



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

Συμβολή Συστήματος Υπομεταφοράς στον
Έλεγχο Τάσεως και Αέργου Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εποπτεία : Π. Μανδουλίδης
Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2018



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Συμβολή Συστήματος Υπομεταφοράς στον Έλεγχο Τάσεως και Αέργου Ισχύος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εποπτεία : Π. Μανδουλίδης
Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27η Μαρτίου 2018.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Κ.Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ.Κορρές
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π.Γεωργιάκης
Επικ.Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2018

(Υπογραφή)

.....

ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

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

© 2018 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Λαμπρόπουλος Βασίλειος, 2018.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) θέτει προκλήσεις αλλά προσφέρει και πολλές ευκαιρίες οι οποίες δίνουν κίνητρα για καινοτόμες λύσεις οι οποίες συμβάλλουν στη συγκρότηση του λεγόμενου «ευφυούς» δικτύου (smart grid). Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η συνεισφορά του συστήματος υπομεταφοράς στον έλεγχο της τάσης και της αέργου ισχύος του συστήματος μεταφοράς. Συγκεκριμένα, γίνεται διερεύνηση της δυνατότητας ελεγχόμενης απορρόφησης αέργου ισχύος από ένα υποδίκτυο προκειμένου να βοηθήσει το ανάντι δίκτυο να μειώσει τις τάσεις του σε ένα στιγμιότυπο χαμηλού φορτίου. Τα προτεινόμενα μέτρα (τεχνικές ελέγχου) για την αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος προσομοιώνονται με χρήση του προγράμματος WPSTAB, το οποίο αποτελεί ένα λογισμικό προσομοίωσης ΣΗΕ που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π).

Το σύστημα που χρησιμοποιείται αποτελεί ένα κομμάτι του γαλλικού ΣΗΕ το οποίο διαχειρίζεται ο RTE. Το σύστημα αποτελείται από ένα δίκτυο υπομεταφοράς 90 kV (ΥΤ) με αυξημένη αιολική διείσδυση το οποίο συνδέεται με ένα σύστημα μεταφοράς 225 kV (ΥΥΤ). Υπάρχουν τρεις υποσταθμοί ΥΥΤ/ΥΤ με παράλληλους μετασχηματιστές οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Στο επίπεδο της υπομεταφοράς είναι συνδεδεμένα οκτώ αιολικά πάρκα. Το στιγμιότυπο λειτουργίας που μελετάται είναι ένα στιγμιότυπο υψηλών τάσεων το οποίο παρατηρείται κατά τη διάρκεια ημερών με χαμηλό φορτίο ή/και αυξημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Οι γραμμές μεταφοράς φορτίζονται κάτω από τη φυσική φόρτιση και επομένως παράγουν άεργο ισχύ η οποία είναι υπεύθυνη για την ανύψωση των τάσεων. Αντικείμενο της εργασίας είναι η εφαρμογή μεθόδων που αποσκοπούν στην απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο υπομεταφοράς και με αυτόν τον τρόπο συμβάλλουν στην αντιμετώπιση των υψηλών τάσεων.

Αρχικά, το δίκτυο προσομοιώνεται με μηδενική ενεργό και άεργο αιολική παραγωγή και εφαρμόζεται η τεχνική της αύξησης των τάσεων στους ζυγούς της υπομεταφοράς καθώς και η τεχνική της δημιουργίας κυκλοφορούσας αέργου ισχύος σε παράλληλους μετασχηματιστές. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται ξανά οι παραπάνω τεχνικές αλλά με λειτουργία των αιολικών πάρκων υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Τέλος, αξιοποιείται η δυνατότητα των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος να ρυθμίζουν την τερματική τους τάση μέσω ελέγχου της αέργου ισχύος και έτσι διερευνώνται τα όρια κατανάλωσης αέργου ισχύος του υποδικτύου όταν οι μετατροπείς των αιολικών πάρκων λειτουργούν με χωρητικό συντελεστή ισχύος.

Λέξεις Κλειδιά

Έλεγχος αέργου ισχύος, Έλεγχος Τάσης, Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο, Κυκλοφορούσα Άεργος Ισχύς, Αιολικά Πάρκα

Abstract

In recent years the increasing penetration of Renewable Energy Sources (RES) in the electric grids poses many challenges, but also offers a lot of opportunities, thus motivating innovative solutions contributing to the smart grid target. This diploma thesis investigates the contribution of the sub-transmission system to the voltage control and reactive power regulation of the transmission system. In other words, the capability of controlled reactive absorption by the sub-transmission system in order to regulate transmission voltage at a light load snapshot is being investigated. The suggested control methods to increase reactive absorption are being simulated using WPSTAB, a power system simulation software developed in National Technical University of Athens (NTUA).

The system considered is a 90 kV (HV) sub-transmission network connected to a transmission network of 225 kV (EHV). This case study is inspired by an unnamed part of the French grid operated by RTE. There are three EHV/HV substations with parallel transformers equipped with LTC (Load Tap Changers). On the sub-Transmission level eight Wind Farms (WFs) are connected. The network condition studied is a light load snapshot with relatively high voltages, as the transmission lines are loaded below their surge impedance loading (SIL) producing reactive power. The overvoltage problem at the extra high voltage (EHV) transmission system can be caused during periods of the day with light load and/or increased PV generation. Main objective of the current diploma thesis is to implement methods which aim to cause controlled reactive absorption by the sub-transmission system and assist the transmission system with overvoltage mitigation.

The development of such methods is based on sub-transmission reference voltage rise in the substations' buses through LTC deadband manipulation. The system is initially simulated assuming that all WFs are not in operation and the methods of voltage increase as well as the circulating current method in parallel transformers are applied. Furthermore, the described methods are applied again with the WFs operating at unity power factor (UPF). Finally, the WF converter capability to operate with capacitive power factor by controlling their terminal voltage is being utilized in order to cause a further increase to reactive absorption.

Keywords

Reactive Power Control, Voltage Control, LTC, Circulating Current Method, Wind Farms

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π)

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ κ.Κωνσταντίνο Βουρνά για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα επιμορφωτικό, σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού καθώς και για το ότι ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να βοηθήσει και να μοιραστεί τις γνώσεις του.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Παναγιώτη Μανδουλίδη, για την άψογη συνεργασία, το χρόνο που αφιέρωσε καθώς και το προσωπικό ενδιαφέρον που έδειξε όλο αυτό το διάστημα. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα Θεόδωρο Σουζέ για το ενδιαφέρον και το χρόνο που διέθεσε να λύσει απορίες που προέκυψαν στην πορεία αυτής της διπλωματικής.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη των αποφάσεων και των επιλογών μου και τους φίλους μου για τις στιγμές που μοιραστήκαμε στη διάρκεια της φοιτητικής μας ζωής.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	5
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
1 Εισαγωγή	17
1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)	17
1.1.1 Σύστημα Παραγωγής	18
1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς	19
1.1.3 Δίκτυο Διανομής	19
1.2 Αιολική Παραγωγή	19
1.2.1 Τύποι Ανεμογεννητριών	21
1.2.2 Ρύθμιση Ενεργού-Αέργου Ισχύος	23
1.2.3 Όριο Ρεύματος και Ονομαστικά Μεγέθη	23
1.3 Γραμμές Μεταφοράς	23
1.3.1 Γραμμές Μεταφοράς Μικρού Μήκους	24
1.3.2 Απώλειες	26
1.3.3 Φαινόμενο Ferranti	26
1.3.4 Γραμμές Μεταφοράς μεσαίου μήκους	27
1.4 Μετασχηματιστές	28
1.4.1 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)	29
1.5 Φορτία	31
1.5.1 Επαγωγικά και Χωρητικά Φορτία	32
1.6 Μακροπρόθεσμη Προσομοίωση ΣΗΕ	33
1.6.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ	33

1.6.2	Οιονεί Στατική Προσέγγιση	35
1.6.3	Πρόγραμμα WPSTAB	35
1.7	Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας	36
2	Περιγραφή δοκιμαστικού συστήματος	39
2.1	Γενική παρουσίαση	39
2.2	Δεδομένα ζυγών και μετασχηματιστών	40
2.3	Δεδομένα Φορτίων	42
2.4	Δεδομένα Αιολικών Πάρκων (Α/Π)	42
2.5	Στιγμιότυπο λειτουργίας με υψηλές τάσεις	43
3	Τεχνικές ελέγχου αέργου κατανάλωσης χωρίς Α/Π	47
3.1	Αύξηση Τάσης αναφοράς	47
3.1.1	Περιγραφή μεθόδου	47
3.1.2	Άνοιγμα διασυνδετικών διακοπών ζυγών (ΔΔΖ)	48
3.1.3	Εφαρμογή στον υποσταθμό ALPHA	48
3.1.4	Εφαρμογή στον υποσταθμό BETA	50
3.1.5	Εφαρμογή στον υποσταθμό GAMMA	52
3.1.6	Αύξηση τάσης αναφοράς σε όλους τους υποσταθμούς	54
3.2	Δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος	56
3.2.1	Λειτουργία παράλληλων μετασχηματιστών με άνισους λόγους μετασχηματισμού	56
3.2.2	Περιγραφή μεθόδου	58
3.2.3	Εφαρμογή στον υποσταθμό ALPHA	59
3.2.4	Εφαρμογή στον υποσταθμό BETA	62
3.2.5	Εφαρμογή στον υποσταθμό GAMMA	64
3.2.6	Ταυτόχρονη εφαρμογή σε όλους τους υποσταθμούς	66
4	Συμβολή Α/Π στην κατανάλωση αέργου ισχύος	71
4.1	Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος	71
4.1.1	Αύξηση τάσης αναφοράς στον υποσταθμό ALPHA	71
4.1.2	ΔΔΖ ανοιχτοί	73
4.1.3	Κυκλοφορούσα αέργος ισχύς σε όλους τους υποσταθμούς	75
4.1.4	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	77
4.2	Απορρόφηση αέργου ισχύος από μετατροπείς Α/Π	79
4.2.1	Εισαγωγή γραμμής Α/Π	80
4.2.2	Αύξηση τάσης αναφοράς	82
4.2.3	Αύξηση τάσεων αναφοράς σε όλους τους υποσταθμούς	91
4.2.4	Επίδραση ανοίγματος διασυνδετικών διακοπών ζυγών (ΔΔΖ)	95
4.2.5	Κυκλοφορούσα αέργος ισχύς σε όλους τους υποσταθμούς	96
4.2.6	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	96

5	Συμπερασματα-Προοπτικές	101
5.1	Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα	101
5.2	Προοπτικές για μελλοντική έρευνα	102
	Βιβλιογραφία	104

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Γενική δομή ΣΗΕ [2].	18
1.2	Διείσδυση αιολικής παραγωγής σε χώρες της Ευρώπης (2017) [7].	20
1.3	Ανεμογεννήτρια με ΑΓΔΤ.	22
1.4	Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα.	22
1.5	Ισοδύναμο-π εναέριας γραμμής μεταφοράς.	24
1.6	Γραμμή μικρού μήκους και διανυσματικό διάγραμμα [13].	25
1.7	Γραμμή με το άκρο άφιξης ανοιχτοκυκλωμένο [1].	26
1.8	Γραμμή μεσαίου μήκους [13].	28
1.9	Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα M/Σ	29
1.10	M/Σ ρύθμισης μέτρου τάσης.	30
1.11	Χρονική εξέλιξη τάσης και νεκρή ζώνη [16].	31
1.12	Ισοδύναμο-π μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού.	31
1.13	Επαγωγικό (a) και χωρητικό φορτίο (b).	33
2.1	Δοκιμαστικό σύστημα.	40
2.2	Ισοδύναμο Thevenin.	44
3.1	Ισοδύναμο-π μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο ($r : 1$).	48
3.2	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.	49
3.3	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	50
3.4	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.	51
3.5	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	51
3.6	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.	52
3.7	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	53
3.8	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.	54
3.9	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.	55
3.10	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.	55
3.11	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	56
3.12	Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών με άνισες σχέσεις μετασχηματισμού.	57
3.13	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.	59
3.14	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10011.	60

3.15	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	61
3.16	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.	62
3.17	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20011.	63
3.18	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	63
3.19	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.	65
3.20	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30011.	65
3.21	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	66
3.22	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.	67
3.23	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10011.	67
3.24	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.	68
3.25	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20011.	68
3.26	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.	69
3.27	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30011.	69
3.28	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.	70
4.1	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 10\%P_{max}$).	72
4.2	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 40\%P_{max}$).	73
4.3	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 90\%P_{max}$).	73
4.4	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 10\%P_{max}$).	74
4.5	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 40\%P_{max}$).	74
4.6	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 90\%P_{max}$).	75
4.7	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 10\%P_{max}$).	76
4.8	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 40\%P_{max}$).	76
4.9	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού($P_{WF} = 90\%P_{max}$).	77
4.10	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς Α/Π.	78
4.11	Ενεργός Ισχύς άπειρου ζυγού.	78
4.12	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς Α/Π.	79
4.13	Διασυνδεδετική γραμμή Α/Π-ζυγού υπομεταφοράς.	80
4.14	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ ALPHA	83
4.15	Άεργος Ισχύς Α/Π-Αύξηση τάσης Υ/Σ ALPHA	83
4.16	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 10010 84	
4.17	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ BETA	85
4.18	Άεργος Ισχύς Α/Π-Αύξηση τάσης Υ/Σ BETA	86
4.19	Άεργος Ισχύς και ρεύματα Α/Π (90 % αιολική διείσδυση)	87
4.20	Τάσεις Α/Π BETA 1 και BETA 2	87
4.21	Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 20010 88	
4.22	Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ GAMMA	89
4.23	Άεργος Ισχύς Α/Π-Αύξηση τάσης Υ/Σ GAMMA	89

4.24 Ρεύματα Α/Π (40 και 90% αιολική διείσδυση)	90
4.25 Άεργος ισχύς Α/Π (40 και 90% αιολική διείσδυση)	90
4.26 Τάσεις Α/Π (40 και 90% αιολική διείσδυση)	91
4.27 Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 30010 91	
4.29 Άεργος Ισχύς Α/Π-Αύξηση τάσεων όλων των Υ/Σ	93
4.30 Άεργος Ισχύς και ρεύματα Α/Π (90 % αιολική διείσδυση)	93
4.31 Τάσεις Α/Π ΒΕΤΑ 1,2 ΓΑΜΜΑ 1,2 και ΘΕΤΑ.	94
4.32 Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 10010.	94
4.33 Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 20010.	95
4.34 Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 30010.	95
4.35 Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 90\%$ - Κυκλοφορούσα άεργος ισχύς). . . .	96
4.36 Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς Α/Π.	97

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Ζυγοί δικτύου	41
2.2	Δεδομένα ΣΑΤΥΦ.	41
2.3	Φορτία συστήματος.	42
2.4	Δεδομένα Αιολικών Πάρκων	42
2.5	Ροή φορτίου (ΔΔΖ κλειστοί)	43
2.6	Ροή φορτίου (ΔΔΖ ανοιχτοί)	44
2.7	Τάση συστήματος μεταφοράς και άεργος ισχύς	45
3.1	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	50
3.2	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	52
3.3	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	53
3.4	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	54
3.6	Επαγωγικές αντιδράσεις μετασχηματιστών (στα 100 MVA)	60
3.5	Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ ALPHA)	60
3.7	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	60
3.8	Τάσεις ζυγών ΥΥΤ	61
3.9	Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ BETA)	62
3.10	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	63
3.11	Τάσεις ζυγών ΥΥΤ	64
3.12	Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ GAMMA)	64
3.13	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	66
3.14	Τάσεις ζυγών ΥΥΤ	66
3.15	Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (όλοι οι Υ/Σ)	68
3.16	Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών	70
4.1	Στοιχεία διασυνδετικών γραμμών Α/Π	80
4.2	Στοιχεία Α/Π	81
4.3	Όρια ρεύματος μετατροπέων	81
4.4	Τελική κατάσταση για το Σενάριο 4 (90 % επίπεδο αιολικής παραγωγής)	98
4.5	Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού (Τελική κατάσταση)	99

Κεφάλαιο 1

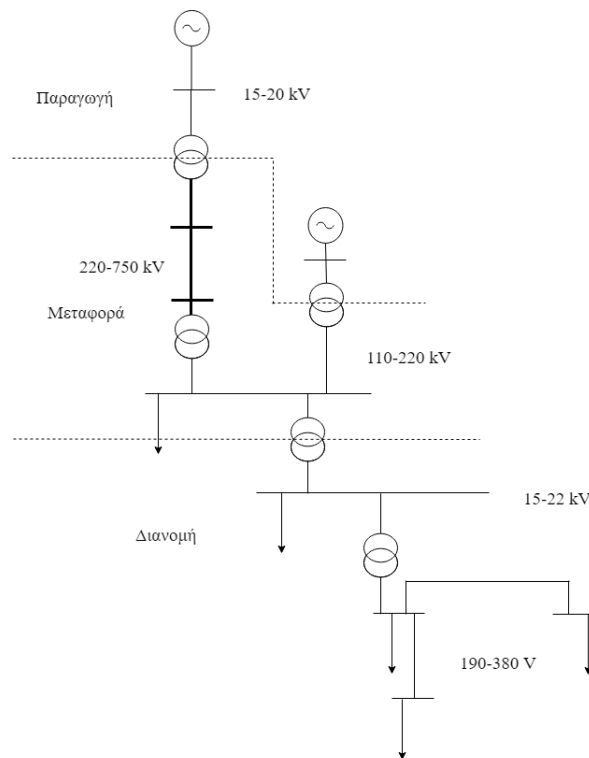
Εισαγωγή

1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Η λειτουργία ενός ΣΗΕ έγκειται στην μετατροπή της εκάστοτε διαθέσιμης μορφής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και στη μεταφορά της στα σημεία κατανάλωσης. Επομένως, βασικές λειτουργίες ενός ΣΗΕ είναι η παραγωγή, η μεταφορά και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των αντίστοιχων καταναλωτών. Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζεται η γενική δομή ενός ΣΗΕ.

Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται σπάνια στην αρχική της μορφή, αλλά συνήθως μετατρέπεται σε άμεσα αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας όπως είναι η μηχανική, η θερμική και ο φωτισμός. Βασικό πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δυνατότητα της εύκολης μεταφοράς και της ελεγχιμότητας που προσφέρει με σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης και αξιοπιστίας. Ο ορθός σχεδιασμός και λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει την ανταπόκριση στις μεταβολές της ζήτησης του φορτίου με το μικρότερο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Παράλληλα, θεμελιώδης απαίτηση είναι η εξασφάλιση σταθερής συχνότητας, τάσης και υψηλού επιπέδου αξιοπιστίας [1],[2].

Παρόλο που τα ΣΗΕ ανά τον κόσμο παρουσιάζουν αρκετές επιμέρους διαφοροποιήσεις ως προς το μέγεθος και τα στοιχεία που τα αποτελούν, όλα μοιράζονται τα ίδια θεμελιώδη χαρακτηριστικά και παρόμοια δομή. Συγκεκριμένα, απαρτίζονται από τρία ξεχωριστά υποσυστήματα, το σύστημα παραγωγής, το σύστημα μεταφοράς και το δίκτυο διανομής.



Σχήμα 1.1: Γενική δομή ΣΗΕ [2].

1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καλείται η διαδικασία που απαιτείται για τη μετατροπή μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας (θερμική, υδροδυναμική, αιολική) σε ηλεκτρική [2]. Ανάλογα με τη μορφή της πρωτογενούς ενέργειας, οι σταθμοί διακρίνονται σε θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς και εναλλακτικούς [2], [3].

Από τους **θερμοηλεκτρικούς σταθμούς**, οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί χρησιμοποιούν τον ατμό που προέρχεται από την καύση ορυκτών (πχ. λιγνίτης) ή την πυρηνική σχάση ως μέσο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας με τη βοήθεια ατμοστροβίλων οι οποίοι οδηγούν τη σύγχρονη γεννήτρια. Αντίθετα, οι πετρελαϊκοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), οι οποίες είναι είτε γεννήτριες Diesel είτε αεριοστροβίλοι.

Στους **υδροηλεκτρικούς σταθμούς**, αξιοποιείται η δυναμική ενέργεια του νερού, η οποία μετατρέπεται σε κινητική μέσω υδροστροβίλων διαφόρων τύπων. Με κριτήριο τον τρόπο που ρέει το νερό, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί διακρίνονται σε φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής και σε αντλητικούς.

Στους **εναλλακτικούς σταθμούς** παραγωγής χρησιμοποιούνται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Οι πιο διαδεδομένες ΑΠΕ στα σημερινά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα (Α/Π) και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα Α/Π αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών και μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο μέσω ανεμοκινητήρα και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω των γεννητριών. Οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί

χρησιμοποιούν ηλιακές κυψέλες (Solar Cells) προκειμένου να μετατρέψουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική.

1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Το σύστημα μεταφοράς είναι αυτό που διασυνδέει τους σταθμούς παραγωγής καθώς και διαφορετικά ΣΗΕ μεταξύ τους και μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος προς τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής [2], [4]. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι περιορίζονται οι ηλεκτρικές απώλειες και εξασφαλίζεται οικονομικότερη λειτουργία. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης δικτύων καθώς και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Επίσης, το σύστημα μεταφοράς εξυπηρετεί βιομηχανικούς καταναλωτές υψηλής τάσης με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10 MW, οι οποίοι διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης [2]. Η δομή των συστημάτων μεταφοράς είναι βροχοειδής, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της τροφοδότησης μέσω εναλλακτικών δρόμων ροής της ισχύος. Τέλος, το συνδυασμένο σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system) [1].

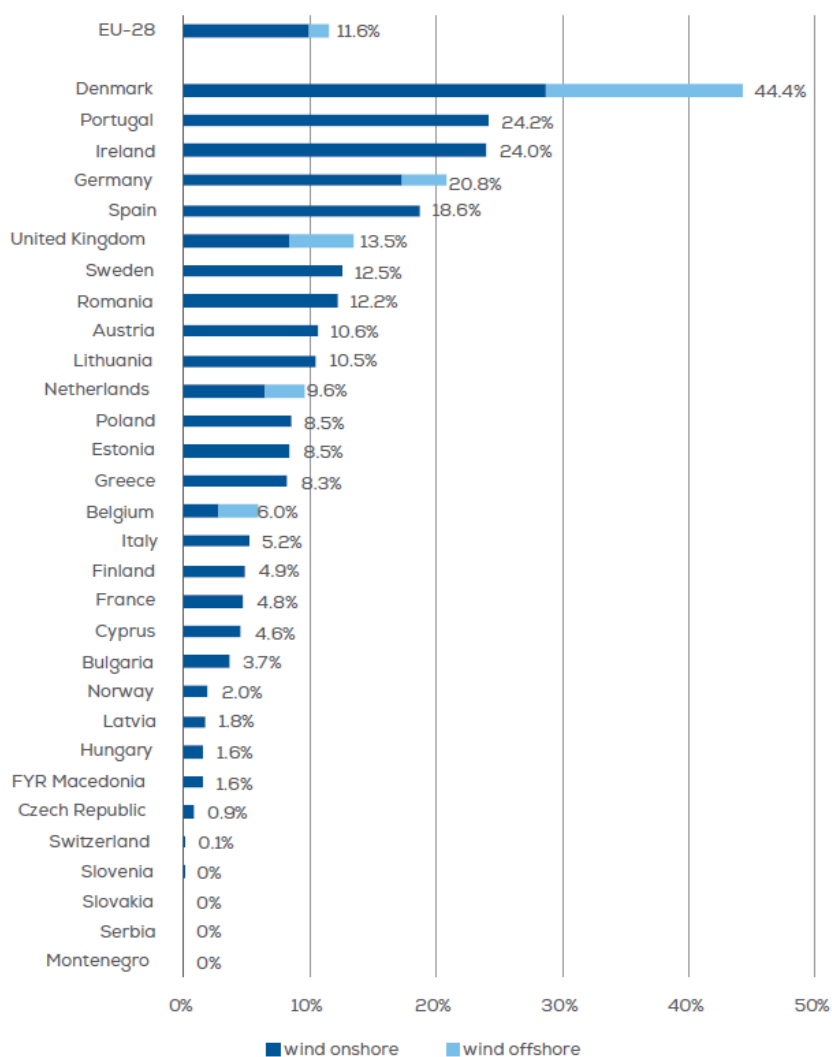
1.1.3 Δίκτυο Διανομής

Με τον όρο *διανομή ηλεκτρικής ενέργειας* περιγράφεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες αυτή διανέμεται στους καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής περιλαμβάνουν τις γραμμές, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στους καταναλωτές και τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης [2]. Το Δίκτυο Διανομής χωρίζεται σε δυο βαθμίδες: την διανομή Μέσης Τάσης ή πρωτεύουσα διανομή και την διανομή Χαμηλής Τάσης ή δευτερεύουσα διανομή. Το δίκτυο διανομής τροφοδοτείται από υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους σταθμούς ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές ΜΤ. Ανάλογα με την περιοχή τροφοδότησης, τα δίκτυα διανομής διαχωρίζονται σε εναέρια και υπόγεια, ενώ εξαιτίας του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν οργανώνονται ακτινικά λόγω απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας στα δίκτυα αυτά [4].

1.2 Αιολική Παραγωγή

Με τον όρο *αιολική παραγωγή* νοείται η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μια άλλη μορφή ενέργεια χρήσιμη για τον άνθρωπο [5]. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της αξιοποίησης της ενέργειας του ανέμου γίνεται από τα αιολικά πάρκα (Α/Π) τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών [6]. Τα τελευταία χρόνια η αιολική ενέργεια παρουσιάζει ραγδαία ανάπτυξη με άμεσο επακόλουθο την αύξηση της διείσδυσης σε αρκετά ΣΗΕ στην Ευρώπη αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο. Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΕ [7], για το έτος 2017 στη Δανία το 44 % της ηλεκτρικής ενέργειας παράχθηκε από αιολικά.

Με ποσοστό περίπου 24 % ακολούθησαν η Πορτογαλία και η Ιρλανδία ενώ η Ελλάδα βρίσκεται στην 14η θέση με 8.3 %. Αναλυτικότερα, τα ποσοστά για τις 28 χώρες της Ε.Ε παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.2. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με στοιχεία του ΑΔΜΗΕ [8], μέχρι το τέλος του 2016 λειτουργούσαν Α/Π συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 2047 MW με πρόβλεψη να ξεπεράσουν τα 4300 MW μέχρι το τέλος του 2027.



Σχήμα 1.2: Διείσδυση αιολικής παραγωγής σε χώρες της Ευρώπης (2017) [7].

Τα μεγάλης ισχύος Α/Π συνδέονται απευθείας στο σύστημα μεταφοράς, ενώ οι μικρότερες μονάδες χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πιο απομονωμένες περιοχές. Η αιολική ενέργεια, ως εναλλακτική της ενέργειας που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, είναι ανανεώσιμη, άφθονη, «καθαρή» υπό την έννοια ότι δεν παράγει αέρια του θερμοκηπίου. Παρ' όλα αυτά, η κατασκευή Α/Π δεν είναι πάντα καλοδεχούμενη εξαιτίας αισθητικής ρύπανσης και λοιπών επιδράσεων στο περιβάλλον της περιοχής [5].

Σημαντικό χαρακτηριστικό της αιολικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί

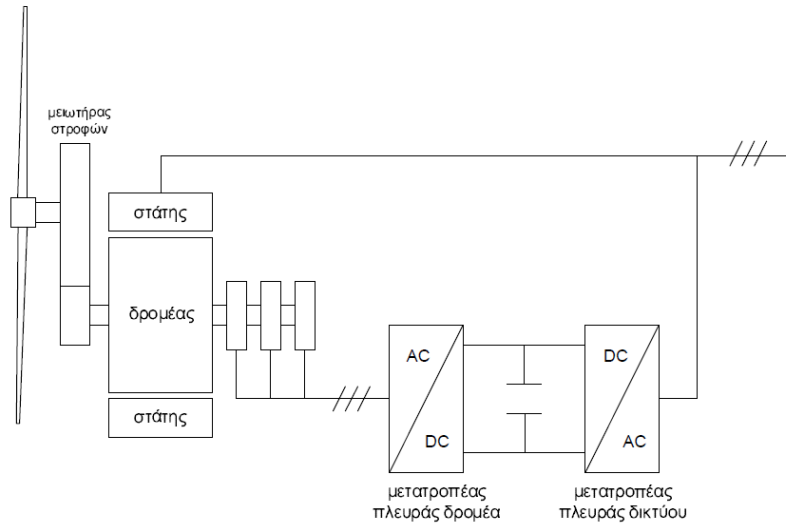
ανάλογα με τη ζήτηση, όπως γίνεται για παράδειγμα με τις υδροηλεκτρικές μονάδες. Αυτό επιβάλλει, για λόγους οικονομικής λειτουργίας, στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας να δέχεται το σύνολο της ισχύος που παράγεται από τα Α/Π. Όσο η διείσδυση της αιολικής παραγωγής αυξάνεται, ανακύπτει ο κίνδυνος της εμφάνισης πλεονάζουσας παραγόμενης ισχύος. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, πρέπει το πλεόνασμα ισχύος να εξάγεται σε γειτονικά ΣΗΕ ή ακόμα και να αποθηκεύεται [5].

Τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετώπιζονταν από τους διαχειριστές των ΣΗΕ ως «αρνητικά φορτία», που σημαίνει ότι είχαν ίδιες υποχρεώσεις με τους καταναλωτές όσον αφορά στην ποιότητα ισχύος (αρμονικές, αντιστάθμιση αέργου ισχύος). Με την αύξηση της αιολικής ισχύος, άρχισε να γίνεται εμφανής η συνεισφορά τους στα δίκτυα μεταφοράς και έτσι άρχισε μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ, των κανονισμών για τα Α/Π που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών ανεμογεννητριών [9].

1.2.1 Τύποι Ανεμογεννητριών

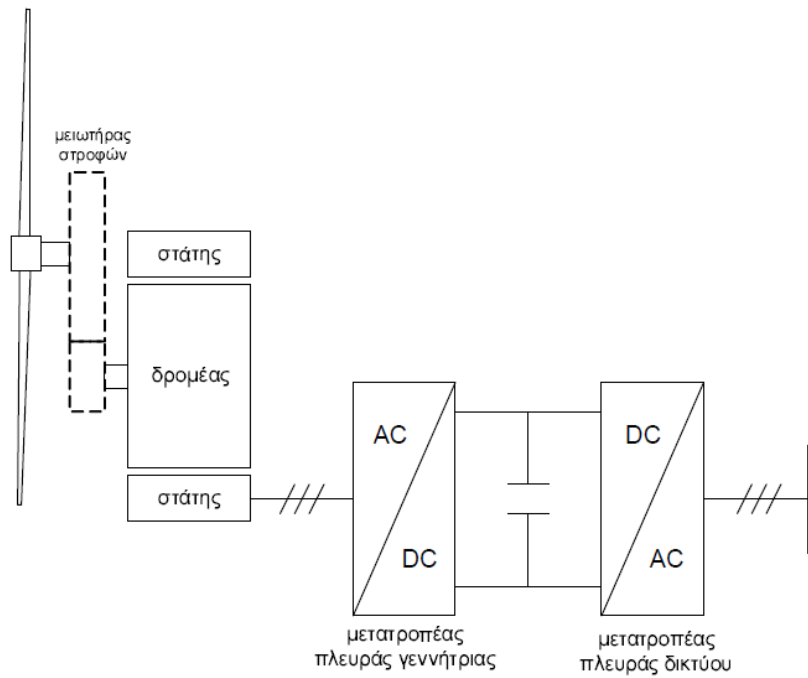
Μια βασική διάκριση των ανεμογεννητριών είναι σε σταθερών και μεταβλητών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούν μηχανές επαγωγής οι οποίες συνδέονται απευθείας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών χρησιμοποιούν μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος για τη ρύθμιση της ταχύτητας και πλεονεκτούν έναντι των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών διότι έχουν δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Το χαρακτηριστικό αυτό συμβάλλει στην αυξημένη ενεργειακή απόδοση και έχει οδηγήσει στην γενικευμένη χρήση και καθιέρωση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η κατηγορία αυτή κάνει χρήση ασύγχρονων γεννητριών διπλής τροφοδότησης (ΑΓΔΤ-DFIG) ή σύγχρονων γεννητριών με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος (Full Converter).

- **Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ-DFIG):** Οι ΑΓΔΤ είναι μηχανές επαγωγής τυλιγμένου δρομέα των οποίων και ο στάτης και ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο. Ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα, ο οποίος αποτελείται από δυο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM) και κοινή DC πλευρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3. Η συνολική ενεργός ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο είναι το άθροισμα της ισχύος του στάτη και της ισχύος του δρομέα (μέσα από τον μετατροπέα). Ο μετατροπέας είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος (25-30 % της ισχύος του στάτη), διότι περνάει μόνο ένα μέρος της ισχύος από αυτό [10]. Ο μετατροπέας πλευράς δρομέα είναι αυτός που ρυθμίζει συνήθως την άεργο ισχύ της γεννήτριας, ενώ ο μετατροπέας πλευράς δικτύου λειτουργεί συνήθως υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος [9].



Σχήμα 1.3: Ανεμογεννήτρια με ΑΓΔΤ.

- Γεννήτριες με Πλήρη Μετατροπέα (Full Converter): Συνήθως χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες είτε με τύλιγμα διέγερσης είτε μονίμων μαγνητών. Οι γεννήτριες αυτές στην πλειοψηφία των περιπτώσεων διαθέτουν μεγάλο αριθμό πόλων προκειμένου να αποφεύγεται το τύλιγμα διέγερσης [9].



Σχήμα 1.4: Ανεμογεννήτρια με πλήρη μετατροπέα.

1.2.2 Ρύθμιση Ενεργού-Αέργου Ισχύος

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος με τους οποίους είναι εξοπλισμένες οι Α/Γ που αναλύθηκαν παραπάνω έχουν τη δυνατότητα για ξεχωριστό έλεγχο της ενεργού ισχύος (P) που παράγουν και της αέργου ισχύος(Q) που παράγουν ή καταναλώνουν. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτός ο έλεγχος της τάσης ή του ρεύματος με κατάλληλη προσαρμογή των ροών ενεργού και αέργου ισχύος. Επιπλέον, είναι δυνατό να ελέγχεται ο συντελεστής ισχύος των μετατροπέων (συνήθως στη μονάδα). Όπως θα γίνει σαφές και παρακάτω στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία διερευνάται η δυνατότητα για λειτουργία των ισοδύναμων ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων με χωρητικό συντελεστή ισχύος, δηλαδή με απορρόφηση αέργου ισχύος.

1.2.3 Όριο Ρεύματος και Ονομαστικά Μεγέθη

Οι μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος δεν έχουν δυνατότητα έστω χρονικά περιορισμένης υπερφόρτισης. Σε περίπτωση που ζητηθεί από το δίκτυο τιμή ρεύματος μεγαλύτερη από την ονομαστική, αυτή περιορίζεται αυτόματα με τη μετατροπή της πηγής τάσεως σε πηγή ρεύματος [11]. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα του μετατροπέα τείνει να ξεπεράσει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος στην αποδεκτή τιμή. Όπως και παραπάνω, έχει θεωρηθεί ότι ο ελεγκτής ρεύματος δρα αχαριαία.

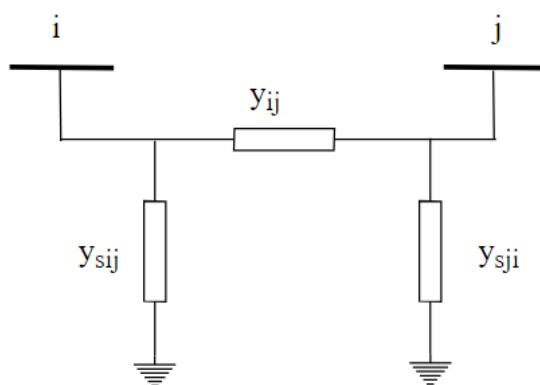
Η μέγιστη τιμή του ρεύματος υπολογίζεται μέσω της φαινόμενης ονομαστικής ισχύος του μετατροπέα και της ονομαστικής τάσης. Συγκεκριμένα θεωρώντας S_n την ονομαστική φαινόμενη ισχύ και V_n την ονομαστική τάση στο ανά μονάδα σύστημα, το μέγιστο όριο ρεύματος υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (1.1)$$

1.3 Γραμμές Μεταφοράς

Οι εναέριες γραμμές (γραμμές μεγάλου μήκους) παριστάνονται με το ισοδύναμο-π κύκλωμα, διότι διαθέτουν υπολογίσιμες χωρητικότητες προς γη. Αντίστοιχα, στην περίπτωση ενός υπόγειου καλωδιακού δικτύου, μπορεί να θεωρηθεί το ίδιο ισοδύναμο κύκλωμα με διαφορετικές τιμές στις ισοδύναμες παραμέτρους. Για την ακρίβεια, στα καλώδια επειδή το διηλεκτρικό ανάμεσα στους αγωγούς είναι ισχυρότερο από τον αέρα και λόγω της μικρής απόστασης των αγωγών μεταξύ τους, εξάγεται ότι η χωρητικότητα προς γη είναι σημαντική και σε καμία περίπτωση δεν θεωρείται αμελητέα.

Όπως θα αποδειχθεί αναλυτικά σε επόμενη υποενότητα, οι γραμμές που είναι φορτισμένες κάτω από τη φυσική φόρτιση, παράγουν άεργο ισχύ. Αυτό σημαίνει ότι οι άεργες απώλειες είναι μικρότερες από την άεργο παραγωγή της εγχάρσιας χωρητικότητας [1], [12]. Η λειτουργική κατάσταση αυτή εμφανίζεται σε περιόδους χαμηλού φορτίου και έχει ως αποτέλεσμα τις υψηλές τάσεις λειτουργίας λόγω πλεονάσματος αέργου ισχύος στο σύστημα. Η παρατήρηση αυτή



Σχήμα 1.5: Ισοδύναμο-π εναέριας γραμμής μεταφοράς.

έχει ιδιαίτερη αξία στην παρούσα διπλωματική εργασία διότι η ανάλυση γίνεται για στιγμιότυπο χαμηλής φόρτισης με υψηλές τάσεις λειτουργίας.

1.3.1 Γραμμές Μεταφοράς Μικρού Μήκους

Στις γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους θεωρείται αμελητέα η εγκάρσια αγωγιμότητα και το μονογραμμικό διάγραμμα που τις περιγράφει είναι αυτό στο Σχήμα 1.6. Η απουσία της εγκάρσιας χωρητικότητας καταλήγει στην υπόθεση ότι το ρεύμα είναι το ίδιο παντού επάνω στη γραμμή. Στη συνέχεια έχοντας ορίσει τις συνιστώσες του ρεύματος ως: $I_i = I \cos \phi$ και $I_r = I \sin \phi$, ορίζονται και οι δυο συνιστώσες της πτώσης τάσης ως εξής:

$$\Delta u = RI_i + XI_r \qquad \delta u = XI_i - RI_r \qquad (1.2)$$

όπου Δu η πτώση τάσης εν φάσει με τη V_2 και δu η εγκάρσια συνιστώσα.

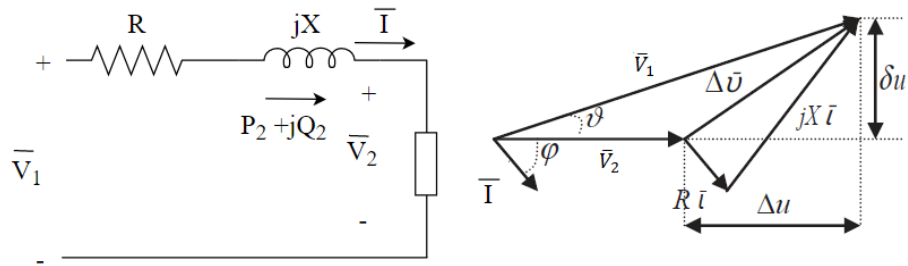
Εκφράζοντας τις δυο σχέσεις της εξίσωσης 1.2 σε συνάρτηση με την ενεργό και την άεργο ισχύ που φτάνει στο ζυγό 2 προκύπτει ότι:

$$\Delta u = \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2} \qquad \delta u = \frac{XP_2 - RQ_2}{V_2} \qquad (1.3)$$

Γενικά, επειδή στις γραμμές μεταφοράς ισχύει ότι $R \ll X$, δηλαδή η ωμική αντίσταση είναι σημαντικά μικρότερη της επαγωγικής αντίδρασης, προκύπτει ότι

$$\Delta u = \frac{XQ_2}{V_2} \qquad \delta u = \frac{XP_2}{V_2} \qquad (1.4)$$

Επομένως, από την εξίσωση 1.4 γίνεται εμφανές ότι μεγαλύτερη συνεισφορά στην πτώση τάσης έχει η ροή αέργου ισχύος πάνω στην γραμμή. Από την άλλη, η ενεργός ισχύς κυρίως επηρεάζει τη φασική απόκλιση (δu) ανάμεσα στις τάσεις. Με βάση αυτά τα συμπεράσματα, η



Σχήμα 1.6: Γραμμή μικρού μήκους και διανυσματικό διάγραμμα [13].

