



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## **Επίδραση Αιολικής Παραγωγής στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Τζούνας

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

Αθήνα, Νοέμβριος 2016





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

## Επίδραση Αιολικής Παραγωγής στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Τζούνας

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 5<sup>η</sup> Δεκεμβρίου 2016

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

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

.....  
Πάυλος Γεωργιλάκης,  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

.....  
Γεώργιος Τζούνας,

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

Copyright © Γεώργιος Τζούνας, 2016

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

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση αυτού του σύγχρονου και πολύ ενδιαφέροντος θέματος της επιστήμης του Ηλεκτρολόγου Μηχανικού, για την καθοδήγηση και την πολύπλευρη βοήθειά του, σε ολόκληρη την πορεία εκπόνησης της εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα, Θεόδωρο Σουξέ, για την άψογη συνεργασία, τον χρόνο που αφιέρωσε και το προσωπικό ενδιαφέρον που έδειξε όλο αυτό το διάστημα.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη διαρκή και πολύτιμη στήριξη των αποφάσεων και των επιλογών μου.



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά την επίδραση της μεταβλητότητας της ενεργού παραγωγής Αιολικών Πάρκων στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και κατά συνέπεια στο όριο ευστάθειας τάσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Το σύστημα δοκιμών που εξετάζεται αποτελείται από μία γραμμή μεταφοράς, στο μέσο της οποίας συνδέεται μέσω γραμμής διανομής Μέσης Τάσης η αιολική παραγωγή. Τα δεδομένα των γραμμών σύνδεσης προέρχονται από δύο πραγματικά Αιολικά Πάρκα που είναι συνδεδεμένα στο Ελληνικό σύστημα, στην περιοχή της Πελοποννήσου. Για την προσομοίωση της επίδρασης που έχει η μεταβλητότητα του ανέμου στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος, δύο συσχετισμένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου θεωρούνται ως είσοδος στις ανεμογεννήτριες. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των χρονοσειρών ενεργού παραγωγής, προσομοιώνει τη λειτουργία και τον έλεγχο μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών και συγκεκριμένα μιας ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Αναλύονται επίσης τα ακραία σενάρια της σταθερής χαμηλής (άπνοια) και υψηλής (ισχυρός άνεμος) ενεργού παραγωγής. Τα δυο Αιολικά Πάρκα εξετάζονται πρώτα χωριστά το καθένα και στη συνέχεια και τα δύο μαζί.

Η γραμμή σύνδεσης κάθε πάρκου αποτελείται από τον υποσταθμό Υψηλής/Μέσης Τάσης και περιλαμβάνει μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ. Στον ζυγό Μέσης Τάσης του υποσταθμού υπάρχουν αυτόματοι στατοί πυκνωτές αντιστάθμισης. Το Αιολικό Πάρκο και οι επί μέρους ελεγκτές των ανεμογεννητριών έχουν την δυνατότητα να ρυθμίζουν την έγχυση αέργου ισχύος στον ισοδύναμο ζυγό σύνδεσης του πάρκου.

Για την εκτίμηση της συνεισφοράς κάθε Αιολικού Πάρκου, υλοποιούνται τρεις διαφορετικές στρατηγικές έλεγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα: α) ρύθμιση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, β) ρύθμιση της τάσης του Αιολικού Πάρκου και γ) ευφυής έλεγχος με εντολή μέγιστης άεργης υποστήριξης σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης. Η τρίτη στρατηγική είναι μια προτεινόμενη μέθοδος που ενεργοποιείται από ένα διακριτό σήμα εκτάκτου ανάγκης, όταν η Υψηλή Τάση της γραμμής μεταφοράς παραβιάσει ένα κατώφλι ελάχιστης τάσης.

Τέλος, εξετάζεται το σύστημα δοκιμών και με τις δύο γραμμές διανομής των Αιολικών Πάρκων συνδεδεμένες. Η ταυτόχρονη συνεισφορά και των δύο πάρκων στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζει ενδιαφέρον, δεδομένου ότι η εντολή άεργης υποστήριξης και οι αυτόματοι έλεγχοι απαιτούν κάποιας μορφής συντονισμό, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις.

Για την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιείται το λογισμικό MATLAB και το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB.

