



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

## Επίδραση Άεργης Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα στο Όριο Φόρτισης Συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Αναγνωστόπουλος

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015





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

## Επίδραση Άεργης Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα στο Όριο Φόρτισης Συστήματος

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Α. Αναγνωστόπουλος

**Επιβλέπων :** Κωνσταντίνος Δ. Βουρνάς

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27<sup>η</sup> Φεβρουαρίου 2015.

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

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

.....  
Σταύρος Παπαθανασίου  
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος, 2015

.....  
Ιωάννης Α. Αναγνωστόπουλος

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

Copyright © Ιωάννης Α. Αναγνωστόπουλος, 2015  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω 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 την δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού, καθώς και για το ότι ήταν πάντα διαθέσιμος και συνεργάσιμος παρά την έλλειψη χρόνου. Οι συναντήσεις και οι συζητήσεις μας συνέβαλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, χωρίς την οικονομική και ηθική στήριξη της οποίας όλα αυτά τα χρόνια, δεν θα μπορούσα να βρίσκομαι σε αυτή τη θέση. Τους ευχαριστώ για την συμπαράσταση και την υποστήριξη σε όλες τις επιλογές μου.



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αύξησης του ορίου φόρτισης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος, μέσω παροχής αέργου ισχύος από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή της Πελοποννήσου. Η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) που βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας χαρακτήρισε ένα στιγμιότυπο του Συστήματος ως ανασφαλές το καλοκαίρι του 2010. Η παραβίαση ασφάλειας αφορούσε την αδυναμία επαναφοράς της λειτουργίας του τοπικού δικτύου της Πελοποννήσου και την επακόλουθη ολική κατάρρευση του Συστήματος μετά την επιβολή μιας κρίσιμης διαταραχής. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η αύξηση των περιθωρίων ασφάλειας του δικτύου της Πελοποννήσου μέσω άεργης υποστήριξης από 7 τοπικά Αιολικά Πάρκα.

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις άεργης υποστήριξης: α) χρήση των αυτόματων μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης συστοιχιών πυκνωτών που βρίσκονται εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς ΜΤ των πάρκων, β) δυνατότητα απευθείας έγχυσης αέργου ισχύος στο δίκτυο ΥΤ χωρίς περιορισμό, και γ) περιορισμένη άεργη υποστήριξη με άνω όριο μέσω Μετατροπέων Πηγής Τάσης, που προσομοιώνουν τα Αιολικά Πάρκα. Σε κάθε περίπτωση, η παροχή της αέργου ισχύος στο δίκτυο πραγματοποιείται μέσω ελέγχου του επιπέδου τάσης του ζυγού ΥΤ που συνδέει το κάθε Αιολικό Πάρκο με το δίκτυο μεταφοράς. Η απόκριση του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος σε κάθε περίπτωση προσομοιώνεται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα με χρήση του λογισμικού WPSTAB, το οποίο βασίζεται στη μέθοδο της Οιονεί Στατικής Προσέγγισης. Τα αποτελέσματα της κάθε προσομοίωσης αναλύονται και συγκρίνονται με τη βοήθεια PV καμπύλων.

Σε δεύτερο στάδιο, αναπτύσσεται ένα λεπτομερέστερο μοντέλο των δικτύων σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων στην ΜΤ, με σκοπό την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων στην περίπτωση άεργης υποστήριξης μέσω Μετατροπέων Πηγής Τάσης. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού MATLAB, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο WPSTAB. Η εμφάνιση υπερτάσεων στα αποτελέσματα οδηγεί στην εκ νέου προσομοίωση του Συστήματος, συμπεριλαμβάνοντας δυνατότητα αντιμετώπισης υπέρτασης στα Αιολικά Πάρκα.

## Λέξεις Κλειδιά

Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, Αιολικά Πάρκα, on-line VSA, περιθώρια ασφάλειας, άεργη υποστήριξη, ασφάλεια τάσης, Μετατροπέας Πηγής Τάσης, αντιμετώπιση υπέρτασης, συστοιχίες πυκνωτών, PV καμπύλες, δίκτυο σύνδεσης





## **Abstract**

In the current diploma thesis, the possibility of a loadability limit increase of the Hellenic Interconnected System is examined, using reactive support provided by distributed generation. The on-line Voltage Security Assessment tool (on-line VSA), installed at the National Energy Control Center, located an insecure snapshot of the System in the summer of 2010. The security violation referred to the load restoration failure of the local power network of Peloponnese and the resulting collapse of the System, following a critical contingency. The main objective of the current thesis is the increase of security margins for the Peloponnese power network through reactive power support of 7 local Wind Farms.

Initially, three cases of reactive support are examined: a) switched capacitor banks connected to the HV/MV substations of the Wind Farms, b) unlimited reactive power supply capability on the HV bus, and c) limited reactive support by an upper limit of Voltage Source Converters (VSCs), representing the Wind Farms. In each case, the network reactive power supply is determined through voltage control of the HV bus that connects each Wind Farm to the transmission network. The System response is simulated, in each case, using long-term time scale simulation software WPSTAB, which is based on the quasi steady-state approximation. PV curves are used to analyze and compare the results of each simulation.

In a second level, a more detailed model of the connection grid (feeder) of each Wind Farm to the MV side is developed, so that more reliable results are extracted in the case of reactive support through VSCs. The simulation is performed in MATLAB, using the results of the simulation in WPSTAB. The appearance of overvoltage in the results leads to a new simulation, including overvoltage suppression schemes at the Wind Farms.

## **Key Words**

Hellenic Interconnected System, Wind Farms, on-line VSA, security margins, reactive support, voltage security, Voltage Source Converter (VSC), overvoltage protection, switchable capacitor banks, PV curves, connection grid (feeder)



# Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	17
1.1	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	17
1.1.1	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	17
1.1.2	Αιολική Ενέργεια.....	18
1.1.3	Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	19
1.2	Ευστάθεια τάσης.....	22
1.2.1	Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης.....	22
1.2.2	Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης.....	23
1.3	Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες Ισχύος-Τάσης (PV).....	24
1.4	Χαρακτηριστικές Φορτίου και Φαινόμενα Αστάθειας Τάσης.....	28
1.5	Λειτουργικά Όρια Σύγχρονων Γεννητριών.....	31
1.6	Σκοπός και Δομή της Εργασίας.....	33
2	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	35
2.1	Παράσταση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας ως Δυναμικό Σύστημα.....	35
2.2	Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης.....	37
2.2.1	Βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης.....	37
2.2.2	Μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης.....	38
2.2.3	Μέθοδοι Αντιμετώπισης Μακροπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης.....	39
2.3	Οιονεί Στατική Προσέγγιση.....	40
2.4	Μοντέλο Μακροπρόθεσμης Χρονικής Κλίμακας.....	41
2.4.1	Γενικά.....	41
2.4.2	Παράσταση Σύγχρονης Γεννήτριας.....	43
2.4.3	Παράσταση Ρυθμιστή Στροφών.....	44
2.4.4	Παράσταση Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT).....	44
2.4.5	Παράσταση Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ).....	44
2.4.6	Παράσταση Προστασίας Γεννήτριας από Υπόταση.....	45
2.4.7	Παράσταση Προστασίας Ρεύματος Τυμπάνου (ΠΡΤ).....	45
2.4.8	Παράσταση Μετασηματιστών με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ).....	47
2.4.9	Παράσταση Φορτίων.....	48

2.4.10	Παράσταση Αυτόματων Μηχανισμών Ζεύξης – Απόζευξης Πυκνωτών.....	49
2.4.11	Παράσταση Δικτύου.....	49
2.5	Πρόγραμμα Προσομοίωσης WPSTAB.....	51
2.5.1	Πρόγραμμα Προσδιορισμού Σημείων Ισορροπίας (ΠΠΣΙ).....	51
2.5.2	Πρόγραμμα Προσομοίωσης στην Μακροπρόθεσμη Κλίμακα (ΠΠΜΚ).....	52
2.6	Εκτίμηση Ασφάλειας Τάσης.....	55
2.6.1	Στατική και Δυναμική Ανάλυση Ασφάλειας.....	55
2.6.2	Εκτίμηση Ασφάλειας Τάσης σε Πραγματικό Χρόνο στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	57
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	59
3.1	Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα και το Στιγμιότυπο του Ιουνίου 2010.....	59
3.2	Παράσταση Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου.....	64
3.3	Αύξηση Ικανότητας Φόρτισης με Χρήση Συστοιχιών Πυκνωτών.....	68
3.4	Έγχυση Αέργου Ισχύος Χωρίς Περιορισμούς από τα Αιολικά Πάρκα.....	71
3.5	Έγχυση Αέργου Ισχύος από Μετατροπείς Πηγής Τάσης.....	75
3.5.1	Αναπαράσταση Αιολικών Πάρκων με Μετατροπείς Ισχύος στο WPSTAB... ..	75
3.5.2	Προσομοίωση περιορισμού ρεύματος στα Αιολικά Πάρκα.....	77
3.5.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	78
3.6	Συγκριτικά Αποτελέσματα.....	87
4	ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΤΕΡΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ.....	89
4.1	Μοντέλο Προσομοίωσης Δικτύου Σύνδεσης Αιολικών Πάρκων.....	89
4.2	Επίδραση του Δικτύου Σύνδεσης στην Παρεχόμενη Υποστήριξη από τα Αιολικά Πάρκα.....	92
4.3	Αντιμετώπιση του Προβλήματος Υπέρτασης.....	101
4.4	Αποτελέσματα με Αλλαγή του Μοντέλου στο WPSTAB.....	103
4.4.1	Επίδραση αλλαγών στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα.....	103
4.4.2	Αποτελέσματα αντιμετώπισης υπέρτασης.....	106
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....	117
5.1	Συμπεράσματα.....	117
5.2	Προοπτικές.....	119
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχ. 1.1: Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα .....	21
Σχ. 1.2: Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας .....	23
Σχ. 1.3: Ακτινικό δίκτυο .....	25
Σχ. 1.4: Τάση συναρτήσει ενεργών και άεργων ισχύων φορτίου .....	26
Σχ. 1.5: Καμπύλες PV .....	27
Σχ. 1.6: Καμπύλες PV συστήματος και φορτίου.....	29
Σχ. 1.7: Φαινόμενα αστάθειας τάσης μέσω αύξησης ζήτησης (α) και διαταραχής (β) ( $\alpha = \beta = 0.7$ ) .....	30
Σχ. 1.8: Καμπύλες ικανότητας φόρτισης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα χωρίς κορεσμό ..	31
Σχ. 2.1: Προσεγγιστικά μοντέλα ΣΗΕ .....	42
Σχ. 2.2: Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	50
Σχ. 2.3: Διάγραμμα Ροής ΠΠΣΙ.....	52
Σχ. 2.4: Διάγραμμα Ροής ΠΠΜΚ .....	54
Σχ. 3.1: Τάσεις ζυγών 794 και 625 .....	60
Σχ. 3.2: Τάσεις ζυγών 761 και 499 .....	62
Σχ. 3.3: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου .....	63
Σχ. 3.4: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος .....	63
Σχ. 3.5: Τάσεις των ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου .....	65
Σχ. 3.6: Αρχικό μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στην YT .....	66
Σχ. 3.7: Ισοδύναμο μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στη MT.....	66
Σχ. 3.8: Απλουστευμένο ισοδύναμο μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στη MT .....	66
Σχ. 3.9: Τάσεις των ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου .....	69
Σχ. 3.10: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου .....	70
Σχ. 3.11: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος .....	70
Σχ. 3.12: Άεργος παραγωγή ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων.....	73
Σχ. 3.13: PV καμπύλη της Πελοποννήσου .....	74
Σχ. 3.14: PV καμπύλη του συνολικού δικτύου.....	74
Σχ. 3.15: Μοντέλο πηγής τάσης με εσωτερική αντίδραση .....	76
Σχ. 3.16: Τάση ζυγού YT 610.....	79
Σχ. 3.17: Εσωτερική ΗΕΔ του ΜΠΤ του ζυγού YT 610.....	79
Σχ. 3.18: Ενεργός παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό YT 610.....	80
Σχ. 3.19: Άεργος παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό YT 610 .....	80
Σχ. 3.20: Ρεύμα πηγής τάσης στο ζυγό YT 610.....	81
Σχ. 3.21: Τάσεις ζυγών YT των ΑΠ .....	83
Σχ. 3.22: ΗΕΔ των ΑΠ.....	83
Σχ. 3.23: Ενεργός παραγωγή των ΑΠ.....	84
Σχ. 3.24: Άεργος παραγωγή των ΑΠ .....	84
Σχ. 3.25: Ρεύμα των ΑΠ .....	85
Σχ. 3.26: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου .....	86
Σχ. 3.27: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος .....	86
Σχ. 3.28: Καμπύλες PV της Πελοποννήσου .....	88
Σχ. 3.29: Καμπύλες PV του συνολικού συστήματος.....	88

Σχ. 4.1: Μοντέλο δικτύου σύνδεσης Αιολικού Πάρκου.....	90
Σχ. 4.2: Τάση του ζυγού ΜΤ WF610 του Αιολικού Πάρκου.....	93
Σχ. 4.3: Άεργος ισχύς του ζυγού ΜΤ WF610 του Αιολικού Πάρκου.....	94
Σχ. 4.4: Ρυθμιζόμενη τάση $V_{2i}$ ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610.....	94
Σχ. 4.5: Μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610.....	95
Σχ. 4.6: Ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών του ΑΠ WF610.....	95
Σχ. 4.7: Άεργος παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό ΥΤ 610.....	97
Σχ. 4.8: Τάση ζυγού ΥΤ 610.....	97
Σχ. 4.9: Τάσεις ζυγών ΜΤ των ΑΠ.....	98
Σχ. 4.10: Ενεργός ισχύς των ζυγών ΜΤ των ΑΠ.....	98
Σχ. 4.11: Άεργός ισχύς των ζυγών ΜΤ των ΑΠ.....	99
Σχ. 4.12: Ρυθμιζόμενες τάσεις των ΣΑΤΥΦ των ΑΠ.....	99
Σχ. 4.13: Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ των ΑΠ.....	100
Σχ. 4.14: Μοντέλο πηγής τάσης με εσωτερική αντίδραση.....	101
Σχ. 4.15: Τάση ζυγού ΥΤ 610 πριν και μετά την αλλαγή.....	104
Σχ. 4.16: Εσωτερική τάση πριν και μετά την αλλαγή.....	104
Σχ. 4.17: Έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό ΥΤ 610 πριν και μετά την αλλαγή.....	105
Σχ. 4.18: Έγχυση ρεύματος στο ζυγό ΥΤ 610 πριν και μετά την αλλαγή.....	105
Σχ. 4.19: Καμπύλη PV Πελοποννήσου.....	107
Σχ. 4.20: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος.....	107
Σχ. 4.21: Τάση του ζυγού ΜΤ WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	108
Σχ. 4.22: Άεργος ισχύς του ζυγού ΜΤ WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	108
Σχ. 4.23: Ρυθμιζόμενη τάση $V_{2i}$ ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης..	109
Σχ. 4.24: Μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	109
Σχ. 4.25: Ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης	110
Σχ. 4.26: Τάση του ζυγού ΜΤ WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	111
Σχ. 4.27: Ρυθμιζόμενη τάση $V_{2i}$ ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης..	111
Σχ. 4.28: Τάση των ζυγών ΜΤ των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	113
Σχ. 4.29: Ενεργός ισχύς των ζυγών ΜΤ των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	113
Σχ. 4.30: Άεργος ισχύς των ζυγών ΜΤ των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	114
Σχ. 4.31: Ρυθμιζόμενες τάσεις των ΣΑΤΥΦ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	114
Σχ. 4.32: Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ με αντιμετώπιση υπέρτασης.....	115

## Κατάλογος Πινάκων

Πίν. 3.1: Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση .....	61
Πίν. 3.2: Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου .....	64
Πίν. 3.3: Δεδομένα ζυγών ΜΤ Αιολικών Πάρκων .....	67
Πίν. 3.4: Στοιχεία ΣΑΤΥΦ Αιολικών Πάρκων.....	68
Πίν. 3.5: Όρια τάσεων ζεύξης/απόζευξης πυκνωτών των υποσταθμών ΜΤ .....	68
Πίν. 3.6: Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση .....	69
Πίν. 3.7: Στοιχεία ζυγών ΑΠ για τον προσδιορισμό αναγκαίας άεργης υποστήριξης .....	72
Πίν. 3.8: Άεργος υποστήριξη των ζυγών ΥΤ των Αιολικών Πάρκων στο τέλος της προσομοίωσης.....	73
Πίν. 3.9: Δεδομένα Μετατροπέων Πηγής Τάσης που προστέθηκαν στο WPSTAB.....	77
Πίν. 3.10: Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση .....	78
Πίν. 3.11: Τάσεις ζυγών ΥΤ στα ΑΠ στο τέλος της προσομοίωσης.....	85
Πίν. 3.12: Όρια φόρτισης, περιθώρια ασφάλειας και διαθέσιμη άεργη υποστήριξη .....	87
Πίν. 4.1: Αρχικά στοιχεία των ΣΑΤΥΦ.....	93
Πίν. 4.2: Χρόνοι ζεύξης των συστοιχιών πυκνωτών .....	100
Πίν. 4.3: Τιμές μέγιστης εσωτερικής τάσης με αντιμετώπιση υπέρτασης .....	102
Πίν. 4.4: Χρόνοι ζεύξης των συστοιχιών πυκνωτών με αντιμετώπιση υπέρτασης .....	115





# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

### 1.1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) περιλαμβάνει το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και του εξοπλισμού που διατίθενται για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, ιδιωτών και βιομηχανιών για χώρες ή περιοχές. Η λειτουργία ενός ΣΗΕ έγκειται στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των αντίστοιχων καταναλωτών. Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας σπάνια πραγματοποιείται στην αρχική μορφή της και συνήθως μετατρέπεται σε πιο άμεσα αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας, όπως η θερμική, η μηχανική ή απλά ο φωτισμός. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στην δυνατότητα της εύκολης μεταφοράς και της ελεγχιμότητας που προσφέρει με σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης και αξιοπιστίας. Η ορθή λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει την τήρηση κάποιων βασικών αρχών και απαιτήσεων [1]:

1. Το σύστημα οφείλει να ανταποκρίνεται επαρκώς σε συνεχείς αλλαγές της ζήτησης του φορτίου. Η ηλεκτρική ενέργεια δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη και επομένως η συνεχής προσαρμογή στην κατανάλωση μέσω του ελέγχου της παρεχόμενης ισχύος είναι απαραίτητη.
2. Το σύστημα πρέπει να παρέχει ενέργεια με το λιγότερο δυνατό οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.
3. Η ποιότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχει πρέπει περιλαμβάνει σταθερή συχνότητα και τάση και υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τα ΣΗΕ ποικίλλουν τόσο σε μέγεθος όσο και σε χαρακτηριστικά. Ωστόσο, κάποια κοινά χαρακτηριστικά εμφανίζονται σε κάθε ΣΗΕ ανεξαιρέτως και αφορούν κυρίως τη βασική δομή τους. Τα στάδια της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας συναποτελούν τη λειτουργία κάθε ΣΗΕ και είναι ζωτικής σημασίας.

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρεται στη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας (π.χ. θερμική, υδραυλική, πυρηνική ενέργεια, κ.τ.λ.) αρχικά σε μηχανική μέσω κινητήριων μηχανών (π.χ. στροβίλων) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω σύγχρονων γεννητριών [4]. Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή σήμερα προέρχεται κυρίως από την καύση ορυκτών καυσίμων, από την ροή ή την πτώση υδάτων, από την πυρηνική σχάση και τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, τα θαλάσσια ρεύματα, η ηλιακή ενέργεια κ.τ.λ.. Το σύστημα παραγωγής ενός ΣΗΕ περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς

ανύψωσης της τάσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις [2].

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από εγκαταστάσεις ισχύος που αναλαμβάνουν τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Οι εγκαταστάσεις αυτές περιλαμβάνουν γραμμές υψηλής τάσης, υποσταθμούς για το μετασχηματισμό των διάφορων επιπέδων τάσεων του συστήματος και υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης σε Μέση Τάση (ΜΤ) προς τροφοδότηση των περιοχών καταναλώσεως. Η υψηλή τάση που επικρατεί στο δίκτυο μεταφοράς βοηθά στην μείωση των απωλειών και συνεπώς σε οικονομικότερη λειτουργία. Οι πιο διαδεδομένες ονομαστικές τάσεις μεταφοράς σήμερα περιλαμβάνουν τιμές όπως 66 kV, 110 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV, 275 kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV και 750 kV [3]. Επίσης, το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί και βιομηχανικούς καταναλωτές ΥΤ, οι οποίοι διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της τάσης και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system) [1].

Το σύστημα διανομής είναι υπεύθυνο για την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των καταναλωτών. Περιλαμβάνει κυρίως της γραμμές διανομής, μέσω των οποίων η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους υποσταθμούς του συστήματος μεταφοράς στους καταναλωτές. Η έννοια του συστήματος διανομής έχει αλλάξει με τα χρόνια. Με τη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, πολλά δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν τον ρόλο της μεταφοράς ενέργειας χαρακτηρίζονται πλέον δίκτυα υπομεταφοράς και αποτελούν μέρος των δικτύων διανομής [3].

### *1.1.2 Αιολική Ενέργεια*

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων από τη μία και η αναπόφευκτη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων από την άλλη, έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Η αιολική ενέργεια, όντας μία από αυτές, έχει διεισδύσει σε πολλά σύγχρονα ΣΗΕ φτάνοντας σε ποσοστά μέχρι και 40% (Δανία) της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, μεγάλα ποσοστά διείσδυσης παρατηρούνται κυρίως σε νησιωτικές περιοχές όπως η Κρήτη (περίπου 20% της ηλεκτρικής ενέργειας).

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται από αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο ΜΤ. Ένας υποσταθμός, ο οποίος εγκαθίσταται σε κοντινή απόσταση, ανυψώνει, μέσω μετασχηματιστή, την τάση σε υψηλή, και έτσι συνδέει όλη την εγκατάσταση σε ένα δίκτυο μεταφοράς. Πολλές φορές, τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται για ενεργειακή υποστήριξη σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου, ενώ σε σπανιότερες περιπτώσεις είναι υπεύθυνα για την αποκλειστική τροφοδότηση απομονωμένων περιοχών. Ωστόσο, η κατασκευή αιολικών

πάρκων δεν είναι πάντα καλοδεχούμενη κυρίως λόγω προβλημάτων αισθητικής ρύπανσης και άλλων επιδράσεων στο τοπικό περιβάλλον [4].

Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα της αιολικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αξιοποιηθεί ανάλογα με τη ζήτηση. Αυτό σημαίνει ότι, για λόγους οικονομίας, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να δέχεται, σε κάθε περίπτωση, το σύνολο της ισχύος που προσφέρουν τα αιολικά πάρκα. Για να αποφευχθεί ένα πιθανό πλεόνασμα παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η χρήση μηχανισμών διαχείρισης ισχύος, όπως η εξαγωγή της πλεονάζουσας ισχύος σε γειτονικά ΣΗΕ, ή ακόμη και η αποθήκευση [4].

Τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά ως αρνητικά φορτία, καθώς το μικρό ποσοστό συμμετοχής τους στην συνολική παραγωγή δεν είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία των ΣΗΕ. Με τον καιρό, η συνεχής αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας άρχισε να κάνει αισθητή την επίδραση της όχι μόνο στη λειτουργία αλλά και στο σχεδιασμό των ΣΗΕ. Ξεκίνησε, επομένως, μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ, των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών [5].

Οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες καθορίζουν την συμπεριφορά τους σε διακυμάνσεις του ανέμου: ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Τα μειονεκτήματα και το σχετικά υψηλό κόστος της πρώτης κατηγορίας οδήγησε στην σχεδόν αποκλειστική κατασκευή και χρήση των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η κατηγορία αυτή επιτρέπει τη μεταβολή των στροφών του δρομέα της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Η παροχή ισχύος στο σύστημα από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πραγματοποιείται είτε μέσω γεννητριών επαγωγής διπλής τροφοδότησης, είτε μέσω σύγχρονων γεννητριών με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρικής ισχύος. Μια πιο αναλυτική περιγραφή των δύο συνδεσμολογιών υπάρχει στο [6].

Ανεξάρτητα από την πραγματική τεχνολογία των ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων, στην παρούσα εργασία, και συγκεκριμένα στα Κεφάλαια 3 και 4, θεωρείται ότι συνεισφέρουν έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος μέχρι την τιμή που επιτρέπουν τα ονομαστικά τους μεγέθη (μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα).

### *1.1.3 Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα*

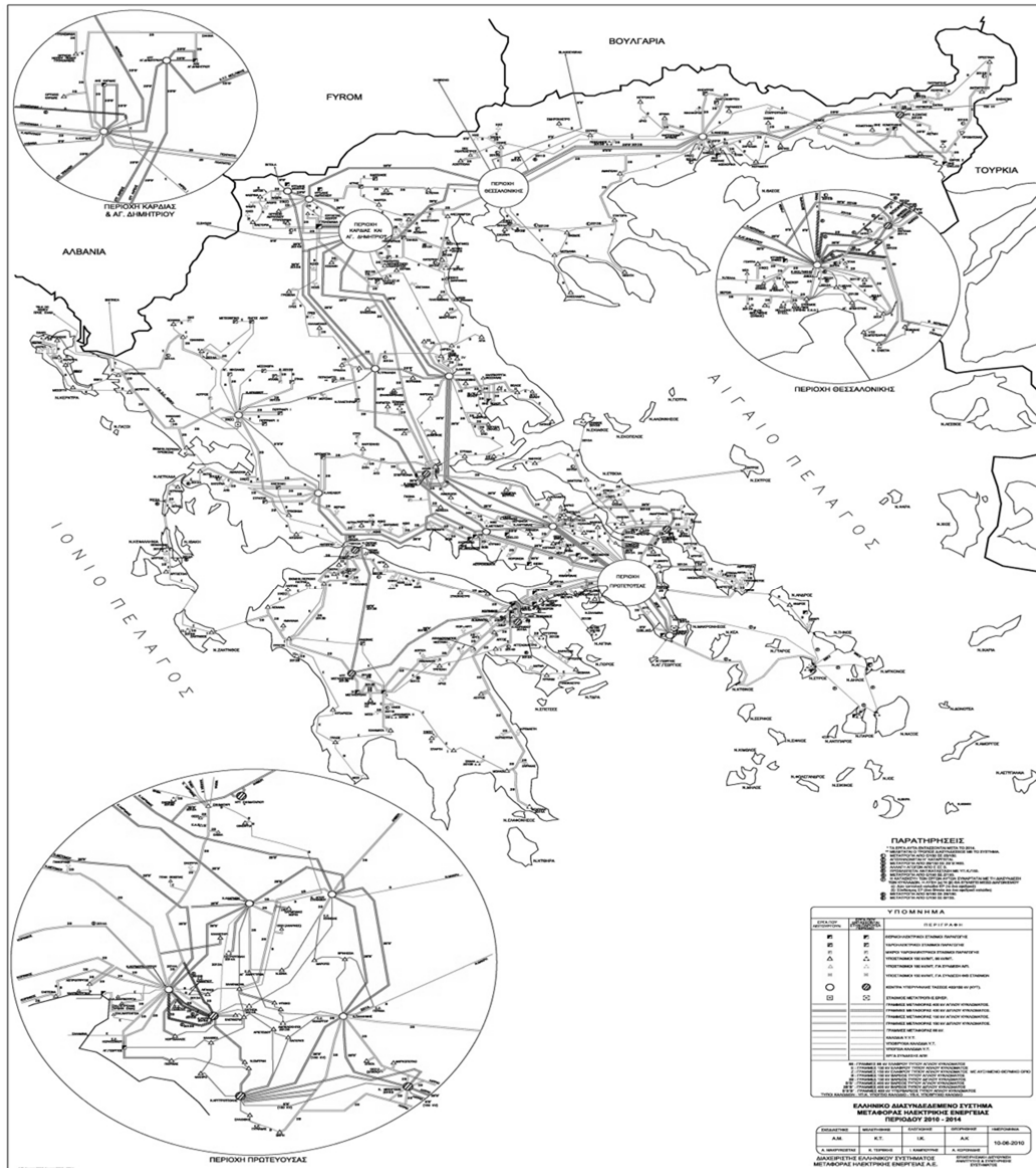
Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα αποτελείται από την παραγωγή και μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στην ηπειρωτική Ελλάδα και σε μερικά από τα γειτονικά νησιά. Η ιδιαιτερότητα του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος έγκειται στο γεγονός ότι, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής βρίσκεται στην βορειοδυτική χώρα, το κυριότερο κέντρο κατανάλωσης εντοπίζεται στο Νότο και κυρίως στην περιοχή της Αττικής. Η γεωγραφική αυτή απόσταση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης οδηγεί, κάτω από συνθήκες υψηλής φόρτισης, σε προβλήματα χαμηλών τάσεων στις περιοχές της Πελοποννήσου, της Θεσσαλίας, της Αττικής και της Στερεάς Ελλάδας.

Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην βόρεια Ελλάδα το 2004 ήταν περίπου 10700 MW, με το 48% να βασίζεται σε καύση λιγνίτη, το 29% σε υδροηλεκτρική παραγωγή, το 14% σε καύση φυσικού αερίου, το 7% σε καύση πετρελαίου και το 2% σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην νότια Ελλάδα ήταν περίπου 2860 MW, με τη μεγαλύτερη συμμετοχή να λαμβάνουν τα εργοστάσια στο Λαύριο, τον Άγιο Γεώργιο, το Αλιβέρι και το εργοστάσιο της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο [7].

Στο Σχ. 1.1 απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος. Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται κυρίως από γραμμές των 400 kV της υπέρ-υψηλής τάσης (YYT) και των 150 kV της υψηλής (YT) (οι γραμμές των 66 kV είναι ελάχιστες). Το δίκτυο διανομής λειτουργεί στο επίπεδο των 20 kV και χαρακτηρίζεται ως μέση τάση (MT). Οι υποσταθμοί διανομής (YT/MT) είναι εξοπλισμένοι με μετασχηματιστές 150/20 kV, με λειτουργία Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) για τον έλεγχο της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών έχουν σταθερές λήψεις και οι αυτομετασχηματιστές 400/150 kV έχουν ΣΑΤΥΦ χωρίς αυτόματη ρύθμιση που λειτουργούν με χειρισμό. Οι ανάγκες για αντιστάθμιση αέργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων. Συστοιχίες πυκνωτών συνολικής ισχύος 4150 MVA<sub>r</sub> είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς MT των υποσταθμών, ενώ έχουν εγκατασταθεί και επιπρόσθετες συστοιχίες YT, συνολικής ισχύος 450 MVA<sub>r</sub> σε σταθμούς παραγωγής. Επίσης, έχουν εγκατασταθεί πηνία YT σε υποσταθμούς για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου. Τα φορτία του συστήματος βρίσκονται κατά κανόνα συγκεντρωμένα στους ζυγούς MT των υποσταθμών διανομής, ενώ υπάρχουν και βιομηχανικά φορτία συνδεδεμένα απευθείας στην YT [8].

Από τον Οκτώβριο του 2004, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδεδετικών γραμμών μεταφοράς με τις γειτονικές χώρες. Πιο συγκεκριμένα, συνδέεται με τη ΠΓΔΜ μέσω δύο γραμμών 400 kV από τη Θεσσαλονίκη και τη Μελίτη, στο Durbono και Bitola, αντίστοιχα. Στα βορειοανατολικά υπάρχει μια σύνδεση με την Αλβανία μέσω δύο γραμμών μεταφοράς, μια των 400 kV από την περιοχή της Καρδιάς στο Zemblak και μια των 150 kV από τον Υ/Σ Μούρτου στον ΥΗΣ Bistrica. Η σύνδεση με τη Βουλγαρία επιτυγχάνεται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς 400 kV μεταξύ Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad. Επιπλέον, το Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα μέσω υποβρύχιου καλωδίου συνεχούς ρεύματος 500 kV με την Ιταλία και από τις 18 Σεπτεμβρίου του 2010 συνδέεται και με το σύστημα της Τουρκίας, με γραμμή μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος [8].

Η μεγάλη γεωγραφική απόσταση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα ασφάλειας του Συστήματος. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών με την αύξηση του φορτίου, λόγω κλιματιστικών και άλλων παρόμοιων συσκευών. Η οικονομική ύφεση του 2010 μετρίασε το παραπάνω πρόβλημα και η αιχμή του φορτίου παρουσίασε μια σχετική μείωση, η οποία αναμένεται να αυξηθεί και πάλι μελλοντικά [7]. Επιπλέον προσπάθειες για την επίλυση του προβλήματος έχουν γίνει από τη μεριά του ΑΔΜΗΕ μέχρι σήμερα, κυρίως με τη μορφή ένταξης νέων



Σχ. 1.1: Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

μονάδων παραγωγής στο Νότιο σύστημα, της ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης και της διεσπαρμένης παραγωγής [8]. Παρόλα αυτά, καθυστέρηση σημαντικών έργων, όπως η αντικατάσταση των γραμμών μεταφοράς της Πελοποννήσου σε επίπεδα τάσης 400 kV, δεν διευκολύνουν την κατάσταση. Επομένως, κατά καιρούς, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα ήρθε αντιμέτωπο με αρκετές κρίσιμες καταστάσεις λειτουργίας, με τη σημαντικότερη να είναι η διακοπή (black-out) του Ιουλίου 2004 [9], ένα μήνα πριν από την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας.

## 1.2 Ευστάθεια τάσης

### 1.2.1 Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης

Ευστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί την κατάσταση λειτουργίας του, τόσο κάτω από ονομαστικές συνθήκες όσο και μετά από μια διαταραχή που υφίσταται.

Πιο συγκεκριμένα, η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί σταθερές αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του συστήματος κάτω από ονομαστική κατάσταση λειτουργίας και έπειτα από διαταραχή του συστήματος. Επίσης, ένας ορισμός της αστάθειας τάσης έχει προταθεί στο [10], ο οποίος περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου και είναι ο εξής:

*Η αστάθεια τάσης προκαλείται από τη απόπειρα των φορτίων (μέσω της δυναμικής συμπεριφοράς τους) να απορροφήσουν ισχύ μεγαλύτερη από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής και μεταφοράς.*

Τα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συναντούν ένα άνω όριο όσον αφορά τη μέγιστη ισχύ που μπορούν να μεταφέρουν. Το όριο αυτό καθορίζει κατά πόσο ένα σύστημα κινδυνεύει να βρεθεί σε κατάσταση αστάθειας τάσης. Όταν το παραπάνω όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παραβιαστεί, ο μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου τείνει να μειώσει την καταναλισκόμενη ισχύ αντί να την αυξήσει. Στο φαινόμενο αυτό βρίσκεται και η ουσία της έννοιας της αστάθειας τάσης.

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων είναι ένας από τους κύριους λόγους πρόκλησης αστάθειας τάσης. Μετά από εμφάνιση διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεως του συστήματος, όπως ΣΑΤΥΦ, κινητήρες επαγωγής και θερμοστατικά φορτία. Άλλες διατάξεις ελέγχου του συστήματος, όπως η προστασία υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στο φαινόμενο της αστάθειας τάσης [10].

Ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης εμφανίζεται με μορφή συνεχούς πτώσης (ή σπανίως ανόδου) των τάσεων σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Η επιτάχυνση αυτού του φαινομένου προκαλεί, εν τέλει, απότομη βύθιση στις τάσεις, οδηγώντας στο φαινόμενο που ονομάζεται *κατάρρευση τάσης*. Η έννοια της κατάρρευσης έχει οριστεί ως εξής [10]:

*Με τον όρο κατάρρευση εννοούμε μια απότομη (πρακτικά ακαριαία) καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται σε αστάθεια που εξελίσσεται σε ταχύτερη χρονική κλίμακα από την αρχικά θεωρούμενη.*

Η ιστορία έχει δείξει, μέσα από συμβάντα κατάρρευσης τάσης, ότι η εκδήλωση του φαινομένου βασίζεται σε μια ποικιλία αιτιών. Μικρές σταδιακές αλλαγές του φορτίου, μεγάλες ξαφνικές διαταραχές, όπως η απώλεια μιας μονάδας παραγωγής, ή εξαιρετικά

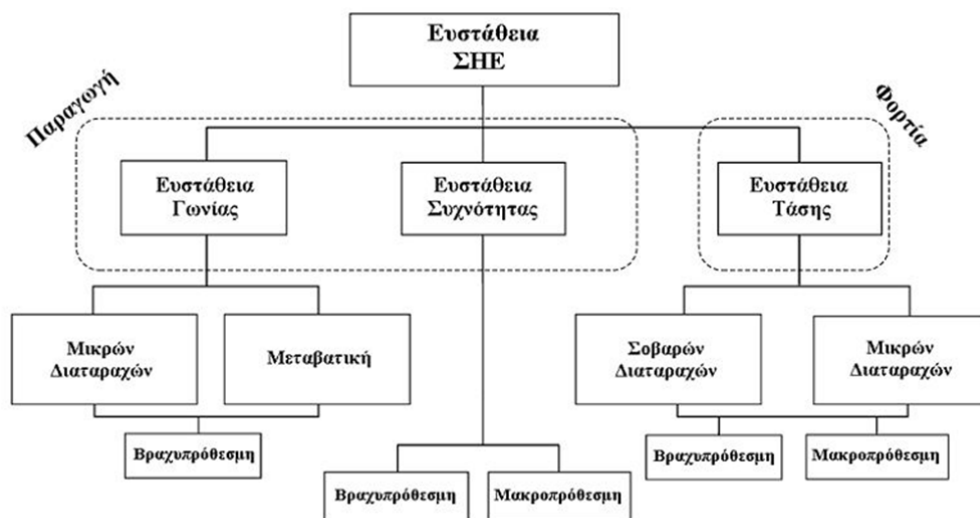
φορτισμένες γραμμές μεταφοράς είναι μερικές από αυτές. Μερικές φορές, μια κατά τα άλλα αδιάφορη ως προς την ευστάθεια τάσης, διαταραχή μπορεί να οδηγήσει μέσω διαδοχικών διαταραχών σε κατάρρευση τάσης. Η πιθανή κατάρρευση της τάσης, μπορεί εύκολα να ευνοηθεί από τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες του συστήματος, με τα πιο σημαντικά να είναι [1]:

- Μεγάλες αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης
- Λειτουργία ΣΑΤΥΦ σε καταστάσεις χαμηλού επιπέδου τάσεων μεταφοράς
- Δυσμενή χαρακτηριστικά φορτίων
- Κακός και άστοχος συντονισμός του συνόλου των συστημάτων προστασίας και ελέγχου

### 1.2.2 Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης

Ενώ η ευστάθεια ενός ΣΗΕ φαίνεται να αποτελεί ενιαίο πρόβλημα, θα ήταν δύσκολο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί με αυτό τον τρόπο. Η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας σε διάφορες μορφές αποδείχτηκε αναγκαία, αφού η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που ο καθένας επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο το σύστημα και χρίζει διαφορετικής αντιμετώπισης. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχ. 1.2, ενώ ο διαχωρισμός τους έγινε σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια [1]:

- Η φύση της αστάθειας
- Το μέγεθος της διαταραχής που προκαλεί την αστάθεια
- Ο εξοπλισμός, οι μηχανισμοί, οι διαδικασίες και το χρονικό διάστημα που πρέπει να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε να μελετηθεί η αστάθεια
- Η καταλληλότερη μέθοδος αντιμετώπισης και πρόβλεψης της αστάθειας.



Σχ. 1.2: Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας

Όπως και τα υπόλοιπα είδη ευστάθειας, η ευστάθεια τάσης μπορεί να διαχωριστεί σε κατηγορίες με βάση διαφορετικά κριτήρια. Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αποτελεί το μέγεθος της διαταραχής που προκάλεσε την απώλεια της ευστάθειας. Με βάση αυτό το κριτήριο, η ευστάθεια τάσης κατηγοριοποιείται σε ευστάθεια τάσης *μεγάλων διαταραχών* και *μικρών διαταραχών* [1]. Ο διαχωρισμός αυτός χρησιμοποιείται στην επιλογή της μεθόδου ανάλυσης των φαινομένων αστάθειας.

Η *ευστάθεια τάσης μεγάλων διαταραχών* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε περιπτώσεις εμφάνισης σημαντικών διαταραχών όπως σφάλματα συστήματος, απώλεια γεννήτριας ή απώλεια γραμμής μεταφοράς. Η ικανότητα αυτή καθορίζεται από το μέγεθος του φορτίου που καλείται να καλύψει το σύστημα, καθώς και από τη λειτουργία και αλληλεπίδραση διάφορων συνεχών ή διακριτών διατάξεων, όπως τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών. Ο εντοπισμός της αστάθειας τάσης πραγματοποιείται συνήθως με μη γραμμική δυναμική ανάλυση του συστήματος για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να εντοπιστεί και η επίδραση τέτοιων διατάξεων [1].

Η *ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε συνθήκες μικρών διαταραχών, όπως σταδιακή αύξηση του φορτίου. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από το καταναλισκόμενο φορτίο και τις αλληλεπιδράσεις διατάξεων, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Η ανάλυση της ευστάθειας τάσης του συστήματος για περιπτώσεις εμφάνισης μικρών διαταραχών πραγματοποιείται με γραμμικοποίηση γύρω από ένα δεδομένο σημείο λειτουργίας, το οποίο χαρακτηρίζεται ευσταθές ή ασταθές [1].

Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού της ευστάθειας τάσης αποτελεί η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Με βάση αυτό το κριτήριο η ευστάθεια τάσης χωρίζεται σε *βραχυπρόθεσμη* και *μακροπρόθεσμη* [10]. Μια πιο αναλυτική περιγραφή της κάθε κατηγορίας παρουσιάζεται στο επόμενο Κεφάλαιο.

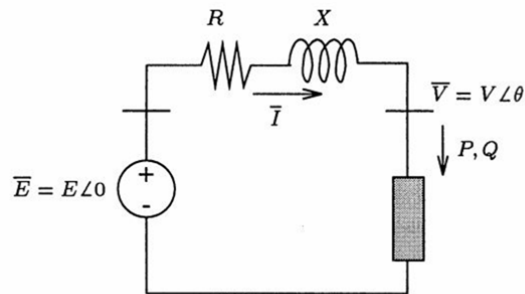
### **1.3 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες Ισχύος-Τάσης (PV)**

Ένας βασικός παράγοντας στην εμφάνιση αστάθειας τάσης ενός συστήματος αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [10]. Το σύστημα έχει την ικανότητα να παρέχει μια μέγιστη ποσότητα ισχύος, η οποία αναφέρεται ως *μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς*. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ενός συστήματος προσδιορίζεται βάσει των διατάξεων και της τοπολογίας του. Η βασική ιδέα προκύπτει από την ανάλυση του ακτινικού δικτύου του Σχ. 1.3, το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και ένα φορτίο.

Για λόγους απλότητας, θεωρούμε ότι η μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο γίνεται χωρίς ωμικές απώλειες ( $R = 0$ ) μέσω της αντίδρασης  $X$ . Επίσης, θεωρούμε ότι η πηγή τάσης



παρέχει σταθερή τάση  $E$ . Το μέτρο και η γωνία της τάσης του φορτίου είναι  $V$  και  $\theta$  αντίστοιχα.



Σχ. 1.3: Ακτινικό δίκτυο

Σύμφωνα με το Σχ. 1.3 έχουμε:

$$\hat{V} = \hat{E} - jX\hat{I} \quad (1.1)$$

Η φαινόμενη ισχύς  $S$  που απορροφάται από το φορτίο είναι:

$$S = P + jQ = \hat{V} \hat{I}^* = \hat{V} \frac{\hat{E}^* - \hat{V}^*}{-jX} = \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \quad (1.2)$$

το οποίο αναλύεται ως:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (1.3)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (1.4)$$

Οι εξισώσεις (1.3) και (1.4) ονομάζονται εξισώσεις ροής ισχύος ή ροής φορτίου ενός δικτύου χωρίς απώλειες. Για δεδομένο φορτίο  $(P, Q)$  οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται ως προς  $V$  και  $\theta$ , με χρήση των οποίων προσδιορίζονται και τα υπόλοιπα μεγέθη.

Με την απαλοιφή του  $\theta$  στις εξισώσεις (1.3) και (1.4) λαμβάνουμε τη γνωστή διτετράγωνη εξίσωση:

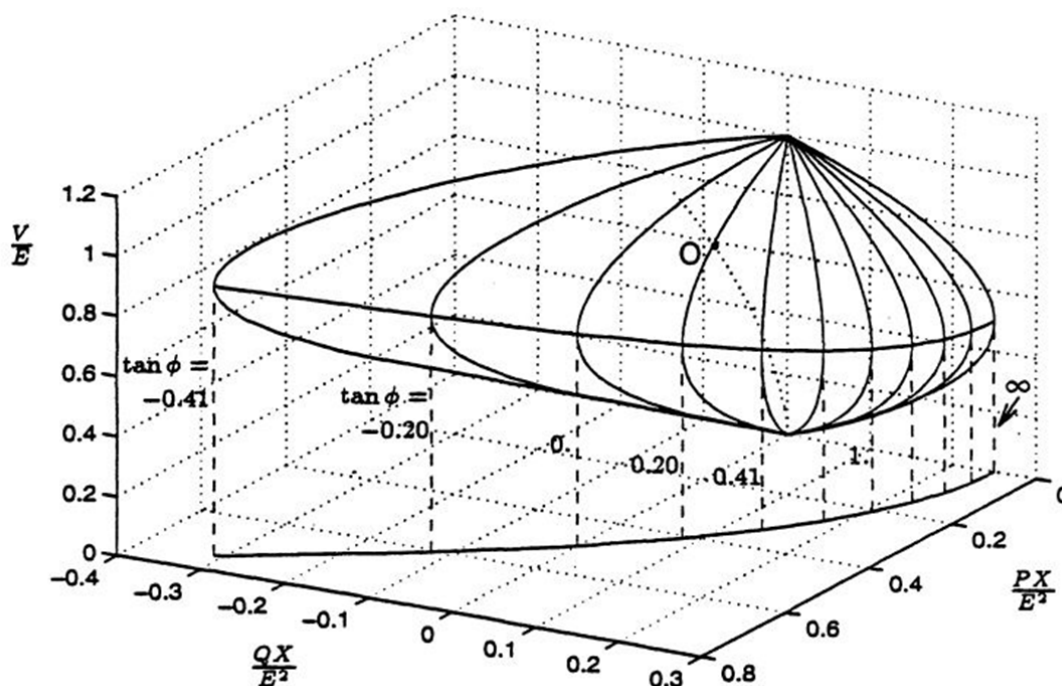
$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.5)$$

Για την ύπαρξη λύσης της εξίσωσης (1.5) πρέπει:

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.6)$$

Υποθέτοντας ότι η ανίσωση (1.6) ικανοποιείται, οι δύο λύσεις της εξίσωσης (1.5) δίνονται από τον τύπο:

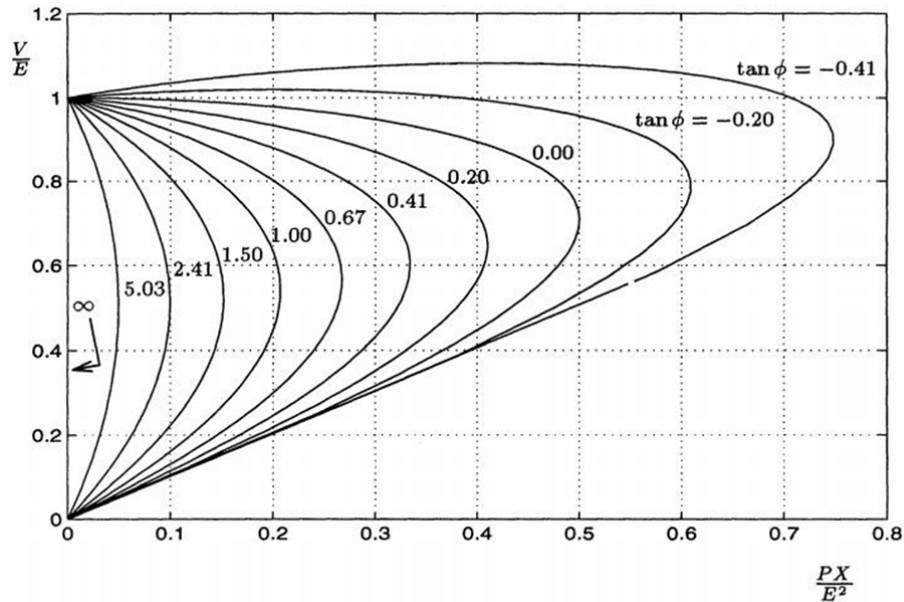
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX} \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2 P^2 - XE^2 Q} \quad (1.7)$$



Σχ. 1.4: Τάση συναρτήσει ενεργών και άεργων ισχύων φορτίου

Στον τρισδιάστατο χώρο  $(P, Q, V)$ , η εξίσωση (1.7) ορίζει την επιφάνεια δύο διαστάσεων που φαίνεται στο Σχ. 1.4. Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «+» στην εξίσωση (1.7), ή αλλιώς στη λύση υψηλής τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «-» στην εξίσωση (1.7), ή αλλιώς στη λύση χαμηλής τάσης. Ο «ισημερινός» της επιφάνειας, όπου οι δύο λύσεις είναι όμοιες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Οι «μεσημβρινοί» του Σχ. 1.4 αντιστοιχούν σε τομές της επιφάνειας με κατακόρυφο επίπεδο  $Q = P \tan \phi$ , με το  $\phi$  να μεταβάλλεται μεταξύ  $-\pi/8$  και  $\pi/2$  με βήμα  $\pi/16$ . Η προβολή αυτών των μεσημβρινών στο επίπεδο  $P, V$  μας δίνει καμπύλες της τάσης  $V$  συναρτήσεως της ενεργού ισχύος  $P$ , με μεταβλητό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες αυτές, που φαίνονται στο Σχ. 1.5, ονομάζονται *καμπύλες ισχύος-τάσης* (καμπύλες  $PV$ ) και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και την ανάλυση της αστάθειας τάσης.