ροή αέργου ισχύος πρέπει να περιορίζεται προκειμένου να περιορίζεται και η πτώση τάσης. Στην πραγματικότητα, αυτό γίνεται εφικτό όταν η παραγωγή αέργου ισχύος βρίσκεται κοντά στην περιοχή κατανάλωσης της. Ωστόσο, δεν πρέπει να αμελείται ο ρόλος της ενεργού ισχύος, απλά εδώ τονίζεται η μεγάλη συνεισφορά που έχει η άεργος ισχύς στην πτώση τάσης όταν υπάρχει μεγάλη απόσταση μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης της [13].

Οι ροές ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό άφιξης 2 δίνονται από τις εξισώσεις 1.5 και 1.6

$$P_2 = \frac{V_2 V_1 \sin \theta}{X} \quad (1.5)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos \theta - V_2^2}{X} \quad (1.6)$$

Ανάλογα, η άεργος ισχύς ισχύος στο ζυγό αναχώρησης 1 δίνεται από την εξίσωση 1.7:

$$Q_1 = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \theta}{X} \quad (1.7)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις εξάγονται τα εξής συμπεράσματα και παρατηρήσεις σχετικά με το ζυγό άφιξης 2:

- Η άεργος ισχύς στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς είναι αντιστρόφως ανάλογη με την επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Το ίδιο ισχύει και για την ενεργό ισχύ.
- Η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή αυξάνεται αν η τάση του ζυγού αναχώρησης αυξηθεί ή αν η τάση του ζυγού άφιξης μειωθεί.
- Οι μικρές διακυμάνσεις του μέτρου των τάσεων στα άκρα των γραμμών (τιμές γύρω στο 1 αμ) και του $\cos \theta$ (τιμές γύρω στο 1) συνδυαστικά επηρεάζουν το ποσό και την κατεύθυνση της ροής αέργου ισχύος.
- Η ροή ενεργού ισχύος επηρεάζεται περισσότερο από τις διακυμάνσεις της γωνίας φορτίου εξαιτίας της μεγάλης κλίσης του $\sin \theta$ στην περιοχή του $\theta = 0$.

1.3.2 Απώλειες

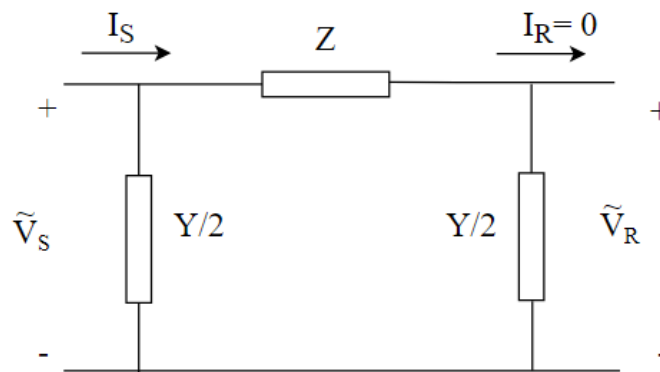
Εκτός από την απαίτηση για διατήρηση της πτώσης τάσης στα αποδεκτά επίπεδα, είναι απαραίτητη η ελαχιστοποίηση της ροής αέργου ισχύος εξαιτίας των απωλειών λόγω φαινομένου Joule. Γενικά ισχύει ότι :

$$Q_1 - Q_2 = \frac{(V_1 - V_2)^2}{X} = I^2 X \quad (1.8)$$

Τα θερμικά όρια για κάθε στοιχείο του δικτύου ορίζονται συναρτήσει του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος. Επομένως, ο περιορισμός της ροής αέργου ισχύος περιορίζει με τη σειρά του και τη ροή ενεργού ισχύος. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών απαιτεί αντιστάθμιση αέργου ισχύος και λειτουργία του δικτύου με τις μέγιστες δυνατές τάσεις.

1.3.3 Φαινόμενο Ferranti

Ως φαινόμενο Ferranti ορίζεται η ανύψωση της τάσης στο άκρο άφιξης μιας ανοιχτοκυκλωμένης ή ελαφρά φορτισμένης γραμμής λόγω του χωρητικού ρεύματος που ρέει μέσα από την αυτεπαγωγή της γραμμής. Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε από τον Ferranti στις εναέριες γραμμές που εξυπηρετούσαν ένα ελαφρά φορτισμένο (και επομένως εξαιρετικά χωρητικό) καλωδιακό δίκτυο.



Σχήμα 1.7: Γραμμή με το άκρο άφιξης ανοιχτοκυκλωμένο [1].

Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 1.7, με εφαρμογή του Νόμου Τάσεων Kirchoff προκύπτει για την τάση αναχώρησης V_S :

$$\tilde{V}_S = Z(\tilde{I}_R + \frac{Y}{2}\tilde{V}_R) + \tilde{V}_R = (\frac{ZY}{2} + 1)\tilde{V}_R + Z\tilde{I}_R \quad (1.9)$$

όμως αφού η γραμμή είναι ανοιχτοκυκλωμένη στο άκρο άφιξης θα ισχύει ότι $I_R = 0$ και επομένως:

$$\tilde{V}_S = (\frac{ZY}{2} + 1)\tilde{V}_R \quad (1.10)$$

Η εξίσωση 1.10 μπορεί να γραφτεί επίσης ως εξής:

$$\tilde{V}_S - \tilde{V}_R = \left(\frac{ZY}{2}\right)\tilde{V}_R = \frac{(j\omega Cl)(R + j\omega L)l}{2}\tilde{V}_R \quad (1.11)$$

όπου l το μήκος της γραμμής σε km . Αμελώντας την ωμική αντίσταση της γραμμής θα ισχύει ότι:

$$V_S - V_R = \frac{-V_R\omega^2 l^2 LC}{2} \quad (1.12)$$

όπου η ποσότητα $1/\sqrt{LC}$ είναι σταθερή σε όλες τις γραμμές και ισούται με την ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων η οποία είναι ίση με $3 \times 10^5 km/sec$ και επομένως:

$$\sqrt{LC} = \frac{1}{3 \times 10^5} \Rightarrow LC = \frac{1}{(3 \times 10^5)^2} \quad (1.13)$$

Με αντικατάσταση στην εξίσωση 1.12 θα προκύψει ότι:

$$V_S = V_R \left(1 - \frac{\omega^2 l^2 \times 10^{-10}}{18}\right) \quad (1.14)$$

και δεδομένου ότι η ποσότητα $1 - \frac{\omega^2 l^2 \times 10^{-10}}{18} < 1$ θα ισχύει τελικά ότι:

$$V_S < V_R \Leftrightarrow V_R > V_S$$

Δηλαδή η τάση στο άκρο άφιξης είναι μεγαλύτερη από την τάση στο άκρο αναχώρησης. Αυτό είναι το φαινόμενο Ferranti. Προκειμένου να αποφεύγεται η ανεπιθύμητη ανύψωση τάσης στο άκρο άφιξης μιας γραμμής, πρέπει να εφαρμόζεται επαγωγική αντιστάθμιση στις γραμμές μεγάλου μήκους. Με αυτόν τον τρόπο, περιορίζεται η ανύψωση της τάσης στα αποδεκτά επίπεδα και αποφεύγονται οι υπερτάσεις [1].

1.3.4 Γραμμές Μεταφοράς μεσαίου μήκους

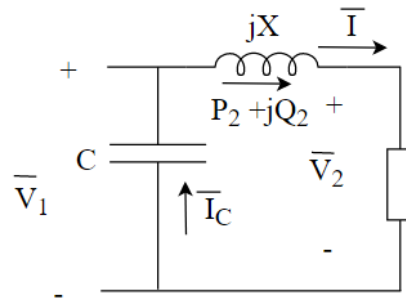
Στις γραμμές μεσαίου μήκους δεν μπορεί να αμεληθεί η εγκάρσια αγωγιμότητα και σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται το π-ισοδύναμο της γραμμής όπου οι εγκάρσιες παράμετροι μοντελοποιούνται με μια συγκεντρωμένη χωρητικότητα C όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8.

Οι εξισώσεις 1.4 συνεχίζουν να ισχύουν και στην περίπτωση που έχει συμπεριληφθεί η εγκάρσια αγωγιμότητα. Όπως είναι προφανές, σε αυτήν την περίπτωση η Q_2 θα εξαρτάται επίσης από την άεργο συνεισφορά της εγκάρσιας αγωγιμότητας στην πλευρά του ζυγού 1 (V_1). Επομένως θα ισχύει:

$$Q_2 = Q_1 + \omega C V_1^2 - \frac{\omega L S_{02}^2}{V_2^2} \quad (1.15)$$

όπου $S_{02} = I V_2$ και Q_1 είναι η εισαγωγή αέργου ισχύος στο ζυγό 1. Η άεργος παραγωγή της γραμμής θα είναι:

$$Q_{gen} = \omega C V_1^2 - \frac{\omega L S_{02}^2}{V_2^2} \quad (1.16)$$



Σχήμα 1.8: Γραμμή μεσαίου μήκους [13].

Σε αυτό το σημείο, θα οριστεί η έννοια της φυσικής φόρτισης. Ως φυσική φόρτιση θεωρείται η ισχύς που μεταφέρεται από μια γραμμή μεταφοράς όταν αυτή τερματίζεται σε μια ωμική αντίσταση ίση με την κυματική της αντίσταση η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.17)$$

Η ισχύς επομένως θα προκύπτει ως εξής :

$$P_N = \frac{V_2^2}{Z_C} \quad (1.18)$$

Η οποία αντιστοιχεί στη φυσική φόρτιση του ζυγού 2. Αν θεωρηθεί η S_{02} ίση με την P_N τότε η Εξίσωση 1.16 μετασχηματίζεται ως εξής:

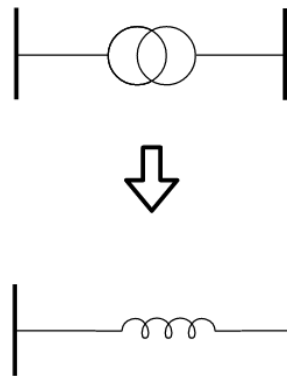
$$Q_{gen} = \omega CV_1^2 - \omega CV_2^2 \quad (1.19)$$

Από την εξίσωση 1.19 γίνεται αντιληπτό ότι αν $V_1 = V_2$ θα είναι $Q_{gen} = 0$ άρα και $Q_1 = 0$. Επομένως, η ισχύς P_N που μεταφέρεται για σταθερό μέτρο τάσης και υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, κάνει την άεργο παραγωγή της γραμμής ίση με το μηδέν. Αν η γραμμή μεταφέρει ισχύ πάνω από τη φυσική ισχύ P_N , όπως γίνεται στις υπερφορτισμένες γραμμές, τότε η γραμμή απορροφά άεργο ισχύ. Στις υποφορτισμένες γραμμές, αντίστοιχα, παράγεται άεργος ισχύς. Στα καλώδια, όπου ο παράγοντας ωCV^2 είναι κυρίαρχος, η παραγωγή αέργου ισχύος ξεπερνά την απορρόφηση της [13].

1.4 Μετασχηματιστές

Οι μετασχηματιστές είναι αυτοί που συνδέουν τις γεννήτριες με τις γραμμές μεταφοράς, καθώς και γραμμές με διαφορετικό επίπεδο τάσης [14]. Μετασχηματίζουν την εναλλασσόμενη τάση και το ρεύμα στα επιθυμητά επίπεδα έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος παραγωγής, του συστήματος μεταφοράς και του δικτύου διανομής [15]. Τα βασικά μέρη ενός μετασχηματιστή είναι ο πυρήνας και τα τυλίγματα του.

Όπως είναι γνωστό στο ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή, ο οποίος παριστάνεται στο ανά μονάδα σύστημα, ο λόγος μετασχηματισμού των τάσεων είναι 1:1 διότι οι αντίστοιχες βασικές τάσεις εκλέγονται βάσει των ονομαστικών πολικών τάσεων του μετασχηματιστή και δεν χρειάζεται αναγωγή των σύνθετων αντιστάσεων του μετασχηματιστή στην πλευρά πρωτεύοντος τυλίγματος ή δευτερεύοντος. Η ιδιότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη, διότι σε ένα ΣΗΕ το πλήθος των μετασχηματιστών είναι πολύ μεγάλο και με αυτόν τον τρόπο απλοποιείται η ανάλυση [16]. Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή περιλαμβάνει τις απώλειες υστέρησης και δινορρευμάτων οι οποίες μοντελοποιούνται από τον εγκάρσιο κλάδο του κυκλώματος. Το απλοποιημένο ισοδύναμο αμελεί αυτές τις απώλειες και περιλαμβάνει μόνο ωμικές απώλειες λόγω της ροής ρεύματος στους αγωγούς του μετασχηματιστή αλλά και επαγωγικές απώλειες λόγω της μαγνητικής ροής σκέδασης στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Για τους μεγάλους μετασχηματιστές (> 200 kVA), οι ωμικές αντιστάσεις είναι πολύ μικρές και επομένως αμελούνται [2]. Το ισοδύναμο κύκλωμα απλοποιείται ακόμα περισσότερο και περιλαμβάνει μόνο μια ισοδύναμη επαγωγική αντίδραση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9.



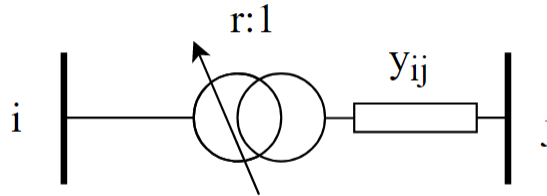
Σχήμα 1.9: Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ .

1.4.1 Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)

Οι μετασχηματιστές ισχύος στο σύστημα μεταφοράς είναι εφοδιασμένοι με Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ ή OLTC ή LTC) και ονομάζονται μετασχηματιστές ρύθμισης. Τα ΣΑΤΥΦ είναι συνήθως ενσωματωμένα σε υποσταθμούς και οι μετασχηματιστές που τα διαθέτουν έχουν τη δυνατότητα, πέρα από το μετασχηματισμό του επιπέδου τάσης, να ελέγχουν το λόγο μετασχηματισμού των τυλιγμάτων ενώ βρίσκονται σε λειτουργία.

Το ΣΑΤΥΦ αλλάζει τις ενεργές σπείρες σε ένα από τα δυο τριφασικά τυλίγματα ενός μετασχηματιστή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού και η ελεγχόμενη τάση να μετασχηματίζεται σε τιμή διαφορετικού μέτρου. Συνήθως, το ΣΑΤΥΦ τοποθετείται στην πλευρά της υψηλής τάσης διότι εκεί τα ρεύματα είναι μικρότερα και αποφεύγονται τα ηλεκτρικά τόξα κατά τη μεταγωγή από σπείρα σε σπείρα. Επιπλέον, στην πλευρά της υψηλής τάσης οι σπε-

ίρες είναι περισσότερες σε αριθμό με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται πιο ακριβής ρύθμιση [16], [17]. Επομένως, από 1:1 που είναι ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού στο ανά μονάδα σύστημα, πλέον γίνεται $r:1$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10: M/Σ ρύθμισης μέτρου τάσης.

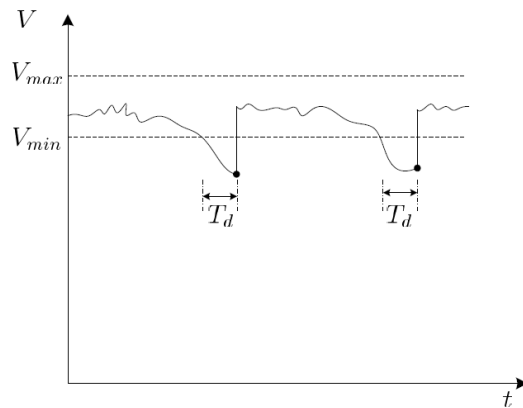
Το ΣΑΤΥΦ πραγματοποιεί διακριτές μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού με ένα βήμα τη φορά. Προκειμένου να αποφεύγονται οι άσκοπες αλλαγές του λόγου μετασχηματισμού, ορίζεται μια νεκρή ζώνη για την ελεγχόμενη τάση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10. Όταν το μέτρο της τάσης βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης, τότε το ΣΑΤΥΦ διατηρεί το λόγο μετασχηματισμού στην τρέχουσα τιμή. Όταν το μέτρο της τάσης βρεθεί εκτός της νεκρής ζώνης, το ΣΑΤΥΦ μετράει κάποια χρονική καθυστέρηση και αλλάζει το λόγο μετασχηματισμού προκειμένου να εισαχθεί και πάλι η τάση στη νεκρή της ζώνη. Ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ διαθέτει μια μηχανική σταθερά απόκρισης κοντά στα 5 δευτερόλεπτα [17]. Στην ήδη υπάρχουσα χρονική καθυστέρηση προστίθενται σκόπιμες καθυστερήσεις. Η σκόπιμη αυτή χρονική καθυστέρηση εφαρμόζεται για τις περιπτώσεις που η τάση εξέρχεται της νεκρής ζώνης παροδικά χωρίς να αποτελεί μόνιμο φαινόμενο και αποσκοπεί στην προστασία του ΣΑΤΥΦ από άσκοπες κινήσεις που επιφέρουν επιπλέον καταπόνηση. Συνεπώς, το ΣΑΤΥΦ δρα μόνο όταν είναι απολύτως αναγκαίο και προστατεύεται από τη μηχανική φθορά που επιφέρουν οι συνεχείς και άσκοπες μεταγωγές. Τέλος, όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, ο αριθμός των ελιγμάτων είναι πεπερασμένος και επομένως το ΣΑΤΥΦ δεν μπορεί να αλλάξει το λόγο μετασχηματισμού επ' άπειρον. Ο λόγος μετασχηματισμού r , δηλαδή είναι φραγμένος μεταξύ δύο οριακών τιμών.

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (1.20)$$

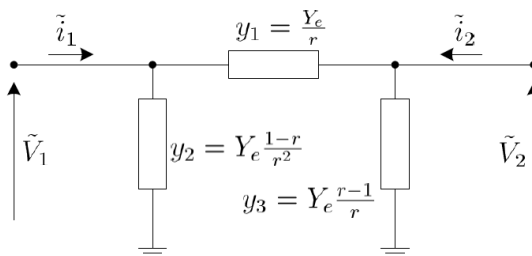
Το ισοδύναμο-π κύκλωμα του μετασχηματιστή ρύθμισης δίνεται από το Σχήμα 1.12. Παρατηρείται ότι για $r=1$ το κύκλωμα απλοποιείται σε μια αγωγιμότητα ευθέως κλάδου που συμπίπτει με το απλοποιημένο ισοδύναμο του Σχήματος 1.9.

Στο WPSTAB για τη διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο του ΣΑΤΥΦ, σύμφωνα με το οποίο ο λόγος μετασχηματισμού αλλάζει ακαριαία και με ένα βήμα κάθε φορά. Μπορούν, επομένως να συμβολιστούν οι διακριτές χρονικές στιγμές ως t_k με $k = 0, 1, 2, \dots$. Αν το ΣΑΤΥΦ δρα τη χρονική στιγμή t_k , τότε η χρονική στιγμή της επόμενης δράσης θα είναι η:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (1.21)$$



Σχήμα 1.11: Χρονική εξέλιξη τάσης και νεκρή ζώνη [16].



Σχήμα 1.12: Ισοδύναμο-π μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού.

Όπου ΔT_k είναι η συνολική καθυστέρηση που ορίζεται να έχει η μια δράση από την επόμενη. Ο διακριτός έλεγχος περιγράφεται από την εξίσωση διαφορών 1.22

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r & \text{αν } V_2 > V_2^0 + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r & \text{αν } V_2 < V_2^0 - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (1.22)$$

Όπου V_2^0 είναι η ονομαστική τάση αναφοράς και d είναι το εύρος της νεκρής ζώνης. Με r_k συμβολίζεται η τιμή του λόγου μετασχηματισμού τη χρονική στιγμή t_k .

1.5 Φορτία

Ο όρος φορτίο έχει πολλαπλούς ορισμούς στην ανάλυση των ΣΗΕ. Ένα φορτίο μπορεί να αντιπροσωπεύει [12]:

- Μία συσκευή που συνδέεται στο σύστημα και καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ.
- Τη συνολική ενεργό και άεργο ισχύς που καταναλώνουν όλες οι συνδεδεμένες με ένα ΣΗΕ συσκευές.

- Την ενεργό και την άεργο ισχύ που παρέχει στο δίκτυο ένας μεμονωμένος σταθμός παραγωγής.
- Ένα τμήμα ΣΗΕ (πχ. δίκτυο διανομής) το οποίο δεν αναπαρίσταται λεπτομερώς στο μοντέλο, αλλά αντιπροσωπεύεται από ένα ισοδύναμο φορτίο που έχει κατά το δυνατόν παρόμοια συμπεριφορά με αυτό το τμήμα.

Η στιγμιαία κατανάλωση του φορτίου είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης επάνω σε αυτό, της συχνότητας του συστήματος f αλλά και μιας αδιάστατης ποσότητας z που αντιπροσωπεύει τις συνδεδεμένες στο δίκτυο συσκευές. Στην παρούσα διπλωματική δεν λαμβάνεται υπόψη η εξάρτηση της κατανάλωσης από τη συχνότητα του δικτύου και τα φορτία παριστάνονται με βάση το **εκθετικό μοντέλο**. Οι εξισώσεις 1.23 και 1.24 εκφράζουν την καταναλισκόμενη ενεργό και άεργο ισχύ αντίστοιχα.

$$P = z_P P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^a \quad (1.23)$$

$$Q = z_Q Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^b \quad (1.24)$$

Όπου z_P και z_Q είναι αδιάστατες μεταβλητές ζήτησης και $z_P P_0$ και $z_Q Q_0$ είναι η αρχική κατανάλωση. Επιπλέον, V_0 είναι η ονομαστική τάση φορτίου για την οποία προκύπτει η αρχική κατανάλωση και V είναι η εφαρμοζόμενη τάση. Τέλος a και b είναι αδιάστατες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τον τύπο του φορτίου. Οι τρεις βασικές κατηγορίες φορτίου ανάλογα με τις τιμές των a και b είναι οι εξής:

1. $a = b = 2$: Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας
2. $a = b = 1$: Φορτίο σταθερού ρεύματος
3. $a = b = 0$: Φορτίο σταθερής ισχύος

1.5.1 Επαγωγικά και Χωρητικά Φορτία

Εδώ θα αναλυθεί η έννοια της τάσης φορτίου για τις δυο κατηγορίες φορτίου: το επαγωγικό ($+jX$) και το χωρητικό φορτίο ($-jX$), τα μονογραμμικά διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.13.

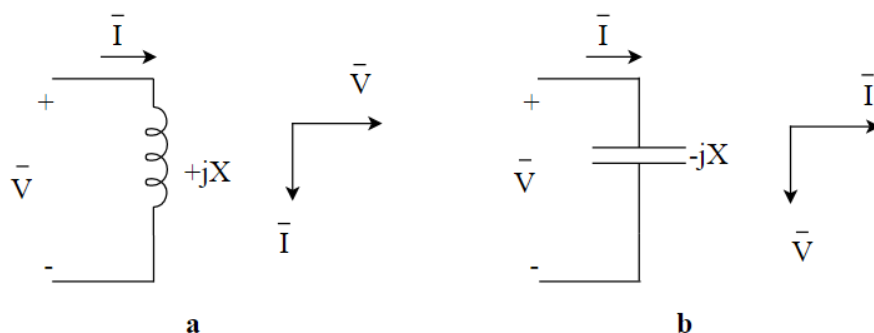
Όσον αφορά στο επαγωγικό φορτίο και επειδή το ρεύμα έπεται της τάσης κατά 90° θα ισχύει:

$$\tilde{V} = jX(-jI) = XI = V \quad (1.25)$$

Δεδομένου ότι $I = Q/V$ το δεξί μέλος γίνεται $XQ/V = V$, άρα :

$$V^2 = XQ \quad (1.26)$$

Για μικρές μεταβολές (παραγωγίζοντας) προκύπτει:



Σχήμα 1.13: Επαγωγικό (a) και χωρητικό φορτίο (b).

$$2V\Delta V = X\Delta Q \Rightarrow \Delta V = X \frac{\Delta Q}{2V} \quad (1.27)$$

ή τελικά:

$$\frac{\Delta V}{V} = X \frac{\Delta Q}{2V^2} \quad (1.28)$$

Οι ίδιες σχέσεις ισχύουν και στην περίπτωση του χωρητικού φορτίου και επομένως τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα εξής:

- Η έγχυση αέργου ισχύος σε ένα επαγωγικό φορτίο προκαλεί την ανύψωση της τάσης του.
- Η τάση ενός χωρητικού φορτίου αυξάνεται όταν το φορτίο εγχέει άεργο ισχύ προς το δίκτυο.

Στα πραγματικά ΣΗΕ, που είναι κατά κύριο λόγο επαγωγικά, η επαγωγική αντίδραση των γραμμών είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντίδραση των φορτίων που βλέπουν οι ζυγοί της μεταφοράς. Επιπλέον, τα πραγματικά φορτία έχουν κυρίως επαγωγική φύση και με βάση αυτές τις παραδοχές εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα [13]:

- Η αύξηση των τάσεων στη μεταφορά επιτυγχάνεται με την έγχυση αέργου ισχύος στους ζυγούς φορτίου από τις κοντινότερες πηγές
- Όσο υψηλότερες είναι οι τάσεις στο δίκτυο μεταφοράς, τόσο μικρότερη προσπάθεια καταβάλλεται για τη διατήρησή τους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του χωρητικού χαρακτήρα των γραμμών μεταφοράς.

1.6 Μακροπρόθεσμη Προσομοίωση ΣΗΕ

1.6.1 Δυναμικό Μοντέλο ΣΗΕ

Τα περισσότερα δυναμικά συστήματα περιγράφονται από ένα σύνολο N διαφορικών εξισώσεων της μορφής:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.29)$$

Όπου x είναι το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και f είναι συνεχείς μη γραμμικές συναρτήσεις των διανυσμάτων x_i . Το διάνυσμα x είναι συνάρτηση του χρόνου και αποτελεί τη λύση της διαφορικής εξίσωσης 1.29 για την αρχική συνθήκη που αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή $t = 0$:

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.30)$$

Σύμφωνα με τη γενική θεωρία των διαφορικών εξισώσεων οι Εξισώσεις 1.29 και 1.30 αποτελούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών και είναι δυνατός ο προσδιορισμός μιας λύσης $x(t)$, υπό την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται τα κριτήρια του θεωρήματος ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης [17].

Τα ΣΗΕ παρουσιάζουν εν γένει αυξημένη πολυπλοκότητα και ποικιλομορφία, χαρακτηριστικά που καθιστούν δύσκολη την ολοκληρωμένη περιγραφή τους μέσω Εξισώσεων της μορφής 1.29. Οι εξισώσεις αυτές αντικαθίστανται με αλγεβρικές- διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν κυρίως τη δυναμική συμπεριφορά ενός ΣΗΕ. Ο διαχωρισμός τους γίνεται με κριτήριο τη χρονική κλίμακα σε εξισώσεις ακαριαίας απόκρισης, βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας [17].

Οι εξισώσεις ακαριαίας απόκρισης περιγράφουν τα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα με διάρκεια λίγων δευτερολέπτων μετά την εμφάνιση της διαταραχής στο σύστημα. Τα φαινόμενα που περιγράφουν είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης που εξελίσσονται πρακτικά ακαριαία. Γι αυτό το λόγο παραλείπεται η μεταβατική τους ανάλυση και χρησιμοποιούνται μόνο οι αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας που περιγράφουν το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στην ημιτονοειδή μόνιμη κατάσταση:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.31)$$

Όπου \mathbf{g} είναι m ομαλές συναρτήσεις και \mathbf{y} το διάνυσμα τάσεων και γωνιών των ζυγών. Τα διανύσματα x, z_c, z_d θα διευκρινιστούν στη συνέχεια.

Οι εξισώσεις βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας περιγράφουν τα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα μετά από μια διαταραχή και διαρκούν συνήθως από ένα έως μερικά δευτερόλεπτα. Οι εξισώσεις αυτές είναι διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης και περιγράφουν κυρίως μεταβατική συμπεριφορά σύγχρονων γεννητριών, ρυθμιστών τάσης, κινητήρων επαγωγής, ηλεκτρονικών ισχύος κλπ. Οι εξισώσεις αυτές έχουν τη μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.32)$$

Όπου f είναι n ομαλές συναρτήσεις και x το $N \times 1$ διάνυσμα κατάστασης των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

Οι εξισώσεις μακροπρόθεσμης κλίμακας αναφέρονται στα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα που δρουν από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση της διαταρα-

χής. Αφορούν κυρίως τις ελεγκτικές και προστατευτικές διατάξεις οι οποίες δρουν πολύ μετά την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων προκειμένου να αποφευχθούν αλληλεπιδράσεις με διατάξεις βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Μια κατηγορία συνιστωσών ενός ΣΗΕ που περιγράφονται από εξισώσεις μακροπρόθεσμης κλίμακας είναι τα ΣΑΤΥΦ. Οι εξισώσεις αυτές είναι συνεχείς διαφορικές εξισώσεις με μεγάλες χρονικές σταθερές και διακριτές εξισώσεις διαφορών με την εξής μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.33)$$

$$\mathbf{z}_d(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(\mathbf{k})) \quad (1.34)$$

Όπου z_c και z_d είναι τα διανύσματα κατάστασης για τα συνεχή και τα διακριτά μακροπρόθεσμα φαινόμενα αντίστοιχα. Το k εκφράζει τη χρονική στιγμή $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT είναι η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

1.6.2 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

Η ανάγκη για προσομοίωση ενός μεγάλου συστήματος στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, οδήγησε στην διατύπωση μιας απλοποιημένης μεθόδου για την επίλυση των εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στο διαχωρισμό σε δυο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας ανάλογα με τη χρονική κλίμακα που εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Έτσι, προκύπτει το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα και το οιονεί στατικό σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Με βάση το οιονεί στατικό σύστημα που χρησιμοποιείται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα θεωρούνται ότι έχουν έρθει σε ισορροπία. Το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.35)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.36)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.37)$$

$$\mathbf{z}_d(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(\mathbf{k})) \quad (1.38)$$

1.6.3 Πρόγραμμα WPSTAB

Το WPSTAB είναι ένα ενιαίο πακέτο λογισμικού χρονικής προσομοίωσης Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα και ανάλυσης ευστάθειας τάσεως, που έχει αναπτυχθεί στο ΕΜΠ [18]. Χρησιμοποιώντας την οιονεί στατική προσέγγιση και ενσωματώνοντας τεχνικές αραιών πινάκων για βελτίωση της αποδοτικότητας και μείωσης του υπολογιστικού φορτίου, αποτελεί ένα ιδιαίτερος χρήσιμο εργαλείο στην εκτίμηση της ασφάλειας τάσεως σε πραγματικό χρόνο, με το εύρος χρήσης του προγράμματος να εκτείνεται από μικρά δοκιμαστικά ΣΗΕ μερικών δεκάδων ζυγών, έως πραγματικά συστήματα χιλιάδων ζυγών, όπως

το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα [19].

Το WPSTAB αποτελείται από τα παρακάτω προγράμματα [18]:

- Πρόγραμμα Προσδιορισμού Σημείων Ισορροπίας (ΠΠΣΙ)
- Πρόγραμμα Προσομοίωσης στη Μακροπρόθεσμη Κλίμακα (ΠΠΜΚ)
- Πρόγραμμα Προσδιορισμού Ορίων Φόρτισης
- Πρόγραμμα Υπολογισμού Ιδιοτιμών και Ιδιοδιανυσμάτων
- Πρόγραμμα μετατροπής αρχείων δεδομένων από ΡΤΙ σε WPSTAB.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση των πρώτων δυο προγραμμάτων για αυτό και περιγράφονται σύντομα παρακάτω.

Το ΠΠΣΙ επιλύει τις εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων και ουσιαστικά αντικαθιστά την παραδοσιακή επίλυση της ροής φορτίου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η αριθμητική μέθοδος Newton-Raphson. Το ΠΠΜΚ χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός ΣΗΕ στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που κυμαίνεται από μερικά λεπτά έως και μερικές ώρες. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο των οιονεί στατικών μεταβολών (οιονεί στατική προσέγγιση) για να παραστήσει τα ταχεία μεταβατικά φαινόμενα από τις εξισώσεις ισορροπίας. Τα βραδέα μεταβατικά φαινόμενα παριστάνονται από διαφορικές εξισώσεις ή εξισώσεις διαφορών.

Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του WPSTAB προκειμένου ναδειχθεί η αρχική και η τελική κατάσταση πριν και μετά την εφαρμογή κάθε τεχνικής ελέγχου καθώς και όλες οι ενδιάμεσες καταστάσεις. Η επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης έγινε προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι συμπεριφορές διατάξεων που ενδεχομένως να υπήρχαν στο ΣΗΕ (π.χ αυτόματα συστήματα ζεύξης και απόζευξης πυκνωτών) καθώς και λοιπά μεταβατικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

1.7 Αντικείμενο και Δομή της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθόδων που αποσκοπούν στην αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς προκειμένου να βοηθήσει το σύστημα μεταφοράς (ΥΥΤ) να μειώσει την παραγόμενη αέργο ισχύ και τις τάσεις σε ένα στιγμιότυπο χαμηλού φορτίου. Με άλλα λόγια διερευνάται η δυνατότητα ελεγχόμενης απορρόφησης αέργου ισχύος από ένα υποδίκτυο, η οποία αποτελεί επικουρική υπηρεσία που συμβάλλει στη μείωση των τάσεων της μεταφοράς (ΥΥΤ). Οι τεχνικές ελέγχου που εφαρμόζονται προσομοιώνονται με χρήση του λογισμικού WPSTAB, η περιγραφή του οποίου έγινε στις προηγούμενες ενότητες.

Το σύστημα που χρησιμοποιείται αποτελεί ένα μέρος του γαλλικού ΣΗΕ που διαχειρίζεται ο RTE. Το στιγμιότυπο στο οποίο εστιάζει η εργασία είναι ένα στιγμιότυπο υψηλών τάσεων στο επίπεδο της μεταφοράς (ΥΥΤ) το οποίο εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ημερών με χαμηλό φορτίο

ή/και αυξημένη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Οι μέθοδοι που θα αναπτυχθούν βασίζονται στη μεταφορά της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ στους παράλληλους μετασχηματιστές των υποσταθμών προκειμένου να αυξηθούν οι τάσεις των ζυγών υπομεταφοράς καθώς και στη λειτουργία των αιολικών πάρκων (Α/Π) είτε με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος είτε με τη δυνατότητα ρύθμισης της τερματικής τους τάσης. Οποιοδήποτε υποδίκτυο είναι ικανό να παρέχει επικουρική υπηρεσία στο ανάντι δίκτυο αλλά για να πραγματοποιηθεί αυτό, πρέπει να γνωρίζει τα όρια του. Σε αυτή την εργασία, επομένως, θα αποτιμηθεί η μέγιστη δυνατή απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς καθώς και οι επιμέρους τιμές αέργου κατανάλωσης που προκύπτουν από την εφαρμογή των ανάλογων μεθόδων. Οι πληροφορίες αυτές στη συνέχεια μπορούν να γνωστοποιηθούν στο διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος βασισμένος σε αυτές μπορεί να απαιτήσει το επιθυμητό ποσό κατανάλωσης προκειμένου να μειώσει τις τάσεις του. Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες που αφορούν στην οργάνωση και τη δομή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ). Δίνονται κάποια στατιστικά στοιχεία σε σχέση με την αιολική παραγωγή και παρουσιάζονται οι τύποι των ανεμογεννητριών καθώς και οι περιορισμοί λειτουργίας τους. Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές εξισώσεις που συνδέουν τις ροές ισχύος με την τάση στις γραμμές μεταφοράς. Ακόμη, εξηγείται το φαινόμενο Ferranti και ο τρόπος αντιμετώπισής του. Επιπλέον, περιγράφεται η λειτουργία των μετασχηματιστών, των ΣΑΤΥΦ καθώς και των φορτίων τα οποία θεωρούνται βασικές συνιστώσες ενός ΣΗΕ. Τέλος, παρουσιάζεται το λογισμικό WPSTAB, οι εξισώσεις που διέπουν το δυναμικό μοντέλο ενός ΣΗΕ καθώς και οι χρονικές κλίμακες και η οιονεί στατική προσέγγιση που χρησιμοποιεί το WPSTAB στην μακροπρόθεσμη προσομοίωση.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή του συστήματος δοκιμών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα δεδομένα των ζυγών, των μετασχηματιστών, των φορτίων καθώς και των αιολικών πάρκων που είναι συνδεδεμένα. Τέλος, περιγράφεται το στιγμιότυπο λειτουργίας σε καθεστώς υψηλών τάσεων στο οποίο εστιάζει η παρούσα εργασία και δίνεται μια σύντομη παρουσίαση του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται η τάση ενός ζυγού συναρτήσει της αέργου ισχύος χρησιμοποιώντας ένα ισοδύναμο Thevenin.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται ρύθμιση της νεκρής των ΣΑΤΥΦ στους παράλληλους μετασχηματιστές των υποσταθμών προκειμένου να προκληθεί κατανάλωση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς. Στο Κεφάλαιο αυτό τα αιολικά πάρκα θεωρούνται ότι έχουν μηδενική ενεργό και άεργο ισχύ εξόδου και αποτιμάται τόσο η συνεισφορά της αύξησης των τάσεων αναφοράς στους ζυγούς υπομεταφοράς των υποσταθμών, όσο και η δημιουργία κυκλοφορούσας ισχύος στην επιπρόσθετη απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς.

Στο Κεφάλαιο 4 προσομοιώνεται η δυνατότητα περαιτέρω απορρόφησης αέργου ισχύος με τα αιολικά πάρκα να λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και με τη δυνατότητα παραγωγής και απορρόφησης αέργου ισχύος μέσω των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος με ρύθμιση της τερματικής τους τάσης. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται η δυνατότητα για λειτουργία με χωρητικό συντελεστή ισχύος, δηλαδή η δυνατότητα απορρόφησης αέργου ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των κεφαλαίων 4 και 5 και αναφέρονται οι προοπτικές και οι δυνατότητες επέκτασης της εργασίας.

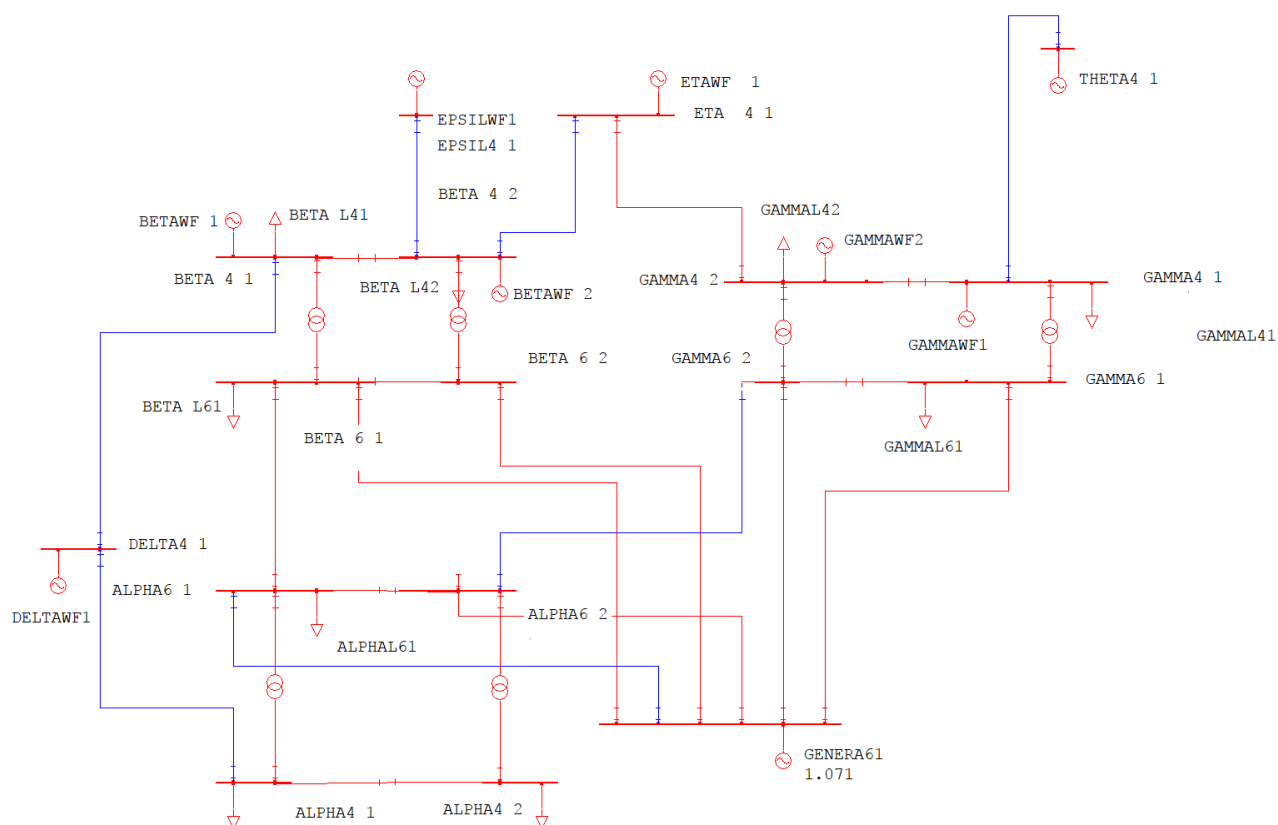
Κεφάλαιο 2

Περιγραφή δοκιμαστικού συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφεί το δοκιμαστικό σύστημα που χρησιμοποιείται στην διπλωματική εργασία. Το σύστημα αυτό αποτελεί ένα κομμάτι του γαλλικού ΣΗΕ το οποίο διαχειρίζεται ο RTE. Συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα δεδομένα των ζυγών, των μετασχηματιστών και των φορτίων καθώς και το στιγμιότυπο λειτουργίας του συστήματος.