### Λέξεις Κλειδιά:

Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, Αιολικά Πάρκα, Μεταβλητότητα του Ανέμου, Όριο Φόρτισης του Συστήματος, Έλεγχος Αέργου Ισχύος, Ευστάθεια Τάσης, Καμπύλες Ισχύος-Τάσεως.





## **Abstract**

This diploma thesis investigates the effect of Wind Farm active power variability on the maximum power transfer, and thus the voltage stability limit of a weak power transfer system.

The test system examined consists of a weak transmission corridor, in the middle of which wind generation is connected through a Medium Voltage distribution feeder. The detailed data for the feeders are taken from two Wind Farms connected to the Hellenic System, in the area of Peloponnese. To simulate the effect of wind variability in system loadability, two correlated wind speed time series are considered as input to the wind generators. The model used to extract the active power time series, simulates the operation and control of a variable speed wind generator, specifically of a doubly-fed asynchronous generator. The extreme scenarios of constant low and constant high wind power generation are also analyzed.

Each Wind Farm connection feeder consists of the HV/MV substation and includes power transformer equipped with LTC. Automatic switched capacitors are connected to the Medium Voltage bus of the substation. The Wind Farm and the wind generator controllers have the ability to regulate the reactive power provision to the wind farm equivalent connection bus.

To assess the contribution from the Wind Farm, three different control strategies of the Wind Farm converter are implemented: a) unity power factor control, b) constant Wind Farm voltage control and c) intelligent emergency control with maximum reactive support command. The third strategy is a proposed control, which is activated by an emergency discrete signal when the high transmission voltage falls below a threshold.

Finally, the simultaneous control with both Wind Farm feeders connected to the grid is examined. The simultaneous contribution of both Wind Farms to the maximum power transfer limit is of great interest, since the reactive support command and the automatic controls require some form of coordination, so as to avoid adverse interactions.

For the system simulation, the software packages used are ad-hoc code programmed in MATLAB and the long-term time scale simulation program WPSTAB.

### **Keywords:**

Maximum Power Transfer, Wind Farms, Wind Variability, Loadability Limits, Reactive Power Control, Voltage Stability, PV Curves.



## Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	21
1.1	Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	21
1.1.1	Σύστημα Παραγωγής.....	21
1.1.2	Σύστημα Μεταφοράς.....	21
1.1.3	Δίκτυο Διανομής .....	22
1.2	Αιολική Ενέργεια και Ηλεκτροπαραγωγή.....	22
1.2.1	Αιολική Παραγωγή και Ανάπτυξη στην Ελλάδα .....	22
1.2.2	Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών.....	23
1.3	Μηχανισμοί Ρύθμισης Αέργου Ισχύος.....	26
1.3.1	Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ.....	26
1.3.2	Μηχανισμοί Αέργου Αντιστάθμισης.....	26
1.4	Ευστάθεια Τάσης.....	27
1.4.1	Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης .....	27
1.4.2	Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας ΣΗΕ.....	28
1.4.3	Μέγιστη μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV.....	29
1.5	Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	34
1.6	Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης.....	35
1.6.1	Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	35
1.6.2	Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης.....	36
1.7	Οιονεί στατική προσέγγιση .....	37
1.8	Πρόγραμμα WPSTAB για την μακροπρόθεσμη ανάλυση ευστάθειας .....	38
1.8.1	Προσδιορισμός Σημείων Ισορροπίας .....	38
1.8.2	Προσομοίωση στη Μακροπρόθεσμη Χρονική Κλίμακα .....	39
1.9	Έλεγχος με Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος.....	40
1.9.1	Μετατροπείς Πηγής Τάσης .....	40
1.9.2	Μετατροπείς AC/DC/AC .....	41
1.9.3	Ρύθμιση Ενεργού και Αέργου Ισχύος.....	41
1.10	Αντικείμενο και δομή της εργασίας .....	42
2	Ανάλυση Αιολικού Πάρκου με Μεταβλητό Άνεμο .....	45
2.1	Μηχανικό Μοντέλο Ανεμοκινητήρα.....	45
2.2	Μοντέλο Γεννήτριας και Ρυθμιστών.....	47
2.2.1	Εξισώσεις Ασύγχρονης Μηχανής Διπλής Τροφοδότησης στην Οιονεί Ημιτονοειδή Κατάσταση .....	47