Σχ. 1.5: Καμπύλες PV

Παρατηρώντας τις καμπύλες PV του Σχ. 1.5, συμπεραίνουμε ότι [10]:

1. Για δεδομένη ενεργό ισχύ του φορτίου υπάρχουν δύο λύσεις: μια με υψηλή τάση και χαμηλό ρεύμα και μία με χαμηλή τάση και υψηλό ρεύμα. Η πρώτη αντιστοιχεί σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας, με τη τάση  $V$  σε πιο κοντινές τιμές με τη τάση γεννήτριας  $E$ . Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, διότι αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο.
2. Όσο αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρότερα  $\tan\phi$ ), αυξάνεται και η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Ταυτόχρονα, όμως, αυξάνεται και η τιμή της τάσης, στην οποία εμφανίζεται το μέγιστο. Αυτό είναι επικίνδυνο από την άποψη ότι, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς επιτυγχάνεται σε υψηλές τιμές τάσεις και κοντά στην ονομαστική, μειώνοντας έτσι τα περιθώρια μεταβολής της τάσης. Επίσης, σε πολύ μεγάλο βαθμό αντιστάθμισης και την ισχύ να πλησιάζει τη μέγιστη τιμή της, δυσκολεύει ο προσδιορισμός της τάσης που αντιστοιχεί σε κανονική λειτουργία, απαιτώντας λεπτομερέστερη ανάλυση.
3. Για υπέρ-αντισταθμισμένα φορτία ( $\tan\phi < 0$ ), ένα τμήμα της καμπύλης PV δείχνει ότι η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι, υπό αρνητικό  $\tan\phi$ , όσο αυξάνεται η κατανάλωση της ενεργού ισχύος, τόσο αυξάνεται η παραγωγή αέργου ισχύος. Επομένως, σε συνθήκες χαμηλής ισχύος φορτίου, η μείωση της τάσης που προκαλείται από την κατανάλωση της ενεργού ισχύος αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη παραγωγή της αέργου. Όσο πιο αρνητικό το  $\tan\phi$ , τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της PV καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

## 1.4 Χαρακτηριστικές Φορτίου και Φαινόμενα Αστάθειας Τάσης

Η έννοια της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος σε ένα σύστημα, παίζει σημαντικό ρόλο στην πιθανότητα εμφάνισης αστάθειας τάσης. Όσο τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ, το σύστημα πλησιάζει όλο και περισσότερο το όριο της μέγιστης ισχύος που μπορεί να παρέχει.

Γενικά, τα φορτία καταναλώνουν ισχύ με βάση την τάση και την συχνότητα. Εφόσον, εδώ εξετάζονται φαινόμενα αστάθειας τάσης, θεωρείται ότι η ισχύς των φορτίων εξαρτάται από την τάση  $V$  του ζυγού που βρίσκεται συνδεδεμένο και από μια αδιάστατη μεταβλητή ζήτησης  $z$ , που εκφράζει το σύνολο του συνδεδεμένου εξοπλισμού. Η παραπάνω σχέση ονομάζεται *χαρακτηριστική φορτίου* και εκφράζεται με τη γενική μορφή [10]:

$$P = P(V, z) \quad (1.8)$$

$$Q = Q(V, z) \quad (1.9)$$

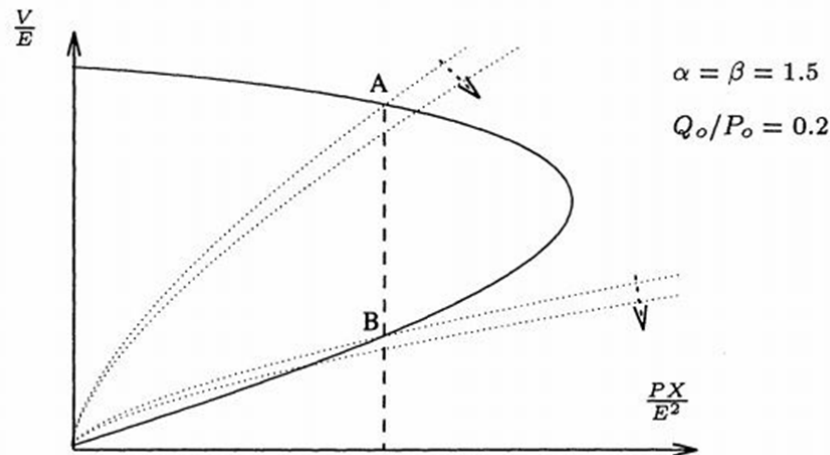
Η σχέση (1.8) ονομάζεται *χαρακτηριστική καμπύλη ενεργού φορτίου* και η (1.9) *χαρακτηριστική καμπύλη άεργου φορτίου*. Διαχωρίζονται έτσι από τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές συστήματος που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (εξίσωση (1.5) και Σχ 1.5).

Μια από τις πιο δημοφιλείς χαρακτηριστικές φορτίου είναι αυτή της *εκθετικής μορφής* και εκφράζεται ως [1],[10]:

$$P = zP_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\alpha \quad (1.10)$$

$$Q = zQ_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\beta \quad (1.11)$$

όπου  $\alpha$ ,  $\beta$  αδιάστατες μεταβλητές,  $P_o$  και  $Q_o$  η ενεργός και η άεργος, αντίστοιχα, ισχύς που καταναλώνεται για μοναδιαία ζήτηση ( $z = 1$ ) με τάση  $V$  ίση με την τάση αναφοράς  $V_o$ . Στο Σχ. 1.6 φαίνεται η καμπύλη PV συστήματος του Σχ. 1.5 που αντιστοιχεί σε  $\tan\phi = 0.2$ , καθώς και δύο καμπύλες φορτίου για  $\alpha = 1.5$  και δεδομένο  $P_o$ , που απεικονίζονται με διακεκομμένες γραμμές. Τα σημεία λειτουργίας Α και Β εκφράζονται από ίδια ισχύ  $P$  αλλά διαφορετική ζήτηση  $z$ .



Σχ. 1.6: Καμπύλες  $PV$  συστήματος και φορτίου

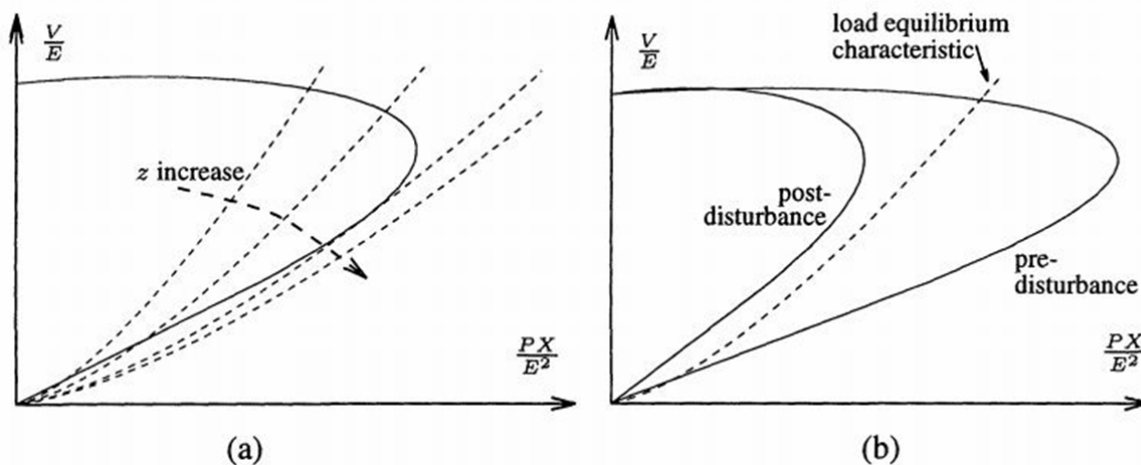
Έστω ότι στη κατάσταση που απεικονίζει το Σχ. 1.6 υπάρξει μια αύξηση στη ζήτηση  $z$ , όπως δείχνουν τα βέλη. Αν το σύστημα βρίσκεται στο σημείο λειτουργίας A, η αύξηση της ζήτησης προκαλεί μείωση της τάσης, αλλά αύξηση του φορτίου. Η συμπεριφορά αυτή είναι και η αναμενόμενη σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αν το σύστημα βρίσκεται στο σημείο λειτουργίας B, η αύξηση στη ζήτηση οδηγεί σε μείωση της τάσης με ταυτόχρονη μείωση στο φορτίο. Ενώ αυτή η συμπεριφορά δεν αποτελεί πρόβλημα σε περιπτώσεις που το φορτίο είναι στατικό, η δυναμική συμπεριφορά που εμφανίζουν συνήθως τα φορτία καθιστά το σημείο B ασταθές.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ευσταθής λειτουργία ενός συστήματος προϋποθέτει την ύπαρξη ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Η ισορροπία αυτή αντιπροσωπεύεται από την τομή των δύο χαρακτηριστικών καμπύλων του Σχ. 1.6. Η μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από πλευρά αστάθειας τάσης, πηγάζει, κυρίως, από την πιθανή διαταραχή αυτής της ισορροπίας.

Η διαταραχή αυτή μπορεί να έχει πολλές μορφές. Στο Σχ. 1.7a απεικονίζεται η απώλεια της ισορροπίας του συστήματος μέσω της συνεχής αύξησης της ζήτησης  $z$  και, εν τέλει, της απώλειας της τομής των δύο χαρακτηριστικών.

Στο Σχ. 1.7b φαίνεται άλλο ένα πιθανό σενάριο αστάθειας. Εδώ εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μετά από την εμφάνιση μιας μεγάλης διαταραχής με τη χαρακτηριστική του φορτίου να παραμένει σταθερή. Οι διαταραχές αυτές συμβολίζουν, συνήθως, απώλειες διατάξεων μεταφοράς ή/και παραγωγής. Στο ακτινικό δίκτυο του Σχ. 1.3, αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της τιμής αντίδρασης  $X$  ή/και σε μείωση της τάσης  $E$ . Σύμφωνα με το Σχ. 1.7b, η διαταραχή προκάλεσε συρρίκνωση της καμπύλης  $PV$  του συστήματος. Έτσι, η σταθερή, κατά τα άλλα, χαρακτηριστική του φορτίου δεν τέμνει πλέον την  $PV$  καμπύλη του συστήματος, δηλώνοντας ότι το σύστημα δεν βρίσκεται πλέον σε θέση να παρέχει την

απαιτούμενη από τα φορτία ισχύ. Η κατάρρευση της τάσης προκαλείται από την αδυναμία απόκτησης σημείου λειτουργίας του συστήματος μετά τη διαταραχή.



Σχ. 1.7: Φαινόμενα αστάθειας τάσης μέσω αύξησης ζήτησης (a) και διαταραχής (b) ( $\alpha = \beta = 0.7$ )

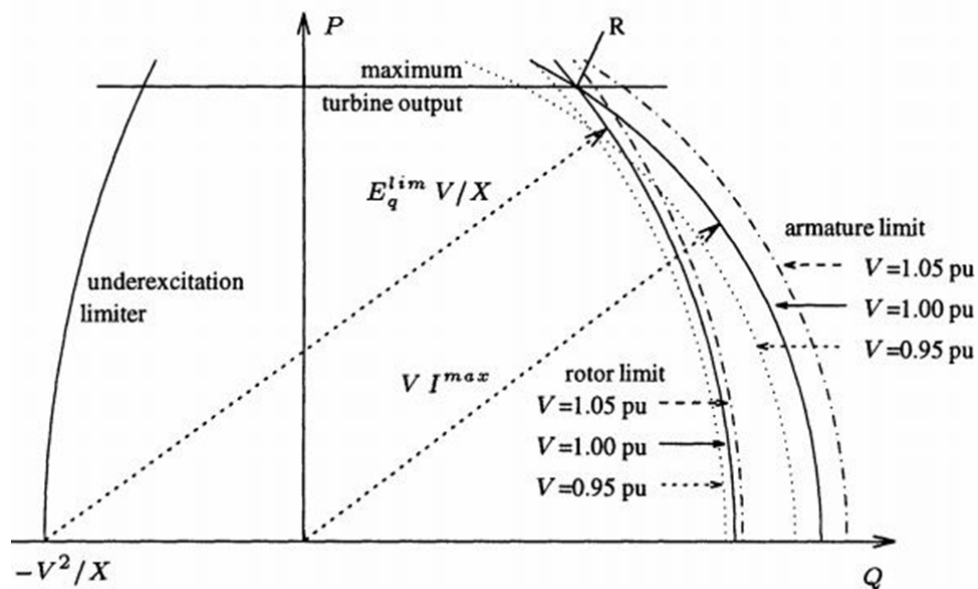
Με τη βοήθεια του Σχ. 1.7a, ορίζεται και η έννοια του *ορίου φόρτισης* ενός συστήματος [10]. Ως όριο φόρτισης θεωρείται το σημείο στο οποίο η χαρακτηριστική του φορτίου εφάπτεται στην καμπύλη  $PV$  του συστήματος. Η αύξηση του φορτίου πέρα από το όριο φόρτισης οδηγεί σε αποτυχία λειτουργίας του συστήματος. Ας σημειωθεί επίσης ότι, υπό φορτίο σταθερής ισχύος ( $\alpha = \beta = 0$ ), το όριο φόρτισης του συστήματος συμπίπτει με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

Σημαντική έννοια επίσης αποτελεί το *περιθώριο ευστάθειας* ή *ασφαλούς λειτουργίας* του συστήματος. Όπως προαναφέρθηκε, το μέρος της  $PV$  καμπύλης που βρίσκεται πάνω από την τάση μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, αντιστοιχεί σε σημεία ευσταθούς λειτουργίας του συστήματος. Αντίστοιχα, το κάτω μέρος αντιπροσωπεύει ασταθή σημεία λειτουργίας. Επομένως, το σημείο που επιτυγχάνεται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς θεωρείται «κρίσιμο» σημείο. Το περιθώριο ευστάθειας ή ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος ορίζεται ως η ποσότητα ενεργού ισχύος που μπορεί να παρέχει το σύστημα, μέχρι την επίτευξη της μέγιστης ποσότητας μεταφερόμενης ισχύος. Τα περιθώρια ευστάθειας χρησιμοποιούνται στην ανάλυση αστάθειας τάσης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούν σημαντική ένδειξη λειτουργικής ασφάλειας.

## 1.5 Λειτουργικά Όρια Σύγχρονων Γεννητριών

Οι σύγχρονες γεννήτριες παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αντιμετώπιση μιας πτώσης στις τάσεις των ζυγών του συστήματος απαιτεί υποστήριξη αέργου ισχύος. Οι γεννήτριες αποτελούν βασικό μέσο παροχής αέργου ισχύος στο σύστημα και επομένως η λειτουργία τους είναι καθοριστική στην εξέλιξη πιθανών φαινομένων αστάθειας τάσης. Η ικανότητα παροχής αέργου ισχύος από τις γεννήτριες, ωστόσο, παρουσιάζει περιορισμούς, οι οποίοι γίνονται ιδιαίτερα αισθητοί σε καταστάσεις με ανάγκη για περαιτέρω άεργη υποστήριξη [10].

Το λειτουργικό σημείο μιας γεννήτριας χαρακτηρίζεται από την ενεργό παραγωγή της  $P_g$ , την άεργο παραγωγή της  $Q_g$  και την τερματική της τάση  $V$ . Η σχέση μεταξύ ενεργού και άεργου παραγωγής  $P_g$  και  $Q_g$  υπό σταθερή τερματική τάση  $V$  αποτελεί έναν από τους καλύτερους τρόπους ανάλυσης των λειτουργικών ορίων μιας γεννήτριας. Η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης παράγει τις καμπύλες ικανότητας φόρτισης μιας γεννήτριας [10]. Το Σχ. 1.8 δείχνει τις καμπύλες ικανότητας φόρτισης μιας γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα χωρίς κορεσμό.



Σχ. 1.8: Καμπύλες ικανότητας φόρτισης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα χωρίς κορεσμό

Όπως φαίνεται και από το Σχ. 1.8, η λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας περιορίζεται τόσο από τον στρόβιλο όσο και από τις διατάξεις προστασίας της. Οι πιο συνήθεις διατάξεις προστασίας μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, το σύστημα προστασίας υποδιέγερσης, το σύστημα περιορισμού ρεύματος τυμπάνου και ο

περιοριστής μαγνητικής ροής, δηλαδή του λόγου της τάσης προς τη συχνότητα ( $V/f$ ) [10],[11]. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοριστικοί παράγοντες λειτουργίας μιας γεννήτριας είναι:

- Η μέγιστη μηχανική ισχύς  $P_m^{max}$  του στροβίλου. Ο περιορισμός αυτός φαίνεται στο Σχ. 1.8 ως η ευθεία  $P_g = P_m^{max}$ , αφού πρώτα αμελήσουμε την αντίσταση στάτη και θεωρήσουμε ονομαστική συχνότητα.
- Το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I^{max}$  του στάτη της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση, ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση του τυλίγματος τυμπάνου. Το τμήμα των καμπύλων ικανότητας φόρτισης που αντιστοιχεί σε αυτό τον περιορισμό καθορίζεται από την εξίσωση:

$$S = \sqrt{P_g + Q_g} = VI^{max} \quad (1.12)$$

η οποία στο επίπεδο  $P_g$ - $Q_g$  ορίζει κύκλο με κέντρο την αρχή των αξόνων και ακτίνα  $VI^{max}$ . Ας σημειωθεί ότι συνήθως το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα  $I^{max}$  επιλέγεται ίσο με το ονομαστικό της γεννήτριας.

- Η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση διέγερσης  $E_f^{lim}$  στη μόνιμη κατάσταση, ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτιση του τυλίγματος πεδίου. Ο περιορισμός αυτός αναπαρίσταται στο Σχ. 1.8, με χρήση των εξισώσεων ισορροπίας της σύγχρονης γεννήτριας για τάση διέγερσης ίση με τη μέγιστη τιμή της στη μόνιμη κατάσταση [10]:

$$V^2 (E_f^{lim})^2 = (V^2 + XQ_g)^2 + (XP_g)^2 \quad (1.13)$$

η οποία στο επίπεδο  $P_g$ - $Q_g$  ορίζει κύκλο με κέντρο ( $P_g = 0, Q_g = -V^2/X$ ) και ακτίνα  $VE_f^{lim}/X$ .

- Η ελάχιστη επιτρεπόμενη τάση διέγερσης  $E_f^{min}$  στην μόνιμη κατάσταση, ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου και κυρίως η απώλεια ευστάθειας λόγω απορρόφησης αέργου ισχύος από τη γεννήτρια.

Από το Σχ. 1.8 φαίνεται επίσης η επίδραση της τερματικής τάσης  $V$  στα λειτουργικά όρια. Μια αύξηση στην τιμή της τερματικής τάσης, οδηγεί σε αύξηση στο όριο περιορισμού του στάτη, καθώς και στο όριο διέγερσης του δρομέα, όταν αμελείται ο κορεσμός.

Σημαντική, όπως προαναφέρθηκε, είναι η παροχή αέργου ισχύος στο σύστημα από τη σύγχρονη γεννήτρια με στόχο τη διατήρηση των επιπέδων των τάσεων στους ζυγούς του συστήματος σε ενδεχόμενη πτώση τους. Το Σχ. 1.8 δείχνει την εξάρτηση της παραγωγής αέργου ισχύος  $Q_g$  τόσο από την παραγωγή της ενεργού  $P_g$ , όσο και από την τερματική τάση  $V$ . Θεωρούμε το σενάριο, κατά το οποίο παρατηρείται μια πτώση σε κάποιες τάσεις του συστήματος και η γεννήτρια καλείται να ανταποκριθεί με την αύξηση της παραγωγής της σε άεργο ισχύ. Όσο η λειτουργία της γεννήτριας βρίσκεται εντός των ορίων περιορισμού, η



αύξηση της τάσης διέγερσης παρέχει την επιπλέον άεργη ισχύ. Όταν η γεννήτρια φτάσει στα όρια λειτουργίας της, η άεργος ισχύς δεν μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω, συνεπώς η τερματική τάση  $V$  της γεννήτριας μειώνεται.

## 1.6 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Η μεγάλη γεωγραφική απόσταση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος, το καθιστά επιρρεπές σε περιστατικά αστάθειας τάσης, με κίνδυνο την πιθανή κατάρρευση. Η συνεχής παρακολούθηση της λειτουργίας του Συστήματος και η ανίχνευση ενδεχόμενων κρίσιμων διαταραχών που θα έθεταν την ομαλή λειτουργία του σε κίνδυνο, πραγματοποιείται από την εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) [12] που βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας.

Το καλοκαίρι του 2010, το on-line VSA χαρακτήρισε ένα στιγμιότυπο του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος ως ανασφαλές, μετά από μια ενδεχόμενη κρίσιμη διαταραχή που αφορούσε την απώλεια της μονάδας No.3 της Μεγαλόπολης [13]. Το πρόβλημα της αστάθειας τάσης εντοπίστηκε στην περιοχή της Πελοποννήσου. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του τοπικού δικτύου μετά τη διαταραχή δεν ήταν αρκετή για την κάλυψη του αρχικού φορτίου, προκαλώντας έτσι μια συνεχή πτώση στις τάσεις του δικτύου μεταφοράς και οδηγώντας εν τέλει στην κατάρρευση του. Η κατάρρευση του τοπικού δικτύου της Πελοποννήσου οδήγησε, μέσω αλυσωτών αντιδράσεων, στην κατάρρευση του συνολικού συστήματος, χωρίς το τελευταίο να παρουσιάζει πρόβλημα αστάθειας τάσης εξ' αρχής.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η αποφυγή της παραπάνω κατάρρευσης προϋποθέτει τη λύση στο πρόβλημα αστάθειας τάσης που εμφανίστηκε τοπικά στην Πελοπόννησο. Μια προφανής λύση αποτελεί η απόκτηση περιθωρίων ασφάλειας του τοπικού δικτύου μετά τη διαταραχή, μέσω αύξησης του ορίου φόρτισης. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι προσδιορισμός της αύξησης του ορίου φόρτισης μέσω άεργης υποστήριξης από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή της Πελοποννήσου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται οι διατάξεις παροχής αέργου ισχύος που βρίσκονται εγκατεστημένες σε 7 Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου. Η εργασία αποτελείται από τα εξής Κεφάλαια:

Στο Κεφάλαιο 2 συνοψίζεται η παράσταση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και των μηχανισμών αστάθειας τάσης που μπορεί να εμφανίζονται. Στη συνέχεια, περιγράφεται η λειτουργία του προγράμματος προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB [11] που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις της εργασίας και αναφέρονται οι τρόποι παράστασης των διατάξεων ενός ΣΗΕ στα δεδομένα του. Τέλος, γίνεται μια εισαγωγή στην έννοια της ασφάλειας τάσης ενός ΣΗΕ και αναλύεται η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) που είναι εγκατεστημένη στο Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας της Ελλάδας.

Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις του στιγμιότυπου του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος στο WPSTAB. Αφού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα χωρίς την δυνατότητα άεργης υποστήριξης, το Κεφάλαιο συνεχίζει εξετάζοντας τρεις διαφορετικούς τρόπους παροχής άεργης ισχύος από τα Αιολικά Πάρκα στο υπόλοιπο δίκτυο: μέσω συστοιχιών πυκνωτών στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ σύνδεσης των πάρκων, με παροχή αέργου ισχύος απευθείας στο ζυγό ΥΤ αρχικά χωρίς όριο και, έπειτα, με επιβαλλόμενο άνω όριο σύμφωνα με τα ονομαστικά μεγέθη του κάθε πάρκου και με τη βοήθεια Μετατροπέων Πηγής Τάσης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσεται ένα λεπτομερές μοντέλο της γραμμής διανομής των Αιολικών Πάρκων, με στόχο την επαλήθευση της ικανότητας των πάρκων να παρέχουν την άεργο ισχύ που προσδιορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η εκ νέου προσομοίωση πραγματοποιείται με χρήση αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο λογισμικό MATLAB και περιλαμβάνει περιορισμό στα επίπεδα των τάσεων για αντιμετώπιση πιθανών υπερτάσεων στο δίκτυο σύνδεσης των πάρκων. Τέλος, αναλύεται η επίδραση του περιορισμού της τάσης στην παροχή αέργου ισχύος του κάθε πάρκου και συγκρίνεται με τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 3.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των Κεφαλαίων 3 και 4, και αναφέρονται οι προοπτικές, καθώς και η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας εργασίας.

## 2 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΗ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

### 2.1 Παράσταση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας ως Δυναμικό Σύστημα

Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα των οποίων η δυναμική συμπεριφορά αποτελεί αντικείμενο μελέτης, περιγράφονται από ένα σύνολο  $N$  διαφορικών εξισώσεων της μορφής:

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

όπου  $\mathbf{x}$  το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και  $\mathbf{f}$  μια διανυσματική, συνήθως μη γραμμική, συνάρτηση του διανύσματος  $\mathbf{x}$ . Το διάνυσμα κατάστασης  $\mathbf{x}$  είναι συνάρτηση του χρόνου και λύση της διαφορικής εξίσωσης (2.1) για κάποιες αρχικές τιμές. Σύμφωνα με τη γενική θεωρία των διαφορικών εξισώσεων, γνωρίζοντας ένα σύνολο αρχικών συνθηκών  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ , είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε μια λύση  $\mathbf{x}(t)$ , με την προϋπόθεση τα κριτήρια ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης να ικανοποιούνται [10].

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούν δυναμικά συστήματα, των οποίων η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία δεν επιτρέπουν την εύκολη και ολοκληρωμένη περιγραφή τους μέσω των εξισώσεων (2.1) και μόνο. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη αλγεβρικών εξισώσεων επιβάλλει περιορισμούς στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Επομένως, πραγματοποιείται επέκταση των παραπάνω εξισώσεων (2.1) σε αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των ΣΗΕ. Επίσης, συνήθως είναι και ο διαχωρισμός των εξισώσεων αυτών με βάση τη χρονική κλίμακα ως εξής [10]:

1. *Εξισώσεις ακαριαίας απόκρισης.* Οι εξισώσεις αυτές είναι αλγεβρικές και αναφέρονται κυρίως στην παράσταση του δικτύου. Οι μεταβολές που τις διέπουν αφορούν ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα που εξελίσσονται σε τόσο μικρά χρονικά διαστήματα, που θεωρούνται πρακτικά ακαριαία μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής ή αλλαγής στις μεταβλητές κατάστασης. Επομένως, παραλείπεται η μεταβατική τους ανάλυση και χρησιμοποιούνται μόνο οι εξισώσεις ισορροπίας τους, που αφορούν κυρίως το ισοζύγιο ενεργού και αέργου ισχύος στο σύστημα στην ημιτονοειδή μόνιμο κατάσταση. Οι αλγεβρικές αυτές εξισώσεις περιγράφονται συνοπτικά ως:

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

όπου  $\mathbf{g}$  είναι  $m$  ομαλές συναρτήσεις και  $\mathbf{y}$  το  $m \times 1$  διάνυσμα των αλγεβρικών μεταβλητών (συνήθως τάσεις και γωνίες). Οι εξισώσεις αυτές παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια τάσης του συστήματος.

2. *Εξισώσεις βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας.* Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα που έχουν διάρκεια λίγων δευτερολέπτων μετά από

την εμφάνιση διαταραχής στο σύστημα. Είναι διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης και οι σταθερές χρόνου που τις χαρακτηρίζουν είναι της τάξεως δευτερολέπτου, δικαιολογώντας έτσι και την βραχυπρόθεσμη απόκριση τους. Συνήθως περιγράφουν την μεταβατική συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών, των ρυθμιστών τάσης, των κινητήρων επαγωγής αλλά και διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, όπως των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Για το λόγο αυτό αναφέρονται ως *βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα*. Οι διαφορικές αυτές εξισώσεις περιγράφονται ως:

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

όπου  $\mathbf{f}$  είναι  $n$  ομαλές συναρτήσεις και  $\mathbf{x}$  το  $n \times 1$  διάνυσμα των βραχυπρόθεσμων μεταβλητών κατάστασης του συστήματος.

3. *Εξισώσεις μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας*. Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα που εκδηλώνονται αρκετά δευτερόλεπτα μετά την ενδεχόμενη διαταραχή. Αφορούν κυρίως ελεγκτές και προστατευτικές διατάξεις, τα οποία είναι προγραμματισμένα να ενεργοποιούνται αρκετά μετά την εμφάνιση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, για την αποφυγή περιττών δράσεων και τυχόν αλληλεπιδράσεων με τις διατάξεις βραχυπρόθεσμης κλίμακας που μπορούν να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες καταστάσεις. Μερικά παραδείγματα εξισώσεων που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης και η προστασία ρεύματος στάτη των σύγχρονων μηχανών, η ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών, κ.τ.λ. . Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από συνεχείς διαφορικές εξισώσεις μεγάλης χρονικής σταθεράς και από διακριτές εξισώσεις διαφορών, και έχουν την μορφή:

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

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

όπου  $\mathbf{z}_c$  και  $\mathbf{z}_d$  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  $\Delta T$  η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

Το σύνολο των εξισώσεων (2.2)-(2.5) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## 2.2 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Το σύστημα εξισώσεων (2.2)-(2.5) περιγράφει πλήρως την κατάσταση ενός ΣΗΕ σε κάθε χρονική στιγμή. Παρόλα αυτά, η κατανόηση της λειτουργίας των μηχανισμών αστάθειας τάσης διευκολύνεται από το διαχωρισμό τους στις δύο χρονικές κλίμακες, τη βραχυπρόθεσμη και τη μακροπρόθεσμη [10].

### 2.2.1 Βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης

Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, η αστάθεια τάσης προκαλείται από τη δυναμική συμπεριφορά των φορτίων και συγκεκριμένα από την απόπειρα να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλίσκουν μετά από μια διαταραχή. Στην βραχυπρόθεσμη κλίμακα η συμπεριφορά αυτή εξελίσσεται εντός λίγων δευτερολέπτων, μια διάρκεια η οποία ταυτίζεται με το χρονικό διάστημα που εμφανίζεται το φαινόμενο της αστάθειας γωνίας στις σύγχρονες γεννήτριες. Στο χρονικό αυτό διάστημα εξελίσσονται και φαινόμενα βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης που αφορούν κυρίως τις γρήγορες προσπάθειες αποκατάστασης φορτίου από κινητήρες επαγωγής και λιγότερο συχνά συνδέσμους υψηλής τάσης - συνεχούς ρεύματος (HVDC links). Η βραχυπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι επίσης γνωστή ως μεταβατική κατάρρευση τάσης [14].

Όταν το σύστημα, το οποίο περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.2)-(2.5), υποστεί μια ξαφνική διαταραχή και βρεθεί εκτός σημείου ισορροπίας, τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα διεγείρονται πρώτα. Οι αργές δυναμικές του συστήματος που περιγράφονται από τις εξισώσεις (2.4) και (2.5) δεν προλαβαίνουν να αποκριθούν και συνεπώς στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Η ανάλυση του συστήματος πραγματοποιείται, επομένως, με τη χρήση μόνο των εξισώσεων (2.2) και (2.3), συνθέτοντας έτσι και το προσεγγιστικό μοντέλο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, όπως θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Επιστρέφοντας στους κινητήρες επαγωγής, οι οποίοι αποτελούν και βασική αιτία εμφάνισης βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης, μια ξαφνική μείωση της τάσης στο σημείο σύνδεσής τους, προκαλεί αρχικά μια πτώση στην ηλεκτρομαγνητική ροπή και μάλιστα ανάλογα με το τετράγωνο της τιμής της τάσης. Για να επαναφέρει την ηλεκτρομαγνητική ροπή στην τιμή της μηχανικής ροπής, ο κινητήρας επιβραδύνει, αυξάνοντας ταυτόχρονα και την ολίσθηση. Εάν η τάση συνεχίζει να μειώνεται, ο κινητήρας είναι πολύ πιθανό να φτάσει το όριο της ροπής ανατροπής.

Τα πιο πιθανά σενάρια εμφάνισης αστάθειας τάσης στη λειτουργία ενός κινητήρα επαγωγής είναι [7]:

1. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς που παρέχεται από το δίκτυο στον κινητήρα δεν είναι αρκετή για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος που απαιτείται από τον κινητήρα. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή δεν θα μπορέσει ποτέ να φτάσει την τιμή της μηχανικής και επομένως ο κινητήρας θα επιβραδύνει μέχρι να σταματήσει (stall), προκαλώντας πτώση της τάσης και ροή υψηλού ρεύματος στο στάτη. Η αστάθεια

τάσης προκαλείται σε αυτή την περίπτωση από αποτυχία του συστήματος να επιστέψει σε ισορροπία μετά τη διαταραχή (απώλεια σημείου ισορροπίας).

2. Η εμφάνιση βραχυκυκλώματος κοντά στον κινητήρα προκαλεί την επιβράδυνση του. Ένα το σφάλμα δεν εκκαθαριστεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, η επιτάχυνση του κινητήρα για την επαναφορά της λειτουργίας του μπορεί να αποβεί αδύνατη, και να οδηγήσει τελικά τον κινητήρα σε επιβράδυνση και παύση της λειτουργίας του, με τις συνέπειες που αναφέρθηκαν στο 1. Σε αυτή τη περίπτωση, η αποτυχία έγκαιρης εκκαθάρισης του σφάλματος, εμποδίζει την επαναφορά του συστήματος στο βραχυπρόθεσμο ευσταθές σημείο ισορροπίας μετά την τελική εκκαθάριση του σφάλματος.

### 2.2.2 Μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης

Όταν το σύστημα διατηρεί την ισορροπία του κατά τη βραχυπρόθεσμη κλίμακα και τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν αποσβεθεί, οι μακροπρόθεσμες αργές δυναμικές, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις (2.4) και (2.5), καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος. Οι γρήγορες δυναμικές συνιστώσες του συστήματος θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται ευσταθώς στις αλλαγές των μακροπρόθεσμων και, επομένως, οι εξισώσεις (2.3) μπορούν να αντικατασταθούν από αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας. Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λογική πίσω από την οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που εμφανίζονται από την εξέλιξη των παραπάνω αργών δυναμικών οδηγούν στην μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [10]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αυτού του είδους αστάθειας τάσης παίζουν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών και τα συστήματα προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, τα οποία, με τις ρυθμιστικές τους λειτουργίες, επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος. Ένα τυπικό σενάριο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης έχει ως εξής [7]:

Το εναρκτήριο έναυσμα για την εμφάνιση αστάθειας αποτελεί συνήθως η μείωση, μετά από κάποια διαταραχή, της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που μπορεί να παρέχει ένα σύστημα παραγωγής ή μεταφοράς στα φορτία κατανάλωσης. Ως αποτέλεσμα οι τάσεις στα δίκτυα μεταφοράς αρχίζουν να πέφτουν, οδηγώντας τις γεννήτριες να αυξήσουν τη διέγερση τους, ενώ ταυτόχρονα βρίσκονται κάτω από τον έλεγχο του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT). Εντοπίζοντας πτώση στα επίπεδα των τάσεων, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών των δικτύων διανομής, προσπαθούν, μετά από κάποια καθυστέρηση, να επαναφέρουν τις τάσεις στις τιμές αναφοράς τους, με τις απαραίτητες αλλαγές του λόγου μετασχηματισμού. Η επαναφορά αυτή σημαίνει και ταυτόχρονη επαναφορά στη ζήτηση των φορτίων πριν από τη διαταραχή. Η επαναφορά των φορτίων και οι συνεχόμενες κινήσεις του ΣΑΤΥΦ, ωστόσο, αποδυναμώνουν τις τάσεις στην πλευρά του δικτύου μεταφοράς. Κάτι τέτοιο οδηγεί στην χρήση αποθεμάτων άεργης ισχύος για άεργη υποστήριξη στο σύστημα, αλλά και στην ενεργοποίηση κάποιων συστημάτων περιορισμού υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, συνεισφέροντας, έτσι, στην περεταίρω μείωση των τάσεων και της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Εάν η ζήτηση των φορτίων εξακολουθεί να υπερβαίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, τότε οποιαδήποτε επιπλέον αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού

αδυνατεί να επαναφέρει τις τάσεις και, έτσι, καταρρέουν, οδηγώντας στη διακοπή της λειτουργίας του συστήματος.

Στην παραπάνω περίπτωση η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης οφείλεται στην αποτυχία του συστήματος να επανέλθει σε μακροπρόθεσμη ισορροπία μετά από διαταραχή. Μια άλλη συνηθισμένη περίπτωση μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης συναντάται όταν τα διάφορα μέτρα αντιμετώπισης είναι αρκετά για την επαναφορά ενός ευσταθούς σημείου ισορροπίας, αλλά το χρονικό διάστημα καθυστέρησης της ενεργοποίησης τους είναι τόσο μεγάλο που το σύστημα δεν ελκύεται έγκαιρα προς αυτό.

### 2.2.3 Μέθοδοι Αντιμετώπισης Μακροπρόθεσμης Αστάθειας Τάσης

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι αντιμετώπισης μιας πιθανής εμφάνισης αστάθειας τάσης σε ένα σύστημα. Οι μέθοδοι αυτές αξιολογούνται με βάση κάποια κριτήρια, με τα πιο σημαντικά να αποτελούν το οικονομικό κόστος και το ενδεχόμενο αντίκτυπο εφαρμογής τους στους διάφορους καταναλωτές. Οι πιο βασικές μέθοδοι αντιμετώπισης της μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι [1][15]:

1. *Συσκευές Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος*: Οι συσκευές αυτές αναφέρονται στους μηχανισμούς αυτόματης ζεύξης-απόζευξης πυκνωτών ή πηνίων, προσφέροντας άεργη υποστήριξη στο σύστημα. Σε περίπτωση εμφάνισης χαμηλών τάσεων, η πρόσθετη άεργη ισχύς που απαιτείται καλύπτεται από την ζεύξη των πυκνωτών. Η επιλογή του μεγέθους, της ικανότητας και της τοποθεσίας των παραπάνω συσκευών βασίζεται σε λεπτομερή μελέτη, με στόχο τον εντοπισμό των αδύναμων περιοχών του συστήματος, καθώς και της ικανοποιητικής του λειτουργίας. Η λειτουργία τους δεν επιφέρει οικονομικό κόστος και δεν επηρεάζει την κατανάλωση.
2. *Έλεγχος γεννητριών*: Η αύξηση της τάσης αναφοράς των γεννητριών μπορεί να αποτελέσει ευεργετικό μέτρο αντιμετώπισης αστάθειας τάσης, καθώς βελτιώνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ που παρέχεται. Επιπλέον, συχνό είναι το φαινόμενο επιλογής ως τάση αναφοράς του αυτόματου ρυθμιστή τάσης της γεννήτριας, τη τάση της πλευράς ΥΤ του υποσταθμού ανύψωσης. Αυτό, σε πολλές περιπτώσεις, βοηθά την αντιμετώπιση αστάθειας τάσης, αφού το σημείο σταθερού επιπέδου τάσης βρίσκεται πιο κοντά στα φορτία. Τέλος, απαραίτητος είναι ο συντονισμός των γεννητριών που ελέγχουν ταυτόχρονα μια αδύναμη περιοχή, για την αποφυγή ανεπιθύμητων αλληλεπιδράσεων (απορρόφηση άεργης παραγωγής από γειτονική γεννήτρια, κ.τ.λ.). Όλα τα παραπάνω μέτρα, δεν επηρεάζουν άμεσα τον καταναλωτή.
3. *Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)*: Σε ένα τυπικό σενάριο αστάθειας τάσης, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών είναι υπεύθυνα για την αποκατάσταση των φορτίων και επομένως για την εμφάνιση της αστάθειας. Για τον περιορισμό της αστάθειας έχουν προταθεί αρκετές ρυθμιστικές κινήσεις, με τις πιο σημαντικές να είναι: α) απενεργοποίηση του ΣΑΤΥΦ (tap blocking), για διακοπή της διαδικασίας αποκατάστασης των φορτίων, β) μείωση της τιμής αναφοράς της τάσης (voltage setpoint reduction), γ) “κλείδωμα” του ΣΑΤΥΦ (tap locking), όπου αναθέτουμε μια

συγκεκριμένη θέση στο ΣΑΤΥΦ, στην άφιξη της οποίας το ΣΑΤΥΦ τη διατηρεί, και γ) αντίστροφη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ (tap reversing), κατά την οποία το ΣΑΤΥΦ ελέγχει την πλευρά του δικτύου μεταφοράς. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή των παραπάνω μεθόδων υπάρχει στο [16]. Η εφαρμογή τους επηρεάζει τις τάσεις διανομής και υποβαθμίζει την παρεχόμενη ισχύ στους καταναλωτές. Τέλος, η μέθοδος της αντίστροφης λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, δεν ενσωματώνεται εύκολα στα υπάρχοντα ΣΑΤΥΦ και έτσι επιφέρει επιπλέον οικονομικό κόστος για την υλοποίηση της. Τα ΣΑΤΥΦ γενικά θεωρούνται διατάξεις μέσου κόστους.

4. *Αποκοπή Φορτίου*: Σε ακραίες καταστάσεις αστάθειας, η αποκοπή φορτίου αποτελεί την πιο αποτελεσματική λύση. Χρησιμοποιείται μόνο σε περιπτώσεις, όπου δεν υπάρχει εναλλακτική μέθοδος αποφυγής κατάρρευσης του συστήματος. Ο χρόνος, η τοποθεσία και το μέγεθος της αποκοπής φορτίου παίζουν σημαντικό ρόλο. Ο χρόνος καθορίζει την καθυστέρηση πέρα από την οποία το μέγεθος της αποκοπής του φορτίου αυξάνει. Η τοποθεσία που εφαρμόζεται η αποκοπή, είναι, συνήθως, η περιοχή εμφάνισης της αστάθειας. Η αποκοπή φορτίου σε γειτονικές περιοχές αποτελεί βοηθητικό παράγοντα. Το μέγεθος της αποκοπής καθορίζεται από αλγόριθμους βελτιστοποίησης για την εξαγωγή της ελάχιστης δυνατής αποκοπής. Όπως γίνεται αντιληπτό, το αντίκτυπο της εφαρμογής της αποκοπής φορτίου στους καταναλωτές, έστω και τοπικά, είναι μεγάλο, ενώ αποτελεί μια από τις πιο οικονομικές μεθόδους αντιμετώπισης.

### 2.3 Οιονεί Στατική Προσέγγιση

Η μελέτη των ΣΗΕ, από πλευράς αστάθειας τάσης, γίνεται ολοένα και πιο σημαντική, κυρίως λόγω των σημαντικών προβλημάτων που μπορεί να προκαλέσει. Οι αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις (2.2)-(2.5) αποτελούν ένα εργαλείο αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και η επίλυση τους δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς ανάλυσης των μηχανισμών αστάθειας που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη ενότητα. Παρά τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής δύναμης που μπορεί να προσφέρει σήμερα η τεχνολογία, μια προσομοίωση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων δεν διευκολύνει πάντοτε την ανάλυση των φαινομένων.

Η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (2.2)-(2.5), οδήγησε στο διαχωρισμό τους σε δύο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται. Τα δύο αυτά υποσυστήματα προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [10] και είναι το *βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα* και το *οιονεί στατικό σύστημα* στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι τα αργά δυναμικά φαινόμενα, λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξης τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όταν



τα γρήγορα, βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με το παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές  $\mathbf{z}_c$  και  $\mathbf{z}_d$  των εξισώσεων (2.4) και (2.5) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνουμε το απλοποιημένο μοντέλο:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.6)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.7)$$

Το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εφόσον το ενδιαφέρον μας στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις διαφορικές εξισώσεις (2.3) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.8)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.9)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (2.10)$$

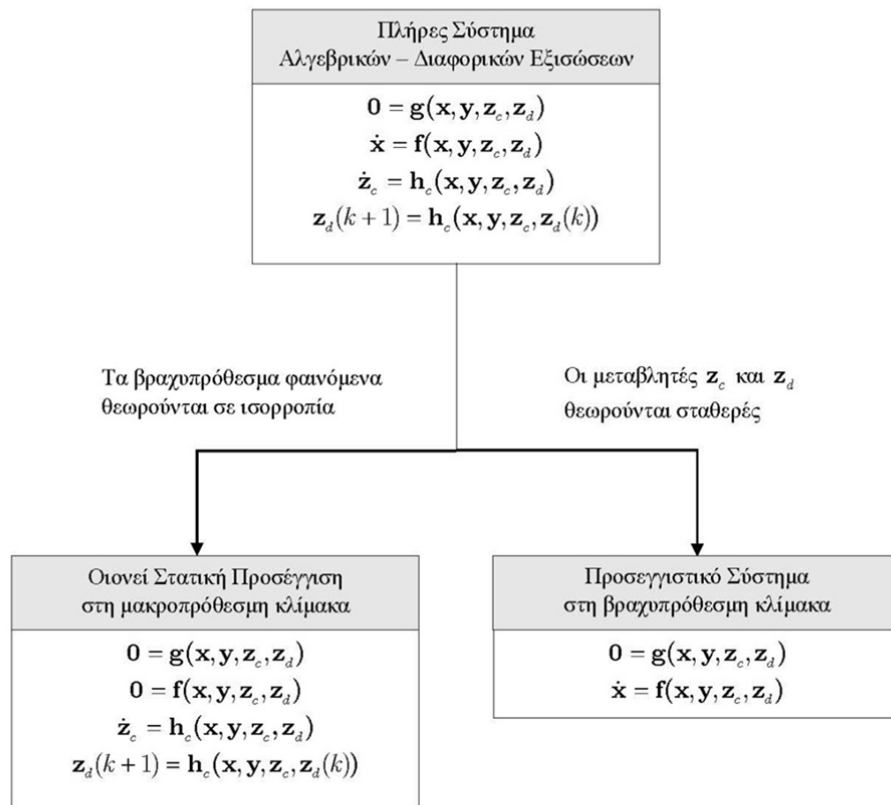
$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (2.11)$$

Τα δύο παραπάνω μοντέλα ανάλυσης φαίνονται και στο Σχ. 2.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι, επειδή η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης είναι πιο συχνή από την βραχυπρόθεσμη, ορισμένα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης επιλέγουν αποκλειστικά το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την επίλυση των εξισώσεων. Μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης που προσφέρει, καθιστώντας, έτσι, δυνατή και την εκτίμηση ασφάλειας συστήματος πραγματικού χρόνου, που είναι πολύ σημαντική.