2.1 Γενική παρουσίαση

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του δοκιμαστικού συστήματος πάνω στο οποίο θα πραγματοποιηθούν οι προσομοιώσεις στα επόμενα κεφάλαια. Πρόκειται για ένα δίκτυο με 2 επίπεδα τάσης ($225\text{ kV}/90\text{ kV}$) τα οποία αντιστοιχούν στην υπερυψηλή (ΥΥΤ) και υψηλή τάση (ΥΤ) αντίστοιχα. Από εδώ και στο εξής το επίπεδο της ΥΤ (90 kV) θα καλείται υπομεταφορά. Το σύστημα αποτελείται από 14 ζυγούς (10 ζυγοί υπομεταφοράς, 3 ζυγοί ΥΥΤ και 1 άπειρος ζυγός). Σε 3 σημεία (υποσταθμοί) υπάρχουν 2 παράλληλοι μετασχηματιστές υποβιβασμού της τάσης με ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού $225\text{ kV}/90\text{ kV}$ οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΥΥΦ). Οι 3 υποσταθμοί συνδέονται με τον άπειρο ζυγό με 6 γραμμές μεταφοράς ΥΥΤ. Ακόμη, στους ζυγούς υπομεταφοράς υπάρχουν διασυνδετικοί διακόπτες (ΔΔΖ), οι οποίοι παριστάνονται στο μοντέλο ως γραμμές μηδενικής σύνθετης αντίστασης. Τα οχτώ Αιολικά Πάρκα (Α/Π) του συστήματος βρίσκονται όλα σε ζυγούς υπομεταφοράς και παριστάνονται ως οχτώ ισοδύναμες ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Τέλος, υπάρχουν φορτία τόσο σε ζυγούς υπομεταφοράς όσο και σε ζυγούς ΥΥΤ.



Σχήμα 2.1: Δοκιμαστικό σύστημα.

2.2 Δεδομένα ζυγών και μετασχηματιστών

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα ονόματα των ζυγών οι κωδικοί τους καθώς και τα επίπεδα τάσης τους. Σε αυτό το σημείο δεν γίνεται κατηγοριοποίηση των ζυγών (Φορτίου, Παραγωγής) καθώς στα επόμενα κεφάλαια θα μοντελοποιηθούν είτε ως ζυγοί φορτίου είτε ως παραγωγής ανάλογα με την προσομοίωση. Σταθερά ζυγός ταλάντωσης (αναφοράς) θα παραμείνει ο ζυγός GENERA61 (9001) ο οποίος θα διατηρεί σταθερό μέτρο και γωνία τάσης σε όλες τις προσομοιώσεις.

Πίνακας 2.1: Ζυγοί δικτύου

A/A ζυγού	Όνομα ζυγού	Αριθμός ζυγού	Ονομαστική τάση
1	ALPHA61	1001	225 kV
2	BETA61	2001	225 kV
3	GAMMA61	3001	225 kV
4	ALPHA41	10010	90 kV
5	ALPHA42	10011	90 kV
6	BETA41	20010	90 kV
7	BETA42	20011	90 kV
8	GAMMA41	30010	90 kV
9	GAMMA42	30011	90 kV
10	DELTA41	40010	90 kV
11	EPSILON41	50010	90 kV
12	ETA41	60010	90 kV
13	THETA41	70010	90 kV
14	GENERA61	9001	225 kV

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω στο δοκιμαστικό σύστημα υπάρχουν τρία σημεία (υποσταθμοί) υποβιβασμού τάσης. Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται τα δεδομένα των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών και των τριών υποσταθμών. Επισημαίνεται πως οι μετασχηματιστές 1001-10010, 1001-10011 συνθέτουν τον υποσταθμό ALPHA, οι 2001-20010, 2001-20011 τον υποσταθμό BETA και οι 3001-30010, 3001-30011 τον υποσταθμό GAMMA.

Πίνακας 2.2: Δεδομένα ΣΑΤΥΦ.

I	J	ICONTROL	RMAX	RMIN	VMAX	VMIN	STEP	T1	T2
10010	1001	10010	1.0600	0.7800	1.07020	1.0502	0.0100	30	15
10011	1001	10011	1.0600	0.7800	1.07020	1.0502	0.0100	30	15
20010	2001	20010	1.1120	0.8240	1.08378	1.0597	0.0120	30	15
20011	2001	20011	1.1120	0.8240	1.08378	1.0597	0.0120	30	15
30010	3001	30010	1.0600	0.7800	1.07113	1.0513	0.0100	30	15
30011	3001	30011	1.0600	0.7800	1.07113	1.0513	0.0100	30	15

Όπου I είναι ο κωδικός αριθμός του ζυγού αναχώρησης κυκλώματος, J είναι ο κωδικός αριθμός του ζυγού άφιξης κυκλώματος, ICONTROL είναι ο κωδικός αριθμός ζυγού του οποίου η τάση ρυθμίζεται από το μετασχηματιστή μεταβλητής λήψης (πρέπει να είναι ένας από τους I ή J.), RMAX και RMIN είναι το άνω και το κάτω όριο λόγου μετασχηματισμού (α.μ) αντίστοιχα. Επιπλέον, VMAX και VMIN είναι το άνω και το κάτω όριο ρυθμιζόμενης τάσης ζυγού αντίστοιχα. Ακόμη, STEP είναι το βήμα μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού, T1 και T2 είναι η αρχική και η επόμενη χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ αντίστοιχα.

2.3 Δεδομένα Φορτίων

Τα φορτία στο δοκιμαστικό σύστημα είναι όλα εκθετικά με εκθέτες $a = 1.5$ και $b = 2$. Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται οι ζυγοί πάνω στους οποίους είναι τα φορτία, οι καταναλώσεις ενεργού και άεργου ισχύος υπό ονομαστική τάση (P_0, Q_0) καθώς και οι εκθέτες a και b .

Πίνακας 2.3: Φορτία συστήματος.

A/A	Όνομα ζυγού	Αριθμός ζυγού	$P_0(MW)$	$Q_0(MVAr)$	a	b
1	GENERA61	9001	0.00	0.00	0.0	0.0
2	ALPHA61	1001	51.00	11.00	1.5	2.0
3	ALPHA41	10010	15.00	3.00	1.5	2.0
4	ALPHA42	10011	10.00	1.50	1.5	2.0
5	BETA61	2001	55.00	11.00	1.5	2.0
6	BETA41	20010	22.00	5.00	1.5	2.0
7	BETA42	20011	9.00	-0.40	1.5	2.0
8	GAMMA61	3001	25.00	7.00	1.5	2.0
9	GAMMA41	30010	32.00	6.00	1.5	2.0
10	GAMMA42	30011	8.00	-0.20	1.5	2.0
11	DELTA41	40010	0.00	0.00	0.0	0.0
12	EPSILON41	50010	0.00	0.00	0.0	0.0
13	ETA41	60010	0.00	0.00	0.0	0.0
14	THETA41	70010	0.00	0.00	0.0	0.0

2.4 Δεδομένα Αιολικών Πάρκων (Α/Π)

Τα αιολικά πάρκα που είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς υπομεταφοράς παριστάνονται ως ισοδύναμες ανεμογεννήτριες. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται τα δεδομένα των αιολικών πάρκων όσον αφορά την ενεργό και τη φαινόμενη ισχύ τους.

Πίνακας 2.4: Δεδομένα Αιολικών Πάρκων

Ζυγός	Όνομα Α/Π	$P_{max}(MW)$	$S_n(MVA)$
20010	BETA WF 1	70	80
20010	BETA WF 2	40	50
30010	GAMMA WF 1	55	65
30011	GAMMA WF 2	32	40
40010	DELTA WF 1	120	150
50010	EPSILON WF 1	65	75
60010	ETA WF 1	90	110
70010	THETA WF 1	80	88

2.5 Στιγμιότυπο λειτουργίας με υψηλές τάσεις

Όπως αναφέρθηκε και στην παρουσίαση του δοκιμαστικού συστήματος, σε αυτή τη διπλωματική εργασία θα γίνει αναφορά σε ένα ενδεικτικό σύστημα υπομεταφοράς με αιολική παραγωγή που συνδέεται με ένα σύστημα μεταφοράς (ΥΥΤ) και ιδιαίτερα θα αναλυθεί ένα στιγμιότυπο υψηλών τάσεων στους ζυγούς του δικτύου. Όπως φαίνεται από την αρχική ροή φορτίου των Πινάκων 2.5 και 2.6, οι ζυγοί του δικτύου έχουν υψηλές τάσεις (πάνω από 1.05 αμ). Το συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας μπορεί να αποδοθεί στο χαμηλό φορτίο των ζυγών του συστήματος. Η χαμηλή φόρτιση των γραμμών ΥΥΤ (φόρτιση κάτω από τη φυσική) οδηγεί στην υπέρσχυση της παραγόμενης αέργου ισχύος από τις εγκάρσιες χωρητικότητες έναντι των απωλειών. Ακόμη, το σύστημα υπομεταφοράς (ΥΤ) με τη σειρά του συμβάλλει και αυτό στην παραγωγή αέργου ισχύος. Άμεσο αποτέλεσμα της πλεονάζουσας αέργου ισχύος είναι η αύξηση των τάσεων σε όλους τους ζυγούς. Οι δυο αρχικές ροές φορτίου (κλειστοί και ανοιχτοί διασυνδεδεικτοί διακόπτες ζυγών υπομεταφοράς) είναι για την περίπτωση που έχει μηδενιστεί η ενεργός και η άεργος παραγωγή από τα αιολικά πάρκα. Όπως παρουσιάζεται στους Πίνακες 2.5 και 2.6 ο ζυγός 9001 (άπειρος ζυγός) καταναλώνει το ποσό αέργου ισχύος που παράγει το σύστημα μεταφοράς/υπομεταφοράς. Όμως επειδή ο 9001 θεωρείται για την προσομοίωση άπειρος ζυγός (σταθερό μέτρο και γωνία τάσης), δεν γίνεται εμφανής η ανύψωση της τάσης του δικτύου μεταφοράς. Προκειμένου να γίνει φανερή η ανύψωση της τάσης του δικτύου μεταφοράς εξαιτίας της ροής αέργου ισχύος προς τον άπειρο ζυγό θα θεωρηθεί το ισοδύναμο Thevenin του δικτύου μεταφοράς όπως φαίνεται από το ζυγό 9001 (Σχήμα 2.2).

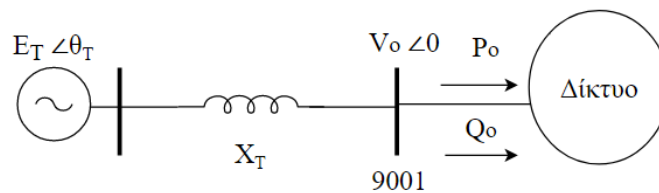
Πίνακας 2.5: Ροή φορτίου ($\Delta\Delta Z$ κλειστοί)

Αριθμός Ζυγού	Τάση(αμ, μοίρες)	$P_G(MW)$	$Q_G(MVAr)$	$P_L(MW)$	$Q_L(MVAr)$
1001	1.07023 $\angle -1.54^\circ$	0	0	51	11
2001	1.06797 $\angle -1.62^\circ$	0	0	55	11
3001	1.07130 $\angle -1.41^\circ$	0	0	25	7
9001	1.07111 $\angle 0.00^\circ$	227.7	-50.79	0	0
10010	1.05939 $\angle -2.27^\circ$	0	0	15	3
10011	1.05939 $\angle -2.27^\circ$	0	0	10	1.5
20010	1.06957 $\angle -2.56^\circ$	0	0	22	5
20011	1.06957 $\angle -2.56^\circ$	0	0	9	-0.4
30010	1.05960 $\angle -2.52^\circ$	0	0	32	6
30011	1.05960 $\angle -2.52^\circ$	0	0	8	-0.2
40010	1.06569 $\angle -2.44^\circ$	0	0	0	0
50010	1.06974 $\angle -2.56^\circ$	0	0	0	0
60010	1.06433 $\angle -2.53^\circ$	0	0	0	0
40010	1.05971 $\angle -2.53^\circ$	0	0	0	0

Πίνακας 2.6: Ροή φορτίου ($\Delta\Delta Z$ ανοιχτοί)

Αριθμός Ζυγού	Τάση(αμ, μοίρες)	$P_G(MW)$	$Q_G(MVAr)$	$P_L(MW)$	$Q_L(MVAr)$
1001	$1.07013\angle -1.54^\circ$	0	0	51	11
2001	$1.06816\angle -1.60^\circ$	0	0	55	11
3001	$1.07107\angle -1.43^\circ$	0	0	25	7
9001	$1.07111\angle 0.00^\circ$	227.7	-50.38	0	0
10010	$1.06018\angle -2.48^\circ$	0	0	15	3
10011	$1.05754\angle -2.11^\circ$	0	0	10	1.5
20010	$1.06751\angle -2.83^\circ$	0	0	22	5
20011	$1.07335\angle -2.11^\circ$	0	0	9	-0.4
30010	$1.05285\angle -3.25^\circ$	0	0	32	6
30011	$1.06522\angle -1.91^\circ$	0	0	8	-0.2
40010	$1.06491\angle -2.69^\circ$	0	0	0	0
50010	$1.07352\angle -2.11^\circ$	0	0	0	0
60010	$1.06918\angle -2.00^\circ$	0	0	0	0
40010	$1.05296\angle -3.25^\circ$	0	0	0	0

Γνωρίζοντας από την αρχική ροή φορτίου ότι η τάση του ζυγού 9001 (άπειρος ζυγός) είναι $1.07111\angle 0.00^\circ$ για τα $50.79 MVAr$ που απορροφά, θα υπολογιστεί η ισοδύναμη τάση Thevenin E_T του συστήματος μεταφοράς θεωρώντας ένα επίπεδο βραχυκύκλωσης $S_{SC} = 10$ αμ και δεδομένου ότι η βασική ισχύς του συστήματος είναι $S_B = 100MVA$ η ισχύς βραχυκύκλωσης θα είναι $1000MVA$. Για την ισοδύναμη αντίδραση θα ισχύει ότι $X_T = 0.1$ αμ. Στο αρχικό σημείο λειτουργίας όπως αναφέρθηκε προκύπτει ότι ο άπειρος ζυγός 9001 απορροφά άεργο ισχύ $Q_o = -50.79MVAr$ ενώ παρέχει το σύστημα με ενεργό ισχύ $P_o = 227.7MW$.



Σχήμα 2.2: Ισοδύναμο Thevenin.

Για το σύστημα των 2 ζυγών θα ισχύει ότι:

$$\tilde{I} = \frac{P_o - jQ_o}{\tilde{V}_o^*} \quad (2.1)$$

$$\tilde{E}_T = \tilde{V}_o + \tilde{I}jX_T \quad (2.2)$$

και επομένως γι αυτό το στιγμιότυπο (μηδενική παραγωγή από αιολικά πάρκα) η τάση Thevenin θα είναι $E_T = 1.0455\angle 11.73^\circ$. Με αυτόν τον τρόπο καταδεικνύεται η ανύψωση τάσης στο ζυγό

9001 (V_o) λόγω της αέργου ισχύος που απορροφά από το δοκιμαστικό σύστημα. Στα επόμενα κεφάλαια θα αναπτυχθούν τεχνικές προκειμένου να προσδιορισθεί το ποσό της αέργου ισχύος που μπορεί να καταναλωθεί από το δοκιμαστικό δίκτυο έτσι ώστε να μειωθεί η αέργου ισχύος που απορροφά ο άπειρος ζυγός 9001. Στον Πίνακα 2.7 γίνεται εμφανές ότι περιορίζοντας το ποσό της αέργου ισχύος που απορροφά ο ζυγός 9001 ή και αντιστρέφοντας την φορά της ροής της, επιτυγχάνεται μείωση της τάσης (ΥΤΤ) V_o κατά 5 % περίπου. Στο Κεφάλαιο 3 με μηδενική παραγωγή από αιολικά πάρκα θα χρησιμοποιηθούν τα ΣΑΤΤΦ στους τρεις υποσταθμούς προκειμένου να αυξηθεί η κατανάλωση αέργου ισχύος από την υπομεταφορά μέσω της αύξησης των τάσεων αναφοράς στους ζυγούς υπομεταφοράς των υποσταθμών. Στο Κεφάλαιο 4 παράλληλα με την αύξηση των τάσεων θα χρησιμοποιηθούν τα αιολικά πάρκα με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και επιπλέον θα γίνει χρήση των μετατροπέων των αιολικών πάρκων προκειμένου να επιτευχθεί επιπλέον απορρόφηση αέργου ισχύος μέσω της λειτουργίας τους με ρύθμιση της τερματικής τους τάσης.

Πίνακας 2.7: Τάση συστήματος μεταφοράς και αέργου ισχύος

$V_o(pu)$	$P_o(MW)$	$Q_o(MVAr)$	$E_T(pu)$
1.07111	227.7	-50.79	1.0455
1.0215	227.7	0.00	1.0455
1.0209	227.7	50	1.0455

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές ελέγχου αέργου κατανάλωσης χωρίς Α/Π

Σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιηθούν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών στους τρεις υποσταθμούς ΥΥΤ/ΥΤ του δοκιμαστικού συστήματος, προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα πρόσθετης κατανάλωσης αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς. Όπως έχει αναφερθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος μειώνει την ανύψωση των τάσεων του συστήματος μεταφοράς. Στο παρόν κεφάλαιο θεωρούνται μηδενικές παραγωγές από τα αιολικά πάρκα, δηλαδή το δοκιμαστικό δίκτυο προσομοιώνεται χωρίς τοπική παραγωγή.

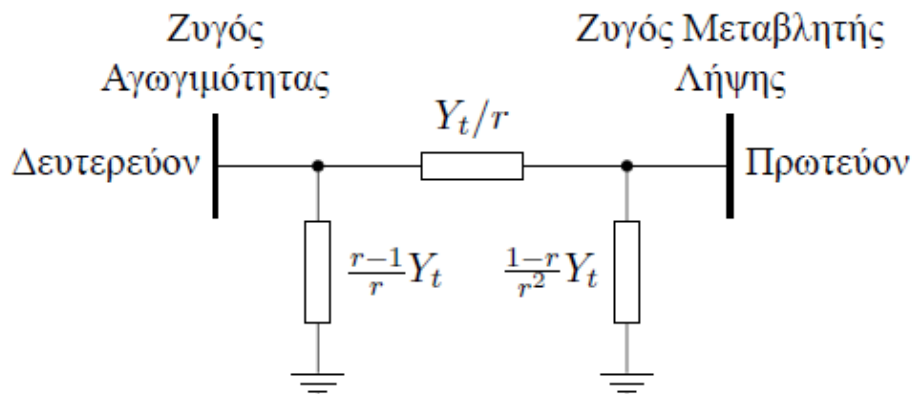
3.1 Αύξηση Τάσης αναφοράς

3.1.1 Περιγραφή μεθόδου

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός είναι η αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς, έτσι ώστε να αντιμετωπιστούν οι υψηλές τάσεις στην ΥΥΤ. Η λογική που θα ακολουθηθεί στην πρώτη μέθοδο είναι η εξής: Η διαταραχή για τη μακροπρόθεσμη προσομοίωση είναι η αύξηση της τάσης αναφοράς στους ζυγούς της υπομεταφοράς η οποία επιτυγχάνεται με μεταφορά της νεκρής ζώνης των δύο παράλληλων μετασχηματιστών σε έναν υποσταθμό κάθε φορά. Προκειμένου να αυξηθεί η τάση στους ζυγούς υπομεταφοράς, η νέα νεκρή ζώνη θα επιλέγεται μεταξύ 1.09, 1.11.

Με βάση τη θεωρία των μετασχηματιστών με μη ονομαστικό λόγο μετασχηματισμού (βλ. Κεφάλαιο 1), από το ισοδύναμο κύκλωμα εξάγεται ότι όταν ο λόγος μετασχηματισμού είναι μικρότερος του 1:1 αμ δημιουργείται στην πλευρά του πρωτεύοντος ($r < 1$) ένα πηνίο και στην πλευρά του δευτερεύοντος ένας πυκνωτής (Σχήμα 3.1). Στην περίπτωση του δοκιμαστικού δικτύου που χρησιμοποιείται οι μεταβλητές λήψεις είναι στην πλευρά της ΥΥΤ(πρωτεύον). Προκειμένου το ΣΑΤΥΦ να αυξήσει την τάση δευτερεύοντος και να την εισάγει στη νέα νεκρή ζώνη, θα μειώνει βήμα-βήμα το λόγο μετασχηματισμού r με αποτέλεσμα αυτός να γίνει μικρότερος της μονάδας και κατ'επέκταση όπως περιγράφηκε η πλευρά του πρωτεύοντος να αποκτήσει ένα πηνίο και η

πλευρά του δευτερεύοντος έναν πυκνωτή. Ως αποτέλεσμα, η αγωγιμότητα του εγκάρσιου πηνίου θα αυξάνεται όσο μειώνεται το r και επομένως θα ρέει μεγαλύτερο ρεύμα με άμεση συνέπεια την αύξηση κατανάλωσης αέργου ισχύος από αυτό. Επιπρόσθετα, η μείωση των τάσεων στο επίπεδο της ΥΥΤ λόγω της δράσης του ΣΑΤΥΦ, θα μειώσει την αέργο παραγωγή από τις εγκάρσιες χωρητικότητες συμβάλλοντας στη μείωση της παραγόμενης αέργου ισχύος από το δοκιμαστικό σύστημα. Από την άλλη, ο εγκάρσιος πυκνωτής στην υπομεταφορά (ΥΤ) θα παράγει αέργο ισχύ με σκοπό την ανύψωση της τάσης. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.1 φαίνονται όσα αναφέρθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 3.1: Ισοδύναμο-π μετασχηματιστή με μη ονομαστικό λόγο ($r : 1$).

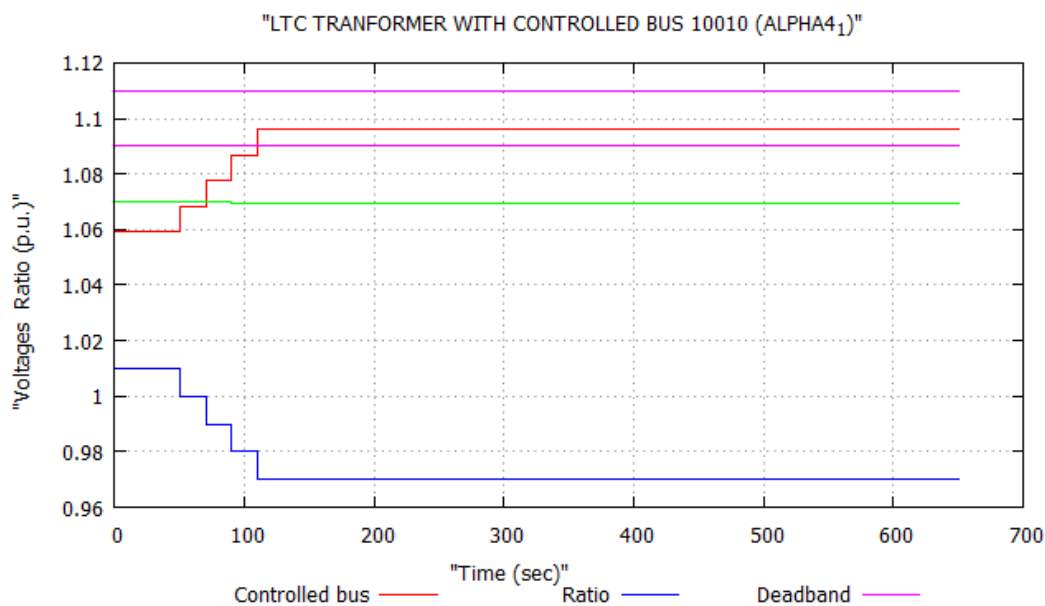
3.1.2 Άνοιγμα διασυνδεδεικτών διακοπών ζυγών (ΔΔΖ)

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, η επίδραση του ανοίγματος των διασυνδεδεικτών διακοπών ζυγών στην αέργο ισχύ του άπειρου ζυγού είναι πολύ μικρή. Συγκεκριμένα από τις αρχικές ροές φορτίου του προηγούμενου κεφαλαίου, στην περίπτωση με τους ανοιχτούς διασυνδεδεικτούς διακόπτες η αρχική κατανάλωση αέργου ισχύος είναι 50.38 MVA_r, δηλαδή η μεταβολή της είναι ανεπαίσθητη. Ως εκ τούτου οι προσομοιώσεις στη συνέχεια θα διεξαχθούν με τους διασυνδεδεικτούς διακόπτες κλειστούς και θα παρουσιαστεί σε πίνακες η επίδραση του ανοίγματός τους.

3.1.3 Εφαρμογή στον υποσταθμό ALPHA

Αρχικά, θα αποτιμηθεί η επίδραση της αύξησης της τάσης αναφοράς των ζυγών υπομεταφοράς του υποσταθμού ALPHA στην αέργο ισχύ του συστήματος. Στη συνέχεια θα προσομοιωθεί το σύστημα με κλειστούς τους διασυνδεδεικτούς διακόπτες των ζυγών της υπομεταφοράς.

Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η τάση του ζυγού 10010 (αντίστοιχα 10011), ο λόγος μετασχηματισμού καθώς και η νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ. Με πράσινο χρώμα παριστάνεται γραφικά η τάση του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή, δηλαδή η ΥΥΤ (ζυγός 1001). Παρατηρείται ότι το ΣΑΤΥΦ δρα τέσσερις φορές αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού προκειμένου να εισάγει την τάση του ελεγχόμενου ζυγού στη νεκρή ζώνη. Συγκεκριμένα, κατεβάζει το λόγο από την αρχική τιμή 1.01

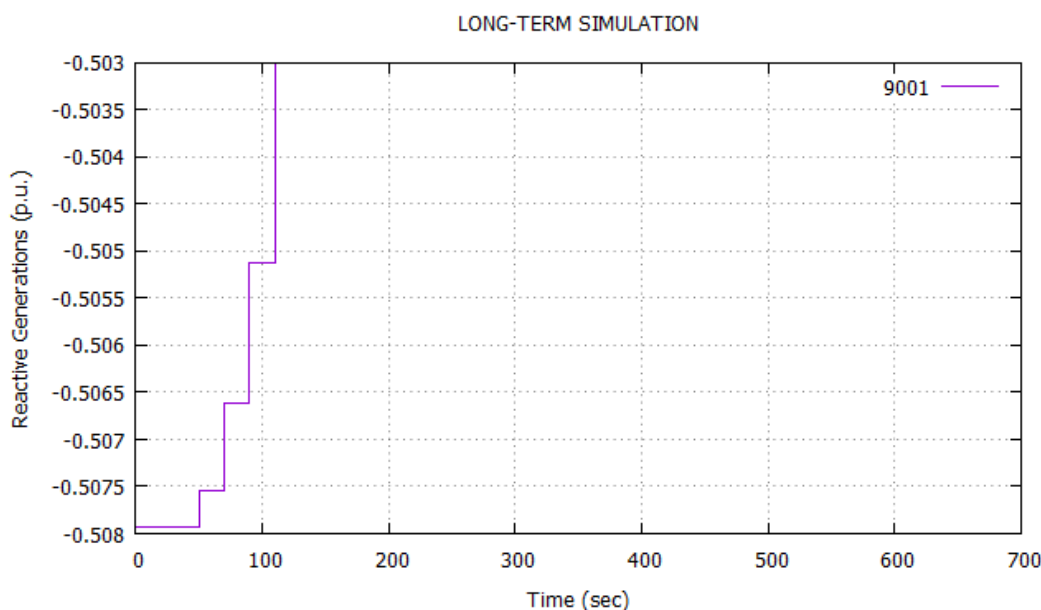


Σχήμα 3.2: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.

στο 0.97 με βήμα 0.01 κάθε φορά. Τελικά, η τάση εισέρχεται στη νεκρή ζώνη και σταθεροποιείται στην τιμή 1.0964 αμ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.

Οι τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς ΥΤΤ (1001, 2001, 3001) δεν παρουσιάζουν κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή καθώς μεταβάλλονται περίπου κατά 0.1%. Στους ζυγούς υπομεταφοράς που ελέγχονται από μετασχηματιστές με ΣΑΤΤΦ (BETA41,GAMMA41), οι τάσεις δεν εξέρχονται από τη νεκρή ζώνη οπότε δεν απαιτείται διορθωτική ενέργεια από το κάθε ΣΑΤΤΦ. Ανάλογα και χωρίς κάποια αξιοσημείωτη συμπεριφορά κινούνται και οι τάσεις στους υπόλοιπους ζυγούς της υπομεταφοράς (DELTA41, EPSILON41, ETA41, THETA41).

Όσον αφορά στη ροή αέργου ισχύος, απο το Σχήμα 3.3 εξάγεται ότι ο άπειρος ζυγός συνεχίζει να απορροφά άεργο ισχύ από το σύστημα υπομεταφοράς. Παρατηρείται ότι με την αύξηση της τάσης αναφοράς στον υποσταθμό ALPHA, επιτεύχθηκε η μείωση της άεργου ισχύ που απορροφά ο άπειρος ζυγός κατά 0.5 MVA περίπου. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι ροές αέργου ισχύος πριν και μετά την αύξηση των τάσεων στον υποσταθμό ALPHA από τους 3 υποσταθμούς (ALPHA, BETA, GAMMA) προς τον άπειρο ζυγό (9001). Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αναφέρονται και στην περίπτωση που οι ΔΔΖ είναι ανοιχτοί.



Σχήμα 3.3: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Πίνακας 3.1: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

		Q_{total} (MVar)	$Q_{9001-1001}$ (MVar)	$Q_{9001-2001}$ (MVar)	$Q_{9001-3001}$ (MVar)
$\Delta\Delta Z$ κλειστοί	Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
	Τελική κατάσταση	-50.30	-15.33	-14.76	-20.19
$\Delta\Delta Z$ ανοιχτοί	Αρχική κατάσταση	-50.38	-17.76	-12.75	-19.85
	Τελική κατάσταση	-49.91	-15.66	-15.25	-19.00

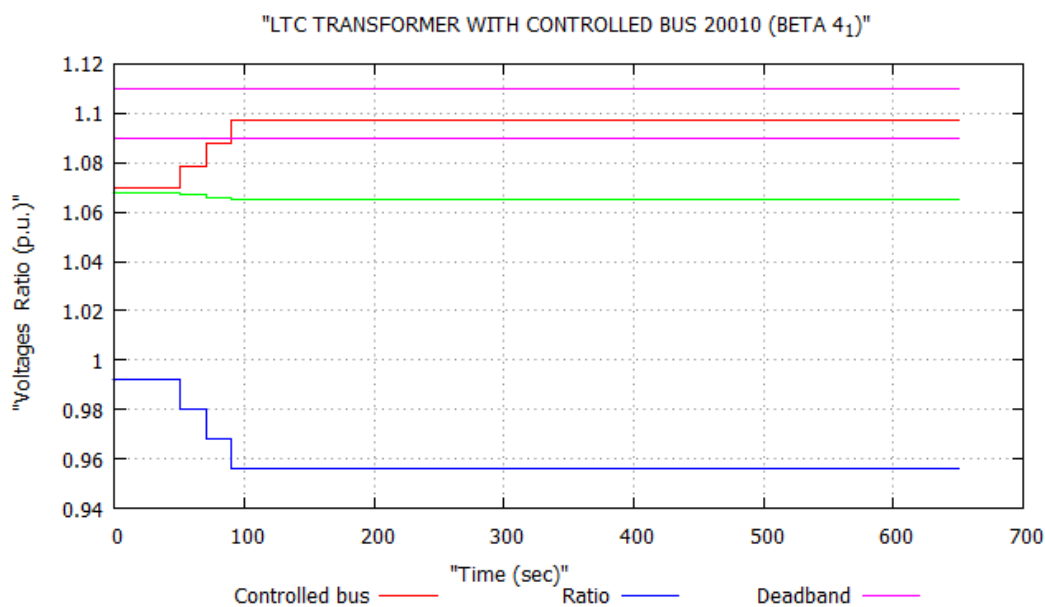
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, με την τεχνική αυτή μειώθηκε η άεργος ισχύς που ρέει από τον υποσταθμό ALPHA προς τον άπειρο ζυγό. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει τη ροή προς τον ζυγό 9001, δηλαδή την απορρόφηση αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό. Συγκεκριμένα, καταναλώθηκαν τοπικά περίπου 3 MVar στον συγκεκριμένο υποσταθμό. Αντίθετα, στον υποσταθμό BETA αυξήθηκε η άεργος ισχύς που ρέει προς τον άπειρο ζυγό. Όσο για τον υποσταθμό GAMMA, η αρχική με την τελική ροή αέργου ισχύος είναι πρακτικά ίδιες.

3.1.4 Εφαρμογή στον υποσταθμό BETA

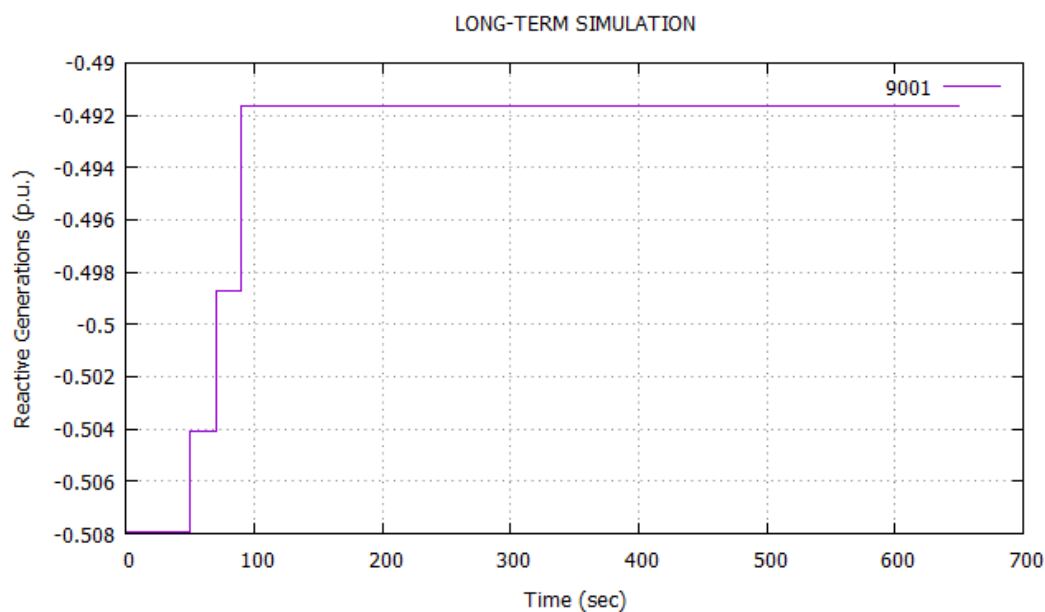
Στη συνέχεια, θα αποτιμηθεί η επίδραση που έχει στην άεργο ισχύ του άπειρου ζυγού η αύξηση των τάσεων αναφοράς στους ζυγούς υπομεταφοράς του υποσταθμού BETA. Οι νεκρές ζώνες των μετασχηματιστών στον υποσταθμό ALPHA επιστρέφουν στις αρχικές τιμές. Όπως και πριν η προσομοίωση θα γίνει για κλειστούς διασυνδεδετικούς διακόπτες ζυγών.

Το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 20010 (αντίστοιχα 20011) αλλάζει το λόγο μετασχηματισμού τρεις

φορές προκειμένου να εισάγει την τάση στη νεκρή ζώνη. Επιπλέον, καμία άλλη τάση (υπομεταφοράς, μεταφοράς) δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη συμπεριφορά. Με πράσινο χρώμα απεικονίζεται η τάση στο ζυγό 2001 (πρωτεύον μετασχηματιστών).



Σχήμα 3.4: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.



Σχήμα 3.5: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Η εφαρμογή της μεθόδου στον υποσταθμό BETA παρατηρείται ότι συμβάλλει πιο δραστικά στην κατανάλωση αέργου ισχύος σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα η

απορροφώμενη από τον άπειρο αέργος ισχύς εδώ σταθεροποιείται κοντά στα 49.2 MVA_r. Στον Πίνακα 3.2 παρακάτω φαίνονται οι ροές αέργου ισχύος προς τον άπειρο ζυγό. Το αρνητικό πρόσημο και πάλι υποδηλώνει την απορρόφηση αέργου ισχύος.

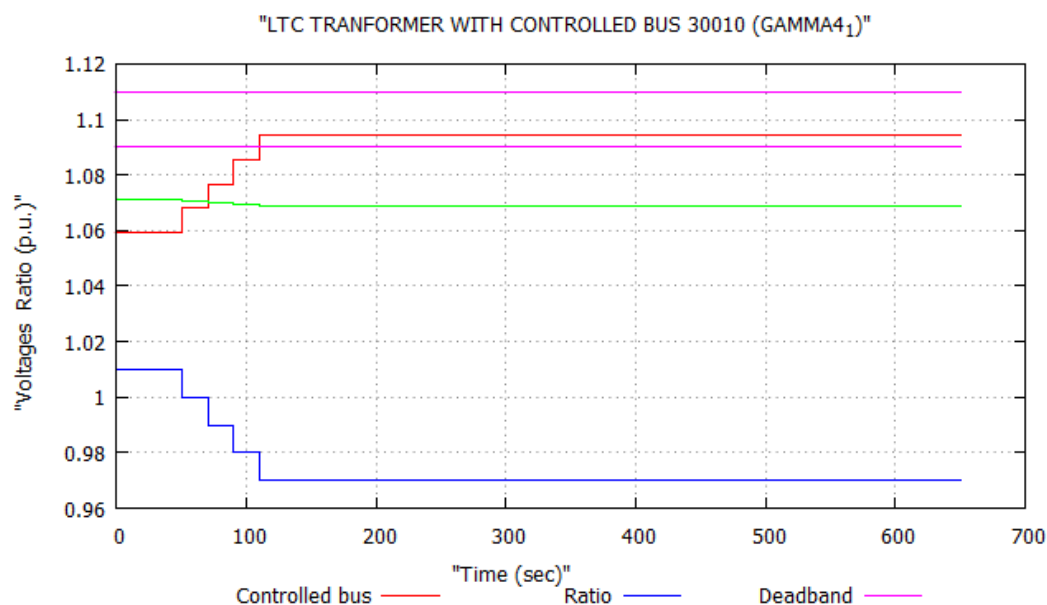
Πίνακας 3.2: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

		Q_{total} (MVA _r)	$Q_{9001-1001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-2001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-3001}$ (MVA _r)
ΔΔΖ κλειστοί	Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
	Τελική κατάσταση	-49.16	-19.05	-4.27	-25.83
ΔΔΖ ανοιχτοί	Αρχική κατάσταση	-50.38	-17.76	-12.75	-19.85
	Τελική κατάσταση	-48.64	-18.58	-4.43	-25.63

Από τον Πίνακα 3.2, φαίνεται ότι ο υποσταθμός BETA έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη βελτίωση αυτή ενώ αντίθετα οι υποσταθμοί ALPHA και GAMMA δρουν αντίστροφα αυξάνοντας την εξαγωγή αέργου ισχύος προς τον ζυγό 9001.

3.1.5 Εφαρμογή στον υποσταθμό GAMMA

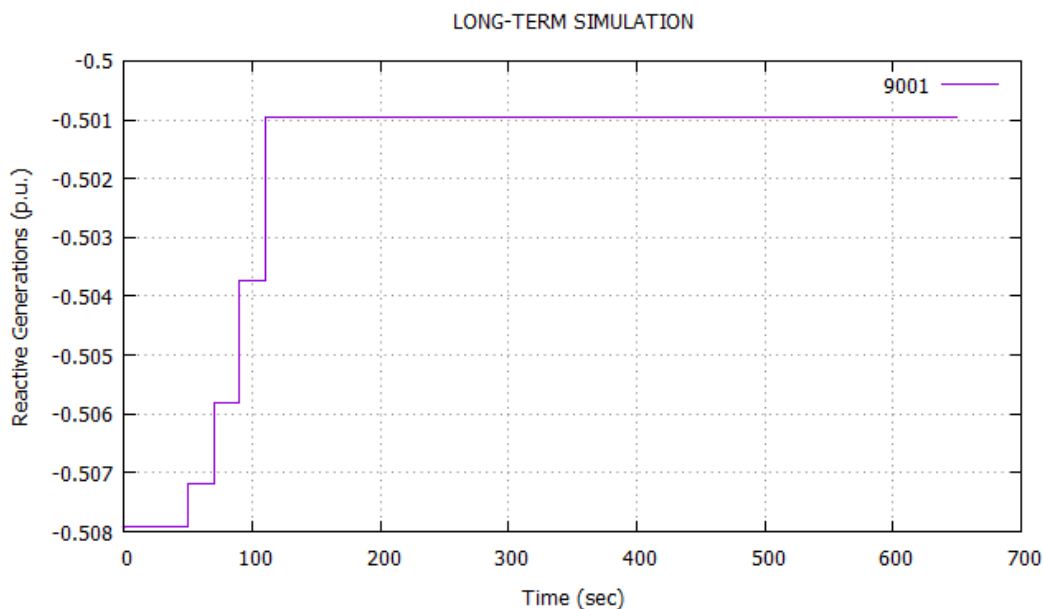
Σε αυτό το σημείο θα προσομοιωθεί η επίδραση που έχει στην κατανάλωση αέργου ισχύος η αύξηση των τάσεων υπομεταφοράς στον υποσταθμό GAMMA. Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για κλειστούς ΔΔΖ αλλά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα με τους ΔΔΖ ανοιχτούς στον τελικό πίνακα.



