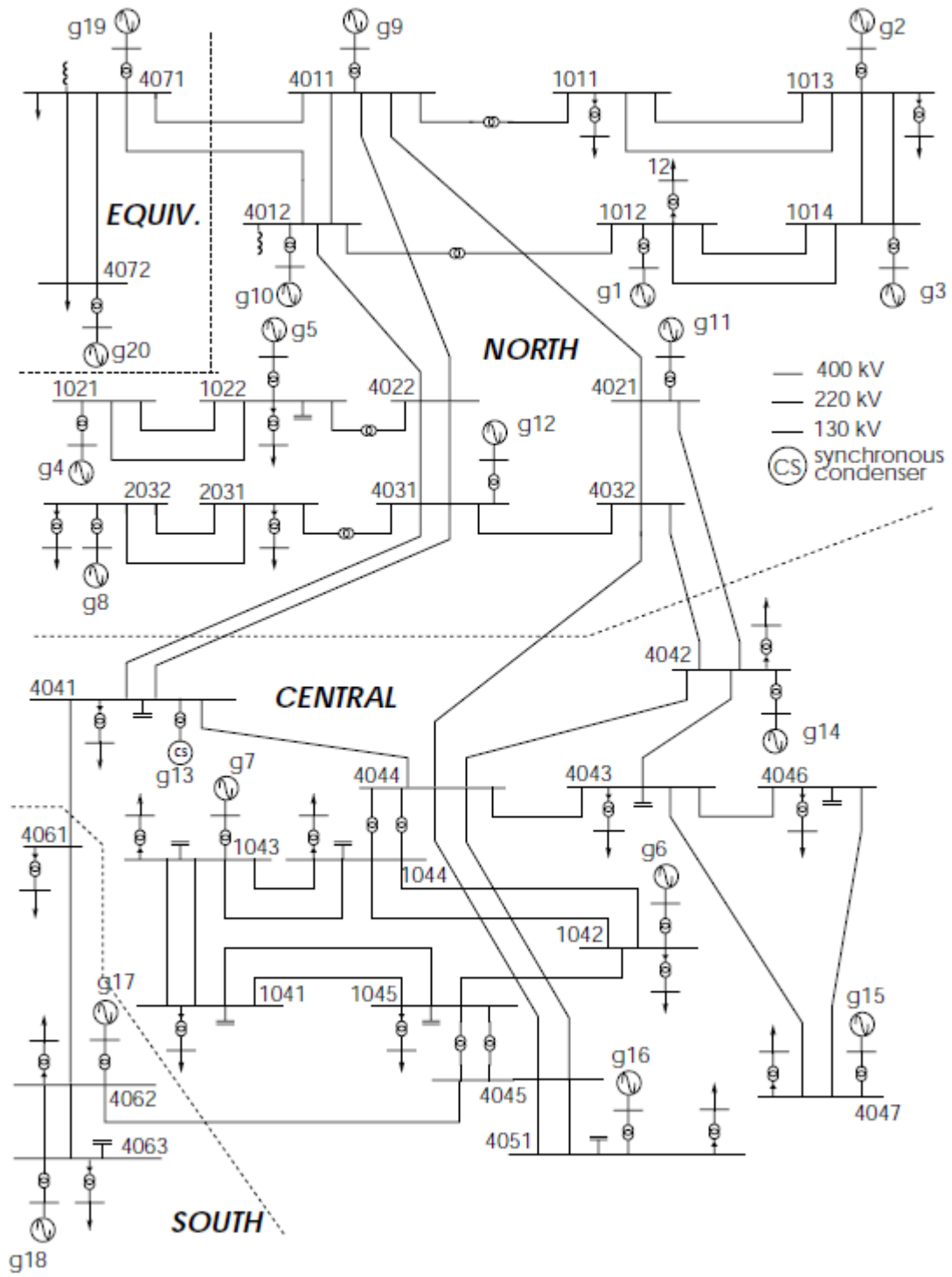
Το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης είναι διακοπτικού τύπου με αναλογικό ρυθμιστή (Σχήμα 2.8) και στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας έχουμε, με βάση τη σχέση (2.33),

$$I_f - I_{flim} = \frac{E_{fo} - I_{flim}}{K_x + 1} \quad (3.2)$$

Για τους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης έχουμε χρησιμοποιήσει το μοντέλο που περιγράφηκε στην παράγραφο 2.1.6. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μετασχηματιστές δεν είναι ταυτοχρονισμένοι, ώστε να έχουμε όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Έχουμε χρησιμοποιήσει δηλαδή διαφορετικούς χρόνους καθυστέρησης πρώτης και επόμενης ενεργοποίησης αλλαγής λήψης σε κάθε ΣΑΤΥΦ. Τα δεδομένα των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.1:

**Πίνακας 3.1** Δεδομένα Μετασχηματιστών Μεταβλητής Λήψης

Ζυγός	Χρονική καθυστέρηση σε $s$ στην πρώτη ενεργοποίηση ( $Td_1$ )	Χρονική καθυστέρηση σε $s$ σε κάθε επόμενη ενεργοποίηση ( $Td_2$ )
1011	30	8
1012	30	9
1013	30	10
1022	30	11
1041	30	12
1042	31	8
1043	32	9
1044	33	10
1045	34	11
2031	30	12
2032	30	8
4041	35	9
4042	36	10
4043	37	11
4046	38	12
4047	39	8
4051	30	9
4061	30	10
4062	30	11
4063	30	12
4071	30	9
4072	30	11



Σχήμα 3.1 Σύστημα δοκιμών Nordic32

## 3.2 Επίπεδα φόρτισης

Για το σύστημα Nordic32 που περιγράφηκε παραπάνω, έχουμε θεωρήσει τρεις διαφορετικές περιπτώσεις.

Στην πρώτη περίπτωση (*case1*) έχουμε θεωρήσει αρκετά μεγάλο επίπεδο φόρτισης ώστε η διαταραχή που εξετάζεται να προκαλεί έντονη αστάθεια τάσης. Το συνολικό φορτίο του συστήματος ανέρχεται στα  $10940MW / 3689MVAR$ , και στην κεντρική περιοχή του συστήματος είναι κατά προσέγγιση  $6070MW/2145MVAR$ .

Στην δεύτερη περίπτωση (*case2*) έχουμε θεωρήσει μικρότερη φόρτιση του συστήματος, αρκετή όμως για να προκαλέσει και πάλι κατάρρευση. Το φορτίο στην κεντρική περιοχή (*central area*) μειώνεται κατά  $240MW/80MVAR$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η διαταραχή που εξετάζεται να προκαλεί οριακή αστάθεια στο σύστημα.

Τέλος, στην τρίτη περίπτωση (*case 3*) έχουμε ακόμα πιο χαμηλή φόρτιση του συστήματος με μείωση του φορτίου στην κεντρική περιοχή κατά  $30MW/10MVAR$  ακόμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μηχανισμοί αποκατάστασης να επαναφέρουν το σύστημα σε ευσταθές σημείο λειτουργίας, μετά τη διαταραχή. Για τον λόγο αυτό, δεν θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική με την τρίτη περίπτωση, η οποία αναλύεται στο [8], αλλά με τις δύο προηγούμενες που παρουσιάζουν έντονη και οριακή αστάθεια αντίστοιχα.



### 3.3 Επιμέρους Δεδομένα Συστήματος στα Μοντέλα Προσομοίωσης

Στην ενότητα 3.1, δόθηκε μια γενική περιγραφή του συστήματος που αναλύθηκε από τα δύο προγράμματα. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήσαμε και αναφέρθηκαν προηγουμένως είναι κοινά και για τα δύο μοντέλα προσομοίωσης. Ειδικότερα όμως, μπορούμε να επισημάνουμε κάποιες τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα δεδομένα του συστήματος και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

➤ Χρειάστηκε να τροποποιήσουμε ελαφρώς τα όρια τάσης διέγερσης σε ορισμένες από τις γεννήτριες του συστήματος στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης στο Wpstab. Ο λόγος είναι ότι στο Simulink η προσομοίωση του μοντέλου και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται σε μικρό χρονικά βήμα, που ορίζεται αυτόματα από τη μέθοδο αριθμητικής ολοκλήρωσης και είναι μικρότερο από  $10^{-3}s$ , ενώ στο Wpstab με βήμα 1sec. Αυτό συνεπάγεται, ότι οι αλλαγές που εκτελούνται στο σύστημα κατά τη διάρκεια ενός δευτερολέπτου δεν είναι ορατές στην ανάλυση του συστήματος με το Wpstab, σε αντίθεση με το μοντέλο του Simulink. Στο Simulink δηλαδή είναι πιθανό η τάση διέγερσης να ξεπεράσει τα όρια φόρτισης και να επανέλθει εντός ορίων σε διάστημα ενός δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης στην αντίστοιχη γεννήτρια. Αντιθέτως στο μοντέλο οιονεί στατικής προσέγγισης το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης δε θα ενεργοποιηθεί την ίδια χρονική στιγμή επειδή η μεταβατική υπερδιέγερση δεν γίνεται αντιληπτή. Έτσι προσαρμόζονται τα δεδομένα για να έχουμε περίπου ταυτοχρονισμένη λειτουργία των περιοριστών υπερδιέγερσης στα δύο μοντέλα.

Βέβαια, δεδομένου ότι στο μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων συμπεριλαμβάνουμε στην ανάλυση του συστήματος και τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα, μπορεί να έχουμε ταχύτερη ή βραδύτερη ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης σε σχέση με το απλοποιημένο μοντέλο, φαινόμενο που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι διορθώσεις που έγιναν στο όριο υπερδιέγερσης, φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2 Όρια τάσης διέγερσης που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο μοντέλα

Γεννήτρια	Όριο τάσης διέγερσης Eflim που χρησιμοποιήθηκε στο πλήρες μοντέλο (Simulink)	Όριο τάσης διέγερσης Eflim που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο οιονεί στατικής ανάλυσης (Wpstab)
g1	1.6799	1.6799
g2	1.6799	1.6799
g3	1.6799	1.6799
g4	1.6799	1.6799
<b>g5</b>	<b>1.9000</b>	<b>1.8930</b>
<b>g6</b>	<b>2.7844</b>	<b>2.8130</b>
<b>g7</b>	<b>3.0500</b>	<b>3.0489</b>
g8	1.6799	1.6799
g9	1.6799	1.6799
g10	1.6799	1.6799
g11	1.6799	1.6799
<b>g12</b>	<b>1.8000</b>	<b>1.7830</b>
g13	2.5500	2.5500
<b>g14</b>	<b>2.8400</b>	<b>2.8500</b>
<b>g15</b>	<b>2.7844</b>	<b>2.7704</b>
<b>g16</b>	<b>2.7844</b>	<b>2.7662</b>
g17	2.7844	2.7844
g18	2.7844	2.7844
g19	1.6799	1.6799

➤ Μια δεύτερη διόρθωση που έγινε στα δεδομένα του συστήματος, αφορά και πάλι στις διαφορές των προγραμμάτων προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν. Αφορά στους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης, οι οποίοι ως μετασχηματιστές διανομής προς το φορτίο, έχουν μηδενική αντίσταση σκεδάσεως και έχουν υλοποιηθεί με αυτό τον τρόπο στο μοντέλο του Simulink. Δεδομένου όμως ότι στο Wpstab η μηδενική αντίσταση μιας διασύνδεσης δεν είναι αποδεκτή στην εκτέλεση αριθμητικών πράξεων, βάσει των σχέσεων (2.42), (2.43), σε όλους τους μετασχηματιστές διανομής έχουμε θεωρήσει μια πολύ μικρή επαγωγική αντίδραση της τάξης του  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  αμ ώστε να είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε μετασχηματιστή παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3 Τιμές αντίδρασης μετασχηματιστών διανομής στο Wpstab

Ζυγός διασύνδεσης μετασχηματιστή διανομής με φορτίο	Τιμή αντίδρασης που έχουμε εισάγει στο wpstab (pu)
1011	0.0010
1012	0.0010
1013	0.0010
1022	0.0010
1041	0.0010
1042	0.0001
1043	0.0001
1044	0.0001
1045	0.0001
2031	0.0010
2032	0.0010
4041	0.0001
4042	0.0001
4043	0.0001
4046	0.0001
4047	0.0001
4051	0.0001
4061	0.0001
4062	0.0001
4063	0.0001
4071	0.0001
4072	0.0001

Εισάγοντας τις αντιδράσεις του Πίνακα 3.3 στους μετασχηματιστές διανομής του συστήματος, ουσιαστικά έχουμε εισάγει και μία κατανάλωση αέργου ισχύος. Αποτέλεσμα αυτού είναι να αλλάξει και η συνολική άεργος ισχύς που παρέχεται στα φορτία του συστήματος. Πρέπει δηλαδή να διορθώσουμε ανάλογα και την παρεχόμενη στα φορτία άεργο ισχύ. Η απώλεια αέργου ισχύος σε κάθε κλάδο δίνεται από τη σχέση :

$$Q_{κατ} = XI^2 \quad (3.1)$$

και δεδομένου ότι η τάση στους ζυγούς διανομής θεωρείται περίπου ίση με 1αμ προκύπτει ότι η τελική άεργος ισχύς προς το φορτίο είναι περίπου

$$Q_{φορτίου} = Q_{αρχικό} - XS^2 \quad (3.2)$$

Τα δεδομένα αέργου ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε πρόγραμμα για την παρεχόμενη ισχύ στα φορτία συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.4 και για τα δύο επίπεδα φόρτισης που μελετώνται.

**Πίνακας 3.4** Διόρθωση αέργου ισχύος για την ανάλυση του συστήματος με χρήση του προγράμματος Wpstab

Ζυγός στον οποίο συνδέεται το φορτίο	Άεργος ισχύς φορτίου από δεδομένα συστήματος (MVAR)	Άεργος ισχύς φορτίου μετά τη διόρθωση (MVAR)	Άεργος ισχύς φορτίου από δεδομένα συστήματος (MVAR)	Άεργος ισχύς φορτίου μετά τη διόρθωση (MVAR)
	Case 1		Case 2	
1011	80.000	79.536	80.000	79.536
1012	100.000	99.000	100.000	99.000
1013	40.000	39.884	40.000	39.884
1022	95.000	94.126	95.000	94.126
1041	200.000	196.000	186.667	186.319
1042	80.000	79.904	53.333	53.279
1043	100.000	99.937	86.667	86.623
1044	300.000	299.270	286.667	286.007
1045	250.000	249.448	236.667	236.175
2031	30.000	29.891	30.000	29.891
2032	50.000	49.575	50.000	49.575
4041	160.000	159.683	160.000	159.683
4042	149.400	149.218	149.400	149.218
4043	303.200	302.298	303.200	302.298
4046	250.000	249.448	250.000	249.448
4047	50.000	49.988	50.000	49.988
4051	302.400	301.669	302.400	301.669
4061	149.000	148.728	149.000	148.728
4062	100.000	99.900	100.000	99.900
4063	300.000	299.562	300.000	299.562
4071	100.000	99.900	100.000	99.900
4072	500.000	495.750	500.000	495.750

## 4. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ ΤΑΣΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφουμε το ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης, που έχει χρησιμοποιηθεί στο σύστημα που μελετάμε και όπως αναφέρθηκε προηγουμένως βασίζεται στη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης. Πρόκειται για τοπική ανίχνευση αστάθειας τάσης σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και αναφέρεται ως Local Identification of Voltage Emergency Situations (LIVES). Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της μεθόδου η οποία αναλύεται λεπτομερέστερα στο [4], καθώς και κάποια παραδείγματα του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου στο σύστημα Nordic32 που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία.

Το ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας παρέχει τοπική και αυτόνομη προστασία απέναντι στην αστάθεια τάσης. Η προστασία μπορεί να ενσωματωθεί στον ελεγκτή κάθε μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης. Το σύστημα προστασίας θα ανιχνεύσει την επικείμενη αστάθεια τάσης και θα εφαρμόσει τα απαραίτητα μέτρα για την αποκατάσταση της ευσταθούς λειτουργίας ρυθμίζοντας το επίπεδο τάσης στους μετασχηματιστές. Το σύστημα αποτελείται από τρεις διακριτές λειτουργίες οι οποίες τρέχουν ταυτόχρονα. Αυτές είναι:

- *LIVES-alarm* : ανίχνευση αστάθειας τάσης,
- *LIVES-restore* : επαναφορά ευστάθειας με αντίστροφη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ, εφόσον ενεργοποιηθεί η LIVES alarm, και
- *LTC control range restoration* : αποκατάσταση ζώνης ελέγχου των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, μετά την εξάντληση του λόγου μετασχηματισμού.

### 4.1 Συναγερμός (LIVES-Alarm)

Η μέθοδος ανίχνευσης (LIVES) βασίζεται στην μέτρηση της τάσης δευτερεύοντος των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης. Ενσωματώνεται εύκολα στη λογική λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ και χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που της παρέχονται από αυτό, την ονομαστική τάση δευτερεύοντος, το εύρος ζώνης και τη χρονική καθυστέρηση για την αλλαγή λήψης. Για να αρχίσει η ανίχνευση αστάθειας τάσης πρέπει το ΣΑΤΥΦ να είναι σε λειτουργία και η τάση που ελέγχει να βρίσκεται κάτω από το κατώτατο όριο της

νεκρής ζώνης. Αυτό ελέγχεται την πρώτη φορά που η τάση παραμένει εκτός ορίου μετά από αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού. Πρακτικά δηλαδή η LIVES αρχικοποιείται εκ νέου κάθε φορά που η τάση δευτερεύοντος αποκατασταθεί εντός ορίων και απενεργοποιείται όταν το ΣΑΤΥΦ εξαντλήσει τον συνολικό αριθμό βημάτων λήψης.

Η πρακτική διαδικασία που ακολουθείται βασίζεται κυρίως στη χρήση ενός κινητού μέσου όρου τάσης δευτερεύοντος σε κάθε ΣΑΤΥΦ. Ο κινητός μέσος όρος προκύπτει από τη σχέση

$$\bar{V}_i(t_j) = \frac{1}{n_i} \sum_{k=0}^{n_i-1} V_i(t_j - k\Delta t) \quad (4.1)$$

Όπου  $\Delta t$  είναι ο χρόνος δειγματοληψίας της μέτρησης και  $n_i$  ο αριθμός των δειγμάτων με βάση τα οποία υπολογίζεται ο κινητός μέσος. Ο κινητός μέσος όρος ανανεώνεται κάθε  $t_j = j\Delta t$ .

Σαν χρονική περίοδο υπολογισμού του μέσου όρου έχουμε θεωρήσει το χρόνο καθυστέρησης του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ. Με την παραδοχή αυτή εξασφαλίζουμε ότι κατά τον υπολογισμό του κινητού μέσου όρου θα έχει γίνει μία μόνο αλλαγή λήψης στο μετασχηματιστή. Αν δεν έχουμε ακριβώς μία αλλαγή λήψης σε κάθε μετασχηματιστή αλλά παραπάνω ή λιγότερες τότε η ανίχνευση αστάθειας τάσης δεν θα είναι απόλυτα ακριβής. Η τάση στο ζυγό (κινητός μέσος) υπολογίζεται πριν την αλλαγή λήψης στον μετασχηματιστή και λαμβάνεται σαν αναφορά.

Με βάση τα προηγούμενα, παρατηρούμε ότι μετά από κάθε αλλαγή λήψης στο μετασχηματιστή, ο κινητός μέσος όρος θα διαφοροποιείται ακολουθώντας τη σχέση

$$\bar{V}_i(kT_i) - \bar{V}_i(kT_i - \Delta t) = \frac{1}{n_i} [V_i(kT_i) - V_i(kT_i - T_i)] = \frac{1}{n_i} \Delta V_i^k \quad (4.2)$$

όπου  $T_i$  είναι ο χρόνος καθυστέρησης του ΣΑΤΥΦ και  $\Delta V_i^k = V_i(kT_i) - V_i(kT_i - T_i)$ , είναι η μεταβολή της τάσης πριν και μετά την αλλαγή του ΣΑΤΥΦ.

Μια ικανή συνθήκη ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος είναι η εξής

$$\Delta V_i^k = V_i(kT_i) - V_i(kT_i - T_i) > 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

Όπως περιγράφεται στα [4,5], αν μετά τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και την αλλαγή λήψης η τάση στον αντίστοιχο ρυθμιζόμενο ζυγό αυξηθεί και προσεγγίσει περισσότερο το κάτω όριο νεκρής ζώνης, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σύστημα οδηγείται σε ευσταθές σημείο λειτουργίας. Συνδυάζοντας τις (4.2) και (4.3) καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ικανή συνθήκη ευστάθειας είναι η αύξηση του κινητού μέσου όρου μετά από αλλαγή λήψης στον αντίστοιχο μετασχηματιστή

$$\bar{V}_i(kT_i) - \bar{V}_i(kT_i - \Delta t) > 0 \quad (4.4)$$

Συμπερασματικά, όταν ο κινητός μέσος όρος αυξάνεται μετά από αλλαγή λήψης έχουμε μια ένδειξη ευστάθειας στο σύστημα, ενώ όταν μειώνεται μπορούμε να υποθέσουμε αστάθεια τάσης. Για λόγους ασφαλείας όμως, δεν ενεργοποιείται συναγερμός κατευθείαν, αλλά αφήνουμε ένα χρονικό διάστημα ανάλογο της περιόδου λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ να περάσει πριν το σήμα συναγερμού. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, παρακολουθείται η συμπεριφορά του κινητού μέσου όρου.

Συνολικά, η λειτουργία της LIVES-alarm είναι η ακόλουθη:

- Αν κατά το χρόνο παρακολούθησης ο κινητός μέσος όρος αυξηθεί σε σχέση με την τιμή αναφοράς, ο μετρητής μηδενίζεται αμέσως και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή μετά την επόμενη αλλαγή λήψης
- αν ο κινητός μέσος όρος παραμένει μικρότερος από την τιμή αναφοράς για ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο της χρονικής καθυστέρησης του ΣΑΤΥΦ, τότε σημαίνει συναγερμός και ξεκινά η λειτουργία της LIVES restore που αναλύεται στη συνέχεια.

## 4.2 Αποκατάσταση Περιοχής Ελέγχου ΣΑΤΥΦ (LTC control range restoration)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η λειτουργία σήμανσης συναγερμού γίνεται σε κάθε ΣΑΤΥΦ χωριστά και χρησιμοποιεί δεδομένα που είναι ήδη διαθέσιμα στον ελεγκτή του μετασχηματιστή. Είναι επομένως απαραίτητη για τη λειτουργία του συστήματος προστασίας, η επαναφορά των ΣΑΤΥΦ, όταν τα τελευταία εξαντλήσουν τις μεταβλητές τους λήψεις. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση της λειτουργίας αποκατάστασης της περιοχής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ (LTC range restoration), η οποία εκτελεί τον παρακάτω αλγόριθμο, [5], που τρέχει παράλληλα με τις λειτουργίες LIVES alarm και restore:

- Αν τη χρονική στιγμή  $t_k = kT_i$ , με την αλλαγή λόγου μετασχηματισμού η σχέση μας φτάσει στο όριο και η τάση δευτερεύοντος παραμείνει εκτός νεκρής ζώνης, θεωρούμε ως αναφορά τον κινητό μέσο όρο που υπολογίζεται τη στιγμή  $t_k$ .
- Αν ο κινητός μέσος όρος τη χρονική στιγμή  $t = t_k + T_i$  (όπου  $t = t_k + T_i$  ο χρόνος επόμενης κίνησης του ΣΑΤΥΦ), είναι κάτω από την τιμή αναφοράς που υποθέσαμε προηγουμένως, τότε η τάση αναφοράς στο ζυγό μειώνεται κατά 5%. Διαφορετικά, αν ο κινητός μέσος όρος είναι πάνω από την τιμή αναφοράς, η τρέχουσα τιμή του αποθηκεύεται ως αναφορά και επαναλαμβάνεται η διαδικασία την επόμενη χρονική στιγμή.
- Η διαδικασία σταματά όταν η τάση δευτερεύοντος επανέλθει εντός ορίων ή πραγματοποιηθούν δυο συνολικά μειώσεις της τάσης αναφοράς.

Ο σκοπός αυτού του αλγορίθμου είναι να παραμένει ενεργό το ΣΑΤΥΦ ώστε να μπορούμε να ανιχνεύσουμε και να διορθώσουμε την όποια αστάθεια στο σύστημα. Βέβαια η μείωση της τάσης αναφοράς στο ζυγό φορτίου είναι έμμεσος τρόπος αποκοπής φορτίου, κάτι το οποίο όμως θα γινόταν ούτως ή άλλως μετά την εξάντληση βημάτων στο λόγο μετασχηματισμού, και μάλιστα με μη ελέγξιμο τρόπο.

### 4.3 Αποκατάσταση Ευστάθειας (LIVES-Restore)

Μετά τη σήμανση συναγερμού και την εκδήλωση αστάθειας τάσης σε ένα ζυγό φορτίου, οι αλλαγές λήψης που θα πραγματοποιηθούν για να επαναφέρουν την τάση στο ζυγό φορτίου, θα επιφέρουν το αντίθετο αποτέλεσμα, δηλαδή η τάση στο ζυγό θα μειωθεί κι άλλο και θα προκαλέσει πτώση τάσης και σε άλλους ζυγούς πέραν του ελεγχόμενου. Γι' αυτό το λόγο, η επαναφορά τάσης στο ζυγό επιτυγχάνεται με αντίστροφη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ, δηλαδή εκτελώντας μια σειρά από αλλαγές εις όφελος της τάσης στο πρωτεύον των μετασχηματιστών. Με τον τρόπο αυτό, η τάση στο ζυγό φορτίου θα αυξηθεί, καθώς αλλάζει το πρόσημο της σχέσης (4.3).

Η αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ θα συνεχιστεί μέχρι να αποκατασταθεί η ευστάθεια τάσης στο σύστημα. Αυτό όμως δεν μπορεί να ελεγχθεί μέσα από τις αλλαγές της τάσης του δευτερεύοντος, γιατί η συνθήκη ευσταθούς λειτουργίας (4.3) προέκυψε με την υπόθεση ότι όλες οι αλλαγές γίνονται προς την ίδια κατεύθυνση σε όλους τους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης του συστήματος. Εμείς όμως, αντιστρέφουμε τη λειτουργία μόνο στα ΣΑΤΥΦ που έχει σημαίνει συναγερμός και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.



Επομένως, όταν κάποιο ΣΑΤΥΦ αντιστρέφει τη λειτουργία του το σφάλμα θεωρείται ότι μειώνεται όταν η τάση πρωτεύοντος αρχίσει να αυξάνεται. Και για τον μετασχηματιστή αυτό, η αντίστοιχη συνθήκη ευσταθούς λειτουργίας τροποποιείται ως εξής

$$\Delta V_{Ai}^k = V_{Ai}(kT_i) - V_{Ai}(kT_i - T_i) > 0, i \in A \quad (4.5)$$

όπου  $V_{Ai}$  είναι η τάση πρωτεύοντος, και  $A$  είναι το σύνολο των ΣΑΤΥΦ που έχουν αντιστρέψει τη λειτουργία τους μετά τη σήμανση συναγερμού.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι ο έλεγχος της τάσης πρωτεύοντος δεν είναι απόλυτα ακριβής ως ένδειξη ευσταθούς λειτουργίας στο σύστημα. Μετά όμως από την αποκατάσταση, η LIVES-alarm είναι και πάλι διαθέσιμη για την εποπτεία της ευστάθειας του συστήματος, επομένως σε περίπτωση μη αποκατάστασης ισορροπίας μπορεί να ενεργοποιηθεί εκ νέου.

Ομοίως με τη λειτουργία της LIVES-alarm, έτσι και εδώ χρησιμοποιούμε τον κινητό μέσο όρο της τάσης πρωτεύοντος για να ελέγξουμε την ισχύ της συνθήκης (4.5).

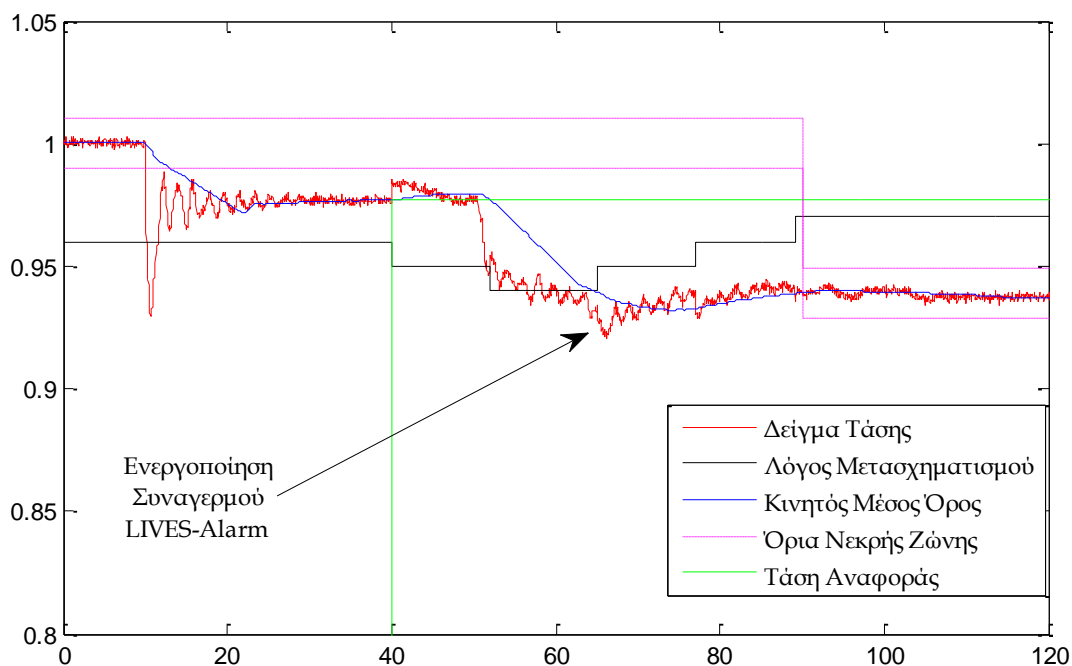
Συνολικά, ο αλγόριθμος της λειτουργίας LIVES-restore είναι ο εξής:

- Μετά τη σήμανση συναγερμού η πρώτη ανάστροφη αλλαγή λήψης αγνοείται
- Στην επόμενη αλλαγή λήψης η τάση του πρωτεύοντος ακριβώς πριν αποθηκεύεται ως αναφορά
- Σε κάθε επόμενη αλλαγή λήψης η τιμή της τάσης συγκρίνεται με την τάση αναφοράς και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη (4.5)
- Εφόσον ικανοποιηθεί η συνθήκη, η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ τερματίζεται και δεν έχουμε επόμενη αλλαγή λήψης. Ταυτόχρονα, αν η τάση δευτερεύοντος εξακολουθεί να είναι εκτός της νεκρής ζώνης, τότε η τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου όρου γίνεται το μέσο της νεκρής ζώνης.

## 4.4 Παράδειγμα λειτουργίας της LIVES στο σύστημα δοκιμών Nordic32

Παρουσιάζουμε στη συνέχεια, ένα παράδειγμα λειτουργίας του συστήματος προστασίας από κατάρρευση, στο σύστημα Nordic32 που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Κάνοντας χρήση του προγράμματος Matlab Simulink θεωρούμε μεγάλη φόρτιση του συστήματος (case1) και υποθέτουμε ως διαταραχή την απώλεια της γραμμής 4032 - 4044. Έχουμε ενεργοποιήσει την προστασία του συστήματος, και μετά τη διαταραχή, που εφαρμόζεται σε χρόνο  $t=10\text{ s}$ , παρατηρούμε την τάση δευτερεύοντος στο ζυγό 1041 του συστήματος που φαίνεται στο Σχήμα 4.1.

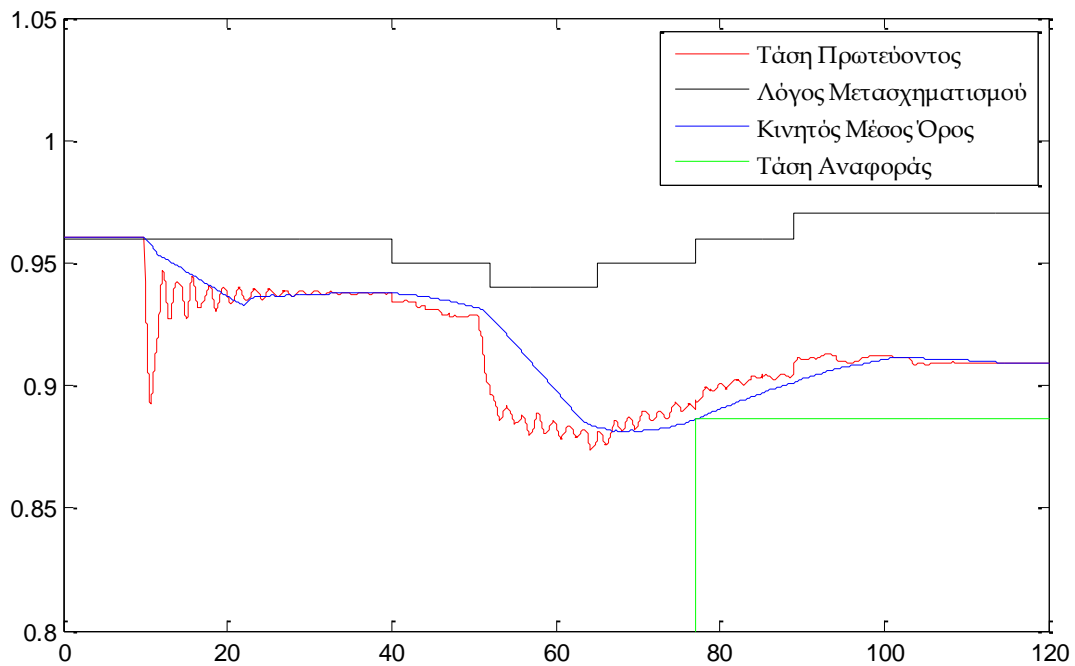


Σχήμα 4.1 Τάση δευτερεύοντος, κινητός μέσος όρος, τάση αναφοράς, όρια τάσης και λόγος μετασχηματισμού του ζυγού 1041 με ενεργοποίηση της LIVES

Ο συναγερμός ενεργοποιήθηκε στο ζυγό τη χρονική στιγμή  $t = 63.95\text{ s}$ .

Παρατηρούμε ότι η τάση στο ζυγό μειώθηκε εκτός της νεκρής ζώνης απευθείας μετά τη διαταραχή, σε χρόνο  $t = 10\text{ s}$  περίπου. Η χρονική καθυστέρηση για την έναρξη λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και την πρώτη αλλαγή λόγου μετασχηματισμού στο ζυγό είναι  $30\text{ s}$ , με αποτέλεσμα σε χρόνο  $t = 40\text{ s}$  να εκτελείται η πρώτη αλλαγή λήψης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1. Ο κινητός μέσος όρος τη δεδομένη χρονική στιγμή είναι εκτός της νεκρής ζώνης και η τιμή ακριβώς πριν την αλλαγή λήψης αποθηκεύεται ως τάση αναφοράς. Κατά το χρονικό διάστημα μέχρι την επόμενη αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού, ο κινητός μέσος όρος παρακολουθείται, και επειδή υπερβαίνει την τάση αναφοράς η ανίχνευση αναστέλλεται. Η επόμενη αλλαγή λήψης πραγματοποιείται σε χρόνο  $t = 52\text{ s}$ , καθώς ο χρόνος καθυστέρησης επόμενης ενεργοποίησης στο ΣΑΤΥΦ είναι ορισμένος στα  $12\text{ s}$ . Όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 4.1 ο κινητός μέσος όρος βρίσκεται διαρκώς κάτω από την τάση αναφοράς κατά το χρονικό διάστημα αυτό. Επομένως, σε χρόνο  $t = 63.95\text{ s}$ , ακριβώς πριν την επόμενη αλλαγή λήψης που θα γινόταν για  $t = 64\text{ s}$ , σημαίνει συναγερμός για έναρξη της λειτουργίας αποκατάστασης τάσης, καθότι ο κινητός μέσος όρος εξακολουθεί να μειώνεται. Με το συναγερμό ενεργοποιείται η LIVES restore, επομένως σε χρόνο  $t = 64\text{ s}$  που εκτελείται η επόμενη αλλαγή λήψης, αυτή διενεργείται προς την αντίθετη κατεύθυνση, αυξάνοντας το λόγο μετασχηματισμού. Για τη λειτουργία αποκατάστασης ευστάθειας, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.3, χρησιμοποιούμε την τάση πρωτεύοντος του αντίστοιχου ΣΑΤΥΦ που φαίνεται μαζί με τον αντίστοιχο κινητό μέσο όρο στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί. Όπως παρατηρούμε κάθε επόμενη αλλαγή λήψης εκτελείται προς αύξηση του λόγου μετασχηματισμού και κατ' επέκταση της τάσης δευτερεύοντος και πρωτεύοντος του μετασχηματιστή.

Σε χρόνο  $t = 64\text{ s}$  εκτελείται η πρώτη αντίστροφη αλλαγή λήψης, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κινητού μέσου όρου (στο πρωτεύον). Δεδομένου ότι η πρώτη αλλαγή αγνοείται, αφήνουμε μία περίοδο λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ. Στην επόμενη αλλαγή λήψης, για  $t = 76\text{ s}$ , η τάση στο ζυγό του πρωτεύοντος, ακριβώς πριν την αλλαγή λήψης, λαμβάνεται ως αναφορά  $V_r$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2. Η τιμή της τάσης τη δεδομένη χρονική στιγμή στο πρωτεύον είναι κάτω από τη νεκρή ζώνη παρά την έναρξη ανάστροφης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ. Προχωράμε στην επόμενη αλλαγή λήψης τη χρονική στιγμή  $t = 88\text{ s}$ , όπου διαπιστώνουμε ότι η τιμή της τάσης πρωτεύοντος είναι μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς  $V_r$ . Εφόσον η τάση στο πρωτεύον αυξάνεται, η σχέση (4.5) ικανοποιείται και θεωρείται ότι επιτεύχθηκε η αποκατάσταση ευστάθειας στο σύστημα. Επομένως δεν έχουμε επόμενη αλλαγή λήψης στο ΣΑΤΥΦ. Παράλληλα, δεδομένου ότι η τάση δευτερεύοντος δεν έχει επανέλθει εντός της νεκρής ζώνης, η τρέχουσα τιμή του κινητού μέσου όρου του δευτερεύοντος γίνεται το μέσο της νεκρής ζώνης, λίγα δευτερόλεπτα μετά την τελευταία αλλαγή λήψης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1. Με αυτή τη μετατόπιση της νεκρής ζώνης ολοκληρώνεται η λειτουργία της LIVES-restore και παρατηρούμε ότι η τάση στο ζυγό αποκαταστάθηκε επιτυχώς με έμμεση αποκοπή φορτίου.



**Σχήμα 4.2** Τάση πρωτεύοντος, κινητός μέσος όρος, τάση αναφοράς, όρια τάσης και λόγος μετασχηματισμού του ζυγού 1041 με ενεργοποίηση της LIVES

Μπορούμε λοιπόν συνολικά να παρατηρήσουμε ότι η μέθοδος προστασίας από κατάρρευση τάσης, LIVES, αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο για την ανίχνευση αλλά και την αποκατάσταση ευστάθειας τάσης σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

## 5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το σύστημα δοκιμών Nordic32 που αναλύθηκε παραπάνω προσομοιώθηκε με χρήση των δύο προγραμμάτων προσομοίωσης Wpstab και Matlab Simulink, για δύο επίπεδα φόρτισης. Σε κάθε περίπτωση, η διαταραχή που επιβάλλουμε στο σύστημα είναι η απώλεια της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς 4032 και 4044 σε χρόνο  $t = 10$  s. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για κάθε περίπτωση χωριστά.

### 5.1 Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια

Στην πρώτη περίπτωση που έχουμε μεγαλύτερη φόρτιση του συστήματος, όπως διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 3, η διαταραχή που προσομοιώνεται τείνει να οδηγήσει σε κατάρρευση του συστήματος, αφού οδηγεί το σύστημα σε αστάθεια σε πολύ μικρό χρόνο.

Προσομοιώνοντας το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων στο Simulink το σύστημα καταρρέει σε χρόνο 102s ενώ με το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης, Wpstab, σε χρόνο 93s.

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η απόκριση του συστήματος είναι όμοια σε γενικές γραμμές και με τις δύο μεθόδους προσομοίωσης του συστήματος. Ειδικότερα, υπάρχουν κάποιες διαφορές, που οφείλονται στη διαφορετική προσέγγιση του κάθε προγράμματος:

- Στο μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων είναι εμφανείς οι ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που εκτελεί το σύστημα κατά τη διαταραχή, καθώς προσομοιώνονται τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας.
- Στις αποκρίσεις του μοντέλου της οιονεί στατικής προσέγγισης έχουμε θεωρήσει τα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα σε ισορροπία με αποτέλεσμα να υπάρχουν διακριτές μεταβάσεις από το ένα σημείο ισορροπίας στο άλλο. Δηλαδή στο μοντέλο επιλύονται συνεχώς οι εξισώσεις μακροπρόθεσμης κλίμακας ώστε να βρεθεί κάθε χρονική στιγμή το νέο σημείο ισορροπίας. Στην οιονεί στατική προσέγγιση έχουμε θεωρήσει χρονικό βήμα  $t = 1$  s για την επίλυση των εξισώσεων.
- Στο απλοποιημένο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης, το σύστημα καταρρέει σε μικρότερο χρόνο από ότι στο πιο λεπτομερές μοντέλο. Αυτό είναι

αναμενόμενο, καθώς στο απλοποιημένο μοντέλο τα φαινόμενα που μελετάμε είναι μόνο αυτά της μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας, ενώ θεωρούμε τα βραχυπρόθεσμα σε ισορροπία, κάτι που δεν ισχύει όταν το σύστημα βρίσκεται σε οριακές καταστάσεις.

➤ Η οιονεί στατική μέθοδος προτρέπει στην απόκριση του συστήματος γιατί προβλέπει και προεξοφλεί το σημείο ισορροπίας αμέσως μόλις γίνει η διαταραχή, ενώ το πραγματικό σύστημα (και η προσομοίωση δύο χρονικών κλιμάκων που το προσεγγίζει) χρειάζεται κάποιο χρόνο μέχρι να αποκαταστήσει την ισορροπία. Η απόκλιση αυτή γίνεται εντονότερη όταν το σύστημα πλησιάζει σε κατάρρευση γιατί τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα δεν είναι πλέον τόσο γρήγορα. Έτσι η οιονεί στατική μέθοδος προαναγγέλει την κατάρρευση νωρίτερα από την προσομοίωση δύο χρονικών κλιμάκων.