## 2.4 Μοντέλο Μακροπρόθεσμης Χρονικής Κλίμακας

### 2.4.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη του βαθμού επιρροής που μπορεί να ασκήσει η Διεσπαρμένη Παραγωγή ορισμένων Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου στο όριο φόρτισης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος. Με άλλα λόγια, εξετάζεται η ενδεχόμενη αύξηση του περιθωρίου ασφάλειας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει. Για την επίτευξη κάτι τέτοιου, απαραίτητη είναι



**Σχ. 2.1:** Προσεγγιστικά μοντέλα ΣΗΕ

η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος, μέσω προσομοίωσης, στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, καθώς αντικείμενο εξέτασης αποτελεί η μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η μέθοδος της οιονεί στατικής προσέγγισης που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου WPSTAB που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανάπτυξη του πακέτου WPSTAB βασίστηκε στην διαδοχική επίλυση των εξισώσεων (2.8)-(2.11) σύμφωνα με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης. Στο πακέτο περιλαμβάνονται [11]:

- Ένα πρόγραμμα επίλυσης των εξισώσεων ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, το οποίο αναφέρεται ως ΠΠΣΙ (Πρόγραμμα Προσδιορισμού Σημείων Ισορροπίας). Το πρόγραμμα αυτό αντικαθιστά το παραδοσιακό πρόγραμμα ροής φορτίου και η εκτέλεση του βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων (2.8) και (2.9), μέσω της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson.
- Ένα πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, που εστιάζει στην ακριβή παράσταση των μηχανισμών και διατάξεων του συστήματος, που

προκαλούν μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης, και αναφέρεται ως ΠΠΜΚ (Πρόγραμμα Προσομοίωσης στη Μακροπρόθεσμη Κλίμακα). Βασίζεται στην διαδοχική επίλυση των εξισώσεων (2.8)-(2.11), χρησιμοποιώντας το ΠΠΣΙ για την επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας των ταχέων μεταβατικών φαινομένων. Οι διαφορικές εξισώσεις των βραδέων δυναμικών φαινομένων επιλύονται με ολοκλήρωση, ενώ οι τιμές των εξισώσεων διαφορών ανανεώνονται σε κάθε διακριτή χρονική στιγμή  $t_k$ .

Υποθέτοντας ότι ο αναγνώστης είναι ήδη αρκετά εξοικειωμένος με τις διατάξεις ενός ΣΗΕ, ακολουθεί μια πολύ συνοπτική παρουσίαση των διατάξεων και των αντίστοιχων εξισώσεων που χρησιμοποιούνται από το WPSTAB για την προσομοίωση μέσω της οιονεί στατικής προσέγγισης.

#### 2.4.2 Παράσταση Σύγχρονης Γεννήτριας

Η σύγχρονη γεννήτρια αναπαρίσταται σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο μόνιμης κατάστασης, το οποίο βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές, η ισχύς των οποίων σε θέματα ευστάθειας τάσης είναι αποδεκτή. Οι εξισώσεις ισορροπίας της σύγχρονης γεννήτριας φαίνονται παρακάτω [11]. Η εξίσωση (2.12) εκφράζει την ενεργό παραγωγή  $P_g$  της γεννήτριας, η (2.13) την άεργο παραγωγή  $Q_g$ , η (2.14) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή κορεσμού  $K$  και η (2.15) εκφράζει το ισοζύγιο ηλεκτρικής και μηχανικής ισχύος  $P_m$ . Οι εξισώσεις (2.12)-(2.15) περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.9).

$$P_g = \frac{KE_f V}{X_l + K(X_d - X_l)} \sin(\delta - \theta) + \frac{V^2}{2} \left( \frac{\sin 2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_q - X_l)} - \frac{\sin 2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) \quad (2.12)$$

$$Q_g = \frac{KE_f V}{X_l + K(X_d - X_l)} \cos(\delta - \theta) + V^2 \left( \frac{\sin^2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_q - X_l)} + \frac{\cos^2(\delta - \theta)}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) \quad (2.13)$$

$$f_{sat}(V, \delta, \theta, E_f, K) = \left[ \left( 1 - \frac{X_l}{X_l + K(X_d - X_l)} \right) V \cos(\delta - \theta) + \frac{X_l}{X_l + K(X_d - X_l)} KE_f \right]^2 + \left[ \left( 1 - \frac{X_l}{X_l + K(X_q - X_l)} \right) V \sin(\delta - \theta) \right]^2 - \left( \frac{1}{Km} - \frac{1}{m} \right)^{\frac{2}{n}} = 0 \quad (2.14)$$

$$P_g = P_m - D(\omega_{sys} - 1) \quad (2.15)$$

όπου:

$X_d, X_q$  : οι σύγχρονες αντιδράσεις ευθέως και εγκάρσιου άξονα αντίστοιχα

$X_l$  : η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

$E_f, V$  : η τάση διέγερσης και η τερματική τάση αντίστοιχα της γεννήτριας

$\delta - \theta$  : η εσωτερική γωνία ή γωνία ροπής

$D$  : ο συντελεστής απόσβεσης του άξονα της μηχανής

- $K$  : ο συντελεστής κορεσμού του μαγνητικού κυκλώματος  
 $m, n$  : οι σταθερές του μοντέλου κορεσμού  
 $\omega_{sys}$  : η ενιαία συχνότητα του συστήματος

Σημειώνεται, τέλος, ο τύπος του κορεσμού  $K$  της γεννήτριας [11]:

$$K = \frac{1}{1 + m\psi_{ag}^n} \quad (2.16)$$

όπου  $\psi_{ag}^n$  η πεπλεγμένη ροή διακένου.

#### 2.4.3 Παράσταση Ρυθμιστή Στροφών

Για τον ρυθμιστή στροφών των γεννητριών θεωρείται ένα απλουστευμένο μοντέλο, το οποίο αντιστοιχεί στη μόνιμο κατάσταση μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Το μοντέλο, επομένως, ακολουθεί τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας. Η εξίσωση ισορροπίας του περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.9) και είναι η εξής [1],[2]:

$$P_m = P_{mo} - \frac{1}{R_g}(\omega_{sys} - 1), \quad P_m^{min} \leq P_m \leq P_m^{max} \quad (2.17)$$

όπου  $P_m$  η μηχανική ισχύς εισόδου στον άξονα της γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση,  $P_{mo}$  η τιμή αναφοράς της μηχανικής ισχύος του στροβίλου,  $P_m^{max}$ ,  $P_m^{min}$  η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, επιτρεπόμενη ισχύς εξόδου του στροβίλου για συνεχή λειτουργία της γεννήτριας και  $R_g$  ο στατισμός της γεννήτριας.

#### 2.4.4 Παράσταση Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT)

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το μοντέλο του αναλογικού αυτόματου ρυθμιστή τάσης με στρεφόμενη ή στατή διέγερση στη μόνιμη κατάσταση, η εξίσωση ισορροπίας του οποίου φαίνεται παρακάτω και περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.9) [11]:

$$E_f = G(V_{ref} - V), \quad E_f^{min} \leq E_f \leq E_f^{max} \quad (2.18)$$

όπου  $G$  το αναλογικό κέρδος του ρυθμιστή,  $V_{ref}$  η τάση αναφοράς της γεννήτριας και  $E_f^{max}$ ,  $E_f^{min}$ , η μέγιστη και η ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή της τάσης διέγερσης  $E_f$  για συνεχή λειτουργία της γεννήτριας.

#### 2.4.5 Παράσταση Συστήματος Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ)

Η παράσταση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης γίνεται με χρήση του μοντέλου με αναλογική – ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου [10]. Σε αυτό το μοντέλο, η μονάδα ελέγχου μηδενίζει το σφάλμα μονίμου καταστάσεως περιορίζοντας το ρεύμα διέγερσης  $I_f$  της γεννήτριας στο μέγιστο επιτρεπόμενο  $I_f^{lim}$ , μετά από μια χρονική καθυστέρηση  $T_{oxl}$ :

$$I_f = I_f^{lim} \quad (2.19)$$

Όταν η γεννήτρια βρίσκεται στη μόνιμη κατάσταση, η ανά μονάδα τάση του πεδίου διεγέρσεως  $E_f$  είναι ίση με το ανά μονάδα ρεύμα πεδίου  $I_f$ , οπότε από την (2.19) έχουμε:

$$E_f = I_f = I_f^{lim} = E_f^{lim} \quad (2.20)$$

Η (2.20) αποτελεί εξίσωση ισορροπίας ενός ΣΠΥ διακοπτικού ή αθροιστικού τύπου, με αναλογική – ολοκληρωτική μονάδα ελέγχου, και περιλαμβάνεται στο σύστημα εξισώσεων (2.9).

#### 2.4.6 Παράσταση Προστασίας Γεννήτριας από Υπόταση

Ο μηχανισμός της προστασίας γεννήτριας από υπόταση ενεργοποιείται σε περίπτωση που η τερματική τάση μιας γεννήτριας προσεγγίσει χαμηλά επίπεδα. Η προστασία επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονόμου υπότασης, ο οποίος ρυθμίζεται με βάση την τερματική τάση της γεννήτριας. Ο ηλεκτρονόμος αποσυνδέει την γεννήτρια, όταν η τερματική τάση  $V_t$ , βρεθεί κάτω από ένα όριο  $V_{thres}$  του ηλεκτρονόμου. Η αποσύνδεση πραγματοποιείται είτε άμεσα, εντός δευτερολέπτου, μέσω διακόπτη, είτε μετά από μια χρονική καθυστέρηση  $T_{del}$ , μέσω της απώλειας των βοηθητικών τυλιγμάτων λόγω υπερέντασης. Το σύστημα προστασίας από υπόταση δεν περιλαμβάνεται σε κάποια κατηγορία εξισώσεων, αλλά επηρεάζει τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του συστήματος μέσω της παραβίασης του ορίου  $V_{thres}$  [17].

#### 2.4.7 Παράσταση Προστασίας Ρεύματος Τυμπάνου (PPT)

Το μοντέλο της προστασίας ρεύματος τυμπάνου προσομοιώνει τη συμπεριφορά των χειριστών στους σταθμούς παραγωγής, σε περιπτώσεις προστασίας μιας γεννήτριας από υπερθέρμανση του στάτη. Όταν το ρεύμα του στάτη  $I_s$  ξεπεράσει ένα επιτρεπόμενο όριο  $I_s^{lim}$ , ενεργοποιείται, μετά από χρονική καθυστέρηση  $d$ , ο μηχανισμός προστασίας, ο οποίος αρχικά προσπαθεί να μειώσει την ενεργό παραγωγή της γεννήτριας, και όταν αυτό δεν είναι πλέον δυνατό προχωρά στη μείωση της αέργου παραγωγής. Ο παραπάνω μηχανισμός ακολουθεί τα παρακάτω αλγοριθμικά βήματα [17]:

1. Σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης υπολογίζεται το ρεύμα του στάτη  $I_s$ , με βάση το σημείο λειτουργίας ( $P_g, Q_g, V$ ) της κάθε γεννήτριας και ελέγχεται αν ξεπερνά το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο  $I_s^{lim}$ . Το ρεύμα του στάτη υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

$$I_s = \frac{\sqrt{P_g^2 + Q_g^2}}{V} \quad (2.21)$$

Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ρεύματος στάτη λαμβάνεται ίσο με το ονομαστικό της γεννήτριας ανηγμένο στη βάση του συστήματος:

$$I_s^{lim} = I_{s,N} = \frac{S_N}{V_N} \quad (2.22)$$

2α. Αν το ρεύμα του στάτη παραβιάζει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, τότε σε πρώτη φάση δίνεται εντολή, μετά από μια χρονική καθυστέρηση  $d$ , για μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας και επομένως μείωση του ρεύματος στάτη. Η καθυστέρηση αυτή ορίζεται ως εξής:

$$d = \begin{cases} d_1, & \text{αρχική χρονική καθυστέρηση} \\ d_2, & \text{επακόλουθη χρονική καθυστέρηση} \end{cases} \quad (2.23)$$

Η αρχική χρονική καθυστέρηση  $d_1$  είναι μεγαλύτερη της επακόλουθης για αποφυγή περιττών ενεργειών σε περιπτώσεις παροδικής υπέρβασης του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου ρεύματος.

Η μείωση της ενεργού παραγωγής της γεννήτριας πραγματοποιείται ελαττώνοντας τη μηχανική ισχύ του στροβίλου με βάση τη σχέση:

$$P_{mo} = P_{mo} - r_{mo} d_2 \quad (2.24)$$

όπου  $P_{mo}$  η τιμή αναφοράς της μηχανικής ισχύος του στροβίλου και  $r_{mo}$  ο ρυθμός μείωσης της. Ο ρυθμός μείωσης  $r_{mo}$  καθορίζεται από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του στροβίλου και της γεννήτριας.

2β. Αν το ρεύμα του στάτη δεν παραβιάζει το μέγιστο όριο, τότε ο έλεγχος προχωρά στην επόμενη γεννήτρια του συστήματος.

3α. Σε αυτό το βήμα γίνεται έλεγχος του τεχνικού ελαχίστου των γεννητριών. Αν παραβιάζεται το όριο ελάχιστης ισχύος εξόδου  $P_m^{min}$  του στροβίλου, η μείωση της ενεργού ισχύος από τη σχέση (2.24) δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί. Η μείωση του ρεύματος στάτη θα γίνει μέσω μεταβολής της αέργου παραγωγής (βήμα 4).

3β. Αν δε υπάρχει πρόβλημα τεχνικού ελαχίστου, ο έλεγχος συνεχίζεται με την επόμενη γεννήτρια του συστήματος.

4. Εάν η μείωση της ενεργού παραγωγής δεν είναι δυνατή λόγω τεχνικού ελαχίστου, ο περιορισμός του ρεύματος στάτη πραγματοποιείται με μείωση της τάσης αναφοράς της γεννήτριας. Η μείωση της τάσης αναφοράς  $V_{ref}$ , γίνεται με σταθερό ρυθμό  $\alpha$ , μέχρι το ρεύμα στάτη να επιστρέψει εντός ορίων. Αν η γεννήτρια λειτουργεί με περιορισμό υπερδιέγερσης, τότε πραγματοποιείται μια αρχική βηματική μείωση  $\Delta V_{ref}^{step}$  της τάσης αναφοράς, έτσι ώστε η γεννήτρια να επανέλθει σε λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης και στη συνέχεια, αν το ρεύμα στάτη συνεχίζει να παραβιάζει το επιτρεπόμενο όριο, η μείωση της τάσης αναφοράς γίνεται με ρυθμό  $\beta$ .

Η βηματική αυτή μείωση της τάσης αναφοράς προσδιορίζεται ως εξής: Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με προστασία υπερδιέγερσης η ΗΕΔ διέγερσης  $E_f$  είναι ίση με τη μέγιστη τάση διέγερσης της γεννήτριας  $E_f^{lim}$ , ήτοι:

$$E_f = E_f^{lim} \quad (2.25)$$

Όταν η γεννήτρια λειτουργεί με αυτόματη ρύθμιση τάσης, η ΗΕΔ διέγερσης  $E_f$  δίνεται από τον τύπο:

$$E_f = G_{AVR}(V_{ref} - V), \text{ με } E_f < E_f^{lim} \quad (2.26)$$

όπου  $G_{AVR}$  είναι το αναλογικό κέρδος του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης στη μόνιμο κατάσταση, και  $V$  η τερματική τάση της γεννήτριας.

Τη χρονική στιγμή όπου η γεννήτρια μεταβαίνει από λειτουργία με APT σε λειτουργία προστασίας υπερδιέγερσης, ισχύει η σχέση:

$$E_f^{lim} = G_{AVR}(V_{ref} - V) \quad (2.27)$$

Για να επαναφέρουμε τη μηχανή σε αυτόματη ρύθμιση θα πρέπει να ισχύσει πάλι η σχέση (2.26), μειώνοντας την ΗΕΔ διέγερσης. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης της τάσης αναφοράς της γεννήτριας κατά:

$$\Delta V_{ref}^{step} = V_{ref} - \left( V + \frac{E_f^{lim}}{G_{AVR}} \right) \quad (2.28)$$

Επομένως η τάσης αναφοράς  $V_{ref}$  ακολουθεί συνοπτικά τον κανόνα:

$$V_{ref} = V_{ref} - \Delta V_{ref} \quad (2.29)$$

$$\Delta V_{ref} = \begin{cases} \alpha d_2, & \text{γεννήτρια με APT} \\ \Delta V_{ref}^{step} + \beta d_2, & \text{γεννήτρια με ΣΠΥ} \end{cases} \quad (2.30)$$

όπου  $\Delta V_{ref}^{step}$  η τιμή της σχέσης (2.28) και  $\alpha, \beta$  οι σταθεροί ρυθμοί μείωσης της τάσης αναφοράς.

#### 2.4.8 Παράσταση Μετασηματιστών με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)

Για την παράσταση των μετασηματιστών μεταβλητής λήψης χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο ΣΑΤΥΦ, με τη μεταβλητή λήψη στο τύλιγμα του πρωτεύοντος του μετασηματιστή. Η παρακάτω διακριτή εξίσωση περιγράφει τη συμπεριφορά του ΣΑΤΥΦ [11]:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_2^o + d \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_2^o - d \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k & , \text{ σε κάθε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2.31)$$

όπου:

- $V_2$  : η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή  
 $V_2^o$  : η τιμή αναφοράς της τάσης δευτερεύοντος  
 $2d$  : το εύρος της νεκρής ζώνης της τάσης αναφοράς  
 $r_k$  : ο λόγος μετασχηματισμού  
 $\Delta r$  : το βήμα αλλαγής της λήψης

Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αρχική καθυστέρηση  $T_{d1}$  και μετέπειτα χρονική καθυστέρηση  $T_{d2}$ . Η  $T_{d1}$  είναι συνήθως μεγαλύτερη, για αποφυγή λανθασμένων και περιττών αλλαγών στη λήψη. Η ρύθμιση του λόγου μετασχηματισμού  $r_k$  περιορίζεται από το άνω και κάτω όριο  $r_{max}$  και  $r_{min}$ , αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (2.31) περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.11).

#### 2.4.9 Παράσταση Φορτίων

Τα φορτία παριστάνονται σύμφωνα με το εκθετικό μοντέλο. Η ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις [1],[10]:

$$P = z_P P_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\alpha \quad (2.32)$$

$$Q = z_Q Q_o \left( \frac{V}{V_o} \right)^\beta \quad (2.33)$$

όπου:

- $z_P, z_Q$  : αδιάστατες μεταβλητές ζήτησης  
 $z_P P_o, z_Q Q_o$  : η κατανάλωση ενεργού και αέργου ισχύος στο σημείο της αρχικοποίησης  
 $V_o$  : η τάση στο αρχικό σημείο  
 $V$  : η εφαρμοζόμενη τάση στο φορτίο  
 $\alpha, \beta$  : αδιάστατες μεταβλητές που χαρακτηρίζουν τον τύπο του φορτίου

Αξιοσημείωτες είναι τρεις βασικές κατηγορίες φορτίου εκθετικού τύπου:

- $\alpha = \beta = 2$ : Φορτίο σταθερής αγωγιμότητας
- $\alpha = \beta = 1$ : Φορτίο σταθερού ρεύματος
- $\alpha = \beta = 0$ : Φορτίο σταθερής ισχύος



#### 2.4.10 Παράσταση Αυτόματων Μηχανισμών Ζεύξης – Απόζευξης Πυκνωτών

Οι μηχανισμοί αυτοί είναι πολύ σημαντικοί στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος στο σύστημα και διατηρούν τα επίπεδα των τάσεων σε επιθυμητά επίπεδα, παίζοντας έτσι ένα σημαντικό ρόλο ως μέτρα πρόληψης αστάθειας τάσης. Η λειτουργία της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών περιγράφεται από τις εξισώσεις [11]:

$$B_{c,k+1} = \begin{cases} B_{c,k} + \Delta B_c, & \text{αν } V < V^0 - \varepsilon \\ B_{c,k} & , \text{αν } |V - V^0| < \varepsilon \\ B_{c,k} - \Delta B_c, & \text{αν } V > V^0 + \varepsilon \end{cases} \quad , \text{με } B_c^{\min} < B_{c,k} < B_c^{\max} \quad (2.34)$$

όπου:

- $V$  : η τιμή τάσης του ελεγχόμενου ζυγού
- $V^0$  : η τάση αναφοράς του ελεγχόμενου ζυγού
- $\varepsilon$  : ανοχή της ρύθμισης
- $B_{c,k}$  : η αγωγιμότητα της συστοιχίας
- $\Delta B_c$  : το βήμα μεταβολής της αγωγιμότητας

Ο αυτόματος μηχανισμός λειτουργεί με μια χρονική καθυστέρηση  $T_{msc}$  για κάθε ζεύξη ή απόζευξη, η οποία είναι αρκετών δευτερολέπτων για να αποτραπούν τυχόν άσκοπες ρυθμίσεις. Τα όρια  $B_c^{\max}$  και  $B_c^{\min}$  αντιπροσωπεύουν τη συνολική μέγιστη και ελάχιστη, αντίστοιχα, διαθέσιμη αγωγιμότητα. Οι εξισώσεις (2.34) περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.11).

#### 2.4.11 Παράσταση Δικτύου

Η παράσταση του δικτύου μπορεί να γίνει με τη βοήθεια του Σχ. 2.2. Η γραμμή μεταξύ των ζυγών  $k$  και  $m$  παριστάνεται με το ισοδύναμο κύκλωμα-π. Οι  $S_{Gk}$  και  $S_{Lk}$  είναι αντίστοιχα η μιγαδική παραγωγή και η μιγαδική ισχύς του φορτίου του ζυγού  $k$ . Σύμφωνα με το Σχ. 2.2, οι φυσικές αγωγιμότητες είναι:

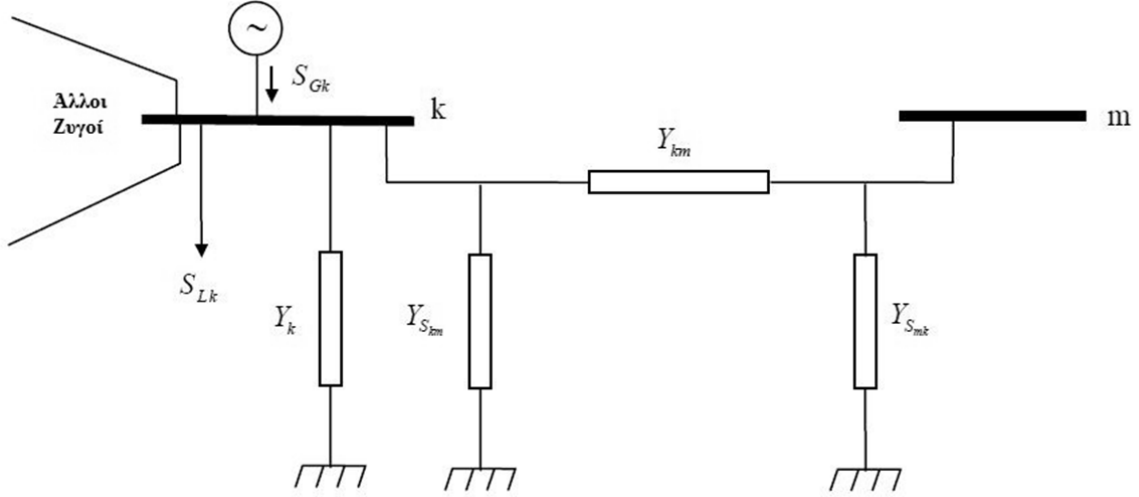
$$Y_{km} = g_{km} + jb_{km} \quad (2.35)$$

$$Y_{skm} = g_{skm} + jb_{skm} \quad (2.36)$$

$$Y_{smk} = g_{smk} + jb_{smk} \quad (2.37)$$

$$Y_k = g_k + jb_k \quad (2.38)$$

όπου  $Y_{km}$  η αγωγιμότητα σειράς,  $Y_{skm}$ ,  $Y_{smk}$ , οι εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής μεταφοράς ή του μετασχηματιστή και  $Y_k$  μια εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα που παριστάνει οποιοδήποτε συνδυασμό πυκνωτών, αυτεπαγωγών ή φορτίων σταθερής αγωγιμότητας πάνω στο ζυγό.



Σχ. 2.2: Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Υποθέτοντας ότι η τάση στο ζυγό  $k$  είναι  $\widehat{V}_k = V_k \angle \theta_k$  και η τάση στο ζυγό  $m$  είναι  $\widehat{V}_m = V_m \angle \theta_m$ , η συνολική ροή ενεργού και αέργου ισχύος από το ζυγό  $k$  είναι [11]:

$$P_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = V_k^2 \sum_{m \in A_k} (g_{km} + g_{skm}) + V_k^2 g_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \alpha_{km} \quad (2.39)$$

$$Q_{NET_k}(\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = -V_k^2 \sum_{m \in A_k} (b_{km} + b_{skm}) + V_k^2 b_k - V_k \sum_{m \in A_k} V_m \beta_{km} \quad (2.40)$$

όπου:

$$\alpha_{km} = g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (2.41)$$

$$\beta_{km} = g_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (2.42)$$

όπου  $A_k$  το σύνολο των γραμμών που συνδέονται με το ζυγό  $k$ . Τα  $\mathbf{V}$ ,  $\boldsymbol{\theta}$  είναι τα διανύσματα των τάσεων και των γωνιών των ζυγών του δικτύου αντίστοιχα. Για ένα σύστημα  $N$  ζυγών υπάρχουν  $N$  εξισώσεις (2.39) και  $N$  εξισώσεις (2.40). Οι εξισώσεις αυτές περιλαμβάνονται στο σύστημα εξισώσεων (2.8).

## 2.5 Πρόγραμμα Προσομοίωσης WPSTAB

### 2.5.1 Πρόγραμμα Προσδιορισμού Σημείων Ισορροπίας (ΠΠΣΙ)

Το ΠΠΣΙ του λογισμικού πακέτου WPSTAB επιλύει συστήματα εξισώσεων τύπου (2.8) και (2.9) με τη μέθοδο Newton-Raphson [11]. Με τη βοήθεια των εξισώσεων ισορροπίας των επιμέρους διατάξεων μπορούν να προσδιοριστούν οι βραχυπρόθεσμες μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Ας σημειωθεί, ότι το γραμμικό σύστημα που προκύπτει από τη συλλογή όλων των εξισώσεων ισορροπίας προσαυξάνεται κατά μια εξίσωση που αντιστοιχεί στην ενιαία συχνότητα του συστήματος  $\omega_{sys}$ . Οι μεταβλητές κατάστασης, επομένως, είναι:

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\delta}, \mathbf{y}^T = [\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{V}^T \omega_{sys}]^T \quad (2.43)$$

όπου  $\boldsymbol{\delta}$  οι γωνίες δρομέα των γεννητριών του συστήματος,  $\boldsymbol{\theta}$  οι γωνίες των τάσεων των ζυγών και  $\mathbf{V}$  τα μέτρα των τάσεων των ζυγών εκτός των ζυγών σταθερής τάσης.

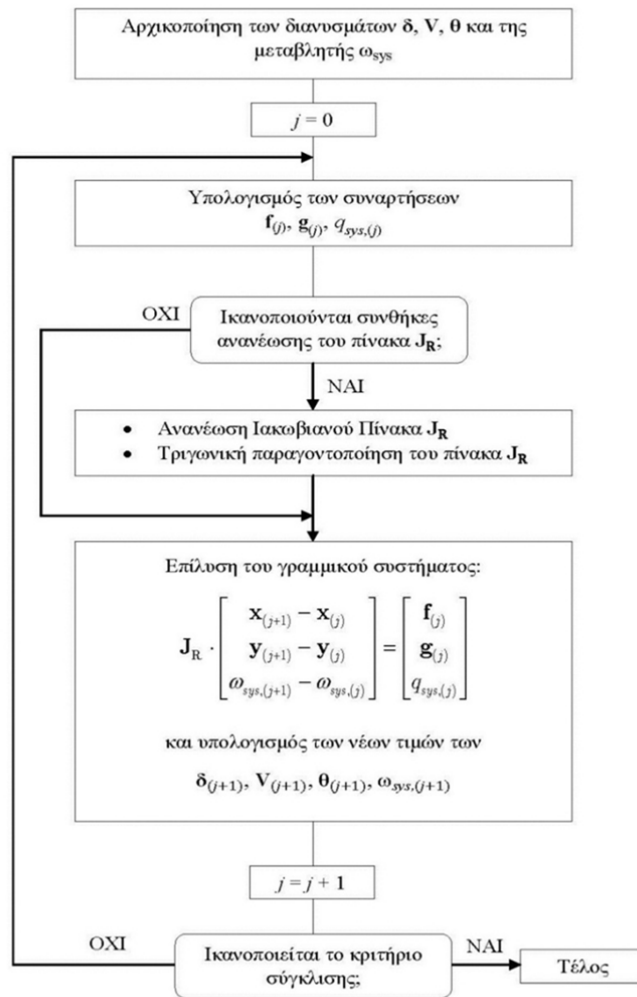
Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας βασίζεται στη μέθοδο της επαναληπτικής επίλυσης μιας ακολουθίας γραμμικών συστημάτων με τη μορφή:

$$\mathbf{J}_R \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{(j+1)} - \mathbf{x}_{(j)} \\ \mathbf{y}_{(j+1)} - \mathbf{y}_{(j)} \\ \omega_{sys,(j+1)} - \omega_{sys,(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{(j)} \\ \mathbf{g}_{(j)} \\ q_{sys,(j)} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

όπου  $\mathbf{J}_R$  ο Ιακωβιανός πίνακας των εξισώσεων ισορροπίας του συστήματος και  $q_{sys}$  η εξίσωση ορισμού της γωνίας αναφοράς του συστήματος. Ο δείκτης  $j$  δηλώνει το πλήθος ανακυκλώσεων της αριθμητικής μεθόδου Newton-Raphson.

Το γραμμικό σύστημα (2.44) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του  $\mathbf{J}_R$  η οποία πραγματοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss. Επίσης, χρησιμοποιούνται τεχνικές αραιών πινάκων, καθώς ο  $\mathbf{J}_R$  αποτελείται κυρίως από τον πίνακα της ροής φορτίου που είναι εξαιρετικά αραιός.

Το Σχ. 2.3 παριστάνει το διάγραμμα ροής του ΠΠΣΙ. Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  προέρχονται είτε από επίλυση του προβλήματος αρχικών συνθηκών είτε από επίλυση του ΠΠΣΙ για προηγούμενες τιμές των αργών μεταβλητών κατάστασης  $\mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d$  κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του ΠΠΜΚ, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Οι αργές μεταβλητές  $\mathbf{z}_c$  και  $\mathbf{z}_d$  παραμένουν σταθερές κατά την εκτέλεση του ΠΠΣΙ.



Σχ. 2.3: Διάγραμμα Ροής ΠΠΣΙ

### 2.5.2 Πρόγραμμα Προσομοίωσης στην Μακροπρόθεσμη Κλίμακα (ΠΠΜΚ)

Το ΠΠΜΚ πραγματοποιεί προσομοιώσεις στην μακροπρόθεσμη κλίμακα, σύμφωνα με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2.8)-(2.11) [11]. Πρόκειται για ένα υβριδικό πρόγραμμα προσομοίωσης για την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων στο οποίο συνυπάρχουν διαφορικές εξισώσεις, εξισώσεις διαφορών και αλγεβρικές εξισώσεις. Συνήθως, σε προγράμματα προσομοίωσης ο χρήστης καλείται να εισάγει δεδομένα, συνήθως σε μορφή διαταραχών. Ονομάζοντας τα δεδομένα εισόδου  $\mathbf{w}$ , το σύστημα εξισώσεων (2.8) – (2.11) αλλάζει ελάχιστα και έχει πλέον τη μορφή:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.45)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.46)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d, \mathbf{w}) \quad (2.47)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k), \mathbf{w}) \quad (2.48)$$

Οι διατάξεις του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που παριστάνονται στο ΠΠΜΚ είναι το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης, τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης πυκνωτών, το σύστημα προστασίας υπότασης και το σύστημα προστασίας ρεύματος στάτη. Το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης λειτουργεί σύμφωνα με τη περιγραφή που προηγήθηκε και δεν έχει κάποια μεταβλητή καταστάσης παρά μόνο χρονική στιγμή έναυσης. Παρόμοια λογική λειτουργίας έχουν και τα συστήματα προστασίας γεννήτριας από υπόταση και προστασίας ρεύματος στάτη. Η διακριτή μεταβλητή του ΣΑΤΥΦ είναι ο λόγος μετασχηματισμού  $r_k$ , ενώ η διακριτή μεταβλητή των μηχανισμών ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών είναι η χωρητική αγωγιμότητα  $B_{c,k}$ .

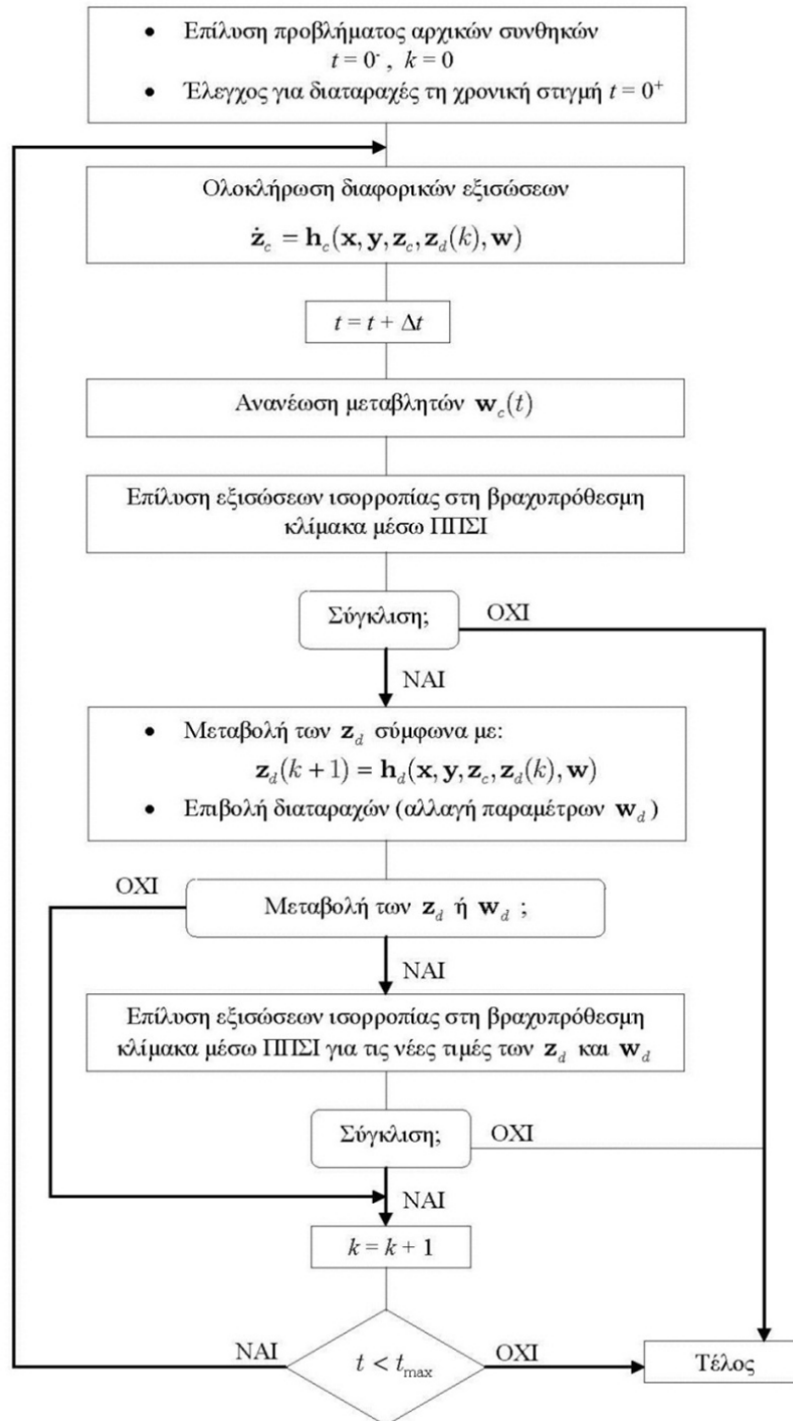
Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα μέσω του ΠΠΣΙ, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις των μακροπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή στις διακριτές μεταβλητές ή σε παραμέτρους του συστήματος. Στο Σχ. 2.4 φαίνεται το διάγραμμα ροής του ΠΠΜΚ. Ας σημειωθεί ότι οι μεταβλητές εισόδου  $\mathbf{w}$  χωρίζονται σε συνεχείς  $\mathbf{w}_c(t)$  (π.χ. γραμμική μεταβολή παραγωγής) και σε διακριτές  $\mathbf{w}_d(t)$  (π.χ. αποκοπή γραμμής).

Το χρονικό βήμα  $\Delta t$  μετάβασης από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη επιλέγεται έτσι ώστε α) όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται με τις εξισώσεις διαφορών (2.48) να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του  $\Delta t$ , ώστε να εξασφαλίζεται η χρονική ακρίβεια των μεταβάσεων, και β) να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (2.47) για να εξασφαλίζει την ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης [11].

Η ανανέωση του Ιακωβιανού πίνακα  $\mathbf{J}_R$  κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα πραγματοποιείται μόνο όταν [11]:

- Αλλάζει η τοπολογία του δικτύου (άνοιγμα, κλείσιμο διακοπών)
- Η σύγκλιση δεν έχει επιτευχθεί στις προηγούμενες 5 ανακυκλώσεις
- Συμβαίνει μεταβολή στο σύστημα (ενεργοποίηση ΣΠΥ)
- Συμβαίνει μεγάλη διαταραχή στις παραγωγές ή τα φορτία του συστήματος

Εφόσον η δυσκολότερη υπολογιστική διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του  $\mathbf{J}_R$ , η ανανέωση του πίνακα προσφέρει οικονομία υπολογιστικού χρόνου.



Σχ. 2.4: Διάγραμμα Ροής ΠΠΜΚ

## 2.6 Εκτίμηση Ασφάλειας Τάσης

### 2.6.1 Στατική και Δυναμική Ανάλυση Ασφάλειας

Μπορούμε να ορίσουμε την *ασφάλεια* ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ως την ικανότητα να ανταποκρίνεται ικανοποιητικά σε οποιαδήποτε εμφάνιση διαταραχής, που θέτει σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία του [11]. Με άλλα λόγια, η ασφάλεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προϋποθέτει την ευσταθή και ομαλή λειτουργία του μετά από κάθε πιθανή διαταραχή. Η εκτίμηση ασφάλειας ενός συστήματος πραγματοποιείται με τεχνικές που βασίζονται στα σημεία λειτουργίας του.

Ένα σημείο λειτουργίας χαρακτηρίζεται ευσταθές από άποψη ευστάθειας τάσης, εάν μετά την εμφάνιση οποιασδήποτε διαταραχής, τα επίπεδα των τάσεων του συστήματος διατηρούν την προκαθορισμένη τιμή τους και το σύστημα αποκτά ένα νέο ευσταθές σημείο λειτουργίας.

Η ανάλυση ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας διαχωρίζεται, συνήθως, σε στατική και δυναμική [11]. Η εκτίμηση της ασφάλειας του συστήματος διαφέρει, ανάλογα με το είδος της κατάστασης έκτακτης ανάγκης που μπορεί να βρεθεί μετά από μια διαταραχή. Η *στατική εκτίμηση ασφάλειας* αντιμετωπίζει περιπτώσεις που μετά τη διαταραχή το σύστημα φτάνει σε ισορροπία, αλλά δεν μπορεί να την διατηρήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα, λόγω παραβίασης περιορισμών ως προς τις τάσεις και τις ροές ισχύος. Η *δυναμική εκτίμηση ασφάλειας* αναφέρεται σε συνθήκες εμφάνισης αστάθειας μετά τη διαταραχή που συνήθως οδηγεί σε σοβαρές συνέπειες.

Η μελέτη της ευστάθειας τάσης ανήκει στη δυναμική ασφάλεια. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 2.2 του παρόντος Κεφαλαίου, οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης εμφανίζονται είτε βραχυπρόθεσμα, εντός λίγων δευτερολέπτων, είτε μακροπρόθεσμα, εντός μερικών δεκάδων δευτερολέπτων. Συνήθως εξετάζεται η μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης, κυρίως λόγω της συχνότερης εμφάνισης της σε σχέση με τη βραχυπρόθεσμη. Η ανάλυση της αστάθειας τάσης πραγματοποιείται με τη βοήθεια μεθόδων, μέσω των οποίων εκτιμάται η ασφάλεια τάσης του συστήματος. Οι μέθοδοι αυτές χωρίζονται στις εξής κατηγορίες [10],[18]:

1. *Ανάλυση Διαταραχών*: Η μέθοδος αυτή ελέγχει την ικανότητα του συστήματος να διατηρεί την ισορροπία του, μετά από την εμφάνιση πιθανών διαταραχών. Κατά την ανάλυση της μακροπρόθεσμης ευστάθειας τάσης, οι διαταραχές αυτές σχετίζονται κυρίως με τη διακοπή λειτουργίας εξοπλισμού όπως γεννήτριες, μετασχηματιστές και γραμμές μεταφοράς. Ένα πολύ γνωστό κριτήριο είναι αυτό της  $N - 1$  ασφάλειας, όπου απαιτείται ευστάθεια του συστήματος μετά από μοναδική απώλεια διάταξης μεταφοράς ή παραγωγής. Κατά την ανάλυση της ασφάλειας με το παραπάνω κριτήριο, επιτρέπεται η χρήση διατάξεων προστασίας από αστάθεια μετά τη διαταραχή, εφόσον οι διορθωτικές κινήσεις δεν έχουν επίδραση στον καταναλωτή (αυτόματη ζεύξη πυκνωτών, αύξηση των τάσεων αναφοράς των γεννητριών, κ.τ.λ.).

2. *Προσδιορισμός Περιθωρίων Ασφάλειας*: Ο προσδιορισμός των περιθωρίων ασφάλειας αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να παραμένει ασφαλές σε σημεία λειτουργίας με φόρτιση πέρα από την αρχική. Η διαδικασία προσδιορισμού των παραπάνω περιθωρίων πραγματοποιείται με την *καταπόνηση* του συστήματος. Η καταπόνηση αυτή εκφράζει μια αύξηση των φορτίων ή/και της παραγωγής. Αυτό αποδυναμώνει το σύστημα, μεταφέροντας μια αυξανόμενη ποσότητα ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ ταυτόχρονα εξαντλούνται τα αποθέματα άεργης ισχύος.

Η έννοια του περιθωρίου ασφάλειας έχει δύο σκέλη: α) όριο φόρτισης μετά τη διαταραχή, και β) όριο ασφαλούς λειτουργίας. Το πρώτο προσδιορίζεται με την καταπόνηση του συστήματος μετά την διαταραχή, ενώ το δεύτερο προσδιορίζεται με βάση την ικανότητα του συστήματος να υπομένει τη διαταραχή σε διάφορα επίπεδα φόρτισης.

3. *Προληπτικός Έλεγχος*: Πέρα από τον προσδιορισμό των περιθωρίων ασφάλειας, απαραίτητος είναι και ο προσδιορισμός των βέλτιστων δράσεων ελέγχου για την διόρθωση μιας επικίνδυνης κατάστασης. Ο προληπτικός έλεγχος αναφέρεται σε όλα τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν προκαταβολικά, έτσι ώστε, σε περίπτωση διαταραχής, να διατηρηθούν ή να αυξηθούν τα περιθώρια ασφάλειας. Ο διορθωτικός έλεγχος αναφέρεται στις δράσεις αποκατάστασης της ευστάθειας του συστήματος μετά από εμφάνιση διαταραχής.

Η εκτίμηση ασφάλειας τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο σε νεκρό χρόνο εκτός λειτουργίας (off-line) όσο και σε πραγματικό χρόνο (on-line) [10]. Στην πρώτη περίπτωση, η εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας χρησιμοποιεί τις παραπάνω μεθόδους για προσδιορισμό των ορίων ασφάλειας για όλες τις πιθανές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται εκ των υστέρων από τους χειριστές του Κέντρου Ελέγχου. Για τον προσδιορισμό ορίων ασφάλειας off-line απαιτείται εξαντλητική προσομοίωση που απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη, καθώς και γνώση των παραμέτρων του συστήματος. Βασικές δυσκολίες είναι ο μεγάλος αριθμός των σημείων λειτουργίας του συστήματος, όπως επίσης και η επίδραση δευτερευουσών συνιστωσών και παραμέτρων που δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων.

Η εκτίμηση ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA) βασίζεται στην πραγματική κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι πλέον αναλύεται μόνο ένα σημείο λειτουργίας. Η λειτουργία μιας εφαρμογής εκτίμησης ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο απαιτεί όμως οικονομία σε υπολογιστικό χρόνο, αφού πρέπει να επαναλαμβάνεται μέσα σε κάποια λεπτά. Επομένως, μια τέτοια εφαρμογή περιέχει και επιπλέον μεθόδους ανάλυσης που εξοικονομούν υπολογιστικό χρόνο, όπως το φιλτράρισμα των διαταραχών [7].



### 2.6.2 Εκτίμηση Ασφάλειας Τάσης σε Πραγματικό Χρόνο στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα παρακολουθείται από την εφαρμογή εκτίμησης ασφάλειας τάσης σε πραγματικό χρόνο (on-line VSA), που αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Λιέγης και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος OMASES [12]. Το εργαλείο αυτό εγκαταστάθηκε στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΔΕΣΜΗΕ το 2003 και βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία από τις αρχές του 2005. Σκοπός του on-line VSA είναι η ανάλυση της επίπτωσης κρίσιμων διαταραχών στην ασφάλεια του συστήματος, μέσω του προσδιορισμού των περιθωρίων ασφάλειας με όρους ποσοτήτων μεταφοράς και κατανάλωσης ισχύος στις περιοχές ζήτησης. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με βάση την οιονεί στατική προσέγγιση που αναλύθηκε στην ενότητα 2.3 του παρόντος Κεφαλαίου. Οι κυριότερες λειτουργίες της εφαρμογής on-line VSA είναι [12]:

1. *Φιλτράρισμα των διαταραχών.* Η οιονεί στατική προσέγγιση προσφέρει ταχύτητα υπολογισμών, αλλά σε περίπτωση μεγάλου αριθμού διαταραχών, η προσομοίωση τους μπορεί να απαιτεί σημαντικό χρόνο. Επομένως στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζεται μια απλούστερη διαδικασία επιλογής των διαταραχών που είναι πιθανόν επιβλαβείς. Η αναγνώριση γίνεται με τη μέθοδο της ροής φορτίου και το προσδιορισμό των χαμηλών τάσεων μετά τη διαταραχή.
2. *Προσδιορισμός Ορίων Ασφαλούς Λειτουργίας.* Για μια προκαθορισμένη κατεύθυνση καταπόνησης στο σύστημα (π.χ. αύξηση φορτίων ή/και παραγωγής), το *όριο ασφαλούς λειτουργίας* αναφέρεται στο σημείο λειτουργίας του συστήματος που αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη καταπόνηση και είναι ικανό να αντέξει οποιαδήποτε διαταραχή του συνόλου που εξετάζεται. Κατά τον προσδιορισμό των ορίων ασφαλούς λειτουργίας, οι καταστάσεις καταπόνησης λαμβάνονται από υπολογισμό ροής ισχύος πριν τη διαταραχή και η επίδραση της κάθε διαταραχής αναλύεται μέσω της οιονεί στατικής προσέγγισης. Η καταπόνηση πριν τη διαταραχή υποθέτει πλήρη επαναφορά φορτίου, ενώ η διαδικασία προσδιορισμού των ορίων ασφαλούς λειτουργίας πραγματοποιείται με δυαδική αναζήτηση (binary search), σε περίπτωση μίας διαταραχής ή με ταυτόχρονη δυαδική αναζήτηση (simultaneous binary search) σε περίπτωση συνόλου. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή των τεχνικών αυτών υπάρχει στο [12].
3. *Υπολογισμός Ορίων Φόρτισης.* Το όριο φόρτισης ενός συστήματος δείχνει την ποσότητα καταπόνησης που μπορεί να αντέξει ένα σύστημα πριν καταρρεύσει. Παρά την ύπαρξη θεωρητικών μεθόδων, το on-line VSA υπολογίζει τα όρια φόρτισης μέσω προσομοίωσης, με την επιβολή καταπόνησης στο σύστημα, αυξάνοντας σε μορφή ράμπας το φορτίο ή/και την παραγωγή και παρακολουθώντας τη χρονική απόκριση του συστήματος. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε μορφή καμπυλών PV, των οποίων η χρησιμότητα αναλύθηκε στην Εισαγωγή. Υπολογίζονται δύο είδη ορίων φόρτισης: α) όρια φόρτισης πριν τη διαταραχή, που χρησιμοποιούνται ως αναφορά για τον χειριστή του συστήματος σε συνθήκες

απουσίας διαταραχής, β) όρια φόρτισης μετά τη διαταραχή, τα οποία υπολογίζονται για τις επικίνδυνες μόνο διαταραχές με τα χαμηλότερα περιθώρια ασφάλειας.