Σχήμα 3.6: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.

Η τάση του ελεγχόμενου ζυγού 30010 (αντίστοιχα 30011) ακολουθεί το ίδιο μοτίβο με τις

τάσεις στις προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6, μετά από τέσσερις διορθωτικές ενέργειες, η τάση εισέρχεται στην νεκρή ζώνη και σταθεροποιείται κοντά στο 1.095 αμ.



Σχήμα 3.7: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Η άεργος ισχύς που καταναλώνει ο άπειρος ζυγός σε αυτό το σενάριο μειώνεται, αλλά όχι στο βαθμό που μειώνεται όταν η ανύψωση τάσης εφαρμόζεται στην BETA. Συγκεκριμένα, στη μόνιμη κατάσταση ο άπειρος ζυγός τελικά καταναλώνει περίπου 50.1 MVar. Ο Πίνακας 3.3 παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις ροές αέργου ισχύος από τους τρεις υποσταθμούς προς το ζυγό 9001.

Πίνακας 3.3: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

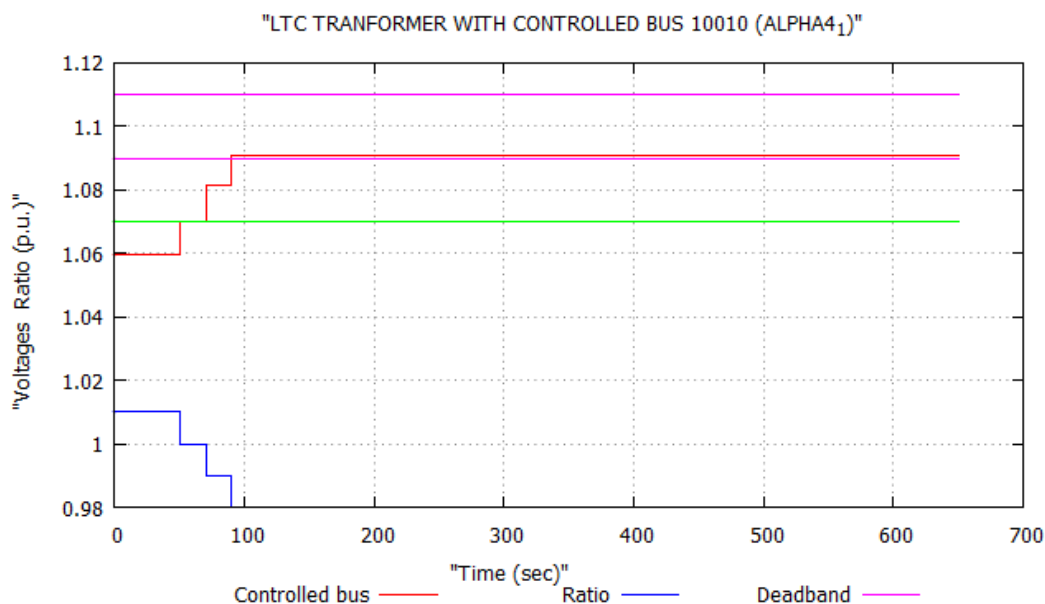
		Q_{total} (MVar)	$Q_{9001-1001}$ (MVar)	$Q_{9001-2001}$ (MVar)	$Q_{9001-3001}$ (MVar)
ΔΔΖ κλειστοί	Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
	Τελική κατάσταση	-50.09	-18.74	-17.44	-13.92
ΔΔΖ ανοιχτοί	Αρχική κατάσταση	-50.38	-17.76	-12.75	-19.85
	Τελική κατάσταση	-49.57	-18.05	-18.23	-13.29

Η βελτίωση σε αυτή την περίπτωση, όπως είναι αναμενόμενο, παρατηρείται στον υποσταθμό GAMMA. Οι υπόλοιποι δύο υποσταθμοί δρουν αντίστροφα αυξάνοντας τη ροή αέργου ισχύος προς τον άπειρο ζυγό.

3.1.6 Αύξηση τάσης αναφοράς σε όλους τους υποσταθμούς

Στην ενότητα αυτή θα προσομοιωθεί η συμπεριφορά της αέργου ισχύος του άπειρου ζυγού όταν αυξάνονται οι τάσεις υπομεταφοράς και στους τρεις υποσταθμούς ταυτόχρονα. Η προσομοίωση θα πραγματοποιηθεί για κλειστούς $\Delta\Delta Z$ όμως στα τελικά αποτελέσματα θα παρουσιαστεί και η επίδραση των ανοιχτών $\Delta\Delta Z$.

Στα Σχήματα 3.8-3.10 φαίνεται η συμπεριφορά των τάσεων στους ζυγούς 10010 (10011), 20010 (20011) και 30010 (30011). Δεδομένου ότι οι τιμές των τάσεων στην αρχική ροή φορτίου είναι μικρότερες του κάτω ορίου της νεκρής ζώνης 1.09 αμ, τα ΣΑΤΥΦ και στους τρεις υποσταθμούς μεταβάλλουν το λόγο μετασχηματισμού προκειμένου να εισαχθούν όλες οι τάσεις στις νεκρές ζώνες.

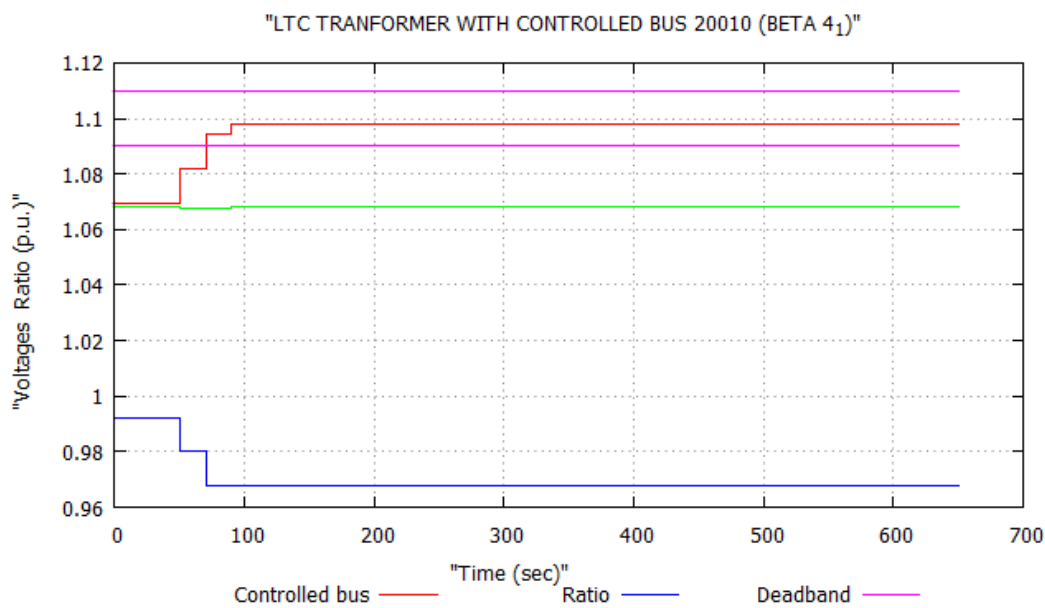


Σχήμα 3.8: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.

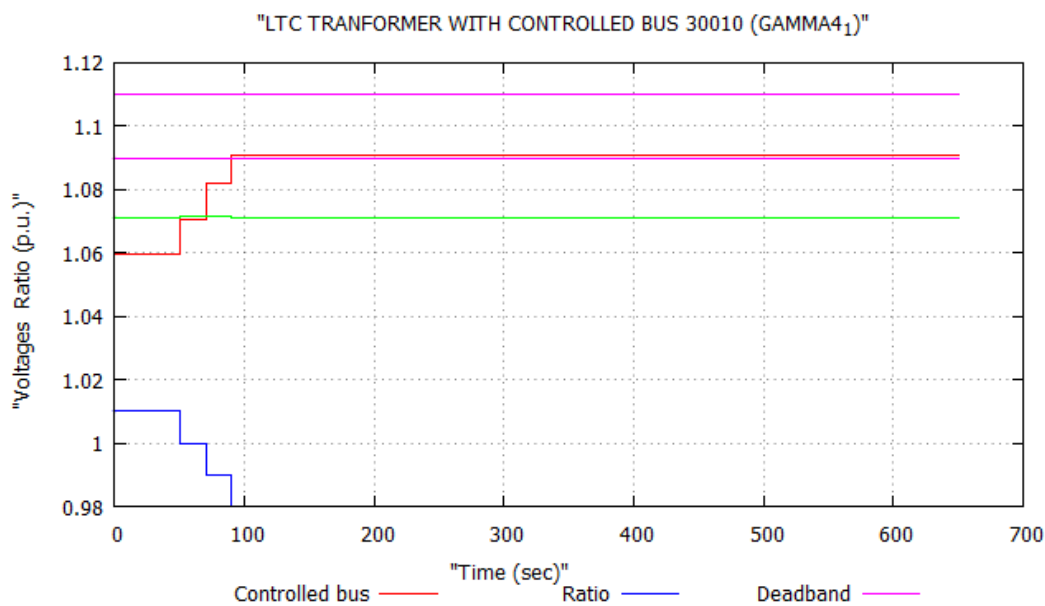
Στο Σχήμα 3.11 παρατηρείται πως η τελική απορροφώμενη από τον άπειρο ζυγό αέργος ισχύς είναι μικρότερη, αλλά η βελτίωση με αυτή τη μέθοδο δεν είναι τόσο δραστική όσο στα προηγούμενα σενάρια που η μεταβολή της νεκρής ζώνης παραγματοποιούνταν σε έναν υποσταθμό κάθε φορά.

Πίνακας 3.4: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

		Q_{total} (MVar)	$Q_{9001-1001}$ (MVar)	$Q_{9001-2001}$ (MVar)	$Q_{9001-3001}$ (MVar)
$\Delta\Delta Z$ κλειστοί	Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
	Τελική κατάσταση	-49.95	-17.57	-13.04	-19.33
$\Delta\Delta Z$ ανοιχτοί	Αρχική κατάσταση	-50.38	-17.76	-12.75	-19.85
	Τελική κατάσταση	-49.3	-17.23	-13.34	-18.73

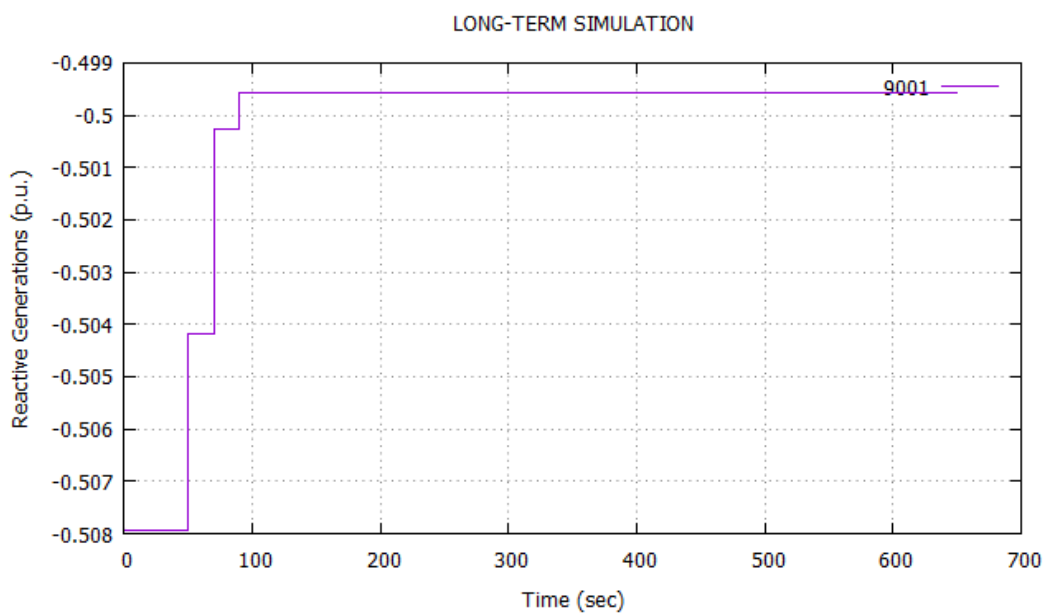


Σχήμα 3.9: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.



Σχήμα 3.10: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.

Από τον Πίνακα 3.4 παρατηρείται πως στους υποσταθμούς ALPHA και GAMMA καταναλώθηκε τοπικά περίπου 1 MVA_r στον καθένα ενώ απο τον υποσταθμό BETA αυξήθηκε η ροή προς τον ζυγό 9001 κατά 1 MVA_r περίπου.



Σχήμα 3.11: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

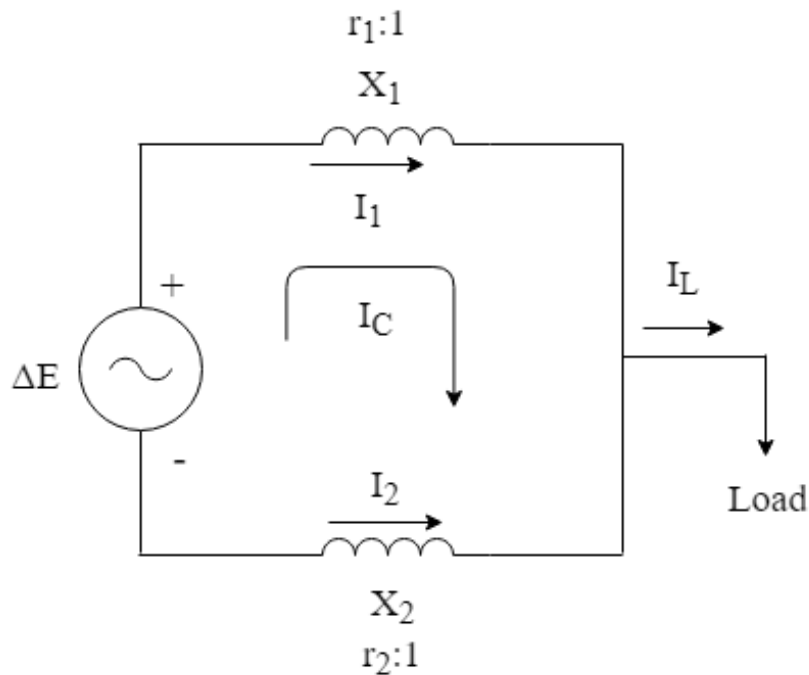
3.2 Δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος

3.2.1 Λειτουργία παράλληλων μετασχηματιστών με άνισους λόγους μετασχηματισμού

Παράλληλισμένοι μετασχηματιστές με άνισους λόγους σπειρών κυκλοφορούν άεργο ισχύ από το μετασχηματιστή της υψηλότερης τάσης δευτερεύοντος προς τον άλλο. Στο Σχήμα 3.12 παριστάνεται η παράλληλη λειτουργία δυο μετασχηματιστών 1 και 2 οι οποίοι τροφοδοτούν ένα φορτίο. Αν οι μετασχηματιστές είχαν ίσες σχέσεις μετασχηματισμού, το ρεύμα του φορτίου I_L θα μοιραζόταν μεταξύ τους αντιστρόφως ανάλογα προς τις επαγωγικές αντιδράσεις τους, δηλαδή:

$$\tilde{I}_1 = \tilde{I}_L \frac{X_2}{X_1 + X_2} \quad (3.1)$$

$$\tilde{I}_2 = \tilde{I}_L \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (3.2)$$



Σχήμα 3.12: Παράλληλη λειτουργία μετασχηματιστών με άνισες σχέσεις μετασχηματισμού.

Μια αύξηση της τάσης του μετασχηματιστή 1, λόγω αλλαγής στη σχέση μετασχηματισμού ισοδυναμεί με την υπέρθεση μιας τάσης $\Delta\tilde{E}$ στο κύκλωμα του μετασχηματιστή 1. Η τάση $\Delta\tilde{E}$ κυκλοφορεί ένα ρεύμα I_c μεταξύ των μετασχηματιστών επί πλέον των ρευμάτων I_1 και I_2 τα οποία θεωρούνται συνιστώσες του ρεύματος φορτίου που οφείλονται στην τάση \tilde{E} . Θεωρείται ότι η αντίσταση του φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερη από τις εν σειρά αντιδράσεις των μετασχηματιστών και επομένως θα ισχύει:

$$\tilde{I}_c \cong \frac{\Delta\tilde{E}}{X_1 + X_2} \quad (3.3)$$

Το \tilde{I}_c έπεται της $\Delta\tilde{E}$ κατά σχεδόν 90° . Επομένως στο βρόχο των δύο παράλληλων μετασχηματιστών κυκλοφορεί άεργος ισχύς, η οποία καταναλώνεται πάνω στις επαγωγικές αντιδράσεις των μετασχηματιστών σύμφωνα με την εξίσωση 3.4:

$$Q_{loss} = I_c^2(X_1 + X_2) = \frac{\Delta E^2}{X_1 + X_2} \quad (3.4)$$

Σε ανά μονάδα μεγέθη το ΔE είναι ίσο με τη διαφορά των λόγων μετασχηματισμού $\Delta r = r_1 - r_2$ και επομένως η σχέση 3.4 μετατρέπεται σε

$$Q_{loss} = \frac{\Delta r^2}{X_1 + X_2} \quad (3.5)$$

Η ιδιότητα της κυκλοφορίας αέργου ισχύος ανάμεσα σε παράλληλους μετασχηματιστές με άνισους λόγους μετασχηματισμού δίνει τη δυνατότητα για επιπλέον τοπική κατανάλωση αέργου ισχύος στο δοκιμαστικό σύστημα υπομεταφοράς και επομένως μικρότερη απορρόφηση από τον

άπειρο ζυγό. Μια προτεινόμενη προσέγγιση για να γίνει η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεσματικότερη είναι η χρήση ηλεκτρονικών ΣΑΤΥΦ στους μετασχηματιστές των υποσταθμών [20]. Η χρήση ηλεκτρονικών ΣΑΤΥΦ παρέχει ποικίλα πλεονεκτήματα όπως χαμηλό κόστος συντήρησης, υψηλή ταχύτητα λειτουργίας και μείωση των ηλεκτρικών τώξων κατά τη μεταγωγή. Η ολοένα αυξανόμενη ανάπτυξη των ημιαγωγικών συσκευών ισχύος όπως τα IGBT και τα Thyristor έχει επιτρέψει την κατασκευή ΣΑΤΥΦ με γρήγορη απόκριση τα οποία παρέχουν στους μετασχηματιστές την επιπρόσθετη δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος παρόμοια με αυτή ενός SVC (Static Var Compensator).

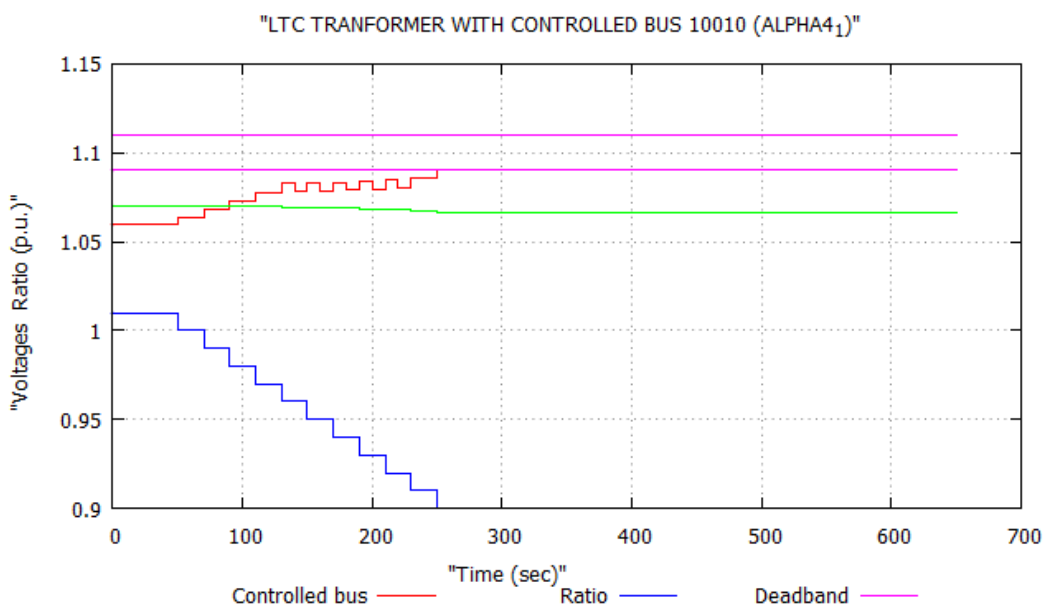
3.2.2 Περιγραφή μεθόδου

Όπως έγινε εμφανές με τις προηγούμενες μεθόδους, η αύξηση της τάσης στους ζυγούς υπομεταφοράς σε έναν υποσταθμό ή και σε όλους ταυτόχρονα συμβάλλει στην αύξηση κατανάλωσης αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς αλλά η συμβολή αυτή είναι πολύ μικρή. Με βάση αυτό το συμπέρασμα και λαμβάνοντας υπόψη τη δυνατότητα για περαιτέρω κατανάλωση αέργου ισχύος μέσω της δημιουργίας κυκλοφορούντος επαγωγικού ρεύματος ανάμεσα σε παράλληλους μετασχηματιστές, θα αναπτυχθεί μια άλλη μέθοδος προκειμένου να αυξηθεί η κατανάλωση αέργου ισχύος στο υποδίκτυο.

Με σκοπό να δημιουργηθεί άνισος λόγος μετασχηματισμού ανάμεσα σε δύο παράλληλους μετασχηματιστές αρκεί να οριστεί διαφορετική νεκρή ζώνη για τα ΣΑΤΥΦ των δύο μετασχηματιστών. Γι αυτό το λόγο, διατηρείται η νεκρή ζώνη του ενός μετασχηματιστή στο διάστημα που φαίνεται στον Πίνακα 2.2 και μετακινείται η νεκρή ζώνη του παράλληλου μετασχηματιστή στο διάστημα [1.09, 1.11]. Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο ΣΑΤΥΦ θα δουλέψουν αντίστροφα. Συγκεκριμένα, το ΣΑΤΥΦ με νεκρή ζώνη [1.09, 1.11] θα μειώσει το λόγο μετασχηματισμού προκειμένου να οδηγήσει την τάση του ζυγού μέσα στη νεκρή του ζώνη. Αντίθετα, όταν η τάση εξέλθει από τη νεκρή ζώνη του άλλου ΣΑΤΥΦ, ο λόγος μετασχηματισμού θα αυξηθεί προκειμένου η τάση να μειωθεί και να εισέλθει ξανά στη νεκρή ζώνη. Δεδομένου ότι απώτερος σκοπός της μεθόδου είναι η αύξηση της τάσης, εξυπηρετεί το σκοπό αυτό η «εξάντληση» του ΣΑΤΥΦ που ενεργεί υπέρ της μείωσης της τάσης. Δεδομένου ότι οι αρχικές τιμές για τους λόγους μετασχηματισμού είναι 0.99 και 1.01 και λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα του Πίνακα 2.2 για τα r_{max} και r_{min} , συμπεραίνεται ότι θα «εξαντληθεί» γρηγορότερα το ΣΑΤΥΦ που ανεβάζει τον λόγο μετασχηματισμού (μειώνει την τάση). Τελικά, θα υπερσχύσει το ΣΑΤΥΦ που μειώνει το λόγο μετασχηματισμού (αυξάνει την τάση) και στη μόνιμη κατάσταση η τάση κάθε ζυγού θα βρεθεί στο διάστημα [1.09,1.11] με τους δύο λόγους μετασχηματισμού σε άνισες τιμές. Όπως γίνεται εμφανές στην παραπάνω περιγραφή, είναι απαραίτητη η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου με τη χρήση προσομοίωσης καθώς είναι απαραίτητο να μελετηθεί η δυναμική συμπεριφορά των ΣΑΤΥΦ στους παράλληλους μετασχηματιστές.

3.2.3 Εφαρμογή στον υποσταθμό ALPHA

Η εφαρμογή της μεθόδου θα γίνει αρχικά στους δύο παράλληλους μετασχηματιστές του υποσταθμού ALPHA. Επιπλέον, η προσομοίωση σε όλες τις περιπτώσεις θα πραγματοποιηθεί μόνο για κλειστούς ΔΔΖ στην υπομεταφορά καθώς με το άνοιγμα τους ακυρώνεται η δυνατότητα για επιπλέον κατανάλωση αέργου ισχύος στο βρόχο των μετασχηματιστών.



Σχήμα 3.13: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.

Στα Σχήματα 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται οι νεκρές ζώνες, οι λόγοι μετασχηματισμού των δυο παράλληλων μετασχηματιστών στον υποσταθμό ALPHA καθώς και η χρονική εξέλιξη της τάσης του ζυγού 10010 (10011). Όπως φαίνεται στα δύο σχήματα, το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή που ελέγχει το ζυγό 10010 (ALPHA41) μειώνει το λόγο μετασχηματισμού επειδή η αρχική τιμή της τάσης είναι μικρότερη από το κάτω όριο της νεκρής ζώνης. Από την άλλη, το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή που ελέγχει το ζυγό 10011 δε δρα από την αρχή της προσομοίωσης καθώς η τάση του ζυγού βρίσκεται μέσα στη νεκρή ζώνη. Όταν η τάση εξέρχεται της νεκρής ζώνης, λόγω της δράσης του ΣΑΤΥΦ στο ζυγό 10010, το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 10011 αυξάνει το λόγο μετασχηματισμού προκειμένου να μειώσει την τάση και να εισαχθεί ξανά στη νεκρή ζώνη. Για το χρονικό διάστημα που τα ΣΑΤΥΦ των 2 παράλληλων μετασχηματιστών δρουν ταυτόχρονα η τάση παρουσιάζει μια ταλάντωση. Αυτό συμβαίνει στο χρονικό διάστημα από περίπου 120 sec μέχρι 220 sec. Μετά από αυτή τη χρονική στιγμή παρατηρείται ότι ο λόγος μετασχηματισμού για το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει το ζυγό 10011 φτάνει στην τιμή 1.06 η οποία είναι και η μέγιστη του (βλ. Πίνακα 2.2). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, να υπερισχύσει το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει το ζυγό 10010 και τελικά να εισάγει την (κοινή) τάση των ζυγών 10010-10011 στη νεκρή ζώνη [1.09,1.11] και να επέλθει η μόνιμη κατάσταση. Τελικά, οι λόγοι μετασχηματισμού των δύο μετασχηματιστών σταθεροποιούνται στις τιμές 0.9 και 1.06

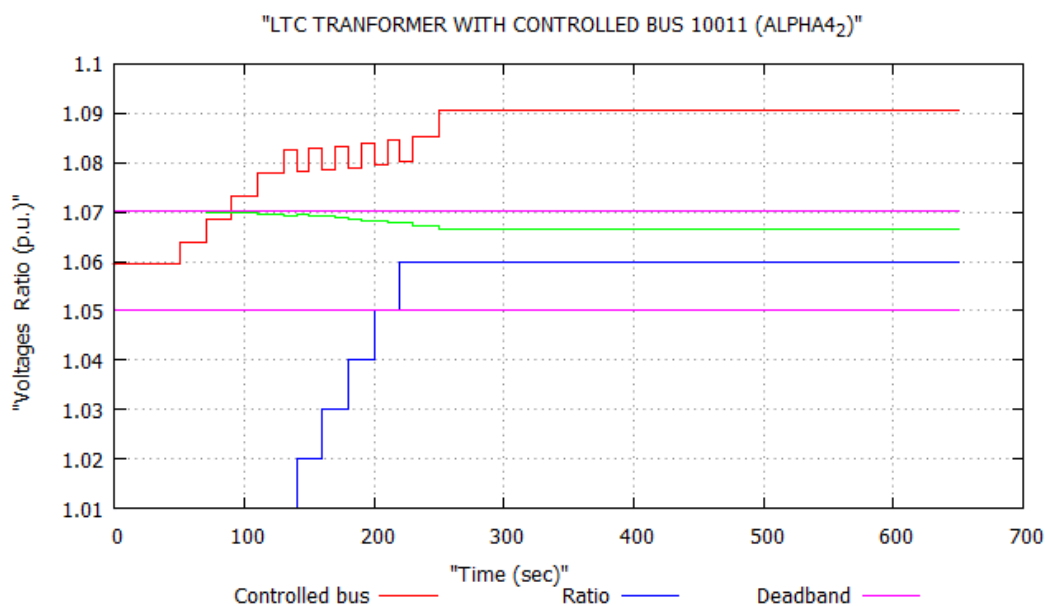
Πίνακας 3.6: Επαγωγικές αντιδράσεις μετασχηματιστών (στα 100 MVA)

Μετασχηματιστής	X (αμ)
10010-1001 (10011-1001)	0.113
20010-2001 (20011-2001)	0.105
30010-3001 (30011-3001)	0.105

αντίστοιχα όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5 με $\Delta r = r_1 - r_2 = 0.16pu$

Πίνακας 3.5: Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ ALPHA)

Μετασχηματιστής	r (αμ)
10010-1001	0.9
10011-1001	1.06

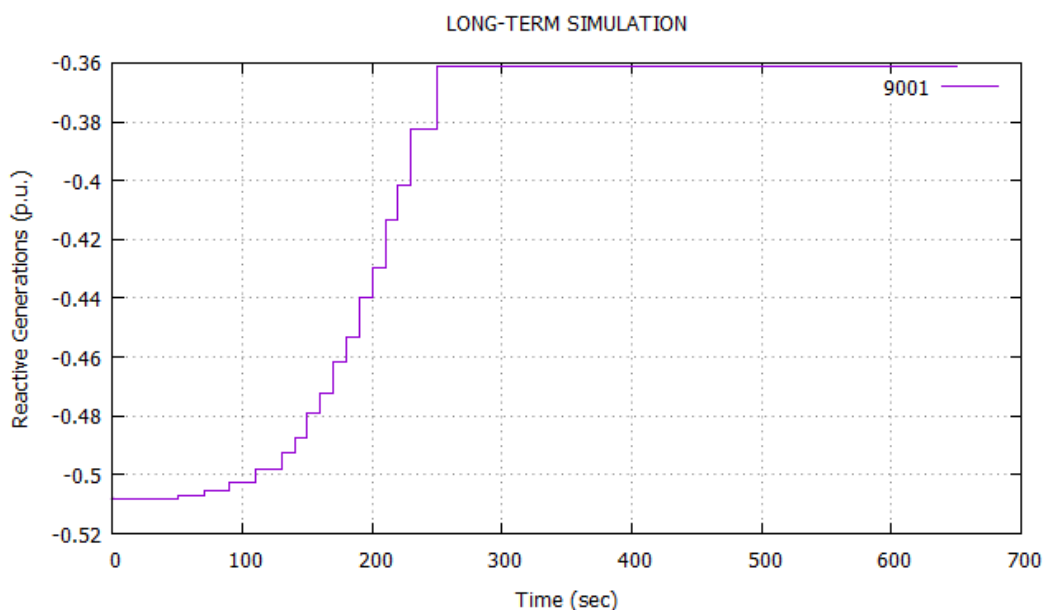


Σχήμα 3.14: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10011.

Η άεργος ισχύς που ρέει προς τον άπειρο ζυγό στο τέλος της προσομοίωσης παρουσιάζει βελτιωμένη εικόνα. Συγκεκριμένα από τα 50.79 MVA_r της αρχικής ροής φορτίου, σταθεροποιείται στα 36 MVA_r περίπου εμφανίζοντας δραστική βελτίωση σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια.

Πίνακας 3.7: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

	Q_{total} (MVA _r)	$Q_{9001-1001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-2001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-3001}$ (MVA _r)
Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
Τελική κατάσταση	-36.14	-8.65	-10.67	-18.41



Σχήμα 3.15: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

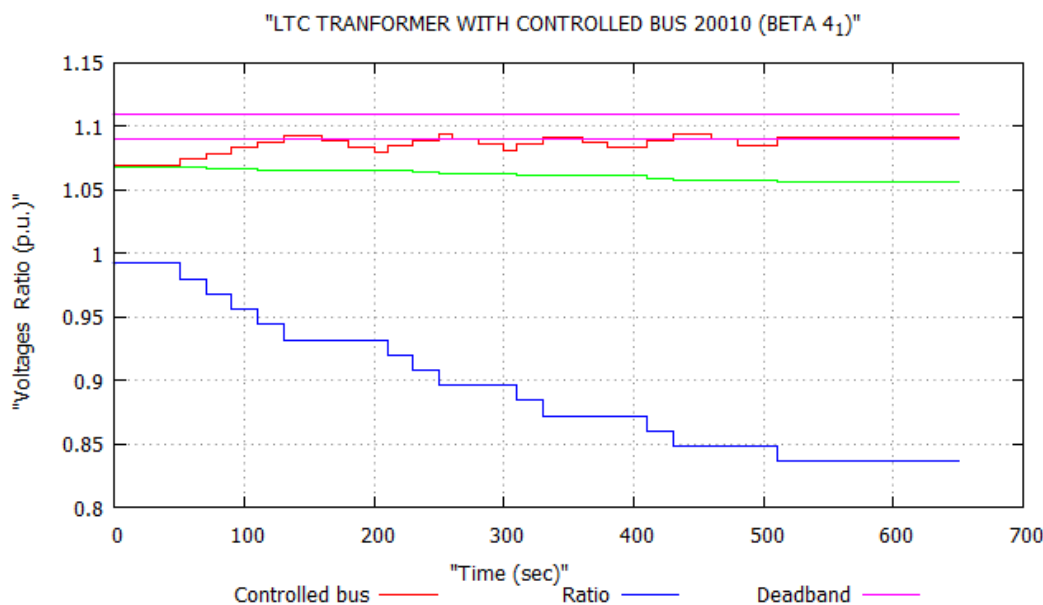
Σε αντίθεση με τα προηγούμενα σενάρια, παρατηρείται ότι όλοι οι υποσταθμοί συνεισφέρουν στη μείωση της ροής αέργου ισχύος προς τον άπειρο ζυγό, δηλαδή καταναλώνεται άεργος ισχύς και στους τρεις. Παρόλο που η εφαρμογή της μεθόδου έγινε στον υποσταθμό ALPHA, καταναλώθηκε άεργος ισχύς και στους υπόλοιπους δύο με αποτέλεσμα να μειωθεί η εξαγωγή προς τον άπειρο ζυγό. Παρακάτω, θα υπολογιστεί η άεργος ισχύς που καταναλώνεται στο βρόχο των δύο μετασχηματιστών εξαιτίας της ροής επαγωγικού ρεύματος μέσα σε αυτόν μέσω της εξίσωσης 3.5 κάνοντας χρήση των τελικών τιμών του λόγου μετασχηματισμού και των επαγωγικών αντιδράσεων των μετασχηματιστών του Πίνακα 3.6. Η άεργος ισχύς που καταναλώθηκε τοπικά εξαιτίας του επαγωγικού ρεύματος βρόχου βρέθηκε ότι είναι **12.16 MVA_r**. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη της απόλυτης τιμής της διαφοράς αρχικής και τελικής απορροφώμενης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό εξαιτίας της μεταβολής των τάσεων στο επίπεδο της ΥΥΤ. Για την ακρίβεια, η μείωση αυτών των τάσεων (Πίνακας 3.8) επέφερε και μειωμένη παραγωγή αέργου ισχύος από τις εγκάρσιες χωρητικότητες και επομένως παρατηρείται η συγκεκριμένη αριθμητική διαφορά.

Πίνακας 3.8: Τάσεις ζυγών ΥΥΤ

	V_{1001} (αμ)	V_{2001} (αμ)	V_{3001} (αμ)
Αρχική κατάσταση	1.07	1.068	1.071
Τελική κατάσταση	1.066	1.067	1.069

3.2.4 Εφαρμογή στον υποσταθμό BETA

Εδώ εφαρμόζεται ανάλογη τακτική με την προηγούμενη ενότητα, αλλά για τον υποσταθμό BETA με τα ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού ALPHA στις αρχικές τους ρυθμίσεις.



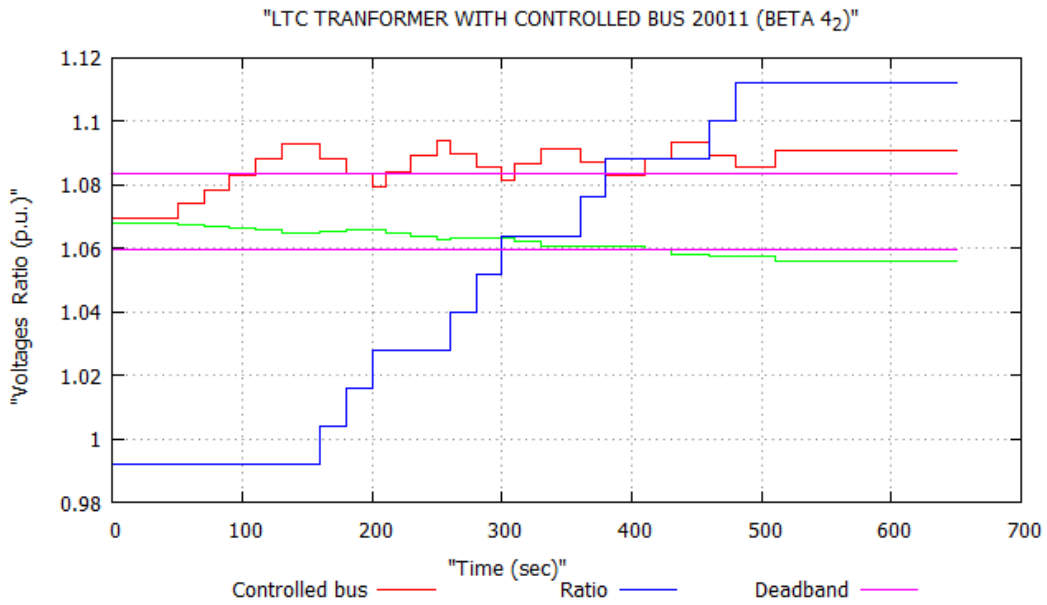
Σχήμα 3.16: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.

Στα Σχήματα 3.16 και 3.17 παρατηρείται ότι επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο με την προσομοίωση για τον υποσταθμό ALPHA. Για όσο χρονικό διάστημα τα δύο ΣΑΤΥΦ δρουν ταυτόχρονα η τάση του ζυγού 20010(20011) ταλαντώνεται όπως εξηγήθηκε και παραπάνω. Λίγο μετά τα 470 sec ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ που ελέγχει το ζυγό 20011 φτάνει στη μέγιστη τιμή του (1.1120 αμ). Μετά από αυτή τη χρονική στιγμή, υπερिσχύει το ΣΑΤΥΦ που ελέγχει το ζυγό 20010 και τελικά εισάγει την τάση στη νεκρή ζώνη [1.09,1.11] επιτυγχάνοντας μόνιμη κατάσταση. Οι τελικοί λόγοι μετασχηματισμού για τους δύο παράλληλους μετασχηματιστές παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3.9.

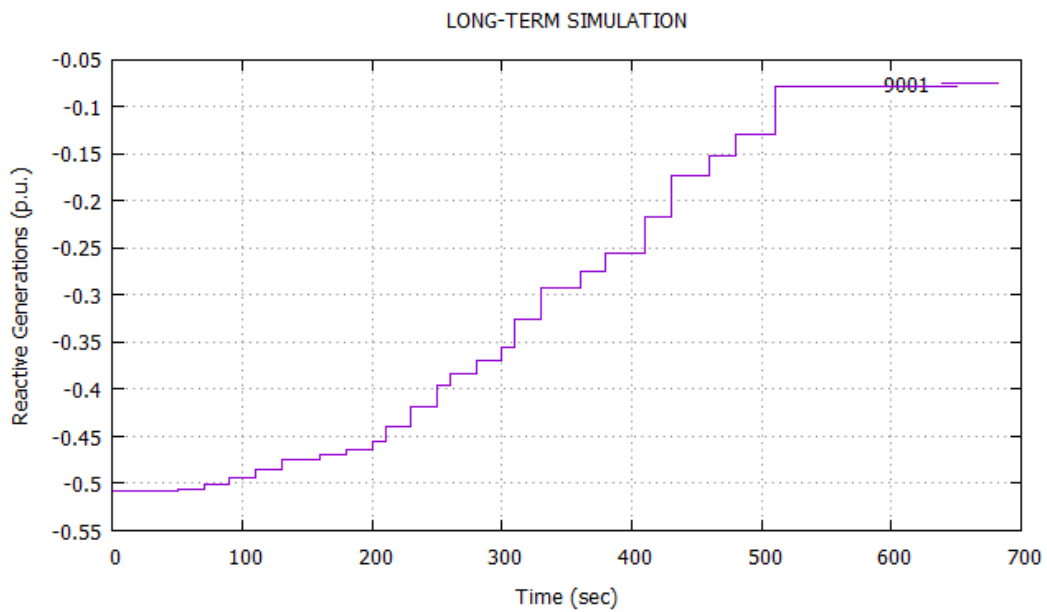
Πίνακας 3.9: Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ BETA)

Μετασχηματιστής	r (αμ)
20010-2001	0.836
20011-2001	1.112

Στο Σχήμα 3.18 παρατηρείται η πιο βελτιωμένη κατάσταση όσον αφορά στη ροή αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα μετά το τέλος της προσομοίωσης, ο άπειρος ζυγός απορροφά πλέον περίπου 7.8 MVA_r. Στον Πίνακα 3.10 παρουσιάζεται η συνεισφορά κάθε υποσταθμού στη ροή αέργου ισχύος, με τη ροή στον υποσταθμό BETA να είναι πλέον θετική υποδηλώνοντας έγχυση αέργου ισχύος από τον ζυγό 9001 προς τον υποσταθμό BETA.