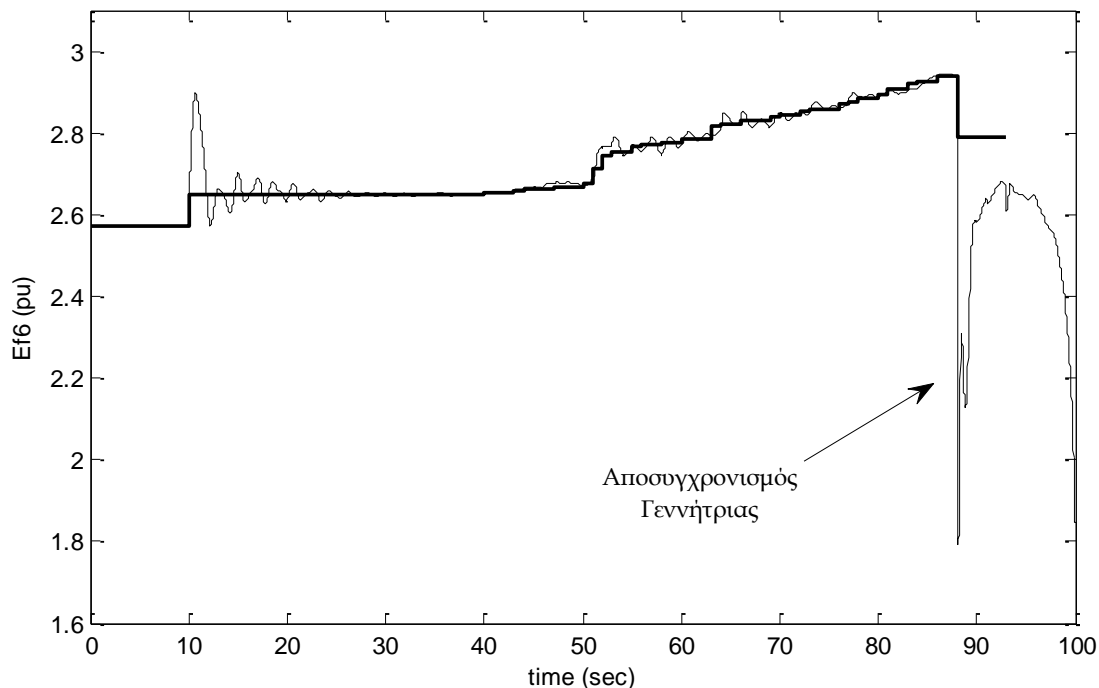
Δεδομένου ότι εξετάζουμε τη σύγκλιση των δύο μεθόδων στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, οφείλουμε να παρατηρήσουμε τη λειτουργία των μηχανισμών της αντίστοιχης χρονικής κλίμακας. Ένας τέτοιος μηχανισμός είναι η λειτουργία του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών. Ο χρόνος στον οποίο ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτός για τις γεννήτριες που βρίσκονται σε υπερδιέγερση σε κάθε μέθοδο προσομοίωσης φαίνεται στον Πίνακα 5.1:

**Πίνακας 5.1** Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης γεννητριών(case1)

Γεννήτριες συστήματος όπου ενεργοποιείται στο σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ)	Χρόνος ενεργοποίησης στο πλήρες μοντέλο (Simulink) (s)	Χρόνος ενεργοποίησης στο μοντέλο οιονεί στατικής προσέγγισης (Wpstab) (s)
g5	34.36	34.00
g7	50.49	50.00
g14	51.00	51.00
g15	52.68	52.00
g12	55.20	55.00
g16	63.81	63.00
g6	88.00	88.00

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1, το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης ενεργοποιείται περίπου στον ίδιο χρόνο και με τις δύο μεθόδους προσομοίωσης για όλες τις γεννήτριες. Η μικρή διαφορά που παρατηρείται οφείλεται στη χρονική ακρίβεια κάθε προγράμματος. Αναλυτικότερα, στα Σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζουμε τις αποκρίσεις της τάσης διέγερσης για τις γεννήτριες g6 και g14 του συστήματος αντίστοιχα.

Σημειώνουμε ότι στα σχήματα που ακολουθούν χρησιμοποιείται η σύμβαση η έντονα μαυρισμένη γραμμή να αντιστοιχεί στα αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος με το Wpstab και η άλλη γραμμή να αντιστοιχεί στην προσομοίωση του πλήρους μοντέλου με το Simulink.



Σχήμα 5.1 Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g6

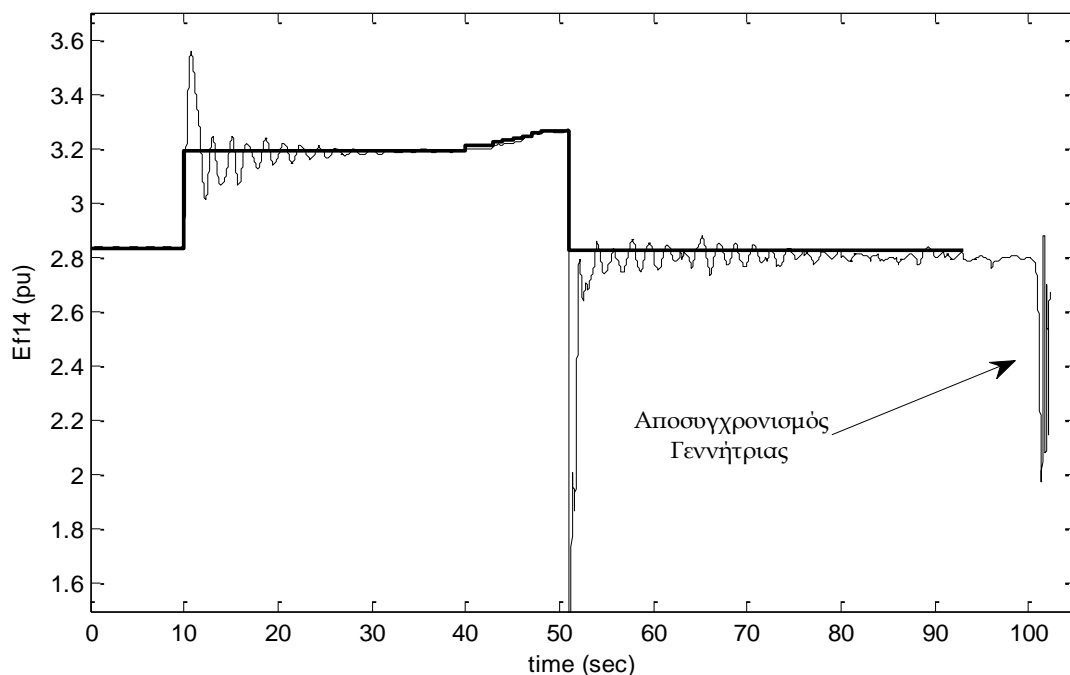
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, η συμπεριφορά της γεννήτριας g6 είναι ίδια στις δύο προσομοιώσεις, και το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης ενεργοποιείται σχεδόν ταυτόχρονα. Οι ταλαντώσεις που φαίνονται στην απόκριση του πλήρους μοντέλου, οφείλονται στις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις οι οποίες όπως είπαμε δεν λαμβάνονται υπ' όψιν στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης.

Μετά την κατάρρευση, παρατηρούμε ότι σε χρόνο  $t = 100\text{ s}$  η γεννήτρια αποσυγχρονίζεται, γι' αυτό και η ΗΕΔ διέγερσης μεταβάλλεται ημιτονοειδώς καθώς η γωνία αυξάνει πέρα από τις  $360^\circ$ . Αυτό δεν είναι ορατό στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης, καθώς ο αποσυγχρονισμός εμφανίζεται ως αδυναμία επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας σε χρόνο  $t = 93\text{ s}$ .

Όμοια απόκριση έχει και η γεννήτρια g12 (Σχήμα 5.2) του συστήματος, η οποία όμως έχει πιο ομαλή συμπεριφορά καθώς δε βρίσκεται στην κεντρική περιοχή του συστήματος όπου η αστάθεια είναι περισσότερο έντονη. Βλέπουμε πάλι τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις ως κύρια διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο μοντέλα προσομοίωσης. Εδώ παρατηρούμε και μία μικρή απόκλιση στη μέση τιμή τάσης διέγερσης, στο τμήμα από  $t = 50\text{ s}$  έως

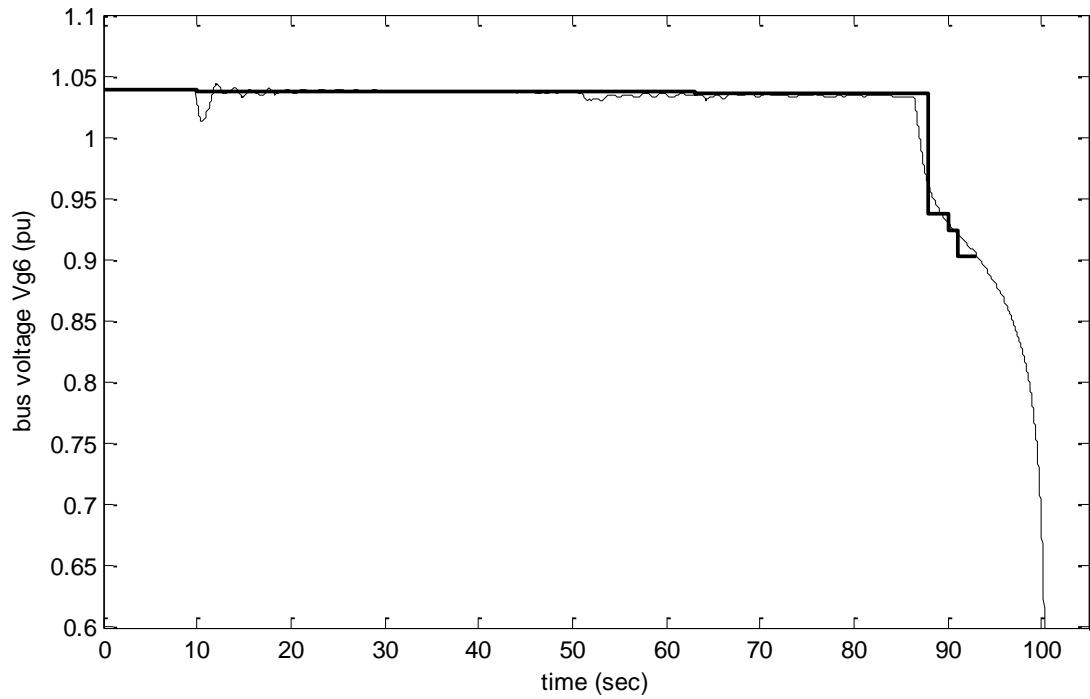
$t = 100$  s. Στο χρόνο αυτό, έχει ενεργοποιηθεί το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης της γεννήτριας, καθώς η τάση διέγερσης έχει υπερβεί το ανώτατο όριο. Έτσι η τάση διέγερσης ρυθμίζεται κοντά στο άνω όριο για προστασία του δρομέα της γεννήτριας. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.3 όπου αναλύσαμε το σύστημα Nordic32, έχουμε κάνει μία διόρθωση στα όρια υπερδιέγερσης κάποιων γεννητριών ώστε να επιτύχουμε ταυτόχρονη λειτουργία των περιοριστών υπερδιέγερσης στα δύο προγράμματα. Επομένως, η μέση τιμή της ΗΕΔ μετά την υπερδιέγερση, παρουσιάζει μία απόκλιση μικρή ανάμεσα στα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Και εδώ είναι εμφανής ο αποσυγχρονισμός της γεννήτριας σε χρόνο  $t = 90$  s. Οι τερματικές τάσεις των γεννητριών ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.3 και 5.4. Η απότομη πτώση τάσης στο ζυγό της γεννήτριας  $g_6$  (Σχήμα 5.3) σε χρόνο 88s είναι εμφανής στα αποτελέσματα του Wpstab καθώς έχουμε διακριτό βήμα. Παρακολουθώντας την απόκριση της τάσης της γεννήτριας  $g_{14}$  (Σχήμα 5.4) παρατηρούμε ότι σε χρόνο  $t = 92$  s η τιμή τάσης που υπολογίζεται στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης με την τελευταία επίλυση των εξισώσεων είναι η τιμή στην οποία καταλήγει το μοντέλο του Simulink λίγα δευτερόλεπτα αργότερα. Πρακτικά δηλαδή παρατηρούμε ότι με την επίλυση των εξισώσεων και τα δυο μοντέλα καταλήγουν στο ίδιο σημείο ισορροπίας, απλά το πλήρες μοντέλο περιγράφει επίσης τα επιμέρους βραχυπρόθεσμα φαινόμενα.

Στα Σχήματα 5.5 έως 5.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την τάση στους ζυγούς της κεντρικής περιοχής του συστήματος (central area) όπου η αστάθεια λόγω της διαταραχής είναι πιο έντονη.

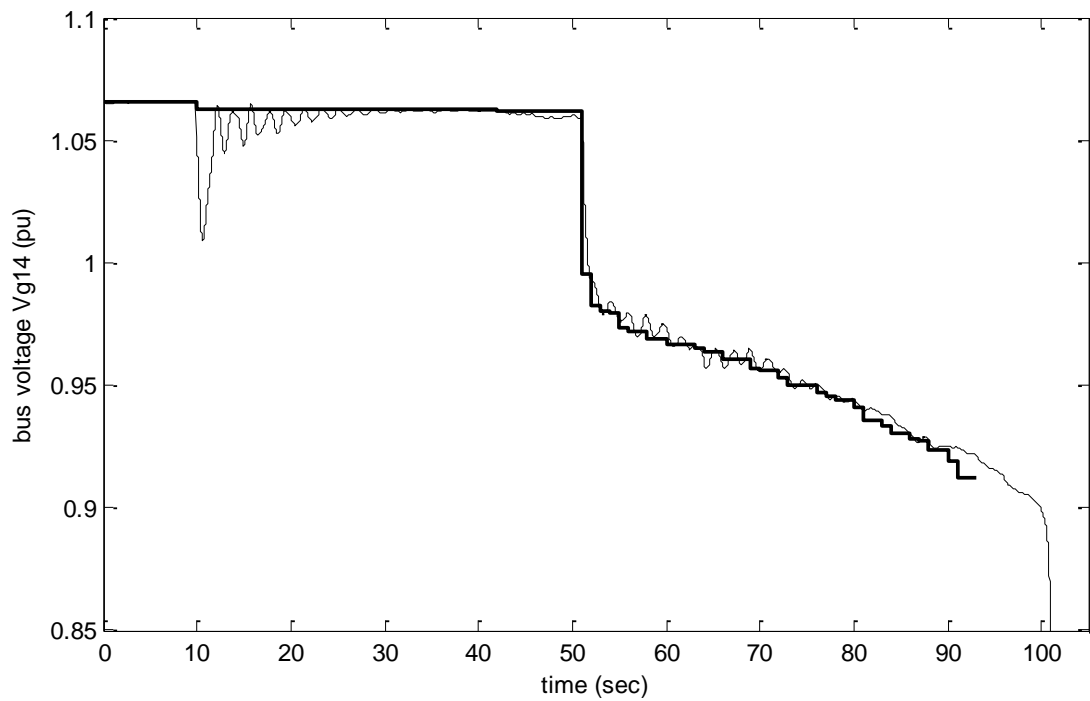


Σχήμα 5.2 Τάση Διέγερσης Γεννήτριας  $g_{14}$



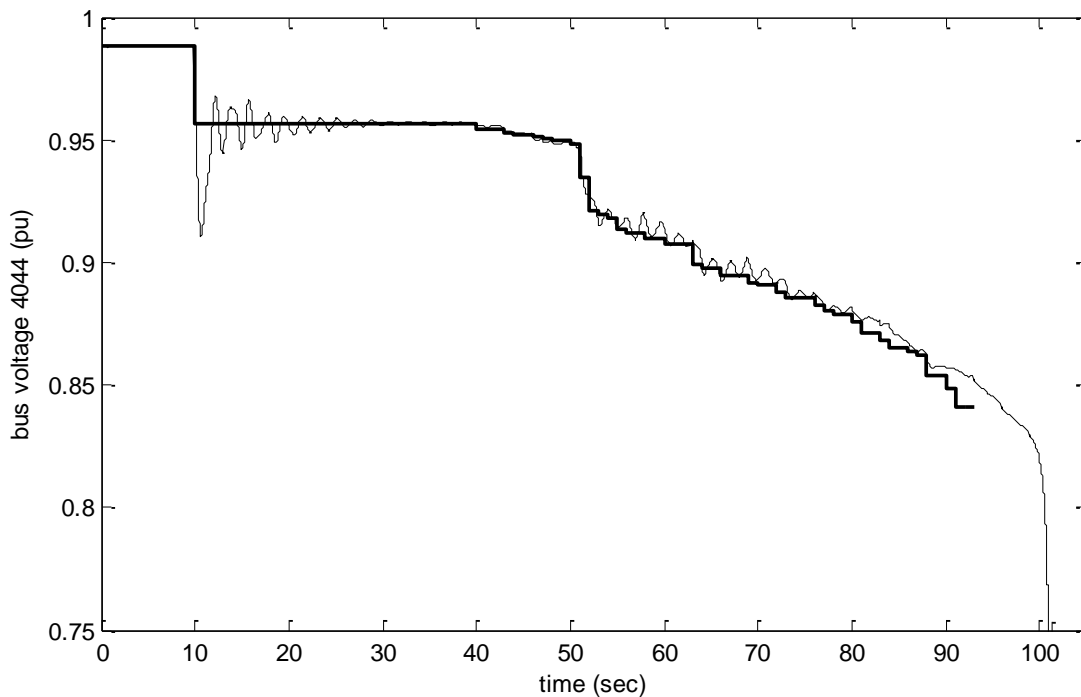


Σχήμα 5.3 Τερματική Τάση γεννήτριας g6

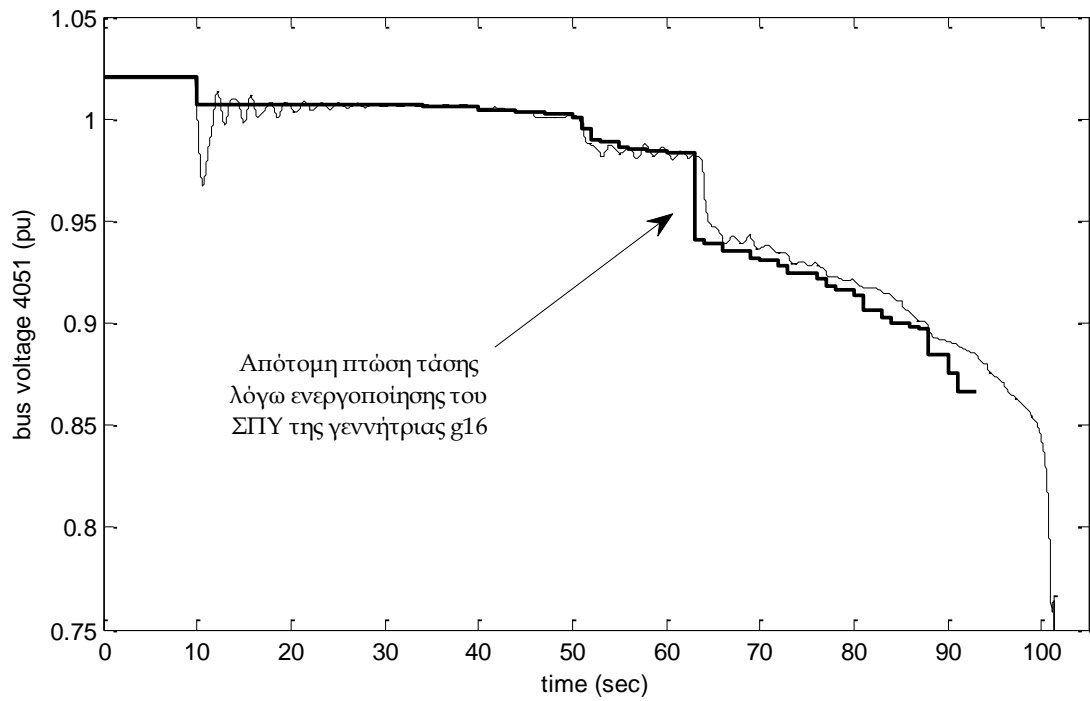


Σχήμα 5.4 Τερματική Τάση γεννήτριας g14

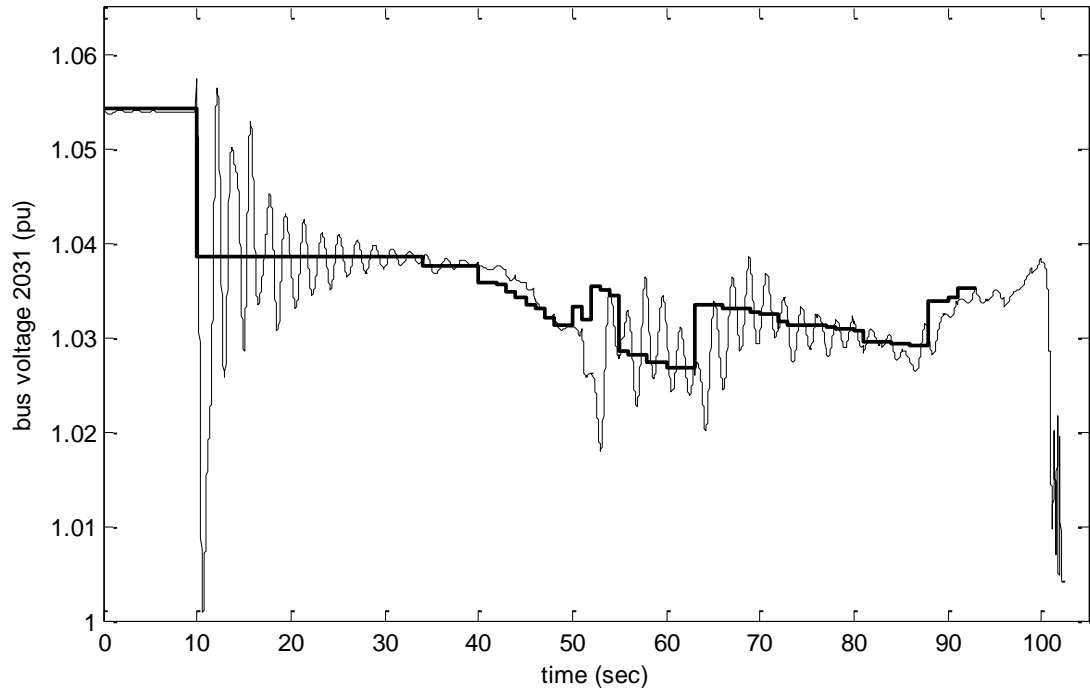
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι με το Wpstab έχουμε τα ίδια αποτελέσματα στην επίλυση των εξισώσεων για την εύρεση νέου βραχυπρόθεσμου σημείου ισορροπίας. Η τάση σε όλους τους ζυγούς είναι ίδια σε κάθε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας και με τα δύο προγράμματα. Στο Σχήμα 5.5 συγκεκριμένα που εμφανίζεται η τάση στο ζυγό 4044 της κεντρικής περιοχής του συστήματος είναι εμφανής η ομοιότητα στην απόκριση των δύο προγραμμάτων. Στο ζυγό 4051 (Σχήμα 5.6) που βρίσκεται μεν στην κεντρική περιοχή αλλά είναι απομακρυσμένος από τη διαταραχή παρατηρούμε ότι σε χρόνο  $t = 63 \text{ s}$  έχουμε μία απότομη πτώση τάσης, η οποία στο μοντέλο του Simulink γίνεται 1s αργότερα. Αυτή η απόκλιση οφείλεται στη γεννήτρια g16 που βρίσκεται στο ζυγό αυτό. Η πτώση τάσης οφείλεται στο σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης της γεννήτριας που ενεργοποιείται εκείνη τη χρονική στιγμή με απόκλιση περίπου 1s στα δύο προγράμματα. Στο ζυγό 2031 (Σχήμα 5.7) που βρίσκεται εκτός της κεντρικής περιοχής, η τάση παρουσιάζει μια σχετική σταθερότητα με πολλές ταλαντώσεις στο πλήρες μοντέλο, ενώ το προσεγγιστικό ακολουθεί με σχετική ακρίβεια τη μέση τιμή.



Σχήμα 5.5 Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4044



Σχήμα 5.6 Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4051

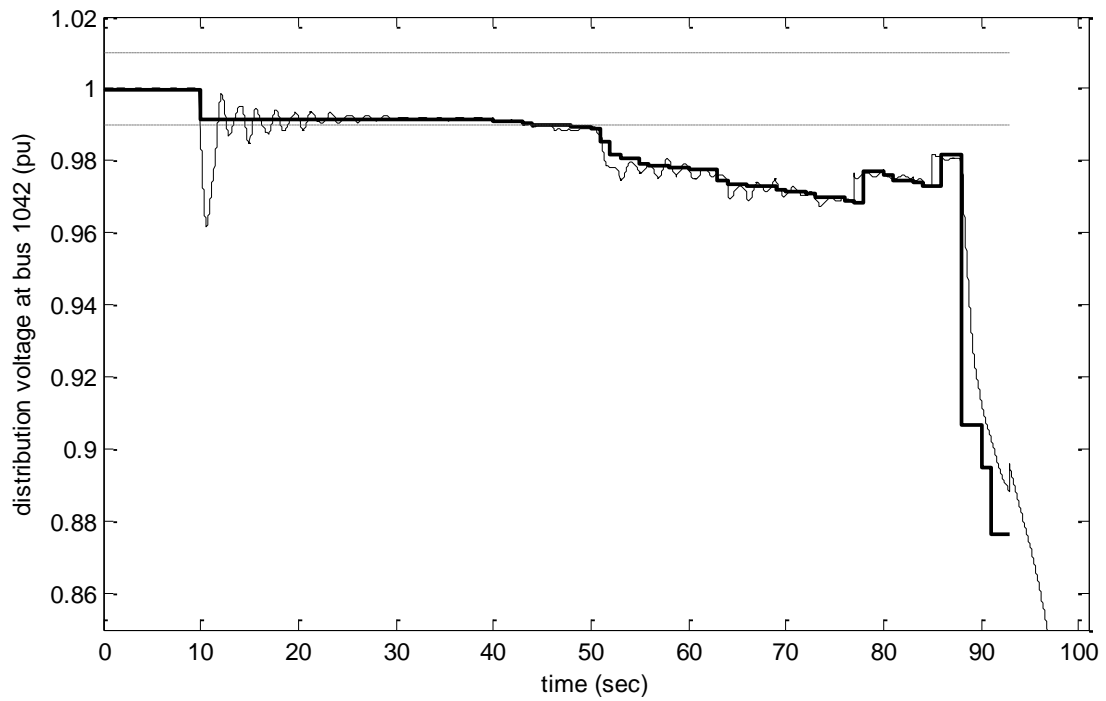


Σχήμα 5.7 Τάση ενδιάμεσου ζυγού 2031 που βρίσκεται κοντά στην κεντρική περιοχή

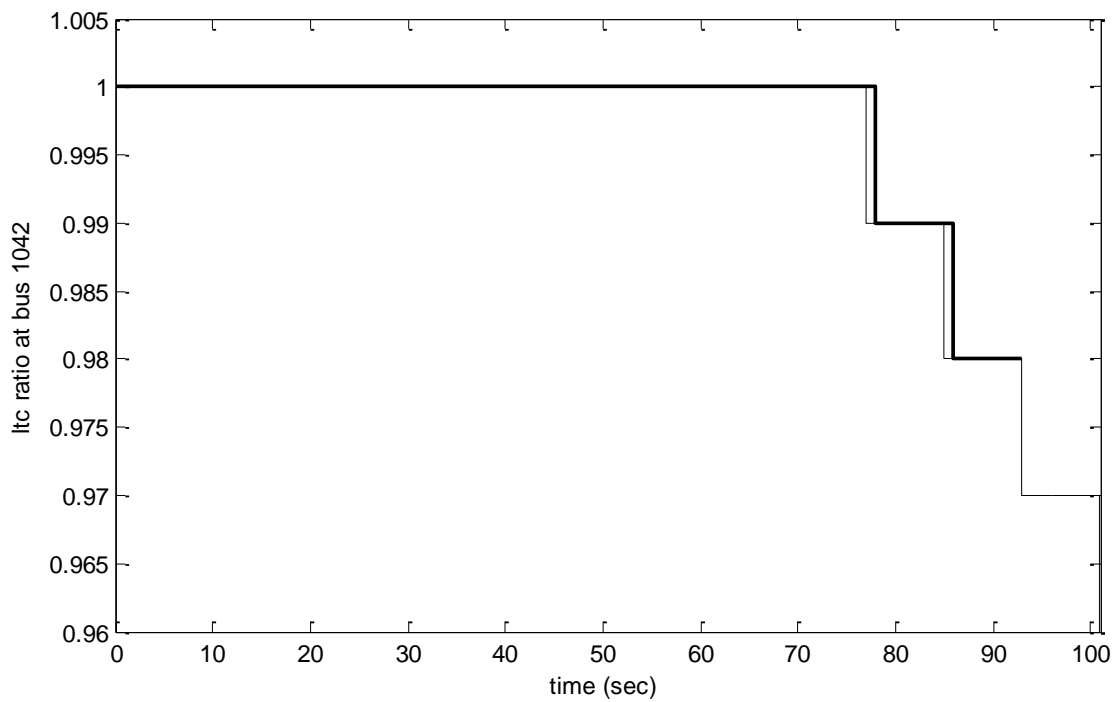
Ομοιότητα παρατηρούμε και στη λειτουργία του δεύτερου μηχανισμού μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Πρόκειται για τη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, που φαίνεται στα Σχήματα 5.8 έως 5.13, μαζί με τις αντίστοιχες τάσεις στους ζυγούς φορτίων.

Στο ζυγό 1042 της κεντρικής περιοχής (Σχήμα 5.8) η συμπεριφορά της τάσης είναι όμοια και με τους δυο τρόπους ανάλυσης. Μετά τη διαταραχή που εφαρμόσαμε στο σύστημα, η τάση παρουσιάζει μια αρχική πτώση αλλά παραμένει εντός των ορίων λειτουργίας. Σε χρόνο  $t = 45 \text{ s}$  για το Simulink και  $t = 47 \text{ s}$  για το Wpstab η τάση βγαίνει εκτός ορίων. Η απόκλιση που παρατηρούμε είναι μικρή και αφορά στα όσα έχουμε ήδη πει για την αναμενόμενη απόκλιση των δυο μεθόδων. Με την τάση να παίρνει μη αποδεκτή τιμή στο ζυγό φορτίου, ενεργοποιείται ο μετασχηματιστής μεταβλητής λήψης στο αντίστοιχο φορτίο. Μετά την αναμενόμενη αρχική χρονική καθυστέρηση και εφόσον η τάση δεν έχει αποκατασταθεί, εκτελείται η πρώτη αλλαγή λόγου μετασχηματισμού σε χρόνο  $t = 76 \text{ s}$  για το Simulink και  $t = 78 \text{ s}$  για το Wpstab. Η χρονική απόκλιση που παρατηρούμε στην έξοδο της τάσης από τη νεκρή ζώνη ανάμεσα στα δύο προγράμματα παραμένει στη λειτουργία του μετασχηματιστή σε όλες τις αλλαγές λόγου μετασχηματισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.9. Δεδομένου ότι μετά την πρώτη αλλαγή λήψης δεν επιτυγχάνεται αποκατάσταση τάσης, γίνονται κι άλλες αλλαγές προς την ίδια κατεύθυνση χωρίς αποτέλεσμα, μέχρι την κατάρρευση του συστήματος. Παρατηρούμε ότι στην προσομοίωση του συστήματος στο Simulink το σύστημα προλαβαίνει κι άλλες αλλαγές λήψης που δεν εκτελούνται στο προσεγγιστικό μοντέλο. Αυτό οφείλεται στον παραπάνω χρόνο που χρειάζεται το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων για να οδηγηθεί σε αστάθεια. Χρειάζεται 11s παραπάνω, πράγμα που σημαίνει ότι έχει τη δυνατότητα να εκτελέσει 2 παραπάνω αλλαγές στη λήψη του μετασχηματιστή. Οι αλλαγές αυτές όμως δεν αποτρέπουν την κατάρρευση.

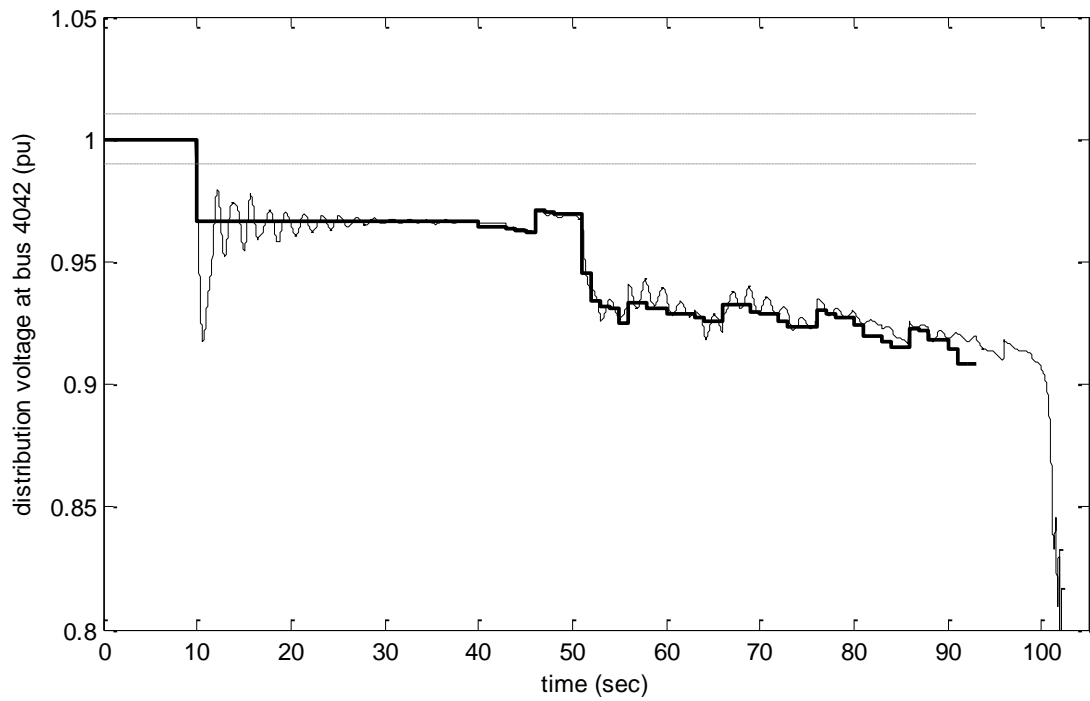
Όσον αφορά την τάση στο ζυγό 4042, που βρίσκεται πιο κοντά στη διαταραχή (Σχήμα 5.10) η τάση βγαίνει εκτός ορίων αμέσως μετά τη διαταραχή σε χρόνο 10s και στα δύο προγράμματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ενεργοποιηθεί ταυτόχρονα ο μηχανισμός του αντίστοιχου μετασχηματιστή (Σχήμα 5.11) και μετά από 36s να γίνει η πρώτη αλλαγή λήψης, εφόσον η τάση δεν έχει αποκατασταθεί. Παρατηρούμε ότι με την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού έχουμε μία μικρή άνοδο στην τάση αλλά δεν είναι ικανή να την επαναφέρει εντός ορίων λειτουργίας. Εκτελούνται κι άλλες αλλαγές λόγου μετασχηματισμού ανά 10s, ταυτόχρονα και στα δυο προγράμματα, μέχρι την κατάρρευση του συστήματος. Και σε αυτό το ζυγό, το μοντέλο στο Simulink προλαβαίνει να κάνει μια παραπάνω αλλαγή για τον ίδιο λόγο, χωρίς όμως κάποια αλλαγή στο τελικό αποτέλεσμα.



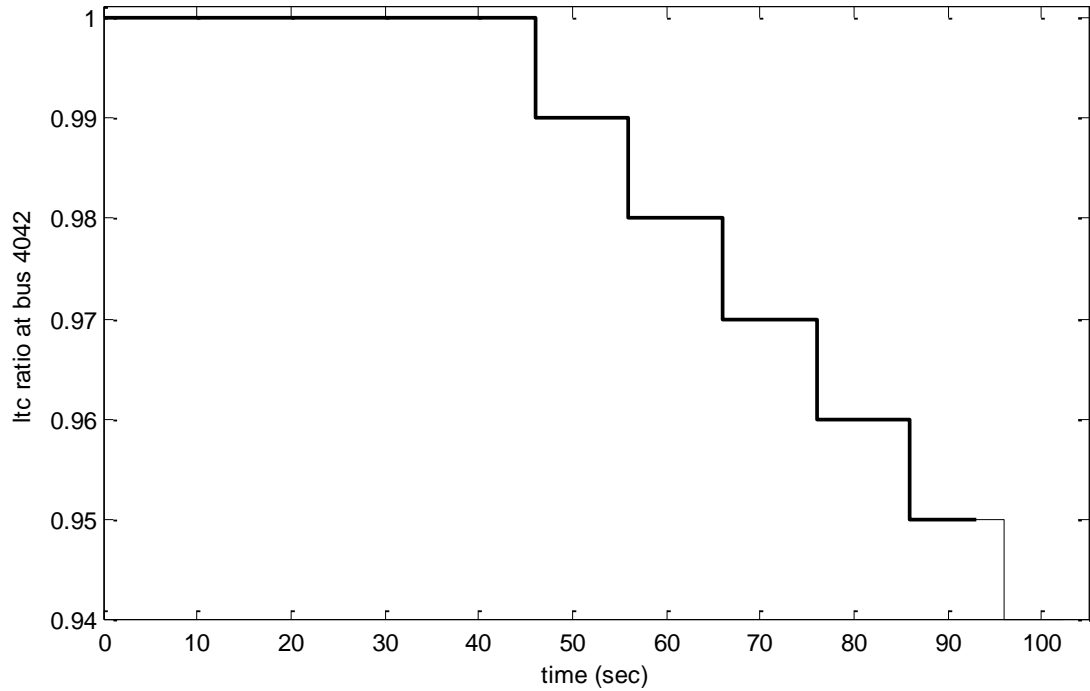
Σχήμα 5.8 Τάση στο ζυγό φορτίου 1042



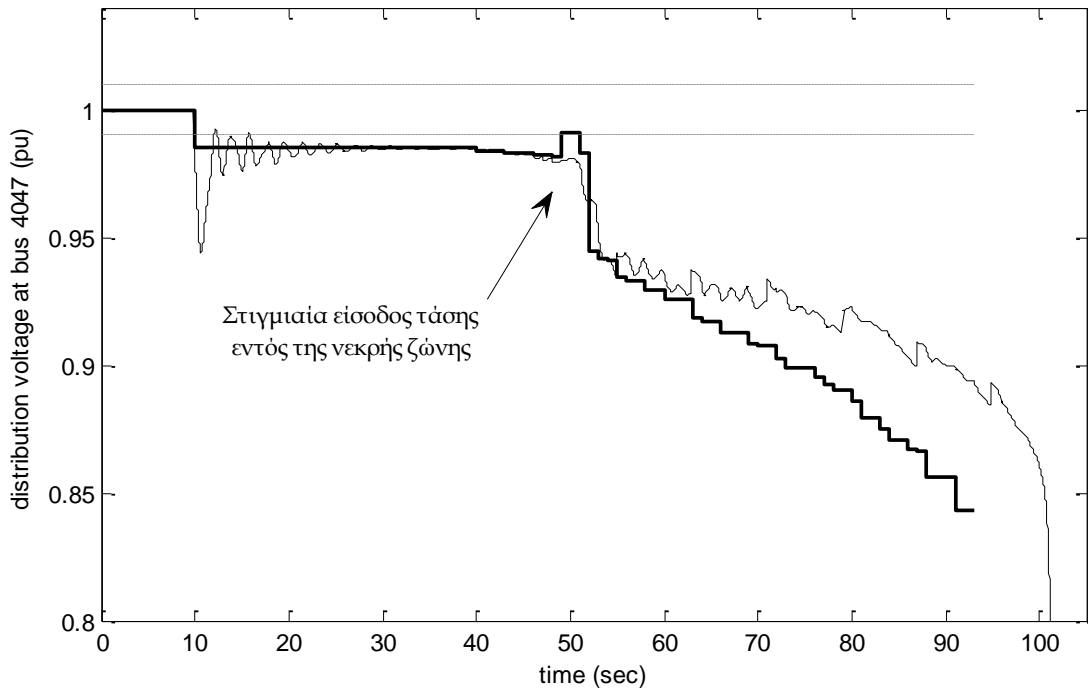
Σχήμα 5.9 Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1042



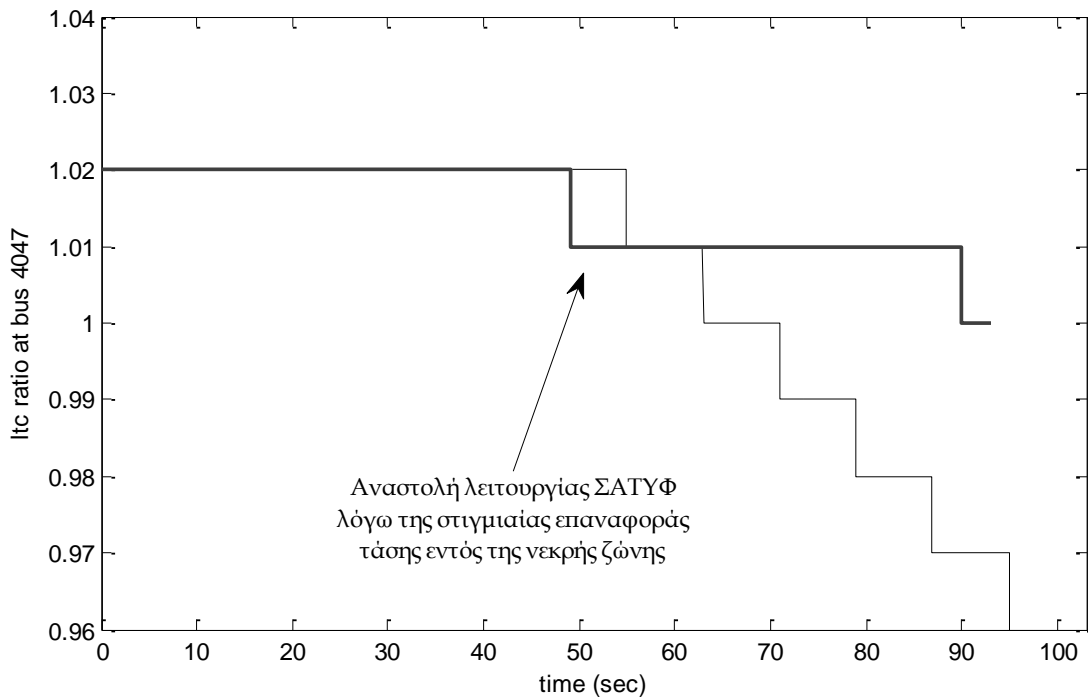
Σχήμα 5.10 Τάση στο ζυγό φορτίου 4042



Σχήμα 5.11 Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4042



Σχήμα 5.12 Τάση στο ζυγό φορτίου 4047



Σχήμα 5.13 : Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4047

Στο Σχήμα 5.12 παρατηρούμε την τάση στο ζυγό 4047 του συστήματος που ναι μεν βρίσκεται στην κεντρική περιοχή αλλά είναι απομακρυσμένος από τη διαταραχή. Παρατηρούμε ότι σε χρόνο 10s που συντελείται η αποκοπή της γραμμής, η τάση στο ζυγό φορτίου πέφτει εκτός της νεκρής ζώνης και στα δυο μοντέλα. Λόγω ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων όμως, το μοντέλο προσομοίωσης του Simulink, για 8s ταλαντώνεται εντός και εκτός της νεκρής ζώνης, και έτσι ο μηχανισμός αλλαγής λήψης του μετασχηματιστή δεν ενεργοποιείται μέχρι να ολοκληρωθούν οι ταλαντώσεις. Αυτό δε συμβαίνει στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης καθώς δεν έχουμε συμπεριλάβει τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε μια απόκλιση μερικών δευτερολέπτων στην αλλαγή λόγου μετασχηματισμού ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Μετά την πρώτη αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.13 το μοντέλο του Simulink παρουσιάζει μία πολύ μικρή αύξηση τάσης όχι όμως αρκετή ώστε να μπει στη νεκρή ζώνη. Αυτό συμβαίνει και σε κάθε επόμενη αλλαγή λήψης μέχρι την κατάρρευση του συστήματος. Αντίθετα όμως, στο Wpstab το μοντέλο μετά την πρώτη αλλαγή λόγου μετασχηματισμού εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη αύξηση τάσης και επανέρχεται οριακά εντός των ορίων λειτουργίας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής λήψης του μετασχηματιστή καθώς θεωρήθηκε ότι αποκαταστάθηκε η τάση στο ζυγό, πράγμα το οποίο δεν συμβαίνει καθώς την επόμενη χρονική στιγμή έχουμε πάλι πτώση της τάσης. Ενεργοποιείται λοιπόν ξανά ο μηχανισμός και χρειάζεται πάλι χρόνο ίσο με την αρχική χρονική καθυστέρηση για να γίνει η επόμενη αλλαγή λήψης. Αμέσως μετά την αλλαγή, το σύστημα καταρρέει.

Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι σε οριακές περιπτώσεις όπως αυτήν, που χρειάζεται μεγαλύτερη ακρίβεια στον υπολογισμό τάσης, το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης μπορεί να χάνει σε ακρίβεια όσον αφορά τη χρονική διαδοχή των γεγονότων, όχι όμως και ως προς την τελική κατάληξη (κατάρρευση τάσης).



## 5.2 Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια

Στην περίπτωση αυτή, το αρχικό φορτίο του συστήματος είναι μειωμένο, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.2, και συνεπώς η διαταραχή που προσομοιώνεται, οδηγεί σε οριακή κατάρρευση του συστήματος, καθότι το φορτίο που αδυνατεί να καλυφθεί λόγω της απώλειας της γραμμής 4032-4044 είναι αρκετά μικρότερο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρεύσει σε πολύ μεγαλύτερο χρόνο. Ειδικότερα, στην προσομοίωση του συστήματος με το Simulink το σύστημα καταρρέει τελικώς στα 568s, ενώ στην οιονεί στατική προσέγγιση με το Wpstab στα 476s.

Όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα που ακολουθούν, η συμπεριφορά των δύο μοντέλων είναι όμοια με την περίπτωση 1, μόνο που η απόκλιση των δυο μεθόδων παρουσιάζεται εντονότερη, λόγω οριακής φόρτισης του συστήματος.

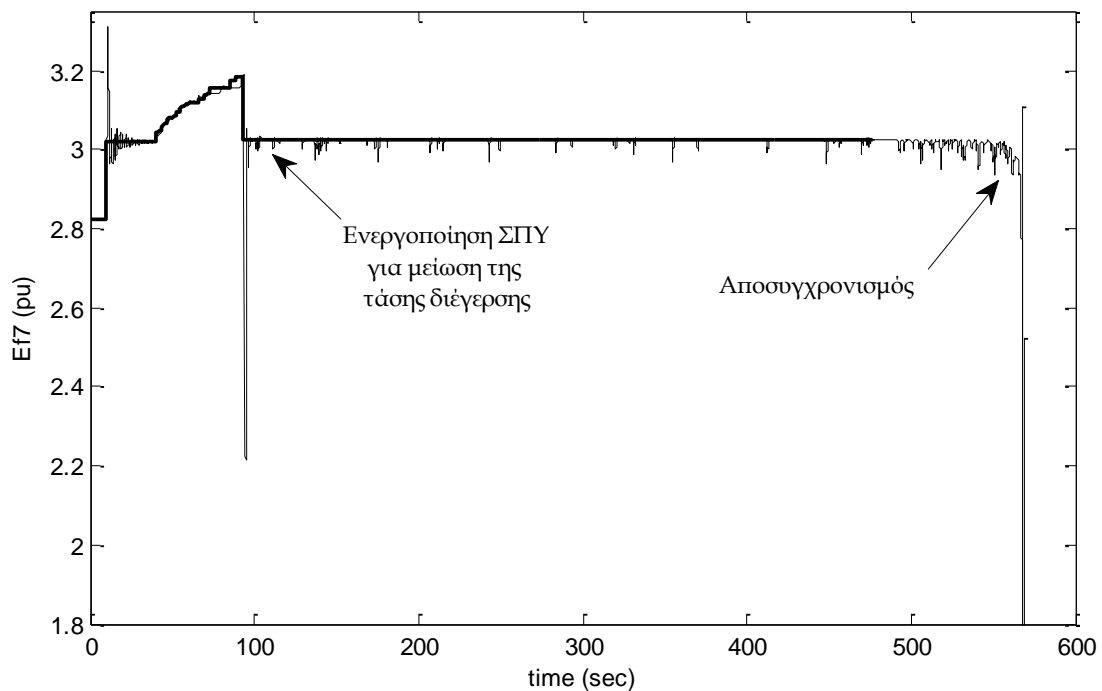
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η απόκλιση στο χρόνο κατάρρευσης στην περίπτωση αυτή είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με την απόκλιση των δύο προγραμμάτων στην πρώτη περίπτωση. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας που έχουμε αγνοήσει στο μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης, διαφοροποιούν το αποτέλεσμα προσομοίωσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και έτσι οι αποκρίσεις αποκλίνουν η μία από την άλλη.

Όσον αφορά τη λειτουργία του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης, στον Πίνακα 5.2 φαίνεται η ενεργοποίησή του στις γεννήτριες που βρίσκονται σε υπερδιέγερση. Η απόκλιση στο χρόνο ενεργοποίησης είναι τώρα μεγαλύτερη από την Περίπτωση 1, πράγμα αναμενόμενο λόγω της συνολικά μεγάλης χρονικής απόκλισης στην απόκριση των δύο μεθόδων. Παρακολουθώντας την ποσοστιαία απόκλιση στο χρόνο ενεργοποίησης παρατηρούμε ότι υπάρχει μία τυχαιότητα στην εμφάνιση του χρόνου υπερδιέγερσης, όμως όσο αργότερα εμφανίζεται η υπερδιέγερση σε μία γεννήτρια, τόσο μεγαλώνει το σφάλμα, λόγω της προαναγγελίας του σημείου βραχυπρόθεσμης ισορροπίας από την οιονεί στατική μέθοδο.

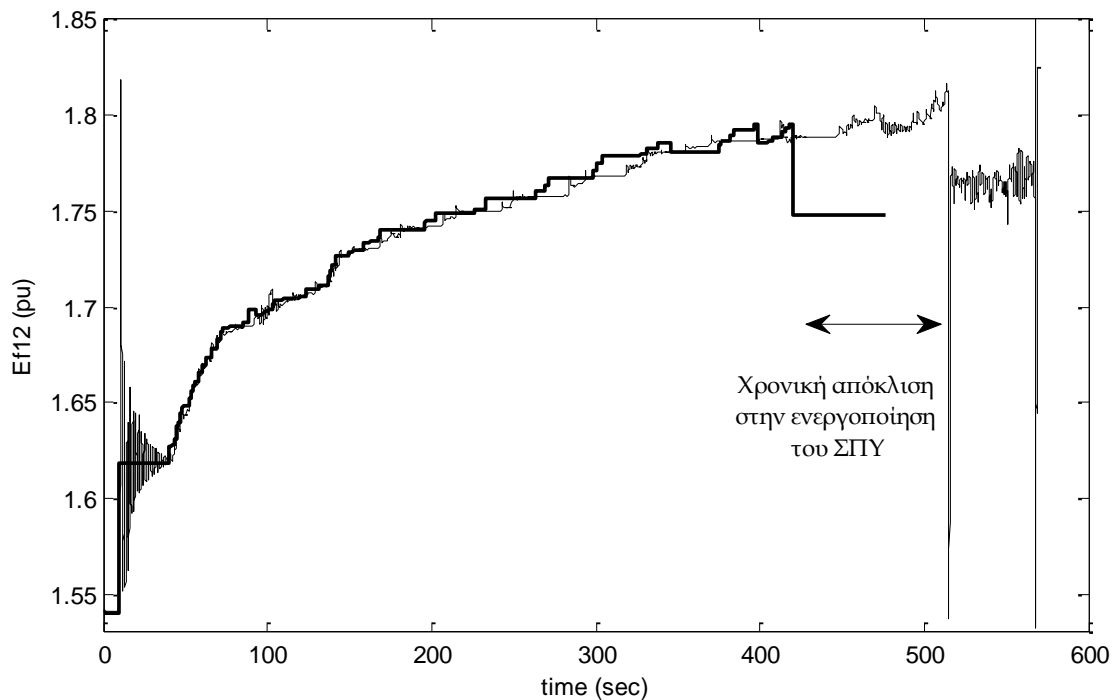
Αναλυτική παρουσίαση των ΗΕΔ διέγερσης στις γεννήτριες του συστήματος γίνεται στα Σχήματα 5.14 και 5.15.

Πίνακας 5.2 Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης γεννητριών(case2)

Γεννήτριες συστήματος όπου ενεργοποιείται στο σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ)	Χρόνος ενεργοποίησης στο πλήρες μοντέλο (Simulink) (s)	Χρόνος ενεργοποίησης στο μοντέλο σιωνεί στατικής προσέγγισης (Wpstab) (s)	Ποσοστιαία απόκλιση χρόνου ενεργοποίησης ανάμεσα στα δύο προγράμματα (%)
g7	94.63	93.00	1.75
g14	100.99	104.00	-2.89
g15	411.90	346.00	19.05
g16	472.94	399.00	18.53
g12	515.17	420.00	22.66
g6	556.15	476.00	16.84



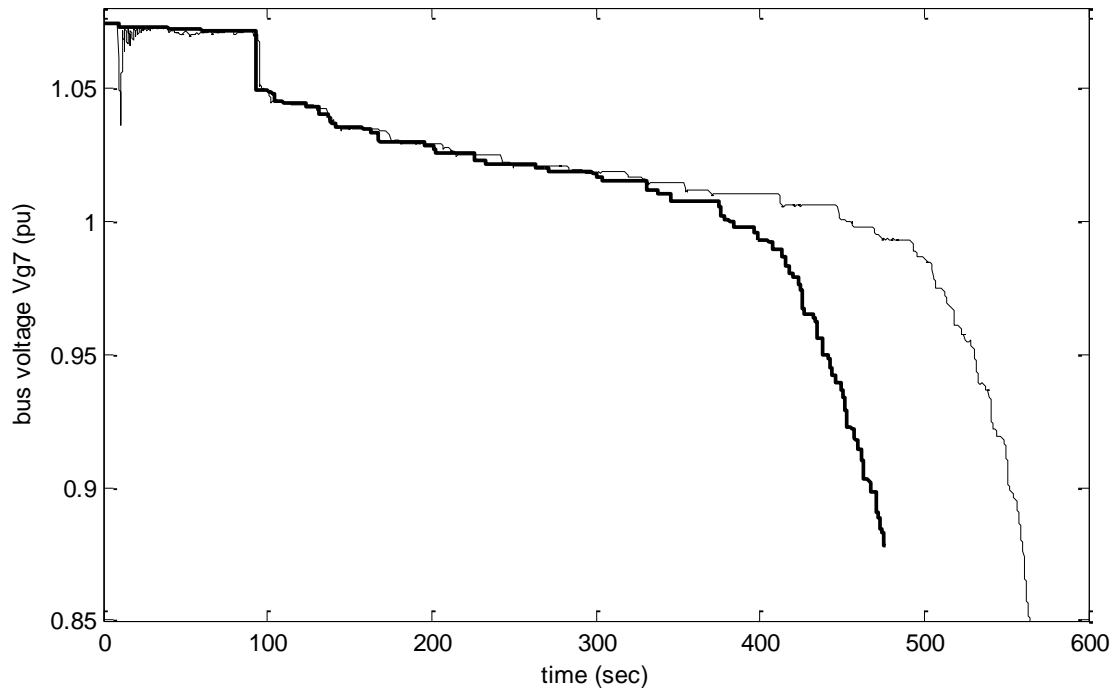
Σχήμα 5.14 Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g7



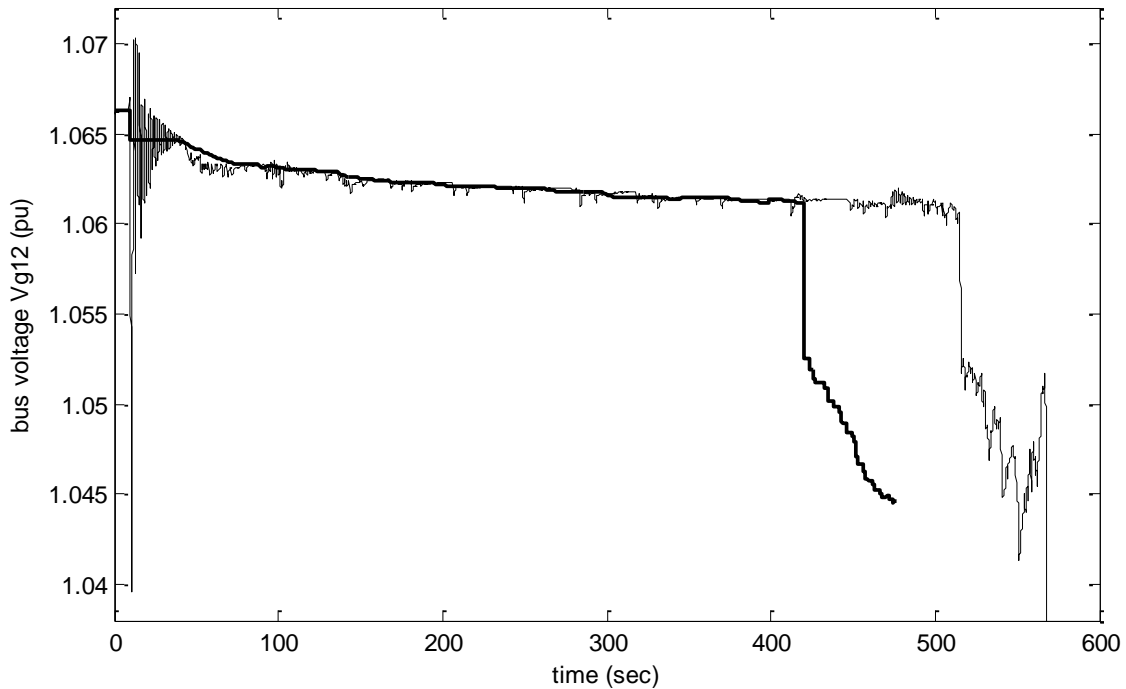
Σχήμα 5.15 Τάση Διέγερσης Γεννήτριας g12

Στα Σχήματα 5.14 και 5.15 έχουμε την τάση διέγερσης των γεννητριών g7 και g12 αντίστοιχα. Όσον αφορά τη γεννήτρια g7 που το σύστημα προστασίας ενεργοποιείται ταυτόχρονα και στα δύο προγράμματα έχουμε ίδια απόκριση τάσης. Στη γεννήτρια g12 αντίθετα έχουμε μια απόκλιση περίπου 100s καθώς έχουμε ορίσει μικρότερο όριο στην τιμή της τάσης διέγερσης στο Wpstab σε σχέση με το Simulink για λόγους που αναλύθηκαν στην Ενότητα 3.3 | Πίνακας 3.2. Παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της τάσης διέγερσης και η συμπεριφορά της είναι ίδια, απλά μετατοπισμένη στο χρόνο. Το ίδιο συμβαίνει στις υπόλοιπες γεννήτριες του συστήματος.

Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά έχει και η τερματική τάση των γεννητριών που παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.16 και 5.17. Η τάση παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά και μέση τιμή, απλά σε μικρότερο χρόνο με το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης.

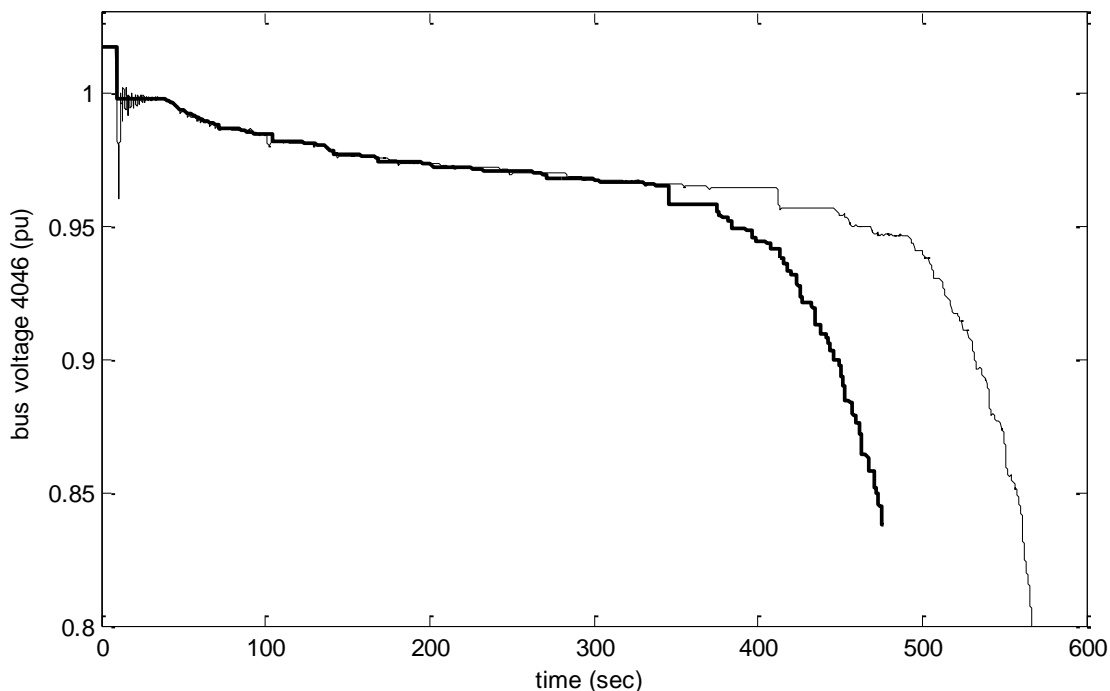


Σχήμα 5.16 Τερματική Τάση γεννήτριας g7



Σχήμα 5.17 Τερματική Τάση γεννήτριας g12

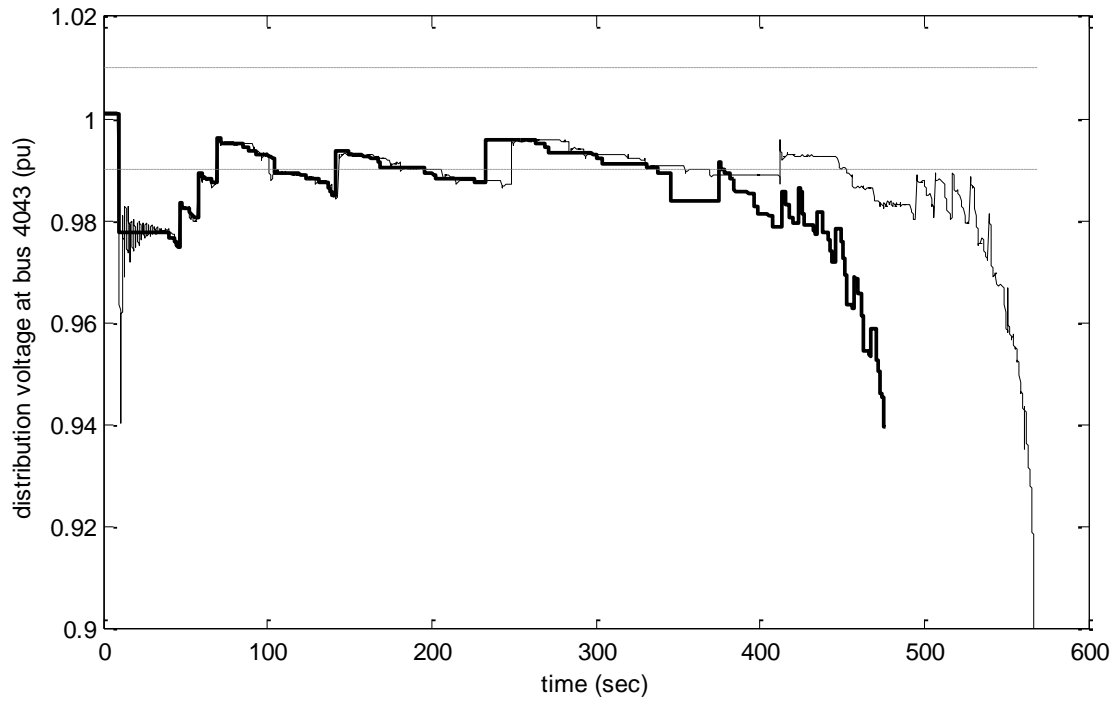
Όσον αφορά τη συμπεριφορά της τάσης στην κεντρική περιοχή του συστήματος, παραθέτουμε μία αντιπροσωπευτική γραφική παράσταση για την τάση στο ζυγό 4046 στο Σχήμα 5.18.



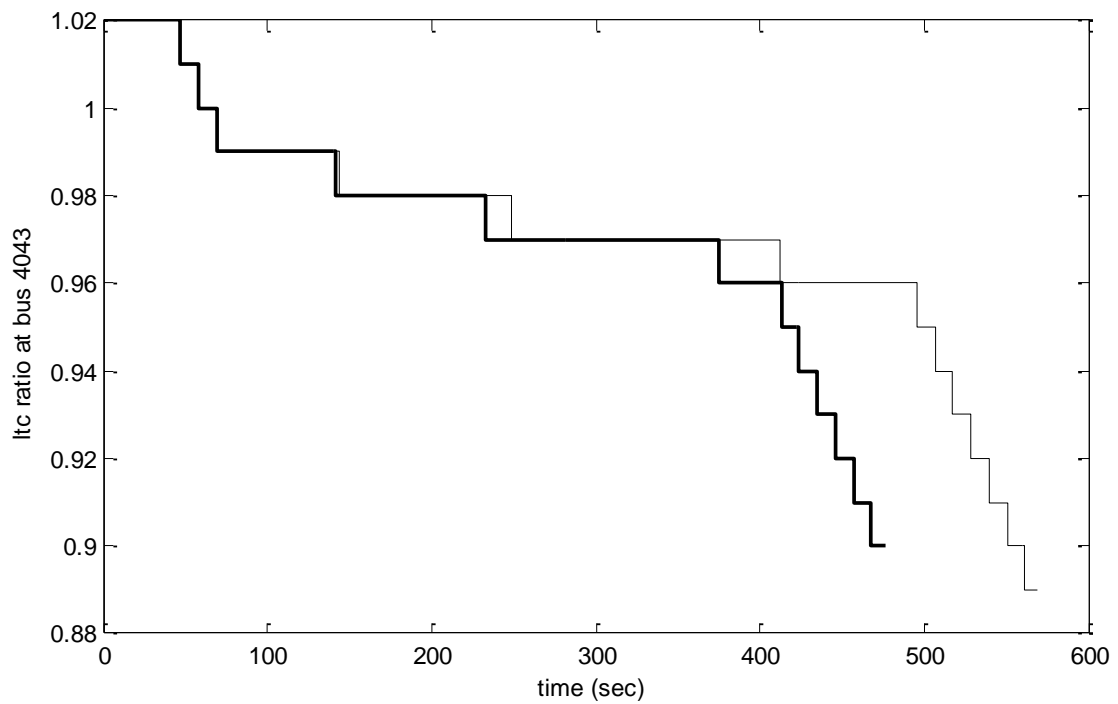
Σχήμα 5.18 Τάση ενδιάμεσου ζυγού κεντρικής περιοχής 4046

Μπορούμε να κάνουμε τις ίδιες παρατηρήσεις για τη συμπεριφορά της τάσης στις δύο προσομοιώσεις. Έχουμε ίδια απόκριση, η οποία προηγείται στο Wpstab καθώς η εύρεση του επόμενου εν δυνάμει σημείου ισορροπίας προεξοφλείται, αλλά το τελικό αποτέλεσμα παραμένει το ίδιο και με τις δυο μεθόδους προσομοίωσης.

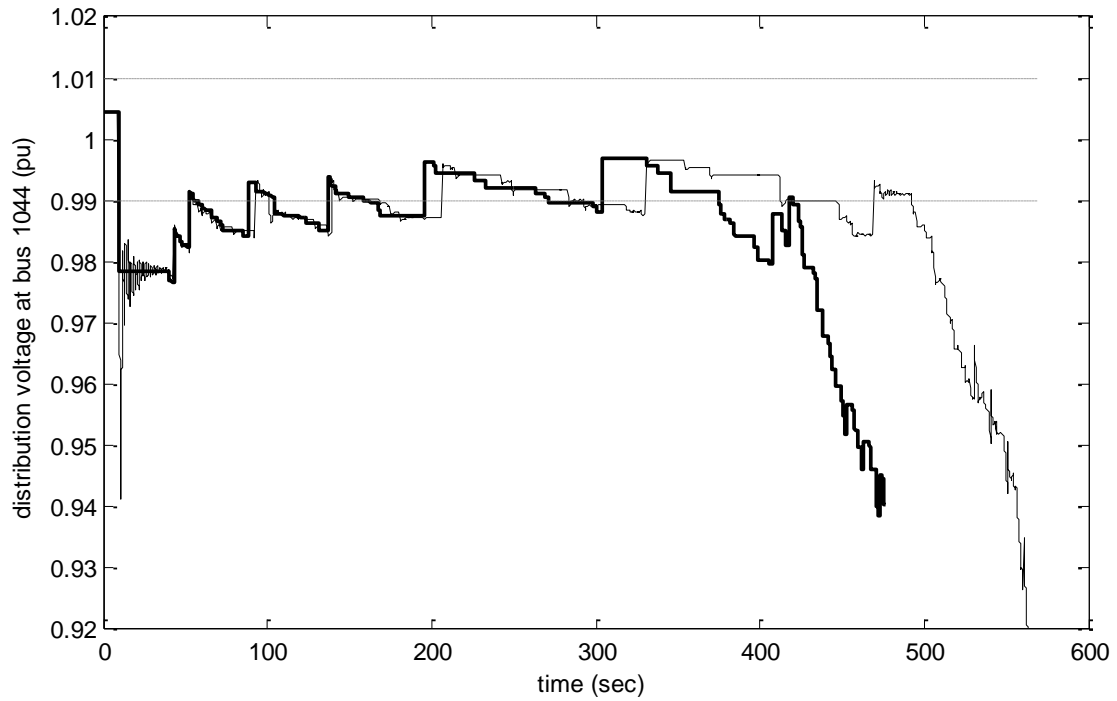
Όσον αφορά τη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης στην περίπτωση αυτή, φαίνεται στα Σχήματα 5.19 έως 5.22 μαζί με τις αντίστοιχες τάσεις στους ζυγούς φορτίων. Στο ζυγό 4043 (Σχήμα 5.19) που είναι πολύ κοντά στη διαταραχή έχουμε έξοδο της τάσης από τη νεκρή ζώνη αμέσως μετά τη διαταραχή. Με τη λειτουργία μεταβλητής λήψης του μετασχηματιστή η τάση αποκαθίσταται προσωρινά εντός επιτρεπών ορίων ανά διαστήματα, αλλά τελικώς ο μηχανισμός δεν πετυχαίνει αποκατάσταση τάσης. Η αλλαγή λήψης είναι ίδια και με τις δύο μεθόδους (Σχήμα 5.20), απλά στο Simulink έχουμε την αναμενόμενη καθυστέρηση και όπως και στην πρώτη περίπτωση, ο μετασχηματιστής προλαβαίνει να κάνει άλλη μία αλλαγή πριν καταρρεύσει το σύστημα. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στο ζυγό 1044 (Σχήμα 5.21 και 5.22) καθώς και στους υπόλοιπους ζυγούς φορτίων του συστήματος.



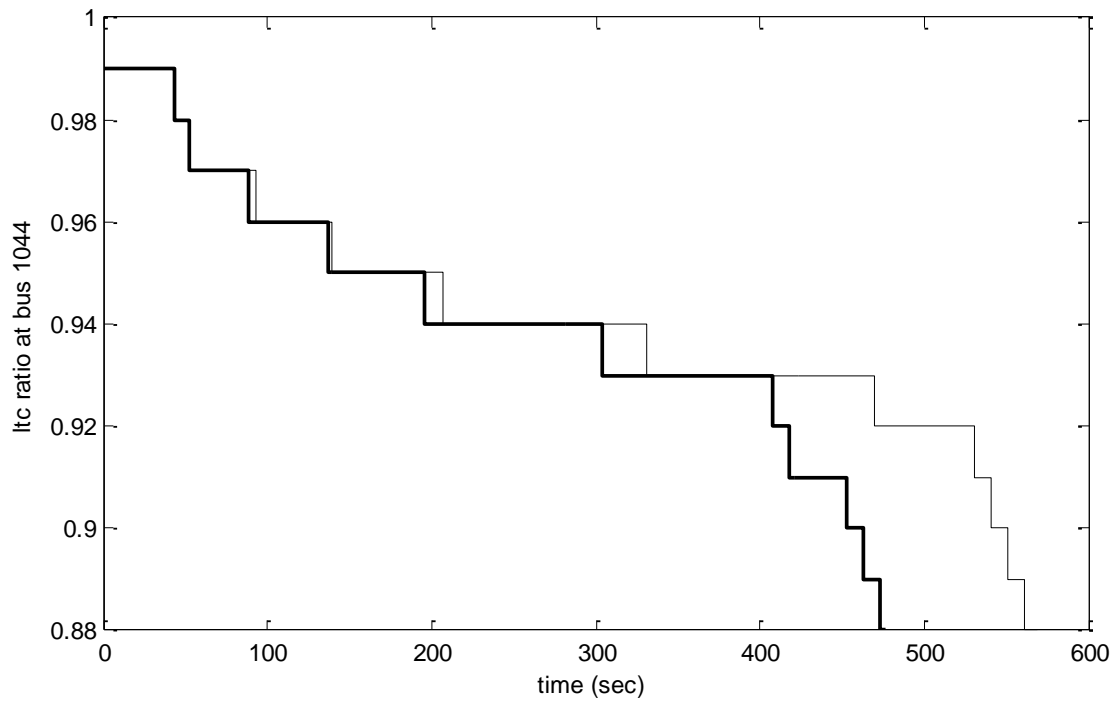
Σχήμα 5.19 Τάση στο ζυγό φορτίου 4043



Σχήμα 5.20 Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 4043



Σχήμα 5.21 Τάση στο ζυγό φορτίου 1044



Σχήμα 5.22 Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1044





## 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΑΠΟ ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ

Στη συνέχεια εκτελούμε την ίδια διαταραχή στο σύστημα και για τις δύο περιπτώσεις αστάθειας, με ενεργοποιημένο το σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης. Το σύστημα προστασίας που χρησιμοποιείται βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης και στην ανίχνευση αστάθειας με τη μέθοδο LIVES, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.

### 6.1 Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια

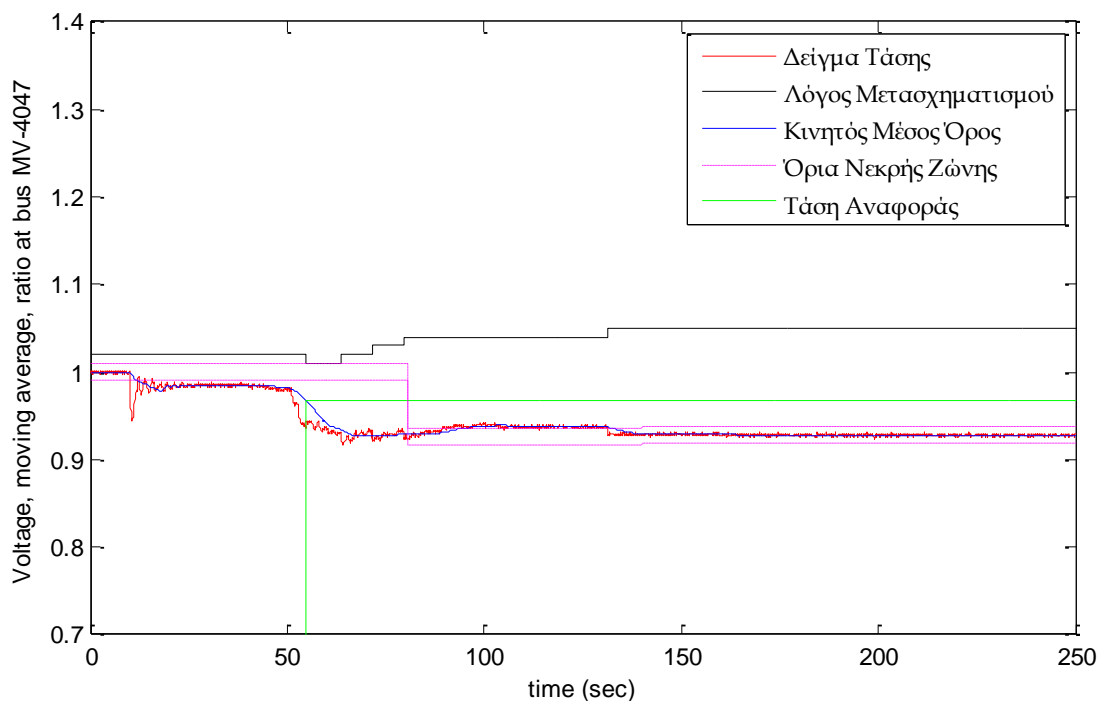
Εντάσσουμε και στα δύο μοντέλα προσομοίωσης τον αλγόριθμο ανίχνευσης αστάθειας και προστασίας από κατάρρευση τάσης και παρατηρούμε ότι μετά τη διαταραχή το σύστημα καταφέρνει τελικώς να λειτουργήσει σε νέο σημείο ισορροπίας, μετά από έμμεση αποκοπή φορτίου. Στόχος μας είναι να ελέγξουμε την ομοιότητα στη λειτουργία της μεθόδου με τα δύο μοντέλα προσομοίωσης. Εξετάζουμε λοιπόν τη λειτουργία της LIVES-alarm και LIVES-restore του συστήματος προστασίας χωριστά.

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζουμε τους ζυγούς φορτίου στους οποίους σημαίνει συναγερμός σε κάθε πρόγραμμα μαζί με τον αντίστοιχο χρόνο εμφάνισής του.

Πίνακας 6.1 Χρόνοι σήμανσης συναγερμού σε κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης

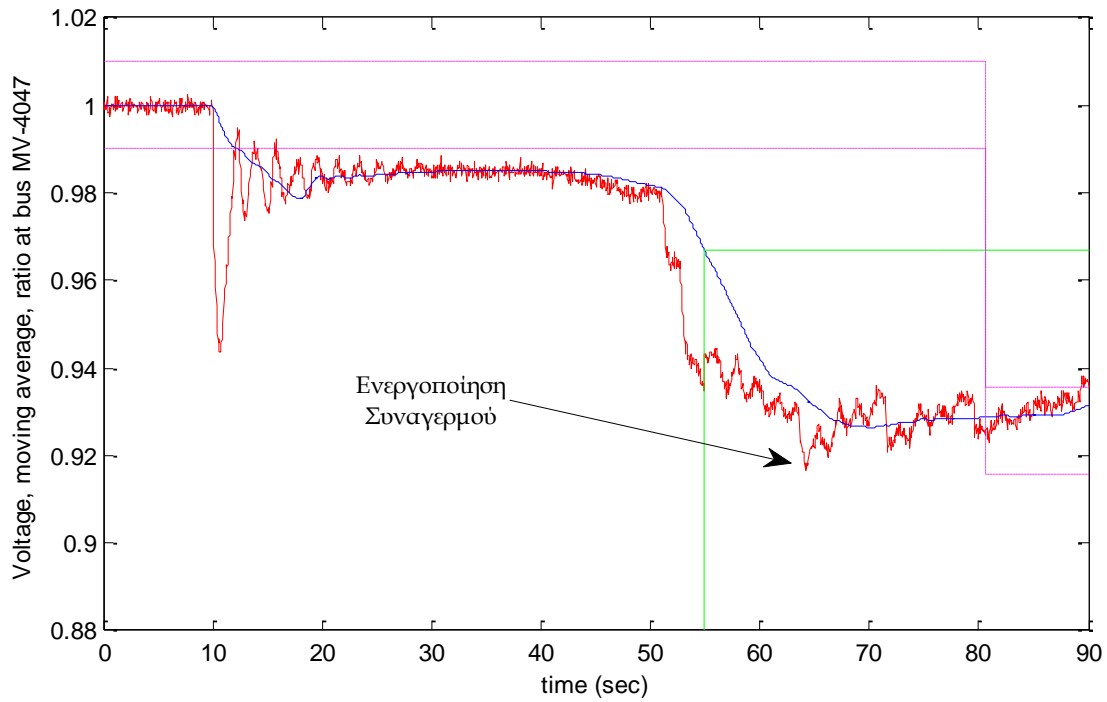
Ζυγός φορτίου	Σήμανση συναγερμού στο μοντέλο του Simulink σε s	Σήμανση συναγερμού στην οιονεί στατική προσέγγιση (Wpstab) σε s
1043	59.90	60.00
4047	62.85	όχι
1044	62.95	63.00
1041	63.95	64.00
1045	65.95	66.00
4042	65.95	66.00
4043	68.95	69.00
4046	71.95	72.00

Παρατηρούμε ότι η ενεργοποίηση του σήματος συναγερμού για τους ζυγούς πέραν του 4047 είναι ίδια στα δύο μοντέλα, με μία χρονική απόκλιση που δικαιολογείται από τη δομή των προγραμμάτων προσομοίωσης, όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενες ενότητες. Η διαφορά που παρατηρείται είναι στο ζυγό φορτίου 4047, όπου με χρήση του Wpstab ο συναγερμός δεν ενεργοποιείται. Δηλαδή δεν παραβιάζεται η ικανή συνθήκη ευστάθειας στο ζυγό, πράγμα που συμβαίνει στο μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων. Η απόκριση τάσης στο Simulink φαίνεται στο Σχήμα 6.1, και εστιάζοντας στη στιγμή της ανίχνευσης προκύπτει το Σχήμα 6.2.

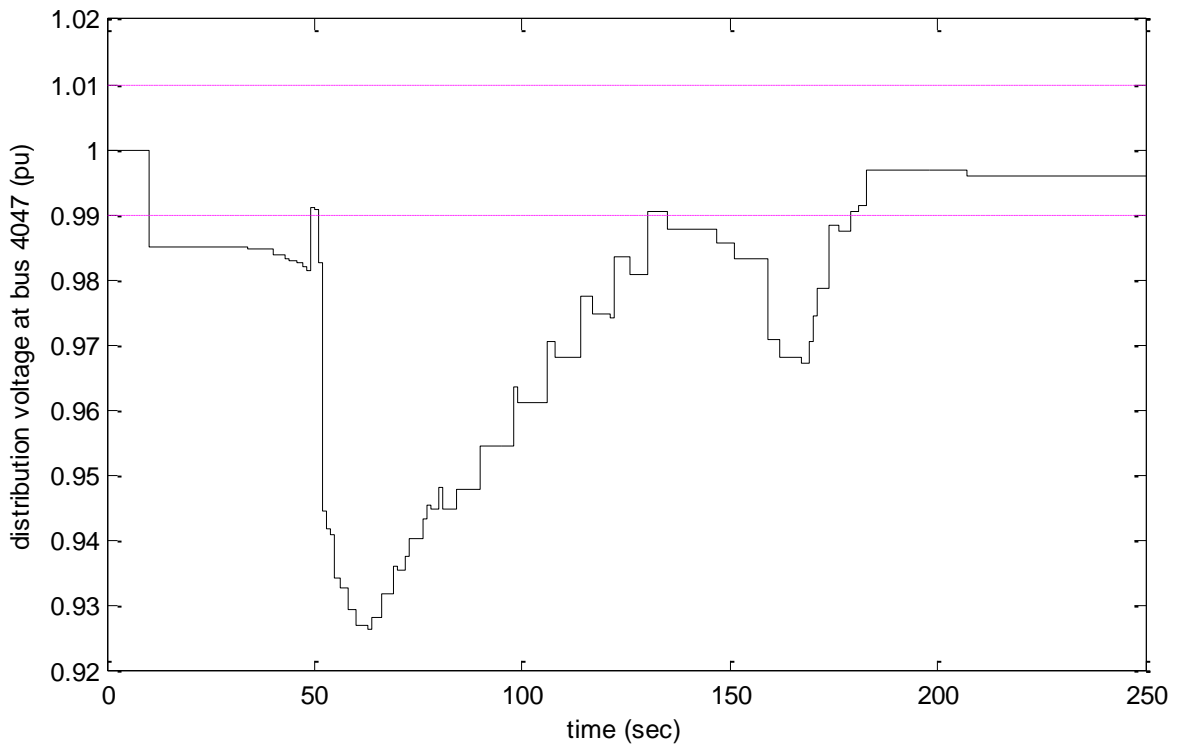


Σχήμα 6.1 Απόκριση τάσης στο ζυγό φορτίου 4047 για το πλήρες μοντέλο με χρήση του Simulink

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Wpstab φαίνονται στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.2 Απόκριση τάσης στο ζυγό 4047 στο Simulink με εστίαση στο χρόνο σήμανσης του συναγερμού



Σχήμα 6.3 Απόκριση τάσης στο ζυγό φορτίου 4047 με χρήση του προσεγγιστικού μοντέλου στο Wpstab

Από το Σχήμα 6.3 φαίνεται ότι ενώ μετά τη διαταραχή η τάση βγαίνει εκτός των ορίων λειτουργίας, τη χρονική στιγμή  $t = 50\text{ s}$  το υπολογιζόμενο σημείο βραχυπρόθεσμης ισορροπίας έχει τιμή τάσης οριακά εντός των ορίων της νεκρής ζώνης, με αποτέλεσμα η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας να αναστέλλεται χωρίς ενεργοποίηση του συναγερμού, κάτι που δε συμβαίνει στο Simulink. Αυτό είναι αποτέλεσμα της διαφοράς των δύο προγραμμάτων και της δομής του προσεγγιστικού μοντέλου όπου δεν λαμβάνουμε υπ' όψιν τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα. Αυτή η μικρή απόκλιση στον υπολογισμό της τάσης στο ζυγό τη χρονική στιγμή  $t = 50\text{ s}$  οδηγεί σε μεγάλη διαφοροποίηση στην απόκριση τάσης στο ζυγό και στο σύστημα συνολικά.