2.2.2	Διανυσματικός Έλεγχος Μετατροπέα Πλευράς Δρομέα και Δικτύου .....	49
2.2.3	Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Διπλής Τροφοδότησης .....	50
2.2.4	Μοντέλο Δύο Στρεφόμενων Μαζών .....	52
2.2.5	Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος .....	53
2.2.6	Ρυθμιστής γωνίας βήματος πτερυγίων και ταχύτητας.....	54
2.3	Εξεταζόμενες Χρονοσειρές Ενεργού Ισχύος.....	55
3	Δομή και Ανάλυση Συστήματος Δοκιμών και Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς.....	61
3.1	Δομή και Δεδομένα Συστήματος Δοκιμών .....	61
3.2	Παράσταση Διατάξεων Ρύθμισης Αέργου Ισχύος .....	63
3.2.1	Παράσταση ΣΑΤΥΦ .....	63
3.2.2	Παράσταση Αυτομάτων Μηχανισμών Ζεύξης-Απόζευξης Πυκνωτών .....	64
3.2.3	Παράσταση Μετατροπέα Ηλεκτρονικών Ισχύος .....	65
3.3	Επίλυση Αλγεβρικών Εξισώσεων .....	67
3.4	Προσομοίωση σε Matlab.....	69
3.5	Λειτουργία Χωρίς Αιολικό Πάρκο.....	70
3.6	Α/Π με Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος .....	71
3.6.1	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1 .....	72
3.6.2	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2 .....	77
4	Επίδραση Άεργης Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα.....	83
4.1	Επίδραση Ρύθμισης Τάσης Α/Π.....	83
4.1.1	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1 .....	83
4.1.2	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2 .....	87
4.2	Έλεγχος Μέγιστης Άεργης Υποστήριξης.....	91
4.2.1	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1 .....	91
4.2.2	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2 .....	95
4.2.3	Συγκριτικά Αποτελέσματα .....	100
4.3	Επίδραση Ενεργού Παραγωγής στην Υποστήριξη του Συστήματος Μεταφοράς.....	102
4.3.1	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1 .....	102
4.3.2	Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2 .....	106
4.3.3	Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας στο Α/Π #2 .....	108
5	Εφαρμογή με Πρόγραμμα Μακροπρόθεσμης Προσομοίωσης .....	111
5.1	Σύγκριση Αποκρίσεων .....	111
5.1.1	Ρύθμιση Τάσης .....	112
5.1.2	Περιοριστής Ρεύματος Μετατροπέα .....	112
5.1.3	Σύγκριση Αποτελεσμάτων .....	113
5.2	Επίδραση αναλογικού κέρδους του Αυτομάτου Ρυθμιστή Τάσης .....	117

5.2.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1 .....	117
5.2.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2 .....	119
5.3 Λειτουργία Συστήματος με δύο Α/Π.....	121
5.3.1 Λειτουργία με Ρύθμιση Τάσης Α/Π .....	122
5.3.2 Έλεγχος με Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη.....	125
6 Συμπεράσματα-Προοπτικές.....	131
6.1 Συμπεράσματα.....	131
6.2 Προοπτικές Περαιτέρω Έρευνας.....	133
Βιβλιογραφία.....	135