Σχήμα 3.17: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20011.



Σχήμα 3.18: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Πίνακας 3.10: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

	Q_{total} (MVar)	$Q_{9001-1001}$ (MVar)	$Q_{9001-2001}$ (MVar)	$Q_{9001-3001}$ (MVar)
Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	20.42
Τελική κατάσταση	-7.88	-7.83	19.59	-19.65

Παρακάτω, θα υπολογιστεί η αέργος ισχύς που καταναλώνεται στο βρόχο των δύο μετασχηματιστών εξαιτίας της ροής επαγωγικού ρεύματος μέσα σε αυτόν μέσω της εξίσωσης 3.5. Η αέργος ισχύς που καταναλώθηκε τοπικά εξαιτίας του επαγωγικού ρεύματος βρόχου βρέθηκε ότι είναι **33.85 MVar**. Αυτή η τιμή είναι μικρότερη της απόλυτης τιμής της διαφοράς αρχικής και τελικής απορροφώμενης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό και οφείλεται στη μείωση των τάσεων στο επίπεδο της ΥΥΤ (Πίνακας 3.11). Στη μείωση της αέργου ισχύος που απορροφάται από τον άπειρο ζυγό συνέβαλε σημαντικά και η μεταβολή (μείωση) της αέργου ισχύος από τον υποσταθμό ALPHA κατά 11 MVar περίπου παρόλο που η αύξηση της τάσης αναφοράς εφαρμόζεται στον υποσταθμό BETA.

Πίνακας 3.11: Τάσεις ζυγών ΥΥΤ

	V_{1001} (αμ)	V_{2001} (αμ)	V_{3001} (αμ)
Αρχική κατάσταση	1.07	1.068	1.071
Τελική κατάσταση	1.066	1.056	1.071

3.2.5 Εφαρμογή στον υποσταθμό GAMMA

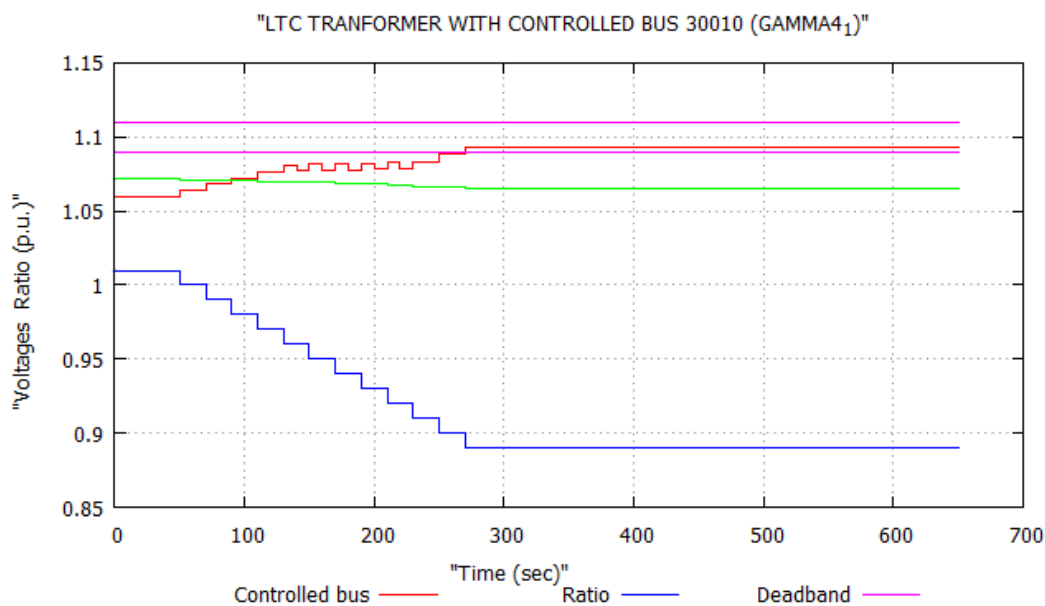
Με ανάλογο τρόπο γίνεται η προσομοίωση για τον υποσταθμό GAMMA. Στα Σχήματα 3.19 και 3.20 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της τάσης του ζυγού 30010 (30011) καθώς και των λόγων μετασχηματισμών των ΣΑΤΥΦ των δύο παράλληλων μετασχηματιστών. Η συμπεριφορά είναι ανάλογη με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Όσο τα δύο ΣΑΤΥΦ αλλάζουν τους λόγους μετασχηματισμού τους παράλληλα η τάση ταλαντώνεται, αλλά λίγο μετά τα 200 sec προσομοίωση το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 30011 φτάνει στη μέγιστη τιμή λόγου μετασχηματισμού (1.06 αμ) οπότε υπερیشχει το ΣΑΤΥΦ του ζυγού 30010 που εισάγει τελικά την τάση στη νεκρή ζώνη [1.09, 1.11] και επιτυγχάνεται η μόνιμη κατάσταση. Οι τελικές τιμές για το λόγο μετασχηματισμού στους μετασχηματιστές του υποσταθμού GAMMA φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 3.12.

Πίνακας 3.12: Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (Υ/Σ GAMMA)

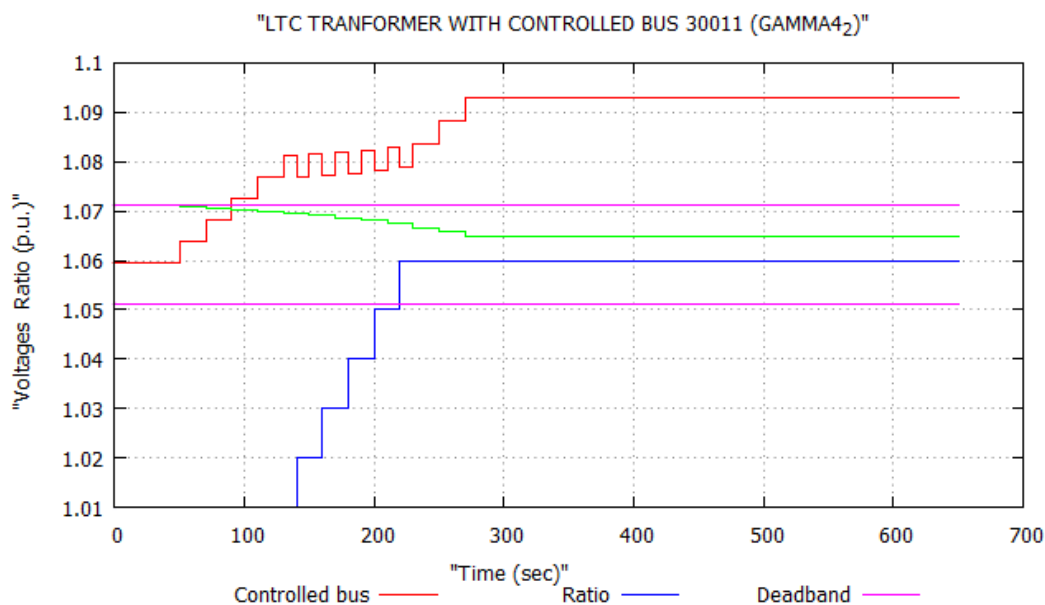
Μετασχηματιστής	r (αμ)
30010-3001	0.89
30011-3001	1.06

Η απορρόφηση αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό μειώνεται και πάλι. Παρ' όλα αυτά δεν παρουσιάζονται καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με την προσομοίωση για τον υποσταθμό BETA. Η συνεισφορά κάθε υποσταθμού στη μείωση της ροής αέργου ισχύος προς τον άπειρο ζυγό παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.13.

Παρακάτω, θα υπολογιστεί η αέργος ισχύς που καταναλώνεται στο βρόχο των δύο μετασχηματιστών εξαιτίας της ροής επαγωγικού ρεύματος μέσα σε αυτόν μέσω της εξίσωσης 3.5. Η αέργος ισχύς που καταναλώθηκε τοπικά εξαιτίας του επαγωγικού ρεύματος βρόχου βρέθηκε ότι

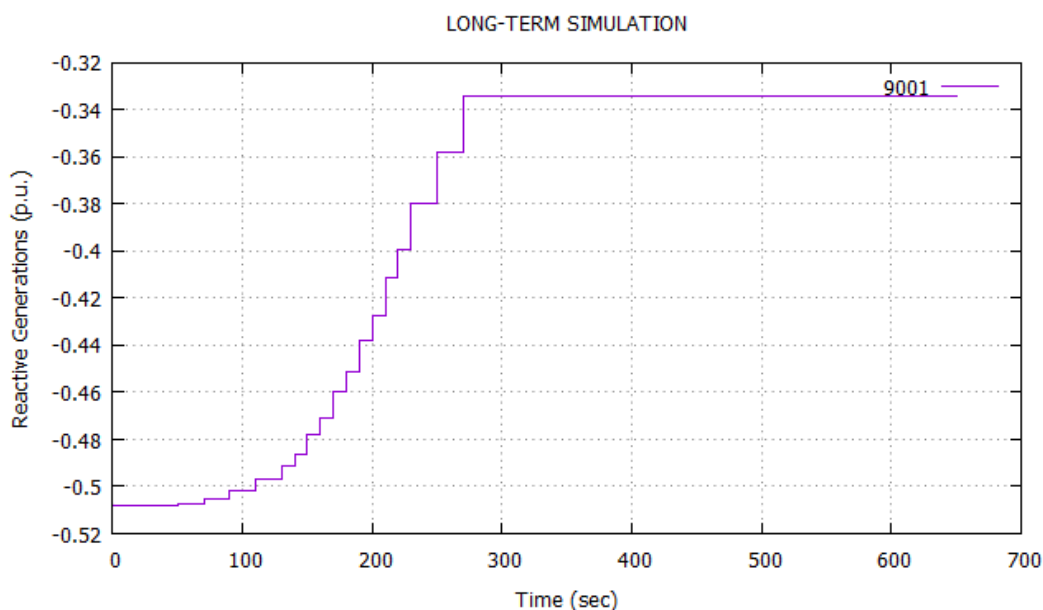


Σχήμα 3.19: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.



Σχήμα 3.20: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30011.

είναι **13.9 MVar**. Όπως φάνηκε και παραπάνω, αυτή η τιμή είναι μικρότερη της απόλυτης τιμής της διαφοράς αρχικής και τελικής απορροφώμενης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό εξαιτίας της μείωσης των τάσεων στο επίπεδο της ΥΥΤ και επομένως μείωσης της παραγόμενης αέργου ισχύος από τις εγκάρσιες χωρητικότητες των γραμμών.



Σχήμα 3.21: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Πίνακας 3.13: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

	Q_{total} (MVA _r)	$Q_{9001-1001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-2001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-3001}$ (MVA _r)
Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	-20.42
Τελική κατάσταση	-33.39	-14.81	15.17	-1.71

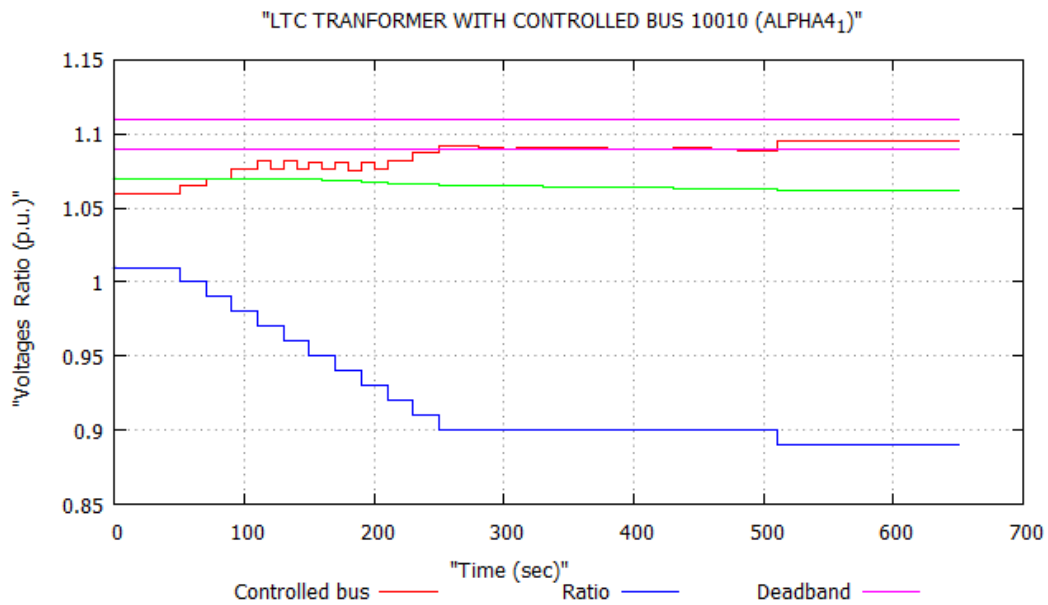
Πίνακας 3.14: Τάσεις ζυγών ΥΥΤ

	V_{1001} (αμ)	V_{2001} (αμ)	V_{3001} (αμ)
Αρχική κατάσταση	1.07	1.068	1.071
Τελική κατάσταση	1.069	1.069	1.065

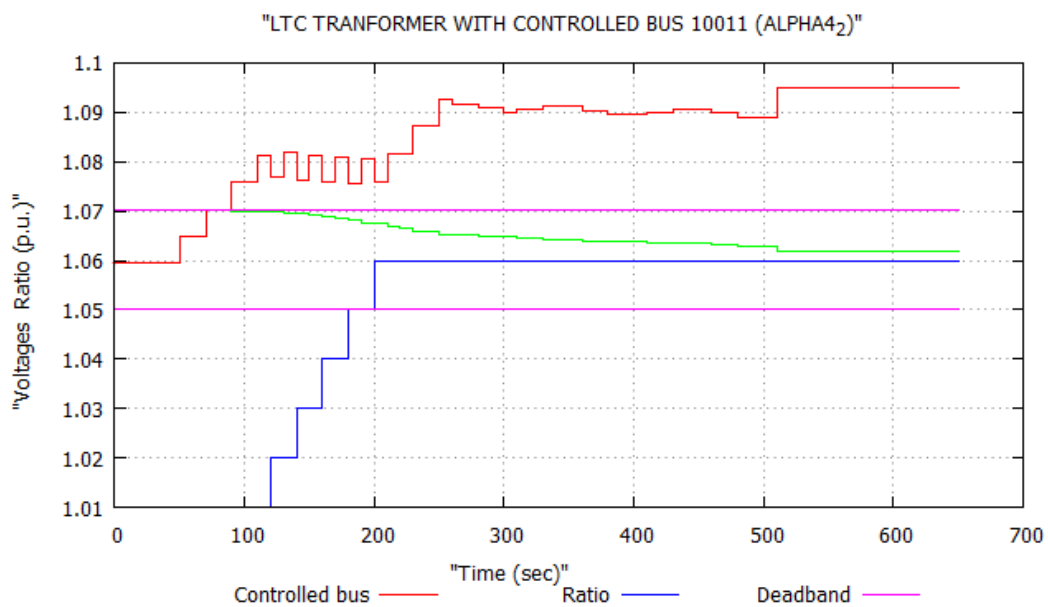
3.2.6 Ταυτόχρονη εφαρμογή σε όλους τους υποσταθμούς

Σε αυτό το σημείο ορίζονται διαφορετικές νεκρές ζώνες σε κάθε ζευγάρι παράλληλων μετασχηματιστών και για τους τρεις υποσταθμούς ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα, η νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ του ενός παράλληλου μετασχηματιστή μεταφέρεται στο διάστημα [1.09, 1.11] και το ΣΑΤΥΦ του άλλου μετασχηματιστή παραμένει στην αρχική του ρύθμιση.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 3.22-3.27, φαίνεται ότι τα ΣΑΤΥΦ των δύο παράλληλων μετασχηματιστών κάθε περιοχής δρουν ανάλογα με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Στον Πίνακα 3.15

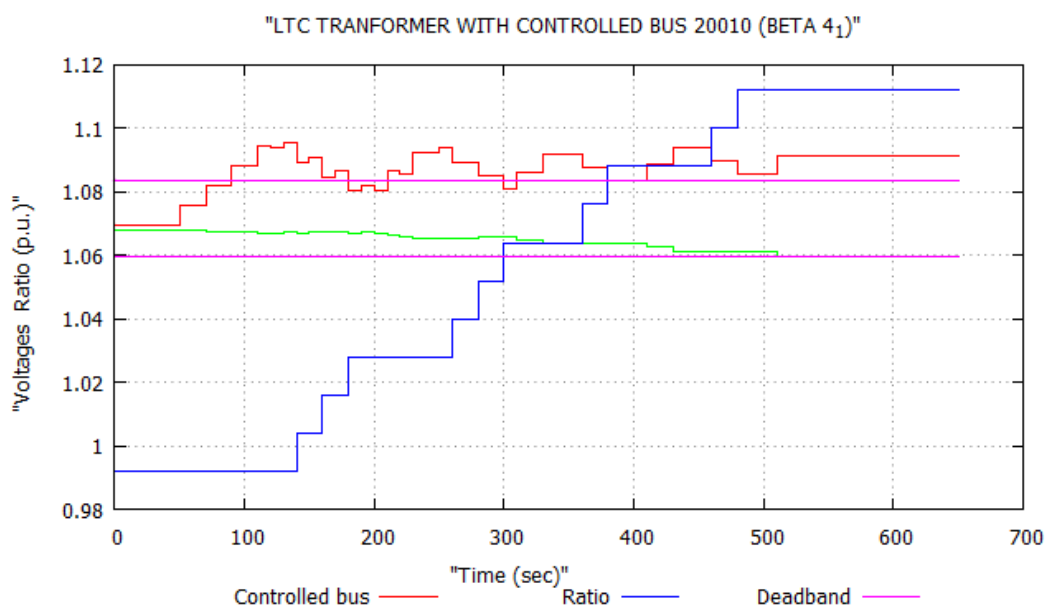


Σχήμα 3.22: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10010.

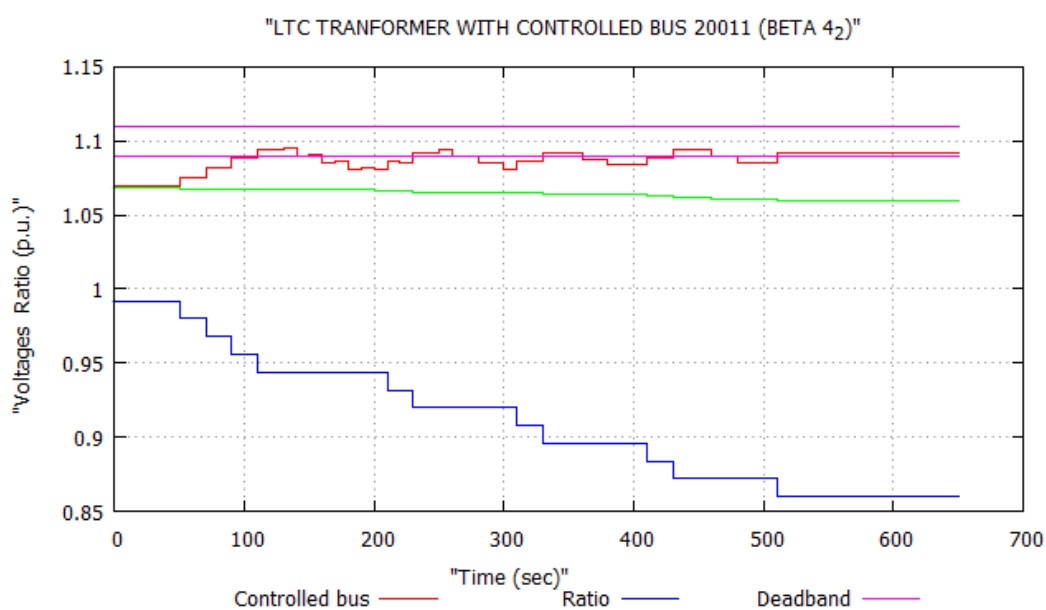


Σχήμα 3.23: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 10011.

φαίνονται οι τελικές τιμές των λόγων μετασχηματισμού σε όλους τους υποσταθμούς.



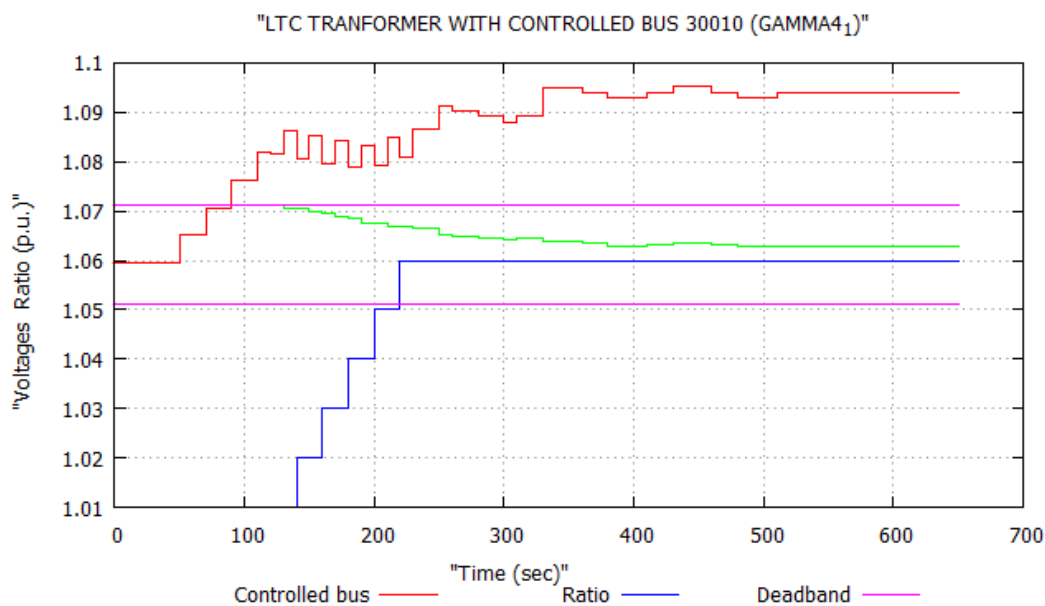
Σχήμα 3.24: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20010.



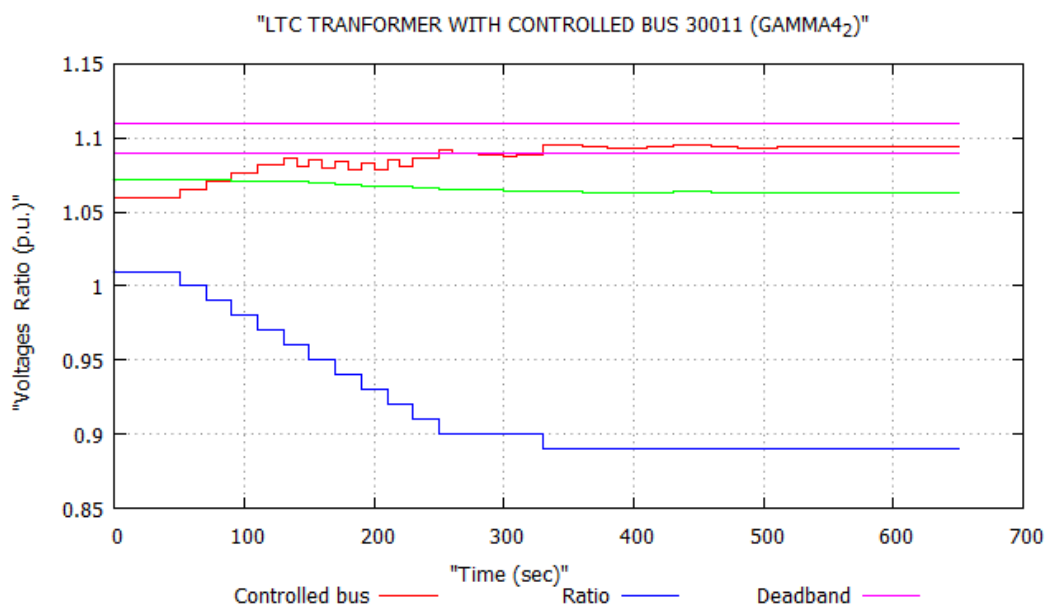
Σχήμα 3.25: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 20011.

Πίνακας 3.15: Τελικοί λόγοι μετασχηματισμού (όλοι οι Υ/Σ)

Μετασχηματιστής	r (αμ)
10010-1001	0.89
10011-1001	1.06
20010-2001	1.1120
20011-2001	0.86
30010-3001	1.06
30011-3001	0.89



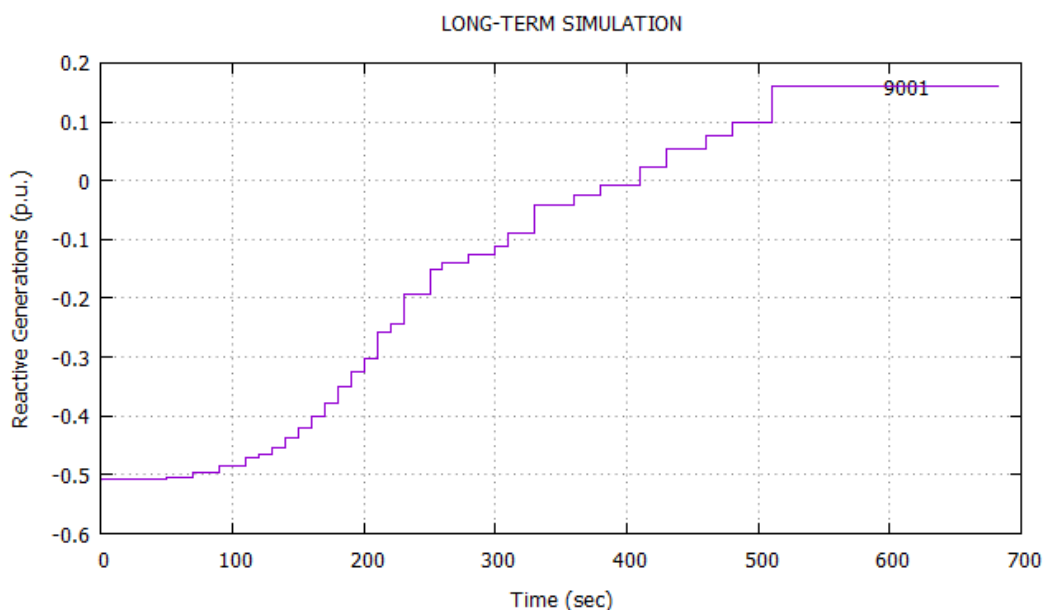
Σχήμα 3.26: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30010.



Σχήμα 3.27: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ζυγού 30011.

Όσον αφορά στην άεργο ισχύ, παρατηρείται στο Σχήμα 3.28 ότι τελικά η ροή αντιστράφηκε. Πλέον, στο τέλος της προσομοίωσης ο άπειρος ζυγός παράγει άεργο ισχύ. Στον Πίνακα 3.16 γίνεται εμφανές πως πλέον και στους τρεις υποσταθμούς αντιστράφηκαν οι ροές με αποτέλεσμα την έγχυση αέργου ισχύος από τον ζυγό 9001. Παρακάτω, θα υπολογιστεί η άεργος ισχύς που καταναλώνεται στο βρόχο των δύο μετασχηματιστών εξαιτίας της ροής επαγωγικού ρεύματος μέσα σε αυτόν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή θα δημιουργηθούν επαγωγικά ρεύματα και

στους τρεις βρόχους (σε κάθε υποσταθμό), πρέπει να υπολογιστεί το άθροισμα και των τριών επαγωγικών απωλειών. Η αέργος ισχύς που καταναλώθηκε τοπικά εξαιτίας των επαγωγικών ρευμάτων των βρόχων βρέθηκε ότι είναι **58.94 MVA_r**. Όπως προηγουμένως έτσι και σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή είναι μικρότερη της απόλυτης τιμής της διαφοράς αρχικής και τελικής απορροφώμενης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό.



Σχήμα 3.28: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού.

Πίνακας 3.16: Ροή αέργου ισχύος των υποσταθμών

	Q_{total} (MVA _r)	$Q_{9001-1001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-2001}$ (MVA _r)	$Q_{9001-3001}$ (MVA _r)
Αρχική κατάσταση	-50.79	-18.04	-12.32	20.42
Τελική κατάσταση	15.93	3.99	9.76	2.17

Κεφάλαιο 4

Συμβολή Α/Π στην κατανάλωση αέργου ισχύος

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση που έχει στην κατανάλωση αέργου ισχύος από το δίκτυο υπομεταφοράς η λειτουργία των αιολικών πάρκων υπό μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος (Σ.Ι) καθώς και με τη δυνατότητα παραγωγής και απορρόφησης αέργου ισχύος από τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. Όπως ακριβώς έγινε στο Κεφάλαιο 3 θα προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος όταν εισάγεται ως διαταραχή η αλλαγή της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ προκειμένου να αυξηθούν οι τάσεις των ζυγών υπομεταφοράς είτε σε έναν υποσταθμό είτε σε όλους ταυτόχρονα.

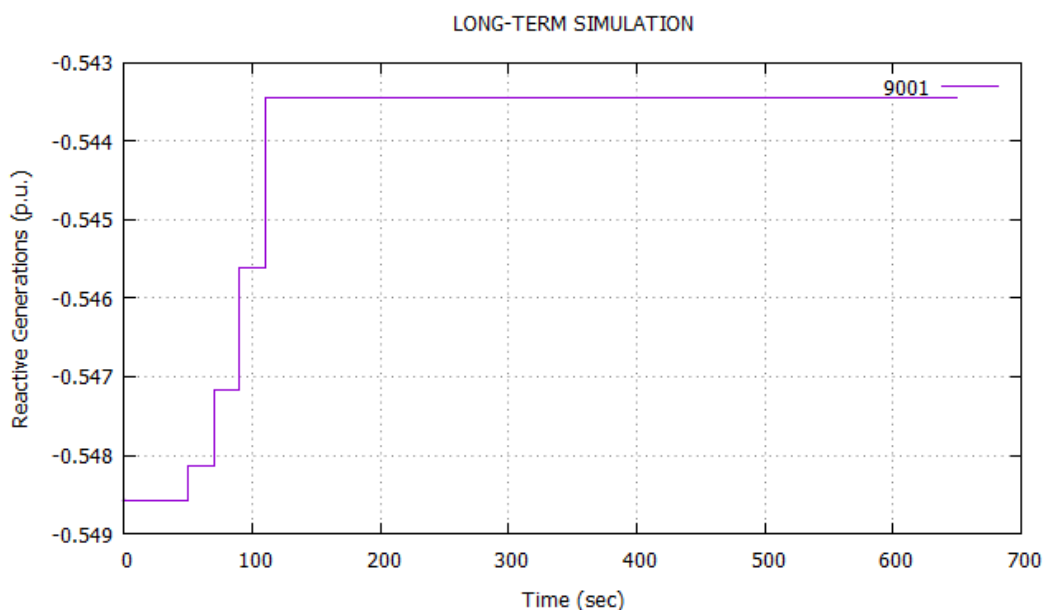
4.1 Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος

Σε αυτήν την ενότητα μηδενίζεται η αέργος ισχύς όλων των αιολικών πάρκων κατά τη διάρκεια της μακροπρόθεσμης προσομοίωσης, δηλαδή λειτουργούν υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Θα προσομοιωθούν δύο μέθοδοι του Κεφαλαίου 3 με τρία σενάρια σταθερής αιολικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, θα ορίζεται μια τιμή για την ενεργό παραγωγή κάθε αιολικού πάρκου ίση με ένα ποσοστό της μέγιστης (P_{max}) για κάθε σενάριο. Οι τιμές που θα προσομοιωθούν είναι το 10%, 40 % και 90 % της μέγιστης ισχύος κάθε αιολικού πάρκου όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 2.4. Θα προσομοιωθεί η επίδραση της αύξηση της τάσης στην περιοχή ALPHA καθώς και η μέθοδος της δημιουργίας κυκλοφορούσας αέργου ισχύος στους μετασχηματιστές όλων των υποσταθμών.

4.1.1 Αύξηση τάσης αναφοράς στον υποσταθμό ALPHA

Όπως αναφέρθηκε και πριν, σε αυτήν την ενότητα θα αποτιμηθεί η επίδραση που έχει στην κατανάλωση αέργου ισχύος η αύξηση των τάσεων στους ζυγούς υπομεταφοράς του υποσταθμού ALPHA. Η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η μεταφορά της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ προκειμένου να αυξηθούν οι τάσεις στους ζυγούς υπομεταφοράς του υποσταθμού ALPHA. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1 η αρχική ροή φορτίου δείχνει πως ο άπειρος ζυγός καταναλώνει περισσότερη αέργου ισχύ σε σύγκριση με το αντίστοιχο σενάριο του Κεφαλαίου 4 που η παραγωγή

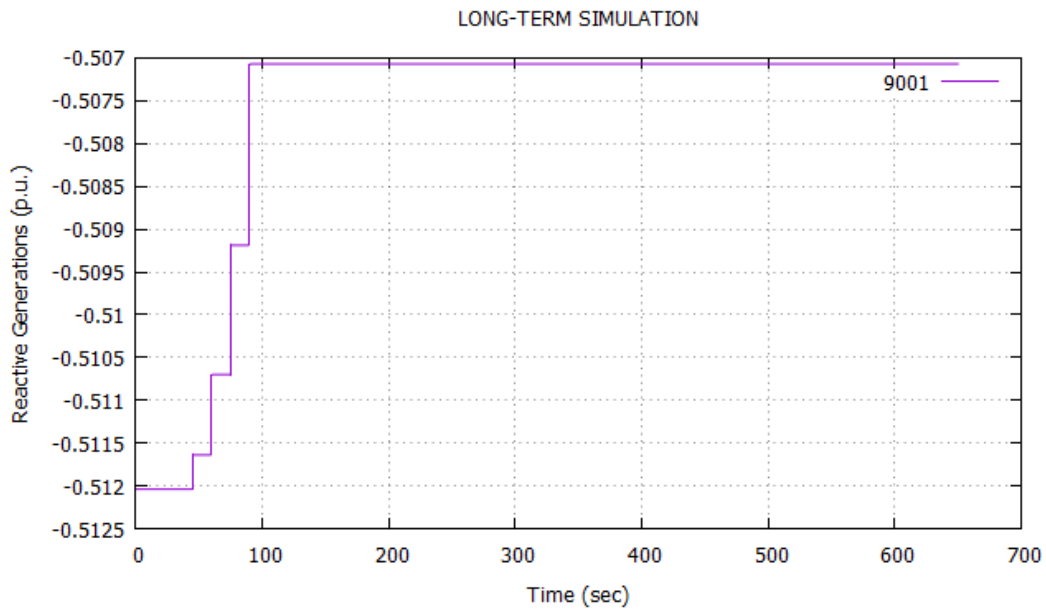
ενεργού και αέργου ισχύος από τα αιολικά πάρκα είναι μηδενική. Αυτή η συμπεριφορά εξηγείται μέσω των ρευμάτων που ρέουν στις γραμμές μεταφοράς. Συγκεκριμένα, η έγχυση ενεργού ισχύος από τα αιολικά πάρκα για την εξυπηρέτηση των φορτίων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ενεργού ισχύος που παρέχει ο άπειρος ζυγός. Αυτό με τη σειρά του μειώνει τα ρεύματα που ρέουν τόσο στις διασυνδετικές γραμμές (9001-1001, 9001-2001 και 9001-3001) όσο και στις υπόλοιπες γραμμές του δικτύου. Ακολούθως, μειώνονται οι άεργες απώλειες της μορφής I^2X και συνεπώς το πλεονάζον ποσό αέργου ισχύος καταναλώνεται από τον άπειρο ζυγό.



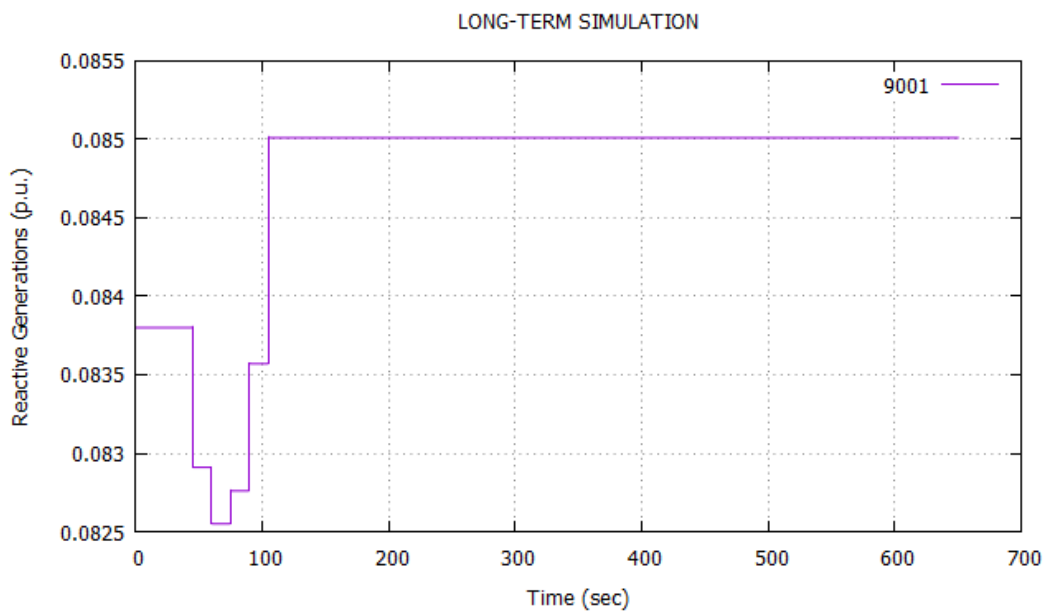
Σχήμα 4.1: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 10\%P_{max}$).

Στο Σήμα 4.2 παρουσιάζεται η περίπτωση που η ενεργός αιολική παραγωγή κάθε πάρκου είναι το 40 % της μέγιστης. Αυτό που παρατηρείται είναι μείωση της αρχικής κατανάλωσης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά οφείλεται στην αλλαγή κατεύθυνσης των ρευμάτων εξαιτίας της αύξησης της εγχεόμενης ενεργού ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται και αύξηση των άεργων απωλειών και επομένως μείωση της αέργου ισχύος που ρέει προς τον άπειρο ζυγό. Παρ' όλα αυτά οι διαφορές είναι μικρές και δεν παρατηρείται ουσιαστική μείωση απορρόφησης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό στο τέλος της προσομοίωσης.

Τέλος, εξετάζεται η περίπτωση για 90 % της μέγιστης ενεργού αιολικής παραγωγής κάθε αιολικού πάρκου. Σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρείται ότι στην αρχική κατάσταση επιτυγχάνεται αντιστροφή της ροής αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα, ο άπειρος ζυγός πλέον παρέχει άεργο ισχύ στο σύστημα. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η χρονική εξέλιξη της παραγωγής αέργου ισχύος του άπειρου ζυγού όταν μεταφέρεται η νεκρή ζώνη των ΣΑΤΥΦ προκειμένου να αυξήσουν τις τάσεις στους ζυγούς υπομεταφοράς του υποσταθμού ALPHA. Παρατηρείται ότι η αρχική από την τελική κατάσταση έχουν πολύ μικρή διαφορά και ως εκ τούτου το περιθώριο εισαγωγής αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό είναι πολύ μικρό.