Μετά την σήμανση του συναγερμού ακολουθεί η ενεργοποίηση αντίστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στους αντίστοιχους ζυγούς, για αποκατάσταση της ευστάθειας. Γίνεται δηλαδή έμμεση αποκοπή φορτίου με αντίστροφη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, ώστε το σύστημα να ισορροπήσει σε νέο ευσταθές σημείο λειτουργίας. Οι χρόνοι αποκατάστασης σε κάθε ζυγό φορτίου, καθώς και η νέα τάση αναφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2 για τα δυο μοντέλα προσομοίωσης.

Πίνακας 6.2 Χρόνος αποκατάστασης τάσης στα δύο προγράμματα προσομοίωσης

Ζυγός Φορτίου	Χρόνος αποκατάστασης στο Simulink (s)	Χρόνος αποκατάστασης στο Wpstab (s)	Νέα τάση αναφοράς στο Simulink (Vset σε αμ)	Νέα τάση αναφοράς στο Wpstab (Vset σε αμ)
1043	79.75	78.00	0.9267	0.9231
4047	80.60	Δεν χρειάζεται αποκατάσταση	0.9257	1.0000 (διατηρείται)
1044	84.90	83.00	0.9349	0.9342
4042	87.90	86.00	0.9267	0.9267
1045	90.00	88.00	0.9436	0.9384
1041	90.10	88.00	0.9389	0.9287
4043	93.00	91.00	0.9386	0.9306
4046	98.00	96.00	0.9430	0.9331

Οι χρόνοι αποκατάστασης είναι σχεδόν ίδιοι και στα δύο προγράμματα με απόκλιση μερικών δευτερολέπτων, πράγμα αναμενόμενο λόγω της γενικότερης χρονικής απόκλισης των δύο μεθόδων ανάλυσης καθώς και της διαφορετικότητας των προγραμμάτων. Όσον αφορά τη νέα τάση αναφοράς, έχουμε και εδώ όμοια συμπεριφορά με μία απόκλιση στο 2<sup>ο</sup> με 3<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στο μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων δε χρειάστηκε δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού σε κανένα ζυγό παρά μόνο στον 4047, για την αποκατάσταση φορτίου. Στην οιονεί στατική προσέγγιση

αντίστοιχα, έχουμε και δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού στους ζυγούς, που φαίνονται στον Πίνακα 6.3 και αντίστοιχα νέες τάσεις αναφοράς που φαίνονται στον Πίνακα 6.4.

**Πίνακας 6.3** Δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού σε ζυγούς του συστήματος στην οιονεί στατική προσέγγιση με χρήση του Wpstab

Ζυγός	Χρόνος ενεργοποίησης συναγερμού (s)
1044	169.00
4043	170.00
1041	171.00
4046	171.00

**Πίνακας 6.4** Τάσεις αναφοράς ΣΑΤΥΦ μετά τη δεύτερη ενεργοποίηση συναγερμού στο Wpstab

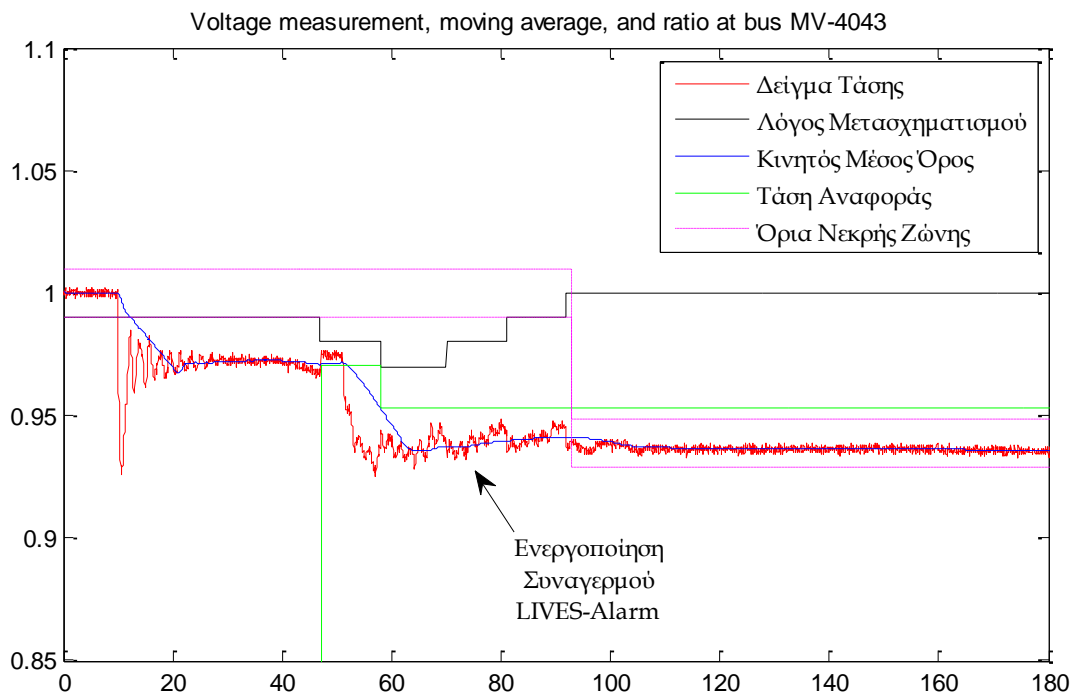
Ζυγός	Χρόνος αποκατάστασης (s)	Νέα τάση αναφοράς (Vset σε αμ)
1044	189.00	0.9074
4043	192.00	0.9041
1041	195.00	0.9049
4046	195.00	0.9069

Αποτέλεσμα της δεύτερης ενεργοποίησης της LIVES restore στους ζυγούς αυτούς είναι η μεγαλύτερη μείωση της τάσης αναφοράς και επακόλουθα μεγαλύτερη έμμεση αποκοπή φορτίου στους αντίστοιχους ζυγούς, σε σχέση με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο Simulink.

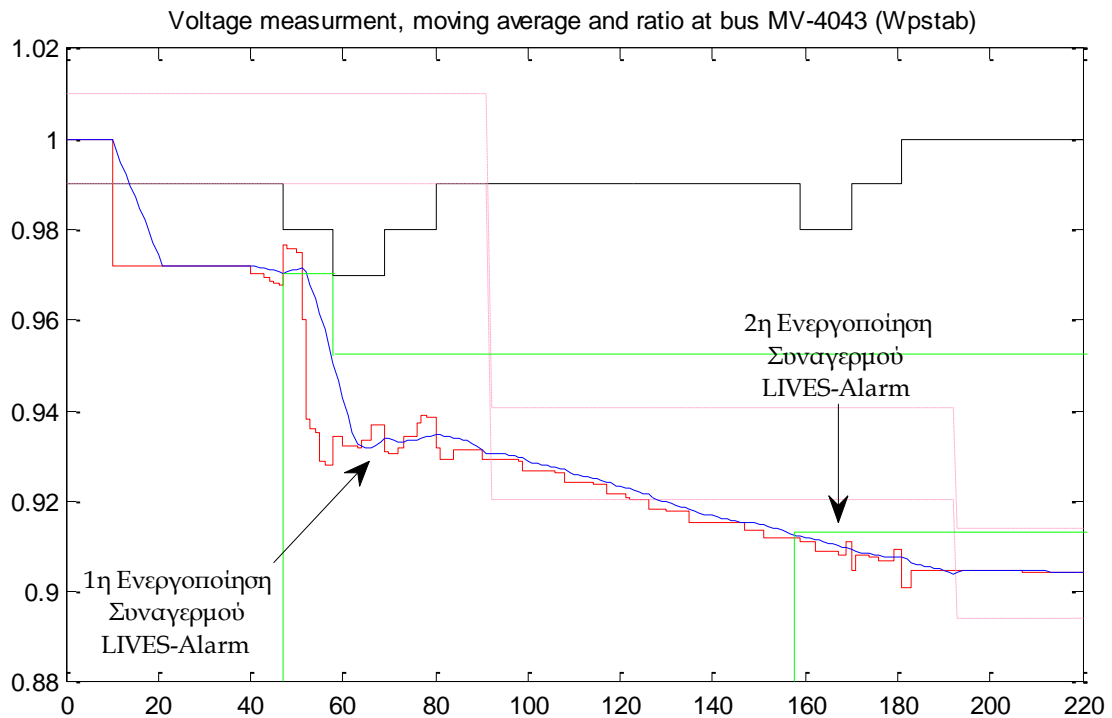
Οι ζυγοί αυτοί βρίσκονται στην κεντρική περιοχή, κοντά στο ζυγό 4047 στον οποίο παρουσιάζεται η διαφορά στην ενεργοποίηση του συναγερμού (LIVES-alarm). Η δεύτερη ενεργοποίηση του συναγερμού στους ζυγούς αυτούς οφείλεται στη διαφορετική συμπεριφορά της τάσης στο ζυγό 4047 στα δυο προγράμματα, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συμπεριφορά τάσης στους υπόλοιπους ζυγούς του συστήματος και ειδικότερα στους γειτονικούς, που συνδέονται άμεσα με αυτόν.

Λεπτομερέστερα, μπορούμε να δούμε τη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης στα Σχήματα 6.4 και 6.5 που ακολουθούν για το ζυγό 4043 στο Simulink και Wpstab αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι αρχικά η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης και προστασίας είναι η ίδια και στα δύο προγράμματα καθώς έχουμε πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού σε χρόνο 69s και στα δύο προγράμματα και χρόνο αποκατάστασης 93s

και 91s αντίστοιχα. Μετά την αποκατάσταση φορτίου η τάση στο ζυγό σταθεροποιείται με βάση τα αποτελέσματα του μοντέλου δύο χρονικών κλιμάκων. Στην προσομοίωση του οιονεί στατικού μοντέλου όμως, λόγω μη αποκατάστασης της τάσης στο ζυγό 4047 έχουμε και δεύτερη πώση τάσης εκτός νεκρής ζώνης κοντά στα 130s, η οποία ανιχνεύεται σε χρόνο 170s και μετά την αποκατάσταση (192s) η τάση σταθεροποιείται, εντός ορίων λειτουργίας, σε χαμηλότερη τιμή.



Σχήμα 6.4 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία της LIVES στο ζυγό 4043 (Simulink)



Σχήμα 6.5 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία της LIVES στο ζυγό 4043 (Wpstab)

Την ίδια ακριβώς συμπεριφορά έχει η τάση και η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης στους ζυγούς 1041, 1044 και 4046 όπου έχουμε διαφορά στη λειτουργία του συναγερμού μεταξύ των δύο προσομοιώσεων.

Στο σημείο αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε και τη συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου που συντελείται με τη χρήση της μεθόδου προστασίας από κατάρρευση τάσης. Ο υπολογισμός του φορτίου που αποκόπτεται σε κάθε ζυγό λόγω της αλλαγής της τάσης αναφοράς, γίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$G_{αποκ} = G_o [(V_{ref}^o)^α - (V_{ref}^{tel})^α] \quad (6.1)$$

όπου  $G_o$  το αρχικό φορτίο στο ζυγό και  $α = 1$  ο εκθέτης φορτίου. Στον Πίνακα 6.5 φαίνεται η συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου του συστήματος για τα δυο προγράμματα προσομοίωσης.

Πίνακας 6.5 Συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου στο σύστημα στα δύο μοντέλα

Ζυγοί φορτίου κεντρικής περιοχής	Αρχική Ζήτηση φορτίου σε κάθε ζυγό (MW)	Νέα τάση αναφοράς στο ζυγό στο simulink (Vref σε αμ)	Αποκοπή φορτίου στο μοντέλο του simulink (MW)	Νέα τάση αναφοράς στο ζυγό στο wpstab (Vref σε αμ)	Αποκοπή φορτίου στο μοντέλο του wpstab (MW)
1041	599.00	0.9389	37.00	0.9049	57.00
1042	300.00	1.0000	0.00	1.0000	00.00
1043	230.00	0.9267	17.00	0.9231	17.00
1044	792.00	0.9349	52.00	0.9074	73.00
1045	699.00	0.9436	40.00	0.9384	43.00
4041	540.00	1.0000	0.00	1.0000	00.00
4042	400.00	0.9267	29.00	0.9267	29.00
4043	900.00	0.9386	55.00	0.9041	86.00
4046	699.00	0.9430	40.00	0.9069	65.00
4047	100.00	0.9257	7.00	1.0000	00.00
4051	800.00	1.0000	0.00	1.0000	00.00
Συνολική αποκοπή φορτίου			277.00		370.00

Όπως αναμέναμε, η αποκοπή φορτίου που προβλέπει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης του Wpstab είναι αρκετά μεγαλύτερη σε σχέση με τη συνολική αποκοπή φορτίου στο μοντέλο του Simulink. Αυτό σημαίνει ότι το οιονεί στατικό μοντέλο εμφανίζεται συντηρητικό σε αυτή τη περίπτωση.

Παράλληλα με το σύστημα προστασίας από κατάρρευση τάσης, εξακολουθεί να λειτουργεί στο σύστημα η προστασία γεννητριών από υπερδιέγερση. Η ενεργοποίηση του ΣΠΥ φαίνεται στον Πίνακα 6.6. Οι χρόνοι ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας είναι όμοιοι στα δύο προγράμματα και όμοιοι με την περίπτωση χωρίς ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας από αστάθεια τάσης. Η διαφορά που παρατηρούμε είναι στη γεννήτρια g6, όπου στο Wpstab ενεργοποιείται πολύ αργότερα λόγω της διαφορετικής (μεγαλύτερης) έμμεσης αποκοπής φορτίου (Πίνακας 6.5). Στα σχήματα 6.4 έως 6.7 παρουσιάζουμε την απόκριση τάσης σε κάποιους ζυγούς του συστήματος.



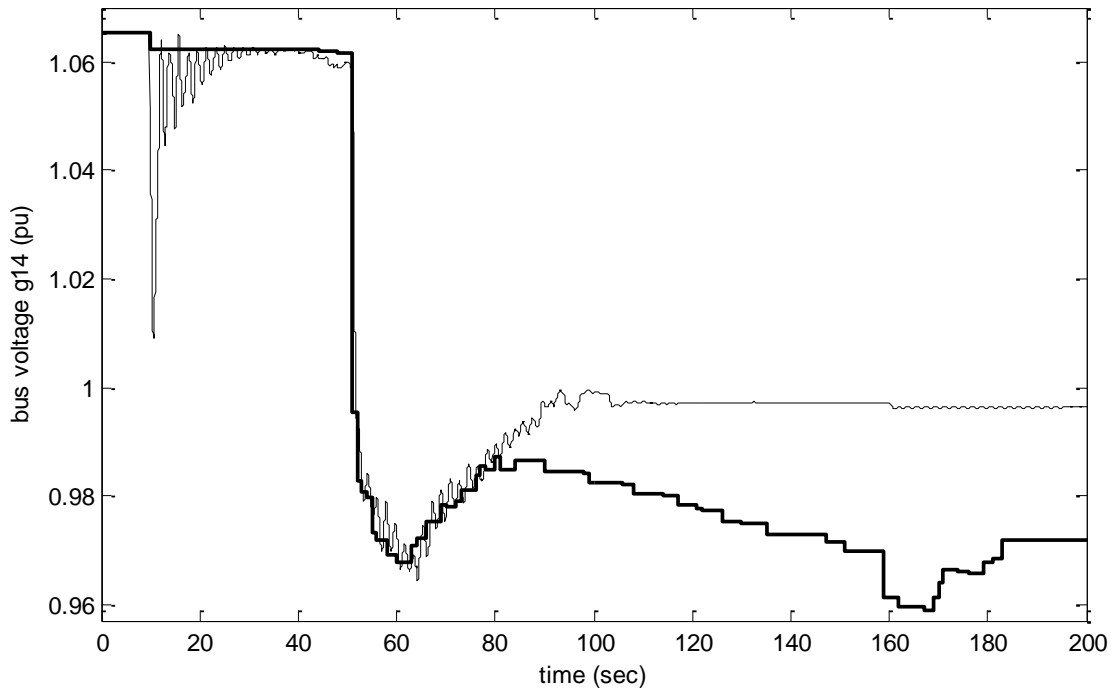
Πίνακας 6.6 Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος υπερδιέγερσης γεννητριών(case1)

Γεννήτριες συστήματος όπου ενεργοποιείται στο σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ)	Χρόνος ενεργοποίησης στο πλήρες μοντέλο (Simulink) (s)	Χρόνος ενεργοποίησης στο μοντέλο οιονεί στατικής προσέγγισης (Wpstab) (s)
g5	34.37	34.00
g7	50.49	50.00
g14	51.00	51.00
g15	52.68	52.00
g12	55.20	55.00
g16	63.81	63.00
g6	89.80	176.00

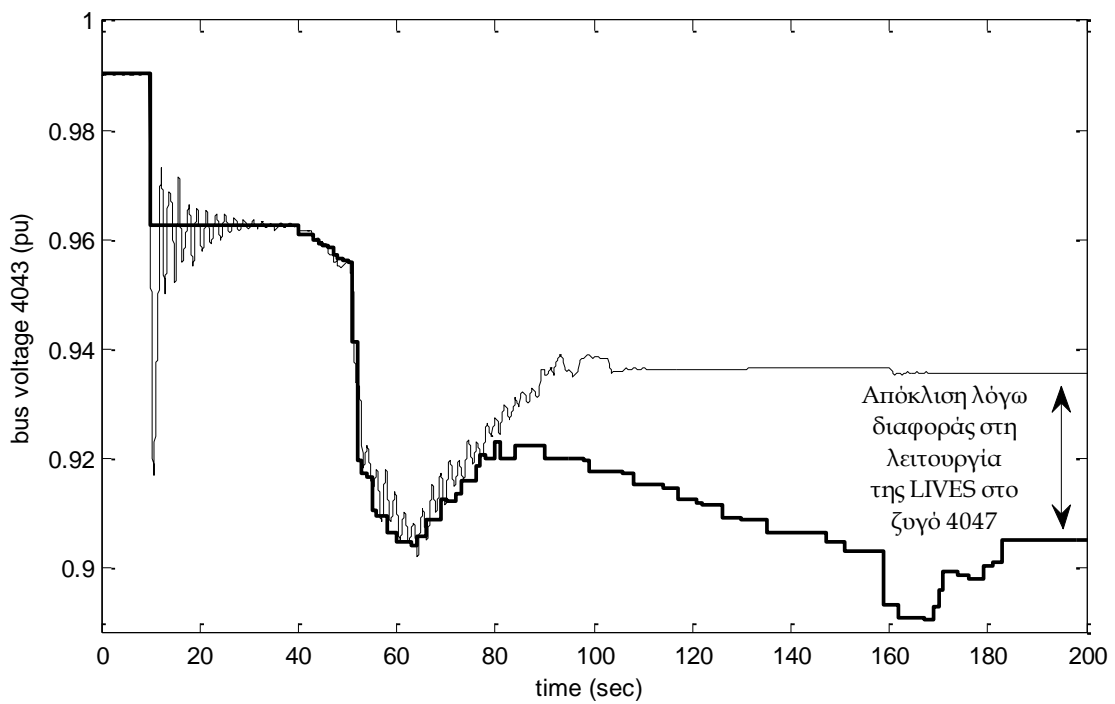
Όσον αφορά τις γεννήτριες έχουμε ίδιους χρόνους ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης και όμοια συμπεριφορά σε όλες τις τερματικές τάσεις. Αυτό που παρατηρούμε στο Σχήμα 6.4, όπου απεικονίζεται η τερματική τάση της γεννήτριας g14, είναι ότι μετά την αποκατάσταση ισορροπίας στο σύστημα έχουμε μία μόνιμη απόκλιση στην απόκριση των δύο μοντέλων, της τάξης του 0.2αμ. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο ζυγό 4047 που παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Αυτό φαίνεται πιο καθαρά στις τάσεις των ενδιάμεσων ζυγών 4043, 4032 και 2032 στα Σχήματα 6.6 έως 6.8 αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 6.7 φαίνεται η απόκριση τάσης στο ζυγό 4043 του συστήματος, ο οποίος συνδέεται άμεσα με το ζυγό 4047. Παρατηρούμε ότι αρχικά, μέχρι και τα 50s τα δύο προγράμματα παρουσιάζουν την ίδια απόκριση τάσης για τις δυο μεθόδους προσομοίωσης. Στη συνέχεια η απόκριση τάσης διαφοροποιείται σημαντικά, με αποτέλεσμα να έχουμε μία απόκλιση της τάξης του 0.4αμ μετά την αποκατάσταση της ισορροπίας στο σύστημα. Σε αυτό οφείλεται και η διαφοροποίηση στη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης.

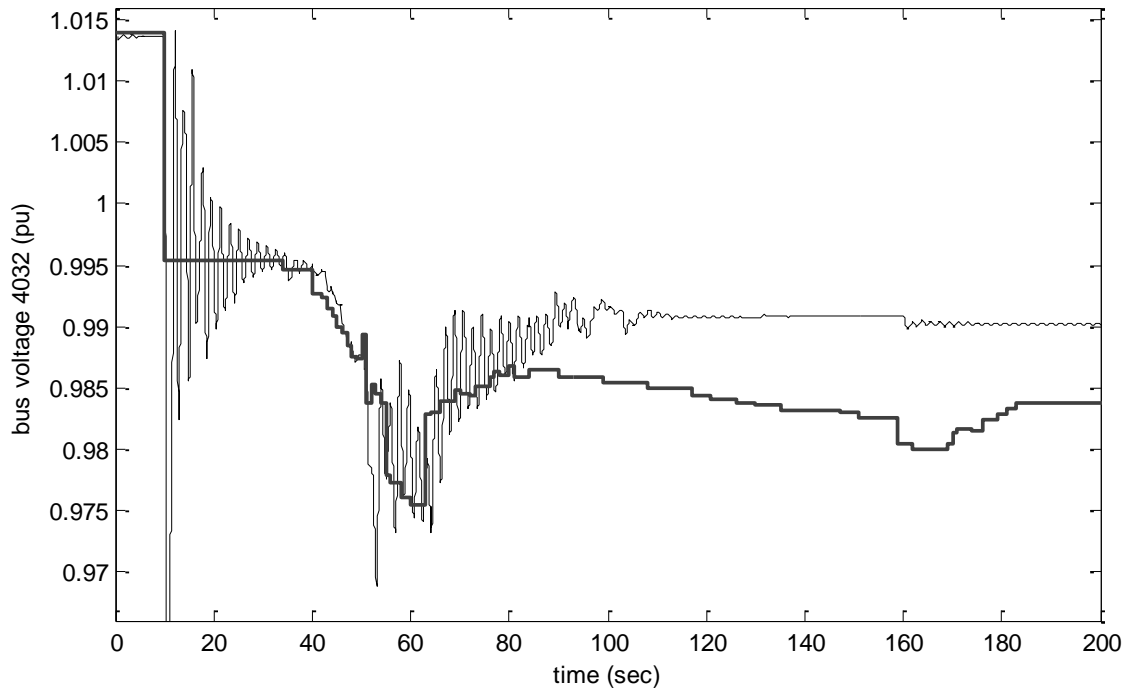
Όσο όμως απομακρυνόμαστε από το ζυγό 4047 η απόκλιση αυτή γίνεται όλο και μικρότερη, όπως φαίνεται στα Σχήματα 6.8 και 6.9. Μπορούμε λοιπόν να εξάγουμε το συμπέρασμα, ότι αν δεν είχαμε αυτή τη στιγμιαία είσοδο της τάσης του ζυγού 4047 εντός της νεκρής ζώνης σε χρόνο 50s, τα δύο μοντέλα θα είχαν την παρόμοια απόκριση τάσης και ίδια λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης και προστασίας.



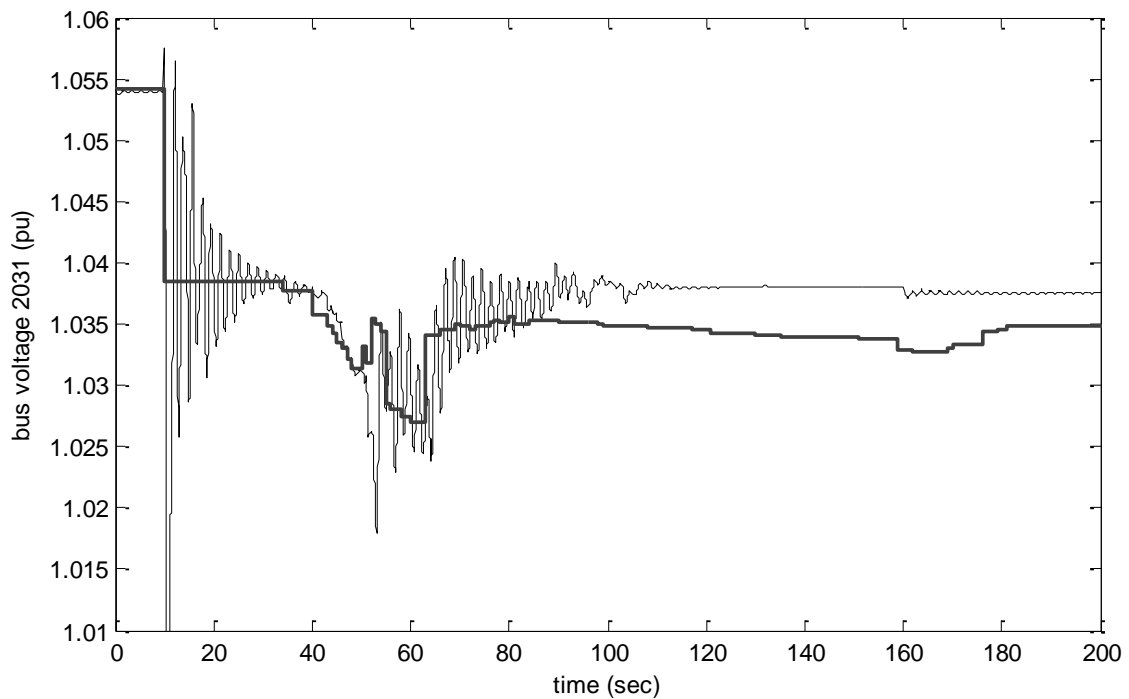
Σχήμα 6.6 Τερματική τάση γεννήτριας g14



Σχήμα 6.7 Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4043 κεντρικής περιοχής



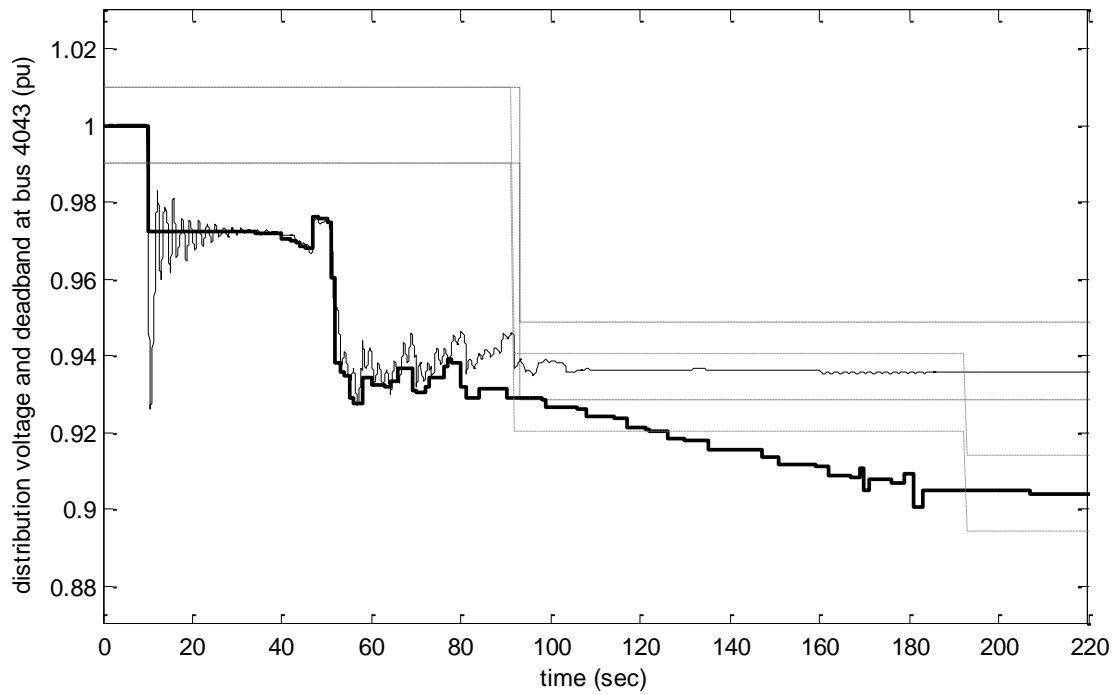
Σχήμα 6.8 Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4032



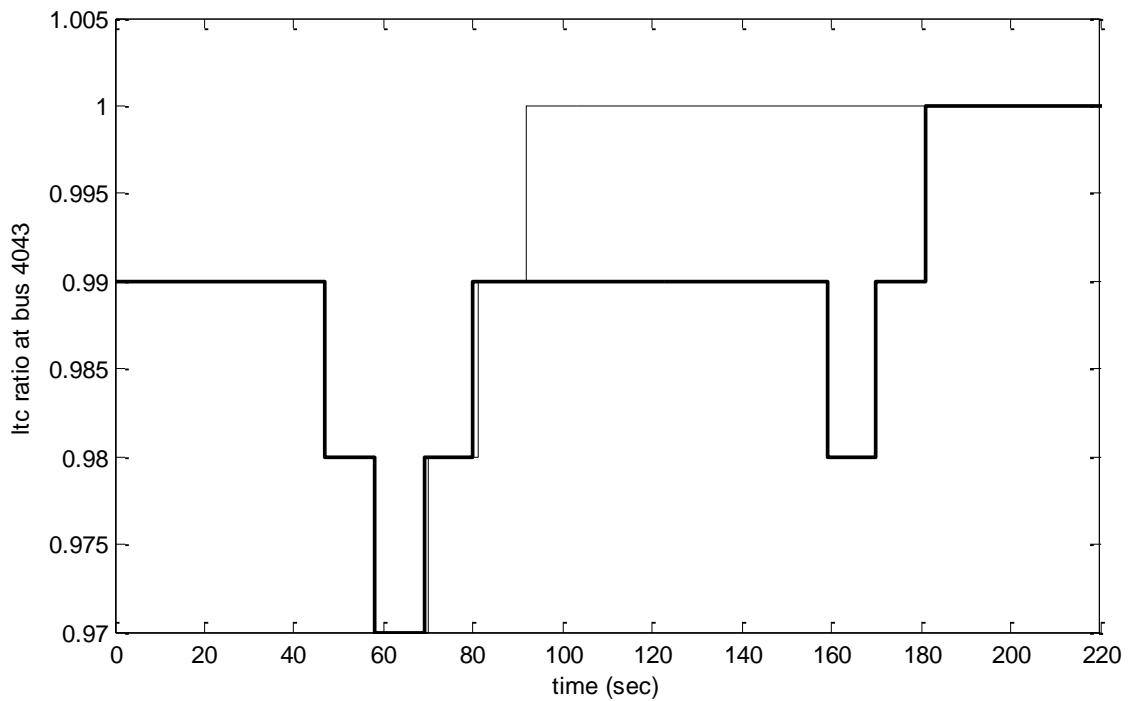
Σχήμα 6.9 Τάση ενδιάμεσου ζυγού 2031

Τα ίδια συμπεράσματα μπορούμε να εξάγουμε και στις αποκρίσεις της τάσης στους ζυγούς φορτίων που φαίνονται στα Σχήματα 6.10 έως 6.13, όπου η αχνή μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στα αποτελέσματα με χρήση του προγράμματος Simulink, ενώ η έντονη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στα αποτελέσματα του Wpstab. Στο ζυγό 4043 έχουμε απόκλιση ίδιας τάξης μεγέθους με την αντίστοιχη του ενδιάμεσου ζυγού. Αναλυτικά η τάση στο φορτίο του ζυγού 4043 παρουσιάστηκε και στα Σχήματα 6.4 και 6.5 για τα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Αποτέλεσμα της διαφορετικής λειτουργίας του συστήματος προστασίας είναι να έχουμε και διαφορετική τάση αναφοράς τελικά στη μόνιμη κατάσταση (Σχήμα 6.10). Επακόλουθα, και η λειτουργία του αντίστοιχου μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης (Σχήμα 6.11) διαφοροποιείται στα δύο προγράμματα.

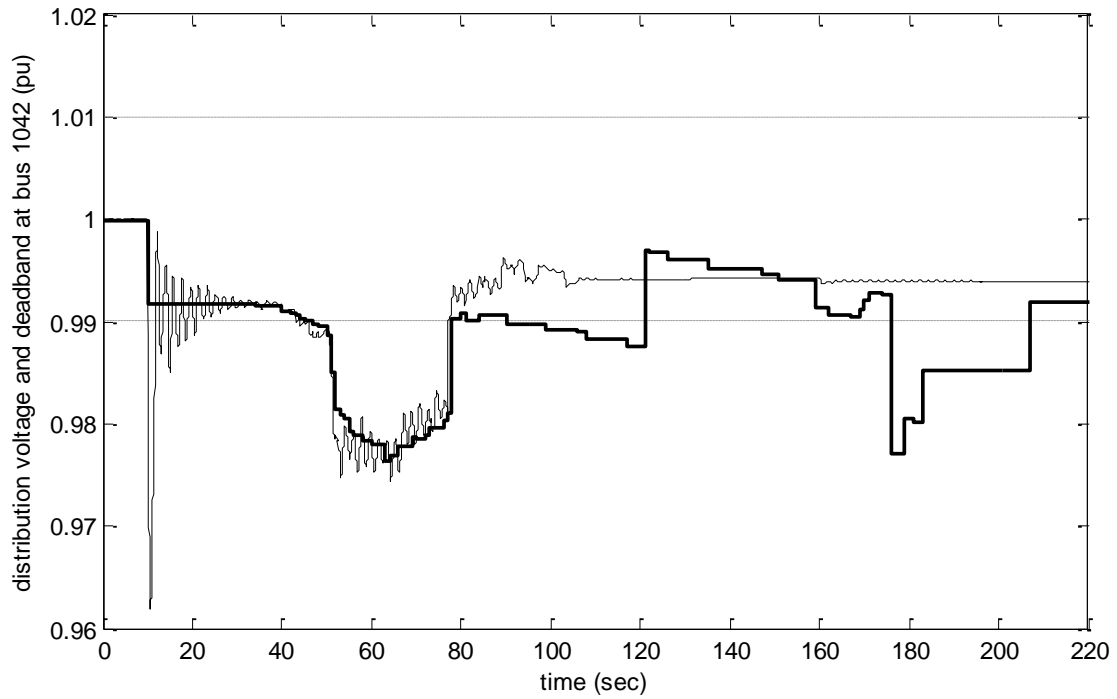
Όσον αφορά το ζυγό 1042 (Σχήμα 6.12), εδώ η τάση παρουσιάζει διαφοροποίηση λόγω της λειτουργίας του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης της γεννήτριας g6 που συνδέεται στο ζυγό αυτό. Η ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης εμφανίζεται με καθυστέρηση σχεδόν 100s όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Ενώ λοιπόν στο Simulink η τάση στο ζυγό σταθεροποιείται μετά τον περιορισμό του ρεύματος διέγερσης της γεννήτριας, στο οιονεί στατικό μοντέλο χρειάζεται περισσότερος χρόνος για σταθεροποίηση της τάσης. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ίδια και εδώ, μόνο που το οιονεί στατικό μοντέλο προβλέπει δυο παραπάνω αλλαγές λόγου μετασχηματισμού (Σχήμα 6.13). Στο φορτίο του ζυγού 4041, που δεν συνδέεται με τον 4047 η απόκριση τάσης είναι ίδια στα δυο μοντέλα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14. Η διαφορά είναι ότι στο Wpstab χρειάστηκε μία παραπάνω αλλαγή λόγου μετασχηματισμού ώστε η τάση του ζυγού να επανέλθει εντός των ορίων λειτουργίας (Σχήμα 6.15).



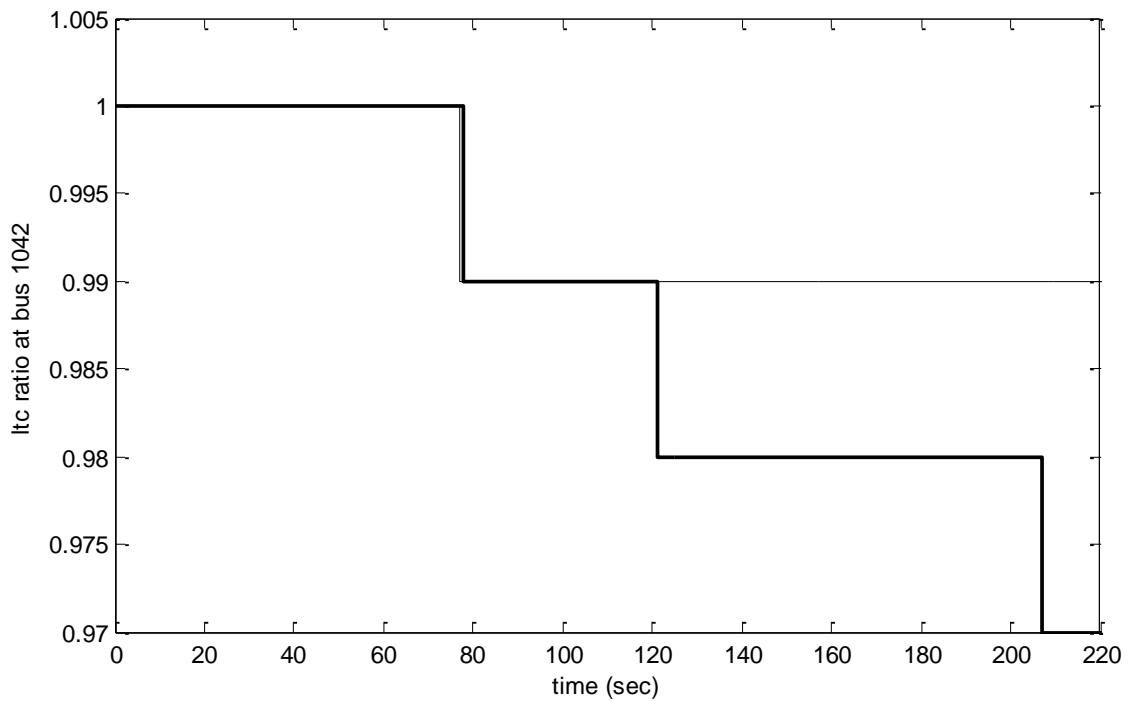
Σχήμα 6.10 Τάση στο ζυγό φορτίου 4043



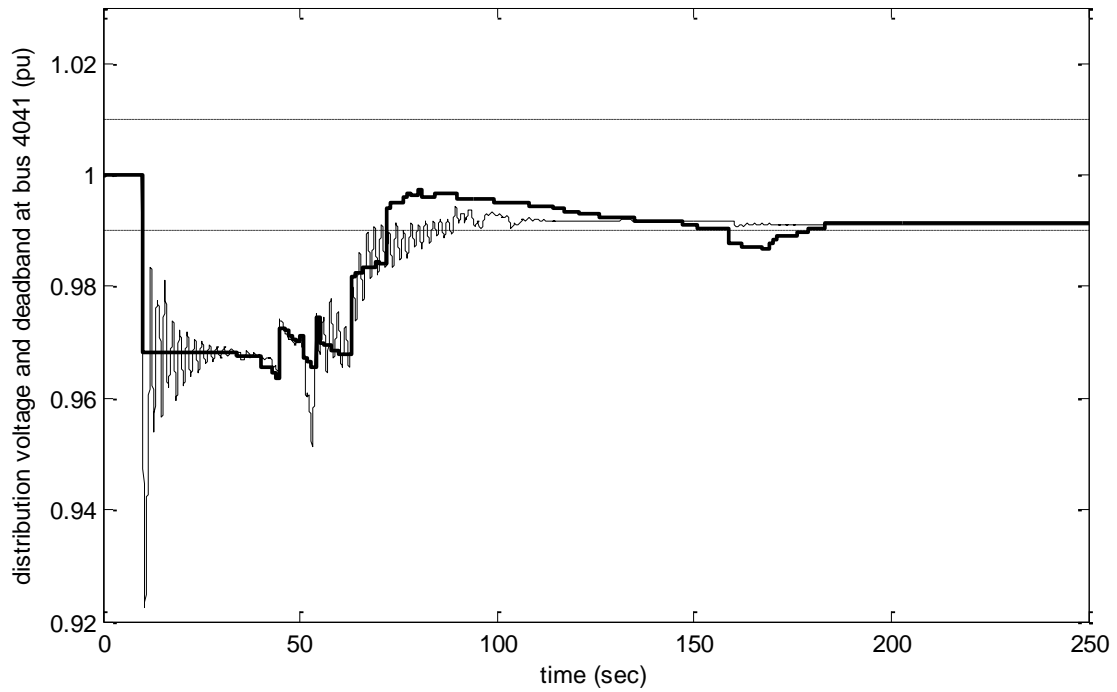
Σχήμα 6.11 Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 4043



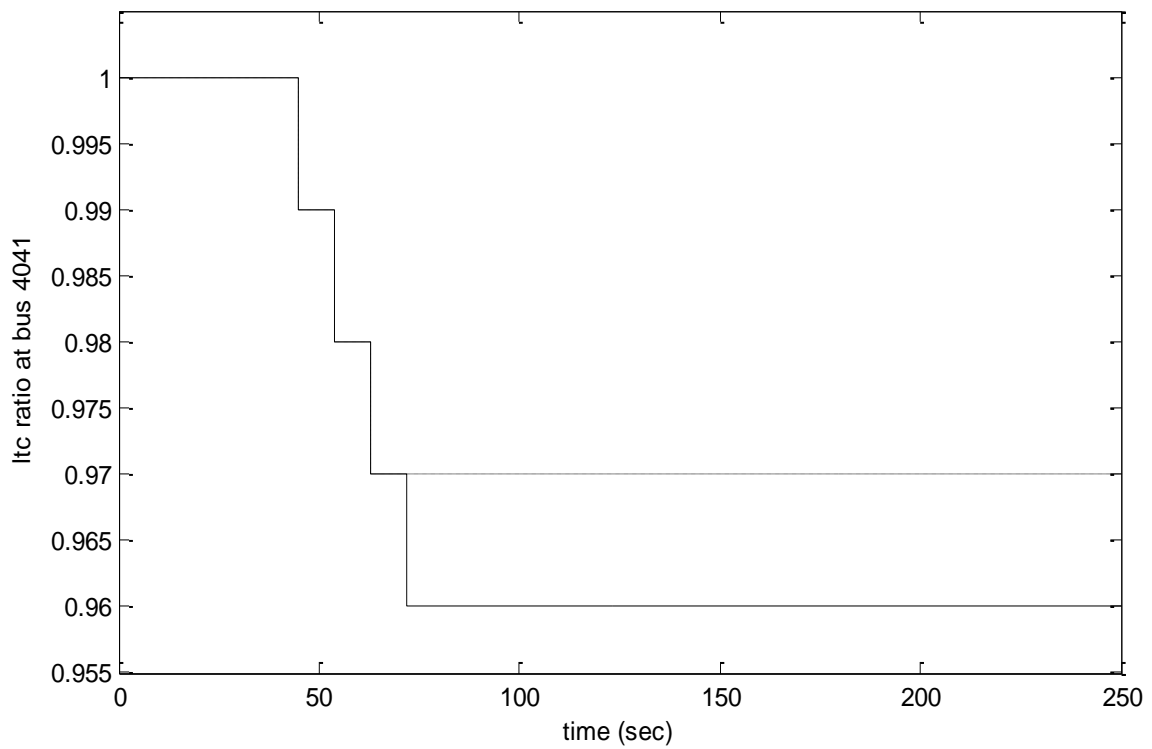
Σχήμα 6.12 Τάση στο ζυγό φορτίου 1042



Σχήμα 6.13 Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 1042



Σχήμα 6.14 Τάση στο ζυγό φορτίου 4041



Σχήμα 6.15 Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό φορτίου 4041

## 6.2 Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια

Και σε αυτή την περίπτωση με την ενεργοποίηση της προστασίας το σύστημα τελικώς ισορροπεί σε νέο σημείο λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στα δύο προγράμματα παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες διαφορές όσον αφορά τη λειτουργία των μηχανισμών αποκατάστασης φορτίου, αλλά η συνολική απόκριση του συστήματος είναι αρκετά παρόμοια. Όσον αφορά την υπερδιέγερση των γεννητριών, η ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας φαίνεται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7 Χρόνος ενεργοποίησης συστήματος υπερδιέγερσης γεννητριών(case2)

Γεννήτριες συστήματος όπου ενεργοποιείται στο σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ)	Χρόνος ενεργοποίησης στο πλήρες μοντέλο (Simulink) (s)	Χρόνος ενεργοποίησης στο μοντέλο οιονει στατικής προσέγγισης (Wpstab) (s)
g7	94.62	93.00
g14	101.00	104.00
g15	411.90	346.00
g16	472.86	399.00
g12	551.63	420.00
g6	569.41	δεν υπερδιεγείρεται

Παρατηρούμε ότι έχουμε αρκετή απόκλιση στο χρόνο ενεργοποίησης στα δύο προγράμματα, όπως και στα αποτελέσματα χωρίς την εφαρμογή του συστήματος προστασίας από αστάθεια τάσης.