Το λογισμικό πίσω από τις παραπάνω λειτουργίες, αποτελείται από δύο πακέτα προγραμμάτων προσομοίωσης, με ξεχωριστή χρήση το καθένα. Για τον προσδιορισμό των ορίων ασφαλούς λειτουργίας και το φιλτράρισμα των διαταραχών χρησιμοποιείται το λογισμικό ASTRE που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης. Το ASTRE αποτελείται από πρόγραμμα ροής φορτίου για την καταπόνηση του συστήματος και το φιλτράρισμα των διαταραχών και από πρόγραμμα προσομοίωσης με τη μέθοδο της οιονεί στατικής προσέγγισης για την προσομοίωση διαταραχών. Ο προσδιορισμός των ορίων φόρτισης μετά τη διαταραχή και η προετοιμασία των καμπυλών PV πραγματοποιείται από το δεύτερο λογισμικό πακέτο WPSTAB που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και καλύφθηκε στην ενότητα 2.5 του παρόντος Κεφαλαίου.

### **3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

Στο παρόν Κεφάλαιο, πραγματοποιείται προσομοίωση και ανάλυση της συμπεριφοράς του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος με έμφαση στην περιοχή της Πελοποννήσου, σε μία κρίσιμη διαταραχή. Η διαταραχή αυτή αναφέρεται σε ένα στιγμιότυπο που χαρακτηρίστηκε ανασφαλές από το on-line VSA [12] και περιλαμβάνει την απώλεια μιας μονάδας παραγωγής στη Μεγαλόπολη. Κάνοντας χρήση του λογισμικού WPSTAB που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο Κεφάλαιο, εξετάζεται η δυνατότητα των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου, να προσφέρουν υποστήριξη άεργης ισχύος στο σύστημα, ώστε να αποτελέσουν μέσα αντιμετώπισης μιας πιθανής κατάρρευσης τάσης. Αναλύονται τρεις περιπτώσεις άεργης υποστήριξης των Αιολικών Πάρκων:

- Αυτόματη ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών σε κάθε πάρκο με βάση την τάση του συστήματος μεταφοράς
- Δυνατότητα έγχυσης αέργου ισχύος στο σύστημα χωρίς περιορισμούς
- Υποστήριξη αέργου ισχύος, με τη χρήση Μετατροπέων Πηγής Τάσης (Voltage Source Converter - VSC), το όριο των οποίων καθορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται σε κάθε ενότητα αυτού του κεφαλαίου, αφορούν το ίδιο στιγμιότυπο με το ίδιο σενάριο διαταραχών. Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει μια κρίσιμη διαταραχή στα 100 s του χρόνου προσομοίωσης (απώλεια της μονάδας No.3 της Μεγαλόπολης), ενώ το φορτίο υπόκειται σε μια συνεχή μεταβολή σε μορφή ράμπας στα 200 s του χρόνου προσομοίωσης με ρυθμό αύξησης 0.0185% ανά δευτερόλεπτο. Το χρονικό βήμα της προσομοίωσης επιλέγεται 1 s.

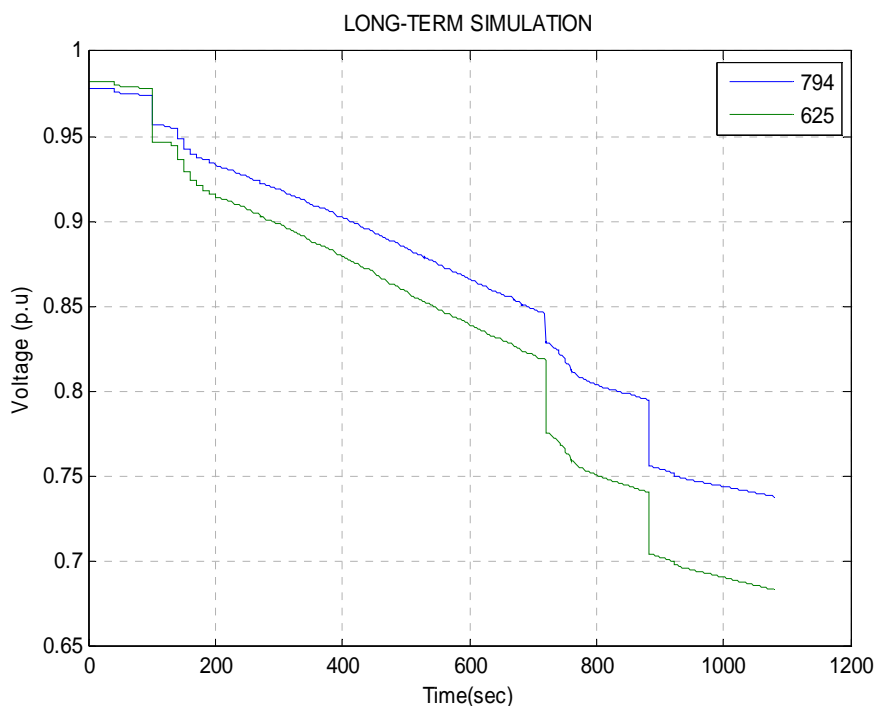
#### **3.1 Το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα και το Στιγμιότυπο του Ιουνίου 2010**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εισαγωγικό κεφάλαιο, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα, λόγω της μεγάλης γεωγραφικής απόστασης μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, βρίσκεται κάτω από πιθανό κίνδυνο κατάρρευσης τάσης. Κατά συνέπεια, παρακολουθείται η ασφάλεια της τάσης από το σύστημα on-line VSA, που περιγράφηκε στην ενότητα 2.6. Η εφαρμογή αυτή, δέχεται δεδομένα πραγματικού χρόνου του συστήματος και ελέγχει, μετά από ένα αριθμό πιθανών διαταραχών, τα περιθώρια ασφάλειας. Αποφαίνεται, έτσι, αν το συγκεκριμένο στιγμιότυπο είναι ανασφαλές από την άποψη της ευστάθειας τάσης.

Ένα τέτοιο στιγμιότυπο χαρακτηρίστηκε ανασφαλές από το on-line VSA, το καλοκαίρι του 2010 και συγκεκριμένα στις 15 Ιουνίου 2010, στις 13:30 ώρα Ελλάδος [13]. Το φορτίο του συστήματος ήταν περί τα 9440 MW με την μονάδα παραγωγής της Μεγαλόπολης No.4 να

βρίσκεται εκτός λειτουργίας. Η κρίσιμη διαταραχή στο παραπάνω στιγμιότυπο ήταν η απώλεια και άλλης μίας μονάδας παραγωγής, της Μεγαλόπολης Νο.3, που οδηγεί στην ενεργοποίηση της προστασίας υπερδιέγερσης όλων των υπόλοιπων μονάδων της περιοχής και εν τέλει προκαλεί τη διαδοχική απώλεια των μονάδων παραγωγής λόγω υπότασης. Καθώς πολλές από τις μονάδες της Πελοποννήσου παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο μεγάλο αστικό κέντρο της Αθήνας, μια συμπεριφορά όπως η παραπάνω μπορεί να οδηγήσει όχι μόνο σε τοπικό αλλά και σε ολικό blackout.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της παραπάνω διαταραχής με το πρόγραμμα WPSTAB, φαίνονται στα Σχ. 3.1-3.4. Ο Πίν. 3.1 συνοψίζει τα χρονικά συμβάντα της προσομοίωσης. Ας σημειωθεί ότι η συντομογραφία ΣΠΥ αναφέρεται στην ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας υπερδιέγερσης της αντίστοιχης μονάδας. Όπως φαίνεται στον Πίν. 3.1, η προαναφερθείσα διαταραχή συμβαίνει στα 100 s του χρόνου προσομοίωσης και αναφέρεται στην απώλεια της μονάδας Νο.3 της Μεγαλόπολης. Στο Σχ. 3.1 απεικονίζεται η τάση ενός υποσταθμού της Πελοποννήσου, που παρουσιάζει συνήθως χαμηλές τιμές τάσης (ζυγός 625, Μέθανα), καθώς και μια ενδεικτική τάση της περιοχής της Αθήνας (ζυγός 794, Ρουφ) συναρτήσει του χρόνου.



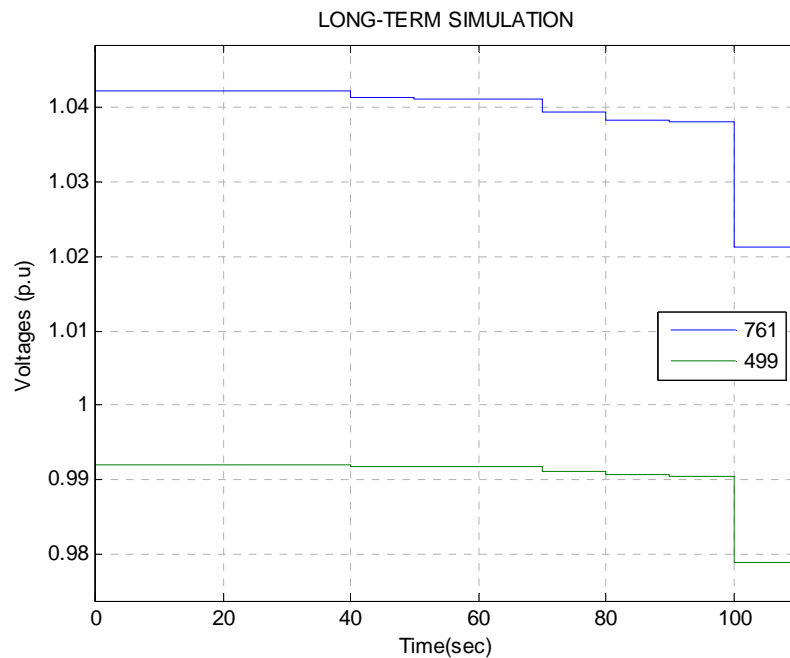
Σχ. 3.1: Τάσεις ζυγών 794 και 625

**Πίν. 3.1:** Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση

Χρόνος t (s)	Γεγονός
70	ΣΠΥ: Άγιος Γεώργιος και Καστράκι 1
100	<b>Απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη 3</b>
130	ΣΠΥ: Λάδωνας 1 και 2
200	<b>Έναρξη γραμμικής αύξησης φορτίου κατά 0.0185%</b>
210	ΣΠΥ: Λαύριο 1
220	ΣΠΥ: Άγιος Δημήτριος 5 και Στράτος I-2
250	ΣΠΥ: Στράτος I-1
260	ΣΠΥ: Πλαστήρας 3 και Στράτος II
340	ΣΠΥ: Καστράκι 3
346	ΣΠΥ: Άγιος Δημήτριος 2
400	ΣΠΥ: Καστράκι 4
439	ΣΠΥ: Άγιος Δημήτριος 4
450	ΣΠΥ: Μεγαλόπολη 1
496	ΣΠΥ: Αμύνταιο 1
512	ΣΠΥ: Λαύριο 6
559	ΣΠΥ: Φλώρινα (Μελίτη)
561	ΣΠΥ: Πλαστήρας 2
606	ΣΠΥ: Άγιος Δημήτριος 1
701	ΣΠΥ: Λαύριο 3
710	<b>Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Μεγαλόπολη 1</b>
720	<b>Απώλεια Μεγαλόπολης 1 (<math>V = 0.8793</math> αμ)</b>
750	ΣΠΥ: Αλουμίνια της Ελλάδας
763	ΣΠΥ: Αμύνταιο 2
771	ΣΠΥ: Λούρος
775	ΣΠΥ: Πουρνάρι I-3
789	ΣΠΥ: Καρδιά 3
801	ΣΠΥ: Καρδιά 1
840	ΣΠΥ: Πουρνάρι I-1
873	<b>Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Άγιος Γεώργιος</b>
883	<b>Απώλεια Αγίου Γεωργίου (<math>V = 0.8732</math> αμ)</b>
913	ΣΠΥ: Κρεμαστά 1 και 3
915	ΣΠΥ: Άγιος Δημήτριος 3
943	ΣΠΥ: Κρεμαστά 2
1066	ΣΠΥ: Ήρων 1
1079	ΣΠΥ: Καρδιά 2
1080	ΣΠΥ: Ήρων 2
1080	<b>Κατάρρευση συστήματος</b>

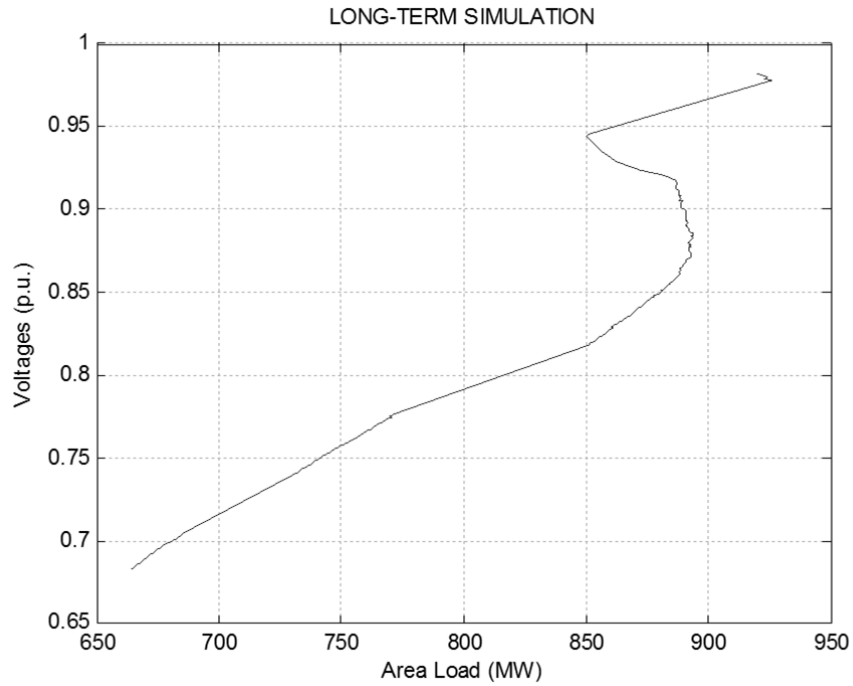
Ο Πίν. 3.1 δείχνει την ύπαρξη χρονικών συμβάντων πριν την διαταραχή των 100 s και πιο συγκεκριμένα την ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης (ΣΠΥ) δύο μονάδων παραγωγής. Θεωρώντας ότι, πριν την εμφάνιση της διαταραχής, το σύστημα όφειλε να βρίσκεται σε απόλυτη ισορροπία, δεν θα έπρεπε να λαμβάνουν χώρα τα παραπάνω γεγονότα. Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στην αρχική επίλυση της ροής φορτίου (για  $t = 0$  s) από το WPSTAB. Οι αρχικές τάσεις κάποιων ζυγών, οι οποίες ρυθμίζονται από Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) προέκυψαν εκτός της αντίστοιχης νεκρής ζώνης. Τα ΣΑΤΥΦ μείωσαν τις τάσεις υπό έλεγχο σε μια προσπάθεια να τις διορθώσουν. Κατά συνέπεια, οι τάσεις διέγερσης κάποιων γεννητριών αυξήθηκαν, με

σκοπό να αντισταθμίσουν την παραπάνω μείωση. Η αύξηση αυτή προκάλεσε την ενεργοποίηση των ΣΠΥ σε κάποιες γεννήτριες και συγκεκριμένα στον Άγιο Γεώργιο (ζυγός 761) και στο Καστράκι No.1 (ζυγός 499). Στο Σχ. 3.2 φαίνονται οι τάσεις των δύο ζυγών για το χρονικό διάστημα πριν τη διαταραχή. Η πρώτη αλλαγή των ΣΑΤΥΦ πραγματοποιείται για  $t = 40$  s, εφόσον η αρχική χρονική καθυστέρηση κάθε ΣΑΤΥΦ έχει οριστεί στα 40 s. Η ενεργοποίηση των ΣΠΥ γίνεται, όπως φαίνεται και στον Πίν. 3.1, για  $t = 70$  s, μετά από χρονική καθυστέρηση 30 s, που έχει οριστεί για το καθένα.

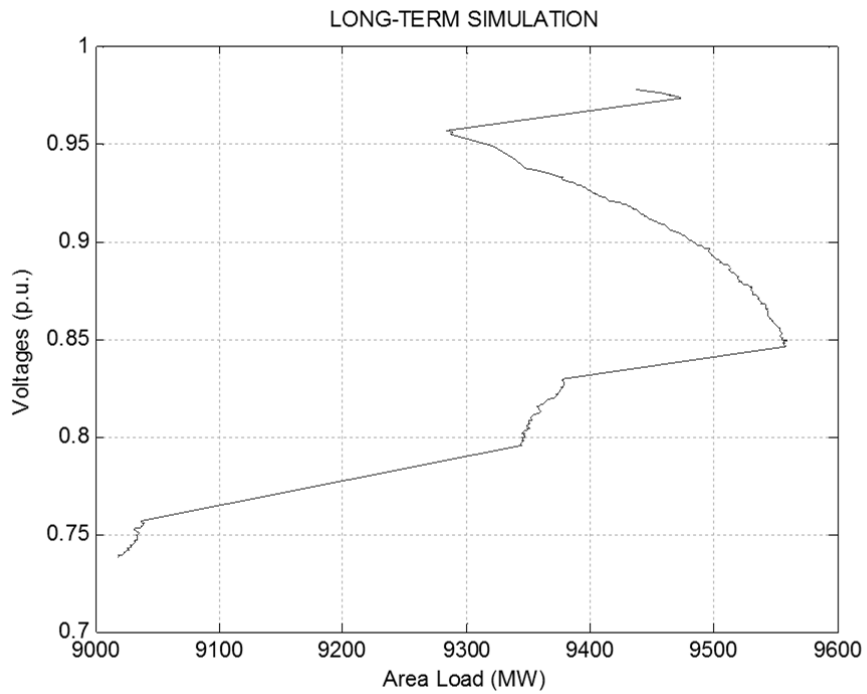


Σχ. 3.2: Τάσεις ζυγών 761 και 499

Στη συνέχεια, το σύστημα υπόκειται σε μια διαταραχή για  $t = 100$  s. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1, μετά την διαταραχή οι τάσεις εμφανίζουν μια απότομη πτώση. Στη συνέχεια, εξακολουθούν να μειώνονται υπό την επίδραση της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ, των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών και της συνεχούς αύξησης του φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, η διαδοχική ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών συνεισφέρει στην ταχύτερη μείωση των τάσεων, όπως φαίνεται και στον Πίν. 3.1. Τη χρονική στιγμή  $t = 710$  s παρατηρείται η πρώτη εμφάνιση υπότασης κάτω του ορίου στη μονάδα παραγωγής No.1 της Μεγαλόπολης. Ακολουθεί, μετά από 10 δευτερόλεπτα για  $t = 720$  s, η αποσύνδεση της μονάδας για τιμή τάσης  $V = 0.8793$  αμ, με συνέπεια να εμφανίζεται μια νέα απότομη πτώση στις τάσεις του Σχ. 3.1. Στη συνέχεια, το σύστημα προστασίας υπερδιέγερσης συνεχίζει να ενεργοποιείται διαδοχικά για διάφορες μονάδες, με αποτέλεσμα την δεύτερη εμφάνιση υπότασης κάτω του ορίου, για  $t = 783$  s, στην μονάδα του Αγίου Γεωργίου. Μετά από 10 δευτερόλεπτα χάνεται και αυτή η μονάδα παραγωγής με τιμή τάσης  $V = 0.8792$  αμ. Επομένως, οι τάσεις για  $t = 883$  s υπόκεινται σε μία ακόμη απότομη πτώση. Η προσομοίωση σταματά στα 1080 s, με την τελική κατάρρευση του συστήματος και τις τάσεις να πλησιάζουν περίπου το 70% των αρχικών τιμών τους.



Σχ. 3.3: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου



Σχ. 3.4: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος

Τα Σχ. 3.3 και 3.4 απεικονίζουν τις PV καμπύλες της Πελοποννήσου και του συνολικού συστήματος αντίστοιχα. Η χρησιμότητα των PV καμπυλών στην ανάλυση ευστάθειας τάσης έχει περιγραφεί στην Εισαγωγή (ενότητα 1.3). Το Σχ. 3.3 δείχνει την τιμή της τάσης του ζυγού 625 (Μέθανα) συναρτήσει του φορτίου της περιοχής της Πελοποννήσου. Όπως φαίνεται, το αρχικό φορτίο κυμαίνεται γύρω στα 920 MW, ενώ η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παρέχει το σύστημα μετά τη διαταραχή είναι περίπου 890 MW. Κατά συνέπεια, δεν υφίσταται περιθώριο ασφάλειας τάσης στην Πελοπόννησο μετά τη διαταραχή και επομένως, φαίνεται απαραίτητη η εκ των προτέρων αποκοπή φορτίου τουλάχιστον 30 MW. Αντίστοιχα, το Σχ. 3.4 δείχνει την τάση του ζυγού 794 (Ρουφ) συναρτήσει ενός συνολικού φορτίου του Συστήματος. Ενώ η περιοχή της Πελοποννήσου αποτυγχάνει να ανταποκριθεί στην διαταραχή, το συνολικό σύστημα είναι σε θέση να παρέχει την αρχική ισχύ των 9440 MW σε ζήτηση, αφού η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ανέρχεται στα 9560 MW. Το περιθώριο ασφάλειας των 120 MW που εμφανίζει το συνολικό σύστημα, δείχνει ότι το πρόβλημα της αστάθειας οφείλεται στην περιοχή της Πελοποννήσου. Παρόλα αυτά, αν η αστάθεια δεν αντιμετωπιστεί έγκαιρα, ο κίνδυνος για ολική κατάρρευση του συστήματος είναι μεγάλος, λόγω αλυσωτών απωλειών.

### 3.2 Παράσταση Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου

Όπως έγινε αντιληπτό και από την παραπάνω ενότητα, για την αποφυγή της αστάθειας τάσης που εμφανίστηκε κατά το στιγμιότυπο του Ιουνίου 2010 μετά από μια κρίσιμη διαταραχή, πρέπει να ληφθούν απαραίτητα μέτρα στην περιοχή της Πελοποννήσου. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται το σενάριο, όπου επτά Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου που αναφέρονται στον Πίν. 3.2 συμβάλλουν, παρέχοντας άεργη υποστήριξη, στην αύξηση του περιθωρίου ασφάλειας του Συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση γίνεται χρήση των συστοιχιών πυκνωτών που βρίσκονται εγκατεστημένες στους υποσταθμούς MT των Αιολικών Πάρκων.

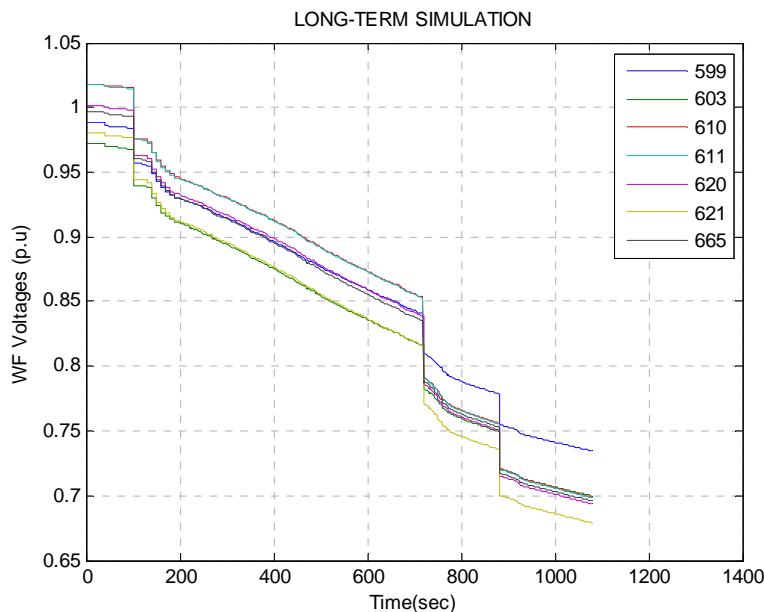
Πίν. 3.2: Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός ΥΤ	Ενεργός ισχύς φορτίου (MW)	Άεργος Ισχύς φορτίου (MVA <sub>r</sub> )	Τάση ζυγού ΥΤ (αμ)
Παναχαϊκό	599	-0.42	-1.46	0.98809
Ελίκη	603	-2.08	-0.91	0.97219
Δόριζα I	610	-13.22	-0.38	1.01814
Δόριζα I-II	611	-10.290	0.44	1.01775
Αγλαδόκαμπος	620	-0.16	1.05	1.00171
Δίδυμα	621	-1.76	-1.44	0.98075
Ζάρακας	665	-3.07	0.42	0.99723

Κατά την αρχική προσομοίωση της προηγούμενης ενότητας, καθένα από τα Αιολικά Πάρκα είχε παρασταθεί ως αρνητικό φορτίο, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.6. Η ενεργός και άεργος ισχύς φορτίου, καθώς και οι αρχικές τάσεις των ζυγών αυτών φαίνονται στον Πίν. 3.2. Στο



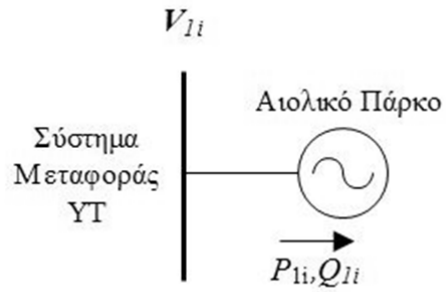
Σχ. 3.5 φαίνονται οι τάσεις των ζυγών συναρτήσει του χρόνου, όπως προέκυψαν κατά την προηγούμενη προσομοίωση. Παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά τους συναρτήσει του χρόνου είναι παρόμοια με αυτή των τάσεων του Σχ. 3.1 και υπόκεινται στις ίδιες μεταβολές.



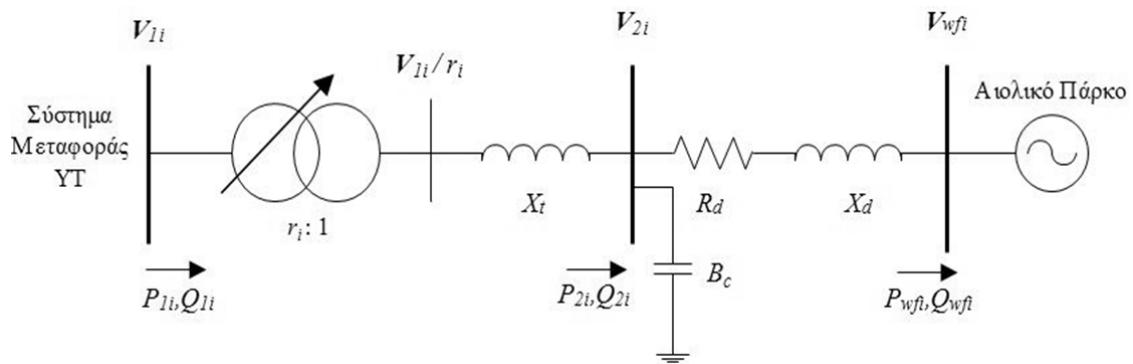
Σχ. 3.5: Τάσεις των ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου

Για να εισαχθεί το μοντέλο των συστοιχιών πυκνωτών στους αντίστοιχους ζυγούς MT των Αιολικών Πάρκων, θεωρήθηκε ένα πιο λεπτομερές ισοδύναμο μοντέλο σύνδεσης τους στην πλευρά MT, το οποίο φαίνεται στο Σχ. 3.7. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα μετασχηματιστή διανομής YT/MT εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, συστοιχίες πυκνωτών εγκατεστημένες στον υποσταθμό MT και μια γραμμή διανομής MT μέχρι το ισοδύναμο Αιολικό Πάρκο. Για λόγους απλούστευσης στην παράσταση των παραπάνω διατάξεων, στο πρόγραμμα προσομοίωσης WPSTAB, ο ζυγός τάσης  $V_{2i}$  του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή παραλείπεται. Το νέο μοντέλο που προκύπτει φαίνεται στο Σχ. 3.8. Όπως φαίνεται, η αντίδραση του μετασχηματιστή έχει πλέον ενσωματωθεί στην αντίδραση της γραμμής διανομής και οι συστοιχίες πυκνωτών βρίσκονται πλέον εγκατεστημένες στον ζυγό MT του Αιολικού Πάρκου, ο οποίος έτσι αποτελεί και τον ζυγό ελέγχου τάσης του ΣΑΤΥΦ.

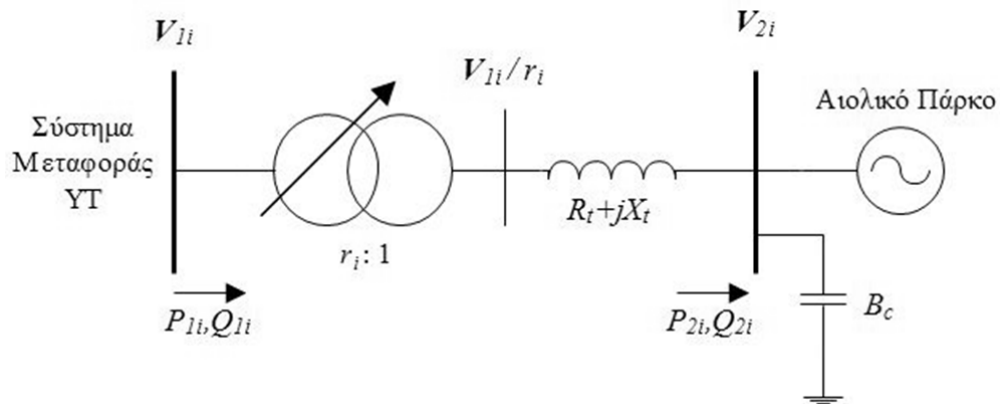
Οι διατάξεις που αποτελούν το απλοποιημένο μοντέλο του Σχ. 3.8 βασίζονται σε κάποιες παραδοχές. Η σύνδεση υλοποιείται μέσω ενός μετασχηματιστή 50 MVA, 150/20 kV, εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση στην πλευρά MT και έχει χρονική καθυστέρηση 30+10 s, δηλαδή αρχική χρονική καθυστέρηση αλλαγής 40 s και κάθε αλλαγή μετέπειτα με καθυστέρηση 10 s.



Σχ. 3.6: Αρχικό μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στην ΥΤ



Σχ. 3.7: Ισοδύναμο μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στη ΜΤ



Σχ. 3.8: Απλουστευμένο ισοδύναμο μοντέλο σύνδεσης Αιολικών Πάρκων στη ΜΤ

Μετά την προσθήκη των μετασχηματιστών, οι αρχικές τάσεις και οι εγχύσεις ισχύος στους ζυγούς ΜΤ που προστέθηκαν πρέπει να καθοριστούν σύμφωνα με την αρχική λύση της ροής, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στον Πίν. 3.2. Χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς του Σχ. 3.8, οι υπολογισμοί των δεδομένων των ζυγών ΜΤ γίνονται με βάση τους εξής τύπους:

$$\hat{I}_i = \frac{P_{1i} - jQ_{1i}}{V_{1i} \angle -\theta_1} \quad (3.1)$$

$$\hat{V}_{2i} = \hat{V}_{1i} - \hat{I}_i (R_t + jX_t) \quad (3.2)$$

$$P_{2i} = V_{2i} I_i \cos \varphi \quad (3.3)$$

$$Q_{2i} = V_{2i} I_i \sin \varphi \quad (3.4)$$

όπου:

$i$  ο αντίστοιχος ζυγός ΥΤ που συνδέεται το Αιολικό Πάρκο,  $\varphi$  η γωνία προπορείας της τάσης  $V_{2i}$  από το αντίστοιχο ρεύμα  $I_i$ ,  $R_t = 0.0142$  αμ η ωμική αντίσταση του μετασχηματιστή και  $X_t = 0.4056$  αμ η επαγωγική του αντίδραση (με βάση ισχύος  $S_B = 100$  ΜVA). Τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών φαίνονται στον Πίν. 3.3.

Πίν. 3.3: Δεδομένα ζυγών ΜΤ Αιολικών Πάρκων

Αιολικό Πάρκο	Ζυγός ΥΤ	Ενεργός ισχύς φορτίου (MW)	Αεργός ισχύς φορτίου (MVar)	Τάση ζυγού ΜΤ (αμ)
Παναχαϊκό	599	-0.42	-1.47	0.99415
Ελίκη	603	-2.08	-0.93	0.97633
Δόριζα I	610	-13.24	-1.06	1.02285
Δόριζα I-II	611	-10.30	0.02	1.01826
Αχλαδόκαμπος	620	-0.16	1.04	0.99748
Δίδυμα	621	-1.76	-1.46	0.98698
Ζάρακας	665	-3.07	0.38	0.99604

Χρησιμοποιώντας τις αρχικές τάσεις των ζυγών ΜΤ του Πίν. 3.3, προσδιορίστηκαν τα όρια της νεκρής ζώνης για το ΣΑΤΥΦ του κάθε μετασχηματιστή τα οποία διαφέρουν από πάρκο σε πάρκο. Επιπλέον, θεωρήθηκε ότι οι αρχικές ρυθμιζόμενες τάσεις ΜΤ βρίσκονται εντός των ορίων, ενώ ο αρχικός λόγος μετασχηματισμού  $r_i$  ήταν 1 αμ, χωρίς αυτός να επηρεάζει ουσιαστικά τα αποτελέσματα. Τα στοιχεία των μετασχηματιστών που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίν. 3.4.

**Πίν. 3.4:** Στοιχεία ΣΑΤΥΦ Αιολικών Πάρκων

Ζυγός YT	$r_{max}$	$r_{min}$	Άνω όριο NZ	Κάτω Όριο NZ	$\Delta r$
599	1.075	0.875	1.090	0.979	0.0125
603	1.075	0.875	0.991	0.961	0.0125
610	1.075	0.875	1.038	1.008	0.0125
611	1.075	0.875	1.032	1.002	0.0125
620	1.075	0.875	1.012	0.982	0.0125
621	1.075	0.875	1.002	0.972	0.0125
665	1.075	0.875	1.050	0.975	0.0125

Οι συστοιχίες των πυκνωτών βρίσκονται εγκατεστημένες στους ζυγούς MT των Αιολικών Πάρκων (Σχ. 3.8) και αποτελούνται από τρεις βαθμίδες με 4 MVAr έκαστη, με συνολική επομένως δυνατότητα αντιστάθμισης 12 MVAr σε κάθε ζυγό και συνολική αντιστάθμιση  $7 \times 12 = 84$  MVAr. Η άεργη υποστήριξη πραγματοποιείται με την ζεύξη κάθε συστοιχίας, η οποία εφαρμόζεται ανάλογα με την τιμή της τάσεως του ζυγού YT του μετασχηματιστή. Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική τιμή της YT του κάθε μετασχηματιστή, προσδιορίζεται μια νεκρή ζώνη για τις συστοιχίες, η υπέρβαση της οποίας καθορίζει την στιγμή ζεύξης ή απόζευξης. Οι τιμές της νεκρής ζώνης για τις συστοιχίες φαίνονται στον Πίν. 3.5, με το άνω όριο να είναι πάντα μικρότερο ή ίσο του 110% για την αποφυγή υπερτάσεων. Τέλος, αξ σημειωθεί ότι υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση για την ζεύξη ή την απόζευξη της κάθε συστοιχίας η οποία ορίζεται στα 60 s, έτσι ώστε να αποφευχθεί η αλληλεπίδραση με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ.

**Πίν. 3.5:** Όρια τάσεων ζεύξης/απόζευξης πυκνωτών των υποσταθμών MT

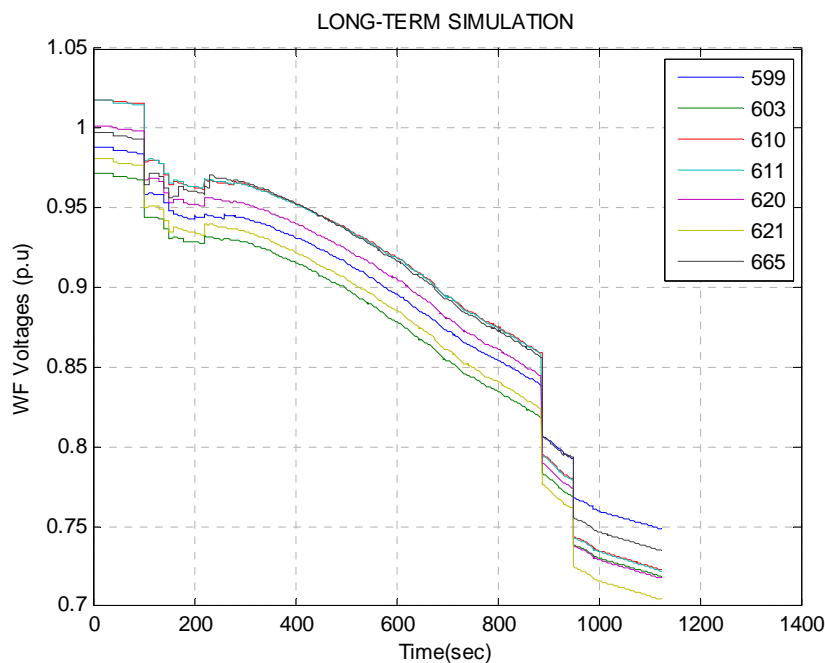
Ζυγός YT	Άνω όριο NZ	Κάτω Όριο NZ
599	1.000	0.9850
603	1.000	0.9700
610	1.100	1.0150
611	1.100	1.0175
620	1.100	1.0000
621	1.000	0.9800
665	1.100	0.9950

### 3.3 Αύξηση Ικανότητας Φόρτισης με Χρήση Συστοιχιών Πυκνωτών

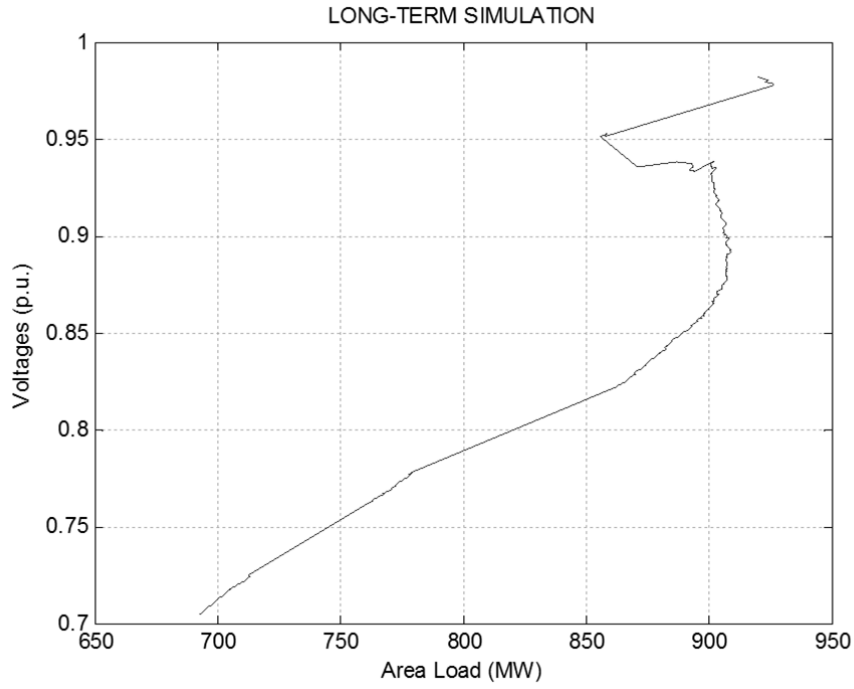
Μετά την προσθήκη των διατάξεων του απλουστευμένου μοντέλου σύνδεσης του Σχ. 3.8 των Αιολικών Πάρκων στα δεδομένα του WPSTAB, το επόμενο βήμα είναι η εκ νέου προσομοίωση του στιγμιότυπου της ενότητας 3.1. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την αυτόματη ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών φαίνονται στα Σχ. 3.9-3.11. Στο Σχ. 3.9 απεικονίζονται οι τάσεις των ζυγών YT των 7 Αιολικών Πάρκων, ενώ στα Σχ. 3.10 και 3.11 παρουσιάζονται οι PV καμπύλες για το σύστημα της Πελοποννήσου και το συνολικό σύστημα αντίστοιχα. Στον Πίν. 3.6 φαίνονται οι χρονικές στιγμές εμφάνισης των διάφορων συμβάντων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αξ σημειωθεί, ότι εδώ παραλείπονται οι ενεργοποιήσεις των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών.

**Πίν. 3.6:** Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση

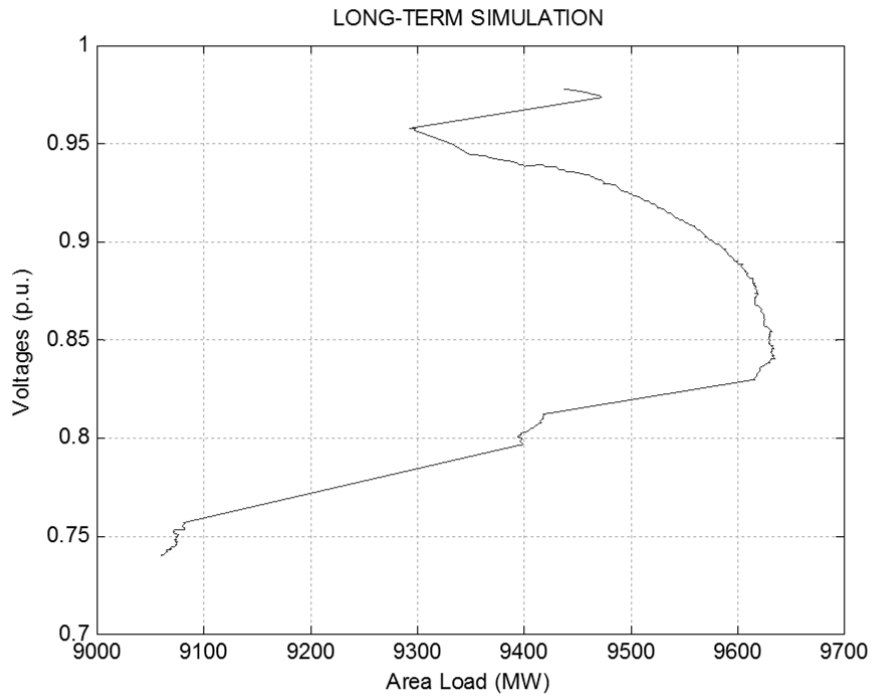
Χρόνος t (s)	Γεγονός
100	Απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη 3
100	Ζεύξη 1ης συστοιχίας: 621, 603, 611, 620 (4MVAr)
110	Ζεύξη 1ης συστοιχίας: 665 (4MVAr)
140	Ζεύξη 1ης συστοιχίας: 599 (4MVAr)
160	Ζεύξη 2ης συστοιχίας: 621, 603, 611, 620 (8MVAr)
160	Ζεύξη 1ης συστοιχίας: 610 (4MVAr)
170	Ζεύξη 2ης συστοιχίας: 665 (8MVAr)
200	Ζεύξη 2ης συστοιχίας: 599 (8MVAr)
200	Έναρξη γραμμικής αύξησης φορτίου κατά 0.0185%
220	Ζεύξη 3ης συστοιχίας: 621, 603, 611, 620 (12MVAr)
220	Ζεύξη 2ης συστοιχίας: 610 (8MVAr)
230	Ζεύξη 3ης συστοιχίας: 665 (12MVAr)
260	Ζεύξη 3ης συστοιχίας: 599 (12MVAr)
280	Ζεύξη 3ης συστοιχίας: 610 (12MVAr)
878	Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Μεγαλόπολη 1
888	Απώλεια Μεγαλόπολης 1 ( $V = 0.8786$ αμ)
939	Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Άγιος Γεώργιος
949	Απώλεια Αγίου Γεωργίου ( $V = 0.8787$ αμ)
1124	Κατάρρευση συστήματος



**Σχ. 3.9:** Τάσεις των ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου



Σχ. 3.10: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου



Σχ. 3.11: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος

Από το Σχ. 3.9, γίνεται εύκολα αντιληπτή, σε σύγκριση με το Σχ. 3.5, η λειτουργία και η επίδραση των συστοιχιών πυκνωτών στις τάσεις των ζυγών ΥΤ των πάρκων. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα τον ζυγό 665, η ζεύξη των συστοιχιών πραγματοποιείται στις χρονικές στιγμές  $t = 110$  s,  $t = 170$  s και  $t = 230$  s, κατά τις οποίες η τάση του ζυγού εμφανίζει μια απότομη άνοδο λόγω της αντιστάθμισης. Ως αποτέλεσμα, η πρώτη απώλεια μονάδας, που αφορούσε τη μονάδα Νο.1 της Μεγαλόπολης καθυστερεί, κάνοντας πλέον την εμφάνιση της για  $t = 888$  s, ενώ ακολουθεί και η μονάδα του Αγίου Γεωργίου για  $t = 949$  s. Τελικά, το σύστημα καταρρέει και η προσομοίωση λήγει για  $t = 1124$  s, σε αντίθεση με το σενάριο της προηγούμενης ενότητας όπου η κατάρρευση συνέβαινε για  $t = 1080$  s. Ας σημειωθεί επίσης ότι κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν όλες οι συστοιχίες των πυκνωτών στους υποσταθμούς των Αιολικών Πάρκων, παρέχοντας συνολικά στο σύστημα  $7 \times 12 = 84$  MVar άεργη υποστήριξη.

Η επίδραση των συστοιχιών πυκνωτών μπορεί, επίσης, να φανεί και μέσω των PV καμπυλών των Σχ. 3.10 και 3.11. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή της Πελοποννήσου παρατηρούμε αρχικά ότι μετά τη διαταραχή η τάση μειώνεται κατά περίπου 2%, σε αντίθεση με την περίπτωση χωρίς τις συστοιχίες, όπου η μείωση ήταν στο 3%. Στη συνέχεια, τη στιγμή που το φορτίο βρίσκεται στα 870 MW, το επίπεδο της τάσης εμφανίζει μια σχετική άνοδο την οποία συγκρατεί μέχρι και τα 900 MW. Από το σημείο εκείνο και μετά η τάση συνεχίζει πτωτική πορεία, ώσπου οι απώλειες των μονάδων προκαλούν την τελική της κατάρρευση. Το περιθώριο ασφάλειας της περιοχής έχει αυξηθεί σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αφού πλέον το τοπικό σύστημα έχει την ικανότητα να καλύψει περί τα 910 MW, αλλά για ακόμη μία φορά αδυνατεί να ανταποκριθεί στο αρχικό φορτίο των 920 MW. Παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και το ολικό σύστημα, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.11, το οποίο έχει πλέον αυξήσει την ικανότητα φόρτισης του κατά 70 MW, ικανό πλέον να παρέχει με ασφάλεια μέχρι και 9630 MW, μετά τη διαταραχή. Υποθέτοντας ότι το αρχικό φορτίο παραμένει το ίδιο, το περιθώριο ασφάλειας ανέρχεται στα 200 MW περίπου.