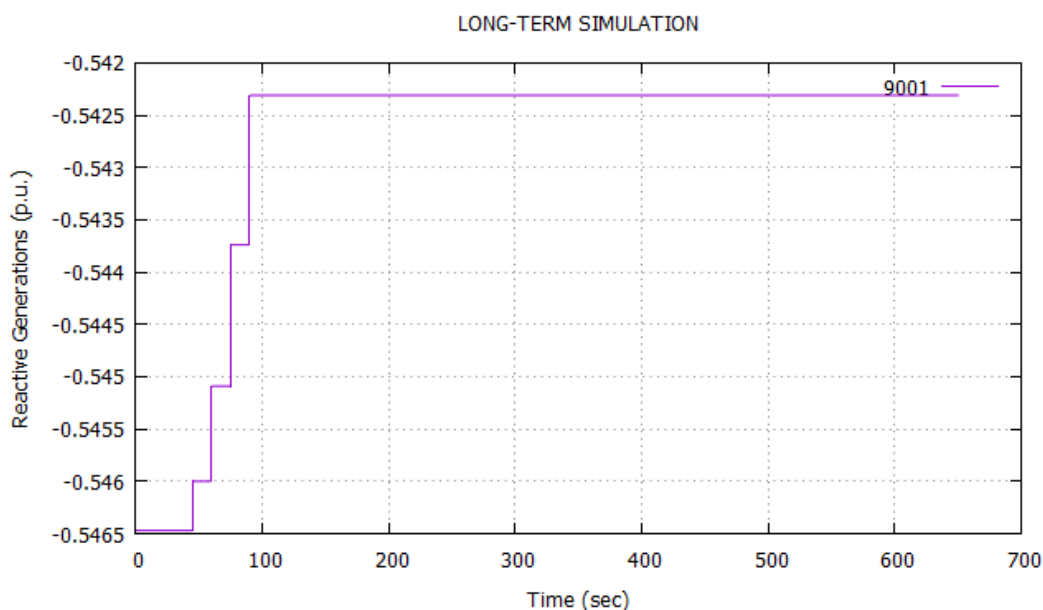
Σχήμα 4.2: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 40\%P_{max}$).



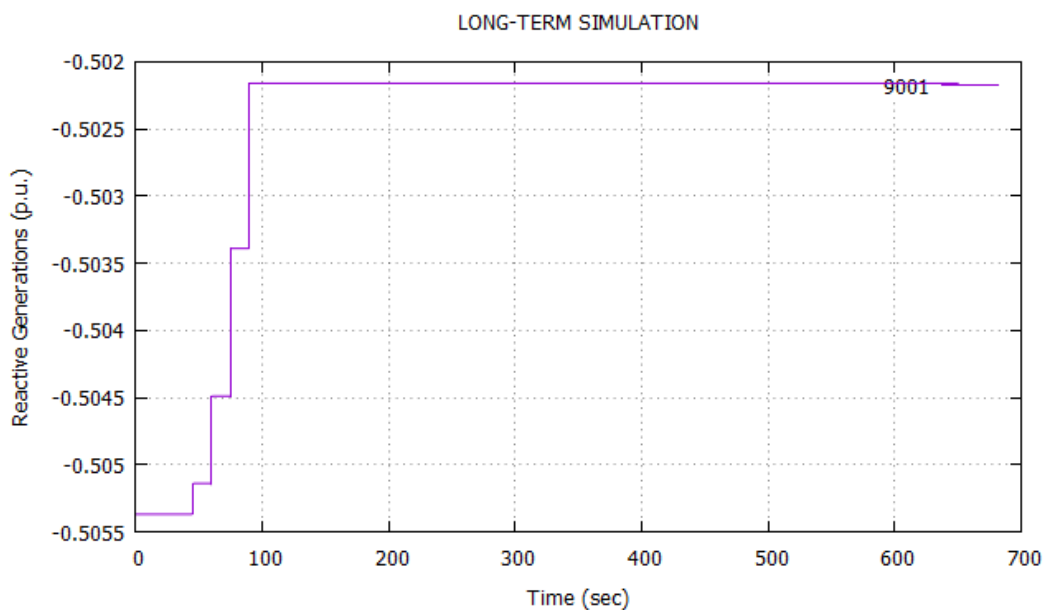
Σχήμα 4.3: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 90\%P_{max}$).

4.1.2 ΔΔΖ ανοιχτοί

Για λόγους πληρότητας, θα γίνει η προσομοίωση και για την περίπτωση που οι διασυνδεδεμένοι διακόπτες ζυγών της υπομεταφοράς είναι ανοιχτοί και πλέον διαχωρίζονται οι ζυγοί 10010-10011, 20010-20011 και 30010-30011.



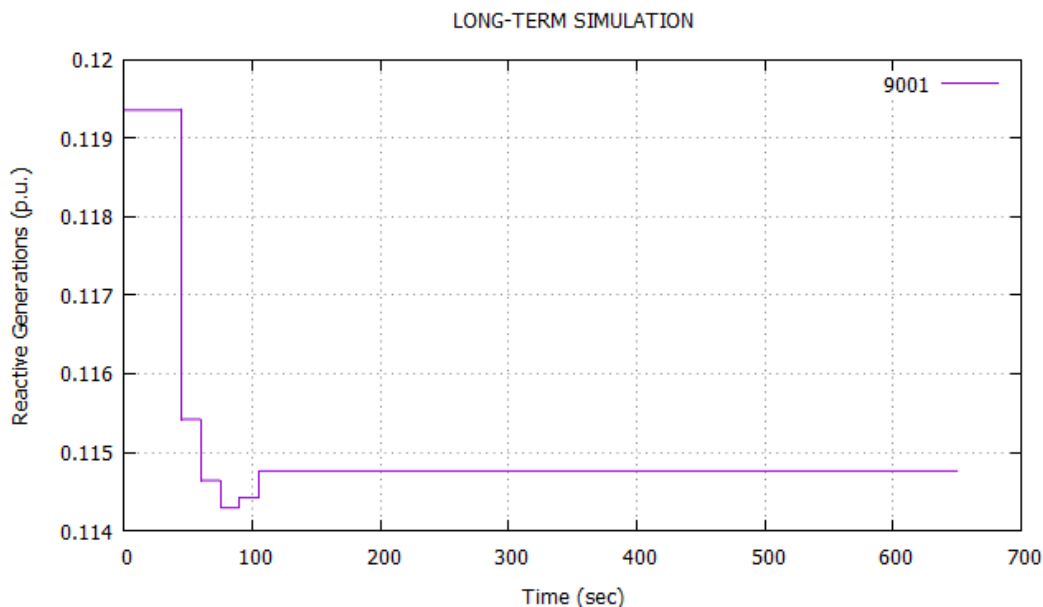
Σχήμα 4.4: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 10\%P_{max}$).



Σχήμα 4.5: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 40\%P_{max}$).

Στα Σχήματα 4.4- 4.5 παρουσιάζεται η συμπεριφορά του συστήματος με ανοιχτούς τους διασυνδεδεικούς διακόπτες. Παρατηρείται ότι στις δυο πρώτες περιπτώσεις (10 % και 40%) το άνοιγμα των διασυνδεδεικτών διακοπών έχει αποτέλεσμα τη μείωση της απορροφώμενης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό αλλά η συγκεκριμένη μείωση είναι πρακτικά πολύ μικρή. Αντίθετα, στο Σχήμα 4.6 παρατηρείται ότι από τη μια στην αρχική κατάσταση (πριν την αύξηση της τάσης αναφοράς) αυξήθηκε η παροχή αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό αλλά παρ' όλα αυτά στο τέλος της προ-

σομοίωσης (μετά την αύξηση της τάσης αναφοράς) παρατηρείται μείωση της εισαγωγής αέργου ισχύος.



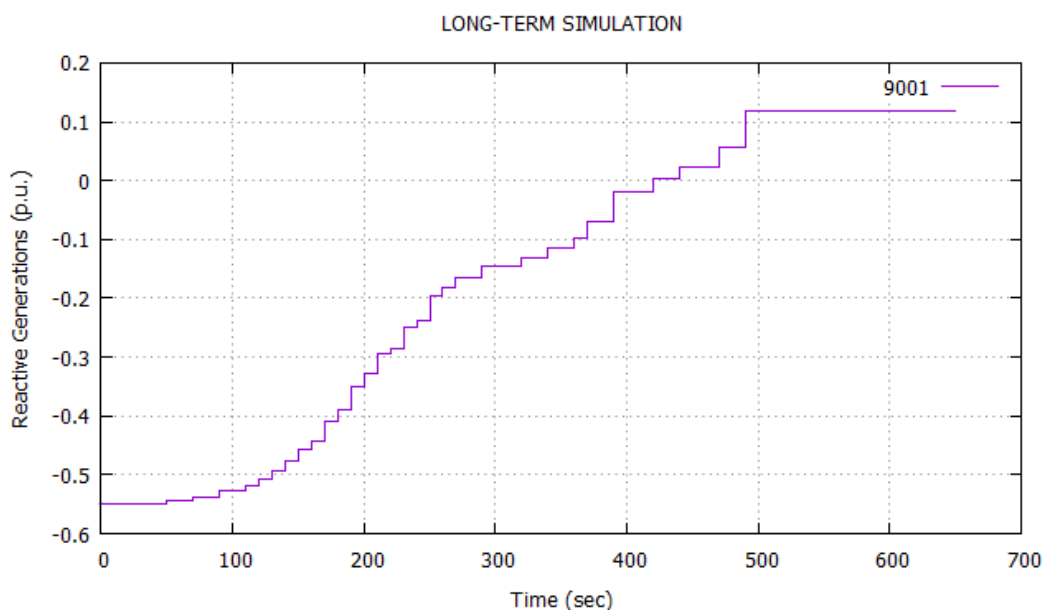
Σχήμα 4.6: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-ανοιχτοί $\Delta\Delta Z$ ($P_{WF} = 90\%P_{max}$).

Τελικά, εξάγεται ότι όπως και στο Κεφάλαιο 3, το άνοιγμα των διασυνδετικών διακοπών ζυγών συμβάλλει θετικά στην κατανάλωση αέργου ισχύος από το δοκιμαστικό δίκτυο για χαμηλές τιμές της μέγιστης ενεργού ισχύος κάθε Α/Π (10 % και 40%). Αντίθετα, για υψηλές τιμές (90 %) η κατανάλωση μειώνεται. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται και στα σχήματα, οι διαφορές αρχικών και τελικών τιμών είναι μικρές γεγονός που επιτρέπει να συναχθεί πως η επίδραση του ανοίγματος των διασυνδετικών διακοπών ζυγών δεν συνεισφέρει δραστικά στην αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος.

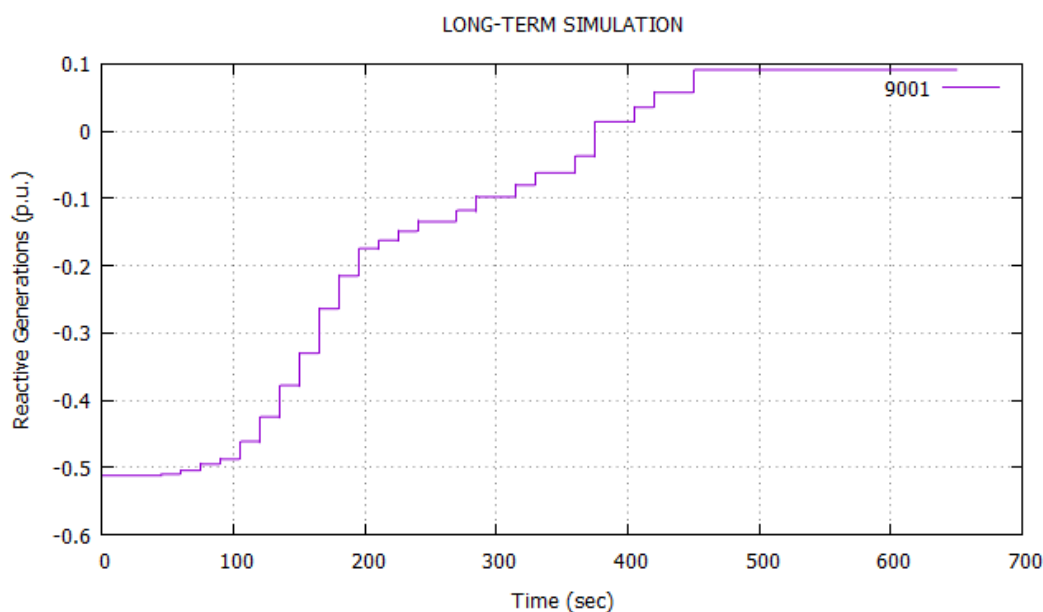
4.1.3 Κυκλοφορούσα άεργος ισχύς σε όλους τους υποσταθμούς

Σε αυτήν την ενότητα, η διαταραχή που εισάγεται είναι η ίδια με αυτή του Κεφαλαίου 3, δηλαδή η ρύθμιση των νεκρών ζωνών των ΣΑΤΥΦ σε όλους τους υποσταθμούς έτσι ώστε παράλληλα με την αύξηση της τάσης να δημιουργηθεί κυκλοφορούσα άεργος ισχύς στους βρόχους των παράλληλων μετασχηματιστών.

Παρατηρείται ότι σε αυτήν την περίπτωση εξαιτίας της τοπικής κατανάλωσης αέργου ισχύος λόγω των κυκλοφορούντων επαγωγικών ρευμάτων (βλ. Κεφάλαιο 3), ο άπειρος ζυγός μεταβαίνει από κατάσταση απορρόφησης (αρχική ροή φορτίου) σε κατάσταση παροχής αέργου ισχύος (τέλος προσομοίωσης). Αυτό συμβαίνει και στις τρεις περιπτώσεις σταθερής αιολικής παραγωγής που μελετήθηκαν όπως φαίνεται και στα Σχήματα 4.7-4.9. Αξίζει να σημειωθεί ότι η τελευταία περίπτωση σταθερής αιολικής παραγωγής ($P_{WF} = 90\%P_{max}$) αυξάνει περαιτέρω την παροχή αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό φτάνοντας κατά μέγιστο τα 75 MVAi κατανάλωση.

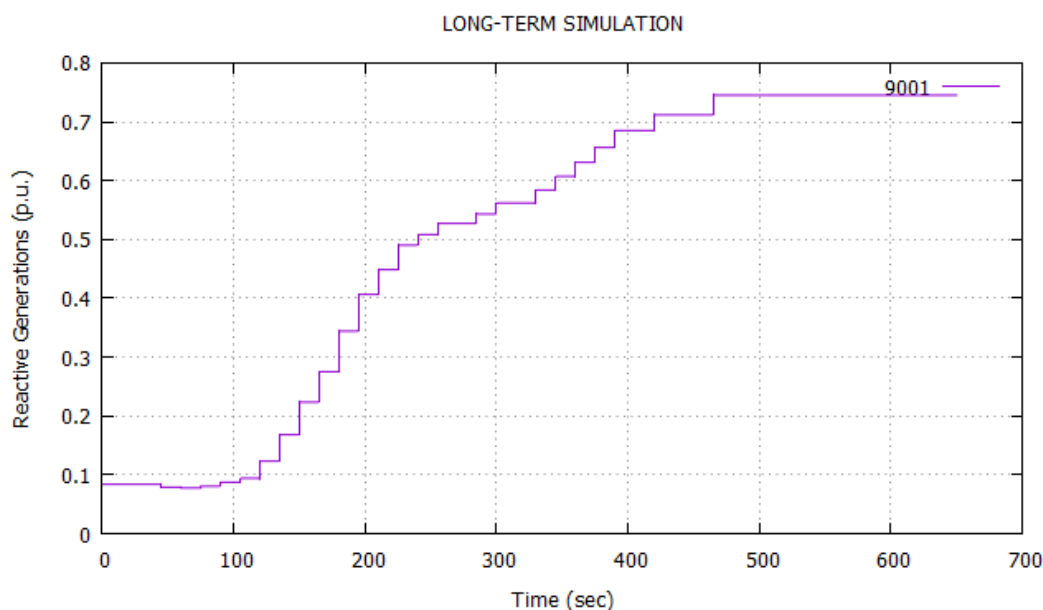


Σχήμα 4.7: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 10\%P_{max}$).



Σχήμα 4.8: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 40\%P_{max}$).

Συμπερασματικά, μελετώντας τα δυο αυτά ακραία σενάρια έγινε εμφανές ότι η λειτουργία των αιολικών πάρκων με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος δεν αυξάνει δραστικά την απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο και επομένως δεν επιτυγχάνει μεγάλη εισαγωγή αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό. Όπως γίνεται εμφανές, ανακύπτει η ανάγκη για εφαρμογή πιο αποτελεσματικών μεθόδων που θα προκαλέσουν μεγαλύτερη απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο υπομεταφοράς.



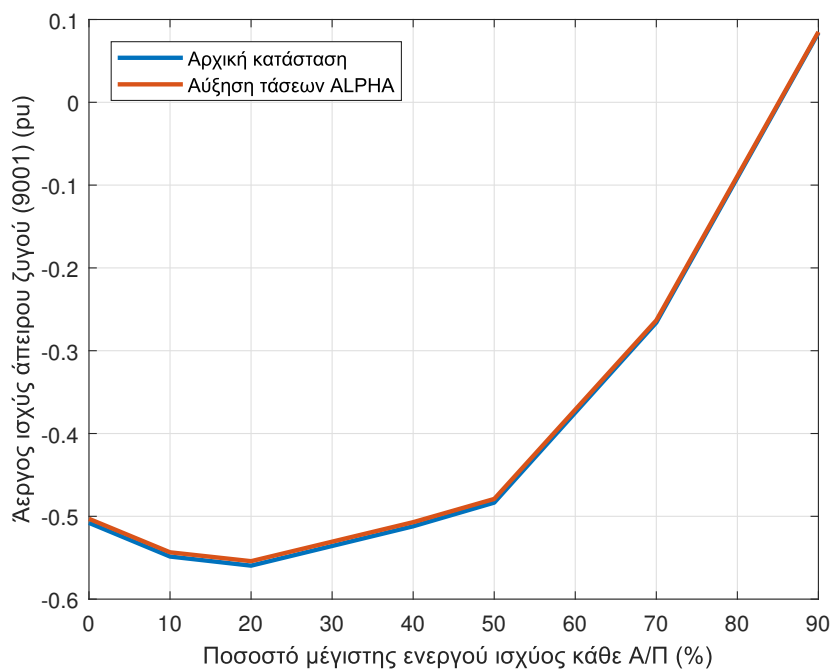
Σχήμα 4.9: Άεργος Ισχύος άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 90\%P_{max}$).

4.1.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

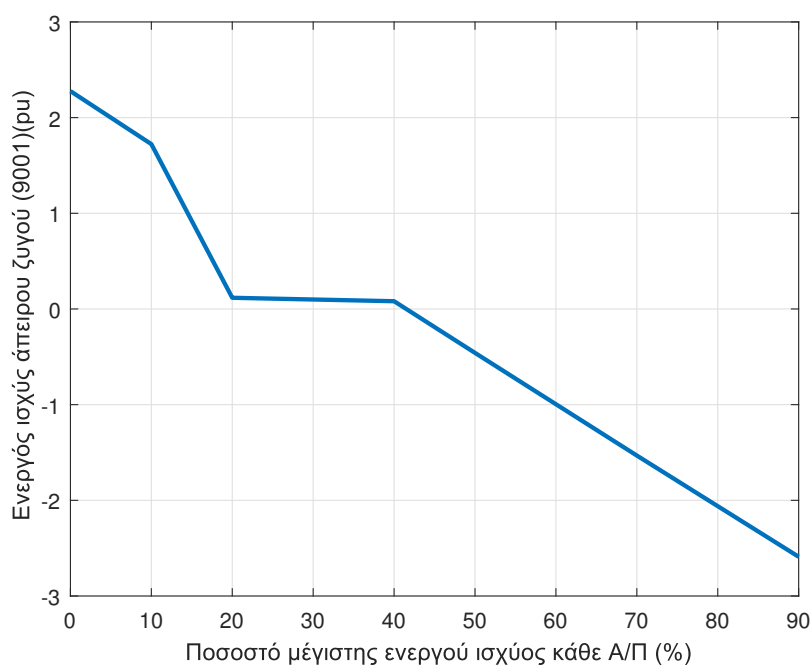
Σε αυτήν την υποενότητα παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που αφορούν στην άεργο ισχύ του άπειρου ζυγού ως συνάρτηση του επιπέδου ενεργού παραγωγής των αιολικών πάρκων. Στα Σχήματα 4.10 και 4.12 φαίνονται οι τιμές της άεργου ισχύος του άπειρου ζυγού συναρτήσει της ενεργού ισχύος των αιολικών σε κάθε περίπτωση που προσομοιώθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Για να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά της άεργου ισχύος, προσομοιώθηκαν οι περιπτώσεις του 20 %, 50 % και 70 % της μέγιστης ισχύος των αιολικών έτσι ώστε τα αποτελέσματά τους να συμπεριληφθούν στις γραφικές παραστάσεις.

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται η άεργος ισχύς του άπειρου ζυγού όταν τα αιολικά πάρκα λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η αύξηση της τάσης υπομεταφοράς των ζυγών στον υποσταθμό ALPHA. Εδώ, γίνεται εμφανές πως η αρχική (πριν την αύξηση της τάσης) με την τελική κατάσταση (μετά την αύξηση της τάσης) διαφέρουν ελάχιστα όπως παρατηρήθηκε και στην ενότητα με την αναλυτική παρουσίαση των προσομοιώσεων. Αξίζει να σχολιασθεί ότι από το 0 % μέχρι το 20 % της μέγιστης ενεργού αιολικής παραγωγής κάθε πάρκου, η άεργος ισχύς που καταναλώνει ο άπειρος ζυγός παρουσιάζει μια μικρή αύξηση. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε προηγουμένως στο επίπεδο του 10 % σε σχέση με την περίπτωση της μηδενικής παραγωγής, αλλά εδώ φαίνεται ότι στην περίπτωση του 20 % υπάρχει περαιτέρω αύξηση της κατανάλωσης άεργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό.

Η αιτιολόγηση αυτής της συμπεριφοράς γίνεται μέσω των ρευμάτων που ρέουν στις γραμμές του δοκιμαστικού δικτύου. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και πριν, η τοπική παραγωγή αντισταθμίζει την ενεργό ζήτηση των φορτίων με αποτέλεσμα ο άπειρος ζυγός να παρέχει λιγότερη ενεργό ισχύ και τελικά να μειώνονται τα ρεύματα στις διασυνδετικές γραμμές ΥΤΤ. Η μείωση



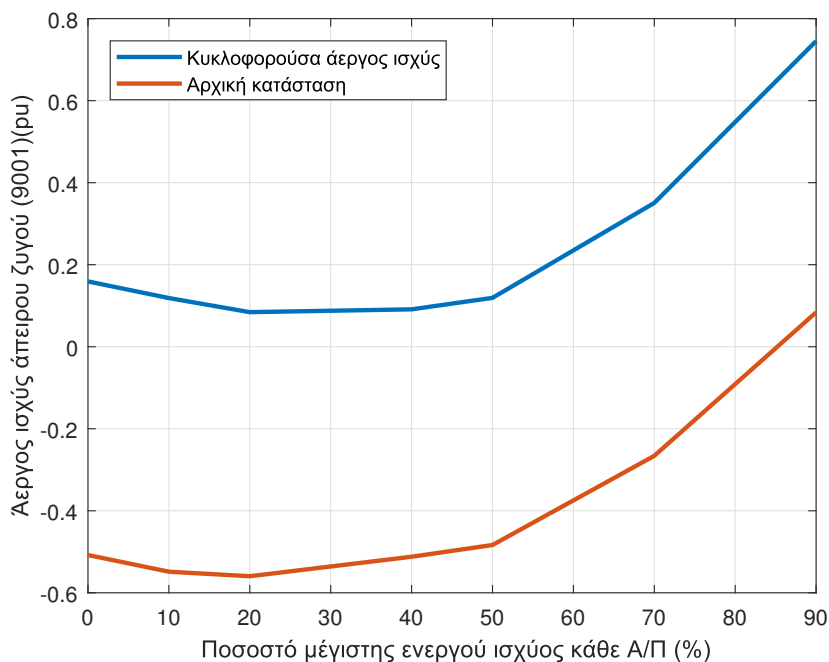
Σχήμα 4.10: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς Α/Π.



Σχήμα 4.11: Ενεργός Ισχύς άπειρου ζυγού.

των συνολικών ρευμάτων επιφέρει μείωση και των άεργων απωλειών της μορφής I^2X και επομένως η επιπλέον άεργος ισχύς που δεν καταναλώνεται στις επαγωγικές αντιδράσεις των γραμμών,

καταναλώνεται από τον άπειρο ζυγό. Όταν η ενεργός παραγωγή αυξάνεται πέραν του 20 % της μέγιστης για κάθε A/Π, το δίκτυο πλέον εξάγει ενεργό ισχύ προς τον άπειρο ζυγό όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.11 με αποτέλεσμα την αλλαγή κατεύθυνσης των ρευμάτων και επομένως αύξησης των αέργων απωλειών. Τελικά, μετά το 20 % παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης αέργου ισχύος από τον άπειρο ζυγό μέχρι το 90 % που πλέον ο άπειρος ζυγός πλέον παρέχει αέργο ισχύ στο δοκιμαστικό δίκτυο.



Σχήμα 4.12: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς A/Π.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται η αντίστοιχη γραφική παράσταση για τη μέθοδο της κυκλοφορούσας αέργου ισχύος και στους τρεις υποσταθμούς. Εδώ παρατηρείται ότι με τη δημιουργία κυκλοφορούντων επαγωγικών ρευμάτων επιτεύχθηκε η τοπική κατανάλωση αέργου ισχύος από το σύστημα σε μεγάλο βαθμό και επομένως η διαφορά αρχικής και τελικής κατάστασης όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.12 είναι μεγαλύτερη. Η μέγιστη απορρόφηση σε αυτήν την περίπτωση επιτυγχάνεται στο 90 % της αιολικής παραγωγής και ανέρχεται περίπου σε 75 MVA_r τα οποία παρέχονται από τον άπειρο ζυγό.

4.2 Απορρόφηση αέργου ισχύος από μετατροπείς A/Π

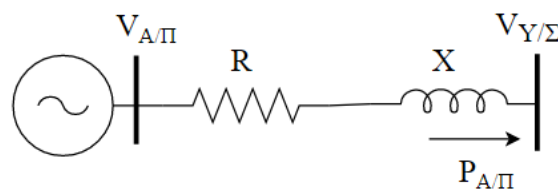
Σε αυτή την ενότητα θα προσομοιωθούν οι δύο μέθοδοι του Κεφαλαίου 3 αξιοποιώντας τη δυνατότητα των μετατροπέων των αιολικών πάρκων να παράγουν και να απορροφούν αέργο ισχύ, δηλαδή να ελέγχουν την τερματική τους τάση. Αυτή η δυνατότητα είναι μια τυπική λειτουργία τόσο των ασύγχρονων γεννητριών διπλής τροφοδότησης (DFIG) όσο και των γεννητριών με πλήρη μετατροπέα (Full Converter).

4.2.1 Εισαγωγή γραμμής A/Π

Για να προσομοιωθεί η συνεισφορά των γεννητριών με μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος στην επιπλέον απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο υπομεταφοράς, χρειάστηκε να γίνει μια τροποποίηση στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε μέχρι στιγμής. Όπως φαίνεται στο μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 2.1, υπάρχει από ένα αιολικό πάρκο στους ζυγούς BETA41, BETA42, GAMMA41, GAMMA42. Όταν οι διασυνδεδεικτοί διακόπτες των ζυγών των υποσταθμού BETA και GAMMA αντίστοιχα είναι κλειστοί, δεν μπορεί να γίνει ρύθμιση της τάσης του ίδιου ζυγού από δύο γεννήτριες. Επομένως, με σκοπό να ξεπεραστεί το πρόβλημα προστίθεται ένας επιπλέον ζυγός για κάθε αιολικό πάρκο (PV ζυγός). Ο εσωτερικός ζυγός του αιολικού πάρκου τώρα συνδέεται με τον υποσταθμό BETA ή GAMMA με μια γραμμή ωμικής αντίστασης 2% και επαγωγικής αντίδρασης 4% στη βάση ισχύος του A/Π. Ο Πίνακας 4.1 δίνει αυτά τα στοιχεία. Τα υπόλοιπα αιολικά πάρκα (DELTA, EPSILON, ETA, THETA) δεν υφίστανται καμία τροποποίηση και παραμένουν όπως στο Σχήμα 2.1.

Πίνακας 4.1: Στοιχεία διασυνδεδεικτών γραμμών A/Π

Ζυγός αναχώρησης (A/Π)	Ζυγός Άφιξης	Σύνθετη αντίσταση γραμμής ($R + jX$)
80010	20010	$0.025 + j0.05$
80011	20011	$0.04 + j0.08$
90010	30010	$0.031 + j0.062$
90011	30011	$0.05 + j0.1$



Σχήμα 4.13: Διασυνδεδεικτική γραμμή A/Π-ζυγού υπομεταφοράς.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα δεδομένα των ισοδύναμων γεννητριών. Σε όλα τα σενάρια που θα εξεταστούν στη συνέχεια θεωρείται ότι όλοι οι μετατροπείς είναι εξοπλισμένοι με περιοριστές ρεύματος για την προστασία των ισοδύναμων γεννητριών των A/Π. Το μέγιστο ρεύμα για κάθε αιολικό πάρκο λαμβάνεται από την εξίσωση 4.1 με S_n, V_n την ονομαστική φαινόμενη ισχύ της κάθε γεννήτριας και την ονομαστική τάση αντίστοιχα. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα όρια ρεύματος κάθε μετατροπέα ανηγμένα στη βάση του συστήματος $S_b = 100MVA$. Τέλος, η προσομοίωση γίνεται με ρύθμιση σταθερής τάσης στις τιμές του Πίνακα 4.2 για το ζυγό κάθε αιολικού πάρκου (PV ζυγός).

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (4.1)$$

Στις περιπτώσεις που το όριο ρεύματος συναντάται κατά την προσομοίωση, τότε το A/Π χάνει τη δυνατότητα ελέγχου της τερματικής του τάσης και λειτουργεί υπό οριακό ρεύμα και σταθερή ενεργό ισχύ. Η τάση πλέον ανεβαίνει και με αυτόν τον τρόπο περιορίζει την αέργο ισχύ που απορροφά ο μετατροπέας του A/Π.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η προσομοίωση θα διεξαχθεί με ρύθμιση σταθερής τάσης στους ζυγούς των αιολικών πάρκων. Οι τιμές της τάσης αναφοράς του Πίνακα 4.2 αντιστοιχούν σε αυτές της ροής φορτίου του Κεφαλαίου 3 όταν έχει μηδενιστεί η ενεργός και η άεργος παραγωγή από τα A/Π. Επιπλέον, τα επίπεδα ενεργού παραγωγής που θα προσομοιωθούν αναφέρονται στο ποσό της ενεργού ισχύος που εγγέεται στο ζυγό του υποσταθμού (ζυγός υπομεταφοράς-ΥΤ) όπως γίνεται εμφανές στο Σχήμα 4.13.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία A/Π

Ζυγός A/Π	Όνομα A/Π	Τάση Ζυγού ($V_{ref}(pu)$)	$S_n(MVA)$
80010	WF BETA 1	1.06957	80
80011	WF BETA 2	1.06957	50
90010	WF GAMMA 1	1.05960	65
90011	WF GAMMA 2	1.05960	40
40010	WF DELTA	1.06569	150
50010	WF EPSILON	1.06974	75
60010	WF ETA	1.06433	110
70010	WF THETA	1.05971	88

Πίνακας 4.3: Όρια ρεύματος μετατροπέων

Ζυγός A/Π	Όνομα A/Π	Όριο ρεύματος ($I_{lim}(pu)$)
80010	WF BETA 1	0.8
80011	WF BETA 2	0.5
90010	WF GAMMA 1	0.65
90011	WF GAMMA 2	0.4
40010	WF DELTA	1.5
50010	WF EPSILON	0.75
60010	WF ETA	1.1
70010	WF THETA	0.88

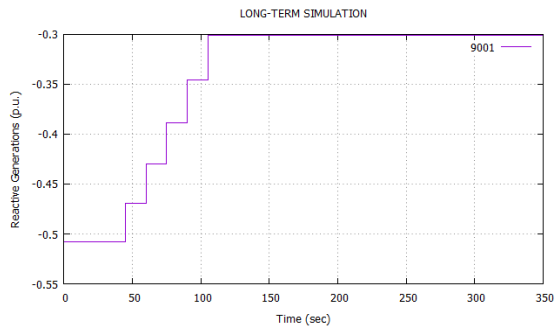
4.2.2 Αύξηση τάσης αναφοράς

Η μέθοδος της αύξησης τάσης αναφοράς, όπως έχει ήδη γίνει σαφές στο Κεφάλαιο 3, αφορά στην αύξηση των τάσεων στους ζυγούς υπομεταφοράς σε έναν υποσταθμό κάθε φορά ή σε όλους τους υποσταθμούς ταυτόχρονα. Η διαταραχή που εισάγεται για τη μακροπρόθεσμη προσομοίωση είναι η μεταφορά της νεκρής ζώνης των ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών στους υποσταθμούς στο διάστημα [1.09,1.11]. Αν και το άνω όριο της νεκρής ζώνης είναι το 1.11 και άρα εκτός αποδεκτού ορίου για την τιμή της τάσης, οι τάσεις των ζυγών στην προσομοίωση δεν ξεπερνούν σε καμία περίπτωση το μέγιστο όριο του 1.1 αμ. Σε αυτήν την περίπτωση θα αποτιμηθεί η συνεισφορά των μετατροπέων των αιολικών στην επιπλέον απορρόφηση αέργου ισχύος.

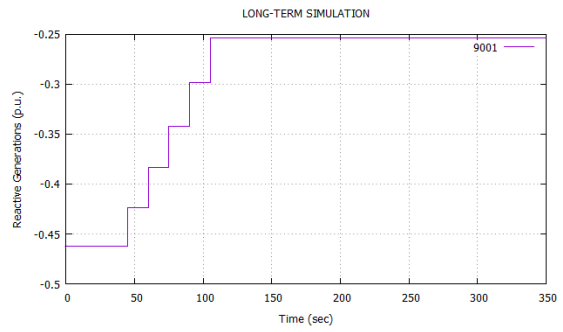
Εφαρμογή στον υποσταθμό ALPHA

Με κλειστούς τους διασυνδεδεικμένους διακόπτες των ζυγών της υπομεταφοράς, η διαταραχή που προσομοιώνεται είναι η αύξηση της τάσης αναφοράς στους ζυγούς του υποσταθμού ALPHA για τέσσερα επίπεδα ενεργού παραγωγής των αιολικών πάρκων ανάλογα με την περίπτωση του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος. Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται η άεργος ισχύς του άπειρου ζυγού σε όλα τα επίπεδα ενεργού παραγωγής από τα αιολικά πάρκα. Παρατηρείται ότι για μηδενική ενεργό παραγωγή το αρχικό σημείο λειτουργίας (πριν την αύξηση της τάσης αναφοράς) συμπίπτει με αυτό του Κεφαλαίου 3, δηλαδή ο άπειρος ζυγός απορροφά 50.79 MVA_r. Δεδομένου ότι οι τάσεις στους ζυγούς των αιολικών πάρκων ορίστηκαν ίδιες με αυτές που προέκυψαν για μηδενική ενεργό και άεργο παραγωγή (Κεφάλαιο 3), στο αρχικό σημείο λειτουργίας προέκυψε μηδενική η άεργος παραγωγή όλων των Α/Π (Σχήμα 4.15α') και επομένως ίδια τιμή για την άεργο ισχύ του άπειρου ζυγού.

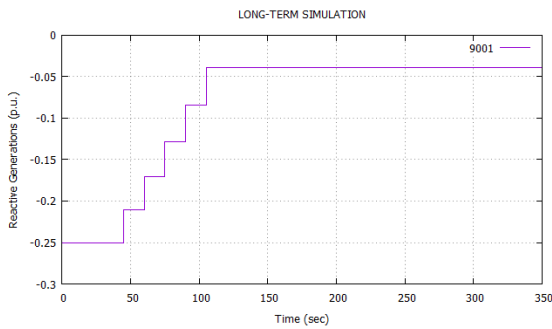
Στο Σχήμα 4.15 γίνεται εμφανής η συνεισφορά των αιολικών πάρκων στην απορρόφηση αέργου ισχύος. Όπως αναφέρθηκε και πριν, στο αρχικό σημείο λειτουργίας πριν την αύξηση της τάσης αναφοράς στους ζυγούς του υποσταθμού ALPHA, τα Α/Π έχουν μηδενική άεργο ισχύ ενώ όταν εφαρμόζεται η αύξηση τάσης αναφοράς στον υποσταθμό ALPHA παρατηρείται ότι το Α/Π στο ζυγό 40010 (WF DELTA1) αρχίζει να απορροφά άεργο ισχύ προκειμένου να διατηρηθεί σταθερή η τάση στον ζυγό του. Στη μόνιμη κατάσταση απορροφά περίπου 0.25 pu ή 25 MVA_r. Τα υπόλοιπα Α/Π αποκρίνονται στην αύξηση τάσης παράγοντας ποσά αέργου ισχύος της τάξης του 0.008 pu.



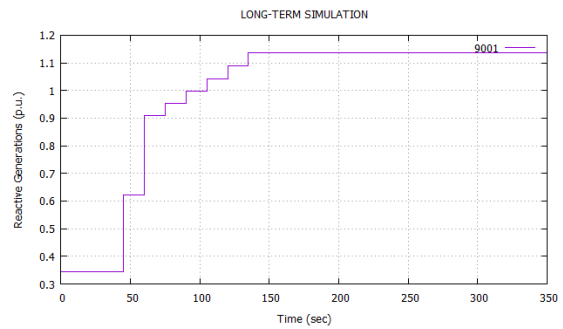
(α') $P_{WF} = 0$



(β') $P_{WF} = 10\%$

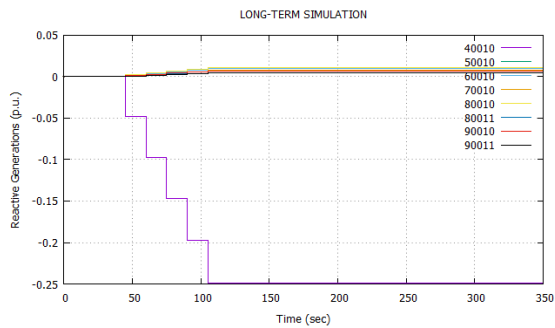


(γ') $P_{WF} = 40\%$

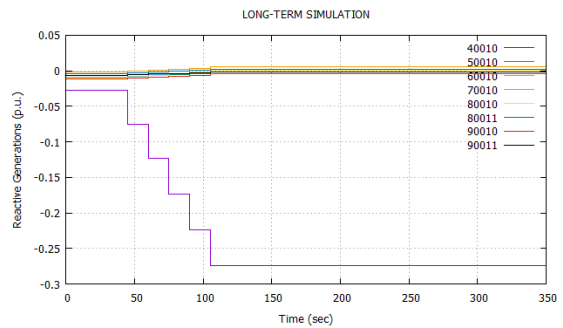


(δ') $P_{WF} = 90\%$

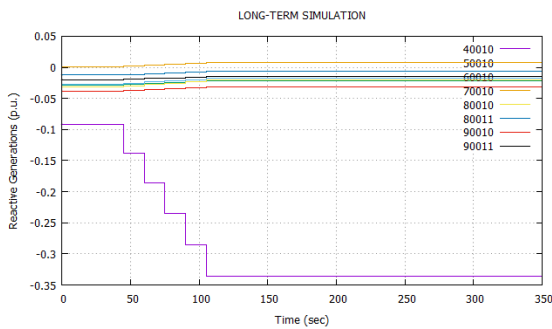
Σχήμα 4.14: Άεργος Ισχύος άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ ALPHA



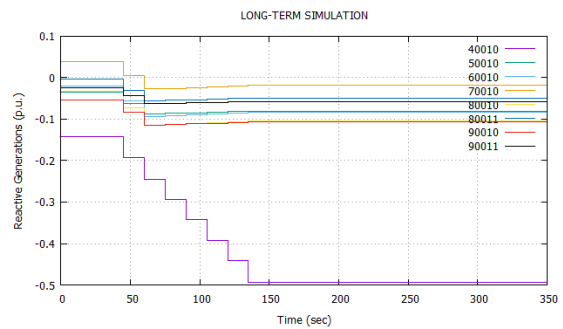
(α') $P_{WF} = 0$



(β') $P_{WF} = 10\%$



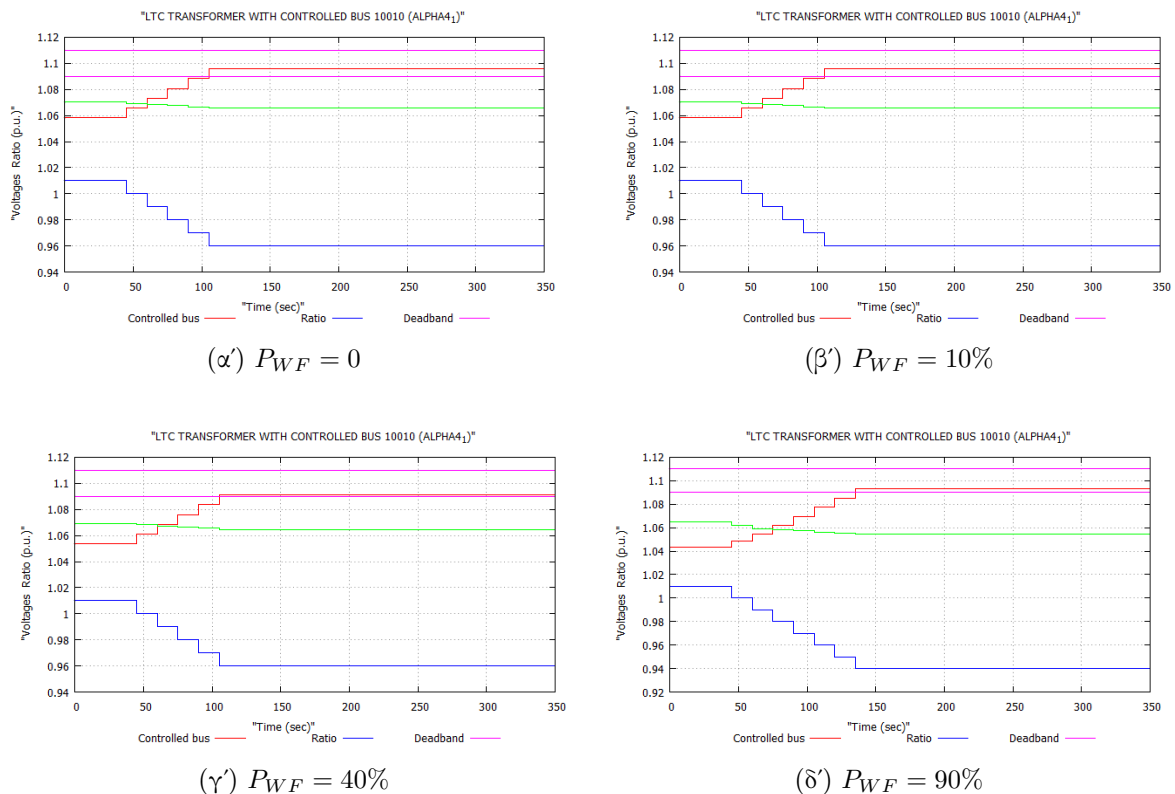
(γ') $P_{WF} = 40\%$



(δ') $P_{WF} = 90\%$

Σχήμα 4.15: Άεργος Ισχύος A/II-Αύξηση τάσης Υ/Σ ALPHA

Από τα Σχήματα 4.14-4.15 γίνεται εμφανές ότι όσο αυξάνεται το επίπεδο της αιολικής διεύθυνσης τόσο αυξάνεται και η απορρόφηση αέργου ισχύος από τα Α/Π στο αρχικό σημείο λειτουργίας, δηλαδή πριν από την αύξηση των τάσεων υπομεταφοράς του υποσταθμού ALPHA. Με την εισαγωγή της αύξησης της τάσης αναφοράς και τη διεξαγωγή της προσομοίωσης παρατηρείται πως κάποια πάγκα αποκρίνονται απορροφώντας αέργο ισχύ και άλλα παράγοντας αέργο ισχύ προκειμένου να διατηρηθεί η τάση των PV ζυγών σταθερή. Για το συγκεκριμένο σενάριο το Α/Π WF DELTA 1 είναι αυτό που έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην απορρόφηση αέργου ισχύος καθώς είναι ακτινικά συνδεδεμένο με τον υποσταθμό ALPHA όπου εφαρμόζεται η αύξηση της τάσης. Η ευνοϊκότερη κατάσταση επιτυγχάνεται στο 90 % της μέγιστης παραγωγής των Α/Π που αντιστοιχεί σε παροχή περίπου 1.1 pu ή 110 MVA_r από τον άπειρο ζυγό όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.14δ'.