Όσον αφορά την ενεργοποίηση συναγερμού και την αποκατάσταση ευστάθειας, τα αποτελέσματα παραθέτονται στους Πίνακες 6.8 και 6.9 για κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης αντίστοιχα.

Στην προσομοίωση με το Simulink τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον Πίνακα 6.8 ο συναγερμός ενεργοποιείται σε τρεις ζυγούς, με άμεση αποκατάσταση. Στα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από την προσομοίωση με το Wpstab έχουμε σήμα συναγερμού στους δυο από τους τρεις ζυγούς που δίνουν σήμα συναγερμού και στο Simulink (Πίνακας 6.8), αλλά έχουμε και επιπλέον συναγερμούς στους ζυγούς 1045 και 4046, ενώ δεν έχουμε σήμανση συναγερμού στο ζυγό 4043.



**Πίνακας 6.8** Χρόνοι ενεργοποίησης συναγερμού και αποκατάστασης στην προσομοίωση με το Simulink (case2)

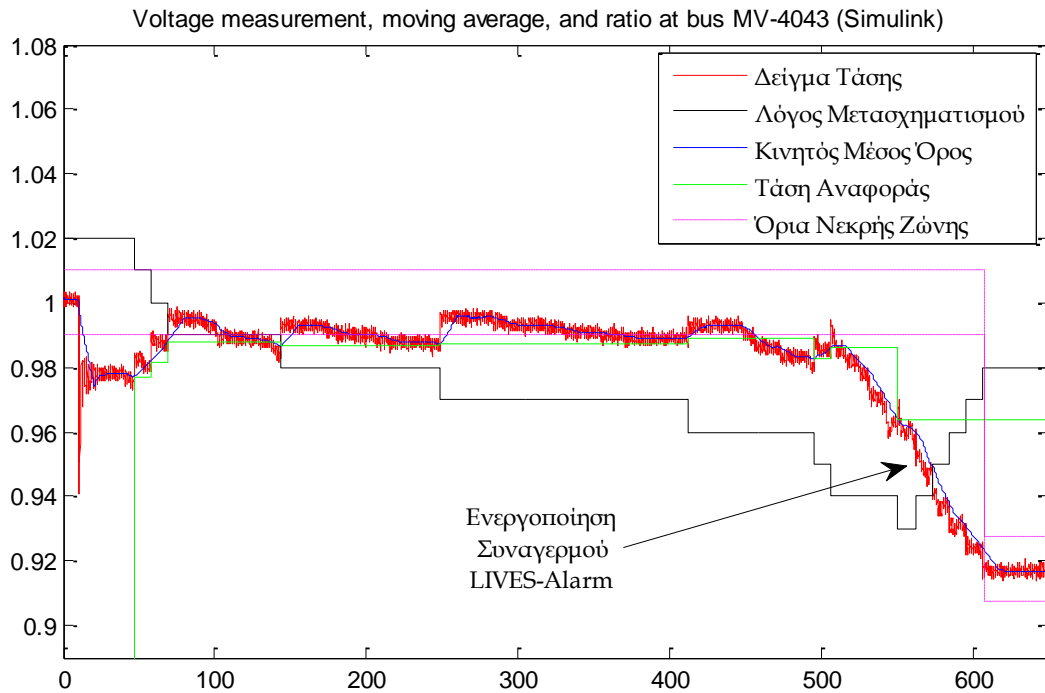
Ζυγός	Χρόνος πρώτης ενεργοποίησης της lives alarm (s)	Χρόνος αποκατάστασης φορτίου μετά την ενεργοποίηση τις lives restore (s)	Νέα τάση αναφοράς (Vset σε αμ)
1041	520.90	595.05	0.8830
4051	561.40	590.25	0.9474
4043	561.85	607.90	0.9176

**Πίνακας 6.9** Χρόνοι ενεργοποίησης συναγερμού και αποκατάστασης στην προσομοίωση με το Wpstab (case2)

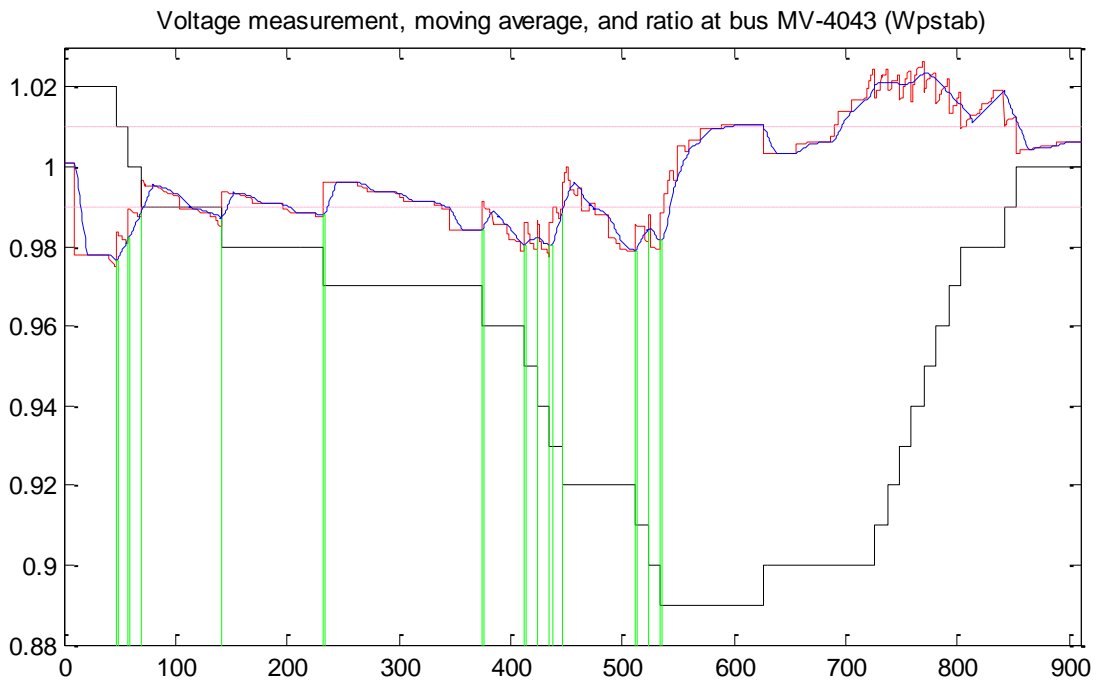
Ζυγός	Χρόνος ενεργοποίησης της lives alarm (s)	Χρόνος αποκατάστασης φορτίου μετά την ενεργοποίηση τις lives restore (s)	Νέα τάση αναφοράς (Vset σε αμ)
4051	435.00	453.00	0.9501
1041	438.00	462.00	0.9502
1045	438.00	482.00	0.9380
4046	538.00	562.00	0.9688
Δεύτερη ενεργοποίηση αποκατάστασης φορτίου			
4051	534.00	552.00	0.9224
1041	537.00	561.00	0.9245

Στη συνέχεια παραθέτουμε την απόκριση τάσης στα φορτία των ζυγών 4043, 1041 και 1045 για να εξετάσουμε το λόγο που η μέθοδος ανίχνευσης αστάθειας λειτούργησε διαφορετικά σε καθένα από αυτούς τους ζυγούς, στα δύο προγράμματα προσομοίωσης.

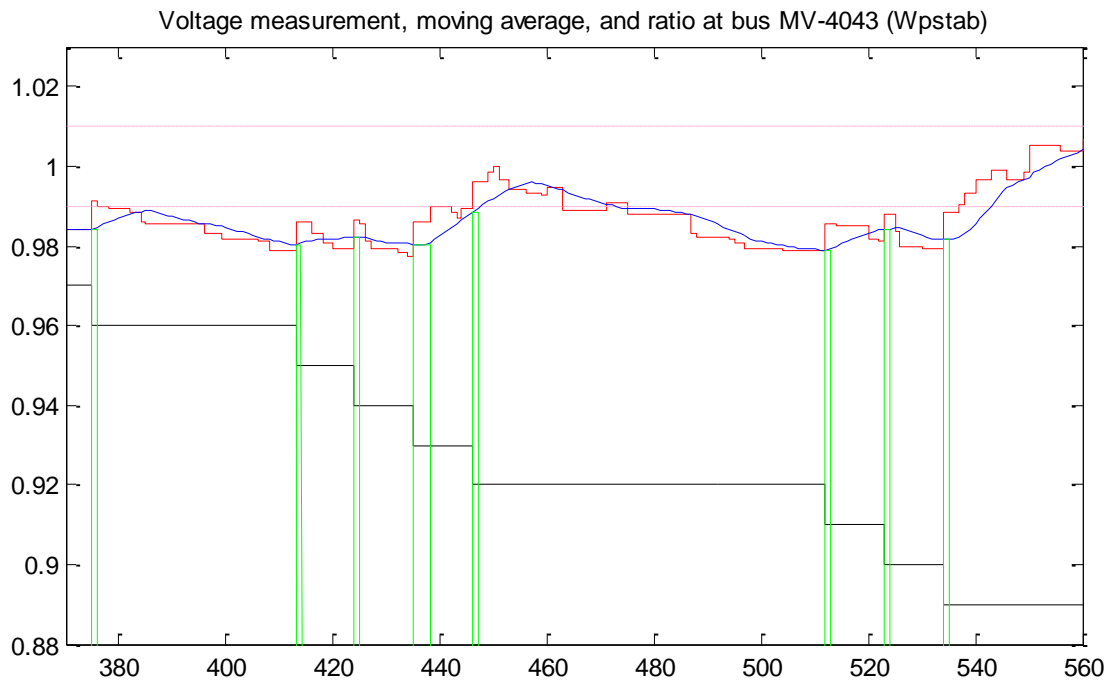
Στα Σχήματα 6.16 έως 6.18 έχουμε την απόκριση στο ζυγό 4043. Στην προσομοίωση του συστήματος με χρήση του μοντέλου δύο χρονικών κλιμάκων στο Simulink, ο αλγόριθμος ανίχνευσης αστάθειας τάσης σημαίνει συναγερμό σε χρόνο 561.85s, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.8 και στο Σχήμα 6.16. Μέχρι εκείνη τη χρονική στιγμή, η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ κατάφερε να διατηρεί την τάση εντός των ορίων σταθερής λειτουργίας, αλλά κοντά στα 500s η τάση μειώθηκε αρκετά, κάτω από το κατώτατο όριο λειτουργίας, αποτέλεσμα του οποίου ήταν η σήμανση συναγερμού και η έναρξη ανάστροφης λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ για αποκατάσταση της τάσης. Από το Σχήμα 6.17 και 6.18 όμως παρατηρούμε ότι με το οιονεί στατικό μοντέλο, η λειτουργία του μηχανισμού αλλαγής τάσης υπό φορτίο καταφέρνει να επαναφέρει και να διατηρήσει την τάση εντός των ορίων λειτουργίας, και δεν εκδηλώνεται τελικά αστάθεια τάσης στο ζυγό.



Σχήμα 6.16 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 (Simulink)



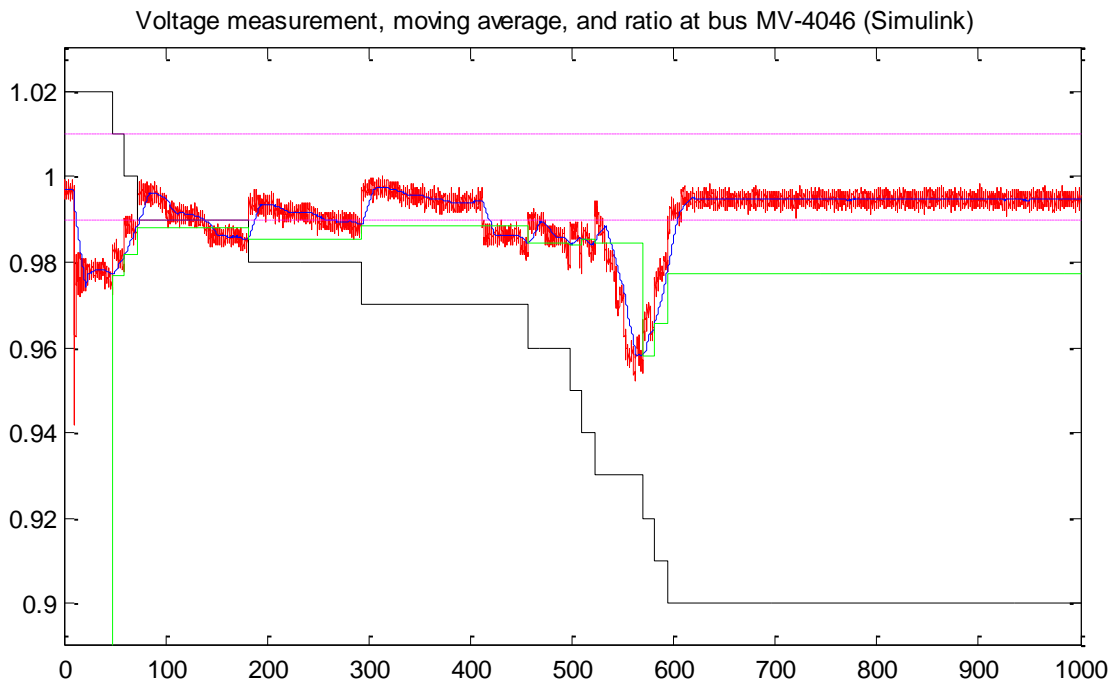
Σχήμα 6.17 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 (Wpstab)



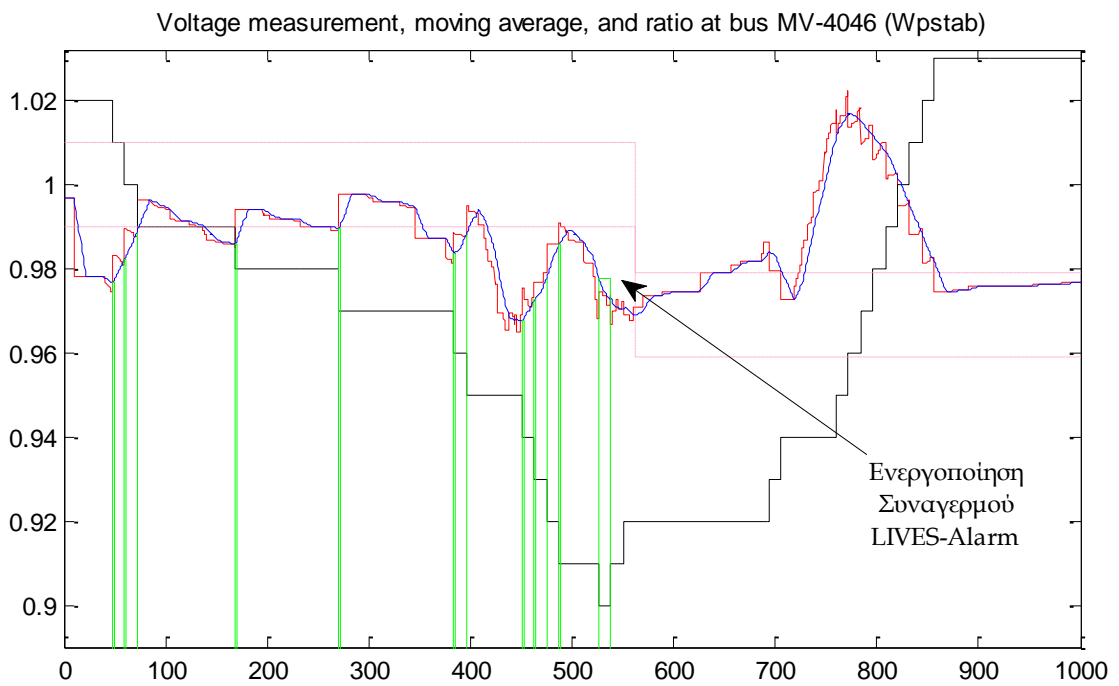
**Σχήμα 6.18** Λειτουργία LIVES στο ζυγό 4043 με εστίαση στο σημείο όπου ο αλγόριθμος προσπαθεί να εντοπίσει πιθανή αστάθεια τάσης.

Αποτέλεσμα της μη ενεργοποίησης συναγερμού στο φορτίο του ζυγού 4043 με χρήση του Wpstab, είναι η διατήρηση της τάσης στο ζυγό 4043 σε χαμηλότερα επίπεδα, κάτι που επηρεάζει επακόλουθα και την τάση στο ζυγό 4046 με τον οποίο συνδέονται άμεσα. Για το λόγο αυτό, ενώ στο Simulink δεν έχουμε ενεργοποίηση συναγερμού στο ζυγό 4046, καθώς η τάση διατηρείται εντός ορίων λειτουργίας, στο οιονεί στατικό μοντέλο η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ δεν επιτυγχάνει διατήρηση σταθερής τάσης με αποτέλεσμα να έχουμε σήμανση συναγερμού και ανάγκη για αποκατάσταση τάσης με έμμεση αποκοπή φορτίου. Οι αντίστοιχες αποκρίσεις για το φορτίο του ζυγού 4046 φαίνονται στα Σχήματα 6.19 και 6.20.

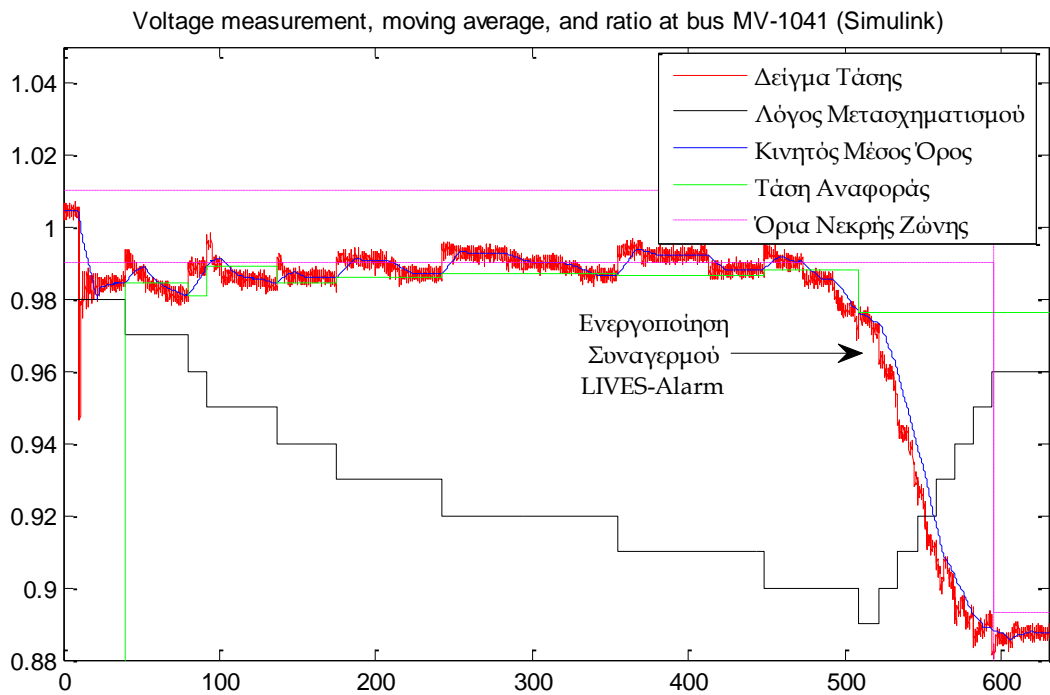
Όσον αφορά τους ζυγούς 1041 και 4051 όπου στο Wpstab έχουμε δυο φορές ανίχνευση αστάθειας, ενώ στο Simulink μόνο μία, η απόκριση τάσης και η λειτουργία της μεθόδου είναι παρόμοια και στους δυο ζυγούς. Παραθέτουμε λοιπόν την απόκριση τάσης με τη λειτουργία της μεθόδου σε Simulink και Wpstab στα Σχήματα 6.21 και 6.22 αντίστοιχα.



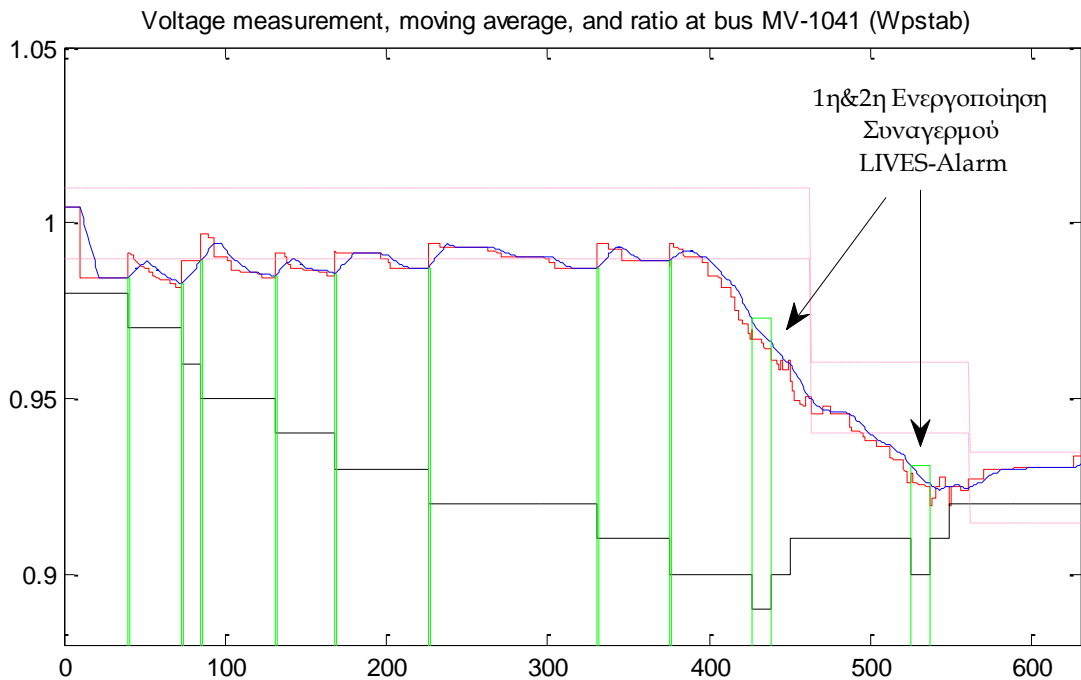
Σχήμα 6.19 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4046 (Simulink)



Σχήμα 6.20 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 4046 (Wpstab)



Σχήμα 6.21 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 1041 (Simulink)



Σχήμα 6.22 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES στο ζυγό 1041 (Wpstab)

Από τα Σχήματα 6.21 και 6.22 παρατηρούμε ότι η σήμανση συναγερμού στο ζυγό 1041 στο Simulink είναι χρονικά κοντά με τη σήμανση 2<sup>ο</sup> συναγερμού με το Wpstab. Δηλαδή η τάση στο ζυγό 1041 διατηρήθηκε εντός ορίων μέχρι τα 500s περίπου στο Simulink και μετά ανιχνεύθηκε αστάθεια. Στο Wpstab, η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ διασφάλισε σταθερή τάση μέχρι τα 400s περίπου, όπου έχουμε και την πρώτη σήμανση συναγερμού. Μετά την ανίχνευση αστάθειας, μπαίνει σε λειτουργία ο μηχανισμός αποκατάστασης τάσης με έμμεση αποκοπή φορτίου. Όμως, η αποκατάσταση τάσης, που ολοκληρώθηκε σε χρόνο 462s, δεν ήταν αποτελεσματική για τη σταθεροποίηση της τάσης εντός της νέας νεκρής ζώνης. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δεύτερη ανίχνευση αστάθειας, που πραγματοποιείται σε χρόνο 537s και όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.22 επιτυγχάνει σταθεροποίηση τάσης σε χαμηλότερα όρια.

Όσον αφορά την ενεργοποίηση συναγερμού στο ζυγό 1045 στην προσομοίωση του συστήματος με το Wpstab, παρατηρούμε το ίδιο φαινόμενο με το ζυγό 4046. Δηλαδή ενώ στο μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων η λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης επιτυγχάνει σταθερή τάση εντός των ορίων λειτουργίας με μείωση του λόγου μετασχηματισμού, στο οιονεί στατικό μοντέλο ανιχνεύεται αστάθεια τάσης η οποία αποκαθίσταται με έμμεση αποκοπή φορτίου.

Διαπιστώνουμε λοιπόν, ότι σε αντίθεση με την Περίπτωση 1, όταν έχουμε οριακή αστάθεια του συστήματος τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα επενεργούν και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση τάσης και επακόλουθα και τη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς σε μεγάλη φόρτιση του συστήματος και μετά από μία διαταραχή, οι τάσεις στους διασυνδεδεμένους ζυγούς μειώνονται απότομα με αποτέλεσμα τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα να μην επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία ανίχνευσης. Στην οριακή κατάσταση της Περίπτωσης 2 που εξετάζεται όμως, οι τάσεις στους κεντρικούς ζυγούς του συστήματος είναι είτε οριακά εκτός, είτε οριακά εντός των ορίων λειτουργίας με αποτέλεσμα η δράση των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων να προκαλεί τη διαφορετική λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης.

Επίσης, στην προσομοίωση του συστήματος στο Wpstab, στο ζυγό 1044, το ΣΑΤΥΦ εξαντλεί όλα τα βήματά του μέχρι το κατώτατο όριο ( $r_{min} = 0.88$ ), με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται ο αλγόριθμος αποκατάστασης περιοχής ελέγχου των ΣΑΤΥΦ, δίνοντας σήμα να μειωθεί η τάση αναφοράς στο 0.95αμ από το 1.00αμ που είναι σε όλους τους ζυγούς φορτίου του συστήματος ώστε να επαναλειτουργήσει. Στην προσομοίωση του συστήματος με χρήση του προγράμματος Simulink δεν έχουμε ενεργοποίηση του αλγορίθμου αποκατάστασης περιοχής ελέγχου (LTC range restoration) σε κανένα ζυγό, παρόλο που τα ΣΑΤΥΦ στους ζυγούς 1043, 1044 και 1045 εξαντλούν τα όλα τα βήματα μέχρι το κατώτατο όριο. Η τάση όμως μετά την εξάντληση των βημάτων λόγω μετασχηματισμού έχει αποκατασταθεί εντός της νεκρής ζώνης, και δεν υπάρχει λόγος

εφαρμογής του αλγορίθμου. Παραθέτουμε στον Πίνακα 6.10 την τελική τάση αναφοράς στους ζυγούς φορτίου της κεντρικής περιοχής του συστήματος για τα δύο προγράμματα. Στους υπόλοιπους ζυγούς φορτίων δεν έχουμε αλλαγή της τάσης αναφοράς καθώς είναι απομακρυσμένοι από τη διαταραχή και η τάση λειτουργίας τους δεν επηρεάζεται σε τόσο μεγάλο βαθμό.

**Πίνακας 6.10** Τελική τάση αναφοράς στους ζυγούς κεντρικής περιοχής του συστήματος που πλήττονται από τη διαταραχή

Ζυγός	Τελική τάση αναφοράς για ζυγούς κεντρικής περιοχής στα αποτελέσματα του Simulink (Vset σε αμ)	Τελική τάση αναφοράς για ζυγούς κεντρικής περιοχής στα αποτελέσματα του Wpstab (Vset σε αμ)
1041	0.8830	0.9245
1042	1.0000	1.0000
1043	1.0000	1.0000
1044	1.0000	0.9500
1045	1.0000	0.9380
4041	1.0000	1.0000
4042	1.0000	1.0000
4043	0.9176	1.0000
4046	1.0000	0.9688
4047	1.0000	1.0000
4051	0.9474	0.9224

Όσον αφορά την έμμεση αποκοπή φορτίου, συγκεντρώνουμε στον Πίνακα 6.11 τα αποτελέσματα για τα δύο προγράμματα προσομοίωσης. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγινε όπως και στην περίπτωση 1 βάσει της σχέσης (6.1).

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή η διαφορά στη συνολική αποκοπή φορτίου ανάμεσα στα δύο μοντέλα προσομοίωσης δεν είναι τόσο έντονη όσο στην περίπτωση 1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εδώ η φόρτιση του συστήματος είναι μικρότερη και η περίπτωση οριακή. Πάλι το Wpstab δίνει συντηρητικά αποτελέσματα σε σχέση με το Simulink (μεγαλύτερη αποκοπή). Παραθέτουμε στη συνέχεια ορισμένα διαγράμματα για την απόκριση του συστήματος.

Όσον αφορά τις τερματικές τάσεις των γεννητριών, ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα είναι αυτό της γεννήτριας g12 που βρίσκεται κοντά στη διαταραχή. Το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης ενεργοποιείται με χρονική διαφορά 132s στα δύο μοντέλα προσομοίωσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.23. Όπως παρατηρούμε η συμπεριφορά

της γεννήτριας είναι παρόμοια, με κύρια διαφορά τη χρονική μετατόπιση που παρατηρήσαμε για την περίπτωση αυτή και στην ανάλυση του συστήματος χωρίς προστασία. Η διαφορά τάσης μετά την αποκατάσταση ευστάθειας στο σύστημα δεν είναι μεγάλη, και το οιονεί στατικό μοντέλο εμφανίζεται να αποκλίνει στο 2<sup>ο</sup> δεκαδικό ψηφίο σε σχέση με το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων.

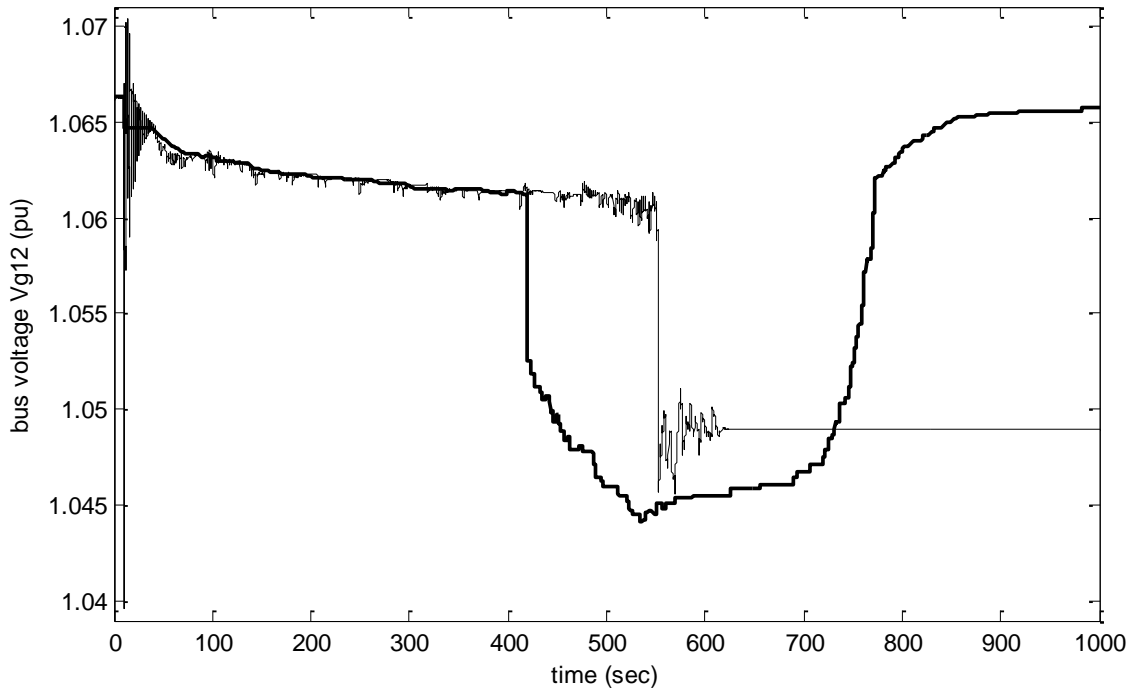
Πίνακας 6.11 Συνολική έμμεση αποκοπή φορτίου στα δύο μοντέλα

Ζυγοί φορτίου κεντρικής περιοχής	Αρχική Ζήτηση φορτίου σε κάθε ζυγό (MW)	Αποκοπή φορτίου στο μοντέλο του Simulink (MW)	Αποκοπή φορτίου στο μοντέλο του Wpstab (MW)
1041	553.00	65.00	41.00
1042	219.00	0.00	0.00
1043	190.00	0.00	0.00
1044	750.00	0.00	38.00
1045	661.00	0.00	41.00
4041	536.00	0.00	0.00
4042	398.00	0.00	0.00
4043	897.00	74.00	0.00
4046	707.00	0.00	22.00
4047	101.00	0.00	0.00
4051	800.00	42.00	62.00
Συνολική αποκοπή φορτίου		181.00	204.00

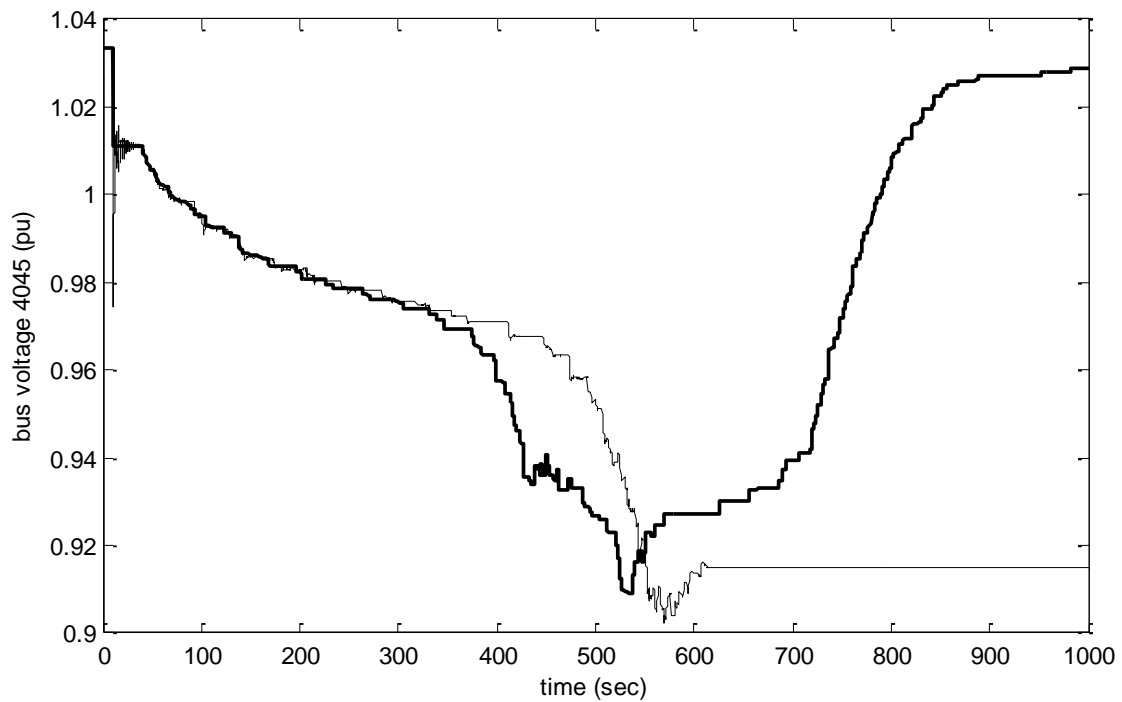
Όσον αφορά τους ενδιάμεσους ζυγούς, έχουμε κι εδώ παρόμοια συμπεριφορά με το ζυγό 4045 που απεικονίζεται στο Σχήμα 6.24. Πρόκειται για ζυγό της κεντρικής περιοχής και παρατηρούμε ότι αρχικά η απόκριση των δύο προσομοιώσεων είναι παραπλήσια, ενώ από  $t = 400$  s και μετά έχουμε βύθιση τάσης στο ζυγό, η οποία εμφανίζεται με μία χρονική απόκλιση περίπου 70 s στις δύο προσομοιώσεις, όση και η απόκλιση στην ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης στην γεννήτρια g16 του συστήματος που είναι κοντά στο ζυγό. Η τιμή στην οποία σταθεροποιείται η τάση στο ζυγό τελικώς έχει αρκετή απόκλιση ανάμεσα στα δύο προγράμματα. Αυτή η μεγάλη απόκλιση οφείλεται κυρίως στη συμπεριφορά της τάσης στο ζυγό 4043 όπου ο αλγόριθμος ανίχνευσης και προστασίας από κατάρρευση τάσης δεν ενεργοποιείται στο Wpstab, με αποτέλεσμα να έχουμε απόκλιση περίπου 1αμ στην τελική τιμή τάσης μετά την αποκατάσταση. Στην απόκλιση των δύο προγραμμάτων συμβάλλει και η διαφορά στη λειτουργία του συστήματος προστασίας στους ζυγούς 1045 και 4046. Παρατηρούμε ακόμα, ότι το



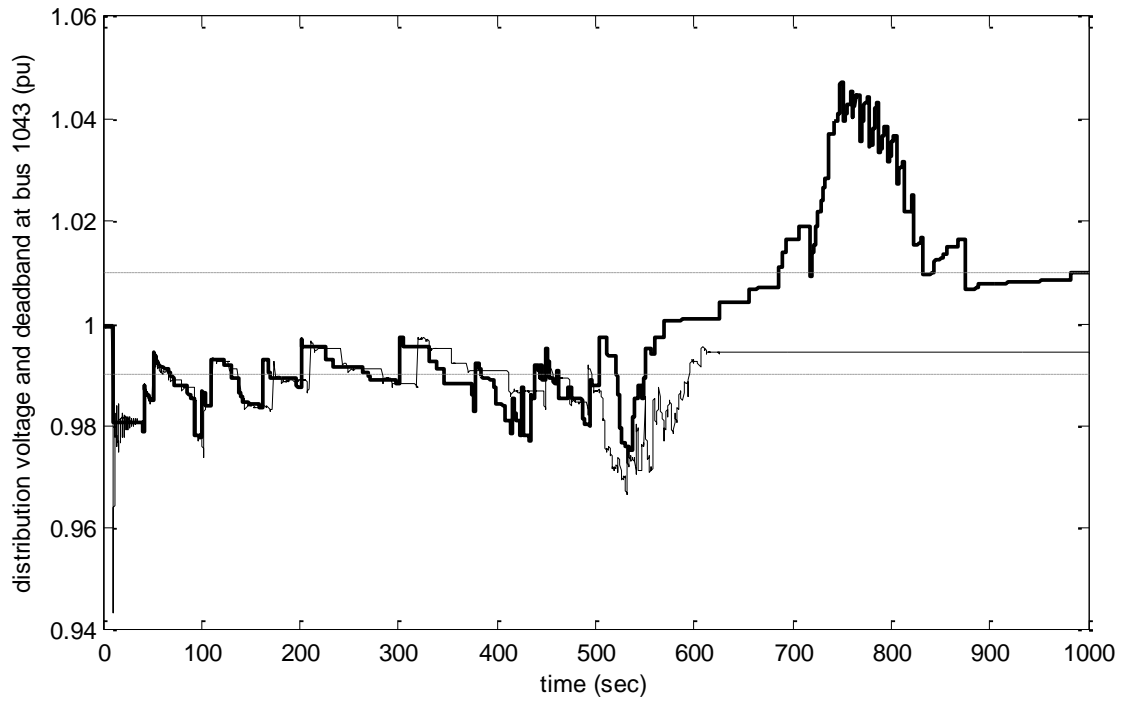
μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων προβλέπει αποκατάσταση ευστάθειας στο σύστημα σε μικρότερο χρόνο από ότι το οιονεί στατικό μοντέλο.