Συμπερασματικά, οι συστοιχίες πυκνωτών που διαθέτουν οι υποσταθμοί των 7 Αιολικών Πάρκων, έχουν, όπως ήταν αναμενόμενο, μια θετική επίδραση στην αύξηση της ασφάλειας του συστήματος μετά τη κρίσιμη διαταραχή. Ενώ το ολικό σύστημα συνέχισε να μην παρουσιάζει πρόβλημα αστάθειας, το τοπικό δίκτυο της Πελοποννήσου εξακολουθεί να βρίσκεται σε κατάσταση αναγκαστικής αποκοπής φορτίου για την ασφαλή λειτουργία του.

### **3.4 Έγχυση Αέργου Ισχύος Χωρίς Περιορισμούς από τα Αιολικά Πάρκα**

Η αντιστάθμιση αέργου ισχύος μέσω συστοιχιών πυκνωτών που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ήταν επιτυχής ως προς την αύξηση της ικανότητας φόρτισης του δικτύου της Πελοποννήσου κατά 20 MW, αλλά το πρόβλημα της αστάθειας στην περιοχή παρέμεινε, αφού η κάλυψη του αρχικού φορτίου του συστήματος στάθηκε αδύνατη. Σε αυτή την ενότητα, πραγματοποιείται ανάλυση της περίπτωσης, όπου η διεσπαρμένη

παραγωγή αιολικής ενέργειας, που βρίσκεται εγκατεστημένη στην Πελοπόννησο και συγκεκριμένα τα 7 προαναφερθέντα Αιολικά Πάρκα, έχουν την δυνατότητα παροχής αέργου ισχύος χωρίς όριο στο δίκτυο σε περίπτωση επικείμενης αστάθειας του συστήματος.

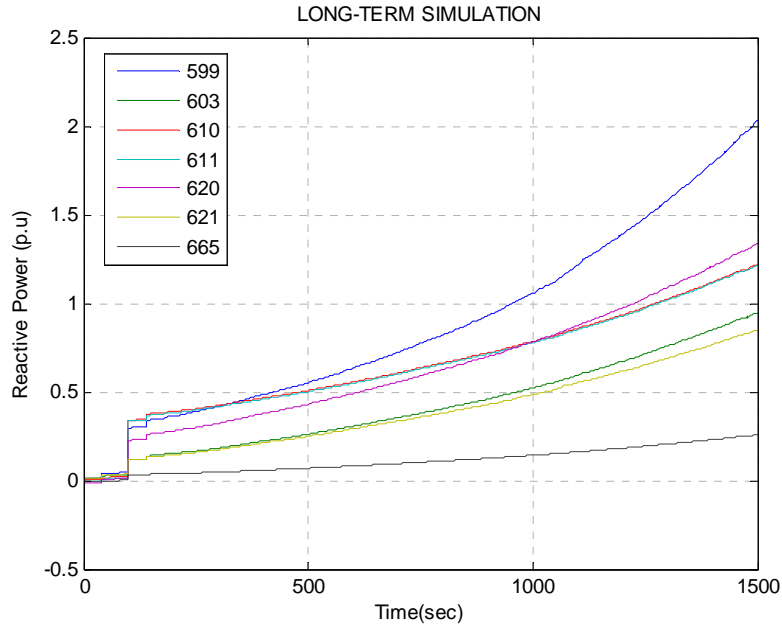
Δεδομένου ότι η πραγματική έγχυση αέργου ισχύος έχει πάντα κάποιο όριο, σκοπός αυτής της προσομοίωσης είναι να προσδιορίσουμε την ποσότητα έγχυσης αέργου ισχύος που απαιτείται έτσι ώστε να διατηρήσουμε τις τάσεις των ζυγών YT των Αιολικών Πάρκων σε σταθερά επίπεδα καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για να επιτευχθεί αυτό, ορίσαμε στα δεδομένα του λογισμικού προσομοίωσης WPSTAB τους ζυγούς των πάρκων ως ζυγούς παραγωγής σταθερής τάσης και σταθερής ενεργού ισχύος (ζυγούς PV). Η τάση και η ενεργός ισχύς παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αρχικές τιμές τους, ενώ η άεργος παραγωγή μεταβάλλεται κατάλληλα. Στον Πίν. 3.5 βρίσκονται τα στοιχεία των ζυγών των 7 Αιολικών Πάρκων που προσθέσαμε στα δεδομένα του WPSTAB.

**Πίν. 3.7:** Στοιχεία ζυγών ΑΠ για τον προσδιορισμό αναγκαίας άεργης υποστήριξης

Ζυγός YT	Ενεργός παραγωγή (MW)	Αρχική Άεργος παραγωγή (MVar)	Τάση Αναφοράς (αμ)
599	0.42	1.46	0.98809
603	2.08	0.91	0.97219
610	13.22	0.38	1.01814
611	10.29	-0.44	1.01775
620	0.16	-1.05	1.00171
621	1.76	1.44	0.98075
665	3.07	-0.42	0.99723

Στα Σχ. 3.12-3.14 φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Ο πίνακας συμβάντων εδώ παραλείπεται, καθώς περιλαμβάνει μόνο περιπτώσεις ενεργοποίησης των συστημάτων προστασίας υπερδιέγερσης των γεννητριών. Στο Σχ. 3.12, παρουσιάζεται η άεργος παραγωγή του κάθε ζυγού κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η έγχυση αέργου ισχύος στο δίκτυο είναι συνεχώς αυξανόμενη και μάλιστα εκθετική, με την εξαίρεση της στιγμής της διαταραχής στα 100 s, όπου μεταβάλλεται απότομα για να επιτευχθεί άμεση ανταπόκριση στην απώλεια της μονάδας No.3 της Μεγαλόπολης. Στο τέλος της προσομοίωσης, η οποία φτάνει φυσικά σε πλήρη διάρκεια (1500 s) σημειώνεται η συνολική ποσότητα αέργου ισχύος που απαιτείται από κάθε ζυγό για την διατήρηση των τάσεων σε σταθερά επίπεδα. Οι ποσότητες αυτές φαίνονται στον Πίν. 3.8.



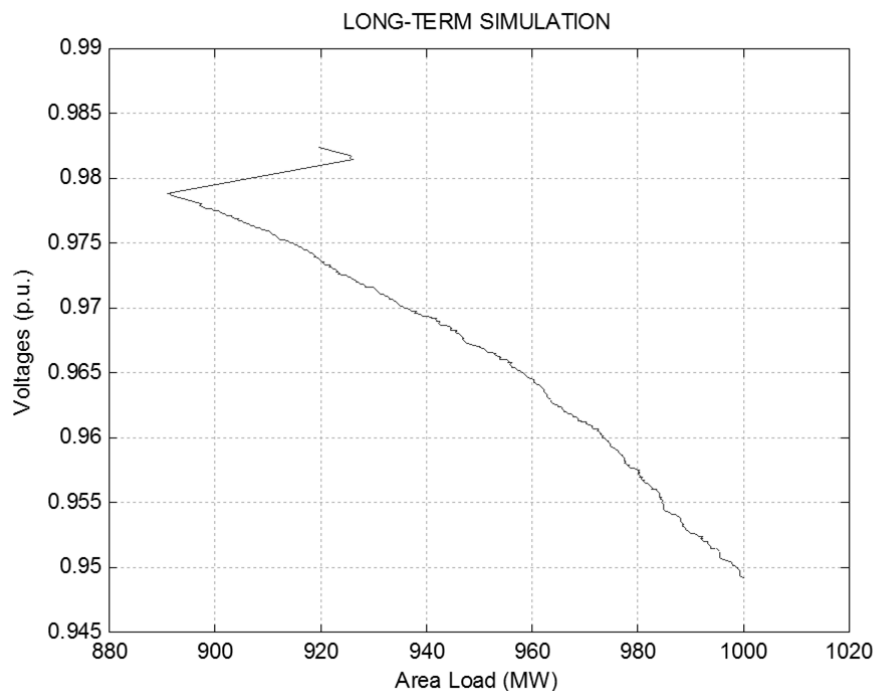


Σχ. 3.12: Αεργος παραγωγή ζυγών ΥΤ των Αιολικών Πάρκων

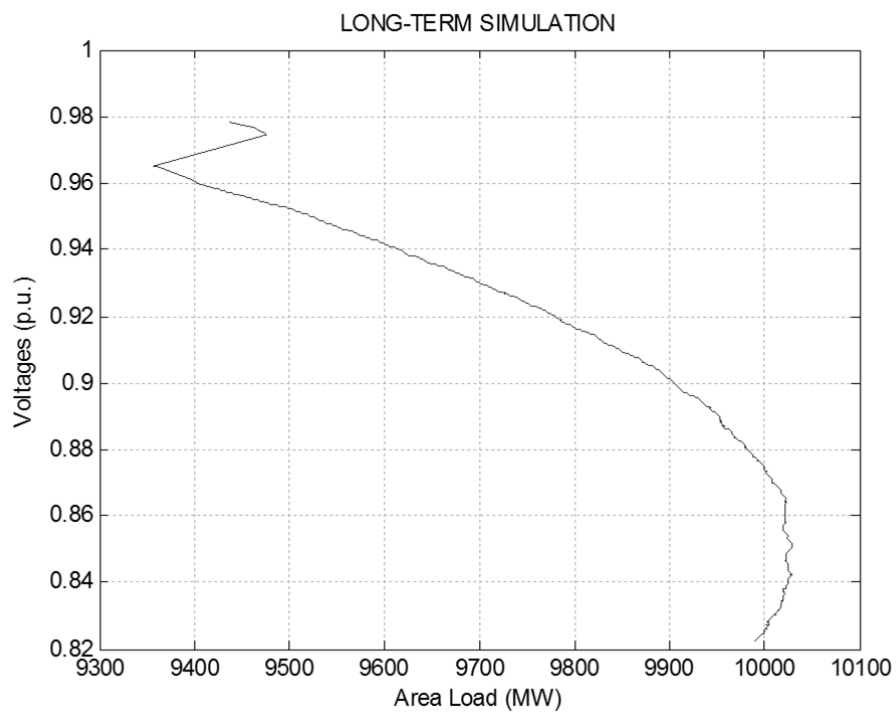
Πίν. 3.8: Αεργος υποστήριξη των ζυγών ΥΤ των Αιολικών Πάρκων στο τέλος της προσομοίωσης

Ζυγός ΥΤ	Αεργος Υποστήριξη (MVar)
599	203.43
603	94.70
610	121.94
611	121.27
620	133.57
621	85.05
665	25.71
<b>Σύνολο</b>	<b>785.67</b>

Οι PV καμπύλες των Σχ. 3.13 και 3.14 καθιστούν πιο εμφανή την αποτελεσματικότητα της παροχής αέργου ισχύος χωρίς όρια στο σύστημα, όσον αφορά την ικανότητα φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη PV της τάσης στο ζυγό στα Μέθανα συναρτήσει του φορτίου της Πελοποννήσου (Σχ. 3.13), αποδεικνύει ουσιαστικά την λύση του προβλήματος της αστάθειας τάσης που εμφανιζόταν. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς μετά τη διαταραχή ανέρχεται πλέον στα 1000 MW, προσφέροντας ένα περιθώριο ασφάλειας των 80 MW στο τοπικό σύστημα, εφόσον το αρχικό φορτίο βρίσκεται στα 920 MW. Επιπλέον, επιτυγχάνεται και η αποφυγή της κατάρρευσης τάσης καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης όχι μόνο στην περιοχή της Πελοποννήσου, αλλά σε όλο το σύστημα, όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.14, στην καμπύλη PV μιας αντιπροσωπευτικής τάσης της Αθήνας



Σχ. 3.13: PV καμπύλη της Πελοποννήσου



Σχ. 3.14: PV καμπύλη του συνολικού δικτύου

συναρτήσει του ολικού φορτίου. Μάλιστα, η συγκεκριμένη καμπύλη δείχνει και μια ικανότητας φόρτισης του ολικού δικτύου της τάξεως των 10020 MW. Η παραπάνω συμπεριφορά ήταν αναμενόμενη αφού μια οποιαδήποτε τοπική πηγή άεργης υποστήριξης χωρίς όρια, θα έλυνε το πρόβλημα της περιοχής.

Συμπερασματικά, όπως δείχνει και ο Πίν. 3.8, συνολικά περίπου 786 MVA<sub>r</sub> χρειάστηκαν για να αποφύγουμε την κατάρρευση του συστήματος, αυξάνοντας τα περιθώρια ασφάλειας. Ένα τέτοιο ποσό αντιστάθμισης δεν είναι φυσικά ρεαλιστικό, και η υλοποίηση μιας τέτοιας διάταξης υποστήριξης αέργου ισχύος θα ήταν μάλλον ασύμφορη. Ένα πιο ρεαλιστικό σενάριο αναλύεται στην επόμενη ενότητα.

### 3.5 Έγχυση Αέργου Ισχύος από Μετατροπείς Πηγής Τάσης

Σε αυτή την ενότητα, εξετάζεται το σενάριο, όπου τα 7 Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου του Πίν. 3.2 παρέχουν τοπικά άεργη υποστήριξη, περιορισμένη με ένα άνω όριο, σε αντίθεση με την απεριόριστη έγχυση άεργης ισχύος που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ο περιορισμός αυτός πραγματοποιείται με τον ορισμό μιας μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής εσωτερικής τάσης και ρεύματος που εγχέεται σε κάθε υποσταθμό των Αιολικών Πάρκων, περιορίζοντας έτσι και τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης. Το μέγιστο ρεύμα μεταφράζεται σε μια μέγιστη ποσότητα αέργου και ενεργού ισχύος, καθορίζοντας έτσι και την ποσότητα της άεργης υποστήριξης από κάθε πάρκο.

Ο παραπάνω περιορισμός του εγχεόμενου ρεύματος θεωρούμε ότι πραγματοποιείται μέσω Μετατροπέων Πηγής Τάσης (Voltage-Source Converter - VSC) [19], οι οποίοι βρίσκονται συνδεδεμένοι στους ζυγούς YT των Αιολικών Πάρκων. Οι μετατροπείς αυτοί παρέχουν μια ρυθμιζόμενη εναλλασσόμενη τάση, χρησιμοποιώντας ελεγχόμενα ημιαγώγιμα στοιχεία που διαθέτουν ικανότητα έναυσης και σβέσης (IGBT, GTO, MTO, IGCT, κ.τ.λ.). Τέτοιοι μετατροπείς ισχύος είναι τάχιστοι στην απόκριση τους και επομένως για ευκολία και χωρίς βλάβη της γενικότητας, θεωρούμε ότι στην προσομοίωση η απόκριση τους είναι ακαριαία. Ας σημειωθεί επίσης ότι τέτοιες διατάξεις δεν βρίσκονται κατ' ανάγκη εγκατεστημένες στις διάφορες μορφές της Διεσπαρμένης Παραγωγής, αλλά η εξάπλωση τους είναι συνεχής. Για ευκολία, στην παρούσα ενότητα, θεωρείται ότι η έγχυση ρεύματος γίνεται κατευθείαν στο ζυγό YT των Αιολικών Πάρκων.

#### 3.5.1 Αναπαράσταση Αιολικών Πάρκων με Μετατροπείς Ισχύος στο WPSTAB

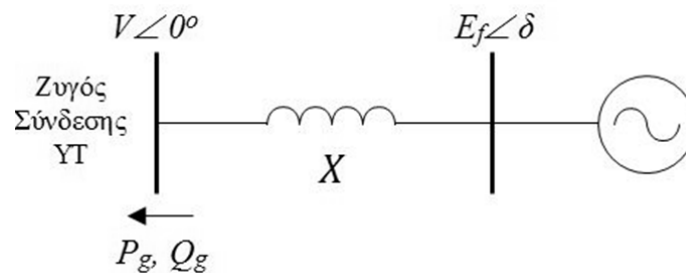
Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των Αιολικών Πάρκων της Πελοποννήσου με θεώρηση Μετατροπέων Πηγής Τάσης, οι ζυγοί YT των πάρκων ορίστηκαν στα δεδομένα του WPSTAB ως ζυγοί παραγωγής. Σε κάθε ζυγό παραγωγής προστέθηκε μια πηγή τάσης με χρήση του ενσωματωμένου μοντέλου γεννήτριας του WPSTAB. Οι γεννήτριες αυτές θεωρήθηκαν χωρίς μαγνητικό κορεσμό με εσωτερική επαγωγική αντίδραση  $X = X_q = X_d = 0.1$  αμ, αυθαίρετα επιλεγόμενη και υπολογισμένη στη βάση της γεννήτριας. Η

ονομαστική ισχύς της κάθε πηγής τάσης ορίζεται στα  $S_N = 50 \text{ MVA}$  και η ονομαστική τάση στα  $V_N = 150 \text{ kV}$ . Το μοντέλο της πηγής τάσης φαίνεται στο Σχ. 3.15.

Ο υπολογισμός της μέγιστης εσωτερικής τάσης  $E_f^{lim}$  της κάθε πηγής έγινε με βάση το Σχ. 3.15. Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή (ενότητα 1.5), κάτω από σταθερή τερματική τάση  $V$  η μέγιστη εσωτερική τάση δίνεται από τον τύπο:

$$V^2 (E_f^{lim})^2 = (V^2 + XQ_g)^2 + (XP_g)^2 \quad (3.5)$$

όπου  $P_g$  και  $Q_g$  η μέγιστη ενεργός και άεργος παραγωγή.



Σχ. 3.15: Μοντέλο πηγής τάσης με εσωτερική αντίδραση

Επειδή, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης η παραγόμενη ενεργός ισχύς  $P_g$  από τα Αιολικά Πάρκα ήταν πολύ μικρή, ο υπολογισμός της  $E_f^{lim}$  γίνεται με βάση την παραγωγή αέργου ισχύος, ίσης με την ονομαστική  $S_N$ , δηλαδή  $Q_g = 50 \text{ MVA} = 1 \text{ αμ}$ , ενώ η ενεργός ισχύς  $P_g$  ορίζεται ίση με το μηδέν. Θεωρώντας, τέλος, ονομαστική τάση σύνδεσης και κάνοντας τους υπολογισμούς βρίσκουμε τελικά ότι για κάθε πάρκο:

$$E_f^{lim} = 1.1 \text{ αμ} \quad (3.6)$$

Εφόσον οι πηγές τάσεις βασίζονται στο μοντέλο γεννήτριας του WPSTAB, υιοθετούνται και οι διατάξεις ελέγχου που το διέπουν, όπως αυτές περιγράφονται στην ενότητα 2.4 του προηγούμενου Κεφαλαίου. Ο έλεγχος της τάσης και της παρεχόμενης ισχύος των πηγών τάσης γίνεται μέσω Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (APT). Το αναλογικό κέρδος του κάθε APT ορίζεται αυθαίρετα στα 200 αμ. Επίσης, η μέγιστη εσωτερική τάση διατηρείται από το Σύστημα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), το οποίο λειτουργεί για κάθε πηγή τάσης με χρονική καθυστέρηση 1 s και αναλογικό κέρδος μηδέν.

Όλα τα υπόλοιπα δεδομένα που δεν αναφέρθηκαν παραπάνω καταχωρήθηκαν ως μηδενικής τιμής. Τα στοιχεία των πηγών τάσης όλων των Αιολικών Πάρκων βρίσκονται συγκεντρωμένα στον Πίν. 3.9.

Πίν. 3.9: Δεδομένα Μετατροπέων Πηγής Τάσης που προστέθηκαν στο WPSTAB

Ζυγός YT	P (MW)	Q (Mvar)	V <sub>ref</sub> (αμ)	Q <sub>min</sub> /Q <sub>max</sub> (Mvar)	P <sub>min</sub> /P <sub>max</sub> (MW)	S (MVA)	X <sub>q</sub> /X <sub>d</sub> (αμ)	E <sub>f,min</sub> /E <sub>f,max</sub> (αμ)	G <sub>a</sub> (αμ)	T <sub>oxl</sub> (s)
599	0.42	1.46	0.98809	-50/50	0.42/0.42	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
603	2.08	0.91	0.97219	-50/50	2.08/2.08	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
610	13.22	0.38	1.01814	-50/50	13.22/13.22	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
611	10.29	-0.44	1.01775	-50/50	10.29/10.29	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
620	0.16	-1.05	1.00171	-50/50	0.16/0.16	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
621	1.76	1.44	0.98075	-50/50	1.76/1.76	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1
665	3.07	-0.42	0.99723	-50/50	3.07/3.07	50	0.1/0.1	0/1.1	200	1

### 3.5.2 Προσομοίωση περιορισμού ρεύματος στα Αιολικά Πάρκα

Όπως προαναφέρθηκε, ο περιορισμός της έγχυσης ισχύος από τα Αιολικά Πάρκα γίνεται με τη μορφή του προσδιορισμού του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος σε κάθε υποσταθμό. Με άλλα λόγια, είναι αναγκαίος ο περιορισμός του ρεύματος των πηγών τάσης, που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των πάρκων στο WPSTAB. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο της Προστασίας Ρεύματος Τυμπάνου (ΠΡΤ) που είναι ενσωματωμένο στο WPSTAB και περιγράφηκε στην ενότητα 2.4.7 του προηγούμενου Κεφαλαίου.

Το μοντέλο της Προστασίας Ρεύματος Τυμπάνου έπρεπε να υποβληθεί σε κάποιες τροποποιήσεις με στόχο την προσομοίωση της συμπεριφοράς των Μετατροπέων Πηγής Τάσης. Για να αποφευχθεί η ανεπιθύμητη επίδραση των τροποποιήσεων στις υπόλοιπες γεννήτριες του συστήματος, αναπτύχθηκε στο WPSTAB ένα νέο μοντέλο περιορισμού ρεύματος με βάση το αρχικό, το οποίο ενσωματώθηκε στις πηγές τάσης των Αιολικών Πάρκων. Το μοντέλο αυτό διαφέρει από το αρχικό ως προς τα εξής:

- Η έννοια του στάτη δεν είναι πλέον κατάλληλη. Ο περιορισμός αφορά πλέον το ρεύμα του Μετατροπέα Πηγής Τάσης ή του πάρκου γενικότερα.
- Η αρχική καθυστέρηση  $d$  ενεργοποίησης του μηχανισμού ορίστηκε μηδενική, με στόχο την προσομοίωση της ταχύτητας των Μετατροπέων Πηγής Τάσης. Η ενεργοποίηση συμβαίνει ακαριαία, σύμφωνα πάντα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης (1 s).
- Εφόσον η ενεργός παραγωγή του κάθε πάρκου θεωρείται σταθερή, δεν υφίσταται πλέον η δυνατότητα μείωσης της ενεργού παραγωγής για τη μείωση του ρεύματος και το αντίστοιχο τμήμα του αλγορίθμου παραλείπεται. Ο εναπομένον τρόπος μείωσης του ρεύματος είναι μέσω της μείωσης της τάσης του ζυγού YT των πάρκων.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ρεύματος λαμβάνεται ίσο με το ονομαστικό για κάθε πηγή τάσης και στην προκειμένη περίπτωση είναι:

$$I_{vsc}^{lim} = I_{vsc,N} = \frac{S_N}{V_N} = 0.5 \text{ αμ} \quad (3.7)$$

ανηγμένο στη βάση ρεύματος του συστήματος  $I_B = S_B/V_B = 100 \text{ MVA}/150 \text{ kV}$ .

Τα υπόλοιπα μεγέθη που αφορούν το μοντέλο περιορισμού ρεύματος λαμβάνουν τις τιμές:  $G_{AVR} = 200 \text{ αμ}$ ,  $\alpha = 0.0004$ ,  $\beta = 0.0001$  και  $d_2 = \Delta t$ , όπου  $\Delta t$  το χρονικό βήμα της προσομοίωσης.

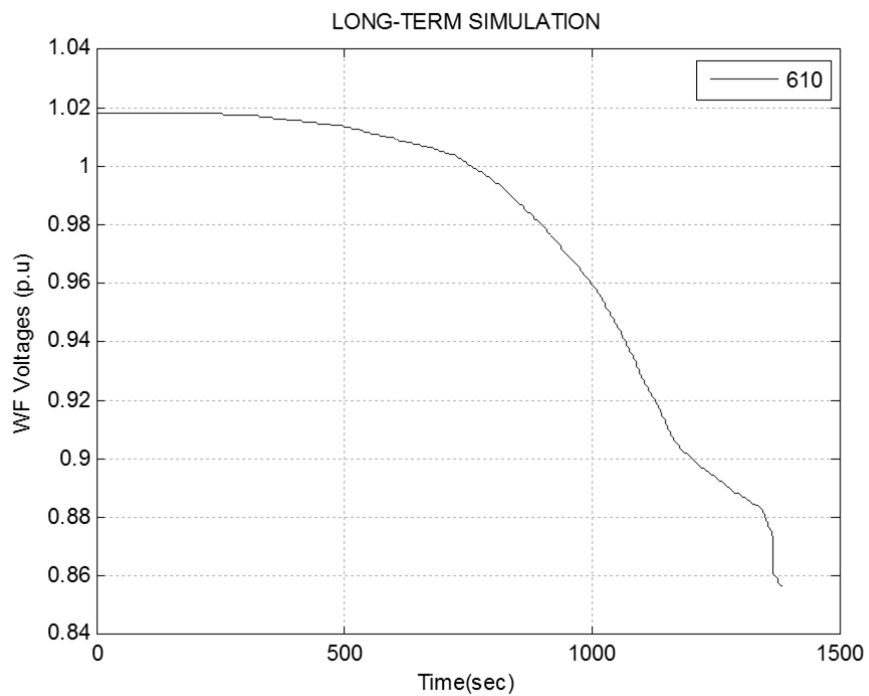
### 3.5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Τα Σχ. 3.16-3.20 δείχνουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τον ζυγό YT 610 του Αιολικού Πάρκου Δόριζα Ι. Ο Πίν. 3.10 παρουσιάζει την αλληλουχία των πιο σημαντικών γεγονότων της προσομοίωσης. Αρχικά, γίνεται η ανάλυση της συμπεριφοράς μόνο του ζυγού 610, με σκοπό την κατανόηση των μηχανισμών που αναπτύχθηκαν προηγουμένως.

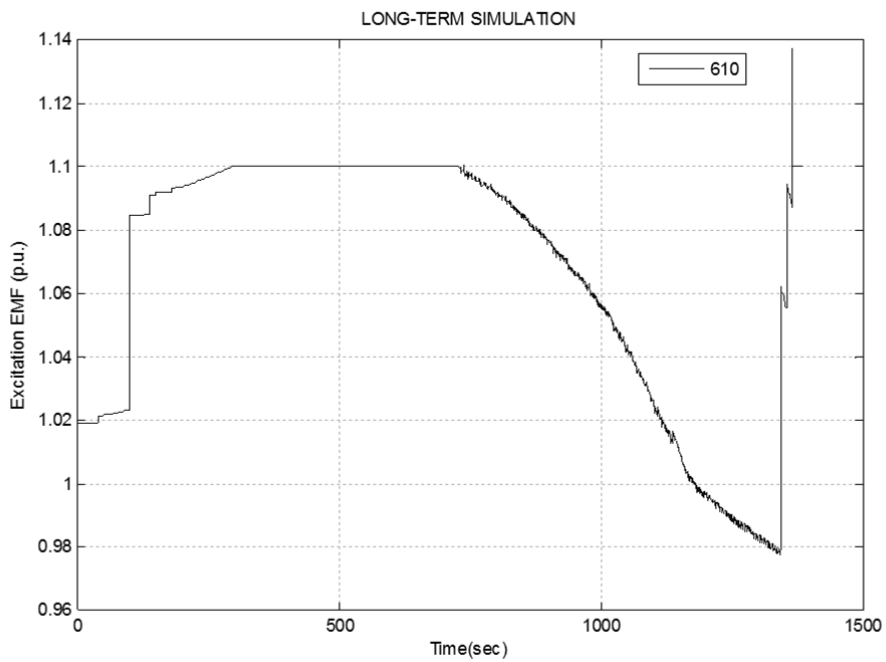
**Πίν. 3.10:** Αλληλουχία γεγονότων κατά την προσομοίωση

Χρόνος t (s)	Γεγονός
100	Απώλεια μονάδας Μεγαλόπολη 3
200	Έναρξη γραμμικής αύξησης φορτίου κατά 0.0185%
418	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 599
545	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 620
679	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 603
731	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 610
744	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 611
751	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 621
1049	Ενεργοποίηση περιορισμού ρεύματος: 665
1334	Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Μεγαλόπολη 1
1344	Απώλεια Μεγαλόπολης 1 ( $V = 0.8790 \text{ αμ}$ )
1345	Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Άγιος Γεώργιος
1355	Απώλεια Αγίου Γεωργίου ( $V = 0.8667 \text{ αμ}$ )
1356	Διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης: Λαύριο 1
1366	Απώλεια Λαυρίου 1 ( $V = 0.8793 \text{ αμ}$ )
1385	Κατάρρευση συστήματος

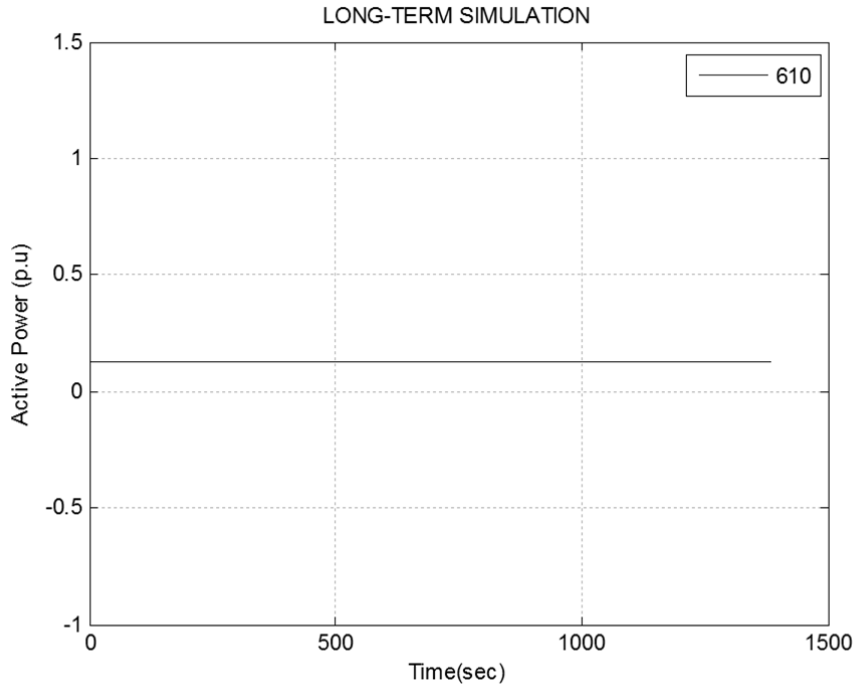
Ξεκινώντας για  $t = 1 \text{ s}$  και μέχρι τη χρονική στιγμή της διαταραχής για  $t = 100 \text{ s}$ , η τάση του ζυγού YT 610 παραμένει σταθερή στην αρχική της τιμή  $V = 1.0181 \text{ αμ}$ , κάτω από τον έλεγχο της αυτόματης ρύθμισης τάσης, ενώ η παραγωγή αέργου ισχύος αρχίζει να αυξάνει (Σχ. 3.19). Η παραγωγή αυτή πραγματοποιείται από την αντίστοιχη αύξηση της εσωτερικής ΗΕΔ, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.17. Ας σημειωθεί εδώ ότι η ενεργός παραγωγή παραμένει σταθερή με τιμή  $P = 13.22 \text{ MW}$  σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, όπως αρχικά είχαμε επιλέξει (Σχ. 3.18). Τη χρονική στιγμή της διαταραχής ( $t = 100 \text{ s}$ ) παρατηρείται μια αναμενόμενη ακαριαία άνοδος στην άεργη παραγωγή από τα  $2.28 \text{ MVA}_r$  στα  $33.78 \text{ MVA}_r$ , με την αντίστοιχη άνοδο να γίνεται αντιληπτή στην εσωτερική ΗΕΔ και στο ρεύμα (Σχ. 3.20), προκειμένου η τάση του ζυγού YT να παραμένει σταθερή στην αρχική της τιμή.



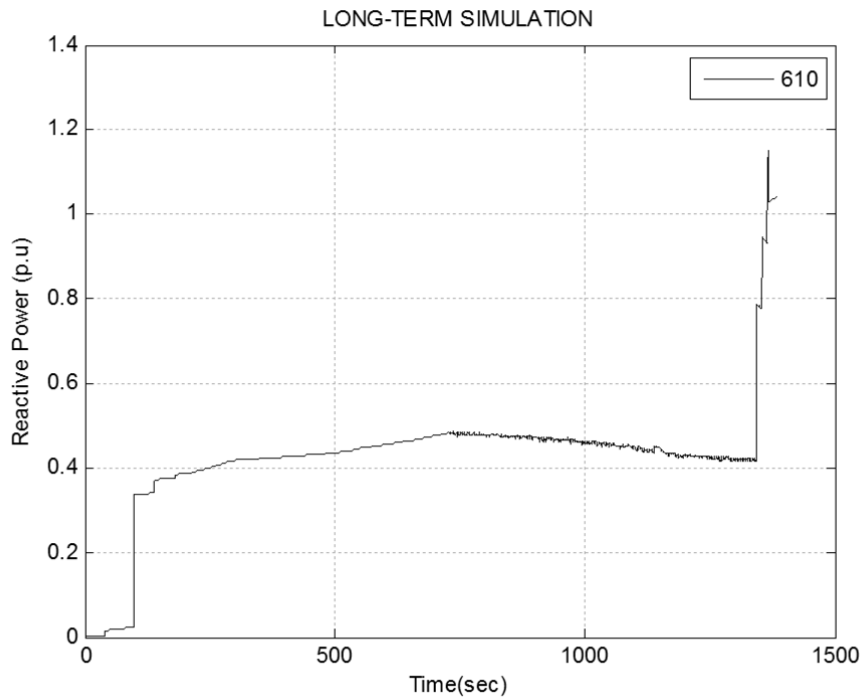
Σχ. 3.16: Τάση ζυγού YT 610



Σχ. 3.17: Εσωτερική ΗΕΔ του ΜΠΤ του ζυγού YT 610

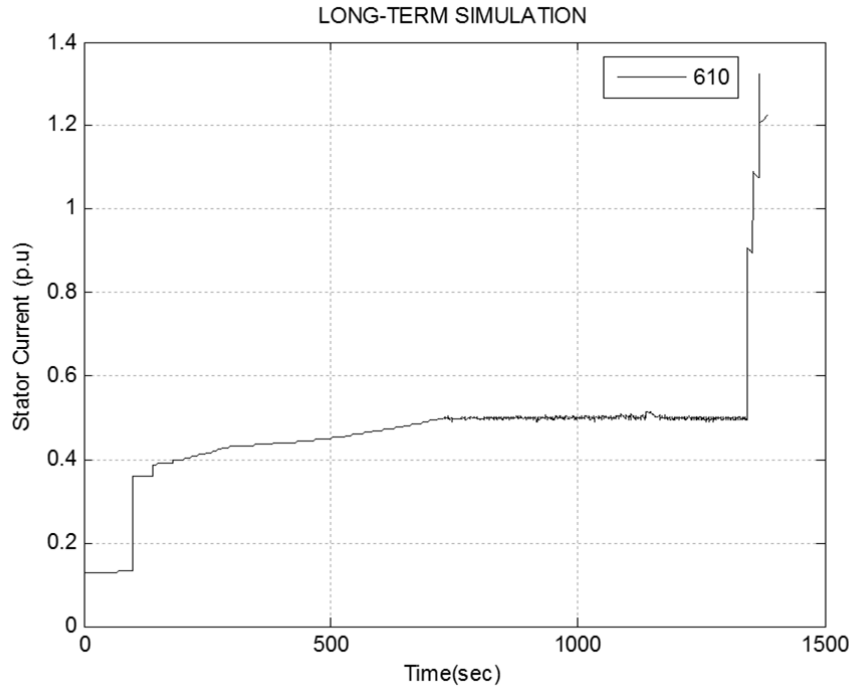


**Σχ. 3.18:** Ενεργός παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό YT 610



**Σχ. 3.19:** Άεργος παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό YT 610





**Σχ. 3.20:** Ρεύμα πηγής τάσης στο ζυγό YT 610

Αυτό συμβαίνει μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 295$  s, όπου η εσωτερική ΗΕΔ λαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $E_f^{lim} = 1.1$  αμ. Τότε, η αυτόματη ρύθμιση τάσης απενεργοποιείται και η πηγή τάσης βρίσκεται πλέον σε κατάσταση σταθερής ΗΕΔ. Από εκεί και έπειτα και μέχρι τη στιγμή  $t = 730$  s, η τάση του ζυγού YT εμφανίζει μια συνεχή μείωση, φτάνοντας τα  $V = 1.0032$  αμ, ενώ η εσωτερική ΗΕΔ παραμένει σταθερή στη μέγιστη τιμή της. Η άεργος παραγωγή και το ρεύμα συνεχίζουν να αυξάνουν για την κάλυψη του φορτίου παραμένοντας μέσα στα επιτρεπτά όρια.

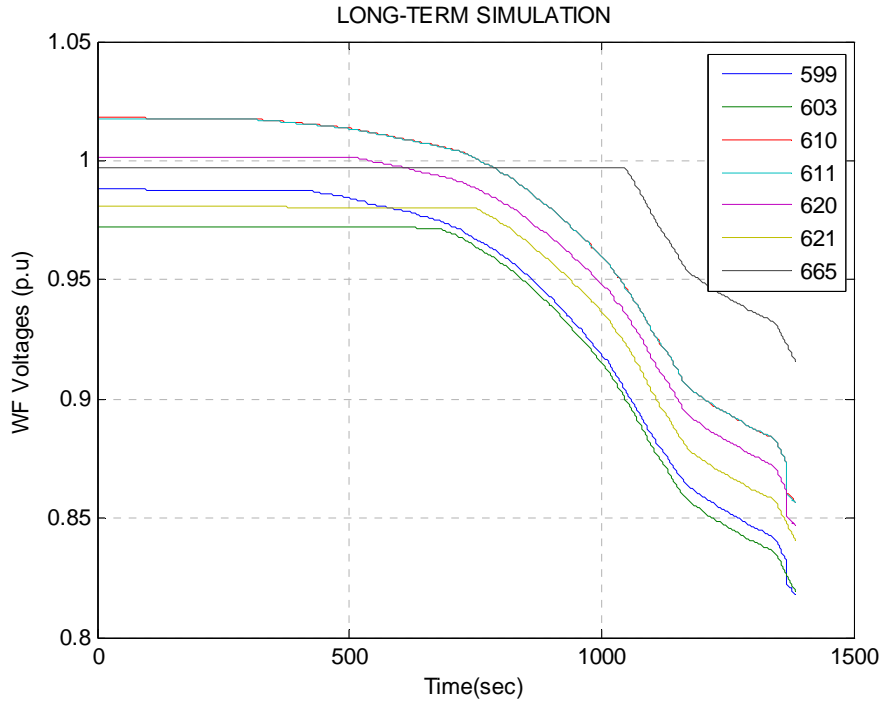
Τη χρονική στιγμή  $t = 731$  s, το ρεύμα ξεπερνά για πρώτη φορά το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο που έχουμε επιβάλλει, το οποίο είναι, σύμφωνα με την υποενότητα 3.5.2,  $I_{VSC}^{lim} = 0.5$  αμ στη βάση του Αιολικού Πάρκου ( $S_B = 100$  MVA). Τότε, μπαίνει σε λειτουργία ο μηχανισμός περιορισμού ρεύματος που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.5.2. Με σκοπό τη μείωση του ρεύματος, η τάση αναφοράς πρέπει να μειωθεί. Εφόσον, όμως, η πηγή τάσης μετατροπέας βρίσκεται υπό σταθερή εσωτερική τάση είναι απαραίτητο να επιτρέψει στη λειτουργία με αυτόματη ρύθμιση τάσης. Οι παραπάνω μειώσεις πραγματοποιούνται μέσα στο επόμενο δευτερόλεπτο της προσομοίωσης, και το ρεύμα μειώνεται και βρίσκεται πάλι εντός ορίων. Λόγω της συνεχούς αύξησης του φορτίου του συστήματος και της επακόλουθης ζήτησης σε άεργο ισχύ, η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται κάθε λίγα δευτερόλεπτα, μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 1343$  s. Η συνεχής αυτή επανάληψη προκαλεί και την πριονωτή μορφή των γραφικών παραστάσεων της ΗΕΔ, της άεργου παραγωγής και του ρεύματος που παρατηρείται στα Σχ. 3.17, 3.19 και 3.20, αντίστοιχα. Μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα των 620 περίπου δευτερολέπτων, το ρεύμα και η άεργος παραγωγή παραμένουν σε γενικές γραμμές σταθερά στη μέγιστη τιμή τους ενώ, λόγω του μηχανισμού περιορισμού ρεύματος

η ΗΕΔ παρουσιάζει συνεχή πτώση. Συνεχής μείωση παρατηρείται και στην τάση του ζυγού ΥΤ, πράγμα αναμενόμενο δεδομένου της αδυναμίας του συστήματος να ανταποκριθεί στην συνεχόμενη αύξηση του φορτίου.

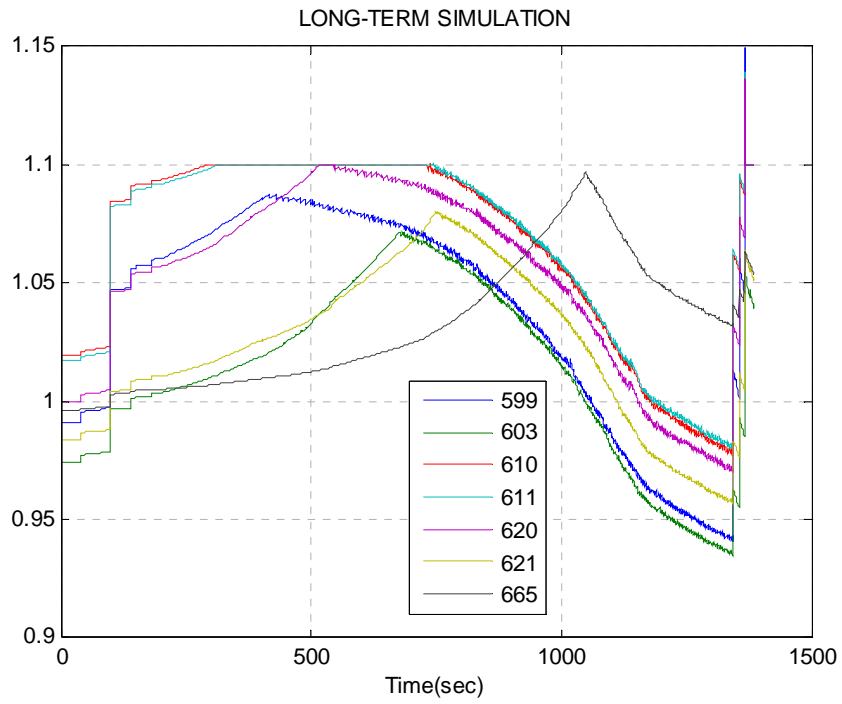
Κατά τη χρονική στιγμή  $t=1334$  s, το σύστημα εμφανίζει την πρώτη διέγερση ηλεκτρονόμου υπότασης στη μονάδα Νο.1 της Μεγαλόπολης που οδηγεί, μετά από 10 δευτερόλεπτα, σε απώλεια της. Ακολουθούν οι μονάδες του Αγίου Γεωργίου και του Λαυρίου, που βρίσκονται πολύ κοντά στο μείζον φορτίο της Αθήνας, ενώ το συνολικό σύστημα καταρρέει για  $t=1385$  s. Όπως φαίνεται και από τις γραφικές παραστάσεις των παραπάνω σχημάτων, η περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος δεν έχει νόημα κατά τη διάρκεια των παραπάνω διαταραχών, που οδηγούν στην κατάρρευση. Η τάση του ζυγού ΥΤ 610 στο τέλος της προσομοίωσης βρίσκεται στην τιμή  $V=0.8568$  αμ, αλλά δεδομένου ότι το ρεύμα στο Σχ. 3.20 και η ΗΕΔ στο Σχ. 3.17 έχει υπερβεί τα όρια, το Αιολικό Πάρκο θα αποσυνδεθεί. .

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και για τους 7 ζυγούς ΥΤ των Αιολικών Πάρκων (Σχ. 3.21-3.27). Η συμπεριφορά του κάθε ζυγού είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε προηγουμένως για το ζυγό 610. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα περιορισμού ρεύματος, ενεργοποιείται για κάθε Αιολικό Πάρκο ανεξαιρέτως, και επομένως ο κάθε υποσταθμός, παρέχει στο σύστημα το μέγιστο των 50 MVA<sub>r</sub> άεργης ισχύος, που διαθέτει. Έτσι, η συνολική άεργη υποστήριξη που μπορεί να επιτευχθεί σε αυτή την περίπτωση είναι  $7 \times 50 = 350$  MVA<sub>r</sub>. Στον Πίν. 3.11 φαίνονται και οι τάσεις των ζυγών ΥΤ των πάρκων στο τέλος της προσομοίωσης, παρότι αυτές δεν μπορούν να υποστηριχθούν, δεδομένου ότι το ρεύμα είναι εκτός ορίων.

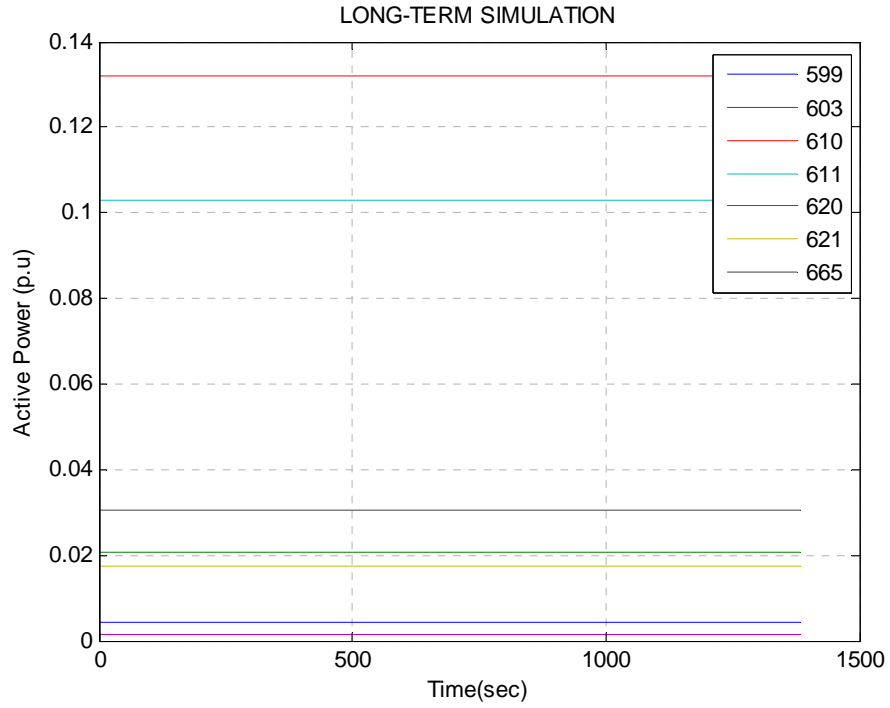
Τέλος, παρατίθενται στα Σχ. 3.26 και 3.27 οι καμπύλες PV του συνολικού φορτίου του Συστήματος και του φορτίου της Πελοποννήσου συναρτήσει μιας αντιπροσωπευτικής τάσης. Πιο συγκεκριμένα, η καμπύλη PV της Πελοποννήσου κάνει εμφανή την επίδραση της υποστήριξης αέργου ισχύος στην περιοχή μέσω μετατροπών ισχύος, σε σύγκριση με την περίπτωση υποστήριξης μέσω συστοιχιών πυκνωτών. Ενδεικτικά είναι τα σημεία Α, Β και C που φαίνονται στο Σχ. 3.26. Το σημείο Α αντιστοιχεί σε τιμή αρχικού φορτίου (920 MW) και συνολική άεργη υποστήριξη περί τα 253 MVA<sub>r</sub>. Για την επίτευξη του περιθωρίου ασφάλειας 10 MW του σημείου Β, απαιτούνται συνολικά γύρω στα 277 MVA<sub>r</sub>. Τέλος, στη μέγιστη ισχύ του σημείου C (περίπου 946 MW), η συνολική παρεχόμενη άεργη ισχύς ανέρχεται στα 327 MVA<sub>r</sub>. Η προαναφερθείσα πριονωτή μορφή των γραφικών παραστάσεων κάνει και εδώ την εμφάνιση της, δυσκολεύοντας έτσι τον ακριβή προσδιορισμό του περιθωρίου ασφάλειας. Παρόλα αυτά, είναι εμφανές ότι το τοπικό πρόβλημα αστάθειας της Πελοποννήσου βρίσκει λύση, αφού η ικανότητα φόρτισης του τοπικού δικτύου βρίσκεται ευδιάκριτα πέρα από το αρχικό φορτίο των 920 MW. Αν θεωρηθεί ότι το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος της καμπύλης βρίσκεται στην περιοχή εμφάνισης της πριονωτής μορφής, τότε μπορεί το σημείο αυτό να οριστεί γύρω στα 940 MW, προσφέροντας περιθώριο ασφάλειας γύρω στα 20 MW. Τέλος, στο Σχ. 3.26 μπορεί να φανεί και η απώλεια των μονάδων λόγω υπότασης. Η πρώτη εμφανίζεται για τάση ζυγού  $V=0.8410$  αμ, και ακολουθούν και οι υπόλοιπες.