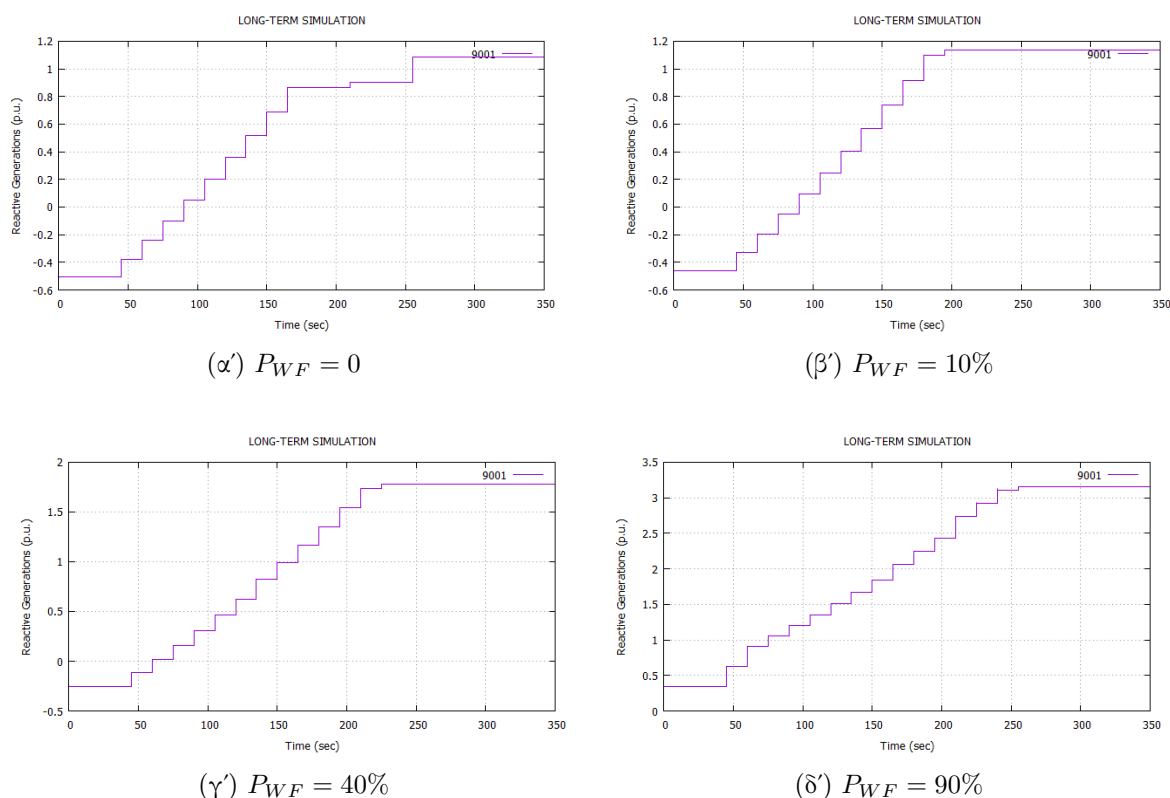
Σχήμα 4.16: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 10010

Τέλος, στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζεται η τάση, η νεκρή ζώνη και ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ελεγχόμενου ζυγού στον υποσταθμό ALPHA για όλες τις περιπτώσεις αιολικής παραγωγής.

Εφαρμογή στον υποσταθμό BETA

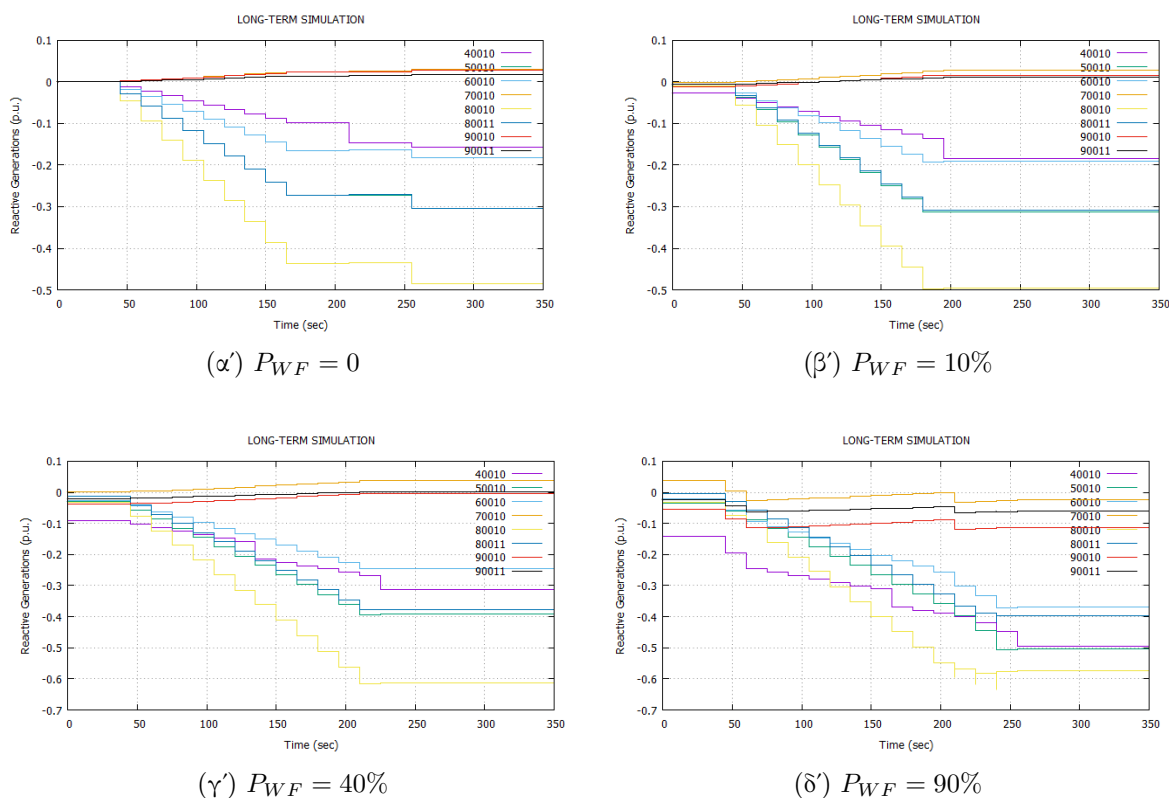
Στον υποσταθμό BETA εφαρμόζεται η ίδια διαταραχή, δηλαδή μεταφέρεται η νεκρή ζώνη των ΣΑΤΥΦ των δυο παράλληλων μετασχηματιστών του υποσταθμού στο διάστημα [1.09,1.11]

προκειμένου να αυξηθεί η τάση στους ζυγούς του. Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, τα δυο A/Π στου υποσταθμού BETA έχουν πλέον ξεχωριστούς ζυγούς των οποίων η τάση διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στο Σχήμα 4.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την αέργο ισχύ του άπειρου ζυγού σε κάθε επίπεδο παραγωγής από τα αιολικά πάρκα. Σε αυτήν την περίπτωση παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στην αρχική με την τελική κατάσταση σε σχέση με την προσομοίωση για την περιοχή ALPHA, οι οποίες καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή της μεθόδου στον συγκεκριμένο υποσταθμό επιφέρει δραστηκότερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.17: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ BETA

Στο Σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η συμβολή κάθε αιολικού πάρκου στην απορρόφηση αέργου ισχύος για το σενάριο της αύξησης τάσης αναφοράς στον υποσταθμό BETA. Όπως είναι αναμενόμενο τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην απορρόφηση αέργου ισχύος για μηδενική και χαμηλή αιολική διείσδυση έχουν τα A/Π που είναι συνδεδεμένα στους ζυγούς 80010 και 80011 δηλαδή τα αιολικά πάρκα BETA 1 και BETA 2 (βλ Πίνακα 4.2). Όσο αυξάνεται το επίπεδο αιολικής παραγωγής στο σύστημα, παρατηρούνται όλο και περισσότερα αιολικά πάρκα να συνεισφέρουν στην αέργο κατανάλωση. Όπως φαίνεται στα Σχήμα 4.18 και ιδιαίτερα στα 4.18γ' και 4.18δ', αιολικά πάρκα όπως το EPSILON και το ETA συνεισφέρουν σημαντικά στην απορρόφηση αέργου ισχύος. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι για 90 % αιολική διείσδυση, ενεργοποιούνται οι περιοριστές ρεύματος στα A/Π BETA 1 και BETA 2 τις χρονικές στιγμές 210s και 225s της προσομοίωσης αντίστοιχα.

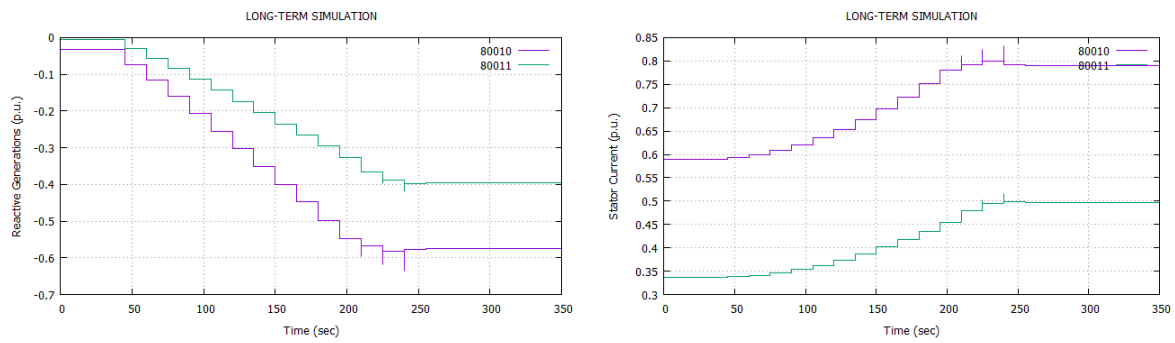


Σχήμα 4.18: Άεργος Ισχύς Α/Π-Αύξηση τάσης Υ/Σ ΒΕΤΑ

Προκειμένου να φανεί η λειτουργία του περιοριστή ρεύματος παρατίθεται το Σχήμα 4.19, στο οποίο φαίνεται η άεργος ισχύς των δυο αιολικών πάρκων στα οποία εμφανίστηκε όριο ρεύματος καθώς και η χρονική εξέλιξη των ρευμάτων τους. Στη χρονική στιγμή 210s ενεργοποιείται για πρώτη φορά ο περιοριστής ρεύματος του αιολικού πάρκου ΒΕΤΑ 1(ζυγός 80010) και επομένως περιορίζεται και η άεργος ισχύς που μπορεί να απορροφήσει. Στο συγκεκριμένο αιολικό πάρκο η διαδικασία περιορισμού ενεργοποιείται άλλες δυο φορές και τελικά το αιολικό πάρκο λειτουργεί σχεδόν υπό οριακό ρεύμα (0.8 pu). Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρείται και στο ΒΕΤΑ 2(80011) με τη διαφορά ότι εκεί ο περιοριστής ρεύματος ενεργοποιείται δυο φορές με την πρώτη φορά να είναι στα 225s.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, όταν συναντάται το όριο ρεύματος σε κάποιο αιολικό πάρκο, γίνεται αδύνατος ο έλεγχος της τάσης του ζυγού του και πλέον λειτουργεί υπό σταθερό ρεύμα (περίπου ίσο με το οριακό) και σταθερή ενεργό ισχύ. Πλέον, με τις νέες συνθήκες λειτουργίας, οι μέχρι πρότινος ελεγχόμενες τάσεις των ζυγών αυξάνονται προκειμένου να επιτευχθεί ο περιορισμός της αέργου ισχύος που απορροφάται από τα αιολικά πάρκα. Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των τάσεων στους ζυγούς των Α/Π (80010-80011). Όπως γίνεται εμφανές, η τάση του ζυγού 80010 αλλάζει τρεις φορές, διότι ο περιοριστής ρεύματος ενεργοποιείται τρεις φορές. Από την άλλη, η τάση του ζυγού 80011 αυξάνεται δύο φορές στις χρονικές στιγμές που ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος εκεί.

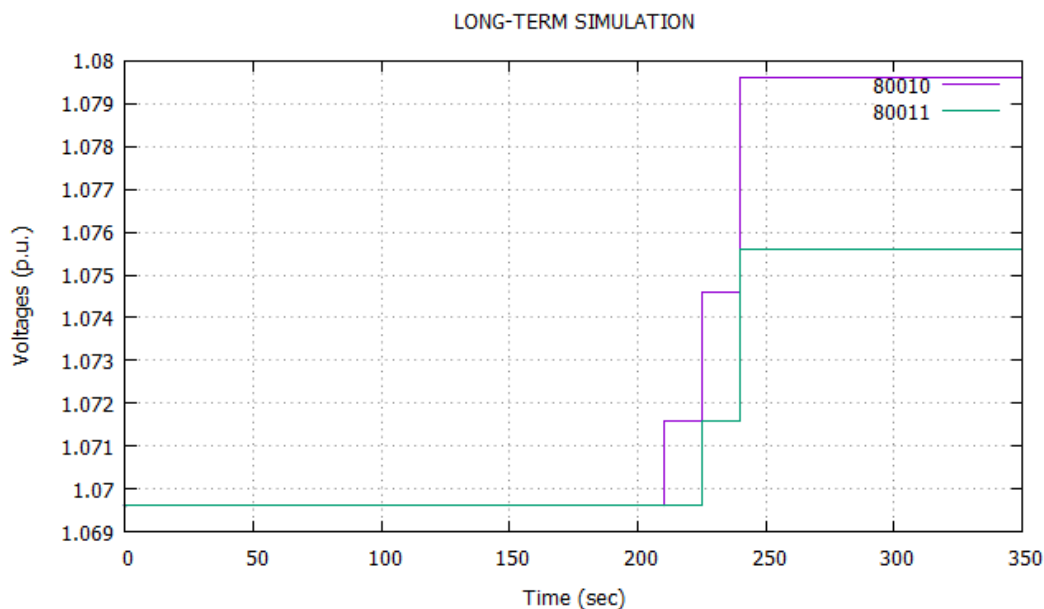
Ο περιορισμός της απορροφώμενης αέργου ισχύος γίνεται εμφανής και στο Σχήμα 4.17δ'



(α) Άεργος Ισχύς A/Π BETA 1 και BETA 2

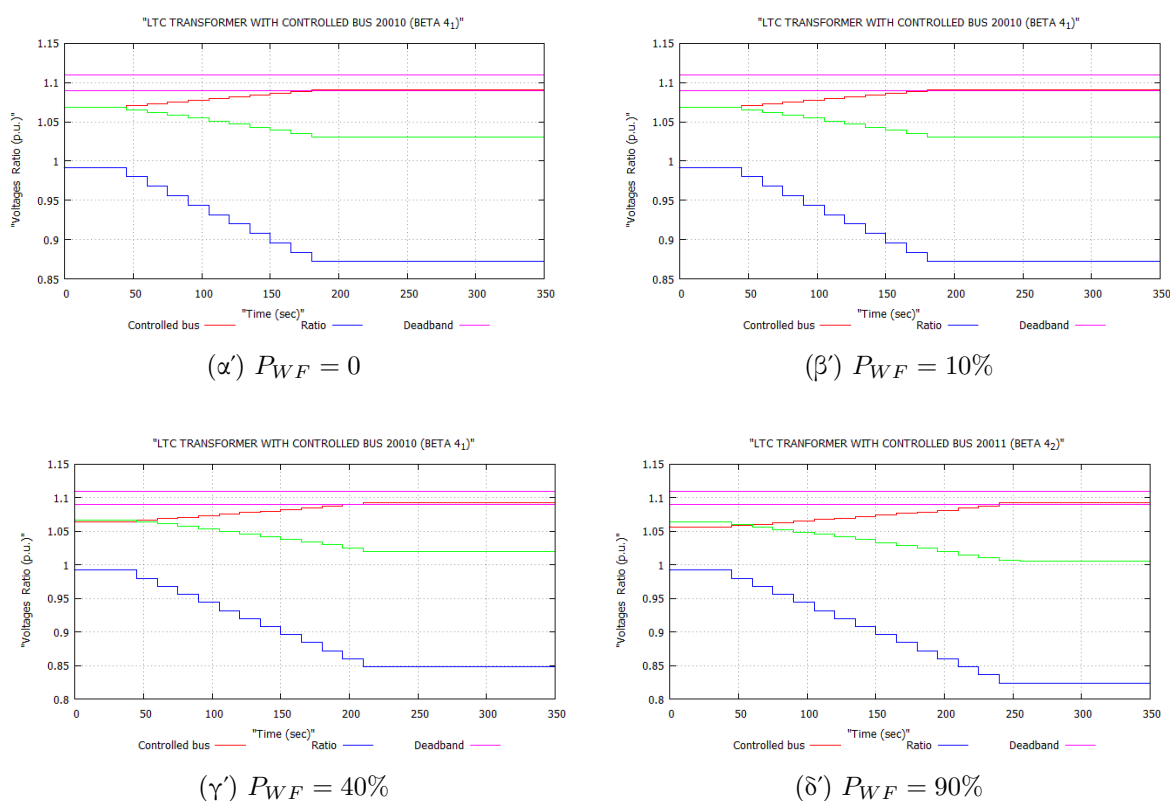
(β) Ρεύμα A/Π BETA 1 και BETA 2

Σχήμα 4.19: Άεργος Ισχύς και ρεύματα A/Π (90 % αιολική διείσδυση)



Σχήμα 4.20: Τάσεις A/Π BETA 1 και BETA 2 .

που είναι η άεργος ισχύς του άπειρου ζυγού. Εκεί παρατηρούνται κάποιες αιχμές στις χρονικές στιγμές ενεργοποίησης των περιοριστών ρεύματος οι οποίες καταδεικνύουν την επίδραση που έχει ο περιορισμός κατανάλωσης αέργου ισχύος από τις γεννήτριες στην άεργο ισχύ που παρέχει ο άπειρος ζυγός στο σύστημα. Επομένως, η μέγιστη άεργος ισχύς που παρέχει ο άπειρος ζυγός εμφανίζεται για το 90 % της αιολικής διείσδυσης και είναι περίπου 315 MVar, ποσό τριπλάσιο σε σχέση με την εφαρμογή της μεθόδου στον υποσταθμό ALPHA.



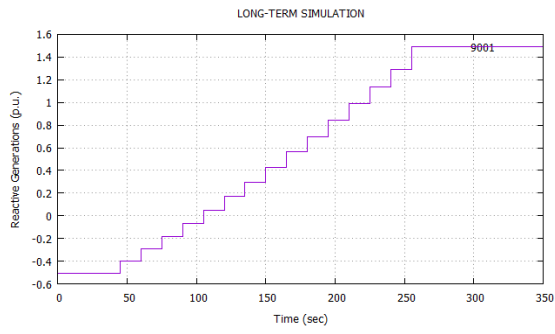
Σχήμα 4.21: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 20010

Τέλος, στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η τάση, η νεκρή ζώνη και ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ελεγχόμενου ζυγού 20010 για όλες τις περιπτώσεις αιολικής παραγωγής.

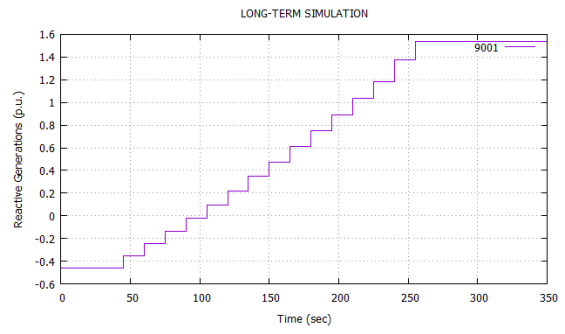
Εφαρμογή στον υποσταθμό GAMMA

Η ίδια μέθοδος εφαρμόζεται και για τον υποσταθμό GAMMA, προκαλώντας την κατανάλωση αέργου ισχύος μέσω της αύξησης των τάσεων στους ζυγούς του υποσταθμού. Το Σχήμα 4.22 απεικονίζει την χρονική εξέλιξη της αέργου ισχύος για όλες τις περιπτώσεις αιολικής διείδυσης που προσομοιώνονται. Στο 4.22δ' παρατηρείται ότι το μέγιστο ποσό αέργου ισχύος που παρέχει ο άπειρος ζυγός σε αυτή την περίπτωση είναι περίπου 300 MVA_r, ποσό μικρότερο από την περίπτωση που η κατανάλωση αέργου ισχύος προκαλείται στον υποσταθμό BETA.

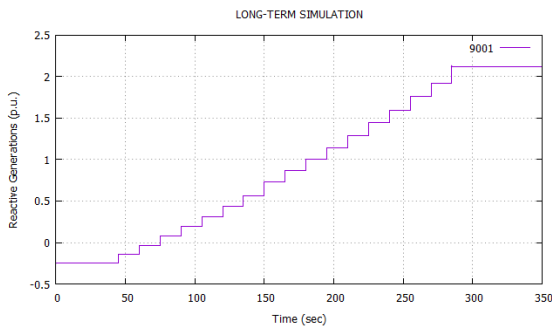
Το Σχήμα 4.23 παρουσιάζει τη συνεισφορά των αιολικών πάρκων στην κατανάλωση αέργου ισχύος για όλα τα επίπεδα αιολικής παραγωγής. Σε αυτήν την περίπτωση ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος για τα A/Π GAMMA 1 και GAMMA 2 ήδη από το 40 % της αιολικής παραγωγής. Όπως παρατηρείται, τα δύο αυτά αιολικά πάρκα έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στην κατανάλωση αέργου ισχύος σε όλα τα επίπεδα ενεργού παραγωγής. Για μεγάλο επίπεδο αιολικής διείδυσης, συμμετέχουν σχεδόν όλα τα A/Π απορροφώντας σημαντικά ποσά αέργου ισχύος.



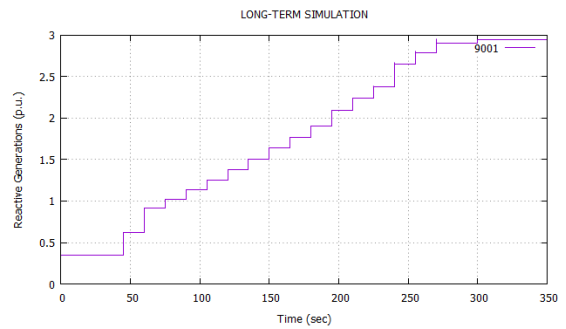
(α') $P_{WF} = 0$



(β') $P_{WF} = 10\%$

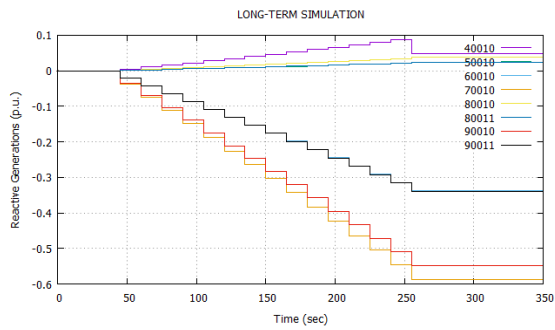


(γ') $P_{WF} = 40\%$

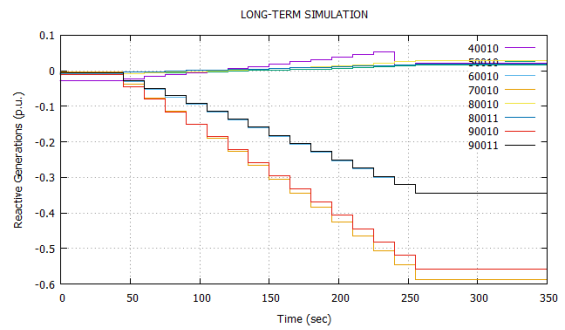


(δ') $P_{WF} = 90\%$

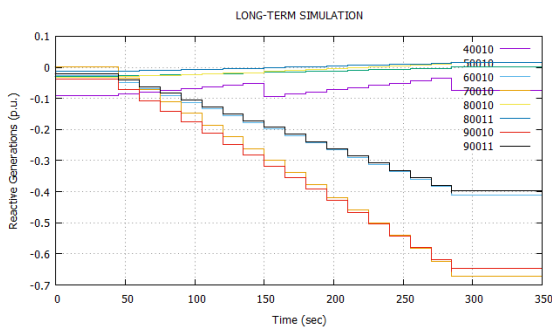
Σχήμα 4.22: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσης Υ/Σ GAMMA



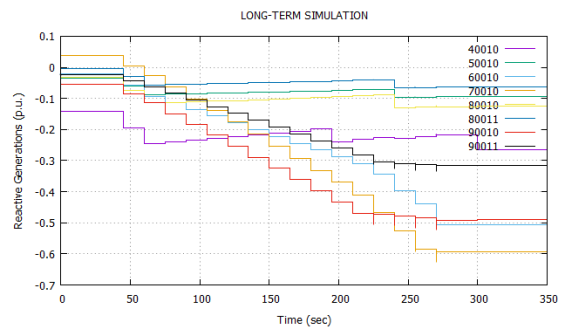
(α') $P_{WF} = 0$



(β') $P_{WF} = 10\%$

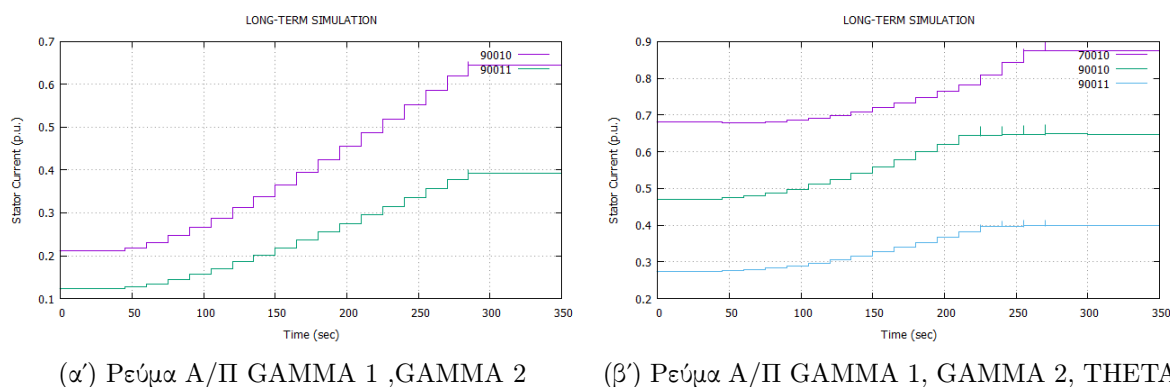


(γ') $P_{WF} = 40\%$



(δ') $P_{WF} = 90\%$

Σχήμα 4.23: Άεργος Ισχύς A/II-Αύξηση τάσης Υ/Σ GAMMA

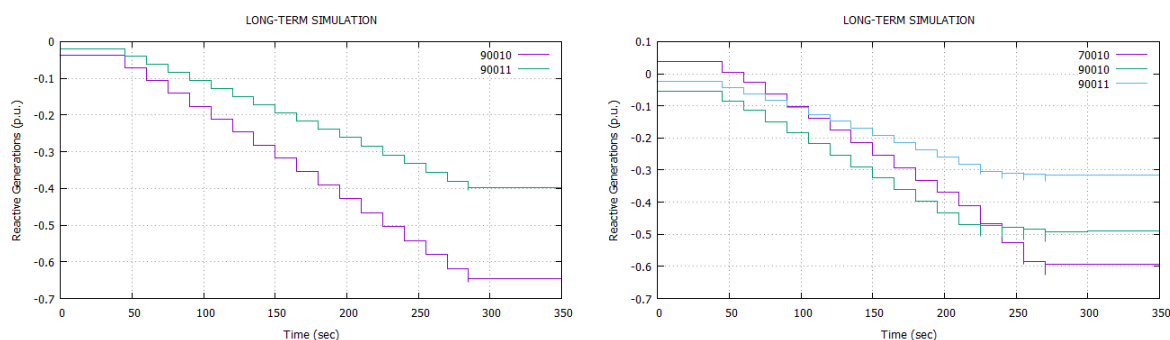


(α') Ρεύμα A/Π GAMMA 1 ,GAMMA 2

(β') Ρεύμα A/Π GAMMA 1, GAMMA 2, THETA

Σχήμα 4.24: Ρεύματα A/Π (40 και 90% αιολική διείδυση)

Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των ρευμάτων των A/Π GAMMA 1, GAMMA 2 και THETA στα επίπεδα αιολικής παραγωγής για τα οποία ενεργοποιείται ο περιορισμός ρεύματος στα συγκεκριμένα αιολικά πάρκα. Για 40 % επίπεδο αιολικής διείδυσης, ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος στα αιολικά πάρκα GAMMA 1 και GAMMA 2 (ζυγοί 90010-90011) στα 285s και από εκεί και πέρα το A/Π λειτουργεί με σταθερό οριακό ρεύμα και σταθερή ενεργό ισχύ. Για το επίπεδο του 90 % της αιολικής διείδυσης ενεργοποιείται και ο περιοριστής για το A/Π THETA.

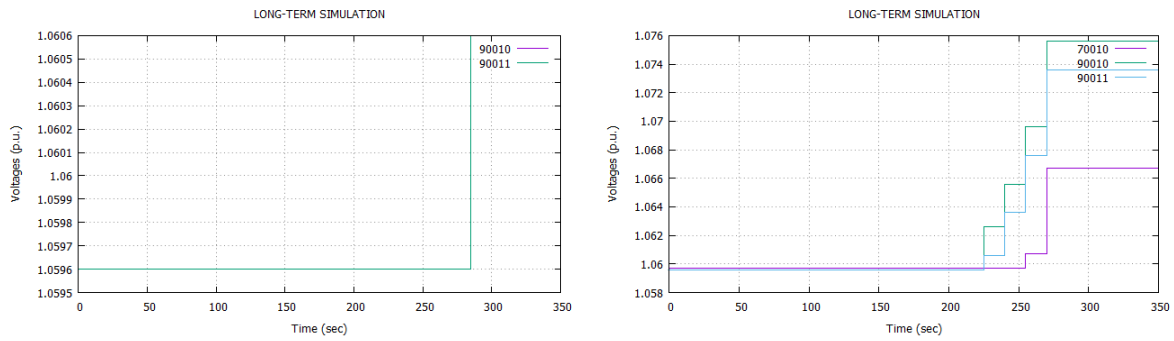


(α') Άεργος ισχύς A/Π GAMMA 1 και GAMMA 2

(β') Άεργος ισχύς A/Π GAMMA 1, GAMMA 2, THETA

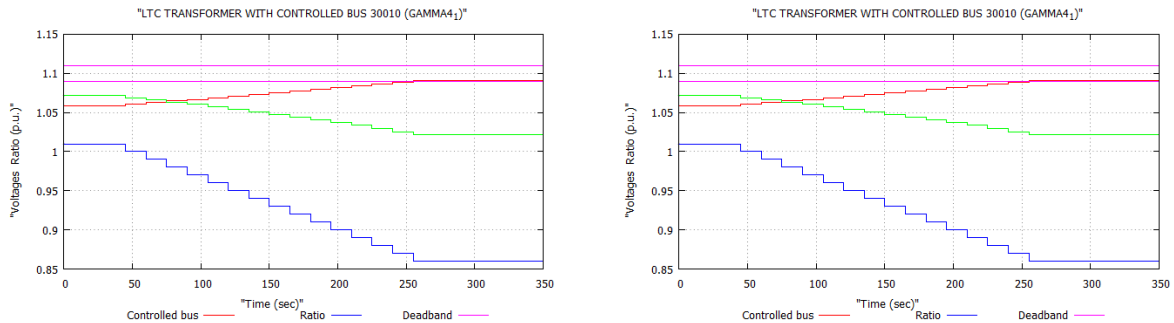
Σχήμα 4.25: Άεργος ισχύς A/Π (40 και 90% αιολική διείδυση)

Στα Σχήματα 4.25 και 4.26 παρουσιάζεται η άεργος ισχύς και οι τάσεις των αιολικών πάρκων στα οποία ενεργοποιείται ο περιορισμός ρεύματος για τα δυο προαναφερθέντα επίπεδα αιολικής διείδυσης. Για την περίπτωση του 40 % στα A/Π GAMMA 1 και GAMMA 2 ενεργοποιείται μια φορά ο περιοριστής ρεύματος και επομένως οι τάσεις των ζυγών τους αυξάνονται μια φορά. Στο Σχήμα 4.26α' φαίνεται ότι οι τάσεις 90010 και 90011 συμπίπτουν καθώς ο περιοριστής ρεύματος ενεργοποιείται την ίδια χρονική στιγμή και για τα δυο αιολικά πάρκα. Αντίθετα, στο Σχήμα 4.26β' οι τάσεις στα A/Π μεταβάλλονται περισσότερες φορές, καθώς οι αντίστοιχοι περιοριστές ρεύματος ενεργοποιήθηκαν περισσότερες φορές. Συγκεκριμένα για τα GAMMA 1 και GAMMA 2 πραγματοποιούνται τέσσερις ενεργοποιήσεις ενώ για το THETA δύο.



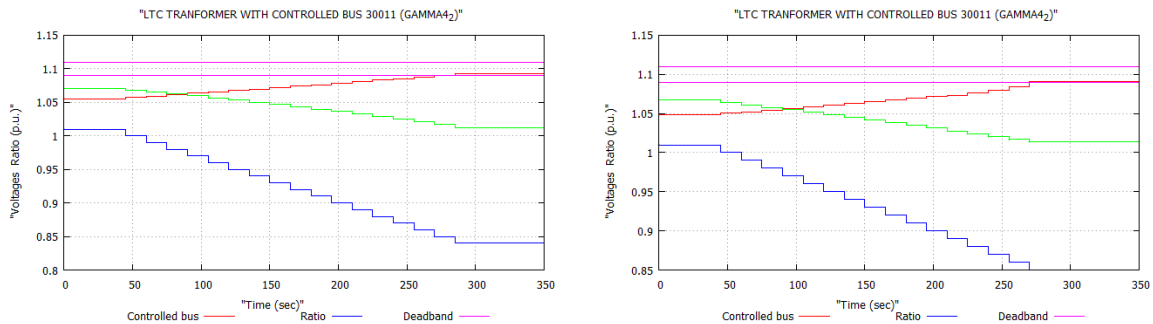
(α') Τάσεις ισχύος A/Π GAMMA 1 και GAMMA 2 (β') Τάσεις A/Π GAMMA 1, GAMMA 2, ΘΕΤΑ

Σχήμα 4.26: Τάσεις A/Π (40 και 90% αιολική διείσδυση)



(α') $P_{WF} = 0$

(β') $P_{WF} = 10\%$



(γ') $P_{WF} = 40\%$

(δ') $P_{WF} = 90\%$

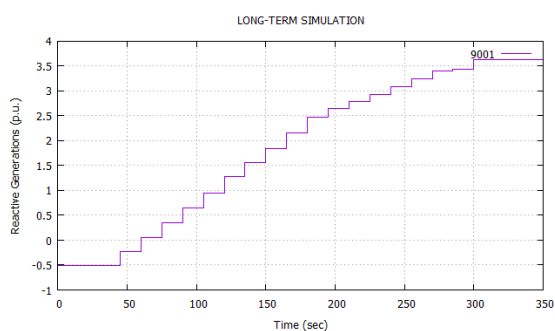
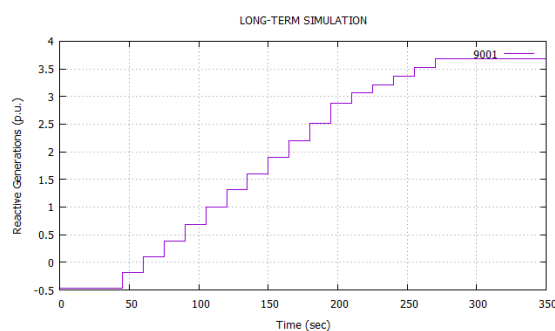
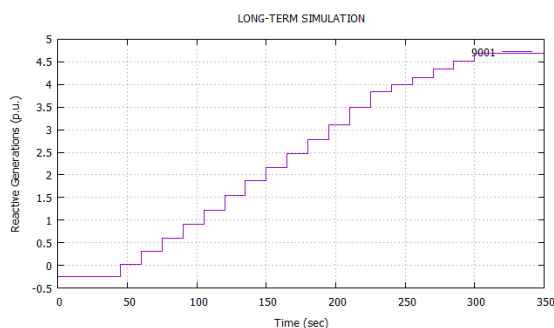
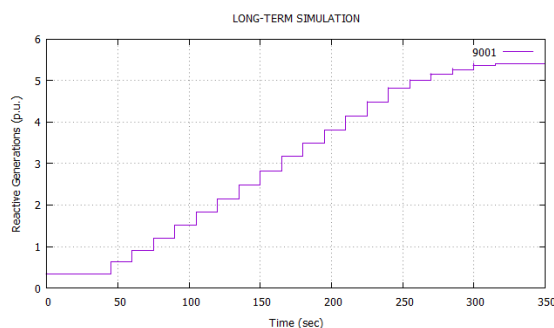
Σχήμα 4.27: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 30010

Τέλος, στο Σχήμα 4.27 παρουσιάζονται οι τάσεις, η νεκρή ζώνη και ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ελεγχόμενου ζυγού 30010 για όλα τα επίπεδα αιολικής παραγωγής.