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 A/Γ σταθερών στροφών .....	24
Σχήμα 1.2 A/Γ μεταβλητής αντίστασης δρομέα .....	24
Σχήμα 1.3 A/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης .....	25
Σχήμα 1.4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα .....	26
Σχήμα 1.5 Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας.....	29
Σχήμα 1.6 Ακτινικό Δίκτυο .....	30
Σχήμα 1.7 Τάση συναρτήσει ενεργών και άεργων ισχύων φορτίου .....	31
Σχήμα 1.8 Καμπύλες PV .....	32
Σχήμα 1.9 Καμπύλη PV .....	32
Σχήμα 1.10 Μετατροπέας AC/DC/AC με σύνδεση back-to-back αντιστροφών.....	41
Σχήμα 2.1 Επίδραση Φίλτρου Χρονικής Σταθεράς $T=0,5s$ .....	45
Σχήμα 2.2 Καμπύλες $C_p$ - $\lambda$ , Μοντέλο Ανεμοκινητήρα .....	46
Σχήμα 2.3 Ανεμογεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης.....	47
Σχήμα 2.4 Μοντέλο Γεννήτριας Διπλής Τροφοδότησης με βρόχο κλειδώματος φάσης .....	50
Σχήμα 2.5 Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς.....	50
Σχήμα 2.6 Σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών .....	53
Σχήμα 2.7 Μοντέλο Συστήματος δύο μαζών .....	53
Σχήμα 2.8 Έλεγχος Αέργου Ισχύος.....	54
Σχήμα 2.9 Έλεγχος ταχύτητας και βήματος έλικας.....	55
Σχήμα 2.10 Καμπύλη ελέγχου στροφών .....	55
Σχήμα 2.11 Χρονοσειρά Ανέμου 1 .....	56
Σχήμα 2.12 Χρονοσειρά Ανέμου 2 .....	56
Σχήμα 2.13 Επιλεγμένο τμήμα Χρονοσειράς Ανέμου 1 .....	57
Σχήμα 2.14 Επιλεγμένο τμήμα Χρονοσειράς Ανέμου 2 .....	57
Σχήμα 2.15 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 1.....	58
Σχήμα 2.16 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 2.....	58
Σχήμα 3.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών .....	61
Σχήμα 3.2 Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος.....	66
Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο Thevenin Συστήματος στην πλευρά του Αιολικού Πάρκου.....	67
Σχήμα 3.4 Σύστημα δύο ζυγών.....	70
Σχήμα 3.5 Καμπύλη PV Φορτίου, A/Π #1 .....	71
Σχήμα 3.6 Καμπύλη PV Φορτίου, A/Π #2 .....	71
Σχήμα 3.7 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος A/Π #1 .....	72
Σχήμα 3.8 Υψηλή Τάση Y/Σ σύνδεσης (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, A/Π #1).....	73
Σχήμα 3.9 Τάσεις ζυγού MT Y/Σ και ζυγού σύνδεσης του A/Π #1 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος).....	74
Σχήμα 3.10 Λόγος Μετασηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, A/Π #1) .....	74
Σχήμα 3.11 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του A/Π #1 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος).....	75
Σχήμα 3.12 Άεργος Ισχύς Γραμμής MT (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, A/Π #1).....	76
Σχήμα 3.13 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, A/Π #1).....	76
Σχήμα 3.14 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 2.....	77
Σχήμα 3.15 Υψηλή Τάση Y/Σ σύνδεσης (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, A/Π #2).....	78

Σχήμα 3.16 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2) .....	78
Σχήμα 3.17 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2) 79	
Σχήμα 3.18 Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος) .....	79
Σχήμα 3.19 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #2 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος) .....	80
Σχήμα 3.20 Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2).....	80
Σχήμα 3.21 Άεργος Ισχύς Γραμμής ΥΤ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2) .....	81
Σχήμα 3.22 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2).....	81
Σχήμα 4.1 Τάσεις ζυγού ΜΤ Υ/Σ και ζυγού σύνδεσης του Α/Π #1 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης) .....	84
Σχήμα 4.2 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1) .....	85
Σχήμα 4.3 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1).....	85
Σχήμα 4.4 Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1).....	86
Σχήμα 4.5 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #1 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης).....	86
Σχήμα 4.6 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1).....	87
Σχήμα 4.7 Τάσεις ζυγού ΜΤ Υ/Σ και ζυγού σύνδεσης του Α/Π #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης) .....	88
Σχήμα 4.8 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2) .....	88
Σχήμα 4.9 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2).....	89
Σχήμα 4.10 Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2) .....	89
Σχήμα 4.11 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης).....	90
Σχήμα 4.12 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2).....	90
Σχήμα 4.13 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1) .....	91
Σχήμα 4.14 ΜΤ στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	92
Σχήμα 4.15 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	92
Σχήμα 4.16 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1).....	93
Σχήμα 4.17 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1) .....	93
Σχήμα 4.18 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1) .....	94
Σχήμα 4.19 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1 .....	95
Σχήμα 4.20 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1).....	95
Σχήμα 4.21 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2) .....	96
Σχήμα 4.22 Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	96
Σχήμα 4.23 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	97
Σχήμα 4.24 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2).....	97
Σχήμα 4.25 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2) .....	98
Σχήμα 4.26 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2).....	99
Σχήμα 4.27 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	99
Σχήμα 4.28 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2).....	100
Σχήμα 4.29 PV Καμπύλη για Έλεγχο Σταθερής Τάσης και Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1 .....	100
Σχήμα 4.30 PV Καμπύλη για Έλεγχο Σταθερής Τάσης και Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2 .....	101
Σχήμα 4.31 Χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή, Α/Π #1 .....	102
Σχήμα 4.32 Ισχύς Φορτίου για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1).....	103
Σχήμα 4.33 1η Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (μέγιστη αιολική παραγωγή στα 1900s), Α/Π #1 .....	104