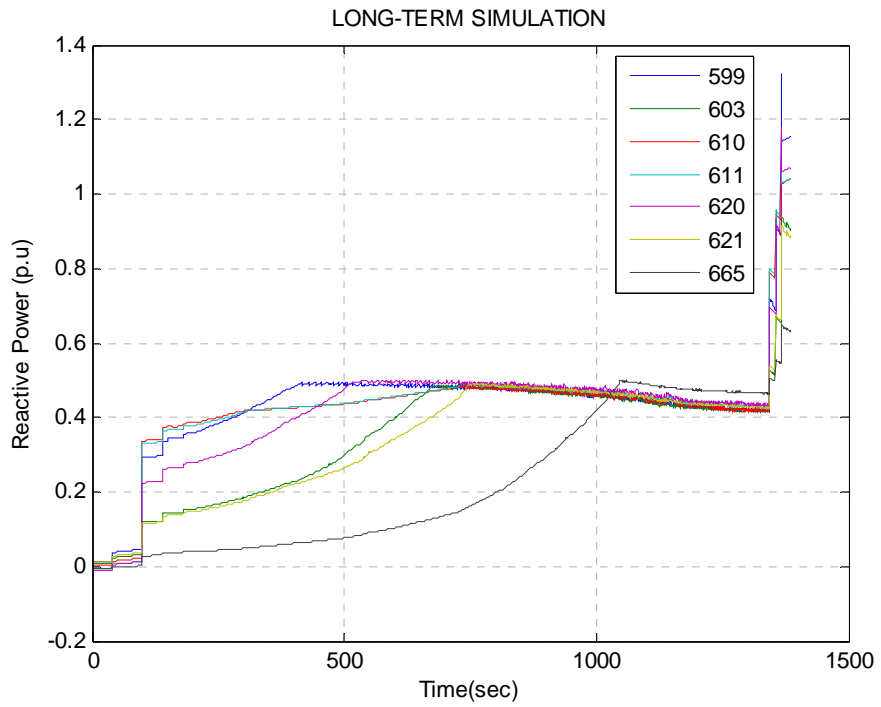
Σχ. 3.21: Τάσεις ζυγών YT των ΑΠ



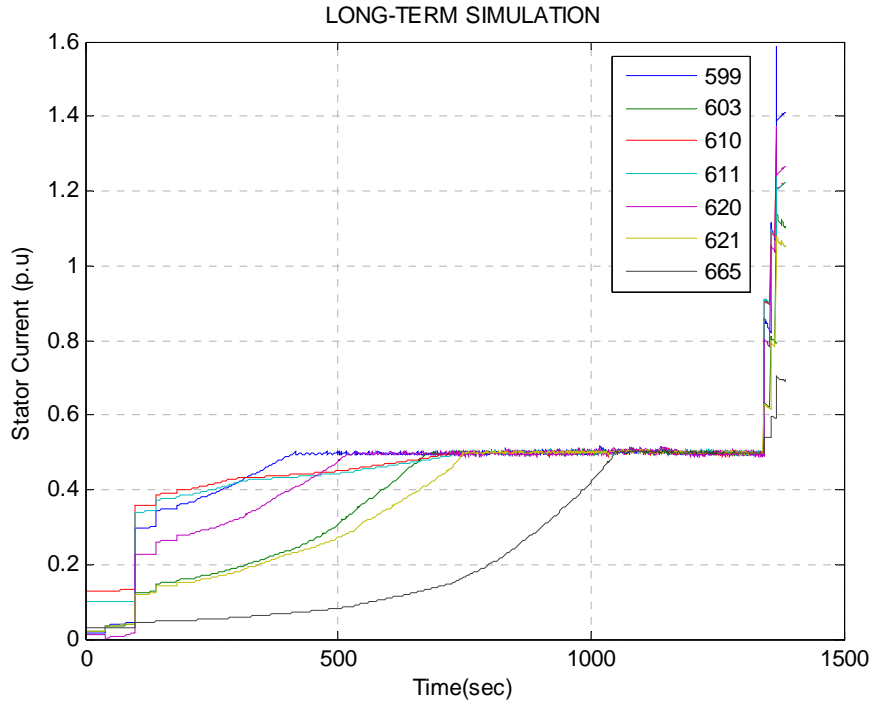
Σχ. 3.22: HEΔ των ΑΠ



Σχ. 3.23: Ενεργός παραγωγή των ΑΠ



Σχ. 3.24: Αεργός παραγωγή των ΑΠ



Σχ. 3.25: Ρεύμα των ΑΠ

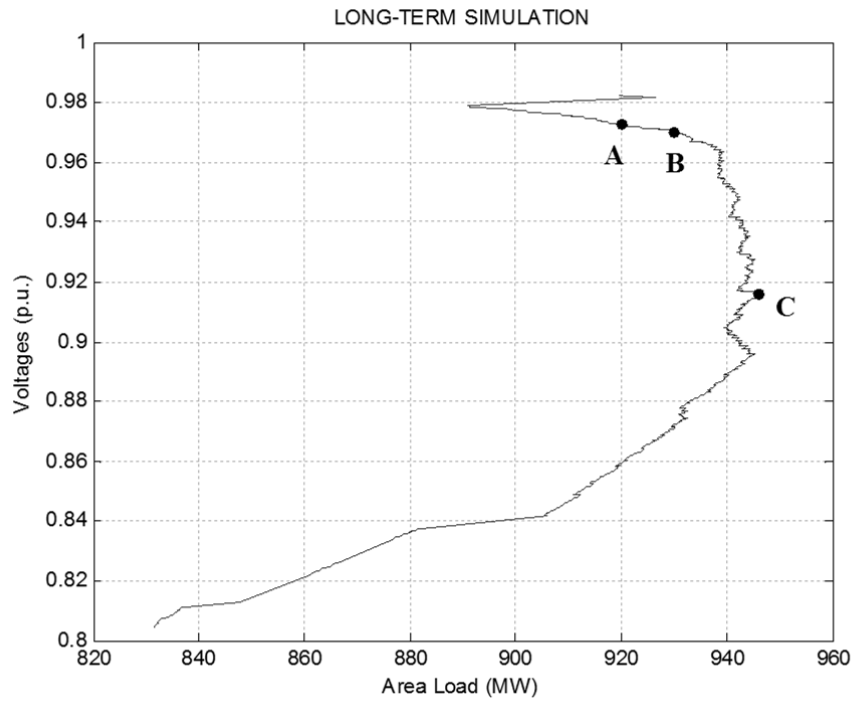
Πίν. 3.11: Τάσεις ζυγών YT στα ΑΠ στο τέλος της προσομοίωσης

Ζυγός YT	Τάση (αμ)
599	0.8176
603	0.8191
610	0.8567
611	0.8564
620	0.8468
621	0.8408
665	0.9157

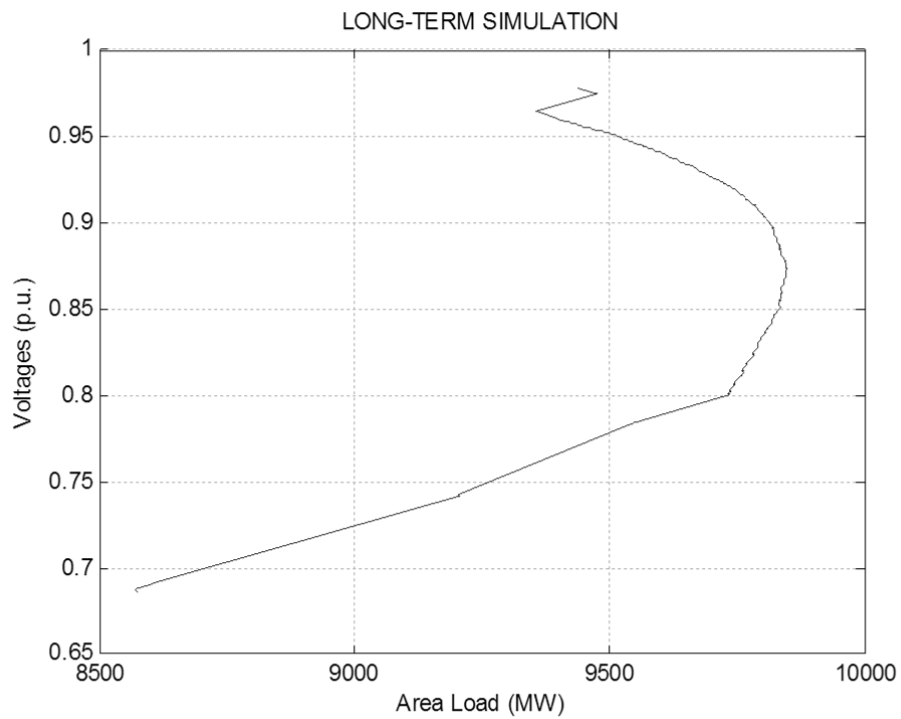
Όσον αφορά την καμπύλη PV του συνολικού συστήματος, το Σχ. 3.27 δείχνει ότι η τοπική άεργη υποστήριξη επηρέασε και το συνολικό δίκτυο. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς μετά τη διαταραχή υπολογίζεται γύρω στα 9840 MW, προσφέροντας ένα περιθώριο ασφάλειας των 400 MW, με την υπόθεση ότι το αρχικό φορτίο παραμένει γύρω στα 9440 MW. Οι απώλειες των τριών μονάδων παραγωγής, μπορούν και εδώ να φανούν εύκολα, με την πρώτη υπόθεση να εμφανίζεται για τάση ζυγού  $V = 0.8$  αμ.

Όπως φάνηκε τελικά, η άεργη υποστήριξη που μπορούν να προσφέρουν τα Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου με τη παραπάνω παραδοχή είναι σε θέση να λύσει το πρόβλημα αστάθειας τάσης που εμφανίστηκε στο εξεταζόμενο στιγμιότυπο. Τα συνολικά 350 MVAr που παρέχουν τα πάρκα, καθιστούν δυνατή την επαναφορά του τοπικού συστήματος της Πελοποννήσου, μετά από ενδεχόμενη διαταραχή. Παρόλα αυτά, η παραπάνω παροχή

αέργου ισχύος με την βοήθεια Μετατροπέων Πηγής Τάσης, συνεχίζει να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα.



Σχ. 3.26: Καμπύλη PV της Πελοποννήσου



Σχ. 3.27: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος

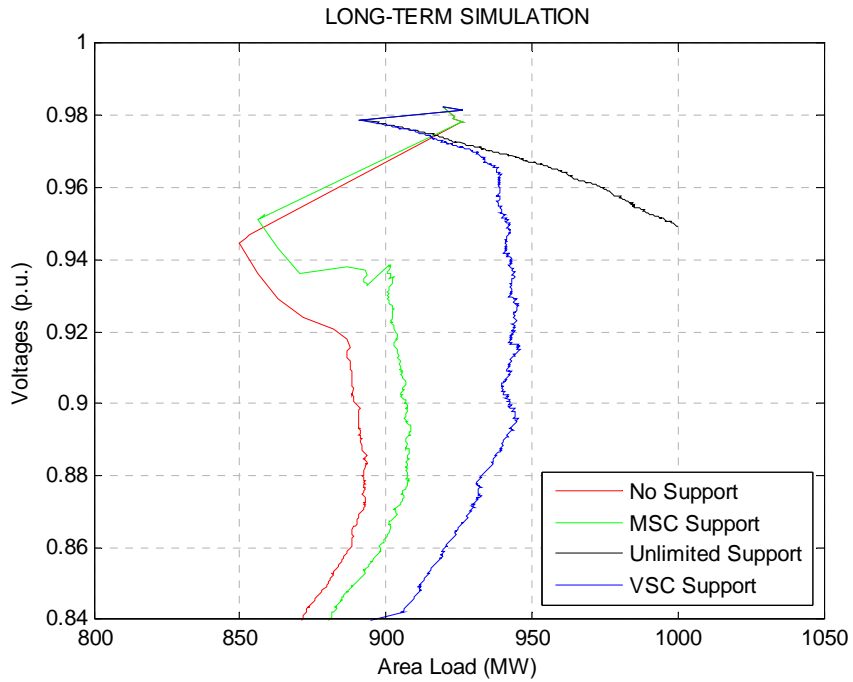
### 3.6 Συγκριτικά Αποτελέσματα

Στα Σχ. 3.28 και 3.29 φαίνονται με μορφή καμπύλων PV τα συγκριτικά αποτελέσματα των παραπάνω τριών περιπτώσεων άεργης υποστήριξης για την αύξηση του ορίου φόρτισης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος. Το Σχ. 3.28 αφορά την περιοχή της Πελοποννήσου ενώ το Σχ. 3.29 το συνολικό Σύστημα. Και τα δύο σχήματα εστιάζουν στις περιοχές τάσης και φορτίου που παρατηρείται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Τέλος, ο Πίν. 3.12 συνοψίζει τα όρια φόρτισης, τα περιθώρια ασφάλειας και την εγγεόμενη άεργη υποστήριξη σε κάθε περίπτωση.

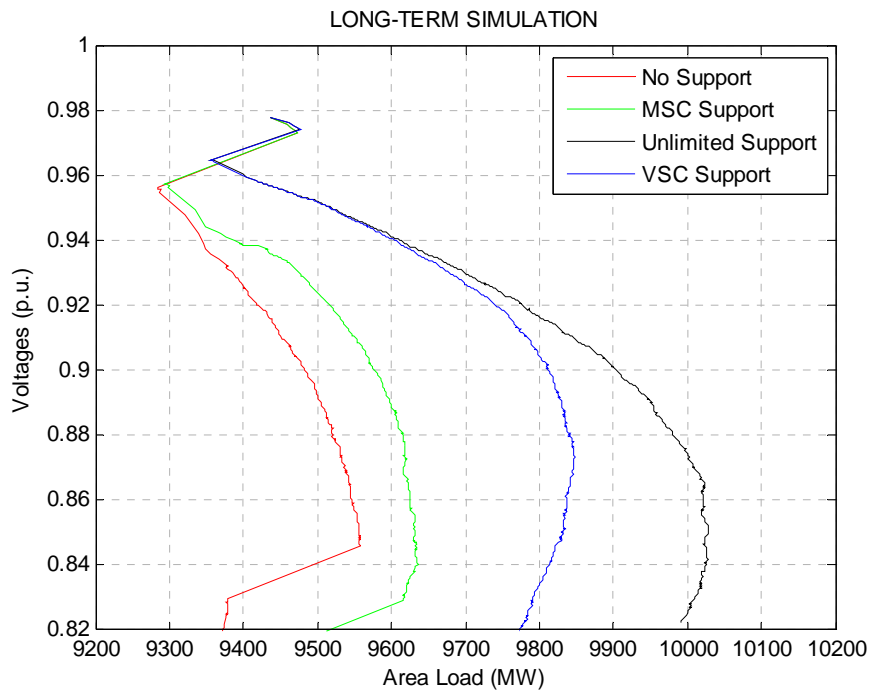
**Πίν. 3.12:** Όρια φόρτισης, περιθώρια ασφάλειας και διαθέσιμη άεργη υποστήριξη

Περίπτωση Άεργης Υποστήριξης	Πελοπόννησος		Συνολικό σύστημα		Εγγεόμενη Υποστήριξη (MVA <sub>r</sub> )
	Όριο φόρτισης (MW)	Περιθώριο ασφάλειας (MW)	Όριο φόρτισης (MW)	Περιθώριο ασφάλειας (MW)	
Χωρίς	890	-30	9560	120	0
Μέσω συσ. πυκν.	910	-10	9630	190	84
Χωρίς όρια	1000	80	10020	580	786
Μέσω ΜΠΤ	940	20	9840	400	350

Τόσο από τις καμπύλες PV όσο και από τον Πίν. 3.12, γίνεται φανερή η επίδραση της άεργης υποστήριξης από τα Αιολικά Πάρκα στην αύξηση των περιθωρίων ασφάλειας της Πελοποννήσου αλλά και του συνολικού συστήματος. Το συνολικό σύστημα αποφεύγει την πιθανότητα εμφάνισης αστάθειας τάσης σε κάθε περίπτωση. Παρόλα αυτά, η ομαλή λειτουργία του προϋποθέτει την αντιμετώπιση του προβλήματος αστάθειας τάσης της Πελοποννήσου. Η χρήση των συστοιχιών πυκνωτών των Αιολικών Πάρκων μπορεί να προσέφερε μια αύξηση στο όριο φόρτισης, αλλά η αδύναμη περιοχή της Πελοποννήσου δεν απέκτησε την δυνατότητα επαναφοράς της αρχικής λειτουργίας της. Το πρόβλημα της αστάθειας τάσης φαίνεται να έλυσε η άεργη υποστήριξη που προσέφεραν οι μετατροπείς ισχύος (Μετατροπείς Πηγής Τάσης) που προσομοιώνουν τη λειτουργία των Αιολικών Πάρκων. Σε αυτή την περίπτωση, η περιοχή της Πελοποννήσου εμφανίζει υψηλότερα επίπεδα τάσης μετά τη διαταραχή (2.5-3%), ενώ επιτυγχάνεται και η απόκτηση περιθωρίου ασφάλειας. Η δυνατότητα, ωστόσο, των μετατροπέων ισχύος ως προς τη διαθέσιμη άεργη υποστήριξη στα προαναφερθέντα πάρκα απαιτεί περισσότερη μελέτη που θα γίνει στο επόμενο Κεφάλαιο.



Σχ. 3.28: Καμπύλες PV της Πελοποννήσου



Σχ. 3.29: Καμπύλες PV του συνολικού συστήματος



## 4 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΤΕΡΗ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ

Στην τελευταία ενότητα του προηγούμενου Κεφαλαίου, η έγχυση αέργου ισχύος στο σύστημα από τα Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου θεωρήθηκε ότι γινόταν απευθείας στον ζυγό ΥΤ. Οι διατάξεις ελέγχου χρησιμοποιούσαν ως τάση αναφοράς την τάση του ζυγού ΥΤ. Οι ενδιάμεσες διατάξεις του δικτύου διανομής (ΣΑΤΥΦ, γραμμές μεταφοράς, κ.τ.λ.), απαραίτητες για την μεταφορά της ισχύος από τα πάρκα στον ζυγό ΥΤ και ακολούθως στο δίκτυο, θεωρήθηκαν δεδομένες και ενσωματωμένες στο μοντέλο, χωρίς να ληφθεί υπόψη η επίδραση τους στη συμπεριφορά του συστήματος.

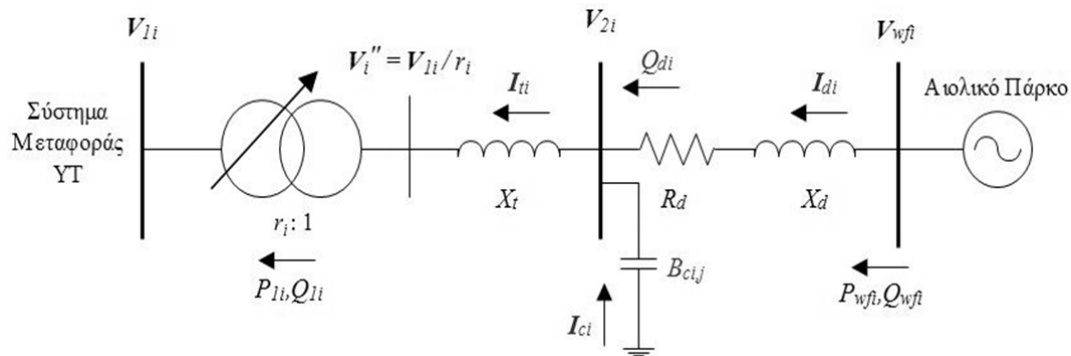
Η ανάγκη για απόκτηση πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός νέου καταλληλότερου μοντέλου δικτύου σύνδεσης, συμπεριλαμβάνοντας και τις ενδιάμεσες διατάξεις. Το μοντέλο αυτό παριστάνεται από το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχ. 3.7 του προηγούμενου Κεφαλαίου και αναπαράγεται εδώ στο Σχ. 4.1. Η ανάλυση της συμπεριφοράς του, πραγματοποιείται μέσω προσομοίωσης στο λογισμικό MATLAB, λαμβάνοντας ως αναφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τη χρήση του WPSTAB στην ενότητα 3.5 του προηγούμενου Κεφαλαίου.

### 4.1 Μοντέλο Προσομοίωσης Δικτύου Σύνδεσης Αιολικών Πάρκων

Οι παραδοχές και οι υποθέσεις που έγιναν στο προηγούμενο Κεφάλαιο και αφορούσαν τις διατάξεις του δικτύου σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων, τροποποιούνται στη συνέχεια για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με το Σχ. 4.1, το δίκτυο σύνδεσης κάθε πάρκου αποτελείται από:

- Τον ζυγό ΥΤ των 150 kV, ο οποίος ταυτίζεται με τον ζυγό στον οποίο ήταν συνδεδεμένο απευθείας το Αιολικό Πάρκο στο προηγούμενο Κεφάλαιο.
- Ένα μετασχηματιστή ισχύος 50 MVA, 150/20 kV εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, η χρονική καθυστέρηση του οποίου ορίζεται για την παρούσα προσομοίωση ίση με 5 s για κάθε κίνηση, συμπεριλαμβανομένου και της αρχικής. Τα όρια του λόγου μετασχηματισμού  $r_i$  ορίζονται ως  $r_{min} = 0.8$  αμ και  $r_{max} = 1.2$  αμ και το βήμα του ως  $\Delta r = 0.01$  αμ. Η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή ορίζεται στα  $X_t = 0.19$  αμ, στην ονομαστική ισχύ. Η υπό έλεγχο τάση είναι η  $V_{2i}$  της πλευράς ΜΤ του μετασχηματιστή.
- Τρεις συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης αγωγιμότητας  $B_c = 0.04$  αμ η καθεμία, συνδεδεμένες στον ζυγό ΜΤ  $V_{2i}$ . Η χρονική καθυστέρηση ζεύξης ή απόζευξης των συστοιχιών ορίζεται στα 20 s για την αποφυγή αλληλεπίδρασης με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ.

- Μια γραμμή διανομής 20 kV με ωμική αντίσταση  $R_d = 0.0142$  αμ και επαγωγική αντίδραση  $X_d = 0.0256$  αμ στη βάση  $S_B = 100$  MVA.
- Τον ζυγό MT  $V_{wfi}$  στον οποίο συνδέεται το Αιολικό Πάρκο.



Σχ. 4.1: Μοντέλο δικτύου σύνδεσης Αιολικού Πάρκου

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε, όπως προαναφέρθηκε, στο MATLAB. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ενότητας 3.5, και πιο συγκεκριμένα οι τιμές, σε κάθε χρονική στιγμή, της τάσης, της ενεργού και της αέργου ισχύος στους ζυγούς ΥΤ. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.1 τα μεγέθη αυτά συμβολίζονται ως  $V_{1i}$ ,  $P_{1i}$  και  $Q_{1i}$  αντίστοιχα. Η προσομοίωση ακολουθεί τα παρακάτω αλγοριθμικά βήματα:

**Βήμα 1:** Αρχικά υπολογίζεται η αρχική τιμή των λόγων μετασχηματισμού  $r_i$  των ΣΑΤΥΦ για κάθε ζυγό  $i$  ΥΤ. Για το σκοπό αυτό, υποθέτουμε ότι η ρυθμιζόμενη τιμή της τάσης  $V_{2i}$  θα πρέπει να επιτρέπει τη μεταφορά της μέγιστης αέργου ισχύος  $Q_{max}$  για μέγιστο λόγο μετασχηματισμού  $r_{max}$ , ενώ η  $V_{1i}$  έχει ονομαστική τιμή. Συνεπώς ορίζεται  $\hat{V}_{1,maxQ} = 1 \angle 0^\circ$  αμ,  $r_{maxQ} = r_{max} = 1.2$  αμ,  $Q_{1,maxQ} = Q_{max} = 0.5$  αμ και  $P_{1,maxQ} = 0$  για κάθε ζυγό  $i$  και γίνεται χρήση των παρακάτω τύπων:

$$\hat{V}_{maxQ}'' = \frac{\hat{V}_{1,maxQ}}{r_{maxQ}} \quad (4.1)$$

$$\hat{V}_{2,set} = \hat{V}_{maxQ}'' + \frac{P_{1,maxQ} - jQ_{1,maxQ}}{\hat{V}_{maxQ}''} (jX_t) \quad (4.2)$$

Εφόσον τα δεδομένα είναι ίδια, η τιμή της τάσης  $\hat{V}_{2,set}$  είναι προφανώς όμοια για κάθε ζυγό  $i$ , και το μέτρο της, το οποίο είναι  $V_{2,set} = 1.0613$  αμ με βάση τις παραπάνω τιμές, χρησιμοποιείται σαν αναφορά στον υπολογισμό όλων των αρχικών  $r_{i,o}$  που γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις:

$$(V_{i,o}'')^4 - (V_{2,set}^2 - 2Q_{1i}X_t) \cdot (V_{i,o}'')^2 + X_t^2 (P_{1i}^2 + Q_{1i}^2) = 0 \quad (4.3)$$

$$r_{i,o} = \frac{V_{1i,o}}{V_{i,o}''} \quad (4.4)$$

όπου, η σχέση (4.3) είναι η γνωστή διτετράγωνη εξίσωση,  $P_{1i}$  και  $Q_{1i}$  η ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού YT  $i$ , και επομένως και του ζυγού τάσης  $V''$ , κατά τη χρονική στιγμή  $t = 0$  s της προσομοίωσης και  $V_{1i,o}$  η τάση του ζυγού YT  $i$  για  $t = 0$  s.

Οι λόγοι μετασχηματισμού  $r_{i,o}$  που προκύπτουν από την (4.4) δεν συμπίπτουν ακριβώς με τις τιμές που αντιστοιχούν στο βήμα αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού, που θεωρείται ότι είναι  $\Delta r = 0.01$  αμ. Συνεπώς είναι αναγκαία η στρογγυλοποίηση των  $r_{i,o}$  στο δεύτερο δεκαδικό ψηφίο. Η στρογγυλοποίηση αυτή γίνεται προς τα πάνω έτσι ώστε να πετύχουμε μικρότερη τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή.

**Βήμα 2:** Ακολουθεί ο προσδιορισμός της νεκρής ζώνης του κάθε ΣΑΤΥΦ. Η ρυθμιζόμενη τάση θεωρείται ότι είναι η τάση  $V_{2i}$  του ζυγού ΜΤ. Εφόσον, το βήμα αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού  $r_i$  έχει οριστεί στο 1%, το εύρος της νεκρής ζώνης ορίζεται στο 2%. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η αρχική τάση  $V_{2i,o}$  να βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης, αλλά όχι απαραίτητα στο κέντρο της. Όπως θα παρουσιαστεί και στα αποτελέσματα, η αρχική τάση  $V_{2i,o}$  του κάθε ΣΑΤΥΦ, βρίσκεται λίγο κάτω από την τάση αναφοράς  $V_{2,set}$  που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα, λόγω της στρογγυλοποίησης του  $r_{i,o}$  προς τα πάνω. Για ευκολία υπολογισμών, η νεκρή ζώνη του κάθε ΣΑΤΥΦ ορίστηκε ως  $V_{2i,min} = 1.045$  αμ και  $V_{2i,max} = 1.065$  αμ.

**Βήμα 3α:** Η προσομοίωση πραγματοποιείται ανά ζυγό ανά δευτερόλεπτο με βάση τα αποτελέσματα του WPSTAB (βλ. ενότητα 3.5) και περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων του δικτύου. Μέσω αυτών, πραγματοποιείται ο έλεγχος για την ζεύξη των 3 συστοιχιών πυκνωτών αγωγιμότητας  $B_c = 0.04$  αμ η καθεμία και ο έλεγχος για κίνηση του ΣΑΤΥΦ, ώστε να ρυθμίζεται η τάση  $V_{2i}$ . Η επίλυση των εξισώσεων ακολουθεί τους συμβολισμούς και τις φορές του Σχ. 4.1:

$$\hat{V}_i'' = \frac{\hat{V}_{1i}}{r_i} \quad (4.5)$$

$$\hat{I}_{ii} = \left( \frac{P_{1i} + jQ_{1i}}{\hat{V}_i''} \right)^* \quad (4.6)$$

$$\hat{V}_{2i} = \hat{V}_i'' + \hat{I}_{ii}(jX_t) \quad (4.7)$$

$$\hat{I}_{ci} = -\hat{V}_{2i}(jB_{ci,j}) \quad (4.8)$$

$$\hat{I}_{di} = \hat{I}_{ii} - \hat{I}_{ci} \quad (4.9)$$

$$\hat{V}_{wfi} = \hat{V}_{2i} + \hat{I}_{di}(R_d + jX_d) \quad (4.10)$$

$$S_{wfi} = P_{wfi} + jQ_{wfi} = \hat{V}_{wfi} \hat{I}_{di}^* \quad (4.11)$$

όπου ο δείκτης  $i$  αναφέρεται στο ζυγό YT, και  $B_{ci,j}$  είναι η αγωγιμότητα των συστοιχιών πυκνωτών μετά την  $j$ -οστή ζεύξη (για  $j=0$   $B_{ci,0} = 0$ , για  $j=1$   $B_{ci,1} = 0.04$  αμ, για  $j=2$   $B_{ci,2} = 0.08$  αμ και τέλος για  $j=3$   $B_{ci,3} = 0.12$  αμ).

**Βήμα 3β:** Ο έλεγχος για ζεύξη ή απόζευξη συστοιχίας πυκνωτών πραγματοποιείται μέσω του υπολογισμού της αέργου ισχύος  $Q_{di}$  που παρέχει το κάθε ΑΠ στον ζυγό τάσης  $V_{2i}$ , βάσει των τύπων:

$$Q_{di} = Q_{wfi} - I_{di}^2 X_d \quad (4.12)$$

$$B_{ci,j+1} = \begin{cases} B_{ci,j} + 0.04 \text{ αμ, αν } Q_{di} > 0.04 \text{ αμ και } B_{ci,j} < 0.12 \text{ αμ} \\ B_{ci,j} - 0.04 \text{ αμ, αν } Q_{di} < 0 \text{ και } B_{ci,j} > 0 \\ B_{ci,j} \quad , \text{ για οποιαδήποτε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (4.13)$$

Η χρονική καθυστέρηση ζεύξης ή απόζευξης συστοιχίας έχει οριστεί στα 20 s. Σημειώνεται ότι κατά το διάστημα εξέλιξης των 20 s, πρέπει να ελέγχεται εάν εξακολουθεί να ισχύει η συνθήκη ζεύξης ή απόζευξης της σχέσης (4.13). Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται περιττές ενέργειες σε περίπτωση εμφάνισης παροδικών μεταβατικών φαινομένων.

**Βήμα 3γ:** Ο έλεγχος για κίνηση του ΣΑΤΥΦ, γίνεται μέσω της τιμής της τάσης  $V_{2i}$  που υπολογίστηκε στο βήμα 3α. Εάν η τιμή της  $V_{2i}$  ξεπερνά το άνω όριο της νεκρής ζώνης, τότε μετά από καθυστέρηση 5 s ο λόγος μετασχηματισμού  $r_i$  αυξάνει κατά 0.01 αμ. Εάν η τιμή της  $V_{2i}$  πέσει κάτω από όριο της νεκρής ζώνης, τότε μετά από καθυστέρηση 5 s ο λόγος μετασχηματισμού  $r_i$  μειώνεται κατά 0.01 αμ. Όπως και παραπάνω με τις συστοιχίες, η ρυθμιζόμενη τάση πρέπει να βρίσκεται εκτός ορίων καθόλη τη διάρκεια των 5 s, προκειμένου να κινηθεί το ΣΑΤΥΦ.

Με το βήμα 3γ ολοκληρώνεται και η προσομοίωση για κάθε χρονική στιγμή.

## 4.2 Επίδραση του Δικτύου Σύνδεσης στην Παρεχόμενη Υποστήριξη από τα Αιολικά Πάρκα

Ο αλγόριθμος που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα εφαρμόστηκε για κάθε ζυγό σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων. Όπως προαναφέρθηκε, ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα για τους ζυγούς YT που προέκυψαν από την προσομοίωση στο WPSTAB της ενότητας 3.5 του προηγούμενου Κεφαλαίου. Ας σημειωθεί εδώ ότι η προσομοίωση τερματίστηκε στα 1342 s, αποφεύγοντας έτσι την εμφάνιση υπότασης και απώλειας μονάδας παραγωγής, γιατί η ανάλυση της συμπεριφοράς του δικτύου σύνδεσης στο τελευταίο στάδιο της κατάρρευσης του συστήματος δεν αποτελεί

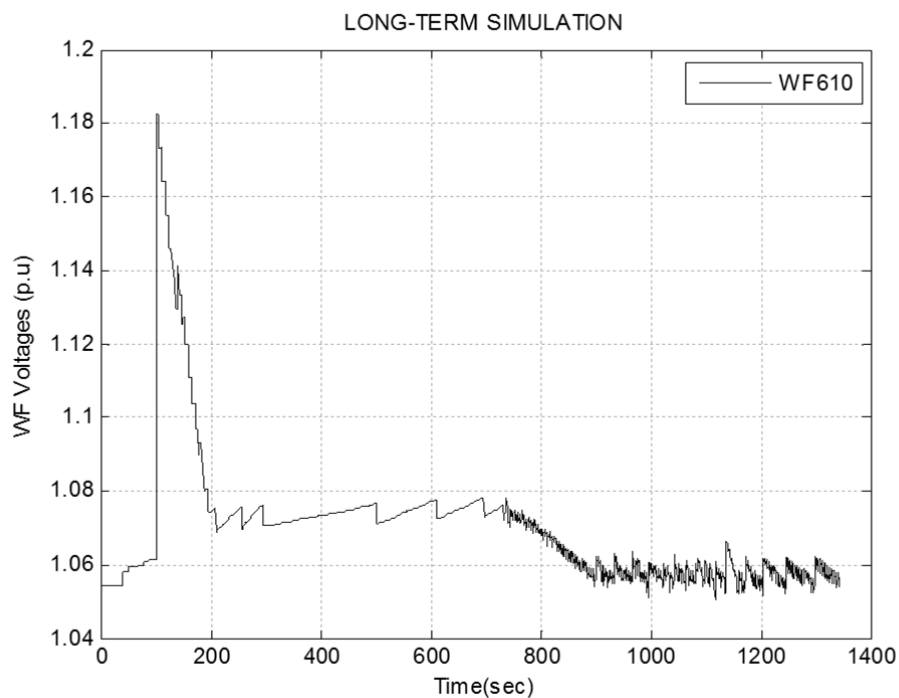
αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Στις περιπτώσεις αυτές, η προστασία των Αιολικών Πάρκων, όπως είναι λογικό, θα τα αποσυνδέσει.

Στον Πίν. 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αρχικοποίησης των ΣΑΤΥΦ όλων ζυγών για  $t = 0$  s, η οποία έγινε σύμφωνα με τους κανόνες του βήματος 1 του αλγορίθμου της προηγούμενης ενότητας.

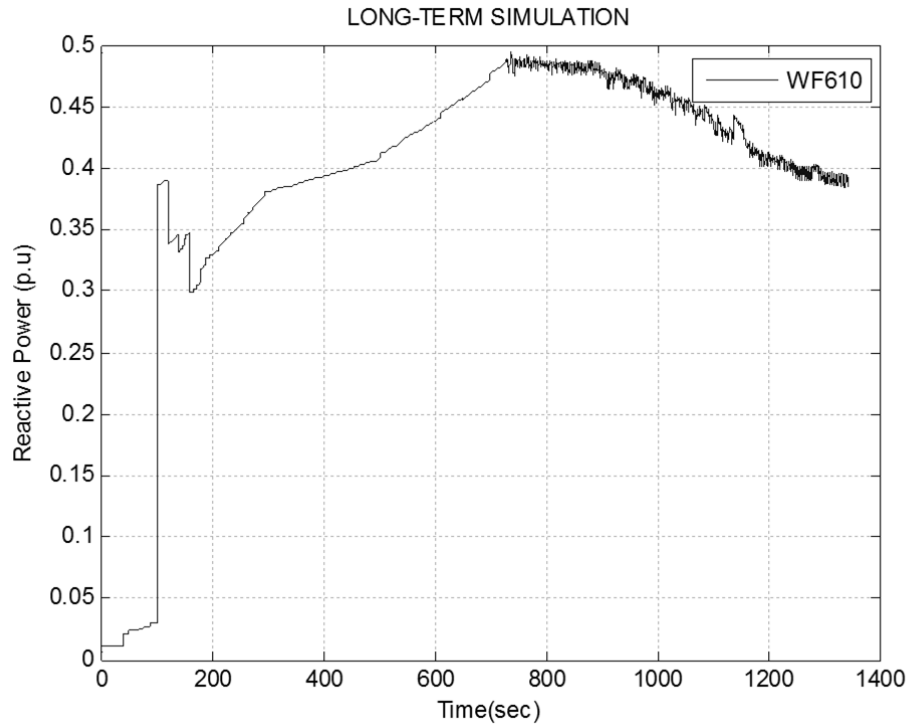
**Πίν. 4.1:** Αρχικά στοιχεία των ΣΑΤΥΦ

Ζυγός ΥΤ	$r_{i,o}$	$V_{2i,o}$
599	0.94	1.0564
603	0.92	1.0600
610	0.97	1.0521
611	0.96	1.0591
620	0.95	1.0506
621	0.93	1.0598
665	0.94	1.0594

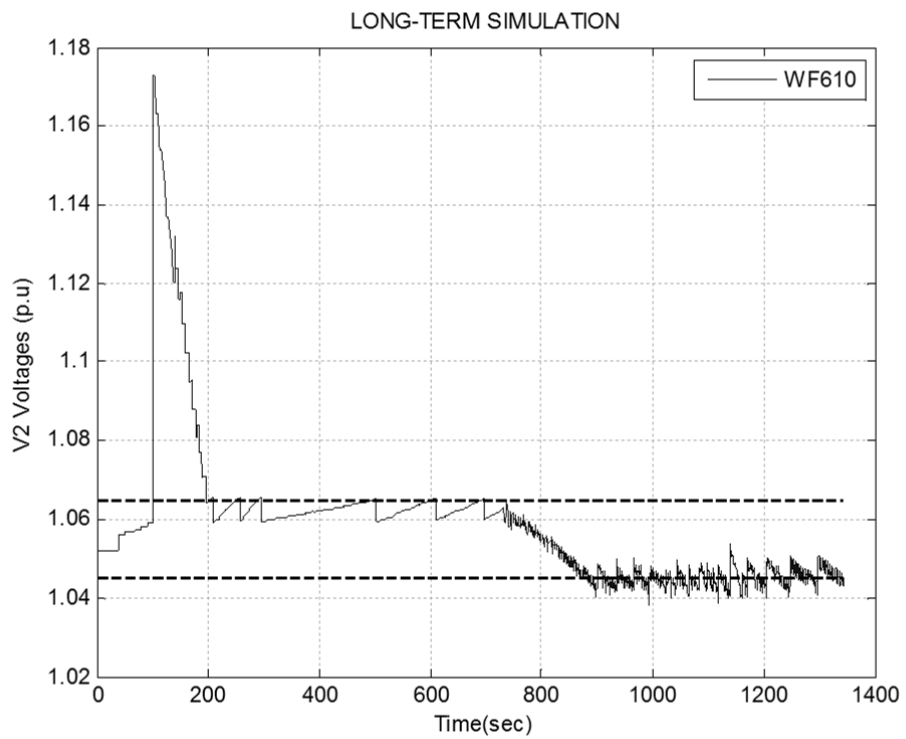
Για λόγους σύγκρισης με το προηγούμενο Κεφάλαιο, στα Σχ. 4.2-4.6, φαίνονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου για τον ζυγό 610. Όλα τα αποτελέσματα αφορούν τον ζυγό ΜΤ στον οποίο συνδέεται το Αιολικό Πάρκο, ο οποίος θα ονομάζεται για ευκολία WF610.



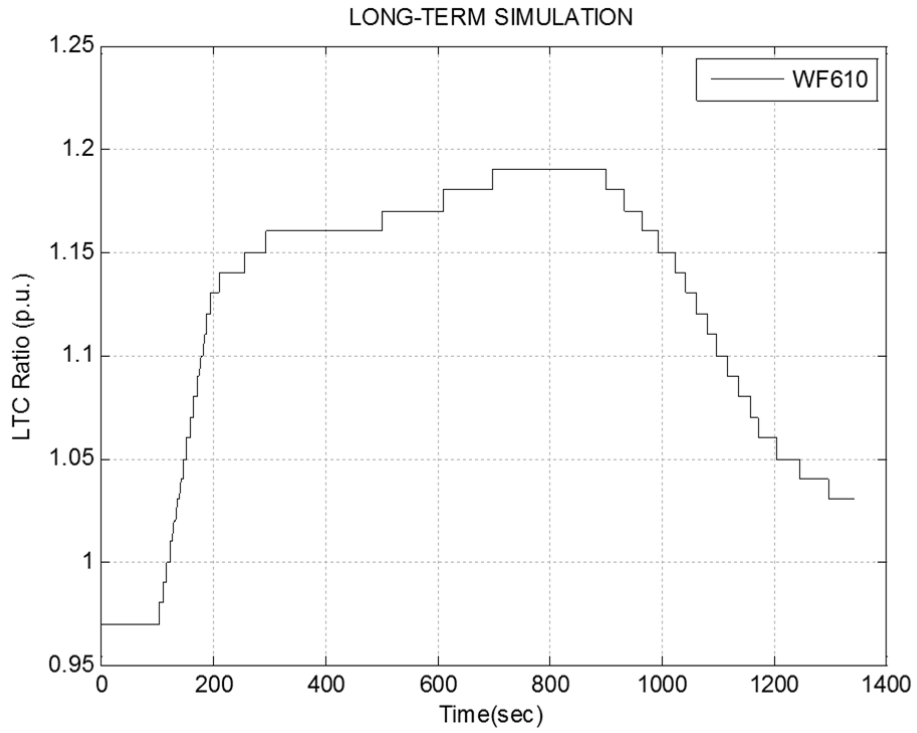
**Σχ. 4.2:** Τάση του ζυγού ΜΤ WF610 του ΑΠ



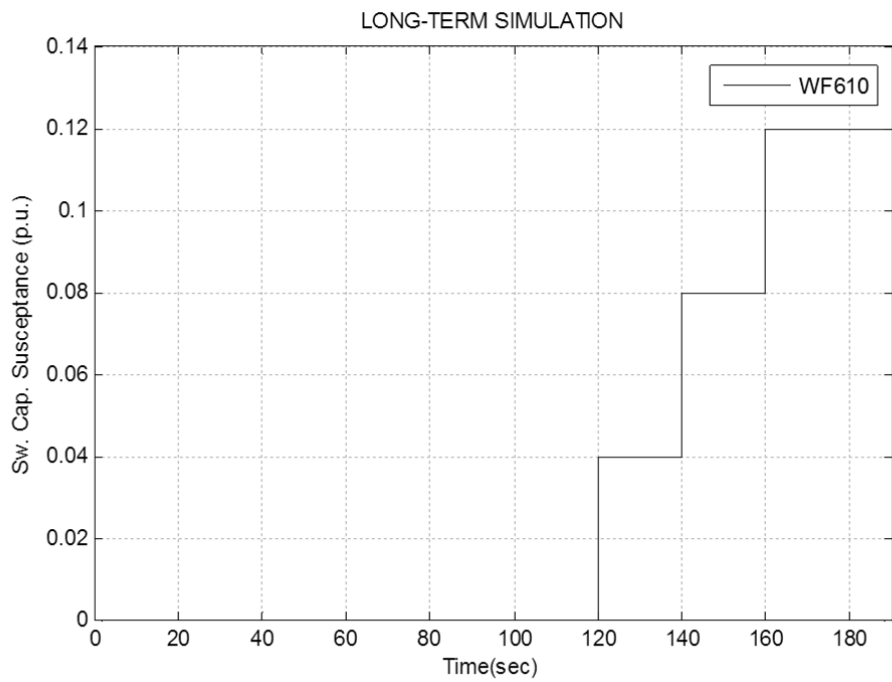
Σχ. 4.3: Άεργος ισχύς του ζυγού MT WF610 του ΑΠ



Σχ. 4.4: Ρυθμιζόμενη τάση  $V_{2i}$  ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610



Σχ. 4.5: Μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610



Σχ. 4.6: Ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών του ΑΠ WF610

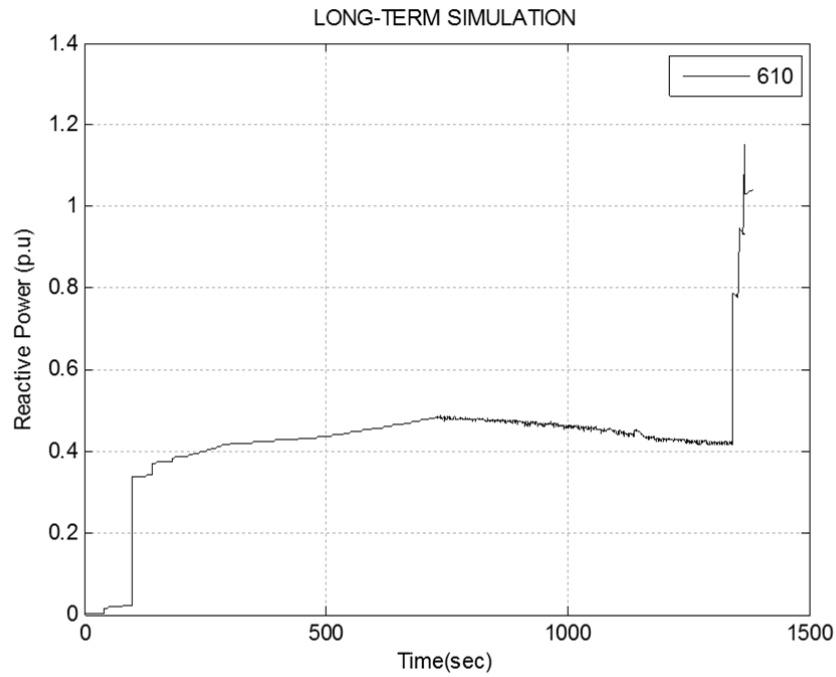
Σύμφωνα με τα Σχ. 4.2 και 4.3, μέχρι τη στιγμή της διαταραχής για  $t = 100$  s η τάση και η άεργος ισχύς του ζυγού WF610 παρουσιάζουν μια μικρή άνοδο, της τάξης του 1-2% λόγω των προβλημάτων αρχικοποίησης που αναφέρθηκαν στην ενότητα 3.1, ενώ ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή και οι συστοιχίες των πυκνωτών παραμένουν στην αρχική τους κατάσταση. Κατά τη στιγμή της διαταραχής (απώλεια μονάδας No.1 Μεγαλόπολης), όλα τα παραπάνω μεγέθη εμφανίζουν ακαριαία άνοδο. Η άεργος ισχύς εμφανίζει μια πολύ μεγάλη αύξηση από τα 3 MVA<sub>r</sub> στα 38 MVA<sub>r</sub>. Η τελευταία προκαλεί και την υπέρταση του 118% της ονομαστικής τιμής τάσης στο Αιολικό Πάρκο (Σχ. 4.2). Όπως είναι αναμενόμενο, παρόμοια μεταβολή εμφανίζει και η ρυθμιζόμενη τάση  $V_{2i}$ .