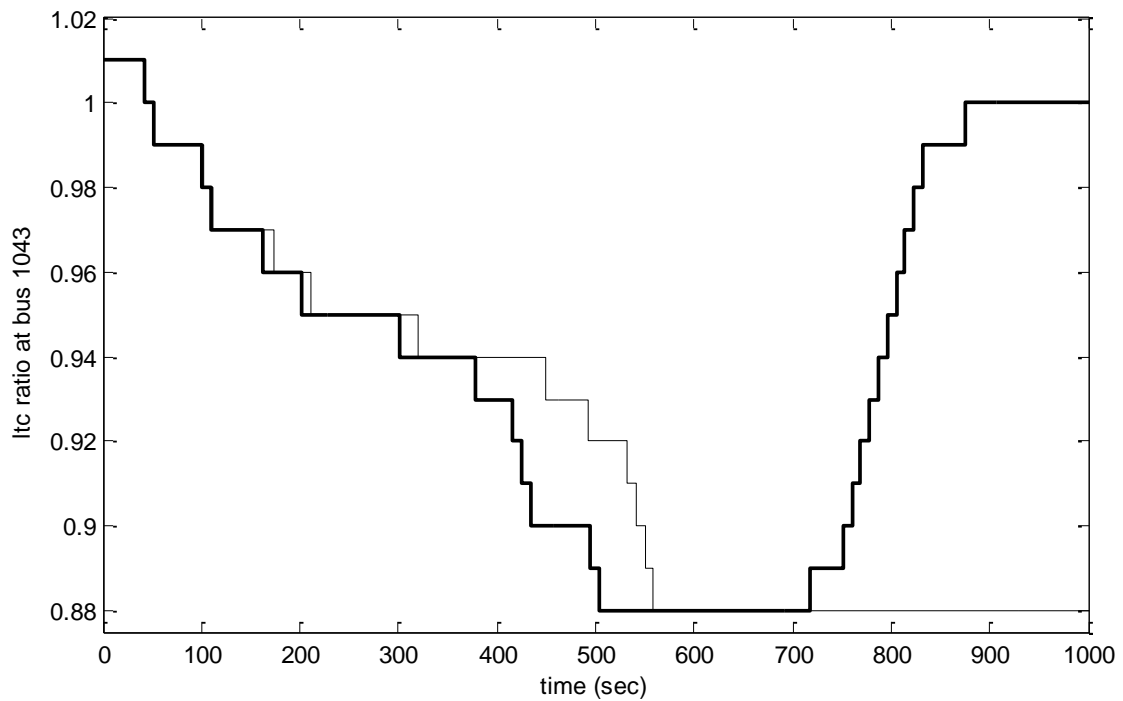
Σχήμα 6.23 Τερματική τάση γεννήτριας g12



Σχήμα 6.24 Τάση ενδιάμεσου ζυγού 4045 κεντρικής περιοχής



Σχήμα 6.25 Τάση στο ζυγό φορτίου 1043 μαζί με τα όρια νεκρής ζώνης



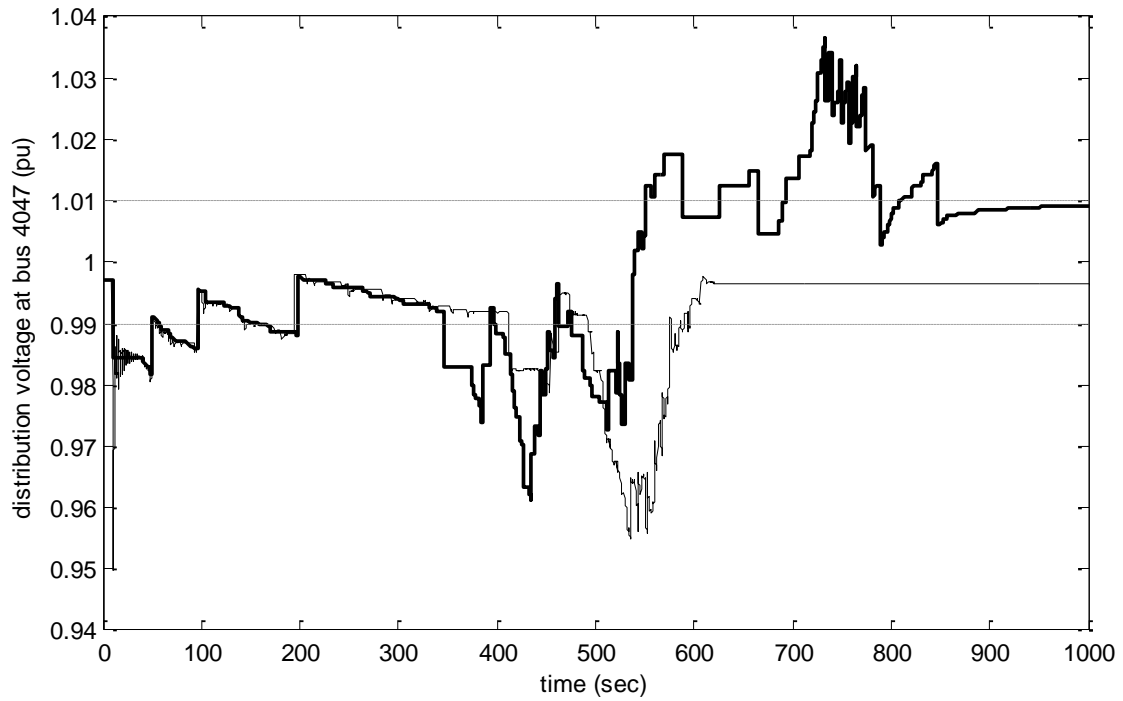
Σχήμα 6.26 Λόγος μετασχηματισμού στο ΣΑΤΥΦ του ζυγού 1043

Όσον αφορά την τάση στους ζυγούς φορτίου και τον αντίστοιχο λόγο μετασχηματισμού, παρουσιάζουμε για τα φορτία 1043 και 4047 τα Σχήματα 6.25 έως 6.28. Με διακεκομμένη γραμμή είναι η τάση του ζυγού στην προσομοίωση πλήρους μοντέλου και με συνεχόμενη αντίστοιχα, το αποτέλεσμα προσομοίωσης με το μοντέλο οιονεί στατικής προσέγγισης. Στο Σχήμα 6.25 φαίνονται και τα αντίστοιχα όρια νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ. Τα ίδια ισχύουν και για το λόγο μετασχηματισμού.

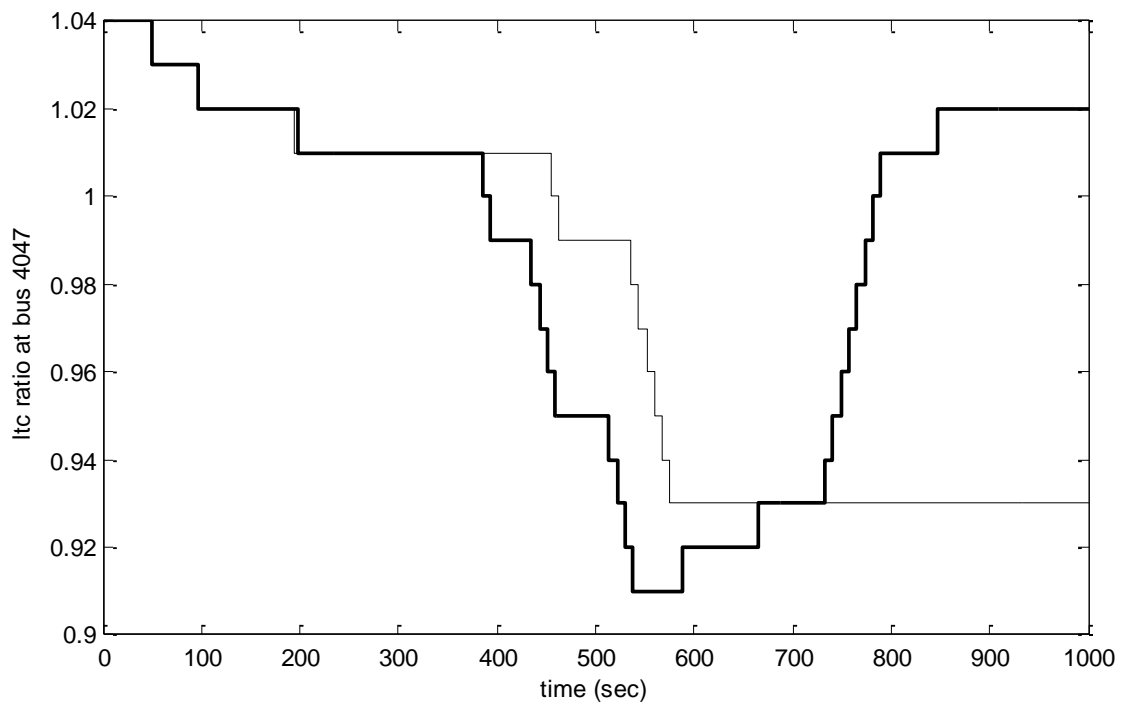
Στο Σχήμα 6.25 έχουμε την τάση στο φορτίο του ζυγού 1043. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά της τάσης είναι αρχικά όμοια στα δυο προγράμματα προσομοίωσης. Μετά τα 500s όμως, που η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης διαφοροποιείται στα δύο προγράμματα παρατηρούμε διαφορά στην απόκριση τάσης στο ζυγό. Όσον αφορά το λόγο μετασχηματισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.26, αρχικά έχουμε τις ίδιες αλλαγές λήψης με μία χρονική μετατόπιση, μέχρι που ο λόγος μετασχηματισμού εξαντλείται στο κατώτατο όριο του και στα δύο προγράμματα. Μετά την εξάντληση των βημάτων του ΣΑΤΥΦ, η τάση στο ζυγό αποκαθίσταται εντός της νεκρής ζώνης στο Simulink, ενώ στο Wpstab η τάση μετά από κάποιο χρόνο ξεπερνά τα όρια λειτουργίας και το ΣΑΤΥΦ χρειάζεται να μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού με σκοπό τη μείωση της τάσης αυτή φορά. Για το λόγο αυτό, οι αλλαγές λόγου μετασχηματισμού γίνονται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Από την απόκριση τάσης του φορτίου στο ζυγό 1043, που είναι όμοια με την απόκριση τάσης των ζυγών 4043 και 4046 που παρουσιάστηκε στα Σχήματα 6.16 έως 6.20, και είναι χαρακτηριστική για την απόκριση τάσης στο σύστημα, είναι εμφανές ότι το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων χρειάστηκε περίπου 600s για την αποκατάσταση ευστάθειας στο σύστημα μετά τη διαταραχή ενώ το οιονεί στατικό μοντέλο ολοκλήρωσε την αποκατάσταση περίπου στα 850s.

Στα Σχήματα 6.27 και 6.28 αντίστοιχα έχουμε την απόκριση τάσης και λόγου μετασχηματισμού στο φορτίο 4047. Και εδώ η απόκριση τάσης είναι όμοια με την απόκριση όλων των ζυγών της κεντρικής περιοχής του συστήματος.

Συμπερασματικά, μπορούμε να εξαγάγουμε το συμπέρασμα ότι, όπως και στην Περίπτωση 1, οι μηχανισμοί επαναφοράς τάσης λειτουργούν με αρκετά διαφορετικό τρόπο σε κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης. Παρόλα αυτά, η συμπεριφορά της τάσης είναι παρόμοια στα δύο προγράμματα, με μία χρονική διαφορά που όπως είπαμε οφείλεται στα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα που θεωρούμε σε ισορροπία στο οιονεί στατικό μοντέλο.



Σχήμα 6.27 Τάση στο ζυγό φορτίου 4047 με τα όρια λειτουργίας



Σχήμα 6.28 Λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 4047

## **7. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΑ ΣΑΤΥΦ**

Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάσαμε τα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος Nordic32 με τα δύο μοντέλα ανάλυσης συστήματος. Στο παρόν Κεφάλαιο κάνουμε μία τροποποίηση στο υπάρχον σύστημα, στους μετασχηματιστές 4011-1011, 4012-1012, 4022-1022, 4031-2031, 4044-1044 και 4045-1045, αντικαθιστώντας τους αυτομετασχηματιστές που υπάρχουν με μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Εκτός αυτού μεταβάλλουμε ανάλογα τους χρόνους λειτουργίας των υπάρχοντων μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης ώστε να έχουμε δεδομένα που προσεγγίζουν ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ. Στη συνέχεια εκτελούμε εκ νέου τη προσομοίωση του συστήματος και με τα δύο προγράμματα για την ίδια διαταραχή.

Το ζητούμενο στο σημείο αυτό είναι να εξετάσουμε την απόκριση του συστήματος στη διαταραχή σε σύγκριση με το αρχικό σύστημα, όπου δεν είχαμε μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς υπερυψηλής - υψηλής τάσης. Για να μπορέσουμε να κάνουμε τη σύγκριση αυτή με ρεαλιστικό τρόπο θα πρέπει τα δεδομένα να είναι ακριβώς ίδια στα δύο συστήματα με μόνη διαφορά τους μετασχηματιστές σε αυτούς τους υποσταθμούς. Το σύστημα με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ περιγράφεται στην επόμενη ενότητα 7.1 και το αντίστοιχο σύστημα με το οποίο θα γίνει η σύγκριση είναι το αρχικό Nordic32 που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ, με τη διαφορά ότι οι χρόνοι απόκρισης των ΣΑΤΥΦ, είναι πλέον αυτοί που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2, ώστε να έχουμε ακριβώς ίδια δεδομένα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο προγραμμάτων για τα δύο επίπεδα φόρτισης του συστήματος που εξετάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.

### **7.1 Δεδομένα συστήματος με την εισαγωγή του δεύτερου επιπέδου**

Στο σύστημα Nordic32, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1, έχουμε μετασχηματιστές διανομής μεταβλητής λήψης στους ζυγούς φορτίου και αυτομετασχηματιστές σταθερής λήψης στους υποσταθμούς ζεύξης υπερυψηλής - υψηλής τάσης.

Σε πρώτη ανάλυση του συστήματος, θεωρούμε μια διαταραχή στο σύστημα και εξετάζουμε τις επιπτώσεις της διαταραχής αυτής με τα δυο προγράμματα προσομοίωσης συστημάτων ενέργειας. Οι μηχανισμοί που επενεργούν είναι τα συστήματα προστασίας

υπερδιέγερσης των γεννητριών καθώς και οι μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης στο επίπεδο διανομής.

Σε δεύτερη ανάλυση, αντικαθιστούμε τους αυτομετασχηματιστές σταθερής λήψης στους υποσταθμούς υπερυψηλής τάσης με μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης οι οποίοι πλέον συμμετέχουν στους μηχανισμούς αποκατάστασης φορτίου. Εισάγοντας αυτό το δεύτερο επίπεδο μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης στο σύστημα, εξετάζουμε σε αυτό το Κεφάλαιο τη συμπεριφορά του συστήματος στην ίδια διαταραχή.

Τα δεδομένα των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης που εισάγαμε στο σύστημα φαίνονται στον Πίνακα 7.1.

Πίνακας 7.1 Δεδομένα 2<sup>ου</sup> επιπέδου μετασχηματιστών

Υποσταθμοί Διασύνδεσης ΥΥΤ/ΥΤ	Αρχική τιμή λόγου μετασχηματισμού		Χρόνοι καθυστέρησης αλλαγής λόγου μετασχηματισμού		Τάση αναφοράς (voltage setpoint)	
	case1	case2	Td <sub>1</sub>	Td <sub>2</sub>	case1	case2
4011-1011	1.12	1.12	30	8	1.12	1.13
4012-1012	1.12	1.12	30	9	1.13	1.13
4022-1022	1.07	1.07	30	11	1.06	1.09
4031-2031	1.05	1.05	30	12	1.05	1.09
4044-1044	1.00	1.03	33	10	0.98	0.99
4044-1044	1.00	1.03	33	10	0.98	0.99
4045-1045	1.00	1.03	33	11	0.99	1.00
4045-1045	1.00	1.03	33	11	0.99	1.00

Για τους ήδη υπάρχοντες μετασχηματιστές διανομής στη χαμηλή τάση, τροποποιούμε τα δεδομένα όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.2, ώστε να αποφύγουμε ταλαντώσεις μεταξύ των δύο επιπέδων ΣΑΤΥΦ (δηλαδή η αποκατάσταση του επιπέδου ΥΤ να προηγείται της ενεργοποίησης του επιπέδου ρύθμισης ΜΤ).

Πίνακας 7.2 Νέα δεδομένα για τους υπάρχοντες μετασχηματιστές διανομής

Ζυγός	Χρόνος καθυστέρησης πρώτης ενεργοποίησης (Td <sub>1</sub> )	Χρόνος καθυστέρησης επόμενης ενεργοποίησης (Td <sub>2</sub> )
1011	50	18
1012	50	19
1013	30	10
1022	50	21
1041	30	12
1042	31	8
1043	32	9
1044	53	20
1045	54	21
2031	50	22
2032	30	8
4041	35	9
4042	36	10
4043	37	11
4046	38	12
4047	39	8
4051	30	9
4061	30	10
4062	30	11
4063	30	12
4071	30	9
4072	30	11

## 7.2 Περίπτωση 1 : Σφοδρή Αστάθεια

Στην περίπτωση αυτή που έχουμε μεγάλη φόρτιση του συστήματος όπως έχει ήδη διατυπωθεί στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, το σύστημα καταρρέει σε μικρό χρονικό διάστημα. Στην προσομοίωση του συστήματος με το πλήρες μοντέλο στο Simulink έχουμε κατάρρευση του συστήματος σε χρόνο 99s, ενώ με χρήση του Wpstab για το προσεγγιστικό μοντέλο ο αντίστοιχος χρόνος είναι στα 86s. Χωρίς την ύπαρξη του δεύτερου επιπέδου

μετασχηματιστών τα αντίστοιχα αποτελέσματα είναι 113s για το Simulink και 105s για το Wpstab.

Παρατηρούμε ότι η εισαγωγή του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών στο σύστημα δεν βελτιώνει την απόκριση του συστήματος ως προς την ευστάθεια τάσης. Αντιθέτως το σύστημα καταρρέει λίγο νωρίτερα σε σχέση με το αρχικό. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το επίπεδο ΥΥΤ/ΥΤ λειτουργεί ταχύτερα. Η διαφορά που παρατηρείται με την αλλαγή αυτή στο σύστημα αφορά τη λειτουργία του συστήματος προστασίας και ανίχνευσης αστάθειας τάσης. Δεδομένου ότι έχουμε τοποθετήσει μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης στους υποσταθμούς αυτούς, μπορούμε σε κάθε έναν από αυτούς τους μετασχηματιστές να εισάγουμε τη μέθοδο ανίχνευσης. Εκτελούμε λοιπόν την προσομοίωση του συστήματος με ενεργοποίηση μόνο της LIVES-alarm για ανίχνευση καθώς δεν μπαίνουμε στη διαδικασία σχεδιασμού προστασίας για το σύστημα με τα δύο επίπεδα ΣΑΤΥΦ. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος με ενεργοποίηση του συναγερμού φαίνονται στον Πίνακα 7.3 για την περίπτωση με και χωρίς το δεύτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ.

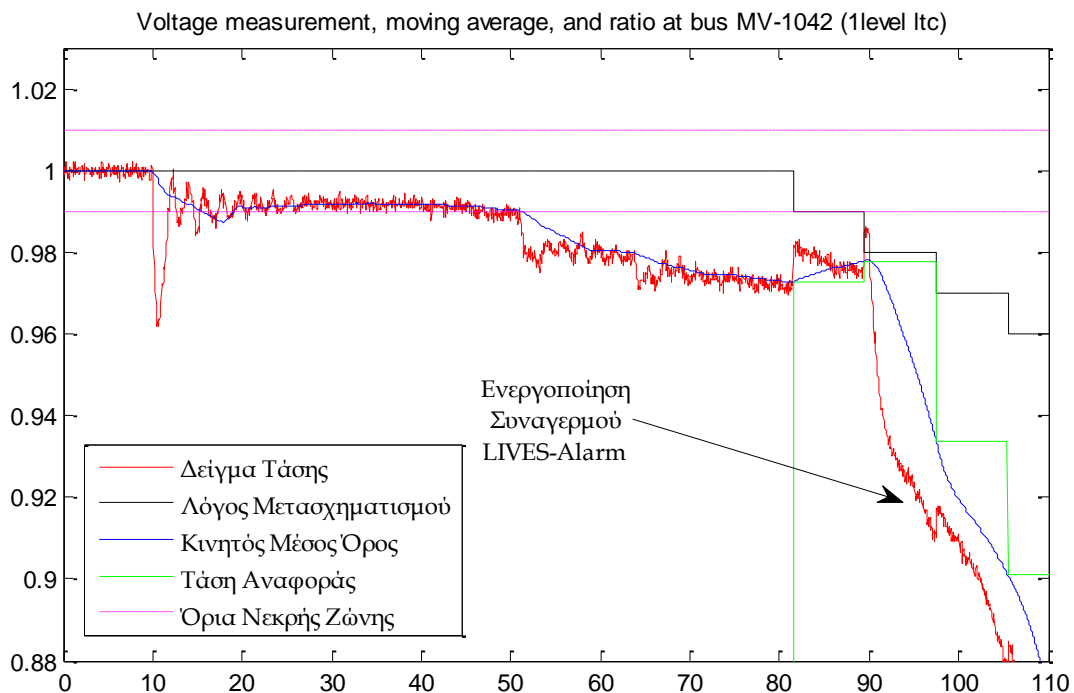
Παρατηρούμε ότι η απόκριση της LIVES-alarm είναι ακριβώς ίδια για όλους τους ζυγούς με εξαίρεση τον 1042 που στην περίπτωση ύπαρξης δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ δεν έχουμε ενεργοποίηση. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος με χρήση του προγράμματος Wpstab είναι όμοια με τα αντίστοιχα του Simulink, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4.

Στα Σχήματα 7.1 και 7.2 απεικονίζονται η τάση, ο κινητός μέσος όρος, ο λόγος μετασχηματισμού και η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης για την περίπτωση με ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η τάση στο ζυγό 1042 είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις. Η τάση βγαίνει εκτός των ορίων λειτουργίας κοντά στα 50s και η πρώτη αλλαγή λήψης πραγματοποιείται σε χρόνο  $t = 82 s$  και στις δυο περιπτώσεις. Η διαφορά είναι ότι το σύστημα με τα δύο επίπεδα ΣΑΤΥΦ καταρρέει νωρίτερα, και ο συναγερμός δεν προλαβαίνει να ενεργοποιηθεί.

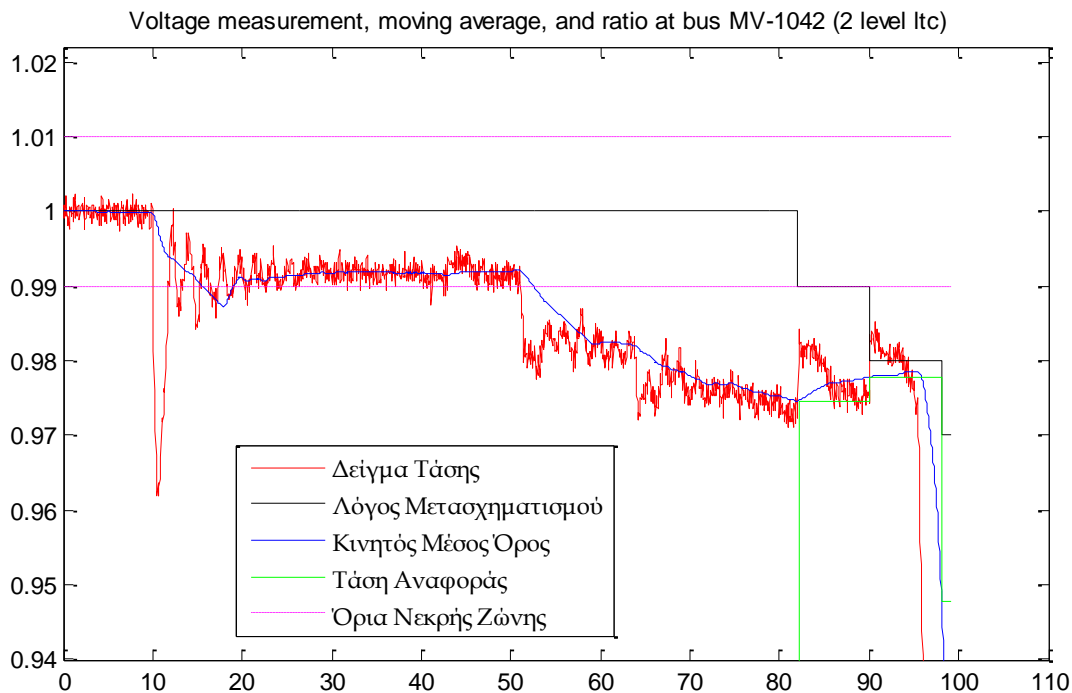


Πίνακας 7.3 : Ενεργοποίηση συναγερμού με ένα και δύο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Simulink)

Πρωτεύων ζυγός	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ (s)	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (s)
1043	59.95	59.95
4047	62.85	62.85
4044	-	62.95
1041	63.95	63.95
4042	65.95	65.90
4045	-	68.25
4043	68.95	68.90
4046	71.95	71.95
1044	83.00	82.90
1045	85.00	84.90
4051	94.05	94.05
1042	105.40	όχι
Κατάρρευση	113.00	99.00



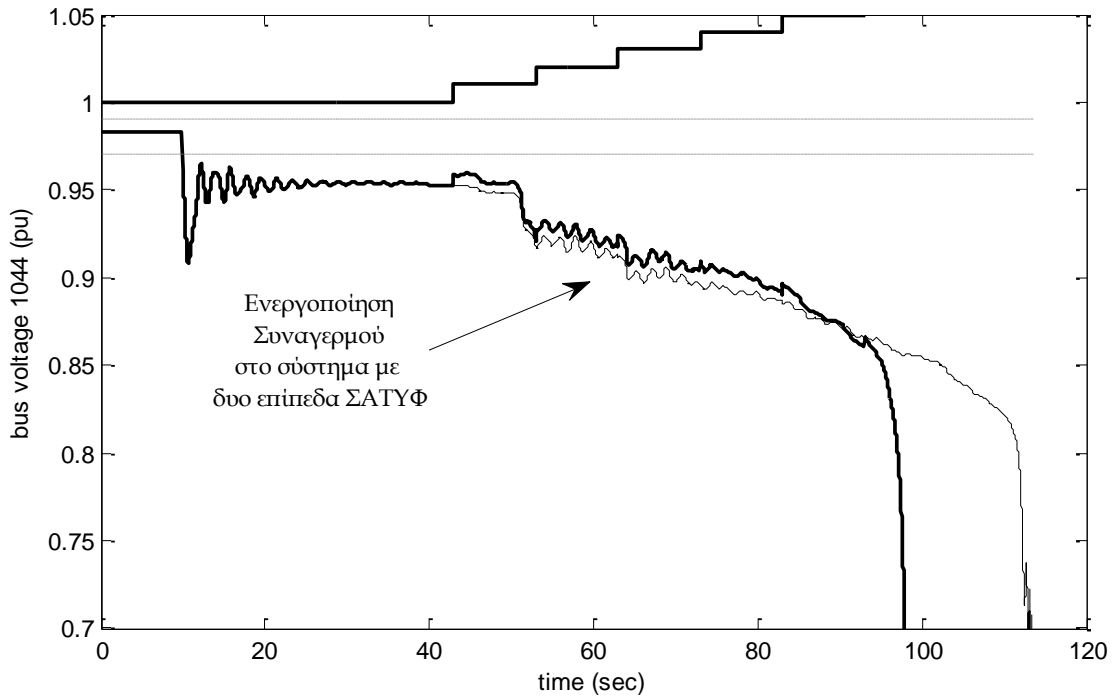
Σχήμα 7.1 Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES-Alarm στο ζυγό 1042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ



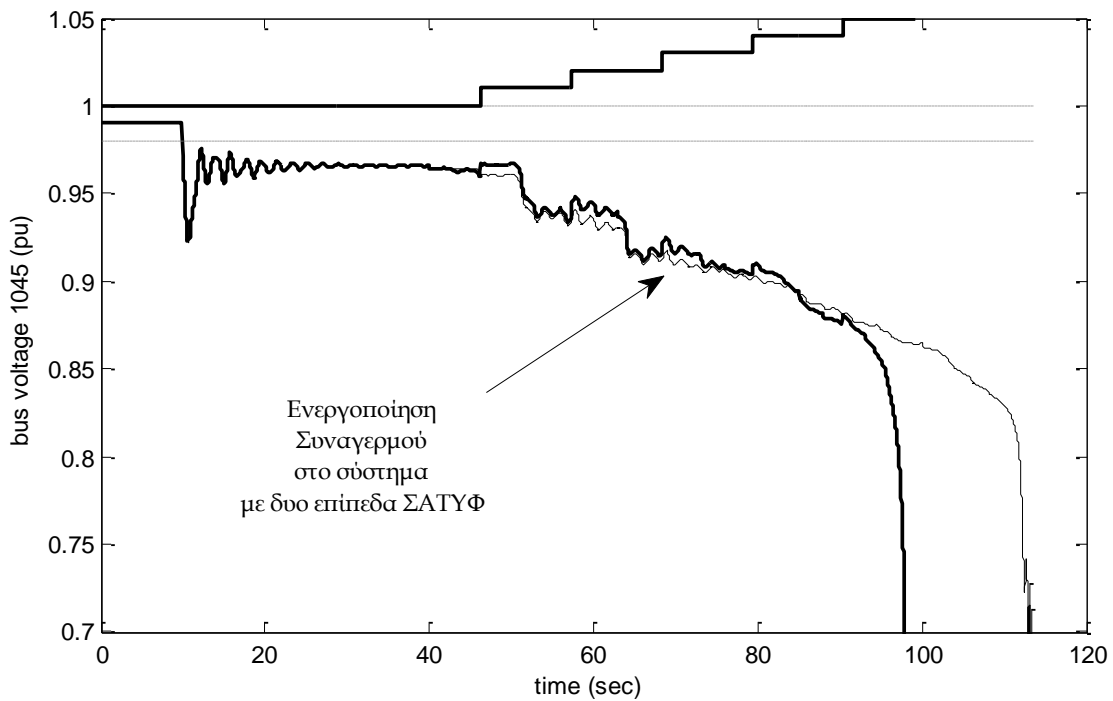
**Σχήμα 7.2** Τάση, κινητός μέσος όρος, λόγος μετασχηματισμού και λειτουργία LIVES-Alarm στο ζυγό 1042 με δύο επίπεδα ΣΑΤΥΦ

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε κάποιες χαρακτηριστικές αποκρίσεις τάσεων και λόγου μετασχηματισμού για τους ζυγούς του συστήματος με και χωρίς την ύπαρξη του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ, με σκοπό να εξετάσουμε τη συμβολή του δεύτερου επιπέδου στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αχνή μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στην απόκριση του συστήματος με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ και η έντονη μαύρη γραμμή στην απόκριση με την ενεργοποίηση του δεύτερου επιπέδου.

Στο Σχήμα 7.3 παρουσιάζεται η τάση στο ζυγό 1044 του συστήματος μαζί με το λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ 4044-1044 για την περίπτωση ύπαρξης δύο επιπέδων ΣΑΤΥΦ. Παρατηρούμε ότι η απόκριση τάσης στο ζυγό είναι ακριβώς ίδια και για τις δύο περιπτώσεις μέχρι τα 40s περίπου. Στο χρόνο αυτό, αρχίζει η λειτουργία μεταβλητής λήψης και εκτελείται η πρώτη αλλαγή λήψης στο μετασχηματιστή της γραμμής ΥΥΤ/ΥΤ, 4044-1044. Στόχος είναι η επαναφορά της τάσης εντός των ορίων λειτουργίας στο ζυγό 1044. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι με την εισαγωγή του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ, η τάση διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα από ότι στο αρχικό σύστημα λόγω της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές ΥΥΤ/ΥΤ. Τα ίδια ακριβώς παρατηρούμε και για την τάση στο ζυγό 1045 που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.4 μαζί με το λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ στη διασύνδεση ΥΥΤ/ΥΤ στους ζυγούς 4045-1045.



Σχήμα 7.3 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1044 (πρωτεύον, Simulink)



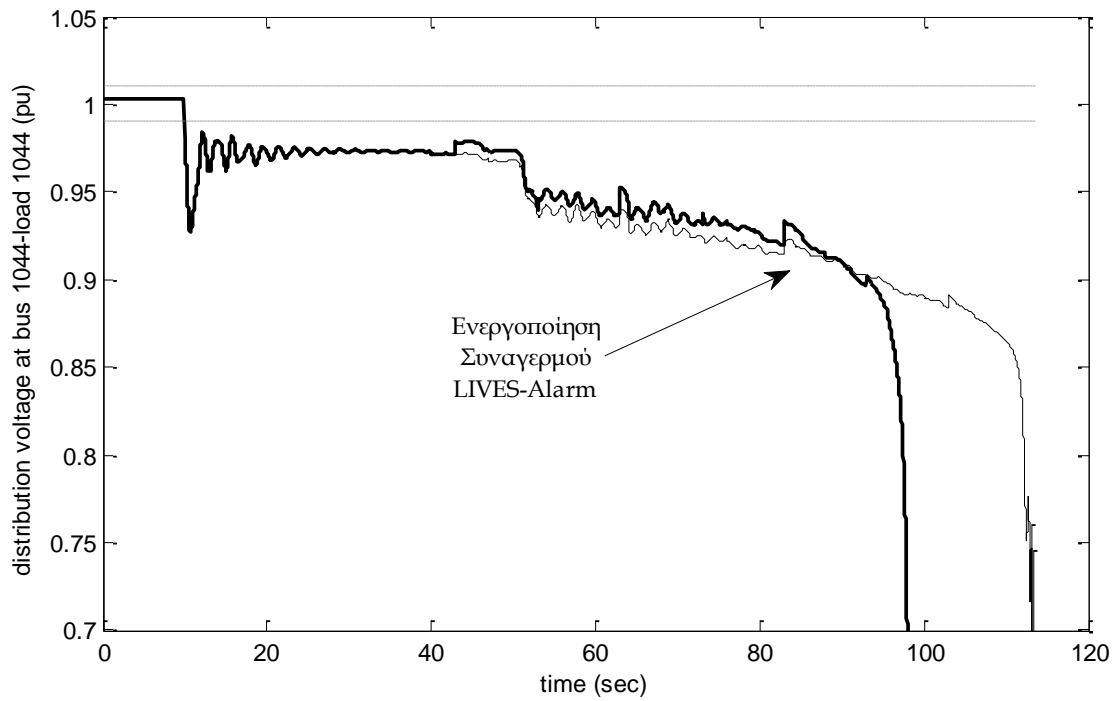
Σχήμα 7.4 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1045 (πρωτεύον, Simulink)

Όσον αφορά τους ζυγούς φορτίου μέσης τάσης 1044 και 1045 από τα Σχήματα 7.5 έως 7.8 παρατηρούμε ότι και εδώ η τάση ακολουθεί ακριβώς ίδια πορεία μέχρι τα 40s. Στη συνέχεια μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι και σε αυτό το ζυγό η τάση είναι σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με το αρχικό σύστημα, καθώς στηρίζεται και από το πάνω επίπεδο μετασχηματιστών. Βέβαια η τελική κατάρρευση του συστήματος δεν μπορεί να αποφευχθεί, αλλά για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας, η τάση στους ζυγούς αυτούς διατηρείται σε καλύτερα επίπεδα, με αποτέλεσμα το φορτίο να καλύπτεται σε μεγαλύτερο ποσοστό για το χρονικό αυτό διάστημα.

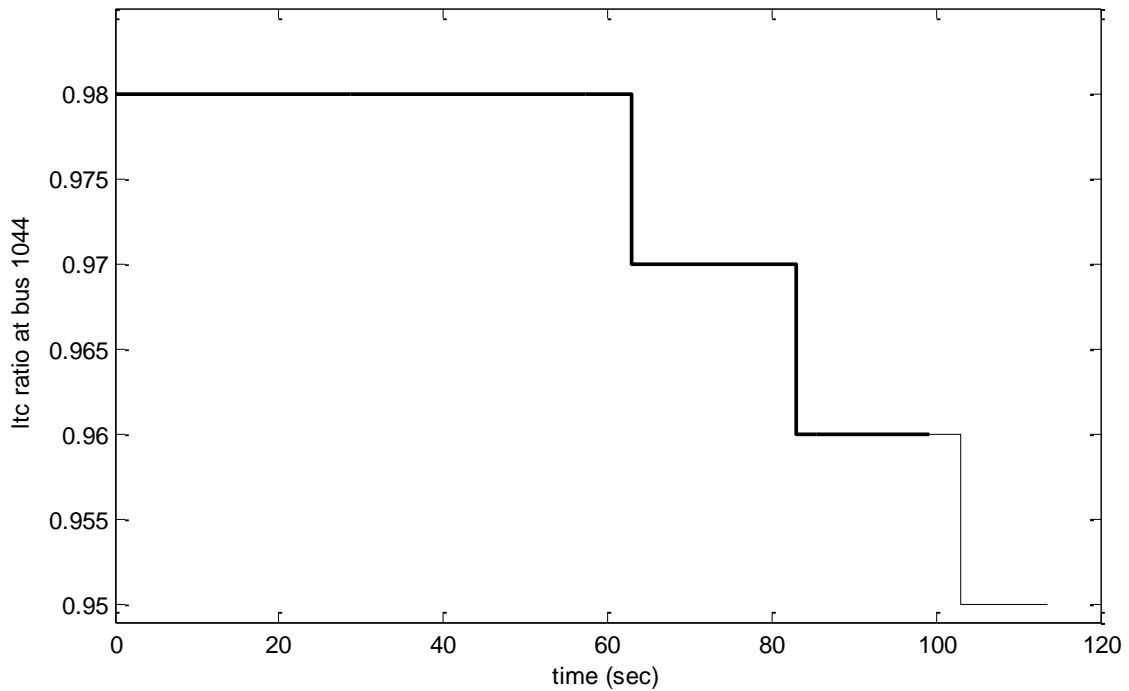
Από τα Σχήματα 7.6 και 7.8 παρατηρούμε ότι η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ στους ζυγούς 1044 και 1045 δεν μεταβλήθηκε με την ένταξη του δεύτερου επιπέδου καθώς οι μεταβολές στο λόγο μετασχηματισμού είναι ίδιες. Η μόνη διαφοροποίηση είναι μία επιπλέον αλλαγή λήψης που προλαβαίνει να γίνει στο σύστημα χωρίς την ένταξη του δεύτερου επιπέδου, πράγμα λογικό καθώς το σύστημα καταρρέει σε μεγαλύτερο χρόνο. Ο λόγος για τον οποίο δεν παρατηρούμε αλλαγή στη λειτουργία είναι γιατί η φόρτιση του συστήματος είναι μεγάλη στην περίπτωση αυτή και η διαταραχή που θεωρούμε μειώνει δραματικά την τάση στους κεντρικούς ζυγούς του συστήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το επίπεδο τάσης να είναι αρκετά κάτω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο. Και εφόσον έχουμε θεωρήσει ίδια δεδομένα για τα ΣΑΤΥΦ των φορτίων με και χωρίς το δεύτερο επίπεδο τάσης, είναι αναμενόμενο να έχουμε ίδια λειτουργία του μηχανισμού.

Η τάση για τους ζυγούς 1044 και 1045, όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.5 και 7.7, βρίσκεται εκτός των ορίων ευσταθούς λειτουργίας από τη χρονική στιγμή της διαταραχής και μέχρι το σύστημα να οδηγηθεί τελικώς σε κατάρρευση. Η συμπεριφορά της τάσης αλλά και της μεθόδου ανίχνευσης είναι ακριβώς η ίδια. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται και εδώ είναι ότι με ενεργοποιημένο το δεύτερο επίπεδο μετασχηματιστών με μεταβλητή λήψη η τάση διατηρείται σε καλύτερα επίπεδα.

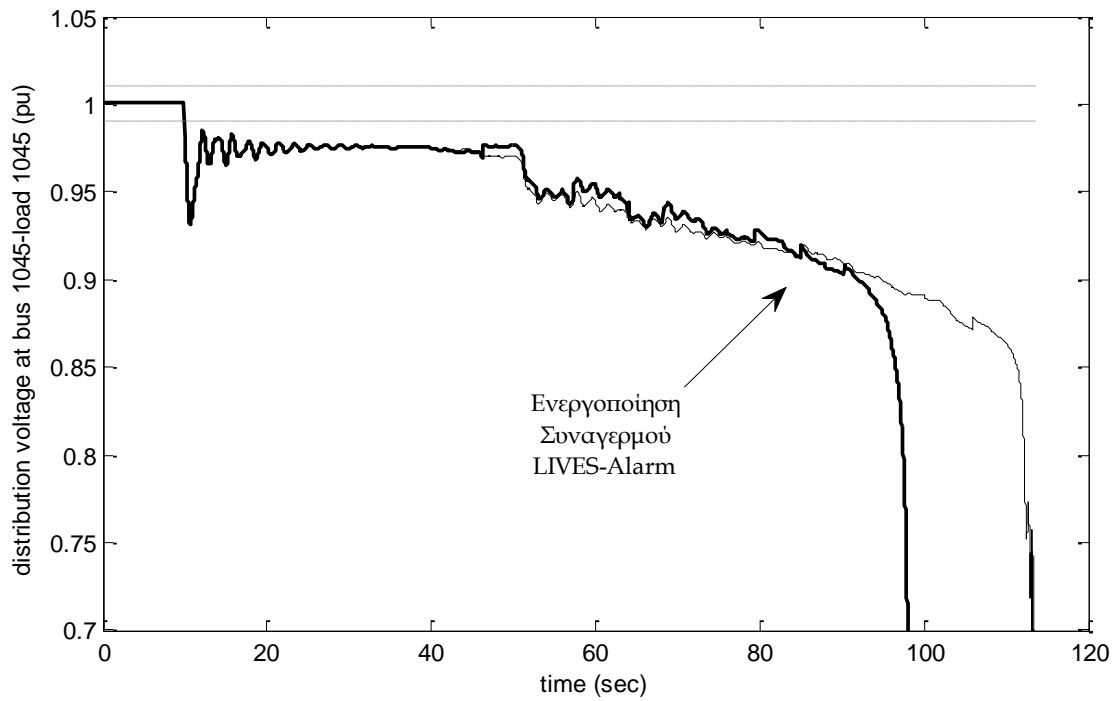
Αυτό που παρατηρούμε από τα σχήματα ουσιαστικά, είναι ότι με την ένταξη του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης έχουμε ενεργοποίηση του συναγερμού ταχύτερα από ότι στο αρχικό σύστημα. Αυτό οφείλεται όχι μόνο στις χρονικές σταθερές που έχουν επιλεγεί για τους μετασχηματιστές, αλλά και στο γεγονός ότι ο έλεγχος του συστήματος ξεκινά από ανώτερο επίπεδο πλέον στο σύστημα, και η αστάθεια τάσης ανιχνεύεται σε υψηλότερο επίπεδο τάσης και κατ' επέκταση σε μικρότερο χρόνο.