Σχήμα 4.34 2η Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (μέγιστη αιολική παραγωγή στα 2583s), A/Π #1 .....	105
Σχήμα 4.35 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένων χρονοσειρών (με μέγιστη αιολική παραγωγή), A/Π #1 .....	105
Σχήμα 4.36 Χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή, A/Π #2 .....	106
Σχήμα 4.37 Ισχύς Φορτίου για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #2).....	107
Σχήμα 4.38 Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (με παραγωγή 1αμ στα 2650s), A/Π #2... ..	108
Σχήμα 4.39 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένης χρονοσειράς (με μέγιστη αιολική παραγωγή), A/Π #2 .....	109
Σχήμα 4.40 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένης χρονοσειράς (με 0,85αμ αιολική παραγωγή), A/Π #2 .....	109
Σχήμα 5.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών .....	111
Σχήμα 5.2 Αναλογικός Ρυθμιστής Τάσης .....	112
Σχήμα 5.3 Τάση Ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, A/Π #1) .....	113
Σχήμα 5.4 Τάση Ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #1) .....	114
Σχήμα 5.5 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, A/Π #1, WPSTAB-Matlab) .....	115
Σχήμα 5.6 PV Καμπύλη (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, A/Π #2, WPSTAB-Matlab).....	115
Σχήμα 5.7 Ενεργός Τιμή Ρεύματος A/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	116
Σχήμα 5.8 Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του A/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	116
Σχήμα 5.9 Τάση στο ζυγό σύνδεσης του A/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	117
Σχήμα 5.10 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς A/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	118
Σχήμα 5.11 PV Καμπύλη (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #1) .....	118
Σχήμα 5.12 Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του A/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)....	119
Σχήμα 5.13 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς A/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη) .....	120
Σχήμα 5.14 PV Καμπύλη (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #2) .....	120
Σχήμα 5.15 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών με δύο Αιολικά Πάρκα.....	121
Σχήμα 5.16 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς A/Π #1 και #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης).....	122
Σχήμα 5.17 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Υ/Σ A/Π #1) .....	123
Σχήμα 5.18 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Υ/Σ A/Π #2) .....	123
Σχήμα 5.19 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης).....	124
Σχήμα 5.20 PV Καμπύλες (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης) .....	125
Σχήμα 5.21 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #2) .....	126
Σχήμα 5.22 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, A/Π #1) .....	126
Σχήμα 5.23 ΜΤ στο ζυγό σύνδεσης των A/Π #1 και #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	127
Σχήμα 5.24 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς A/Π #1 και #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	128
Σχήμα 5.25 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	128
Σχήμα 5.26 PV Καμπύλες (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη).....	129



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου .....	51
Πίνακας 3.1 Δεδομένα Γραμμών Σύνδεσης Α/Π #1 και #2 (αμ σε $S_B=100\text{MVA}$ ).....	63
Πίνακας 3.2 Δεδομένα Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου (αμ σε $S_B=100\text{MVA}$ ) .....	63
Πίνακας 3.3 Αρχικοποίηση Δικτύου (αμ σε $S_B=100\text{MVA}$ ) .....	69
Πίνακας 4.1 ΜΜΙ με Μεταβλητή Ενεργό Ισχύ (MW).....	101
Πίνακας 4.2 ΜΜΙ (MW) για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή ενεργό παραγωγή, Α/Π #1 ....	103
Πίνακας 4.3 ΜΜΙ (MW) για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή ενεργό παραγωγή, Α/Π #2 ....	107
Πίνακας 5.1 Αντιδράσεις Δικτύου Μεταφοράς (αμ για $S_B=100\text{MVA}$ ) .....	121
Πίνακας 5.2 ΜΜΙ (MW) για σταθερή χαμηλή αιολική παραγωγή.....	125



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

---

## Εισαγωγή

### 1.1 Δομή Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος: την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή. Η ηλεκτρική ενέργεια, από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι και το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μια συνεχή ροή, και επειδή δεν είναι εύκολα και οικονομικά αποθηκεύσιμη, πρέπει να παράγεται τη στιγμή ακριβώς που καταναλώνεται [1].