4.2.3 Αύξηση τάσεων αναφοράς σε όλους τους υποσταθμούς

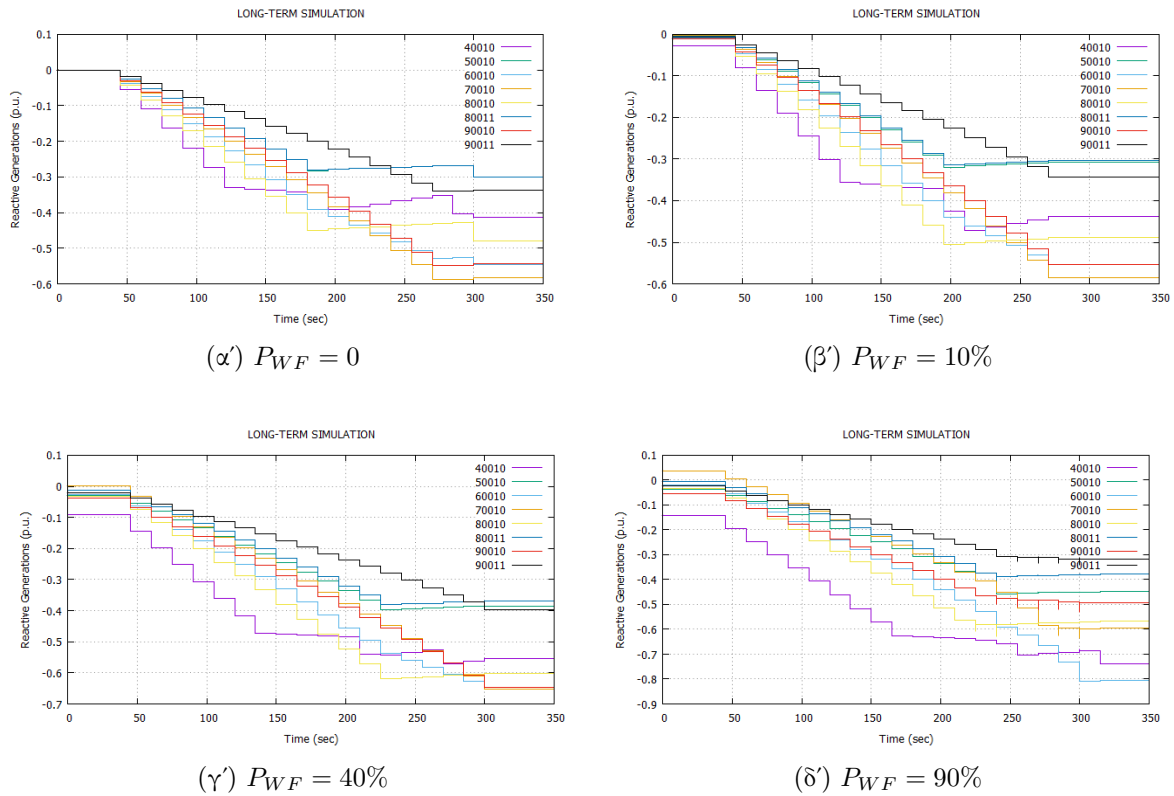
Όπως και στο Κεφάλαιο 3 θα εφαρμοστεί και εδώ η αύξηση των τάσεων στους ζυγούς όλων των υποσταθμών ταυτόχρονα. Όπως είχε δείχθει, με τα αιολικά πάρκα εκτός λειτουργίας, η μέθοδος αυτή υστερούσε στην κατανάλωση αέργου ισχύος σε σχέση με την μέθοδο αύξησης

της τάσης σε έναν υποσταθμό και συγκεκριμένα με την αύξηση των τάσεων στους υποσταθμούς BETA και GAMMA. Στη συγκεκριμένη περίπτωση που τα αιολικά πάρκα έχουν τη δυνατότητα παραγωγής και απορρόφησης αέργου ισχύος μέσω των μετατροπέων, παρατηρείται ότι με αυτή τη μέθοδο επιτυγχάνεται η μέγιστη κατανάλωση αέργου ισχύος από το σύστημα. Στο Σχήμα 4.28 και συγκεκριμένα στο 4.28δ' φαίνεται ότι ο άπειρος ζυγός στο τέλος της προσομοίωσης (μετά την αύξηση των τάσεων σε όλους τους υποσταθμούς) παρέχει περίπου 540 MVA_r σε επίπεδο αιολικής παραγωγής 90%.

(α') $P_{WF} = 0\%$ (β') $P_{WF} = 10\%$ (γ') $P_{WF} = 40\%$ (δ') $P_{WF} = 90\%$

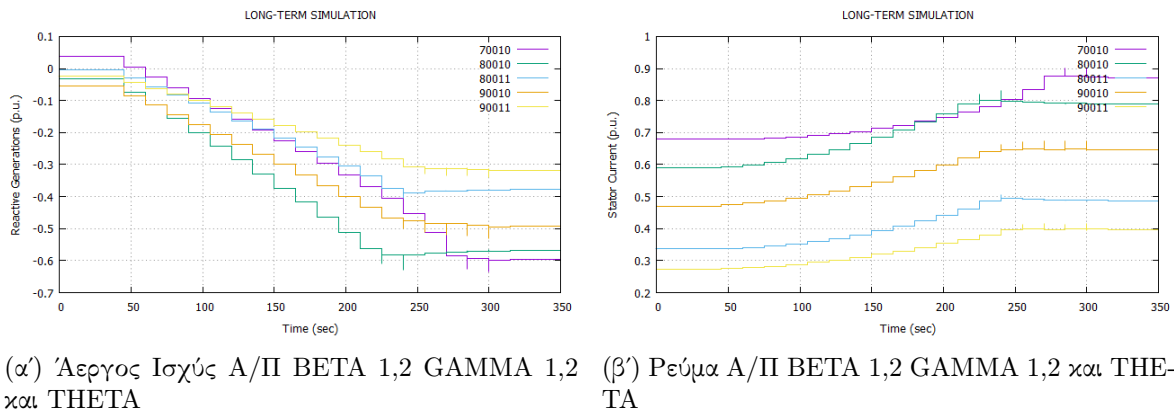
Σχήμα 4.28: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού-Αύξηση τάσεων όλων των Υ/Σ

Πλέον, για όλα τα επίπεδα αιολικής διείσδυσης παρατηρείται συμβολή όλων των αιολικών πάρκων στην απορρόφηση αέργου ισχύος σύμφωνα με το Σχήμα 4.29. Σε αυτό το σενάριο ενεργοποιούνται οι περιοριστές ρεύματος των αιολικών πάρκων BETA 1, BETA 2, GAMMA 1, GAMMA 2 και THETA για πρώτη φορά τις χρονικές στιγμές 225s, 240s, 240s, 255s και 285s αντίστοιχα.



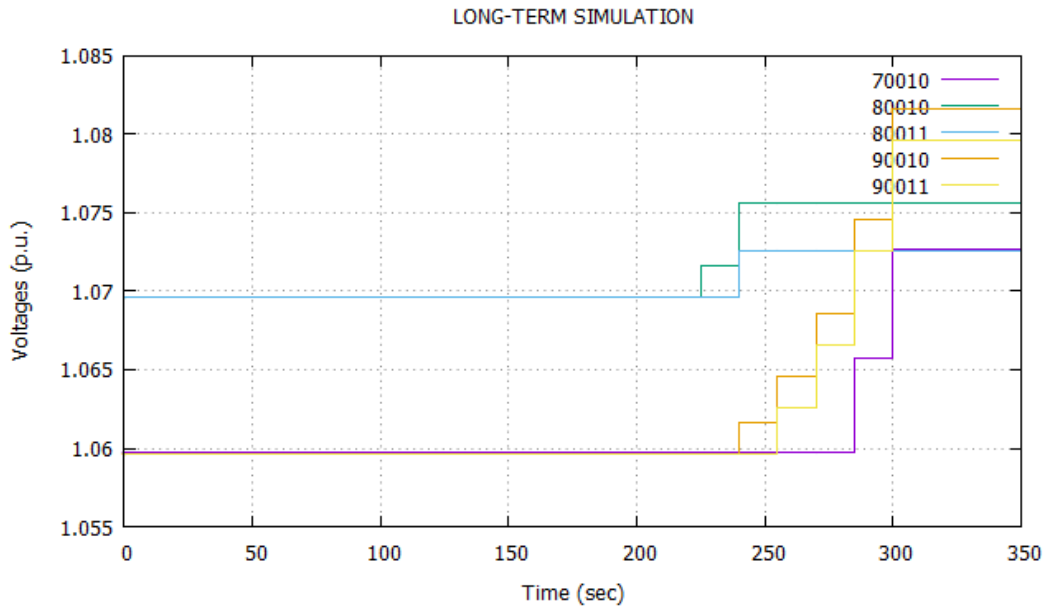
Σχήμα 4.29: Άεργος Ισχύς A/Π-Αύξηση τάσεων όλων των Υ/Σ

Στο Σχήμα 4.30 παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι χρονικές εξελίξεις της αέργου ισχύος και των ρευμάτων στα αιολικά πάρκα που ενεργοποιείται ο περιορισμός ρεύματος.



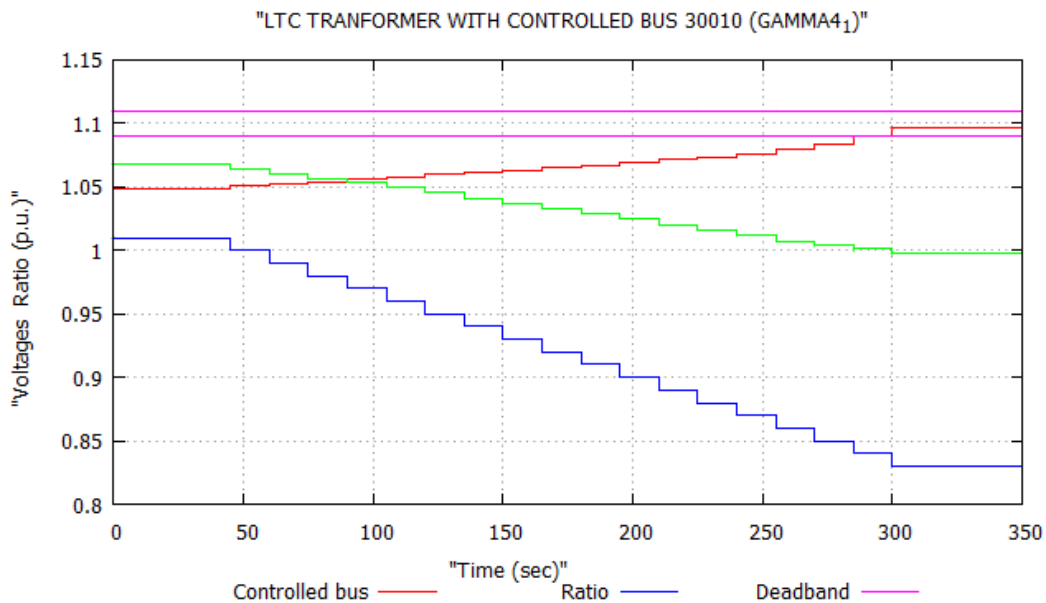
Σχήμα 4.30: Άεργος Ισχύς και ρεύματα A/Π (90 % αιολική διεύθυνση)

Στο Σχήμα 4.31 παρουσιάζεται και η χρονική εξέλιξη των τάσεων των ζυγών των αιολικά πάρκα στα οποία ενεργοποιείται ο περιορισμός ρεύματος. Η τάση των ζυγών αυτών ανεβαίνει τις χρονικές στιγμές ενεργοποίησης των περιοριστών ρεύματος, έτσι ώστε να περιοριστεί η απορρόφηση αέργου ισχύος από τους μετατροπείς.

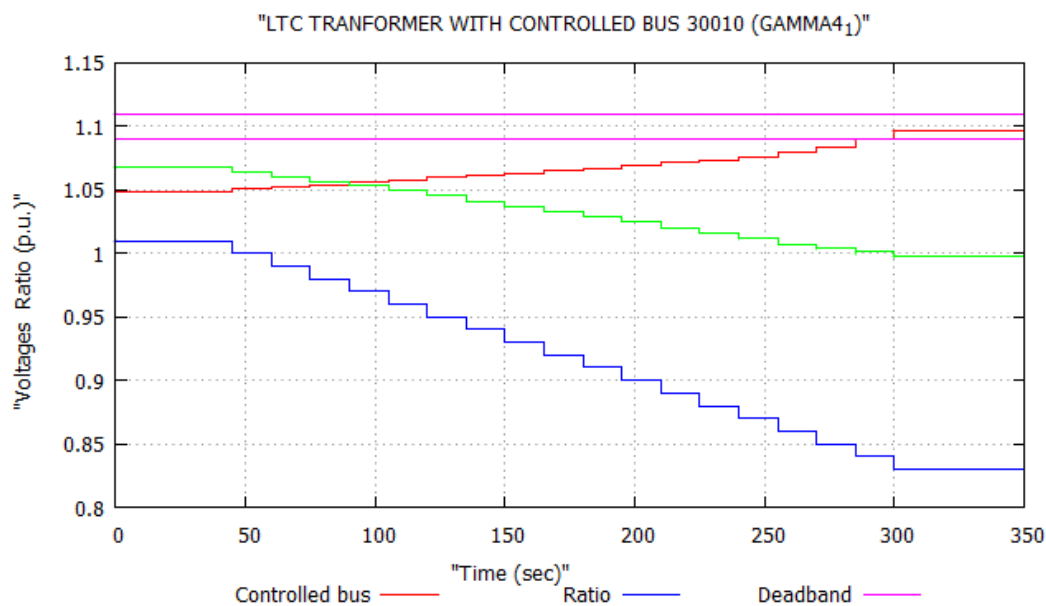


Σχήμα 4.31: Τάσεις Α/Π ΒΕΤΑ 1,2 ΓΑΜΜΑ 1,2 και ΘΕΤΑ.

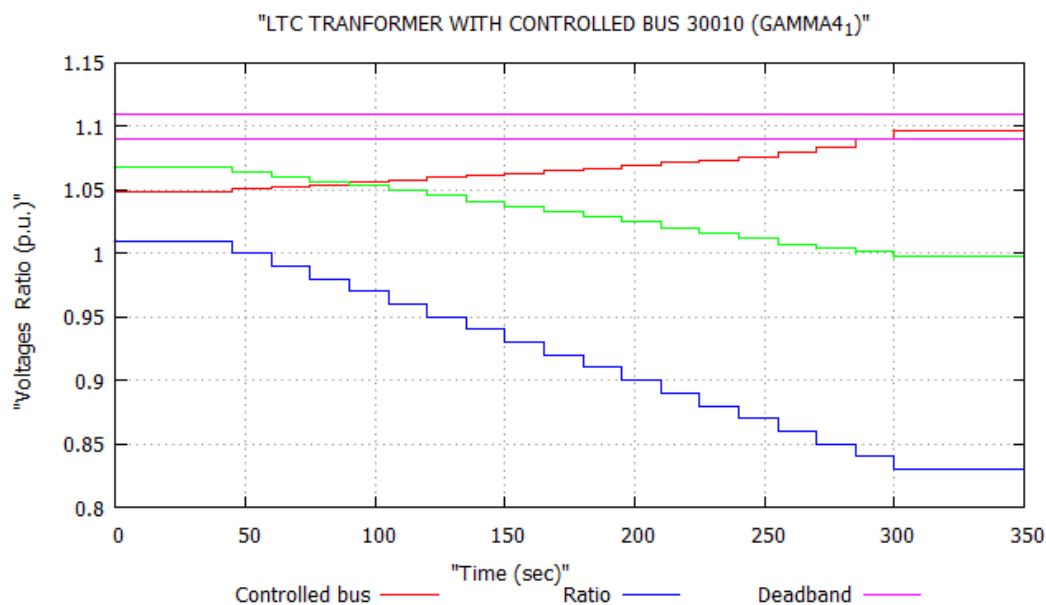
Τέλος, στα Σχήματα 4.32-4.34 παρουσιάζονται οι τάσεις, οι νεκρές ζώνες και οι λόγοι μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ και των τριών υποσταθμών στην περίπτωση που η αιολική παραγωγή κάθε αιολικού πάρκου ανέρχεται στο 90 % της μέγιστης.



Σχήμα 4.32: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 10010.



Σχήμα 4.33: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 20010.



Σχήμα 4.34: Τάση, νεκρή ζώνη και λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ ελεγχόμενου ζυγού 30010.

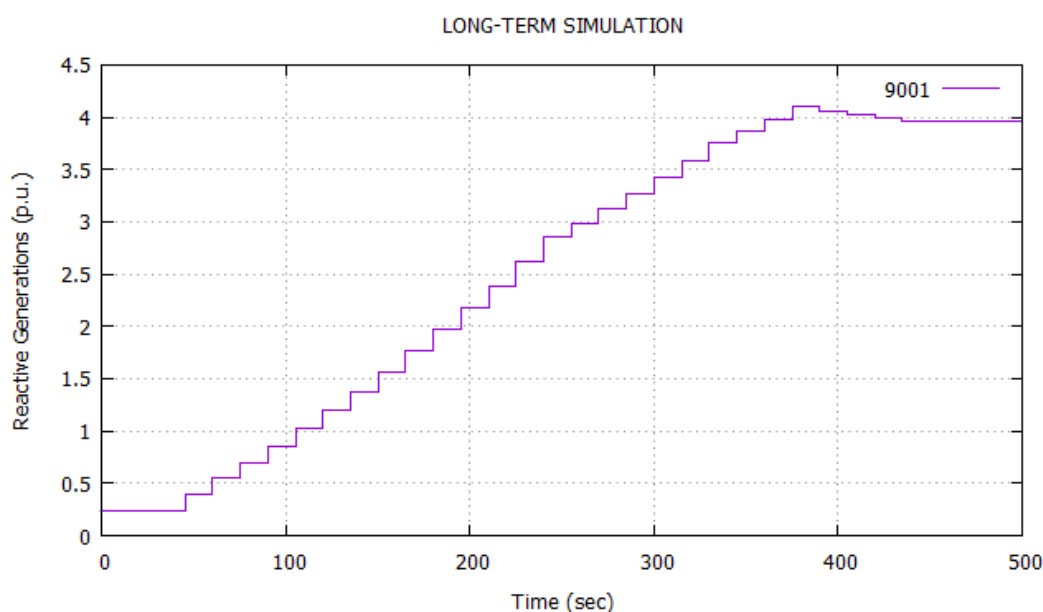
4.2.4 Επίδραση ανοίγματος διασυνδεδειγμένων διακοπών ζυγών (ΔΔΖ)

Όλες οι προσομοιώσεις μέχρι στιγμής διεξάχθηκαν για την περίπτωση που όλοι οι διασυνδεδειγμένοι διακόπτες των ζυγών υπομεταφοράς είναι κλειστοί. Για την περίπτωση που οι διακόπτες θεωρούνται ανοιχτοί και στους τρεις υποσταθμούς παρατηρείται, όπως και για το μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, θετική επίδραση στην περαιτέρω απορρόφηση αέργου ισχύος μόνο για τα χαμηλά

επίπεδα αιολικής διεύδυσης. Για επίπεδα από 40 % και πάνω, το άνοιγμα των διασυνδεδειγμένων διακοπών μειώνει την ικανότητα απορρόφησης αέργου ισχύος από τα Α/Π και επομένως η μέγιστη τιμή απορρόφησης επιτυγχάνεται με τους $\Delta\Delta Z$ κλειστούς με τη μέθοδο της αύξησης των τάσεων σε όλους τους υποσταθμούς για το 90 % επίπεδο αιολικής διεύδυσης.

4.2.5 Κυκλοφορούσα αέργος ισχύς σε όλους τους υποσταθμούς

Τελευταία θα εξεταστεί η τεχνική της δημιουργίας κυκλοφορούσας αέργου ισχύος όπως έγινε τόσο στην περίπτωση χωρίς αιολικά πάρκα όσο και στην περίπτωση που λειτουργούν με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.



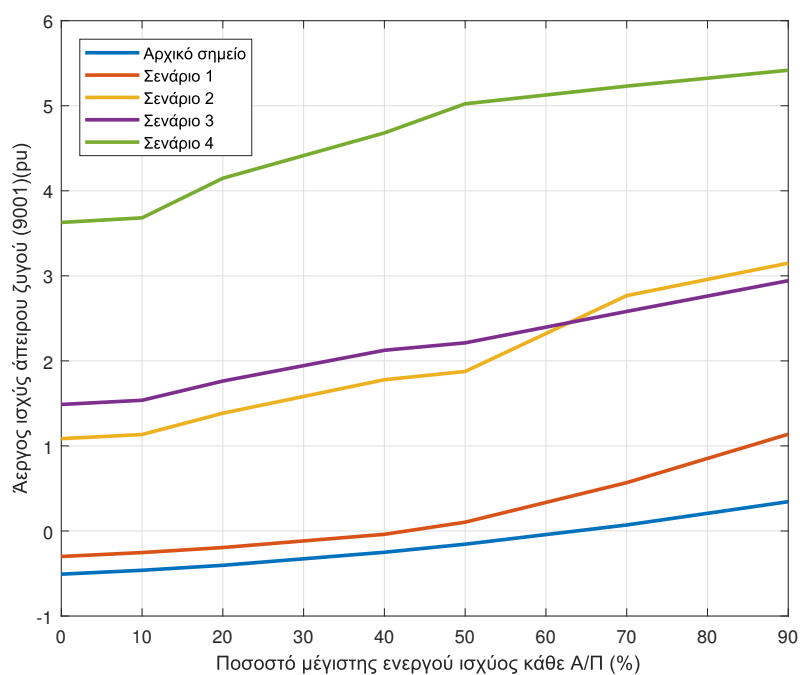
Σχήμα 4.35: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού ($P_{WF} = 90\%$ - Κυκλοφορούσα αέργος ισχύς).

Στο Σχήμα 4.35 φαίνεται η αέργος ισχύς του άπειρου ζυγού πριν τη δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος και στους τρεις υποσταθμούς και μετά. Όπως διαπιστώνεται, ενώ με τα αιολικά πάρκα εκτός λειτουργίας, η τεχνική αυτή αποδίδει τη μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος, στην περίπτωση αυτή παρέχει απορρόφηση μικρότερη σε σχέση με την αύξηση της τάσης αναφοράς σε όλους τους υποσταθμούς ταυτόχρονα. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο, διότι η απορρόφηση αέργου ισχύος λόγω επαγωγικών ρευμάτων απλά διευκολύνει τις γεννήτριες και καταναλώνει την αέργο ισχύ που θα κατανάλωναν αυτές σε διαφορετική περίπτωση. Επομένως, συμπεραίνεται ότι η τεχνική αυτή δίνει βέλτιστα αποτελέσματα όταν τα αιολικά πάρκα είτε είναι εκτός λειτουργίας είτε λειτουργούν υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

4.2.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Όπως και στην ενότητα με τον μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, έτσι και εδώ θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα που αφορούν στη λειτουργία των αιολικών πάρκων με

δυνατότητα ελέγχου της αέργου ισχύος τους μέσω ρύθμισης της τερματικής τους τάσης. Για να αποδοθεί ακριβέστερα η συμπεριφορά της αέργου ισχύος του άπειρου ζυγού συμπεριλήφθηκαν στα διαγράμματα και οι περιπτώσεις του 20 %, 50 % και 70 % της μέγιστης ισχύος των αιολικών πάρκων.



Σχήμα 4.36: Άεργος Ισχύς άπειρου ζυγού και ενεργός ισχύς Α/Π.

Στο Σχήμα 4.36 παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα επίπεδα αιολικής ισχύος στην περίπτωση που οι μετατροπείς των αιολικών πάρκων έχουν τη δυνατότητα παραγωγής και κατανάλωσης αέργου ισχύος. Εδώ, παριστάνονται γραφικά πέντε καμπύλες οι οποίες αντιστοιχούν τόσο στην επίδραση μόνο του επιπέδου αιολικής παραγωγής (μπλε καμπύλη) όσο και στην επίδραση της ρύθμισης των ΣΑΤΥΦ παράλληλα με το επίπεδο αιολικής παραγωγής. Ως σενάριο 1 ορίζεται η αύξηση των τάσεων στους ζυγούς του υποσταθμού ALPHA, ως σενάριο 2 στον υποσταθμό BETA, ως σενάριο 3 στον GAMMA και τέλος σενάριο 4 σε όλους τους υποσταθμούς ταυτόχρονα.

Πίνακας 4.4: Τελική κατάσταση για το Σενάριο 4 (90 % επίπεδο αιολικής παραγωγής)

A/Π	V (αμ)	I (αμ)	P_G (MW)	Q_G (MVAR)
BETA 1	1.0755	0.79	63	-56.73
BETA 2	1.0725	0.49	36	-37.82
GAMMA 1	1.0816	0.645	49.5	-49.24
GAMMA 2	1.0796	0.397	28.8	-31.76
DELTA	1.0657	1.227	108	-73.86
EPSILON	1.0697	0.69	58.5	-44.81
ETA	1.0643	1.073	81	-80.57
THETA	1.0721	0.872	72	-59.66

Όπως έχει ήδη σχολιαστεί αλλά φαίνεται και στο Σχήμα 4.36, το σενάριο 1 έχει μικρή επίδραση στην κατανάλωση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς. Πιο συγκεκριμένα για χαμηλά επίπεδα αιολικής διείσδυσης (< 40 %) η ισχύς του άπειρου ζυγού παραμένει αρνητική, δηλαδή το σύστημα μεταφοράς συνεχίζει να παράγει άεργο ισχύ. Όσο αυξάνεται η αιολική διείσδυση, η ροή ισχύος αντιστρέφεται με τη μέγιστη κατανάλωση να ανέρχεται στα 114 MVA_r για επίπεδο αιολικής παραγωγής 90 %. Με την εφαρμογή του σεναρίου 2, η κατανάλωση αέργου ισχύος από την υπομεταφορά αυξάνεται δραστικά με τη μέγιστη κατανάλωση αέργου ισχύος να επιτυγχάνεται και πάλι στο 90 % της αιολικής παραγωγής και να ανέρχεται στα 315 MVA_r. Το σενάριο 3 αυξάνει περαιτέρω την κατανάλωση αέργου ισχύος για αιολική διείσδυση μέχρι περίπου 65 % και για υψηλότερα επίπεδα παραγωγής το σενάριο 2 εμφανίζεται πιο αποτελεσματικό σύμφωνα με το Σχήμα 4.36. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο περιορισμός ρεύματος για το συγκεκριμένο σενάριο συναντάται πρώτη φορά στο 40 % επίπεδο αιολικής παραγωγής σε αντίθεση με το σενάριο 2 που συναντάται από το 70 % και πάνω. Η παρατήρηση αυτή εξηγεί επιπλέον τη συμπεριφορά της καμπύλης του σεναρίου 2 (κίτρινη καμπύλη). Πιο συγκεκριμένα, η κλίση της για το διάστημα 50-70 % είναι απότομη, ενώ στο διάστημα 70- 90% παρουσιάζει ομαλότερη συμπεριφορά. Η μορφή αυτή οφείλεται στον περιορισμό της απορροφωμένης αέργου ισχύος που γίνεται μέσω της ενεργοποίησης των περιοριστών ρεύματος στα αιολικά πάρκα. Τέλος, αποτελεσματικότερο απ' όλα είναι το σενάριο 4 με μεγάλη διαφορά για όλα τα επίπεδα αιολικής παραγωγής. Ανάλογη παρατήρηση για την κλίση της καμπύλης όπως έγινε στα σενάρια 2 και 3 μπορεί να γίνει και εδώ. Για την ακρίβεια, στο διάστημα 70-90 % παρατηρείται μικρότερη κλίση της καμπύλης σε σχέση με τα διαστήματα 10- 20% και 20- 50%. Η ομαλοποίηση της καμπύλης και σε αυτό το σενάριο αποδίδεται στην ενεργοποίηση των περιοριστών ρεύματος στα αιολικά πάρκα από το επίπεδο αιολικής παραγωγής 50 %. Ο Πίνακας 4.5 συνοψίζει τα αποτελέσματα για την άεργο ισχύ του άπειρου ζυγού στην τελική κατάσταση (μετά την αύξηση των τάσεων) για κάθε επίπεδο αιολικής παραγωγής. Από την άλλη, ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει τις επιμέρους άεργους καταναλώσεις των Α/Π στο τελικό σημείο λειτουργίας του σεναρίου 4 για 90 % επίπεδο αιολικής παραγωγής. Επιπλέον, δίνονται οι τελικές τιμές των τάσεων των ζυγών των αιολικών πάρκων καθώς και τα αντίστοιχα ρεύματα λειτουργίας. Ως εκ τούτου, γίνεται εμφανές ότι τα αιολικά πάρκα BETA 1,2 , GAMMA 1,2 και THETA λειτουργούν με σχεδόν οριακό ρεύμα και σταθερή ενεργό ισχύ ενώ η τάση των ζυγών τους έχει πλέον αυξηθεί.

Πίνακας 4.5: Άεργος ισχύς άπειρου ζυγού (Τελική κατάσταση)

Επίπεδο αιολικής παραγωγής	Q_{9001} (MVA _r)			
	Σενάριο			
	1	2	3	4
0%	-30.0	108.5	148.7	362.8
10%	-25.4	113.4	183.9	368.2
40%	-3.9	177.8	204.2	468
90%	113.8	314.9	228.9	541.8

Κεφάλαιο 5

Συμπερασματα-Προοπτικές

5.1 Σύνοψη και κύρια συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η συμβολή του συστήματος υπομεταφοράς στον έλεγχο της αέργου ισχύος και της τάσης του συστήματος μεταφοράς. Συγκεκριμένα, αποτιμήθηκε η δυνατότητα του συστήματος υπομεταφοράς να καταναλώσει άεργο ισχύ προκειμένου να βοηθήσει το σύστημα μεταφοράς να μειώσει τις τάσεις και την παραγωγή αέργου ισχύος σε συνθήκες χαμηλού φορτίου.

Αρχικά η διερεύνηση των ορίων κατανάλωσης αέργου ισχύος έγινε με μηδενική ενεργό και άεργο παραγωγή από τα αιολικά πάρκα και αποτιμήθηκε η συνεισφορά των μετασχηματιστών των υποσταθμών στην απορρόφηση αέργου ισχύος. Συγκεκριμένα, η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν η αύξηση των τάσεων στους ζυγούς της υπομεταφοράς σε έναν υποσταθμό αλλά και σε όλους τους υποσταθμούς ταυτόχρονα. Το βασικό συμπέρασμα που εξήχθη είναι ότι η μέθοδος αυτή συμβάλλει στην αύξηση της κατανάλωσης αέργου ισχύος πιο δραστικά όταν εφαρμόζεται αύξηση τάσεων στους ζυγούς υπομεταφοράς των υποσταθμών BETA ή GAMMA. Αντίθετα, η ταυτόχρονη αύξηση των τάσεων υπομεταφοράς σε όλους τους υποσταθμούς δεν προκαλεί μεγάλη απορρόφηση αέργου ισχύος. Κύριο συμπέρασμα της εφαρμογής των παραπάνω μεθόδων χωρίς αιολικά πάρκα είναι ότι η επίδραση τους στην απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς είναι μικρή.

Στη συνέχεια, προκειμένου να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της απορρόφησης αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της κυκλοφορούσας αέργου ισχύος στους παράλληλους μετασχηματιστές υποσταθμών. Η μέθοδος αυτή συνέβαλε δραστικά στην αύξηση της απορρόφησης αέργου ισχύος τόσο με την εφαρμογή της σε έναν υποσταθμό όσο και με την εφαρμογή της και στους τρεις υποσταθμούς ταυτόχρονα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εφαρμογή της μεθόδου κυκλοφορούσας αέργου ισχύος σε όλους τους υποσταθμούς έδωσε τη μέγιστη απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς χωρίς τα αιολικά πάρκα.

Επιπρόσθετα, εφαρμόστηκε τόσο η μέθοδος της αύξησης τάσεων υπομεταφοράς στον υποσταθμό ALPHA όσο και η δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος σε όλους του υποσταθμούς με τα αιολικά πάρκα να λειτουργούν υπό μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Για την ακρίβεια προ-

σομοιώθηκε η συμπεριφορά της αέργου ισχύος σε τρία σενάρια σταθερής αιολικής παραγωγής τα οποία εκφράζονται ως ποσοστό της μέγιστης αιολικής παραγωγής του κάθε αιολικού πάρκου για καθεμιά από τις παραπάνω μεθόδους (αύξηση τάσεων αναφοράς και κυκλοφορούσα αέργος ισχύς). Εδώ, η αέργος απορρόφηση εξαρτάται από δύο παράγοντες: α) το επίπεδο αιολικής παραγωγής και β) την εφαρμογή κάποιας μεθόδου που προκαλεί περαιτέρω απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα. Όσον αφορά στο επίπεδο αιολικής παραγωγής, εξάγεται ότι όταν το επίπεδο αιολικής παραγωγής είναι μικρότερο από τα φορτία, μειώνει τα ρεύματα και επομένως και τις αέργες απώλειες μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την αέργο κατανάλωση. Για υψηλά επίπεδα αιολικής διείσδυσης, τα ρεύματα αλλάζουν φορά και αυξάνονται παράλληλα με την αύξηση της αιολικής παραγωγής συμβάλλοντας στην απορρόφηση αέργου ισχύος μέσω της αύξησης των αέργων απωλειών του συστήματος. Η εφαρμογή της μεθόδου αύξησης της τάσης σε έναν υποσταθμό επέφερε μικρή μεταβολή στην απορρόφηση αέργου ισχύος και τελικά δραστηκότερη μέθοδος για την περίπτωση του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος αποδείχθηκε η δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος και στους τρεις υποσταθμούς ταυτόχρονα.

Όταν έγινε εφαρμογή της αύξησης των τάσεων αναφοράς στους ζυγούς υπομεταφοράς τόσο ενός υποσταθμού όσο και όλων των υποσταθμών ταυτόχρονα με τα αιολικά πάρκα να ελέγχουν την αέργο ισχύ τούς μέσω ρύθμισης της τερματικής τους τάσης, τότε επιτεύχθηκε αυξημένη απορρόφηση αέργου ισχύος από το υποδίκτυο. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν ανάλογα με την περίπτωση του μοναδιαίου συντελεστή ισχύος τέσσερα σενάρια σταθερής αιολικής παραγωγής. Η μέθοδος αυτή αύξησε δραστικά την απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς διότι αξιοποιήθηκε η δυνατότητα των αιολικών πάρκων να λειτουργήσουν με χωρητικό συντελεστή ισχύος, δηλαδή απορροφώντας αέργο ισχύ. Όσον αφορά στην επίδραση του επιπέδου αιολικής παραγωγής στην απορρόφηση αέργου ισχύος, εξάγεται ότι για υψηλά επίπεδα αιολικής παραγωγής η απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα αυξάνεται. Μεγαλύτερη επίδραση στην απορρόφηση αέργου ισχύος είχε το σενάριο αύξησης των τάσεων των ζυγών υπομεταφοράς σε όλους τους υποσταθμούς και συγκεκριμένα στο 90 % της αιολικής παραγωγής επιτεύχθηκε η μέγιστη απορρόφηση η οποία ανέρχεται στα 541 MVA_r. Για λόγους πληρότητας, προσομοιώθηκε και η δημιουργία κυκλοφορούσας αέργου ισχύος σε όλους τους υποσταθμούς, η οποία όμως δεν αύξησε περαιτέρω την απορρόφηση αέργου ισχύος από το σύστημα υπομεταφοράς.

Τα αποτελέσματα για τα όρια απορρόφησης μπορούν να γνωστοποιηθούν στο διαχειριστή του δικτύου ο οποίος μπορεί να ζητήσει το ανάλογο ποσό απορρόφησης μέσω ενός κέντρου ελέγχου ενέργειας ή μπορεί η υπηρεσία απορρόφησης αέργου ισχύος να εφαρμοστεί αυτόματα κάθε φορά που η τάση του ζυγού ΥΤΥ υπερβεί μια μέγιστη τιμή.

5.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μελέτη γίνεται φανερό πως υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω έρευνα.

Η εργασία αυτή περιορίστηκε σε ανάλυση υπό σταθερή τάση τροφοδοσίας ενός ζυγού Υ-ΥΤ θεωρούμενου ως ζυγού αναφοράς. Ως εκ τούτου, επειδή η τάση αυτή διατηρείται σταθερή

δεν γίνεται εμφανής η επίδραση της απορρόφησης αέργου ισχύος στην τάση του συστήματος μεταφοράς. Η ανάλυση της επίδρασης της αέργου ισχύος στην τάση θα προϋπέθετε την ύπαρξη ενός μοντέλου για το σύστημα μεταφοράς το οποίο δεν ήταν διαθέσιμο από το διαχειριστή του δικτύου. Εάν όμως γίνει υπόθεση ενός ισοδύναμου Thevenin για το σύστημα μεταφοράς όπως έγινε στο Κεφάλαιο 2, μπορεί να επαναληφθεί η ανάλυση με τις ίδιες τεχνικές και να εξαχθούν αποτελέσματα όχι μόνο για τη ροή αέργου ισχύος αλλά και για την επίδρασή της στην μεταβολή της τάσης του συστήματος μεταφοράς. Με τη μορφή που έγινε η ανάλυση στη διπλωματική, μπορεί ο διαχειριστής του συστήματος υπομεταφοράς να γνωστοποιήσει στον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς τα όρια κατανάλωσης αέργου ισχύος και αυτός με τη σειρά του να ζητήσει το επιθυμητό ποσό κατανάλωσης για να ρυθμίσει τις τάσεις του.

Όπως έγινε εμφανές, στην παρούσα εργασία μελετάται μόνο η δυνατότητα παροχής της επικουρικής υπηρεσίας της απορρόφησης αέργου ισχύος από ένα υποδίκτυο στο ανάντι δίκτυο σε ένα στιγμιότυπο υψηλών τάσεων και χαμηλού φορτίου. Μια εφικτή επέκταση θα ήταν η διερεύνηση παροχής αέργου ισχύος από το δίκτυο υπομεταφοράς στο δίκτυο μεταφοράς για ένα στιγμιότυπο λειτουργίας με χαμηλές τάσεις.

Επιπλέον, προκειμένου να παρέχεται η υπηρεσία της ρύθμισης τάσης από τα αιολικά πάρκα θα πρέπει να υπάρχει σχετική συμφωνία μεταξύ των διαχειριστών του συστήματος μεταφοράς και του συστήματος υπομεταφοράς. Επομένως, μια εφικτή προοπτική για μελλοντική έρευνα θα ήταν η αποτίμηση της συγκεκριμένης υπηρεσίας σε χρηματικό ποσό.

Ακόμη, σημαντική προϋπόθεση αποτελεί η δυνατότητα παρέμβασης στο δίκτυο (π.χ αλλαγή τάσεων αναφοράς). Για να γίνει αυτό εφικτό μπορεί να εξεταστεί η δυνατότητα ελέγχου με τηλεχειρισμό καθώς και η δυνατότητα τηλεμέτρησης.

Τέλος, η χρήση των μετατροπέων ηλεκτρονικών ισχύος βασίστηκε σε παραδοχές και απλοποιήσεις. Στα σενάρια που προσομοιώθηκαν θεωρήθηκε ακαριαία η απόκριση των μετατροπέων χωρίς να υπάρχουν χρονικές καθυστερήσεις. Με την εισαγωγή κάποιας χρονικής καθυστέρησης το μοντέλο θα γίνει ρεαλιστικότερο, διότι θα αναπαρίστανται οι χρονικές καθυστερήσεις των ρυθμιστών.

Βιβλιογραφία

- [1] P. Kundur. «*Power System Stability And Control*». Palo Alto, California: Mc Graw-Hill, 1994.
- [2] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής. «*Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*». Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 2001.
- [3] Κ. Βουρνάς και Β. Κ Παπαδιάς. «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως*». Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία, 1991.
- [4] Β. Κ Παπαδιάς. «*Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας*». Αθήνα, 1985.
- [5] F. Coyle. «*Introduction to Wind Power*». The English Press, 2011.
- [6] T. Ackermann. «*Wind Power in Power Systems*». John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [7] D.Fraile and A. Mbistrova. «*Wind in Europe 2017-Annual combined onshore and offshore wind energy statistics*». Wind Europe, Φεβ. 2018.
- [8] ΑΔΜΗΕ. «*Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2017-2027*». Μάι. 2017.
- [9] Γ. Τσουράκης. 'Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας'. Διδακτορική διατρ. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Μαρ. 2010.
- [10] Σ. Παπαθανασίου. «*Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας - Σημειώσεις Παραδόσεων*». Αθήνα, 2014.
- [11] Σουζές Θ. 'Αεργος Υποστήριξη Συστήματος Μεταφοράς από Διεσπαρμένες Πηγές'. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Οκτ. 2015.
- [12] J. Machowski, J.W Bialek and J.R Bumby. «*Power System Dynamics: Stability and Control*». Wiley, 2008.
- [13] S. Corsi. «*Voltage Control and Protection in Electrical Power Systems*». London: Springer, 2015.
- [14] J.J.Grainger and W.D Stevenson Jr. «*Power System Analysis*». Mc Graw Hill, 1994.
- [15] J. D. Glover, M.S Sarma and T. J Overbye. «*Power System Analysis and Design*». Cengage Learning, 2000.
- [16] Π. Μανδουλίδης. 'Πρόγραμμα Προσομοίωσης Ευστάθειας Τάσης και Μέτρων Προστασίας από Κατάρρευση'. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Οκτ. 2010.

-
- [17] T. Van Cutsem and C. Vournas. «*Voltage Stability of Electric Power Systems*». Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [18] Κ. Βουρνάς (Επιστημονικός Υπεύθυνος). «*Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα*». Αθήνα, Απρ. 1999.
- [19] Χ. Λάμπρου. 'Σχεδίαση Συστημάτων Ανίχνευσης Αστάθειας Τάσεως και Προστασίας από Κατάρρευση'. Διδακτορική διατρ. ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Μαρ. 2017.
- [20] F. P. de Mello. 'Solid-state Technology-enhancing power system equipment'. Στο: *IEEE Power and Energy Magazine (Volume 3, Issue:4)* (July-August 2005).