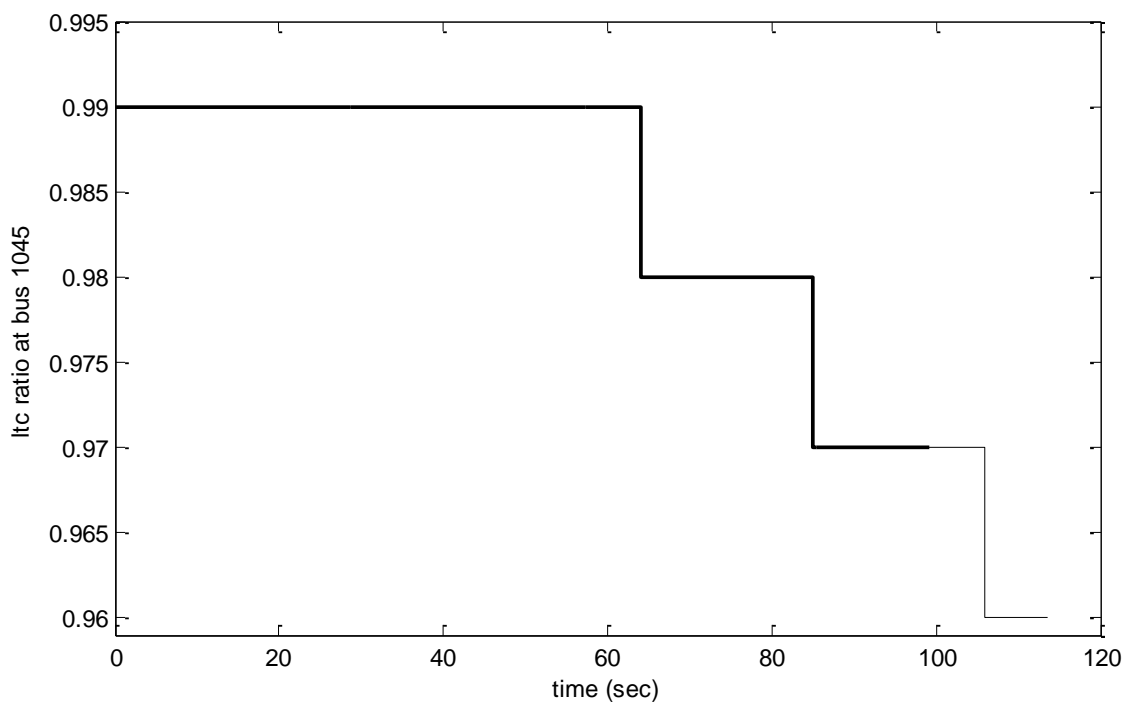
Σχήμα 7.5 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΜΤ 1044 (δευτερεύον, Simulink)



Σχήμα 7.6 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ στο ζυγό ΜΤ 1044 (Simulink)



Σχήμα 7.7 Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (δευτερεύον, Simulink)



Σχήμα 7.8 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ στο ζυγό MT 1045 (Simulink)

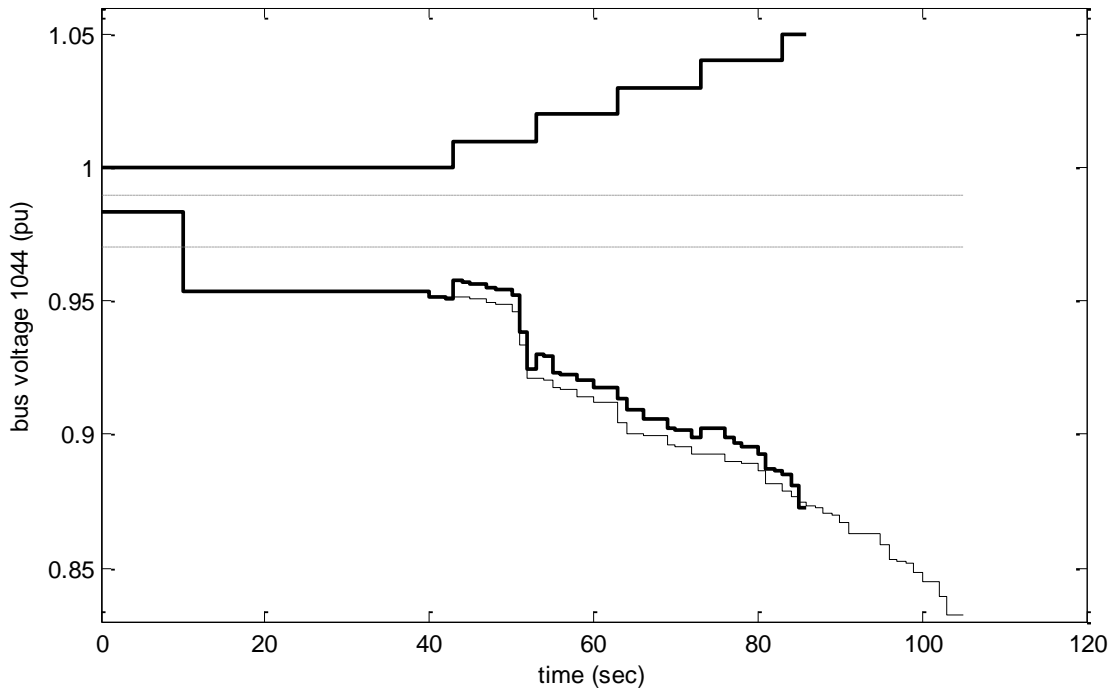
Προς σύγκριση των δύο μεθόδων ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας παραθέτουμε και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προκύπτουν από την προσομοίωση του συστήματος με χρήση του προγράμματος Wpstab με και χωρίς την ύπαρξη του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.9 έως 7.14. που ακολουθούν, και η αχνή μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στην απόκριση με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ, ενώ η έντονη μαύρη γραμμή στην απόκριση με ένταξη του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ.

Όσον αφορά τη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης, τα αποτελέσματα είναι όμοια με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης σε δυο χρονικές κλίμακες. Η ανίχνευση αστάθειας γίνεται στον ίδιο χρόνο και εδώ με τη διαφορά ότι πέρα από τον ζυγό 1042 δεν προλαβαίνει να ενεργοποιηθεί ούτε ο συναγερμός στους ζυγούς 4051 και 4047 καθώς το σύστημα καταρρέει νωρίτερα.

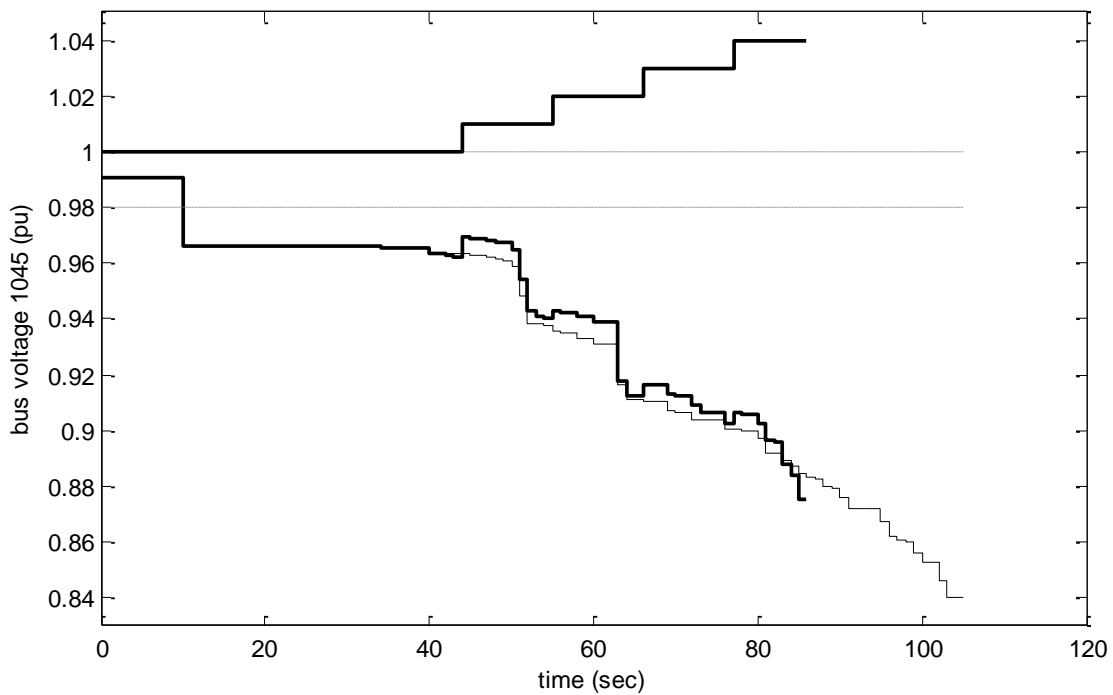
**Πίνακας 7.4** Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Wpstab)

Πρωτεύων ζυγός	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ (s)	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (s)
1043	60.00	60.00
4044	-	63.00
4045	-	66.00
1041	64.00	64.00
4042	66.00	66.00
4043	69.00	69.00
4046	72.00	72.00
1044	83.00	83.00
1045	85.00	85.00
4051	90.00	όχι
4047	98.00	όχι
1042	105.00	όχι
Κατάρρευση	105.00	86.00

Παρατηρούμε ότι και με χρήση της μεθόδου οιονεί στατικής προσέγγισης, τα αποτελέσματα είναι ίδια με τα αντίστοιχα του μοντέλου δύο χρονικών κλιμάκων, και η ένταξη του δεύτερου επιπέδου μετασηματιστών μεταβλητής λήψης έχει την ίδια επίδραση στο σύστημα.

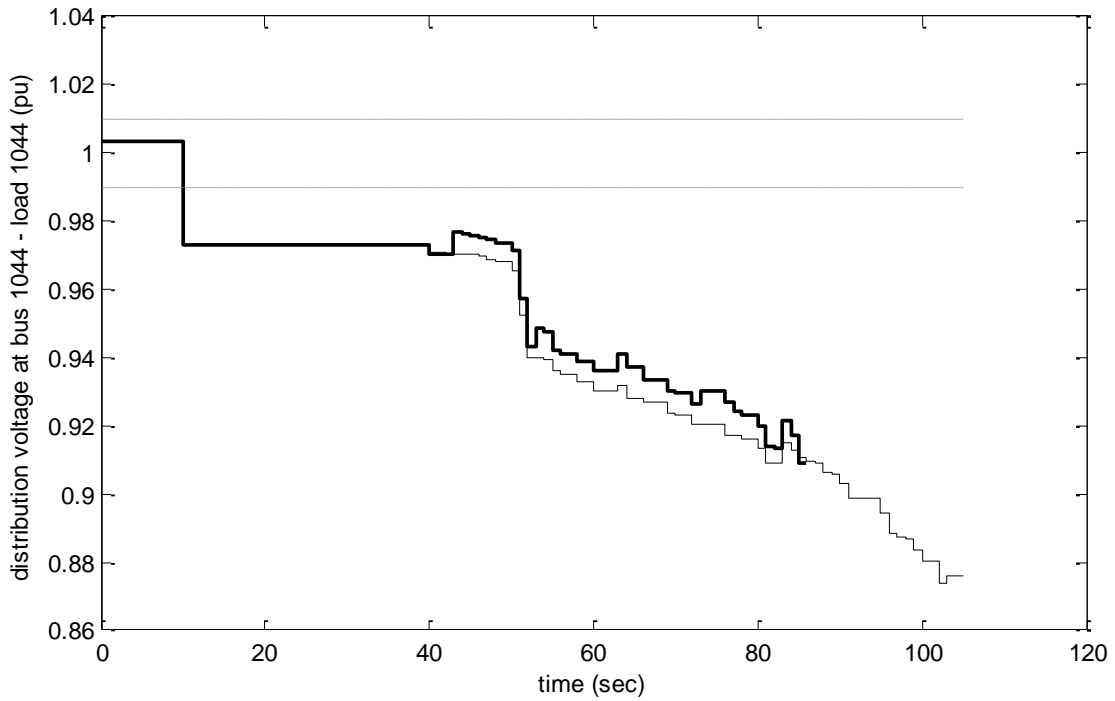


Σχήμα 7.9 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1044 (Wpstab)

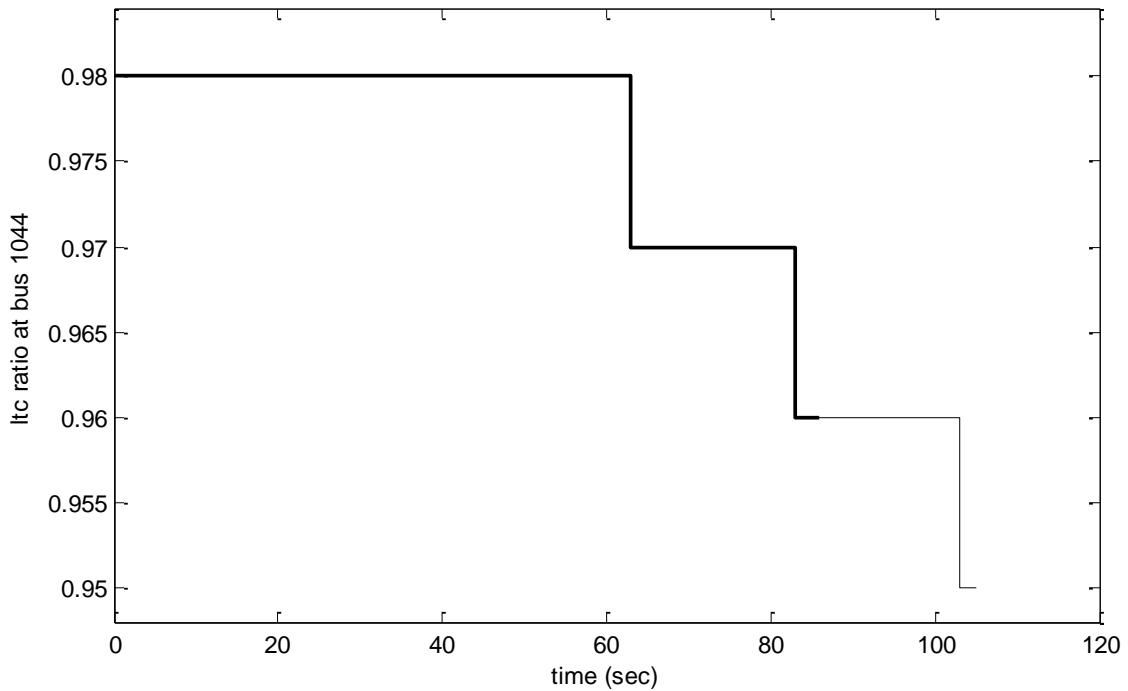


Σχήμα 7.10 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1045 (Wpstab)

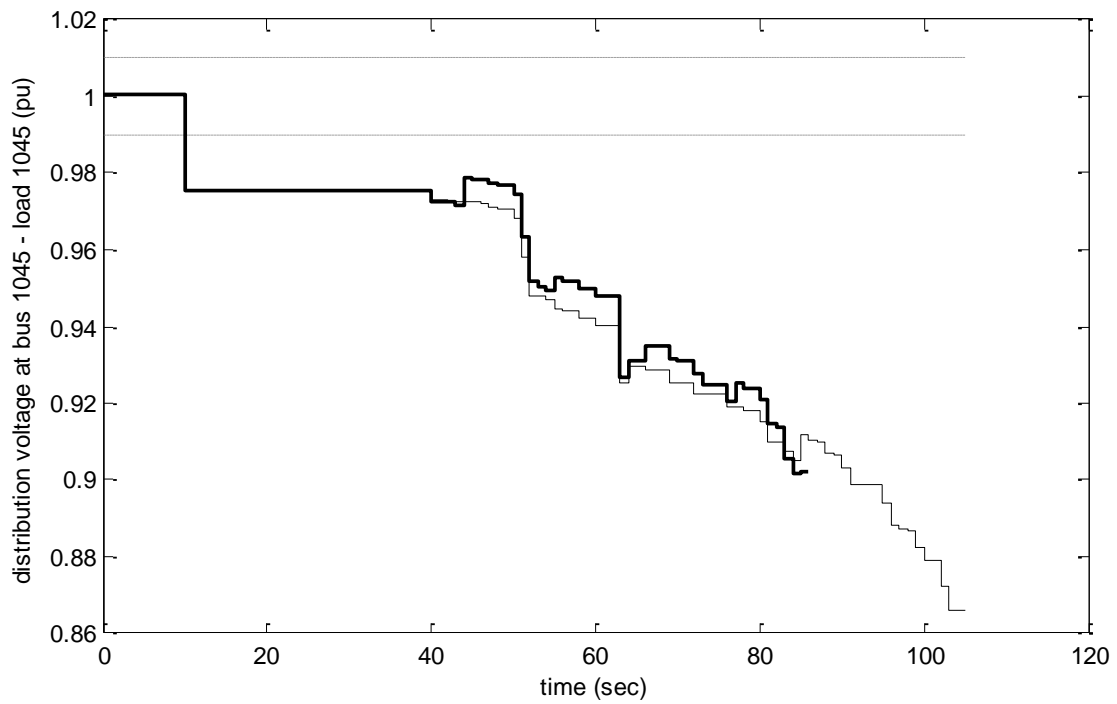




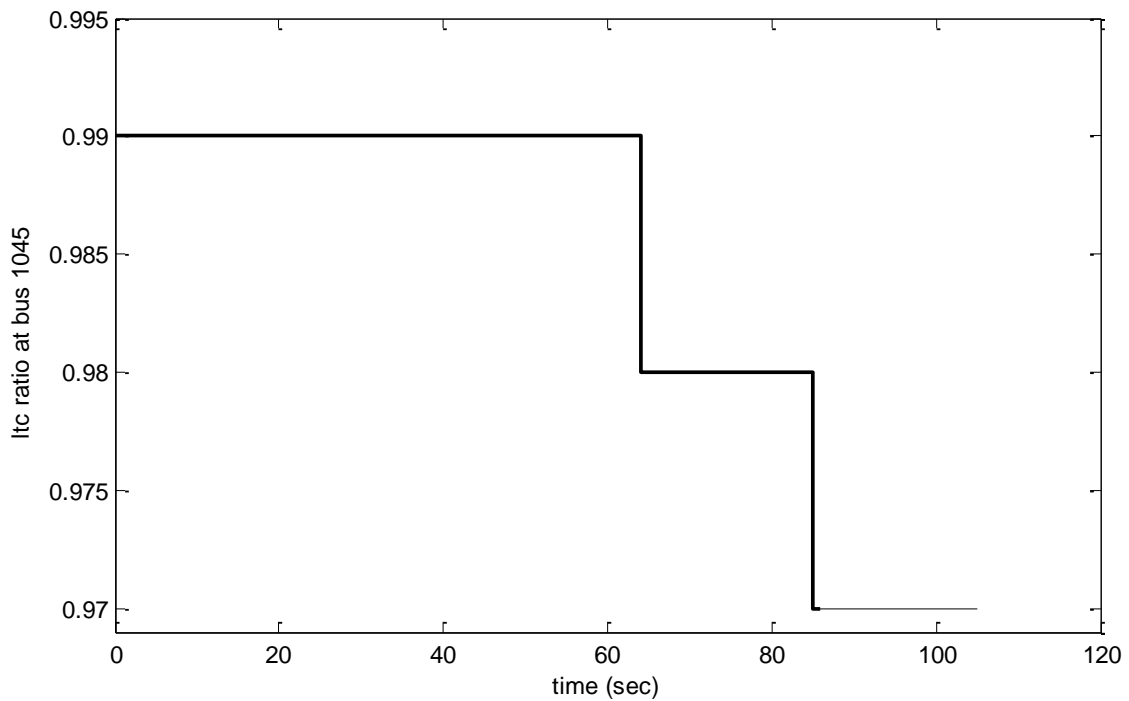
Σχήμα 7.11 Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (Wpstab)



Σχήμα 7.12 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1044



Σχήμα 7.13 Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (Wpstab)



Σχήμα 7.14 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1045

## 7.3 Περίπτωση 2 : Οριακή Αστάθεια

Στην περίπτωση αυτή έχουμε οριακή φόρτιση του συστήματος και η κατάρρευση λόγω αστάθειας τάσης πραγματοποιείται σε μεγαλύτερο χρόνο. Έχοντας απενεργοποιημένο το ανώτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ, το σύστημα καταρρέει σε χρόνο 648s στο Simulink με χρήση του μοντέλου δυο χρονικών κλιμάκων, και στα 642s στο Wpstab με το μοντέλο της οιονείστατης ανάλυσης. Αν ενεργοποιήσουμε το δεύτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ, οι χρόνοι κατάρρευσης μειώνονται στα 513s για το Simulink και στα 324s για το Wpstab.

Όσον αφορά τη λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης αστάθειας τάσης, αυτή αποτυπώνεται στον Πίνακα 7.4 όπου φαίνεται ο χρόνος ενεργοποίησης του σήματος συναγερμού για ύπαρξη ενός και δυο επιπέδων ΣΑΤΥΦ.

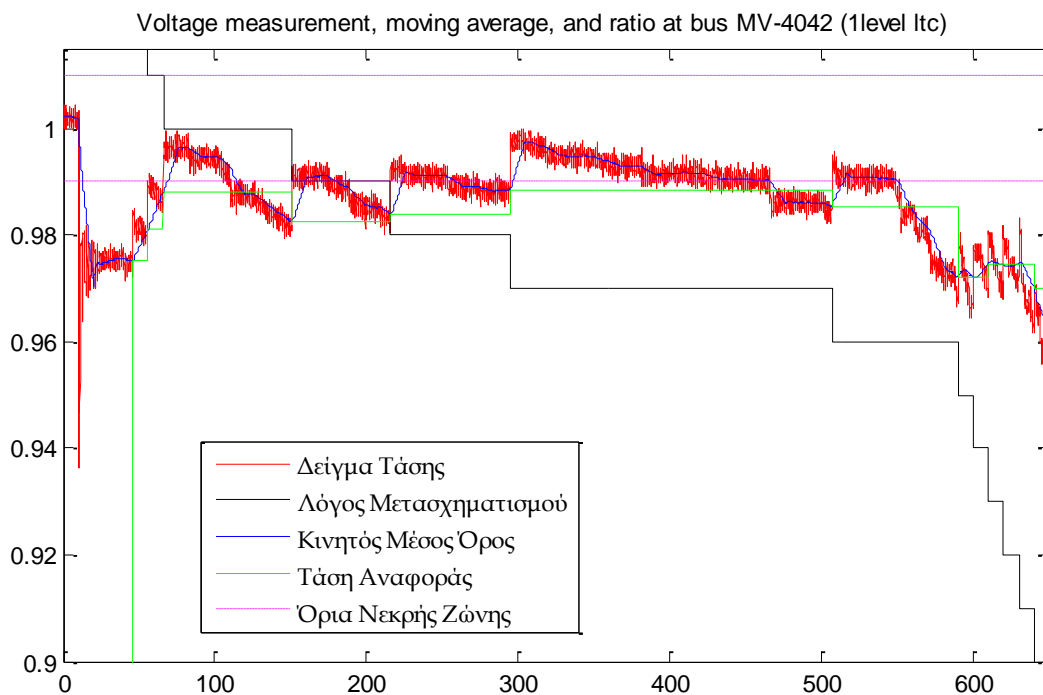
Πίνακας 7.5 : Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Simulink)

Πρωτεύων ζυγός μετασχηματιστή	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ (s)	Πρωτεύων ζυγός μετασχηματιστή	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (s)
1041	586.95	4046	417.70
1044	592.35	4045	472.95
1045	592.50	4044	482.70
4043	605.85	4043	493.30
1043	607.05	4047	494.35
4046	608.60	4051	494.60
4047	625.50	4042	500.65
4051	632.30	1043	506.50
1042	639.60	1041	513.10
Κατάρρευση	648.00		513.00

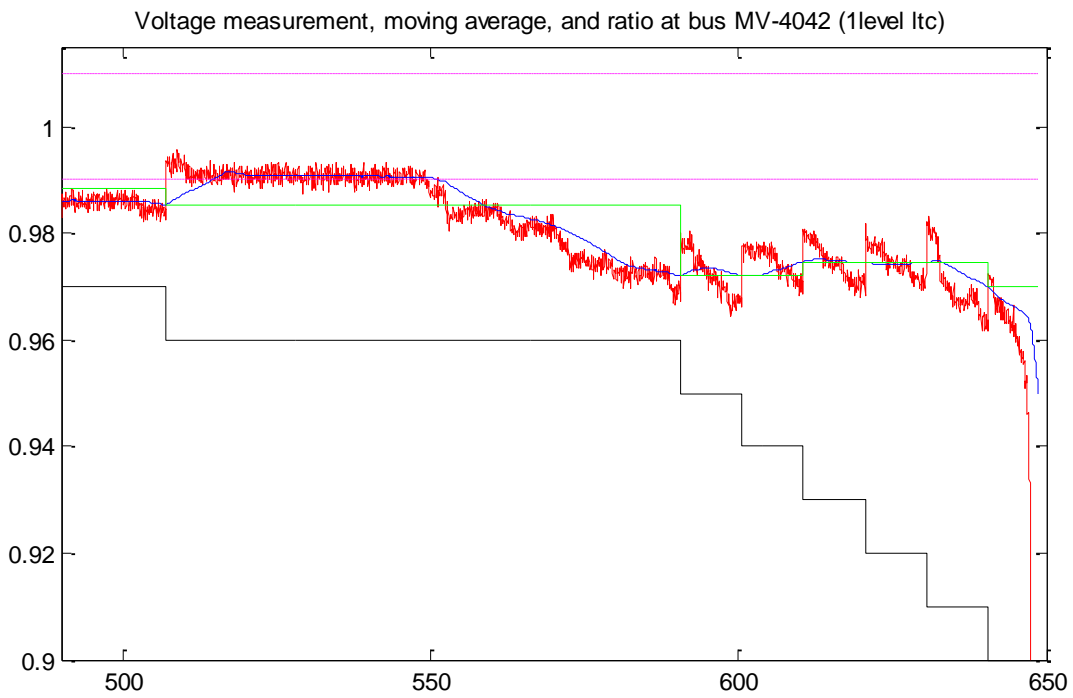
Παρατηρούμε ότι έχουμε ενεργοποίηση συναγερμού σε όλους σχεδόν τους ζυγούς της κεντρικής περιοχής, με αρκετά μεγάλη απόκλιση στο χρόνο ενεργοποίησης. Οι βασικές διαφορές που παρατηρούμε είναι η μη ανίχνευση αστάθειας τάσης στους ζυγούς 1044 και 1045 με ενεργοποίηση του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς με τη λειτουργία των μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης στους ζυγούς 4044 και 4045 η τάση στα φορτία των αντίστοιχων ζυγών διατηρείται σε καλά επίπεδα εντός της νεκρής ζώνης μέχρι την κατάρρευση του συστήματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η καλύτερη κάλυψη φορτίου από τη στιγμή της διαταραχής και μέχρι να ενεργοποιήσουμε κάποιο

μηχανισμό αποκατάστασης τάσης στο σύστημα. Επόμενη διαφοροποίηση είναι η σήμανση συναγερμού στο ζυγό 1042 μόνο στην προσομοίωση με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ, και στο ζυγό 4042 αντίστοιχα που εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση ενεργοποίησης του δεύτερου επιπέδου. Στα σχήματα 7.15 έως 7.20 εμφανίζεται η απόκριση τάσης, ο κινητός μέσος όρος, ο λόγος μετασχηματισμού και η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης για τους ζυγούς αυτούς και στις δυο περιπτώσεις.

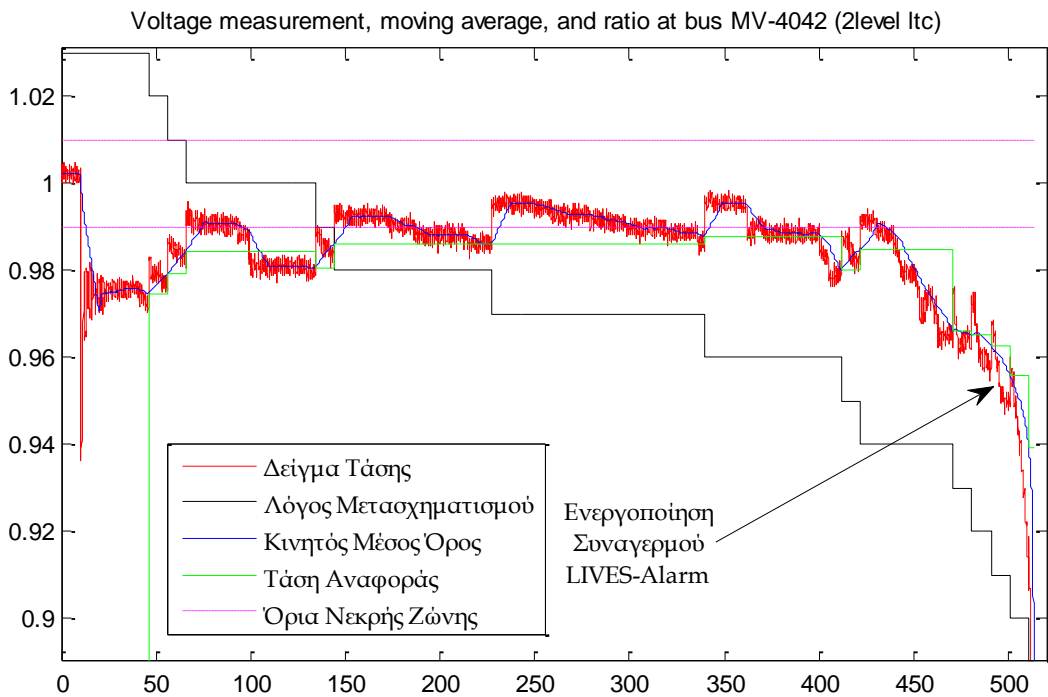
Όσον αφορά το ζυγό 4042 (Σχήμα 7.15 και 7.17) παρατηρούμε ότι ενώ η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης από τα 550s περίπου και μετά, και σε κάθε αλλαγή λόγου μετασχηματισμού η μέθοδος ανίχνευσης αποθηκεύει την τιμή του κινητού μέσου όρου ως αναφορά, η τάση με τη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ εμφανίζει αύξηση. Λεπτομερέστερα, στο Σχήμα 7.16 παρατηρούμε ότι ο κινητός μέσος όρος είναι οριακά πάνω από την τάση αναφοράς με αποτέλεσμα να μην ανιχνεύεται αστάθεια. Όταν πλέον ο κινητός μέσος εμφανιστεί μειωμένος σε σχέση με την τάση αναφοράς, το σύστημα καταρρέει. Αντιθέτως, με ενεργοποιημένο το δεύτερο επίπεδο παρατηρούμε ότι η τάση παρουσιάζει πιο απότομη πτώση και ο συναγερμός ενεργοποιείται λίγο πριν την κατάρρευση του συστήματος (Σχήμα 7.17).



Σχήμα 7.15 Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ



Σχήμα 7.16 Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ σε μεγέθυνση

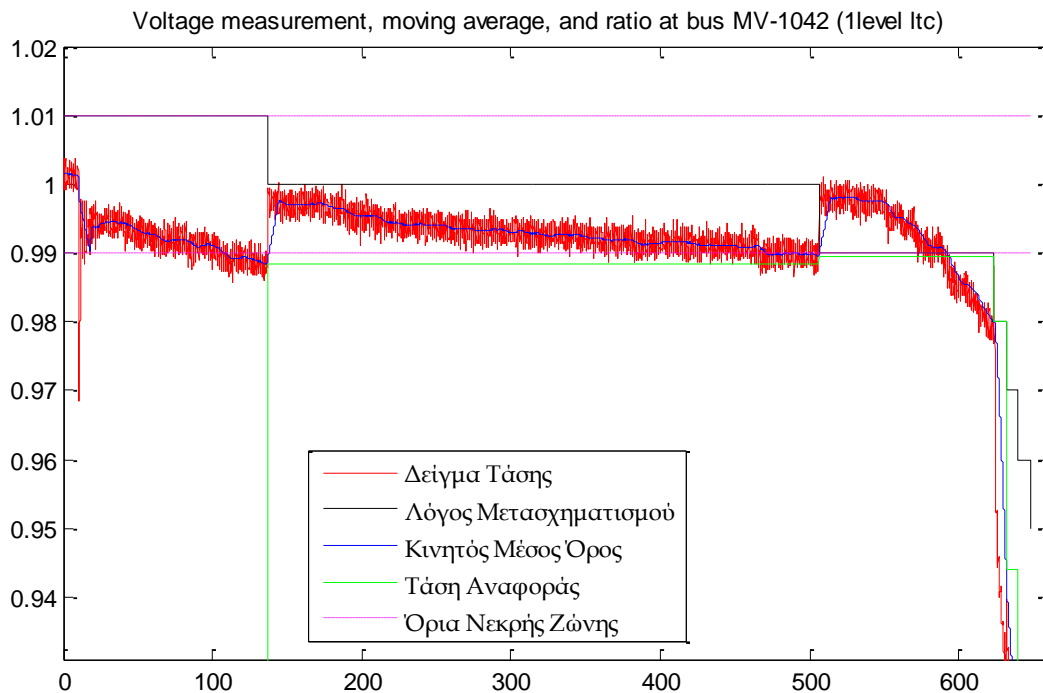


Σχήμα 7.17 Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ

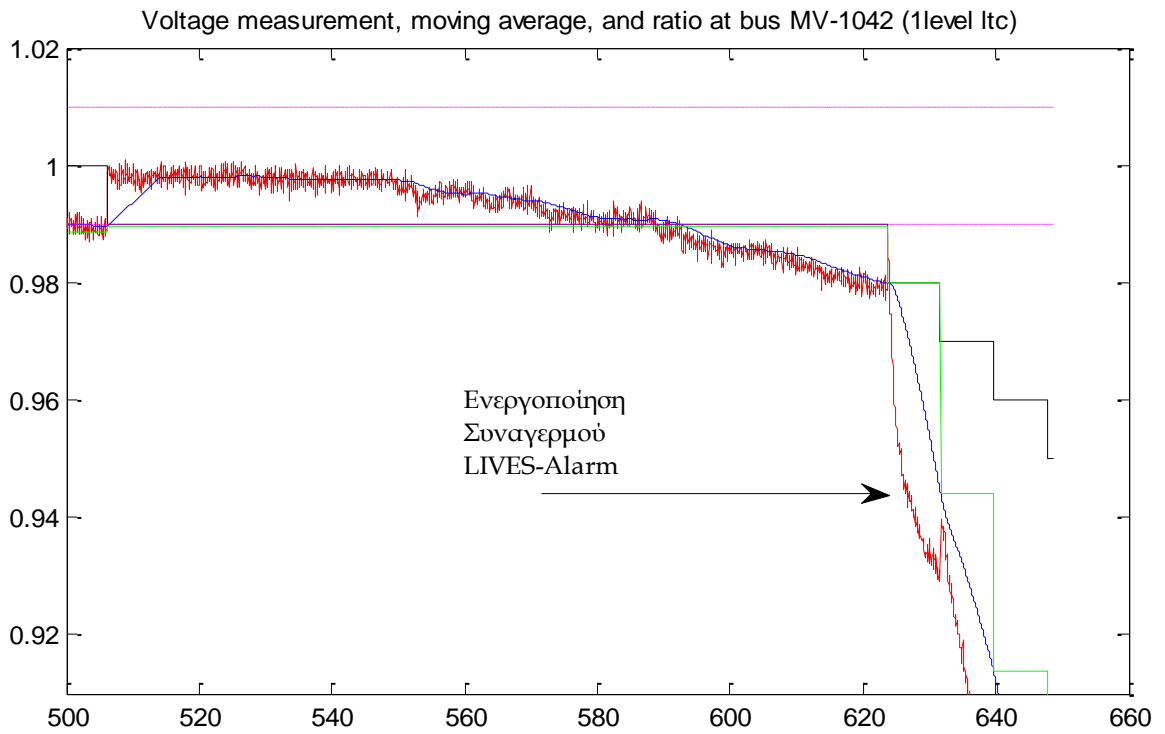
Για το ζυγό 1042 όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.18 έως 7.20 η τάση διατηρείται σε αρκετά καλό επίπεδο για μεγάλο χρονικό διάστημα και στις δύο περιπτώσεις. Η διαφορά είναι ότι με ένα μόνο επίπεδο μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης το σύστημα χρειάζεται περισσότερο χρόνο πριν οδηγηθεί σε κατάρρευση, κάτι που παρέχει περισσότερο χρόνο στη μέθοδο ανίχνευσης ώστε να ενεργοποιηθεί ο συναγερμός. Με ενεργοποίηση του δεύτερου επιπέδου όμως, η τάση στο ζυγό 1042 διατηρείται εντός των ορίων λειτουργίας μέχρι τη στιγμή της κατάρρευσης.

Συνολικά, διαπιστώνουμε ότι η ύπαρξη του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών με μεταβλητή λήψη στους υποσταθμούς υπερυψηλής/υψηλής τάσης, συγκρατεί την τάση τα φορτία της κεντρικής περιοχής (1041, 1042, 1043, 1044, 1045) σε καλύτερα επίπεδα.

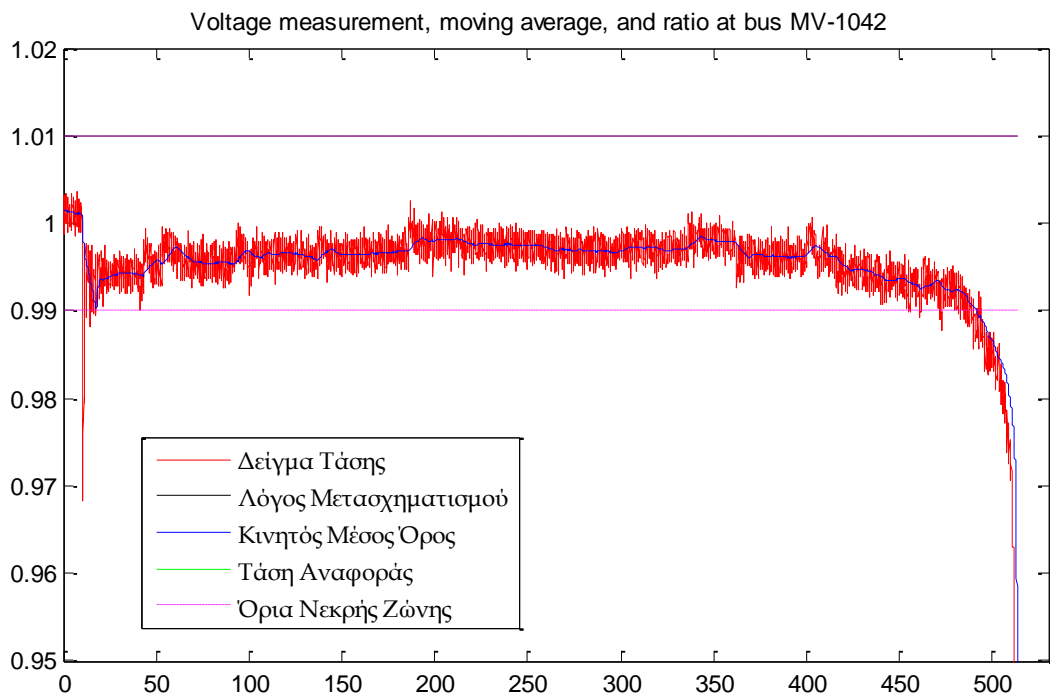
Οι αντίστοιχες αποκρίσεις τάσης και λόγου μετασχηματισμού για τους ζυγούς ΥΤ 1044, 1045 με ενεργοποίηση και μη του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ φαίνονται στα Σχήματα 7.21 έως 7.26 που ακολουθούν.