Αμέσως μετά τη διαταραχή, ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί του ΣΑΤΥΦ και των συστοιχιών πυκνωτών. Το ΣΑΤΥΦ φροντίζει για την πτώση της τάσης από την τιμή του 118% της ονομαστικής, αυξάνοντας τον αρχικό λόγο μετασχηματισμού  $r_i$ , και η ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών αντισταθμίζει την υπέρβαση της αέργου ισχύος πέρα από τα 4 MVA<sub>r</sub>. Οι παραπάνω λειτουργίες υπόκεινται σε μια καθυστέρηση των 5 s και 20 s αντίστοιχα, κάτι το οποίο φαίνεται και στα Σχ. 4.5 και 4.6. Η συνεχής αύξηση του λόγου  $r_i$  παρατηρείται κάθε 5 s μέχρι τη χρονική στιγμή  $t = 196$  s, όπου η ρυθμιζόμενη τάση  $V_{2i}$  του ΣΑΤΥΦ βρίσκεται για πρώτη φορά μετά τη διαταραχή μέσα στη νεκρή ζώνη που έχουμε ορίσει (Σχ. 4.4). Η πρώτη συστοιχία πυκνωτών συνδέεται για  $t = 120$  s (Σχ. 4.6) και η επίδραση της μπορεί να φανεί στην παραγωγή αέργου ισχύος του Σχ. 4.3, στην οποία προκαλεί μια σχετική πτώση. Μέχρι και τη στιγμή  $t = 160$  s έχει συνδεθεί και η τρίτη συστοιχία, έχοντας προσφέρει συνολική αντιστάθμιση 12 MVA<sub>r</sub>. Σημειώνεται ότι λόγω της φύσης της προσομοίωσης (άεργη υποστήριξη) δεν πραγματοποιείται απόζευξη καμίας συστοιχίας.

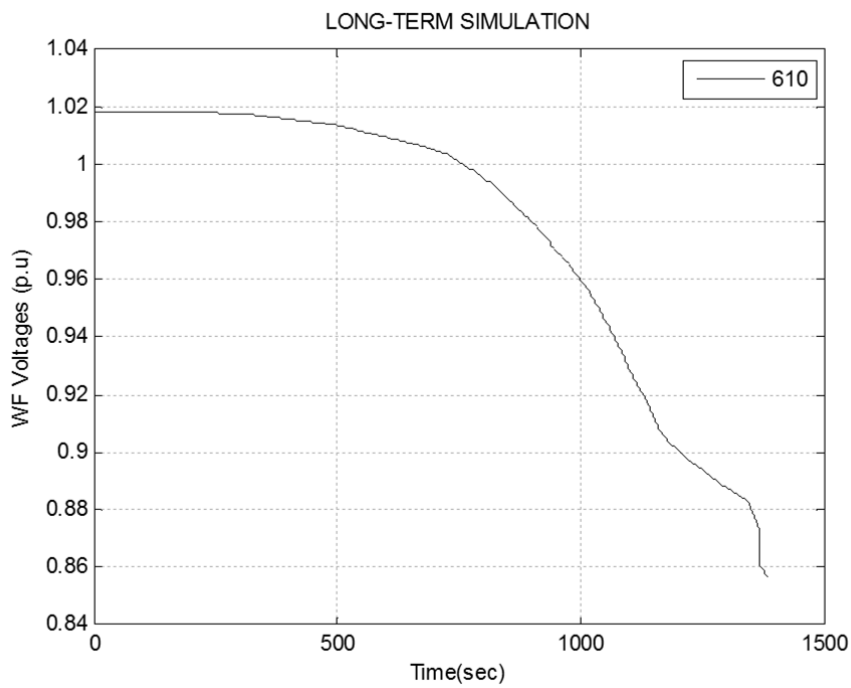
Παρατηρώντας τα Σχ. 4.2-4.4, μετά την επιστροφή της τάσης  $V_{2i}$  μέσα στη νεκρή ζώνη του ΣΑΤΥΦ (Σχ. 4.4) και μέχρι περίπου τη στιγμή  $t = 730$  s, τα μεγέθη αυξάνονται συνεχώς και σχετικά ομαλά, αν εξαιρέσουμε τις στιγμές ενεργοποίησης των μηχανισμών του ΣΑΤΥΦ και των συστοιχιών πυκνωτών. Παρόλα αυτά, η αύξηση αυτή σταματά με την ενεργοποίηση του μηχανισμού περιορισμού ρεύματος τη χρονική στιγμή  $t = 731$  s, και η παροχή αέργου ισχύος στο σύστημα σταθεροποιείται κοντά στα 50 MVA<sub>r</sub>, αλλά σε πριονωτή μορφή όπως φάνηκε στο Σχ. 3.19 της ενότητας 3.5. Το Σχ. 3.19 αναπαράγεται στο Σχ. 4.7. Εφόσον από τη στιγμή  $t = 731$  s και μετά η άεργος ισχύς είναι ουσιαστικά σταθερή, και με την τάση του ζυγού ΥΤ του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή να ακολουθεί πτωτική πορεία (Σχ. 4.8), η τάση  $V_{2i}$  συναντά πλέον ανά χρονικά διαστήματα το κάτω όριο της νεκρής ζώνης του ΣΑΤΥΦ. Αυτό φαίνεται και στις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ στο Σχ. 4.5, όπου ο λόγος μετασχηματισμού  $r_i$  πέφτει ανά διαστήματα. Η συνεχής υπέρβαση του κάτω ορίου της νεκρής ζώνης που φαίνεται στο Σχ. 4.4, οφείλεται στο ότι η τάση  $V_{2i}$  παρουσιάζει διακυμάνσεις με τη μορφή εισόδου και εξόδου από τη νεκρή ζώνη σε χρονικό διάστημα μικρότερο των 5 s της χρονικής καθυστέρησης του ΣΑΤΥΦ. Κατά τη διάρκεια αυτών των δευτερολέπτων η άεργος ισχύς του ζυγού ΜΤ του Αιολικού Πάρκου, παρουσιάζει μια μικρή βαθμιαία πτώση, κυρίως λόγω της αδυναμίας του ΣΑΤΥΦ να διατηρεί την τάση σε αρκετά σταθερά επίπεδα. Σημειώνεται εδώ ότι η ενεργός ισχύς του πάρκου είναι σχεδόν σταθερή



καθόλη τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου (13.25-13.55 MW), καθώς η ωμική αντίσταση  $R_d$  της γραμμής μεταφοράς είναι σχετικά μικρή.

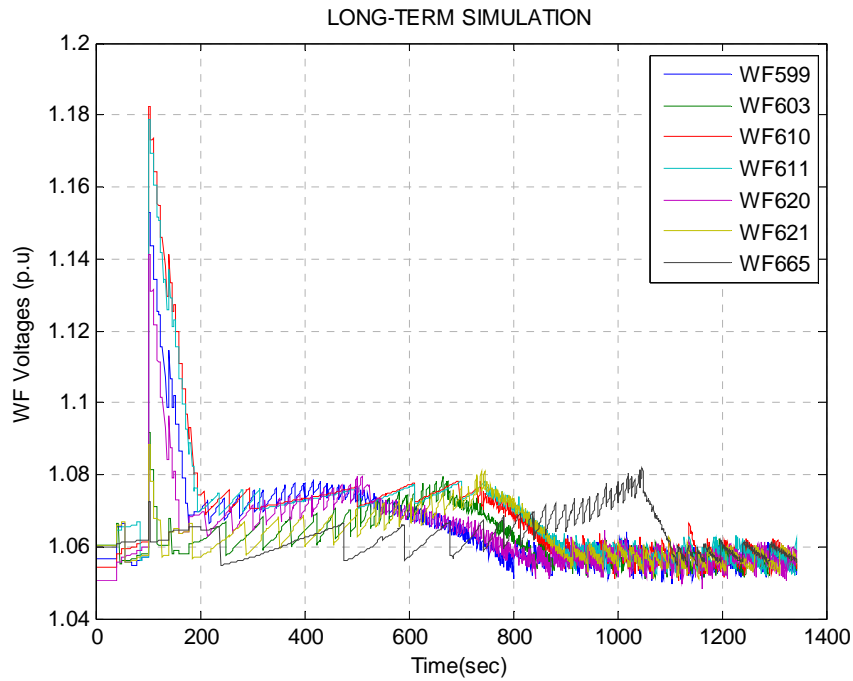


Σχ. 4.7: Άεργος παραγωγή του ΑΠ στο ζυγό YT 610

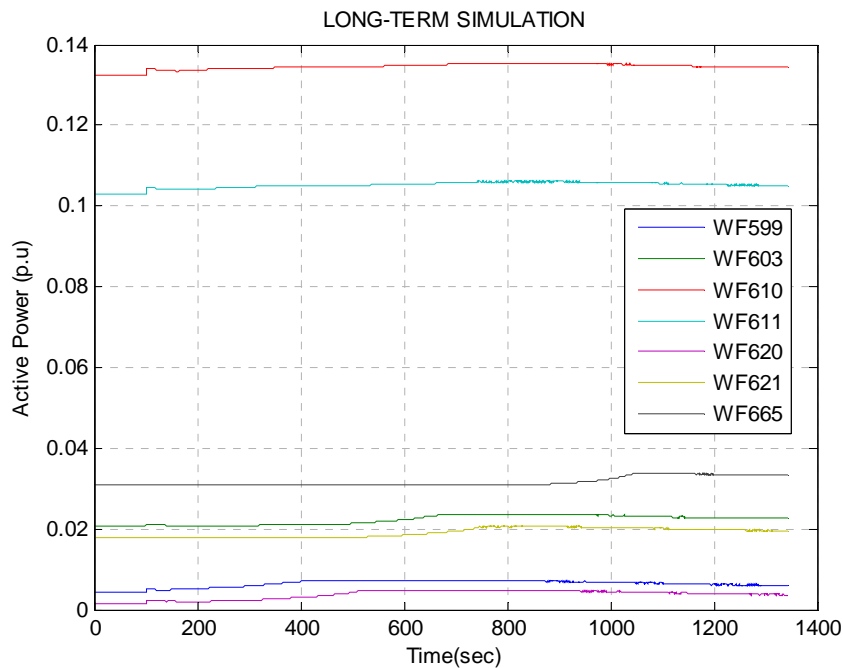


Σχ. 4.8: Τάση ζυγού YT 610

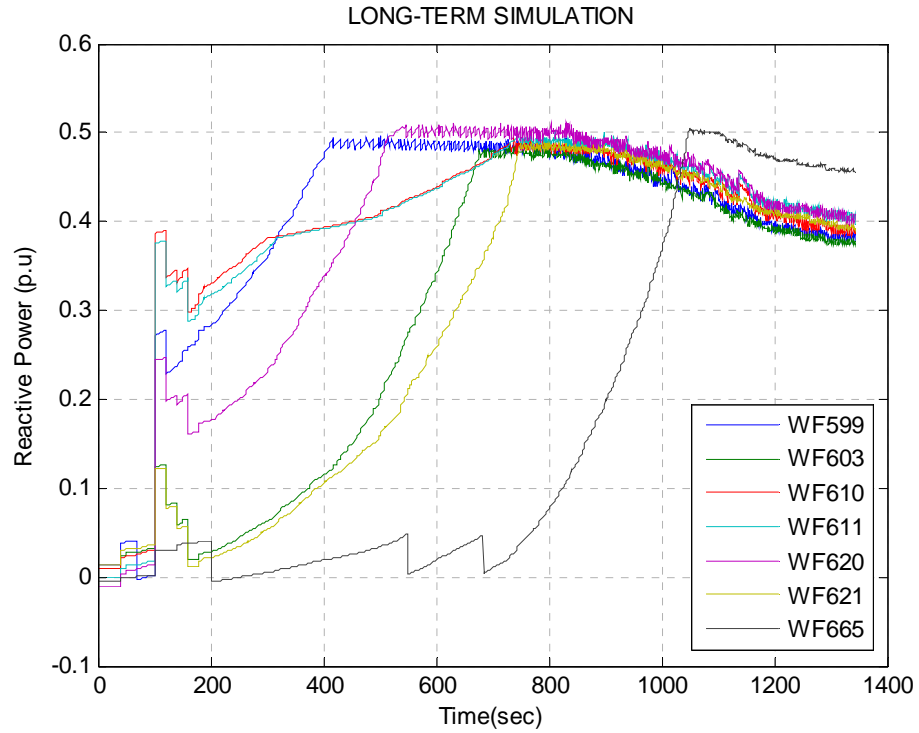
Τα συνολικά αποτελέσματα για όλους τους ζυγούς MT των Αιολικών Πάρκων φαίνονται στα Σχ. 4.9-4.13. Όλοι οι ζυγοί MT παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του ζυγού 610 που αναλύθηκε παραπάνω και, επομένως, η ξεχωριστή ανάλυση τους είναι περιττή. Οι ζεύξεις των συστοιχιών παρουσιάζονται στον Πίν. 4.2.



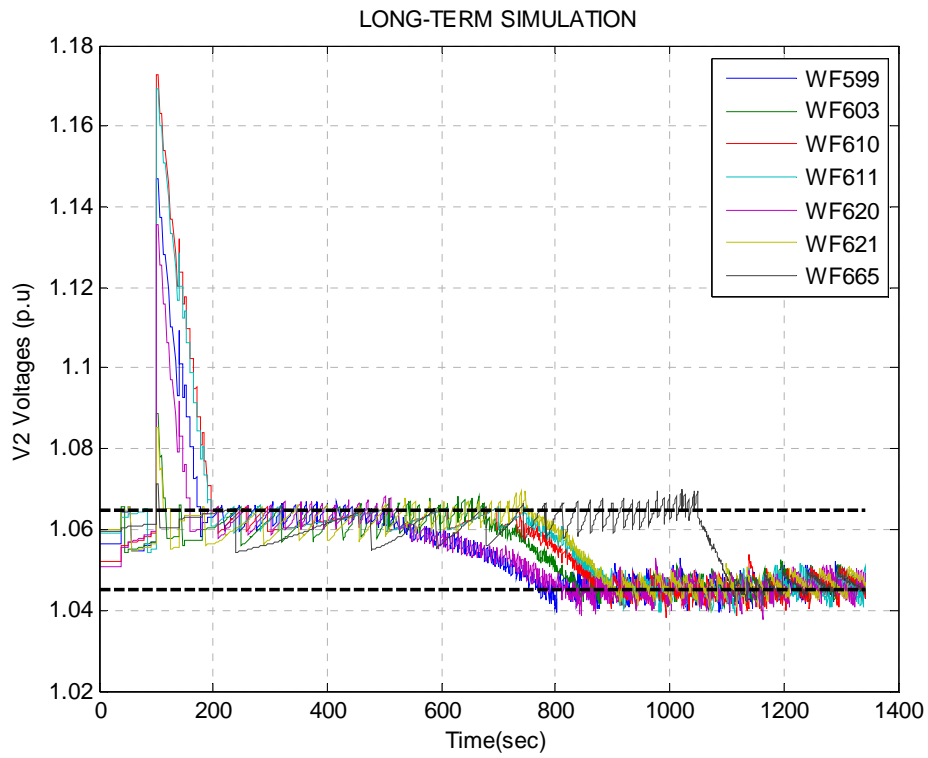
Σχ. 4.9: Τάσεις ζυγών MT των ΑΠ



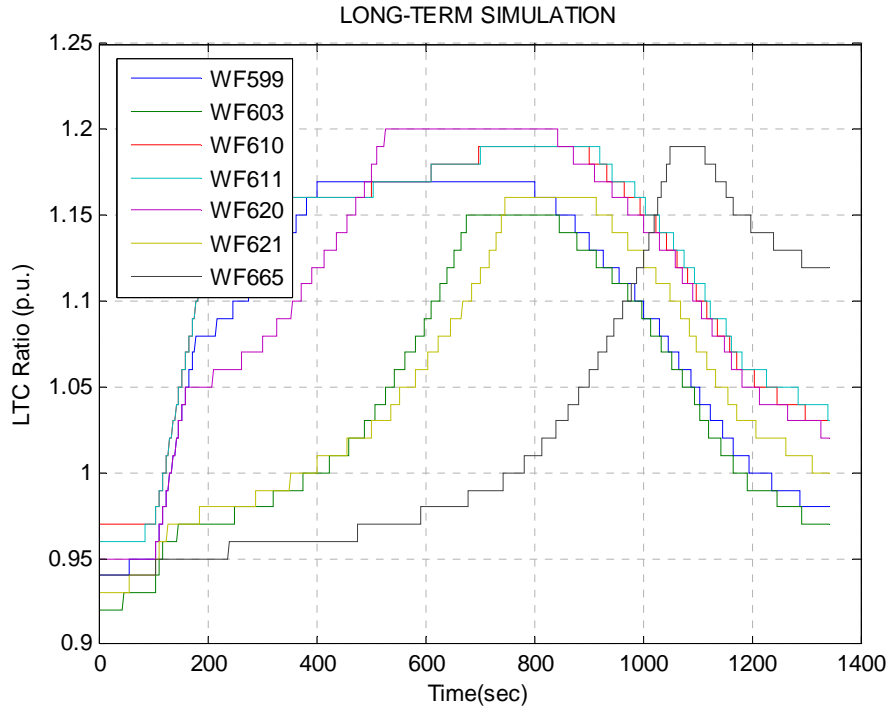
Σχ. 4.10: Ενεργός ισχύς των ζυγών MT των ΑΠ



Σχ. 4.11: Άεργός ισχύς των ζυγών MT των ΑΠ



Σχ. 4.12: Ρυθμιζόμενες τάσεις των ΣΑΤΥΦ των ΑΠ



Σχ. 4.13: Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ των ΑΠ

Πίν. 4.2: Χρόνοι ζεύξης των συστοιχιών πυκνωτών

Ζυγός MT	Πρώτη ζεύξη (s) (0.04 αμ)	Δεύτερη ζεύξη (s) (0.08 αμ)	Τρίτη ζεύξη (s) (0.12 αμ)
WF599	70	120	140
WF603	120	140	160
WF610	120	140	160
WF611	120	140	160
WF620	120	140	160
WF621	120	140	160
WF665	200	549	684

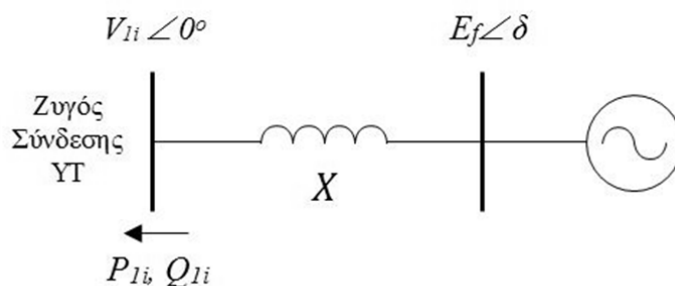
Συμπερασματικά, η λειτουργία του δικτύου σύνδεσης που σχεδιάστηκε στο MATLAB αποδείχθηκε ικανοποιητική. Τα ΣΑΤΥΦ κατάφεραν να διατηρήσουν τις διάφορες τάσεις μέσα σε αποδεκτά επίπεδα, ενώ οι συστοιχίες πυκνωτών απέφεραν μια ελάφρυνση στην άεργο παραγωγή που απαιτούνταν από τα Αιολικά Πάρκα. Παρόλα αυτά, κάποια προβλήματα έκαναν την εμφάνισή τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το πρώτο πρόβλημα είναι η πριονωτή μορφή που παρουσιάζουν οι γραφικές παραστάσεις. Το πρόβλημα αυτό προκαλείται από την ενεργοποίηση του περιορισμού ρεύματος στην προσομοίωση του WPSTAB που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο και τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος στον παρόντα αλγόριθμο. Το σημαντικότερο πρόβλημα έχει να κάνει με την εμφάνιση υπερτάσεων την στιγμή της διαταραχής, αλλά και κατά τη διάρκεια των επόμενων δευτερολέπτων, λόγω της

καθυστερήσης του ΣΑΤΥΦ να διορθώσει την κατάσταση. Οι υπερτάσεις γενικά πρέπει να αποφεύγονται σε ΣΗΕ και δεν θεωρείται λογικό να γίνουν ανεκτές από την προστασία λειτουργίας των Αιολικών Πάρκων. Συνεπώς, η ανάλυση που έγινε στην παρούσα ενότητα υποδεικνύει ότι η προσομοίωση του προηγούμενου Κεφαλαίου είναι υπεραισιόδοξη ως προς της δυνατότητα παροχής άεργης υποστήριξης από τα Αιολικά Πάρκα, κατά τη στιγμή έπειτα μιας σοβαρής διαταραχής, όπως αυτή που προσομοιώνεται.

### 4.3 Αντιμετώπιση του Προβλήματος Υπέρτασης

Όπως αναφέρθηκε, η εμφάνιση υπερτάσεων στα αποτελέσματα της παραπάνω προσομοίωσης, αποτελεί σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Συνήθως, σε πραγματικά δίκτυα διανομής η υπέρταση δεν θα εμφανιστεί, επειδή απλά θα περιοριστεί η έγχυση αέργου ισχύος, ώστε η τάση του Αιολικού Πάρκου να διατηρείται στην ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή. Εφόσον η προσομοίωση της προηγούμενης ενότητας έγινε χρησιμοποιώντας δεδομένα από την προσομοίωση του WPSTAB, για να αντιμετωπιστεί η υπέρταση πρέπει να γίνουν αλλαγές στον τρόπο προσομοίωσης του WPSTAB.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η αποφυγή της στιγμιαίας υπέρτασης κατά την εμφάνιση της κρίσιμης διαταραχής για  $t = 100$  s, είναι αδύνατη, διότι θα πρέπει αυτή πρώτα να ανιχνευθεί. Η διόρθωση της υπέρτασης, ωστόσο, μέσα στα επόμενα δευτερόλεπτα είναι εφικτή και προσομοιώνει ικανοποιητικά την πραγματική λειτουργία του συστήματος. Στόχος της μεταβολής των δεδομένων στο WPSTAB, είναι η αποφυγή της αναμενόμενης καθυστέρησης των ΣΑΤΥΦ να επαναφέρουν τη τάση σε φυσιολογικά επίπεδα και η διόρθωση της υπέρτασης σχεδόν αμέσως μετά την κρίσιμη διαταραχή. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει η διόρθωση της υπέρτασης να γίνει από την πηγή αέργου ισχύος και όχι από τα ΣΑΤΥΦ. Πραγματοποιείται, λοιπόν, η αλλαγή των παραμέτρων του μοντέλου της πηγής τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο WPSTAB στην ενότητα 3.5 του προηγούμενου Κεφαλαίου και αναπαράγεται εδώ στο Σχ. 4.14. Οι παράμετροι που θα αλλαχτούν είναι η εσωτερική επαγωγική αντίδραση  $X$  της πηγής και η μέγιστη τιμή της εσωτερικής τάσης  $E_f^{lim}$ .



Σχ. 4.14: Μοντέλο πηγής τάσης με εσωτερική αντίδραση

Η διόρθωση γίνεται στην παρούσα ενότητα με την αύξηση της εσωτερικής αντίδρασης  $X$  της πηγής τάσης και την ταυτόχρονη αλλαγή της μέγιστης εσωτερικής τάσης  $E_f^{lim}$ . Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο του WPSTAB προσαρμόζεται στο Σχ. 4.1. Για την καλύτερη προσομοίωση της σκέδασης του μετασχηματιστή του Σχ. 4.1, το νέο  $X$  ορίζεται ως  $X=0.38$  αμ στη βάση των 100 MVA ή  $X=0.19$  αμ στη βάση των 50 MVA του Μετατροπέα Πηγής Τάσης. Για να αποφευχθεί η υπέρταση, η ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή τάσης  $V_{2i}$  του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή ορίζεται στα  $V_{2i,max} = 1.08$  αμ. Με βάση την τιμή αυτή και τα Σχ. 4.1 και 4.14, ορίζονται οι παρακάτω σχέσεις (στη βάση των 100 MVA), με τη χρήση των οποίων γίνεται ο υπολογισμός της  $E_f^{lim}$  (θεωρείται ότι  $P_{1i} = 0$ ):

$$E_f^{lim} = V_{1i} + \frac{-jQ_{1i}}{V_{1i}}(jX) \quad (4.14)$$

$$V_{2i,max} = 1.08 = \frac{V_{1i}}{r_i} + \frac{-jQ_{1i}}{V_{1i}/r_i}(jX_i) \quad (4.15)$$

Για  $X = X_i = 0.38$  αμ και από τις σχέσεις (4.14) και (4.15) έχουμε ότι:

$$E_f^{lim} = \left(1 - \frac{1}{r_i^2}\right)V_{1i} + \frac{1.08}{r_i} \quad (4.16)$$

Ο λόγος μετασχηματισμού  $r_i$  παραμένει σταθερός αμέσως μετά τη διαταραχή, ενώ η τάση  $V_{1i}$  του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή αναμένεται να εμφανίσει μικρή μεταβολή. Κατά συνέπεια, για τον υπολογισμό της  $E_f^{lim}$  σύμφωνα με τη σχέση (4.16), τα  $V_{1i}$  και  $r_i$  λαμβάνουν τις τιμές που είχαν αμέσως πριν την διαταραχή ( $t=99$  s). Στον Πίν. 4.3 φαίνονται οι τιμές αυτές, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της  $E_f^{lim}$  που προκύπτουν.

**Πίν. 4.3:** Τιμές μέγιστης εσωτερικής τάσης με αντιμετώπιση υπέρτασης

Ζυγός ΥΤ	$V_{1i}$	$r_i$	$E_f^{lim}$
599	0.9880	0.9500	1.0301
603	0.9721	0.9300	1.0094
610	1.0181	0.9700	1.0495
611	1.0177	0.9700	1.0495
620	1.0017	0.9500	1.0286
621	0.9807	0.9400	1.0197
665	0.9972	0.9400	1.0176

#### 4.4 Αποτελέσματα με Αλλαγή του Μοντέλου στο WPSTAB

Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν στα δεδομένα του WPSTAB, αφορούν την προσομοίωση που αναλύθηκε στην ενότητα 3.5 του προηγούμενου Κεφαλαίου. Τα δεδομένα του Πίν. 3.7 παραμένουν ως έχουν εκτός από τα πεδία της εσωτερικής αντίδρασης  $X$  και της μέγιστης τάσης διέγερσης  $E_f^{lim}$ , τα οποία αντικαταστάθηκαν από τις νέες τιμές της προηγούμενης ενότητας. Πριν παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του αλγορίθμου στο MATLAB με την αντιμετώπιση της υπέρτασης, πραγματοποιείται μια σύντομη σύγκριση της απόκρισης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος στο WPSTAB πριν και μετά τις τροποποιήσεις στους Μετατροπείς Πηγής Τάσης των Αιολικών Πάρκων.

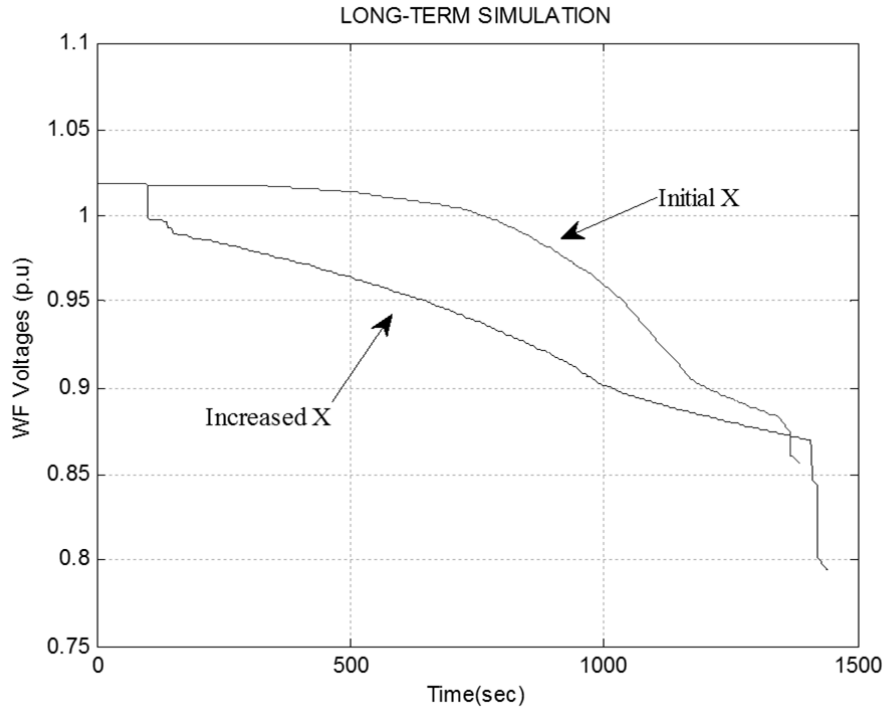
##### 4.4.1 Επίδραση αλλαγών στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Οι παραπάνω αλλαγές, προκάλεσαν, όπως ήταν αναμενόμενο μια μεταβολή της συμπεριφοράς του Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα στην προσομοίωση του WPSTAB. Η άεργη υποστήριξη που προσέφεραν τα αιολικά πάρκα, κυρίως στην περιοχή της Πελοποννήσου (Σχ. 3.24) δεν αναμένεται να είναι η ίδια, καθώς κάποιες κύριες παράμετροι των πηγών τάσης που καθορίζουν την παραγωγή αέργου ισχύος έχουν πλέον μεταβληθεί. Μάλιστα περιμένουμε πτώση της παροχής αέργου ισχύος και κυρίως αμέσως μετά τη διαταραχή, αφού οι άεργες απώλειες στην εσωτερική αντίδραση των πηγών τάσης έχουν αυξηθεί ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε και η μέγιστη εσωτερική τους τάση.

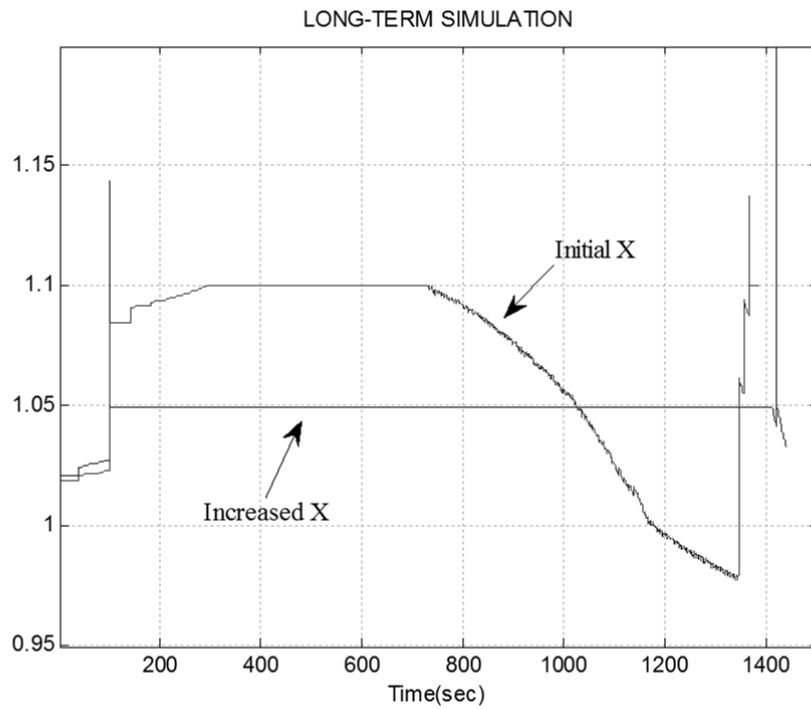
Για λόγους σύγκρισης, στα Σχ. 4.15-4.18 παρουσιάζονται σε γραφικές παραστάσεις τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο WPSTAB πριν και μετά τις αλλαγές στο μοντέλο των Μετατροπέων Πηγής Τάσης για τον ζυγό YT 610. Επειδή η συμπεριφορά του ζυγού 610 στους διάφορους μηχανισμούς προστασίας και ελέγχου έχει αναλυθεί λεπτομερώς στο προηγούμενο Κεφάλαιο, εδώ θα παραληφθεί μια τέτοια ανάλυση και θα τονιστούν μόνο οι διαφορές ανάμεσα στις δύο προσομοιώσεις.

Σύμφωνα με τα Σχ. 4.15-4.18, οι πρώτες σημαντικές διαφορές πριν και μετά την αλλαγή εμφανίζονται κυρίως κατά την πρόκληση της κρίσιμης διαταραχής για  $t = 100$  s. Όπως φαίνεται και από Σχ. 4.16, η εσωτερική τάση περιορίζεται στο όριο της αμέσως μετά τη διαταραχή. Η μέγιστη τιμή της εσωτερικής τάσης διατηρείται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης, μέχρι περίπου για  $t = 1410$  s, όπου παρατηρούμε και την πρώτη εμφάνιση απώλειας μονάδας παραγωγής.

Η αλλαγή της μέγιστης εσωτερικής τάσης προκαλεί μεταβολές στο επίπεδο της τάσης του ζυγού YT και στην έγχυση αέργου ισχύος κατά την διαταραχή, όπως παρατηρείται και στα Σχ. 4.15 και 4.17, αντίστοιχα. Η μεν τάση εμφανίζει πτώση από το πρώτο κιόλας δευτερόλεπτο μετά τη διαταραχή, ενώ η τάση πριν την αλλαγή των δεδομένων διατηρούσε σταθερή την τιμή της για αρκετά δευτερόλεπτα (μέχρι  $t = 295$  s).

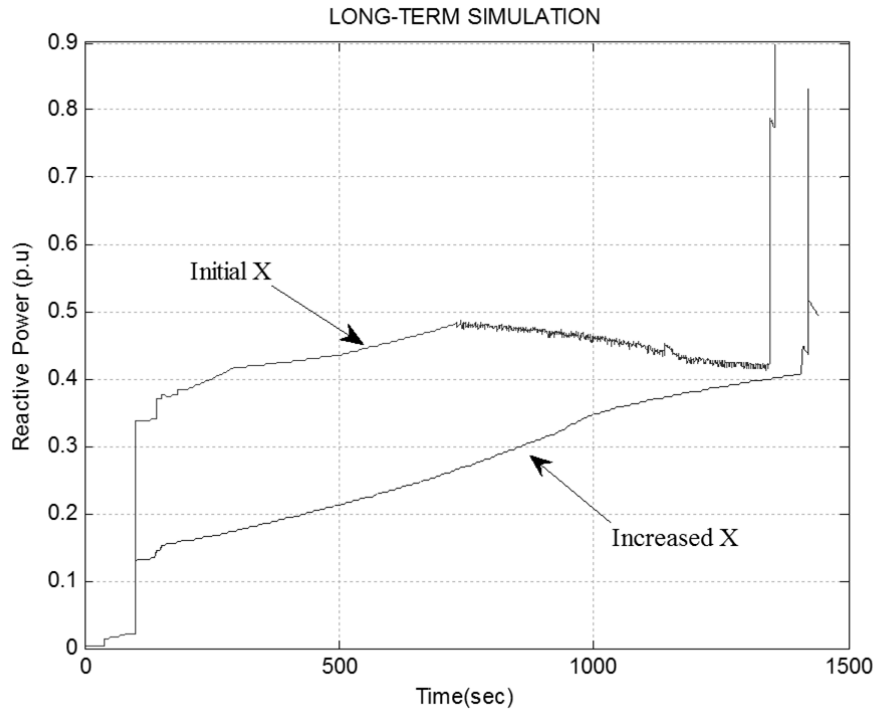


Σχ. 4.15: Τάση ζυγού YT 610 πριν και μετά την αλλαγή

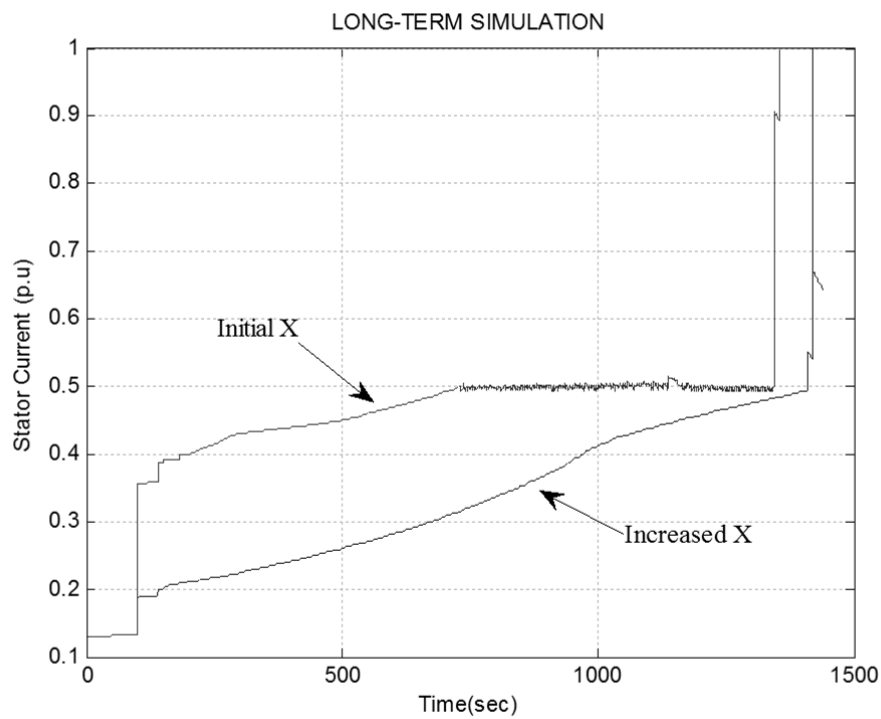


Σχ. 4.16: Εσωτερική τάση πριν και μετά την αλλαγή





Σχ. 4.17: Έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό YT 610 πριν και μετά την αλλαγή



Σχ. 4.18: Έγχυση ρεύματος στο ζυγό YT 610 πριν και μετά την αλλαγή

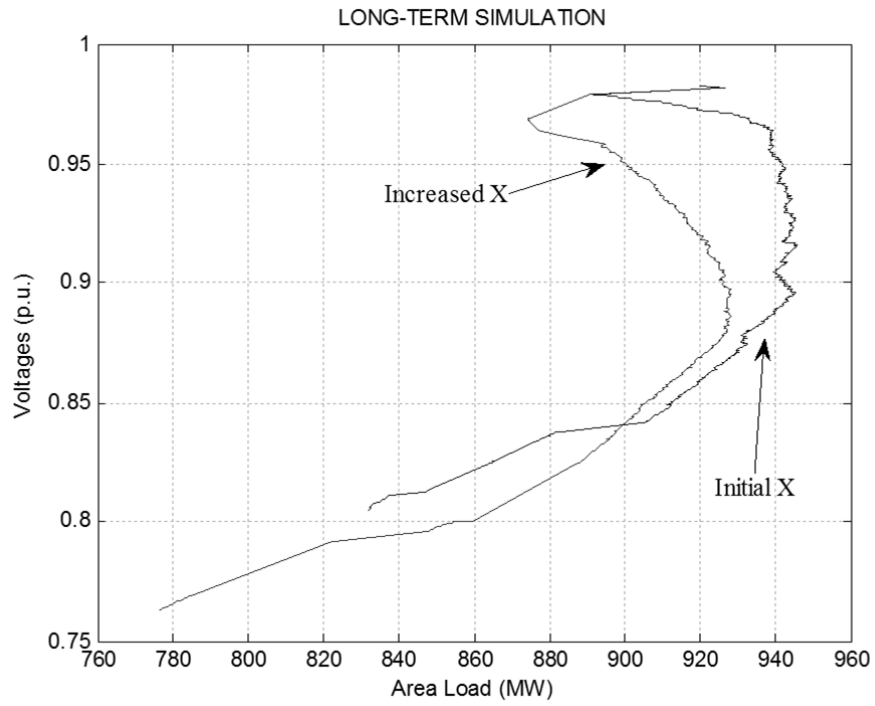
Το Σχ. 4.17, δείχνει τη διαφορά στην ποσότητα αέργου ισχύος που παρέχεται πριν και μετά την αλλαγή των παραμέτρων της πηγής τάσης. Αρχικά, η αέργος έγχυση της πηγής τάσης αμέσως μετά τη διαταραχή έφτανε τα 34 MVA<sub>g</sub>, ενώ μετά τις αλλαγές η παροχή αυτή περιορίζεται στα 13 MVA<sub>g</sub>. Σε αυτή τη μείωση παροχής αέργου ισχύος αμέσως μετά τη διαταραχή βασίζεται η μέθοδος της αντιμετώπισης υπέρτασης που εφαρμόστηκε. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η αέργος ισχύς μετά τις αλλαγές δεν περιορίζεται πριν την εμφάνιση της πρώτης απώλειας μονάδας για  $t = 1410$  s. Αυτό φαίνεται και από το Σχ. 4.18 του ρεύματος, το οποίο δεν ξεπερνά το όριο των 0.5 αμ μέχρι τη στιγμή της αποσύνδεσης της μονάδας.

Αναμενόμενες είναι και οι διαφορές στις PV καμπύλες της Πελοποννήσου και του Συστήματος, οι οποίες φαίνονται στα Σχ. 4.19 και 4.20. Τα επίπεδα των τάσεων μετά τη διαταραχή έχουν μειωθεί σημαντικά, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και ο ρυθμός πτώσης τους κατά την αύξηση του φορτίου. Η PV καμπύλη της Πελοποννήσου μετά τις αλλαγές, παύει να εμφανίζει την έντονη προιονωτή μορφή της προσομοίωσης της ενότητας 3.5, έχοντας μια πιο ομαλή μορφή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μηχανισμός περιορισμού ρεύματος των Αιολικών Πάρκων δεν ενεργοποιείται πλέον κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι το άνω όριο της αέργου ισχύος που μπορεί να εγχυθεί στο σύστημα δεν συναντάται από όλα τα αιολικά πάρκα, κάτι το οποίο μειώνει τη συνολική αέργη υποστήριξη των 350 MVA<sub>g</sub>, που ήταν δυνατή στο προηγούμενο Κεφάλαιο. Το περιθώριο ασφάλειας στην περιοχή της Πελοποννήσου έχει πλέον μειωθεί στα 5 MW περίπου με την προϋπόθεση της διατήρησης του αρχικού φορτίου των 920 MW. Το περιθώριο ασφάλειας του συνολικού συστήματος εμφανίζει πτώση στα 300 MW, με το αρχικό φορτίο στα 9440 MW. Συμπερασματικά, οι αλλαγές στις παραμέτρους του μοντέλου της πηγής τάσης στο WPSTAB προκάλεσαν μείωση στα περιθώρια ασφάλειας, με την αδύναμη περιοχή της Πελοποννήσου, ωστόσο, να διατηρεί ένα μικρό περιθώριο των 5MW. Το ολικό σύστημα συνεχίζει να μην παρουσιάζει κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα από πλευράς αστάθειας τάσης.

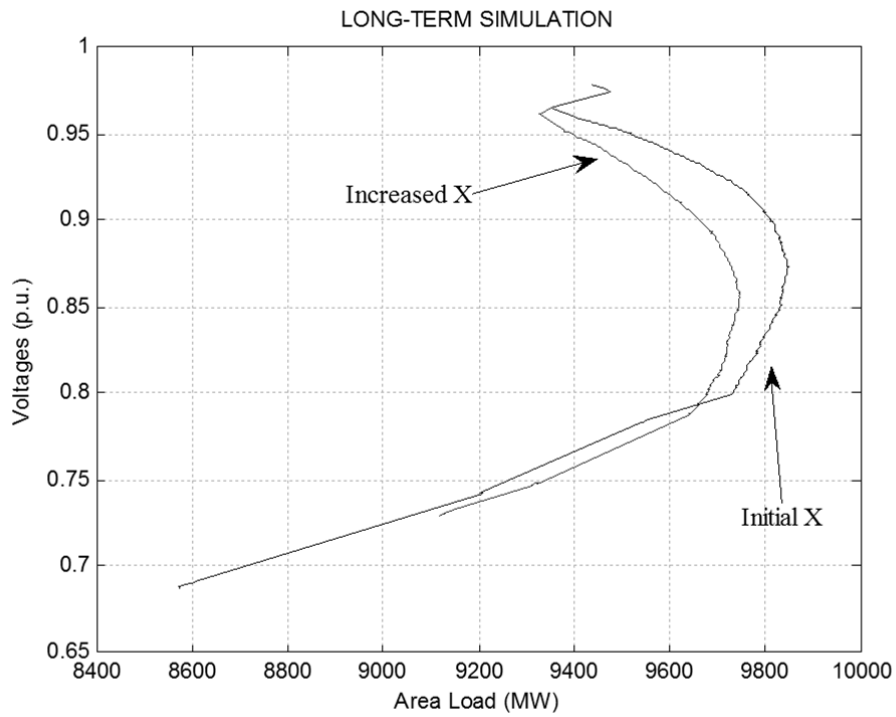
#### 4.4.2 Αποτελέσματα αντιμετώπισης υπέρτασης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο WPSTAB, μετά τις αλλαγές στο μοντέλο των πηγών τάσης των Αιολικών Πάρκων, χρησιμοποιήθηκαν για μια εκ νέου προσομοίωση του δικτύου σύνδεσης στο MATLAB, με στόχο την αντιμετώπιση της υπέρτασης. Ο αλγόριθμος προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο MATLAB και περιγράφηκε στην ενότητα 4.1 του παρόντος Κεφαλαίου, παρέμεινε ως έχει για την προσομοίωση στην παρούσα ενότητα. Η μόνη αλλαγή πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα εισόδου. Επομένως, όλες οι αρχικοποιήσεις και όλοι οι μηχανισμοί (ΣΑΤΥΦ, συστοιχίες πυκνωτών) των οποίων η λειτουργία αναλύθηκε στην ενότητα 4.1, παραμένουν ως έχουν.

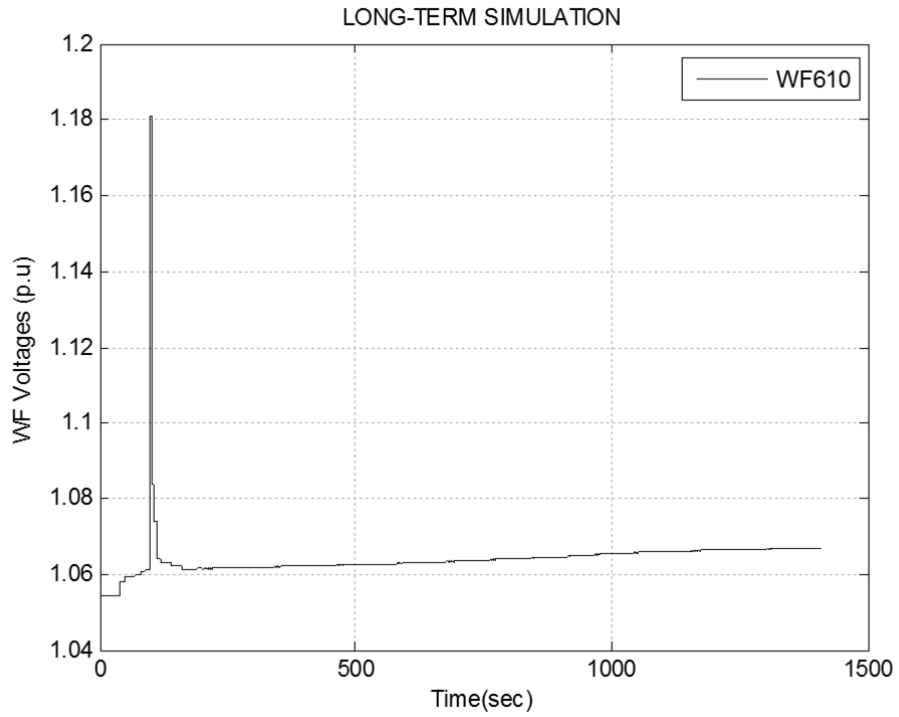
Για λόγους σύγκρισης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας, παρουσιάζονται στα Σχ. 4.21-4.25 τα αποτελέσματα για τον ζυγό 610, που αφορούν την πλευρά MT του δικτύου σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων (WF610). Όλες οι γραφικές παραστάσεις σταματούν για  $t = 1409$  s, ακριβώς πριν την εμφάνιση της πρώτης απώλειας μονάδας παραγωγής.