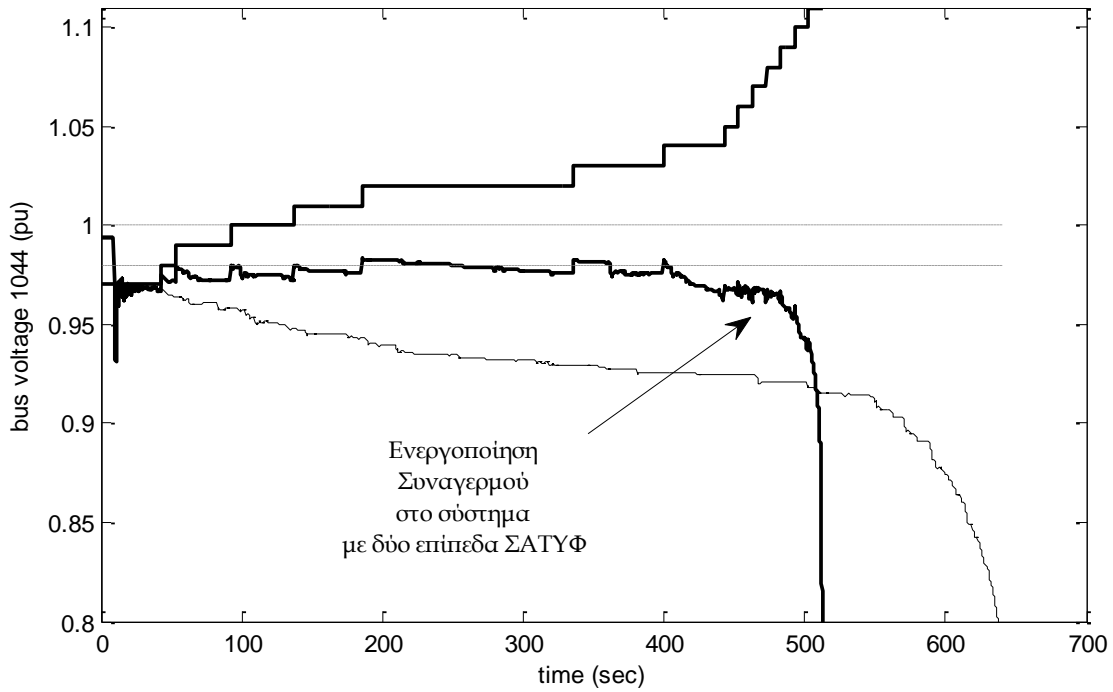
**Σχήμα 7.18** Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 1042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ



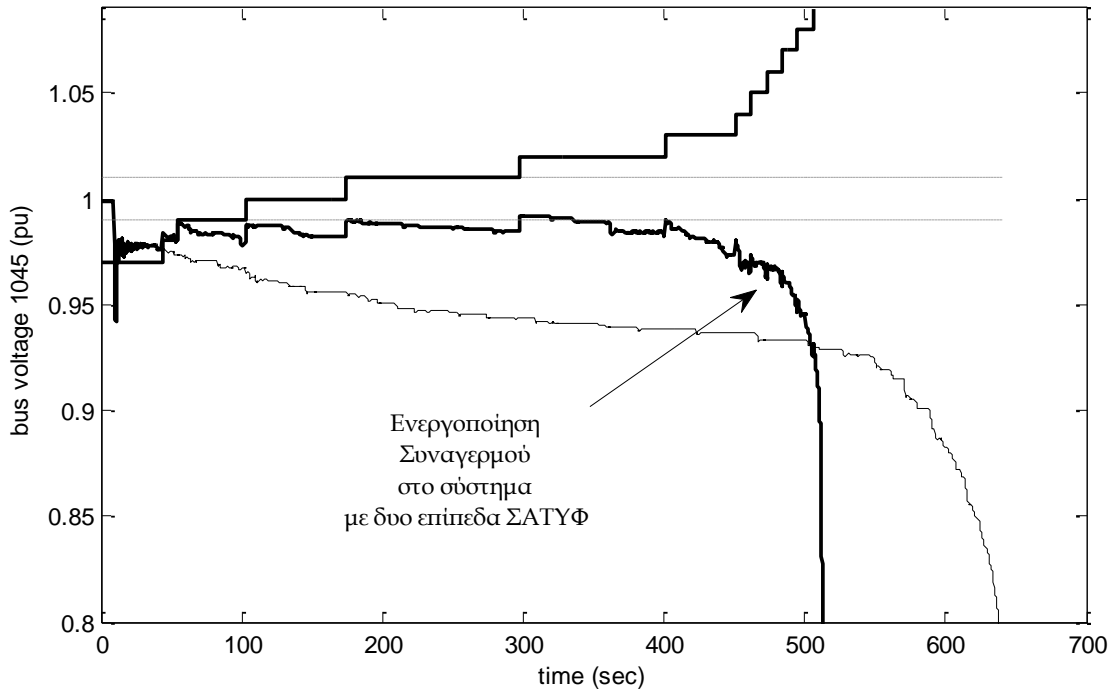
Σχήμα 7.19 Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ σε μεγέθυνση



Σχήμα 7.20 Τάση, κινητός μέσος όρος, και λόγος μετασχηματισμού στο ζυγό 4042 με δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ

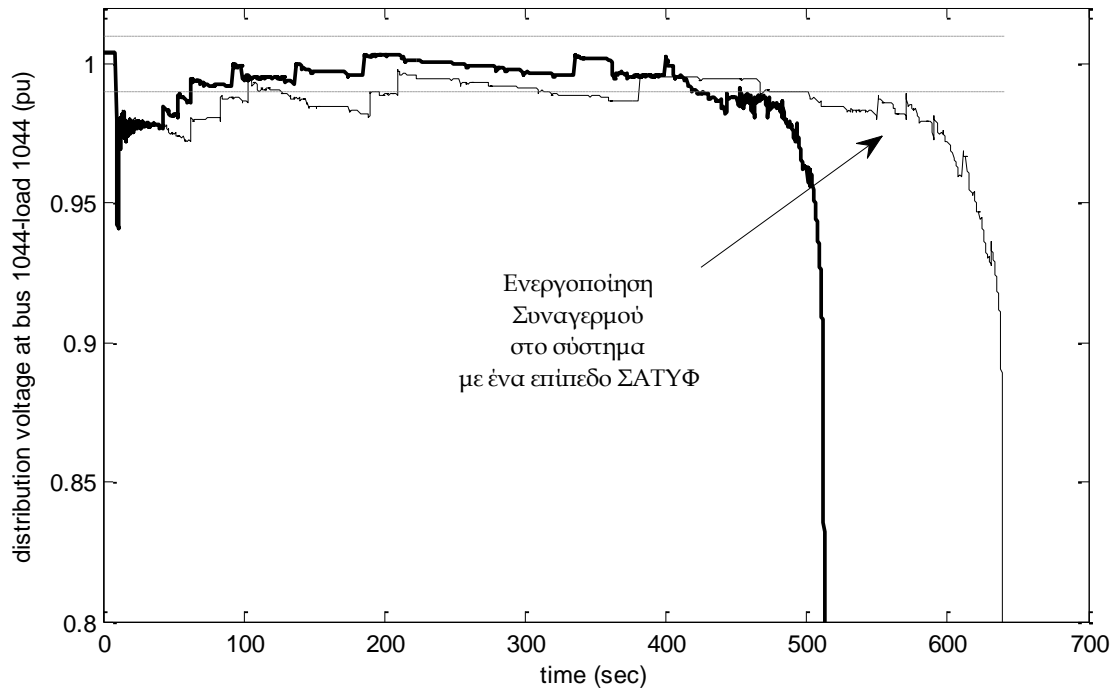


Σχήμα 7.21 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1044 (πρωτεύον, Simulink)

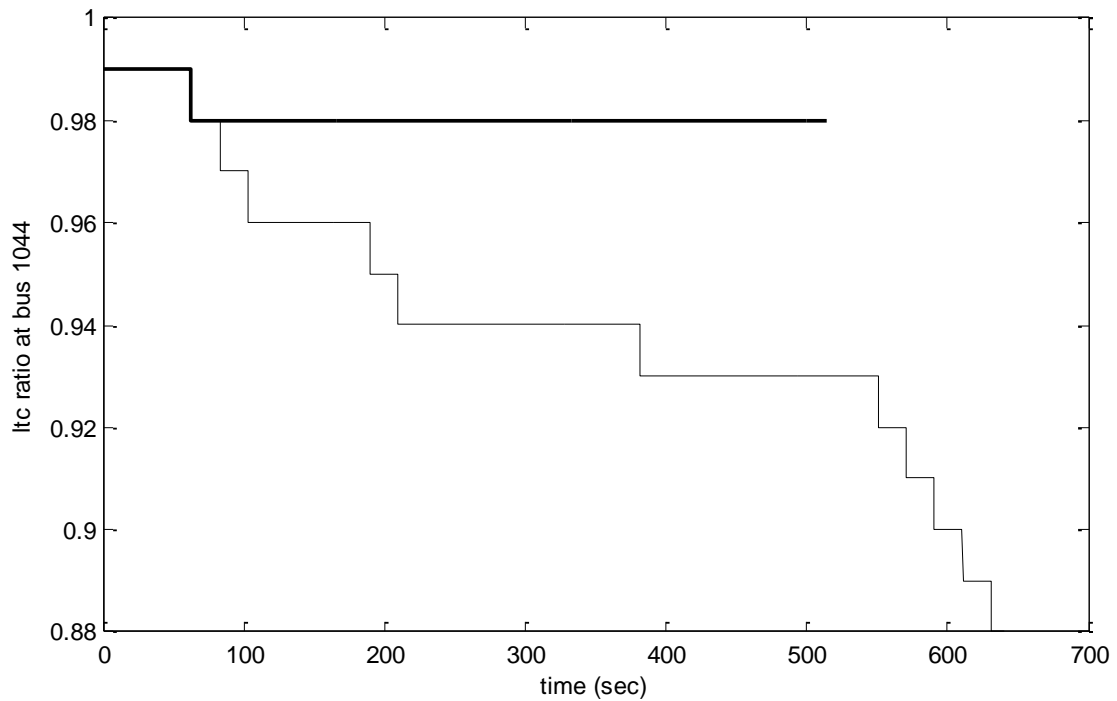


Σχήμα 7.22 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1045 (πρωτεύον, Simulink)

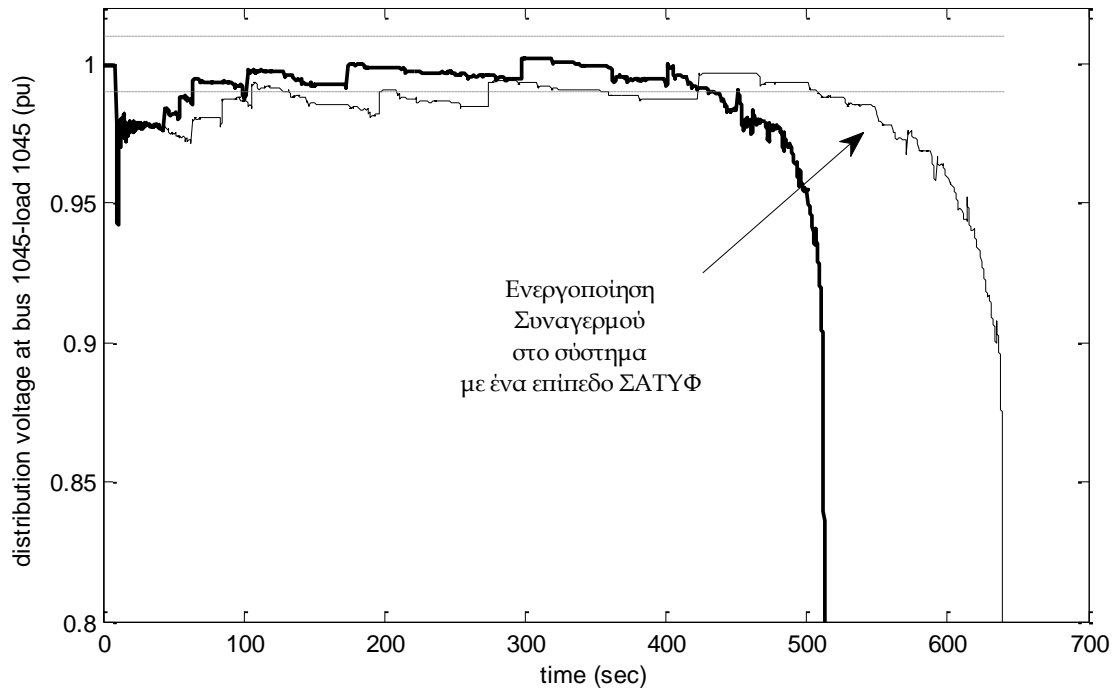




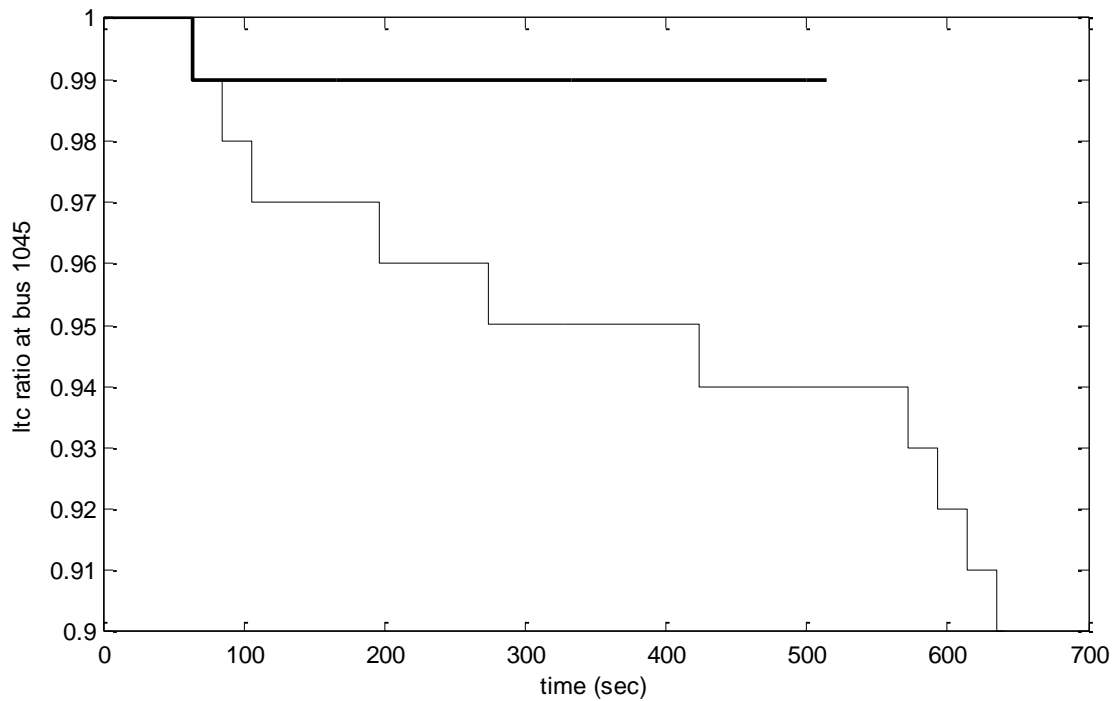
Σχήμα 7.23 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΜΤ 1044 (δευτερεύον, Simulink)



Σχήμα 7.24 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1044



Σχήμα 7.25 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΜΤ 1045 (δευτερεύον, Simulink)



Σχήμα 7.26 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1045

Όσον αφορά τους ζυγούς φορτίου μέσης τάσης, η τάση δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση αλλά με ενεργοποιημένο το δεύτερο επίπεδο ΣΑΤΥΦ έχουμε μια σχετικά καλύτερη απόκριση και μεγαλύτερη κάλυψη του φορτίου για το χρονικό διάστημα που δρουν οι μηχανισμοί μέχρι να επέλθει αστάθεια στο σύστημα.

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή που έχουμε οριακή αστάθεια του συστήματος, η συμβολή του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ είναι μεγαλύτερη καθώς καταφέρνει να διατηρήσει την τάση στους αντίστοιχους ζυγούς υψηλής τάσης σε καλύτερο επίπεδο. Και η τάση στους αντίστοιχους ζυγούς φορτίου ΜΤ διατηρείται εντός των ορίων της νεκρής ζώνης. Όσον αφορά τη λειτουργία των αντίστοιχων ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή διαφοροποιείται, καθώς λόγω της λειτουργίας του ανώτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ στο επίπεδο ΥΥΤ/ΥΤ, η τάση διατηρείται σταθερή στο δευτερεύον χωρίς να χρειάζεται επέμβαση του μηχανισμού ΣΑΤΥΦ.

Και για την περίπτωση αυτή παραθέτουμε στα Σχήματα 7.27 έως 7.32 τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την προσομοίωση με χρήση του προγράμματος Wpstab.

Προσομοιώνοντας το σύστημα με το οιονεί στατικό μοντέλο έχουμε ίδια αποτελέσματα στη λειτουργία του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών, απλά είναι εμφανής η χρονική απόκλιση των δύο προγραμμάτων που αναλύθηκε εκτενώς στα Κεφάλαια 5 και 6 της εργασίας. Επίσης η προσομοίωση με το οιονεί στατικό μοντέλο και με ένταξη του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ προβλέπει κατάρρευση του συστήματος σχεδόν στο μισό χρόνο, σε σχέση με το αρχικό σύστημα.

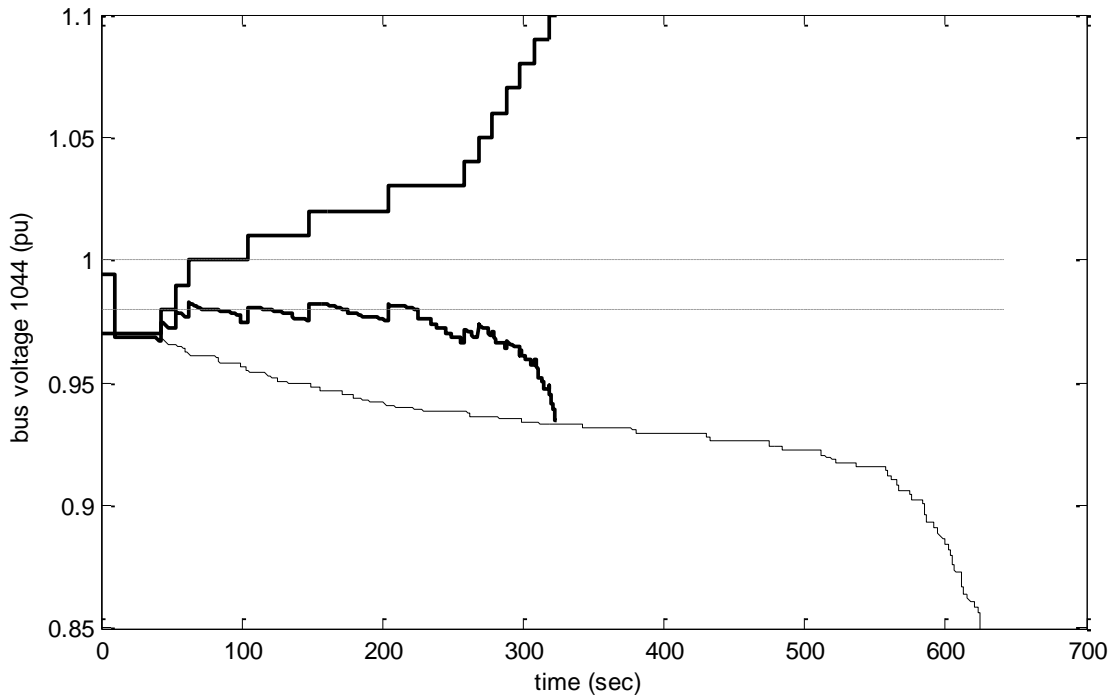
**Πίνακας 7.6** Πρώτη ενεργοποίηση του συναγερμού της LIVES-alarm για ένα και δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (Wpstab)

Πρωτεύων ζυγός μετασχηματιστή	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm ένα επίπεδο ΣΑΤΥΦ (s)	Πρωτεύων ζυγός μετασχηματιστή	Χρόνος συναγερμού LIVES-alarm δυο επίπεδα ΣΑΤΥΦ (s)
1043	598.00	4046	275.00
4046	599.00	4044	288.00
4051	603.00	4051	288.00
1044	605.00	4042	291.00
1041	606.00	4045	308.00
1045	612.00	4043	309.00
4043	613.00	4047	309.00
4047	614.00		
4042	615.00		
Κατάρρευση	642.00		324.00

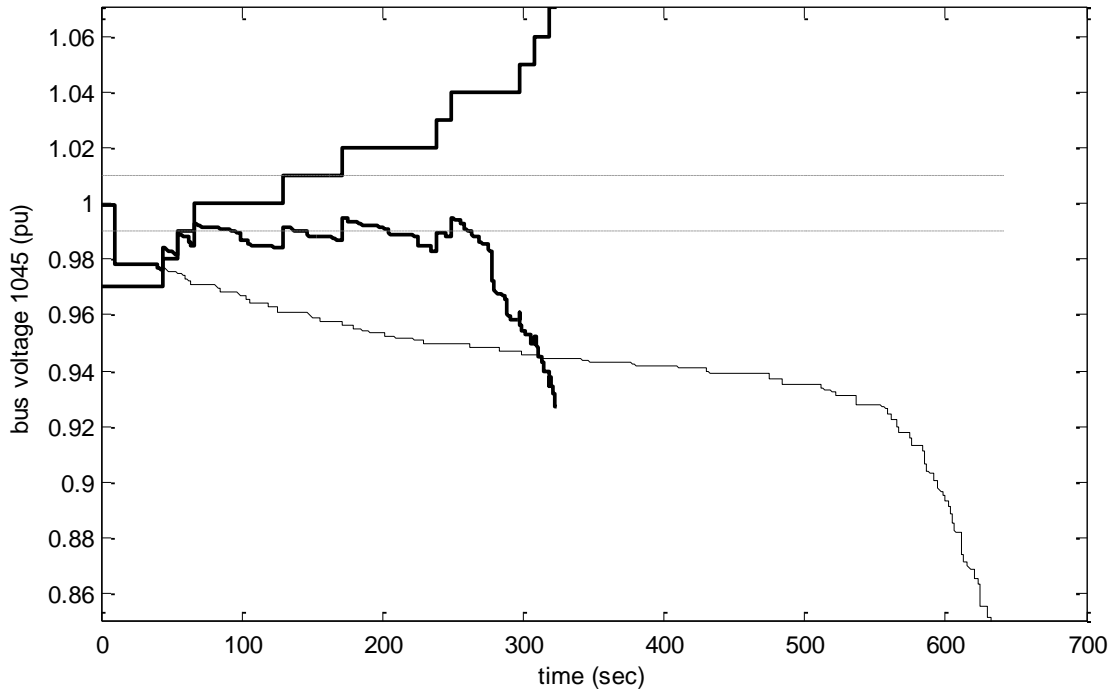
Από τον Πίνακα 7.6 διαπιστώνουμε ότι και στην προσομοίωση του συστήματος με το οιονεί στατικό μοντέλο η ύπαρξη δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ διατηρεί την τάση στα φορτία της κεντρικής περιοχής 1041, 1042, 1043, 1044 και 1045 εντός των ορίων λειτουργίας, καθώς δεν έχουμε ανίχνευση αστάθειας τάσης.

Από τα Σχήματα 7.27, 7.28, 7.29 και 7.31 παρατηρούμε ότι το οιονεί στατικό μοντέλο προβλέπει διατήρηση τάσης σε αρκετά υψηλότερη τιμή με 2 επίπεδα μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης σε σχέση με την πρόβλεψη του μοντέλου δύο χρονικών κλιμάκων.

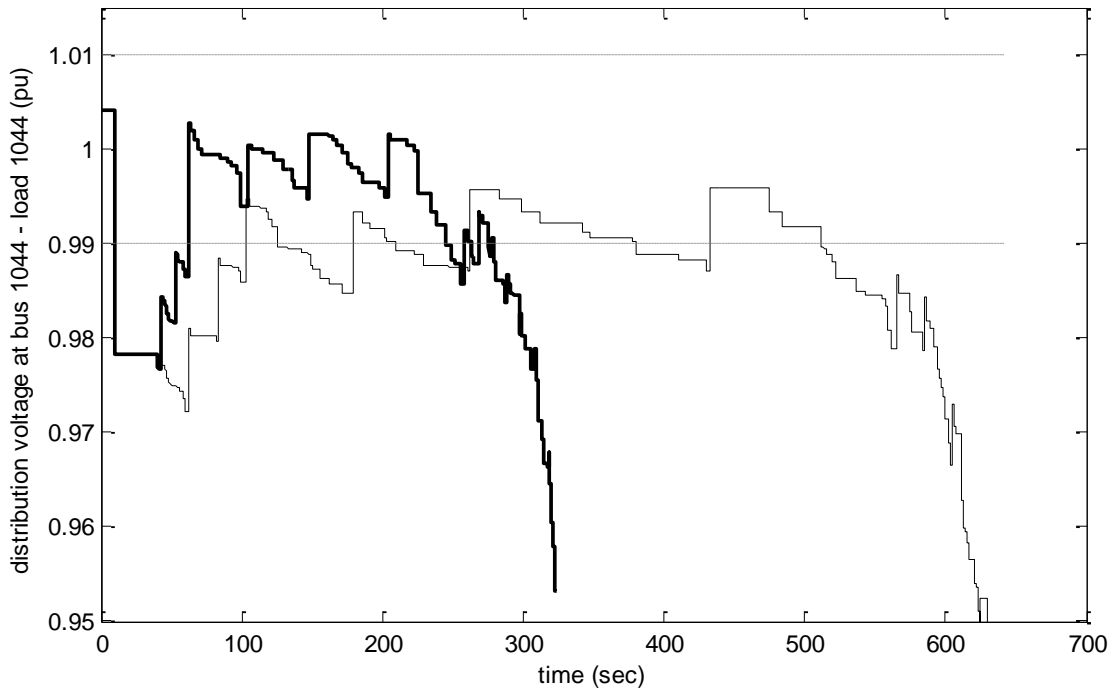
Όσον αφορά τη λειτουργία του μηχανισμού αλλαγής τάσης υπό φορτίο, τα Σχήματα 7.30 και 7.32 πιστοποιούν την ομοιότητα στη λειτουργία του μηχανισμού στα δύο προγράμματα.



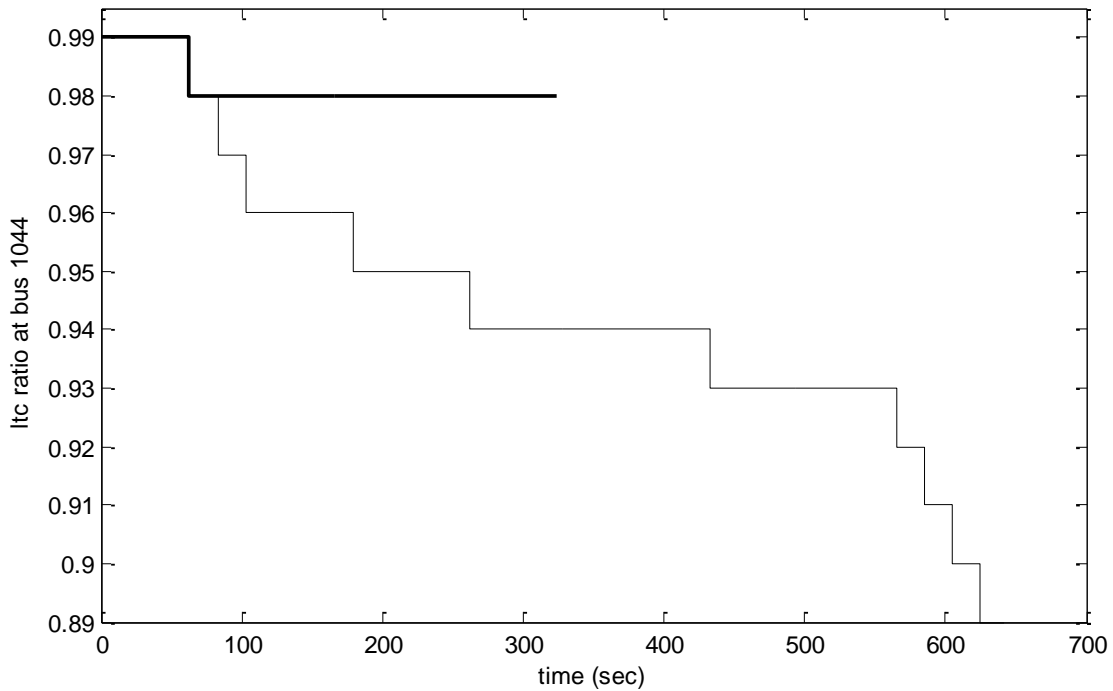
Σχήμα 7.27 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1044 (Wpstab)



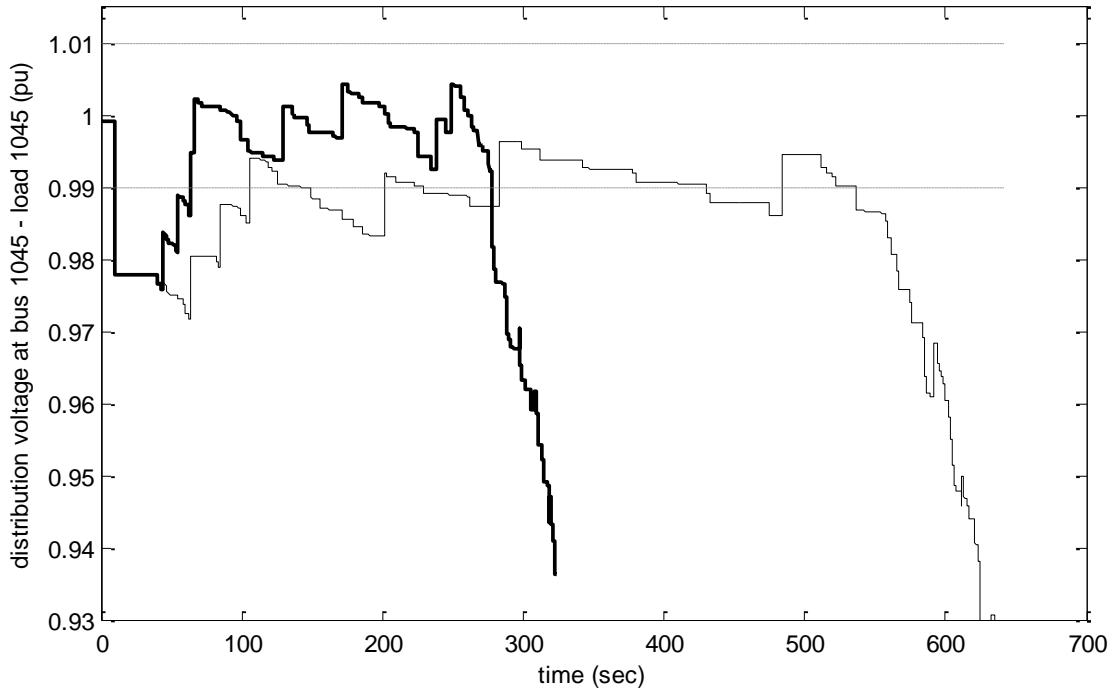
Σχήμα 7.28 Απόκριση τάσης στο ζυγό ΥΤ 1045 (Wpstab)



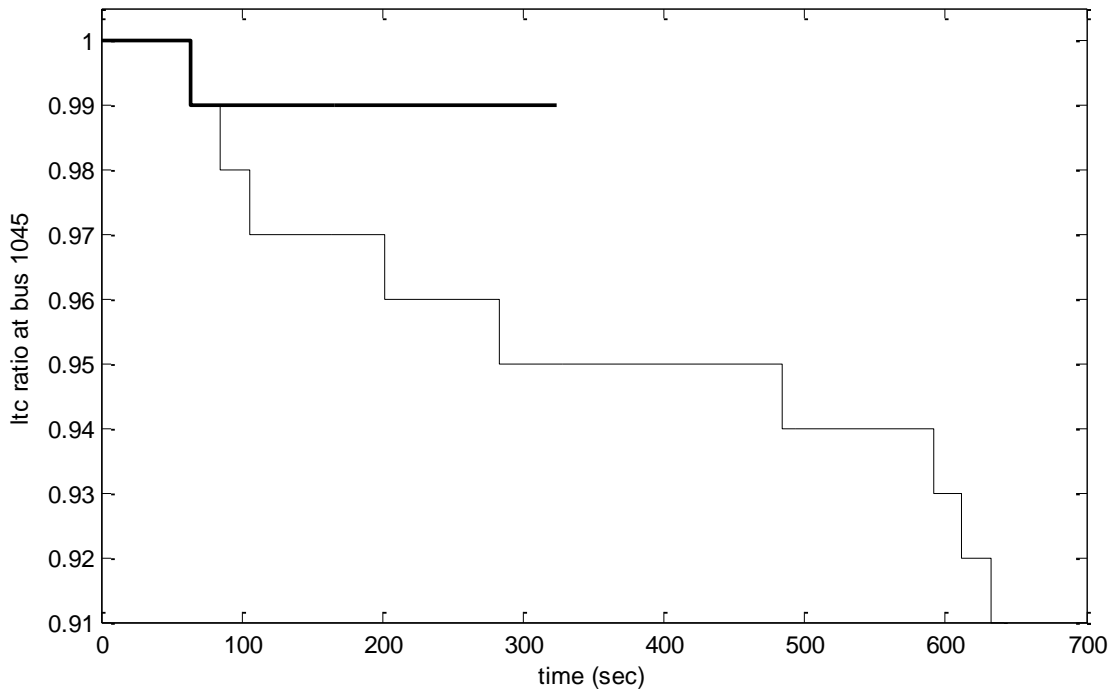
Σχήμα 7.29 Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1044 (Wpstab)



Σχήμα 7.30 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1044(Wpstab)



Σχήμα 7.31 Απόκριση τάσης στο ζυγό MT 1045 (Wpstab)



Σχήμα 7.32 Λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ ΥΤ/ΜΤ του ζυγού 1045 (Wpstab)





## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 8.1 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η σύγκριση δύο μεθόδων προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα έγινε σύγκριση ανάμεσα στη μέθοδο προσομοίωσης δύο χρονικών κλιμάκων, που αποτυπώνει με μεγάλη ακρίβεια το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, και στη μέθοδο προσομοίωσης με την οιονεί στατική προσέγγιση που αποτελεί ένα απλοποιημένο μοντέλο. Για την προσομοίωση του συστήματος δοκιμών που επιλέχθηκε με χρήση του ακριβέστερου μοντέλου χρησιμοποιήσαμε το περιβάλλον Matlab Simulink και για την προσομοίωση με το απλοποιημένο μοντέλο, το πρόγραμμα Wpstab, που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο ΣΗΕ του Ε. Μ. Πολυτεχνείου. Η προσομοίωση του συστήματος δοκιμών, που έγινε και στα δύο αυτά προγράμματα για μία δεδομένη διαταραχή, προέβλεψε την αναμενόμενη απόκριση του συστήματος. Με βάση τα όσα αναπτύχθηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6 για τα αποτελέσματα προσομοίωσης, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την ακρίβεια κάθε μεθόδου.

Αρχικά, το γενικό συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι και οι δύο μέθοδοι καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα για την ευστάθεια ή κατάρρευση του συστήματος μετά τη διαταραχή. Η μέθοδος δύο χρονικών κλιμάκων είναι σαφώς πιο ακριβής καθώς λαμβάνει υπόψη και τα φαινόμενα βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας, τα οποία θεωρούνται ακαριαία στην οιονεί στατική ανάλυση.

Όσον αφορά την απόκριση των δύο μεθόδων συνολικά, διαπιστώνουμε ότι κατά τη διαταραχή έχουμε παρόμοια απόκριση και με τα δύο μοντέλα. Καθώς όμως το σύστημα πλησιάζει σε κατάρρευση, η απόκλιση γίνεται εντονότερη. Η οιονεί στατική μέθοδος παρατηρούμε ότι προτρέπει στην απόκριση του συστήματος καθώς προβλέπει το επόμενο βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας σε μικρότερο χρόνο από ότι χρειάζεται το πραγματικό σύστημα όπως αποτυπώνει η προσομοίωση δύο χρονικών κλιμάκων. Λόγω αυτού, το σύστημα καταρρέει σε μικρότερο χρόνο όταν η προσομοίωση γίνεται με την οιονεί στατική μέθοδο. Ειδικά για την περίπτωση όπου έχουμε οριακή αστάθεια του συστήματος, οι δύο μέθοδοι έχουν μεγάλη απόκλιση στην πρόβλεψη του χρόνου κατάρρευσης, πράγμα αναμενόμενο. Το σύστημα δηλαδή να μην καταρρέει και στις δύο περιπτώσεις, αλλά σε αρκετά μεγαλύτερο χρόνο όταν η προσομοίωση γίνεται στις δύο χρονικές κλίμακες, επειδή τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα δεν είναι πλέον τόσο γρήγορα, και επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την απόκριση του συστήματος καθώς αλληλεπιδρούν με τα μακροπρόθεσμα.

Η λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης, της οποίας ο αλγόριθμος ενσωματώθηκε και στο πρόγραμμα Wpstab, από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 6 και 7, διαπιστώσαμε ότι παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά και στα δύο προγράμματα. Ειδικά σε περιπτώσεις έντονης αστάθειας, που οι τάσεις στους ζυγούς του συστήματος παρουσιάζουν μεγάλη πτώση η ενεργοποίηση συναγερμού προβλέπεται στον ίδιο χρόνο και στα δυο μοντέλα προσομοίωσης. Σε οριακές περιπτώσεις βέβαια, παρατηρήσαμε ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα επενεργούν και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση τάσης στους ζυγούς του συστήματος, και δεδομένου ότι η τάση αυτή είναι κοντά στα όρια λειτουργίας, είναι αναμενόμενο να έχουμε διαφορές στην πρόβλεψη κάθε μοντέλου.

Όσον αφορά τη λειτουργία του συστήματος προστασίας από αστάθεια τάσης, με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6 διαπιστώνουμε ότι η λειτουργία της μεθόδου είναι επίσης παρόμοια και με τις δύο μεθόδους προσομοίωσης. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί εδώ, είναι ότι το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης παρουσιάζεται συντηρητικό σε σχέση με το μοντέλο δύο χρονικών κλιμάκων. Και όσο μεγαλύτερο είναι το συνολικό φορτίο που πρόκειται να αποκοπεί, τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόκλιση στην αποκοπή φορτίου που προβλέπει το Wpstab. Οπότε σε περιπτώσεις οριακής αστάθειας, η πρόβλεψη του οιονεί στατικού μοντέλου για την αποκοπή φορτίου μπορεί να θεωρηθεί αρκετά ακριβής.

Επίσης, στην εργασία εξετάστηκε η εισαγωγή δύο επιπέδων μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης και τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του συστήματος παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 7. Με βάση τα αποτελέσματα, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η εισαγωγή του δεύτερου επιπέδου ΣΑΤΥΦ σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν βελτιώνει πάντα την απόκριση του συστήματος από πλευράς ευστάθειας. Κατά κύριο λόγο, η βελτίωση εντοπίζεται στις εξής παραμέτρους:

➤ Παράλληλα με τους μετασχηματιστές μεταβλητής λήψης εισάγουμε και τη μέθοδο ανίχνευσης αστάθειας τάσης όχι μόνο στα φορτία αλλά και σε ενδιάμεσους ζυγούς και υποσταθμούς ΥΥΤ/ΥΤ. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα ταχύτερης ανίχνευσης της αστάθειας, καθώς δεν θα χρειαστεί η διαταραχή να φτάσει στα φορτία του συστήματος για να ενεργοποιηθεί ο συναγερμός. Αυτό σημαίνει ότι η ανίχνευση αστάθειας θα πραγματοποιηθεί σε μικρότερο χρονικό διάστημα, κάτι που μας δίνει τη δυνατότητα να δράσουμε ταχύτερα προς αποκατάσταση ευσταθούς λειτουργίας.

➤ Σε επόμενη ανάλυση, εισάγοντας μεταβλητή λήψη (ΣΑΤΥΦ) σε ανώτερο επίπεδο τάσης, ουσιαστικά εισάγουμε ένα μηχανισμό ρύθμισης τάσης όχι μόνο σε φορτία αλλά και σε ενδιάμεσους ζυγούς του συστήματος. Επομένως με αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού στους υποσταθμούς υπερυψηλής/υψηλής τάσης μπορούμε να ρυθμίσουμε την τάση εντός επιτρεπών ορίων και στους ζυγούς υψηλής τάσης, προς

αποφυγή μεγάλων αποκλίσεων από την ενδεδειγμένη τιμή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να διατηρούμε την τάση στους ζυγούς σε υψηλότερα επίπεδα για το χρονικό διάστημα που λαμβάνει χώρα η διαταραχή, με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη κάλυψη του φορτίου μέχρι να δράσουν οι μηχανισμοί αποκατάστασης και το σύστημα να επέλθει ισορροπία.

## 8.2 Προοπτικές

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε η αποτελεσματικότητα του προγράμματος Wpstab στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και η ακρίβεια στην πρόβλεψη απόκρισης του πραγματικού συστήματος σε διαταραχές.

Στα πλαίσια αυτής της σύγκρισης εντάξαμε στο πρόγραμμα και τη μέθοδο προστασίας από κατάρρευση τάσης. Υπάρχει όμως η δυνατότητα να γίνουν κι άλλες επεκτάσεις για τη βελτίωση του προγράμματος. Μία τέτοια βασική βελτίωση αφορά την εισαγωγή στο πρόγραμμα των δυναμικά επαναφερόμενων φορτίων. Πρόκειται για φορτία που τείνουν να αποκαθιστούν την απορροφόμενη ισχύ τους λόγω της δυναμικής τους συμπεριφοράς. Τέτοια φορτία είναι οι μηχανές επαγωγής και τα θερμοστατικά φορτία και αποτελούν έναν ακόμα μηχανισμό αποκατάστασης φορτίου, πέραν των συστημάτων αλλαγής τάσης υπό φορτίο. Η μοντελοποίηση των δυναμικών φορτίων καθιστά το πρόγραμμα προσομοίωσης πληρέστερο εργαλείο για τη μελέτη συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Όσον αφορά το σύστημα δοκιμών Nordic32 που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των δύο προγραμμάτων και τη μελέτη λειτουργίας δύο επιπέδων ΣΑΤΥΦ, υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω βελτίωσή του, ώστε να προσεγγίζει με όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια ένα πραγματικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα όμως και στο υπάρχον σύστημα Nordic32, είναι πολλά τα δεδομένα για τα οποία δεν έχουμε πλήρη γνώση. Η περαιτέρω μελέτη του συστήματος λοιπόν, ώστε να αποτελεί εργαλείο για μελέτη όλων των δυναμικών φαινομένων σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μια ακόμα προοπτική έρευνας.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας με χρήση του Simulink και του Wpstab δόθηκε η δυνατότητα ένταξης, στο υπάρχον σύστημα, του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών. Όσον αφορά το Wpstab, λόγω της δομής του προγράμματος, η ένταξη πολλαπλών επιπέδων μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης είναι απλή διαδικασία και περιλαμβάνεται σαν επιλογή στο κύριο σώμα του αλγορίθμου. Η επέκταση αυτή όμως στο Matlab Simulink προϋποθέτει την προσθήκη πρόσθετων λειτουργιών στο υπάρχον σύστημα, και η μοντελοποίηση του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε στο σύστημα

δοκιμών Nordic32. Συνεπώς η βελτίωση του αλγορίθμου ένταξης πολλαπλών επιπέδων ΣΑΤΥΦ στο Simulink, είναι ένα ακόμα αντικείμενο περεταίρω μελέτης, ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε οποιοδήποτε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε ότι αφορά την ένταξη στο σύστημα του δεύτερου επιπέδου μετασχηματιστών μεταβλητής λήψης, μετά την εισαγωγή τους στο σύστημα δοκιμών και την μελέτη λειτουργίας τους στην προστασία του συστήματος, μπορούμε να συνεχίσουμε την έρευνα όσον αφορά τη χρησιμότητα και την απόδοσή τους σε πραγματικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, βάσει των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, η ένταξη του δεύτερου επιπέδου μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη λειτουργία της μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης (LIVES). Επομένως η περεταίρω μελέτη της λειτουργίας τους αποτελεί σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη μεθόδων για ταχύτερη ανίχνευση αστάθειας τάσης, και βελτίωση των συστημάτων προστασίας.

Τέλος, η ένταξη του αλγορίθμου ανίχνευσης αστάθειας τάσης στο πρόγραμμα Wpstab και η μελέτη της λειτουργίας του, δίνει μια ώθηση για συνέχιση της έρευνας όσον αφορά τη μέθοδο. Υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης τη μεθόδου ανίχνευσης αστάθειας τάσης καθώς και της μεθόδου αποκατάστασης. Η βελτίωση της μεθόδου LIVES αφορά την ένταξή της σε μεγάλα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, όπως το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, κάτι που μελετάται ήδη στο Εργαστήριο ΣΗΕ του Ε. Μ. Πολυτεχνείου.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] T. Van Cutsem and C. Vournas, *"Voltage Stability of Electric Power Systems."* Springer, 1998.
- [2] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, *"Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας"*, Αθήνα 2001.
- [3] Β. Κ. Παπαδιά, *"Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας"*, Τόμοι I, II, Αθήνα 1985.
- [4] C. D. Vournas, T. Van Cutsem, *"Local Identification of Voltage Emergency Situations"*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23, no. 3, pp. 1239 – 1248, Aug. 2008.
- [5] C. Vournas, C. Lambrou, M. Glavic, T. Van Cutsem, *"An integrated autonomous protection system against voltage instability based on Load Tap Changers"*, IREP Symposium - Bulk Power System Dynamics and Control – VIII (IREP), August 1-6, 2010, Buzios, PJ, Brazil.
- [6] C. D. Vournas, G. A. Manos, P. W. Sauer, M. A. Pai, *"Effect of Overexcitation Limiters on Power System Long-Term Modeling"*, IEEE PES Trans. on Energy Conversion, 1999.
- [7] Prabha Kundur, *"Power System Stability and Control"*, McGraw-Hill, 1994.
- [8] CIGRE TF 38.02.08, *"Long-Term Dynamics – Phase II"* (M. Stubbe, convenor), 1995.
- [9] Γ. Α. Μάνος, *"Ανάλυση Φαινομένων Κατάρρευσης Τάσεως σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας"*, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 1998.