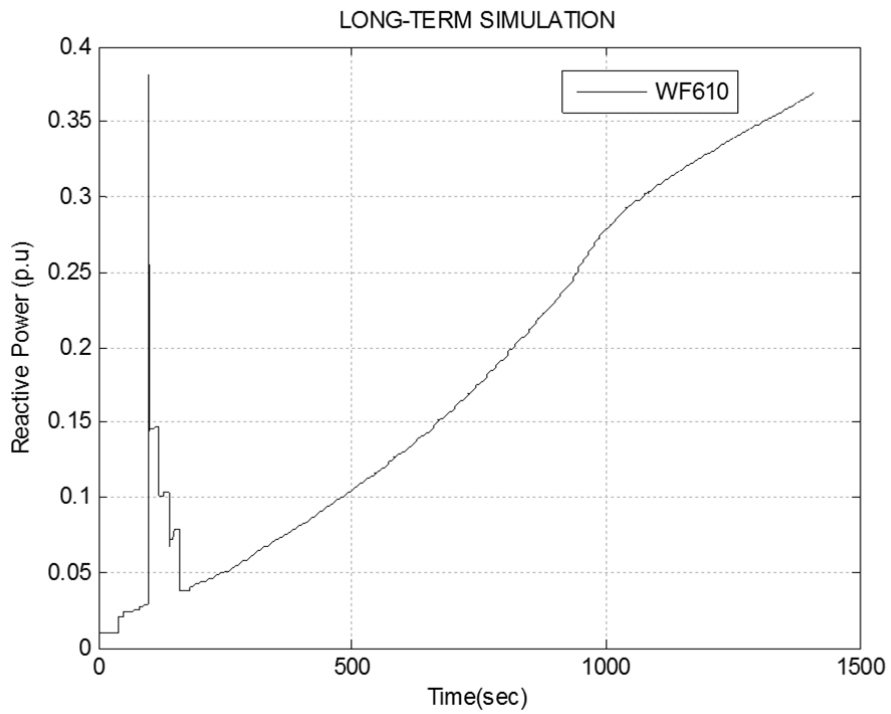
Σχ. 4.19: Καμπύλη PV Πελοποννήσου



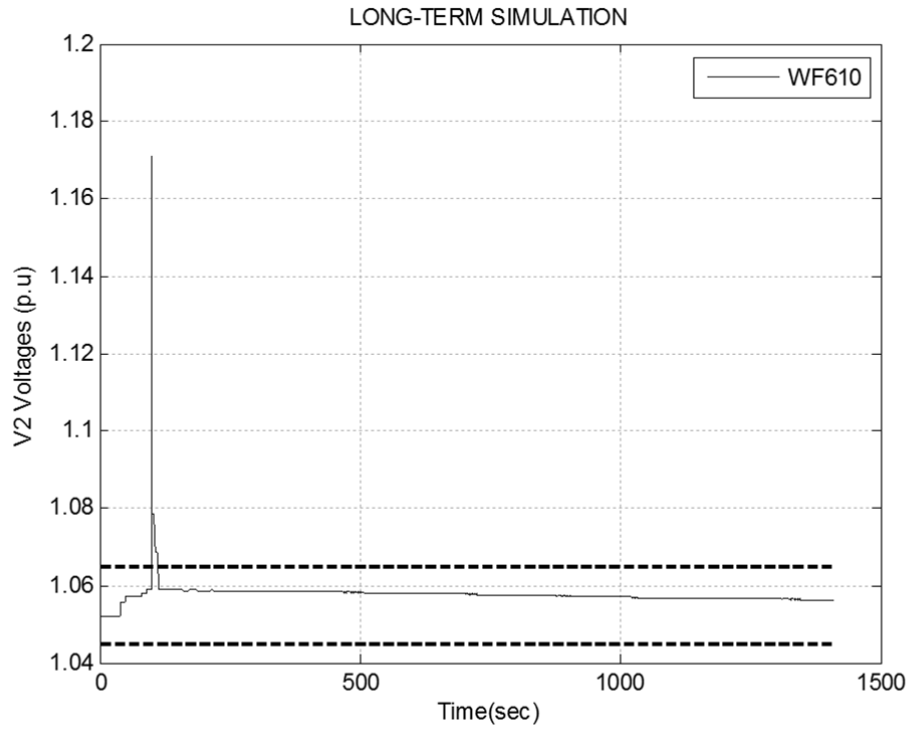
Σχ. 4.20: Καμπύλη PV του συνολικού συστήματος



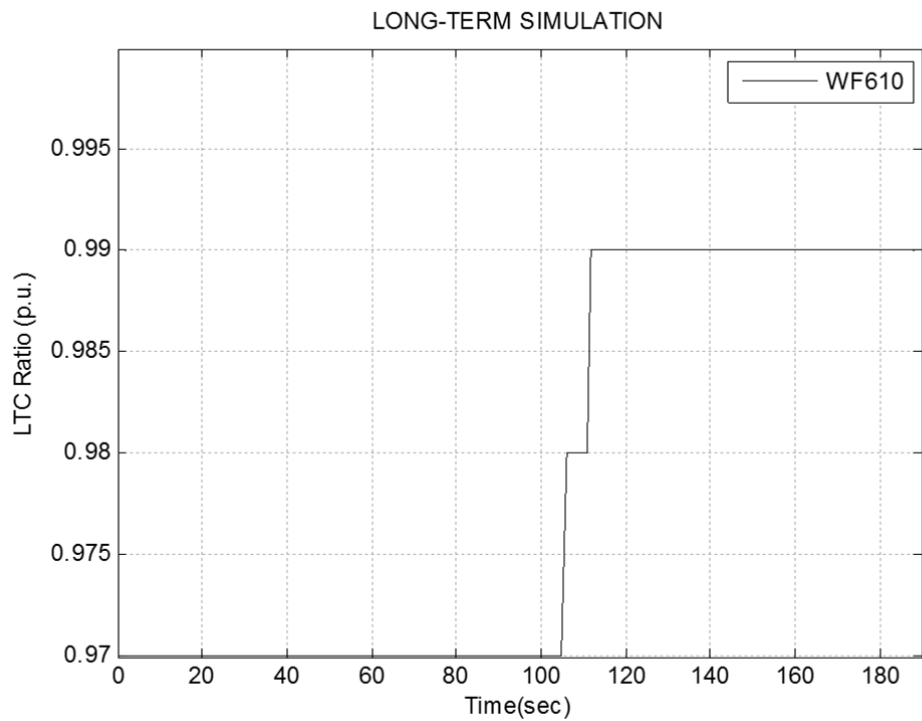
Σχ. 4.21: Τάση του ζυγού MT WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



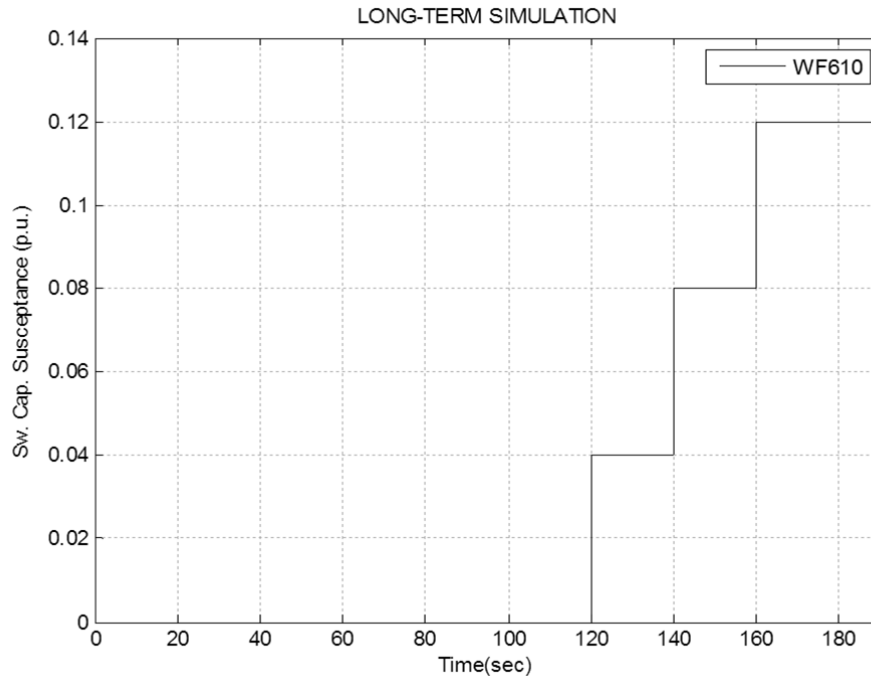
Σχ. 4.22: Αεργός ισχύς του ζυγού MT WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



Σχ. 4.23: Ρυθμιζόμενη τάση  $V_{2i}$  ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης



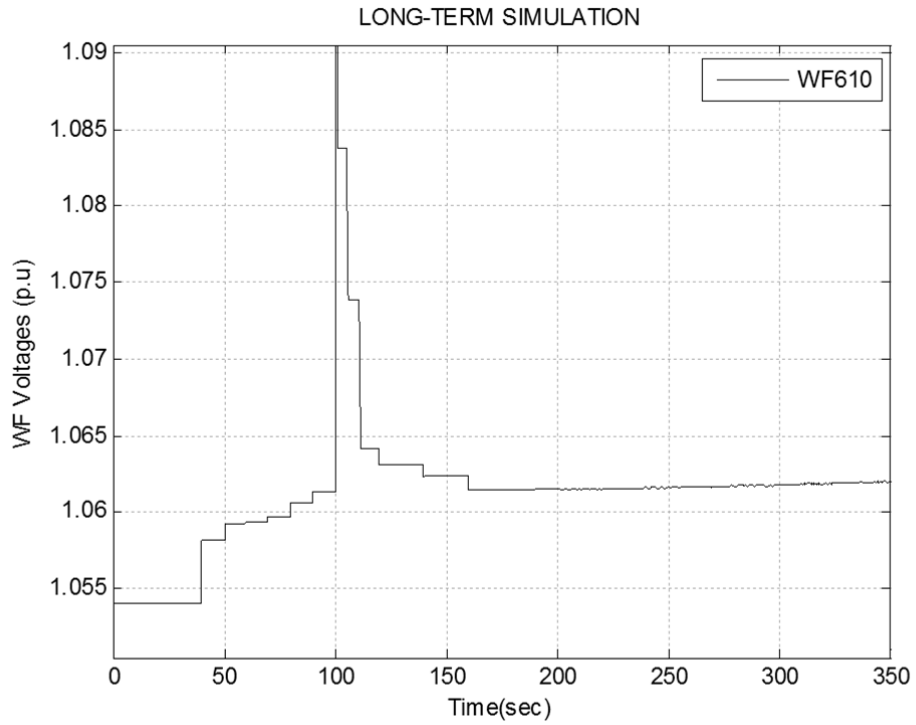
Σχ. 4.24: Μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης



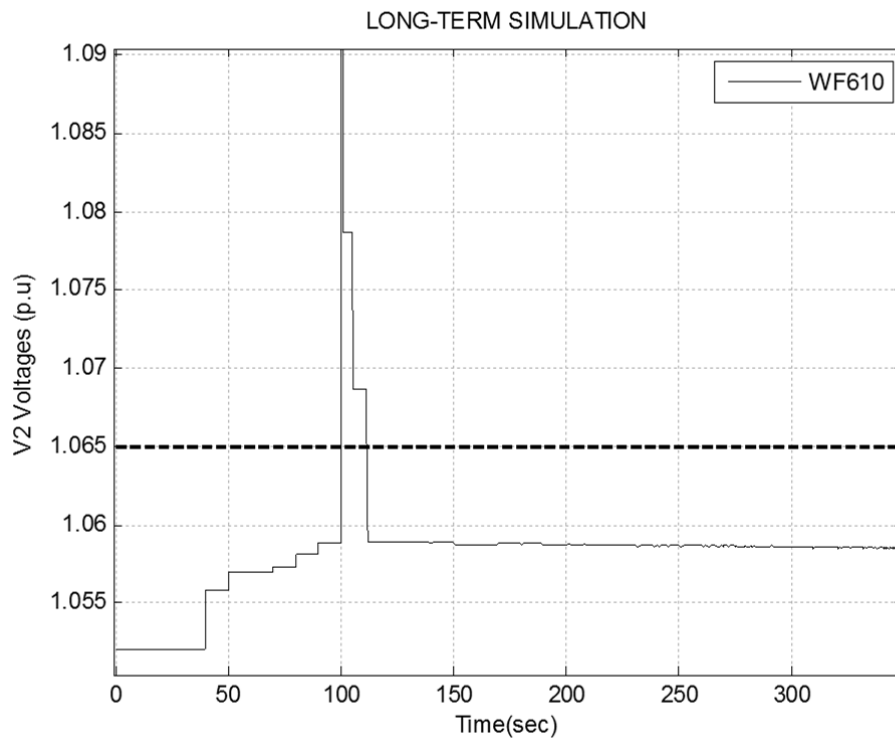
**Σχ. 4.25:** Ζεύξη των συστοιχιών πυκνωτών του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης

Μέχρι τη στιγμή της διαταραχής για  $t = 100$  s, η συμπεριφορά του δικτύου σύνδεσης είναι όμοια με αυτή πριν τις τροποποιήσεις των δεδομένων εισόδου. Τη στιγμή της διαταραχής, εμφανίζεται μια ακαριαία άνοδος των τάσεων και τις αέργου ισχύος (Σχ. 4.21-4.23), η οποία σηματοδοτεί την εμφάνιση υπέρτασης στο δίκτυο. Η μείωση της μέγιστης τιμής της εσωτερικής τάσης που φαίνεται στο Σχ. 4.16 περιόρισε την έγχυση αέργου ισχύος τη στιγμή της διαταραχής (Σχ. 4.18) και κατά συνέπεια τα επίπεδα των τάσεων πέφτουν στο επόμενο δευτερόλεπτο. Στη μεγεθυμένη εικόνα των Σχ. 4.26 και 4.27, παρατηρούμε ότι η ρυθμιζόμενη τάση του ΣΑΤΥΦ εμφανίζει πτώση σε τιμή περίπου 1.079 αμ και η τάση του πάρκου σε 1.084 αμ για  $t = 101$  s. Επομένως τα μέτρα προστασίας εναντίον της υπέρτασης που λήφθηκαν, τροποποιώντας τα δεδομένα εισόδου ήταν επιτυχή. Ας σημειωθεί εδώ ότι η καθυστέρηση διόρθωσης της υπέρτασης του 1 s οφείλεται στην όμοια καθυστέρηση που εμφανίζει ο περιορισμός της εσωτερικής τάσης στη μέγιστη τιμή της από την προσομοίωση στο WPSTAB.

Στο Σχ. 4.24, παρουσιάζονται οι κινήσεις του ΣΑΥΤΦ για την διόρθωση της ρυθμιζόμενης τάσης  $V_{2i}$ . Μετά την διόρθωση της υπέρτασης σε τιμή 1.079 αμ, το ΣΑΥΤΦ μεταβάλλει το λόγο μετασχηματισμού δύο φορές από την αρχική τιμή 0.97 αμ, σε χρόνους  $t = 105$  s και  $t = 111$  s, ενώ για το υπόλοιπο της προσομοίωσης ο λόγος μετασχηματισμού παραμένει σταθερός στα 0.99 αμ. Ως αποτέλεσμα, η τάση  $V_{2i}$  παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.23, εμφανίζοντας μια ελαφρώς αρνητική κλίση. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις τροποποιήσεις του μοντέλου της πηγής τάσης στο WPSTAB. Πιο συγκεκριμένα, η αλλαγή της εσωτερικής αντίδρασης της



Σχ. 4.26: Τάση του ζυγού MT WF610 του ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



Σχ. 4.27: Ρυθμιζόμενη τάση  $V_{2i}$  ΣΑΤΥΦ του ΑΠ WF610 με αντιμετώπιση υπέρτασης

πηγής για την προσομοίωση της σκέδασης του μετασχηματιστή, καθώς και η αποφυγή της πριονωτής μορφής που εμφανιζόταν λόγω του περιορισμού ρεύματος, συνέβαλλαν στο παραπάνω αποτέλεσμα.

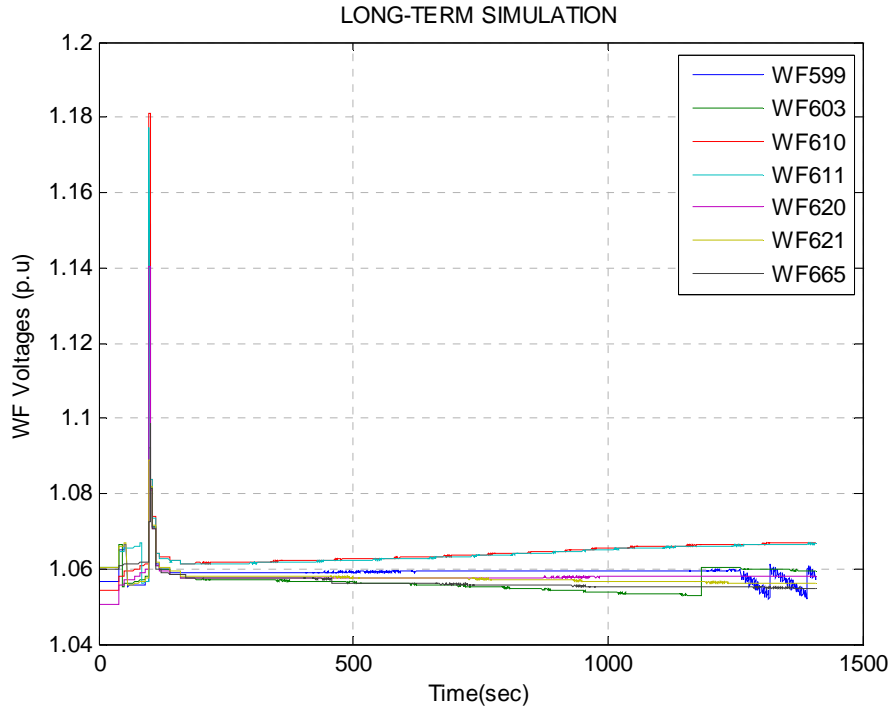
Η τάση του Αιολικού Πάρκου του Σχ. 4.21 ακολουθεί τη συμπεριφορά της ρυθμιζόμενης τάσης  $V_{2i}$  του ΣΑΤΥΦ. Εμφανής διαφορά παρουσιάζεται από τη χρονική στιγμή σταθερού λόγου μετασχηματισμού 0.99 αμ και έπειτα, όπου η τάση του πάρκου εμφανίζει μια ελαφρώς θετική κλίση. Η διαφορά αυτή οφείλεται στις απώλειες της γραμμής μεταφοράς που παρεμβάλλεται μεταξύ του πάρκου και του μετασχηματιστή.

Η άεργος έγχυση του αιολικού πάρκου του Σχ. 4.22 δείχνει να ακολουθεί τη μορφή της αυξανόμενης αέργου έγχυσης της πηγής τάσης στο WPSTAB του Σχ. 4.18. Αξιοσημείωτη είναι εδώ η τιμή της αέργου ισχύος αμέσως μετά τη διαταραχή, η οποία ανέρχεται πλέον περίπου στα 15 MVA<sub>Γ</sub> σε αντίθεση με τα 38 MVA<sub>Γ</sub> πριν τις αλλαγές στο WPSTAB. Η μείωση αυτή αποτελούσε και τον στόχο των τροποποιήσεων που πραγματοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση της υπέρτασης. Τα μειωμένα 15 MVA<sub>Γ</sub> που πλέον παρέχονται εμποδίζουν την εμφάνιση της υπέρτασης στο δίκτυο ΜΤ. Σημειώνεται επίσης ότι η ενεργός ισχύς του δικτύου συνεχίζει βρίσκεται σε σταθερά επίπεδα καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

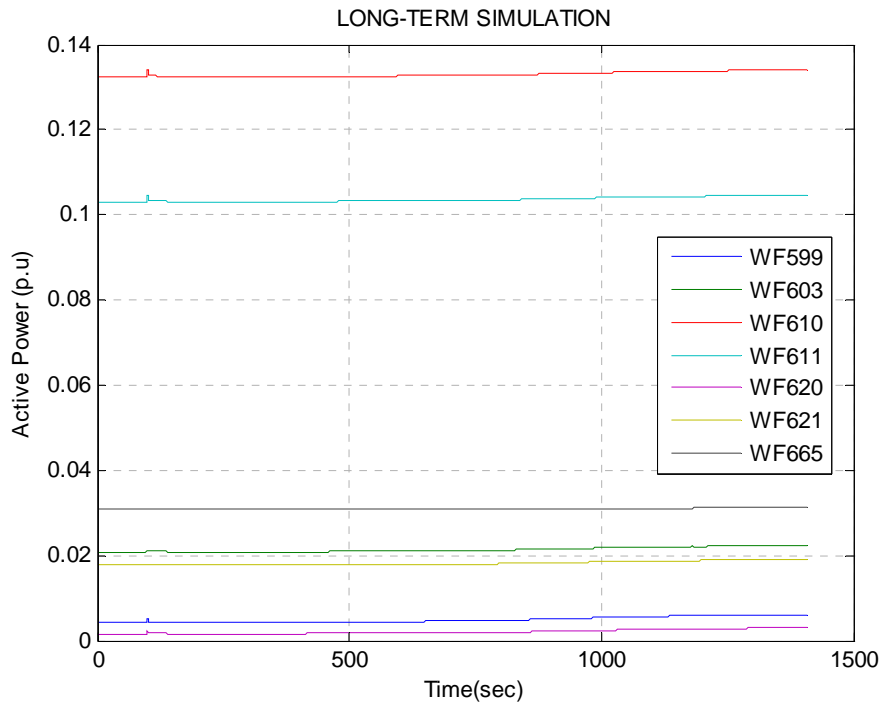
Στη χρονική εξέλιξη της τάσης και της αέργου ισχύος του Αιολικού Πάρκου παρατηρείται επίσης η επίδραση των συστοιχιών πυκνωτών που βρίσκονται συνδεδεμένες στον ζυγό ΜΤ  $V_{2i}$ . Το Σχ. 4.25 δείχνει τους χρόνους στους οποίους πραγματοποιείται η ζεύξη καθεμίας από τις τρεις συστοιχίες. Κατά τη ζεύξη κάθε συστοιχίας, η τάση και η άεργος ισχύς του πάρκου μειώνονται ακαριαία (Σχ. 4.26 και 4.22 αντίστοιχα), παρέχοντας ελάφρυνση στη λειτουργία έγχυσης αέργου ισχύος. Για  $t = 160$  s συνδέεται και η τελευταία συστοιχία. Σημειώνεται ότι λόγω της φύσης της προσομοίωσης (άεργη υποστήριξη) δεν πραγματοποιείται απόζευξη καμίας συστοιχίας.

Ακολουθούν στα Σχ. 4.28-4.32 τα συνολικά αποτελέσματα για τα 7 Αιολικά Πάρκα. Όλοι οι ζυγοί ΜΤ παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του ζυγού 610 που αναλύθηκε παραπάνω και, επομένως, η ξεχωριστή ανάλυση τους είναι περιττή. Εξαίρεση αποτελεί ο ζυγός WF599, οποίος εμφανίζει πριονωτή μορφή στα τελευταία δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, λόγω ενεργοποίησης του μηχανισμού περιορισμού ρεύματος. Οι ζεύξεις των συστοιχιών παρουσιάζονται στον Πίν. 4.4.

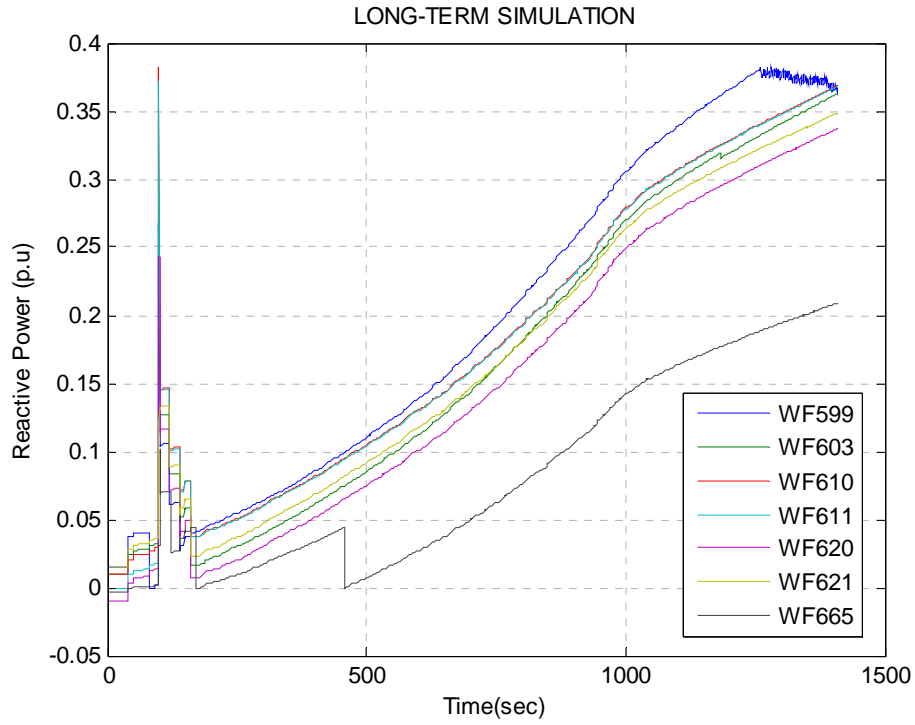




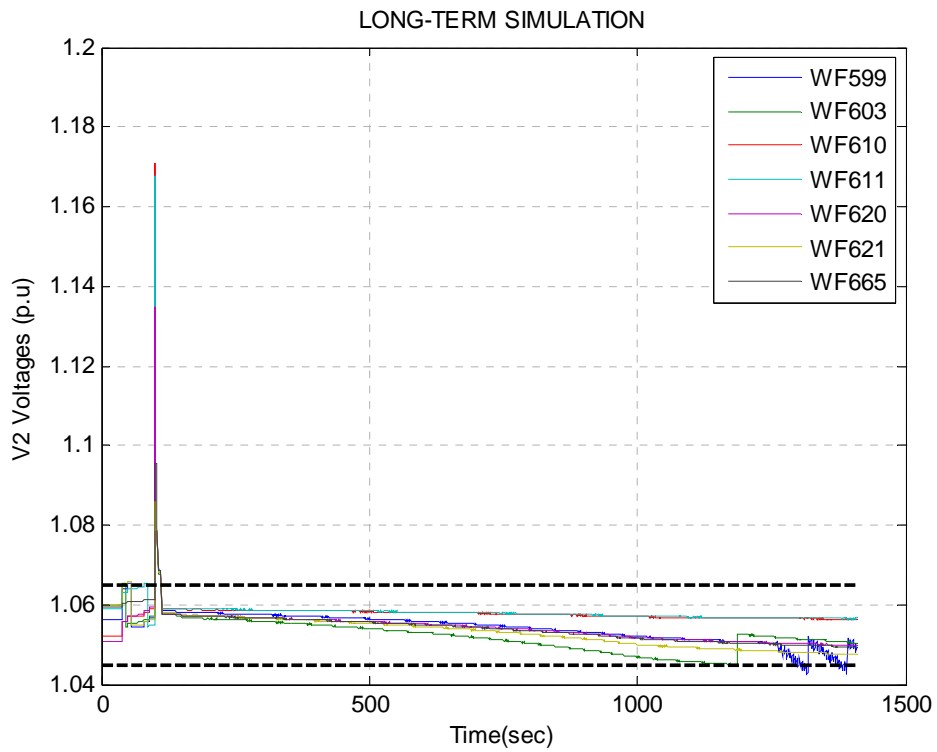
Σχ. 4.28: Τάση των ζυγών MT των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



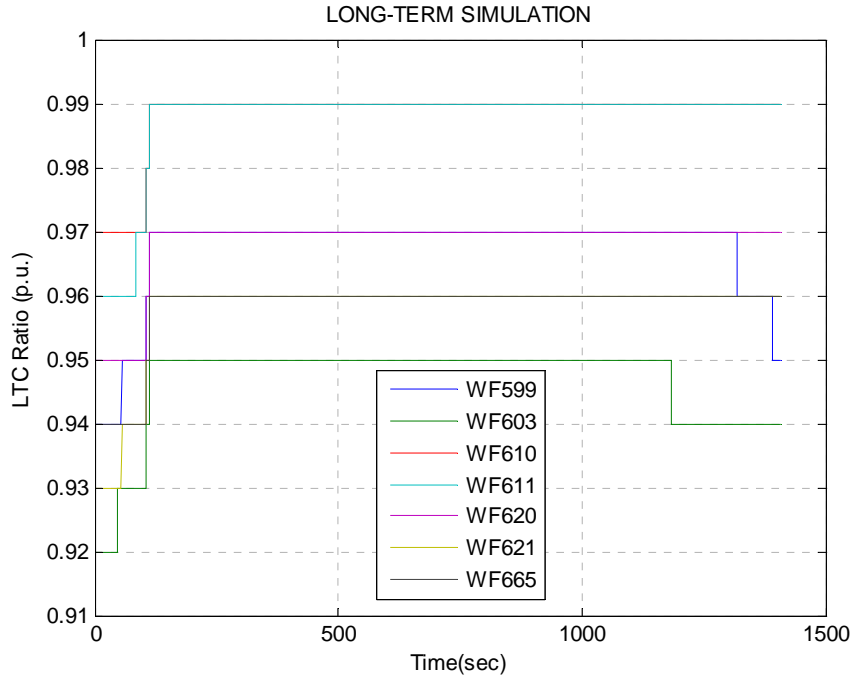
Σχ. 4.29: Ενεργός ισχύς των ζυγών MT των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



Σχ. 4.30: Άεργος ισχύς των ζυγών ΜΤ των ΑΠ με αντιμετώπιση υπέρτασης



Σχ. 4.31: Ρυθμιζόμενες τάσεις των ΣΑΤΥΦ με αντιμετώπιση υπέρτασης



Σχ. 4.32: Μεταβολές των λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ με αντιμετώπιση υπέρτασης

Πίν. 4.4: Χρόνοι ζεύξης των συστοιχιών πυκνωτών με αντιμετώπιση υπέρτασης

Ζυγός MT	Πρώτη ζεύξη (s) (0.04 αμ)	Δεύτερη ζεύξη (s) (0.08 αμ)	Τρίτη ζεύξη (s) (0.12 αμ)
WF599	80	120	140
WF603	120	140	160
WF610	120	140	160
WF611	120	140	160
WF620	120	140	161
WF621	120	140	160
WF665	121	170	457

Από τα παραπάνω αποτελέσματα, έγινε αντιληπτή η μεγάλη επιρροή που είχαν οι αλλαγές στα δεδομένα του WPSTAB, τόσο στα επίπεδα των τάσεων όσο και σε ολόκληρο το δίκτυο σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων. Η απόκριση του δικτύου στις αλλαγές αυτές αντιπροσωπεύει μια πιο ρεαλιστική συμπεριφορά σε σχέση με την προηγούμενη ενότητα, καθώς η προστασία από υπέρταση είναι διαθέσιμη στα πραγματικά δίκτυα των Αιολικών Πάρκων. Παράλληλα με την αντιμετώπιση της υπέρτασης, μικρότερα οφέλη της παρούσας προσομοίωσης είναι η μειωμένη λειτουργία των ΣΑΤΥΦ και του μηχανισμού περιορισμού ρεύματος για σχεδόν όλα τα πάρκα. Κύριο μειονέκτημα αποτελεί, ωστόσο, η μειωμένη έγχυση αέργου ισχύος κατά τη διαταραχή σε σχέση με πριν. Λόγω του περιορισμού των επιπέδων των τάσεων, το όριο των 50 MVA<sub>g</sub> που μπορεί να διαθέσει κάθε πάρκο, δεν συναντάται από κανένα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με εξαίρεση το πάρκο του

ζυγού 599. Κατά συνέπεια, όπως έδειξαν οι PV καμπύλες στα Σχ. 4.19 και 4.20, η περιοχή της Πελοποννήσου και το συνολικό σύστημα υπέστησαν μια σημαντική μείωση στα περιθώρια ασφάλειας μετά τη διαταραχή. Παρόλα αυτά η δυνατότητα επαναφοράς της λειτουργίας του συστήματος είναι εφικτή ακόμη και μετά την παραπάνω μείωση.

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης από άποψη ασφάλειας τάσης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος μέσω της Διεσπαρμένης Παραγωγής με εφαρμογή στη περιοχή της Πελοποννήσου. Το στιγμιότυπο λειτουργίας του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος που εξετάστηκε, αφορούσε την περίπτωση μιας διαταραχής τον Ιούνιο του 2010 που εντόπισε η εφαρμογή on-line VSA και χαρακτηρίστηκε ως κρίσιμη. Όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, η ενδεχόμενη αυτή διαταραχή θα προκαλούσε αποτυχία επαναφοράς της λειτουργίας του τοπικού δικτύου της Πελοποννήσου και την τελική κατάρρευση του συνολικού δικτύου. Για την αποφυγή μιας τέτοιας κατάρρευσης, αξιολογήθηκε στα πλαίσια της εργασίας η δυνατότητα υποστήριξης μέσω παροχής αέργου ισχύος από 7 Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου. Ακολούθησε η διεξαγωγή προσομοιώσεων στο λογισμικό WPSTAB για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις άεργης υποστήριξης, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 3.

Η πρώτη μέθοδος άεργης υποστήριξης αφορούσε τη χρήση των μηχανισμών αυτόματης ζεύξης-απόζευξης συστοιχιών πυκνωτών που βρίσκονται εγκατεστημένοι στους υποσταθμούς YT/MT των Αιολικών Πάρκων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, παρά την εμφάνιση βελτίωσης των περιθωρίων ασφάλειας στο δίκτυο της Πελοποννήσου, δεν υπήρχε δυνατότητα κάλυψης του τοπικού αρχικού φορτίου πριν τη διαταραχή. Αυτό οφείλεται στη σχετικά μικρή ποσότητα εγκατεστημένης αέργου ισχύος σε μορφή συστοιχιών πυκνωτών ( $7 \times 12 = 84 \text{ MVAr}$ ), καθώς επίσης και στη χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης των μηχανισμών αυτών. Κατά συνέπεια, ο κίνδυνος για κατάρρευση για τη συγκεκριμένη διαταραχή παρέμεινε.

Στη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε η δυνατότητα παροχής αέργου ισχύος από τα Αιολικά Πάρκα απευθείας στο ζυγό YT χωρίς περιορισμό. Σκοπός αυτής της άσκησης ήταν ο προσδιορισμός της συνολικής άεργης υποστήριξης που απαιτούνταν για την εξάλειψη του προβλήματος της αστάθειας τάσης της Πελοποννήσου. Τα αποτελέσματα της ενότητας 3.3 έδειξαν ότι η ποσότητα αυτή ανέρχεται περίπου στα 786 MVAr. Φυσικά, η δυνατότητα εγκατάστασης μιας τέτοιας ποσότητας άεργης υποστήριξης δεν είναι ρεαλιστική, τουλάχιστον με τα σημερινά δεδομένα. Επομένως, στη συνέχεια ακολούθησε η αναζήτηση μιας πιο ρεαλιστικής λύσης.

Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση έγινε προσομοίωση της έγχυσης αέργου ισχύος από τα Αιολικά Πάρκα στο Σύστημα με τη χρήση Μετατροπέων Πηγής Τάσης (Voltage Source Converters – VSC). Η παρεχόμενη ενεργός ισχύς θεωρήθηκε σταθερή, ενώ η παροχή αέργου ισχύος περιορίστηκε από ένα άνω όριο σύμφωνα με τα ονομαστικά μεγέθη του κάθε πάρκου με τη μορφή μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος. Ακόμη, η έγχυση αέργου ισχύος στο Σύστημα θεωρήθηκε ότι γίνεται απευθείας στο ζυγό YT των πάρκων. Στην ενότητα 3.4 το όριο αυτό ορίστηκε στα 50 MVAr για κάθε πάρκο, μειώνοντας την ποσότητα αέργου

ισχύος της προηγούμενης μεθόδου περίπου στο μισό ( $7 \times 50 = 350 \text{ MVA}$ ). Ο παραπάνω μηχανισμός περιορισμού ρεύματος στηρίχθηκε στο μοντέλο της Προστασίας Ρεύματος Τυμπάνου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [17]. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ήταν ικανοποιητικά με την περιοχή της Πελοποννήσου να εμφανίζει πλέον περιθώρια ασφάλειας της τάξης των 20 MW, λύνοντας ουσιαστικά το πρόβλημα αστάθειας τάσης που εμφανιζόταν. Ωστόσο, τα παραπάνω αποτελέσματα πρέπει να ελεγχθούν με βάση την πραγματική σύνδεση των Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα.

Μια πρώτη προσπάθεια αξιολόγησης των αποτελεσμάτων έγινε στο Κεφάλαιο 4. Σκοπός ήταν ο προσδιορισμός των συνεπειών της προσομοίωσης του Κεφαλαίου 3 για τον ζυγό ΜΤ των Αιολικών Πάρκων. Για να συμβεί αυτό, ήταν αναγκαία η πιο λεπτομερής αναπαράσταση της γραμμής διανομής των Αιολικών Πάρκων. Η αναπαράσταση αυτή περιελάμβανε μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, γραμμή διανομής και συστοιχίες πυκνωτών. Τα μεγέθη των διατάξεων επιλέχτηκαν όμοια για όλα τα πάρκα. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε μέσω αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ενότητας 3.4. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παροχή αέργου ισχύος διαμέσου της γραμμής διανομής των Αιολικών Πάρκων είναι εφικτή, μέσω της βοηθητικής λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ και των συστοιχιών πυκνωτών. Παρόλα αυτά, η εμφάνιση υπέρτασης μετά την εμφάνιση της κρίσιμης διαταραχής παραμένει προβληματική.

Η αντιμετώπιση της υπέρτασης αποτέλεσε αντικείμενο του δεύτερου μέρους του Κεφαλαίου 4. Για την αντιμετώπιση της υπέρτασης έπρεπε να τροποποιηθούν κατάλληλα τα αποτελέσματα της ενότητας 3.4. Η τροποποίηση αυτή αφορούσε κυρίως το μέγεθος της ποσότητας αέργου ισχύος που εγχέεται στον ζυγό ΥΤ ακριβώς μετά τη διαταραχή. Μειώνοντας κατάλληλα αυτή την ποσότητα και προχωρώντας σε νέα προσομοίωση, η υπέρταση που εμφανιζόταν κατά την κρίσιμη διαταραχή αντιμετωπίστηκε άμεσα (μετά από 1 δευτερόλεπτο). Η αντιμετώπιση της υπέρτασης είχε, ωστόσο, ανάλογο αντίκτυπο στη γενικότερη υποστήριξη αέργου ισχύος από τα Αιολικά Πάρκα, δεδομένου ότι με την προαναφερθείσα τροποποίηση η ικανότητα παροχής αέργου ισχύος των πάρκων μετά τη διαταραχή μειώθηκε σημαντικά. Κατά συνέπεια, το περιθώριο ασφάλειας της Πελοποννήσου εμφάνισε πτώση κατά 15 MW, μειώνοντας την ασφάλεια τάσης του Συστήματος σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση. Σε κάθε περίπτωση πάντως το αποτέλεσμα της προσομοίωσης δείχνει ότι το φορτίο της Πελοποννήσου μπορεί να αποκατασταθεί μετά τη διαταραχή.

## 5.2 Προοπτικές

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάστηκαν διάφοροι τρόποι παροχής αέργου ισχύος στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα από 7 Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου.

Στην ενότητα 3.3 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο WPSTAB, με άεργη υποστήριξη μέσω των συστοιχιών πυκνωτών που βρίσκονται εγκατεστημένες στους υποσταθμούς των Αιολικών Πάρκων. Ωστόσο, η προσομοίωση στηρίχθηκε στην παράσταση των Αιολικών Πάρκων με βάση το απλουστευμένο μοντέλο σύνδεσης των πάρκων στη ΜΤ. Μια βελτίωση, επομένως, θα αποτελούσε η τροποποίηση των δεδομένων του WPSTAB, ώστε το μοντέλο σύνδεσης στη ΜΤ να λάβει την πλήρη μορφή του. Κάτι τέτοιο θα προσέφερε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα προσομοίωσης, καθώς το πλήρες ισοδύναμο μοντέλο αντικατοπτρίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματικότητα.

Η χρήση των Μετατροπέων Πηγής Τάσης για άεργη υποστήριξη στην ενότητα 3.5, βασίστηκε σε αρκετές παραδοχές και απλοποιήσεις. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι τα 7 Αιολικά Πάρκα διαθέτουν πράγματι τέτοιους μετατροπείς ισχύος, ενώ κάτι τέτοιο μπορεί να μην ισχύει. Ένα πρώτο σημαντικό βήμα, επομένως, θα ήταν ο έλεγχος της διαθεσιμότητας τέτοιων μετατροπέων στα πάρκα. Ακόμη, η παράσταση των μετατροπέων αυτών στα δεδομένα του WPSTAB βασίστηκε στο ήδη ενσωματωμένο μοντέλο προστασίας ρεύματος τυμπάνου των σύγχρονων γεννητριών. Η έλλειψη μοντέλου Μετατροπέων Πηγής Τάσης προκάλεσε κάποια προβλήματα στα αποτελέσματα της προσομοίωσης (πριονωτή μορφή γραφικών παραστάσεων), δυσκολεύοντας έτσι την ορθή αξιολόγηση τους. Ένα μελλοντικό αντικείμενο μελέτης, επομένως, αποτελεί η ανάπτυξη ενός μοντέλου Μετατροπέων Πηγής Τάσης (ή μετατροπέων ισχύος γενικότερα) και η ενσωμάτωσή του στο περιβάλλον του WPSTAB. Προϊόν της παραπάνω μελέτης θα είναι η αναβάθμιση του λογισμικού WPSTAB σε νεότερη έκδοση, με διαθεσιμότητα πιο σύγχρονων διατάξεων ισχύος.

Ένα πολύ σημαντικό θέμα βελτίωσης της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η χρήση πραγματικών δεδομένων για το κάθε Αιολικό Πάρκο. Τόσο στο Κεφάλαιο 3 όσο και στο Κεφάλαιο 4 τα μεγέθη που αντιπροσώπευαν τις διάφορες διατάξεις του μοντέλου σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων επιλέχτηκαν αυθαίρετα και όμοια για κάθε πάρκο. Επιπλέον, σε κάθε προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε, η παράσταση των ανεμογεννητριών παραλείφθηκε, και δόθηκε μεγαλύτερη σημασία στη συμπεριφορά της γραμμής διανομής πέρα από τον κοινό ζυγό σύνδεσης ΜΤ των ανεμογεννητριών. Επομένως, η εξέταση των πραγματικών δεδομένων των Αιολικών Πάρκων και η εκ νέου αντίστοιχη προσομοίωση αποτελεί ένα πιθανό μελλοντικό αντικείμενο έρευνας σε συνεργασία με τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) της Ελλάδας.

Στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Κεφαλαίου 4, εμφανίστηκε ένα πιθανό πρόβλημα υπέρτασης στην γραμμή διανομής του κάθε Αιολικού Πάρκου. Με σκοπό την απόκτηση μιας γενικότερης εικόνας συμπεριφοράς της γραμμής διανομής, η αντιμετώπιση βασίστηκε στην κατάλληλη τροποποίηση των δεδομένων εισόδου του αλγορίθμου, θεωρώντας στην

ουσία ότι η χρονική στιγμή εμφάνισης και το μέγεθος της υπέρτασης ήταν γνωστά. Για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων, προτείνεται η δυνατότητα αντιμετώπισης της υπέρτασης μέσω του λογισμικού WPSTAB με χρήση συμβατικών μεθόδων. Μια τέτοια υλοποίηση θα καθιστούσε το WPSTAB ως ένα πιο ολοκληρωμένο λογισμικό προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Σημαντική, επίσης, επέκταση της παρούσας εργασίας, θα ήταν η χρήση ενός μεγαλύτερου μέρους της Διεσπαρμένης Παραγωγής (π.χ. συμπεριλαμβάνοντας φωτοβολταϊκά), ελαχιστοποιώντας έτσι τους περιορισμούς που επέβαλλαν τα 7 Αιολικά Πάρκα που χρησιμοποιήθηκαν. Ειδικά, σε ένα πιθανό συνδυασμό με την έννοια του ευφυούς δικτύου (smart grid), η Διεσπαρμένη Παραγωγή θα μπορούσε να αξιοποιηθεί πιο αποδοτικά. Οι αυτοματοποιημένες λειτουργίες που προσφέρει το ευφύες δίκτυο, θα επέτρεπαν καλύτερο έλεγχο στην ποσότητα άεργης υποστήριξης που απαιτείται από κάθε είδος Διεσπαρμένης Παραγωγής σε περιπτώσεις αστάθειας τάσης. Η αναβάθμιση του δικτύου σε «ευφύες» θα το μετέτρεπε από παθητικό σε ενεργητικό, με τους καταναλωτές και τους διεσπαρμένους παραγωγούς να συμμετέχουν ενεργά στην αγορά ενέργειας.



## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994
- [2] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς και Κ. Ντελκής, “Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2011
- [3] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2010
- [4] F. Coyle, “Introduction to Wind Power”, The English Press, 2011
- [5] Γ. Τσουράκης, “Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2010
- [6] E. Hau, “Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application”, Economics, Springer 2013
- [7] S. C. Savulescu, “Real-Time Stability in Power Systems”, Springer, 2014
- [8] ΑΔΜΗΕ, “Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023”, Αθήνα, 2014
- [9] C. D. Vournas, V. C. Nikolaidis, A. A. Tassoulis, “Post-mortem analysis and data validation in the wake of the 2004 Athens blackout”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, pp. 1331 - 1339, Aug. 2006
- [10] T. Van Cutsem and C. Vournas, “Voltage Stability of Electric Power Systems”, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [11] Κ. Βουρνάς, (Επιστημονικός Υπεύθυνος), “Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα”, Αθήνα, Απρίλιος 1999
- [12] T. Van Cutsem, J. Kabouris, G. Christoforidis, C. D. Vournas, “Application of real-time voltage security assessment to the Hellenic Interconnected System”, IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol.: 152, pp. 123- 131, Jan. 2005
- [13] Κ. Βουρνάς, (Επιστημονικός Υπεύθυνος), “Παρακολούθηση Ευστάθειας Τάσεως και Μέτρα Προστασίας στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα”, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012
- [14] C.W. Taylor, “Power System Voltage Stability”, EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994
- [15] T. Van Cutsem and C. Vournas, “Emergency Voltage Stability Controls: an Overview”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa FL, pp. 1-10, 24-28 June 2007

[16] C. Vournas and M. Karystianos, "Load Tap Changers in Emergency and Preventive Voltage Stability Control", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 1, pp. 492-498, February 2004

[17] Β. Χ. Νικολαΐδης, "Σχεδίαση Προστασίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης", ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος, 2007

[18] T. Van Cutsem, "Voltage Instability: Phenomena, countermeasures and analysis methods", Proceedings of the IEEE, Vol.: 88, pp. 208- 227, Feb. 2000

[19] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, 2000