#### 1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής. Αναφέρεται στη μετατροπή πρωτογενούς ενέργειας (π.χ. θερμική, υδραυλική, αιολική) αρχικά σε κινητική μέσω κινητήριων μηχανών (π.χ. στροβίλων) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω σύγχρονων γεννητριών. Στο σύστημα παραγωγής συμπεριλαμβάνονται και οι υποσταθμοί ανύψωσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

Το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται στον καταναλωτή, προέρχεται από την θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων, από τη μηχανική ενέργεια των υδάτινων ροών και υδατοπτώσεων, από την πυρηνική σχάση και τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερο από εναλλακτικές πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, τα θαλάσσια ρεύματα.

#### 1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης, γίνεται με τις γραμμές υψηλής (ΥΤ) και υπερυψηλής (ΥΥΤ) τάσης. Αυτές μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κεντρικά σημεία του δικτύου, τους υποσταθμούς, από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής μέσης τάσης (ΜΤ). Επίσης, τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, οι οποίοι συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής σε μέση τάση (ΥΤ/ΜΤ) και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης (ΧΤ), και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 10MW. Το σύστημα μεταφοράς συμπεριλαμβάνει και τους υποσταθμούς ζεύξης των διαφορετικών δικτύων των γραμμών υψηλής τάσης.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τιμές τάσης μεταφοράς, αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταφοράς στα ΣΗΕ έχουν σήμερα τιμές 66kV, 110kV, 132kV, 138kV, 150kV, 220kV, 275kV, 345kV, 400kV, 500kV και 750kV. Η διάταξη των δικτύων μεταφοράς είναι βροχοειδής, σε αντίθεση με την ακτινική δομή των δικτύων διανομής. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system).

### **1.1.3 Δίκτυο Διανομής**

Το δίκτυο διανομής είναι υπεύθυνο για τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των καταναλωτών. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ. Στη συνέχεια, μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας, τροφοδοτούνται οι πελάτες μέσης τάσης και οι υποσταθμοί ΜΤ/ΧΤ. Από τους υποσταθμούς ΜΤ/ΧΤ, η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει τελικά στο σύνολο των καταναλωτών.

Τα δίκτυα διανομής, ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν, μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια. Λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας [2].

Τα τελευταία χρόνια, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και η παράλληλη τεχνολογική εξέλιξη των υλικών οδήγησαν στη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων, με αποτέλεσμα δίκτυα που παλιότερα έπαιζαν το ρόλο μεταφοράς να χαρακτηρίζονται ως δίκτυα υπομεταφοράς και να αποτελούν μέρος της διανομής.

## **1.2 Αιολική Ενέργεια και Ηλεκτροπαραγωγή**

### **1.2.1 Αιολική Παραγωγή και Ανάπτυξη στην Ελλάδα**

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων από τη μία και η σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων από την άλλη, έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μία απ' τις σπουδαιότερες εναλλακτικές μορφές ενέργειας, η οποία έχει διεισδύσει στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, φτάνοντας σε ποσοστά μέχρι και 40% της συνολικής ζήτησης του φορτίου (π.χ. στη Δανία), είναι η αιολική ενέργεια.

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται από τα Αιολικά Πάρκα. Τα Αιολικά Πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο ΜΤ. Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) μετατρέπουν την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική. Η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του ανέμου και είναι κατά προσέγγιση ανάλογη του κύβου της ταχύτητας [3]. Αιολικά Πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ πάνω από 15MW, συνδέονται συνήθως σε υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ μέσω γραμμών διανομής μέσης τάσης. Πολλές φορές, τα Αιολικά Πάρκα εγκαθίστανται για ενεργειακή υποστήριξη σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν ντιζελοληλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου, ενώ σε σπανιότερες περιπτώσεις είναι υπεύθυνα για την αποκλειστική τροφοδότηση απομονωμένων περιοχών [4].

Στην Ελλάδα, παρά το γεγονός ότι υπάρχει ένα υψηλό αιολικό δυναμικό, η πραγματική διείσδυση αιολικής ενέργειας δεν είναι ανάλογα σημαντική. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), το 2008 μόνο το 3,7% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας καλύφθηκε από αιολική παραγωγή. Μέχρι το 2013, στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα είχαν εγκατασταθεί ανεμογεννήτριες ισχύος 1495MW, όταν η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ήταν περίπου 17,4GW [5].

Οι περιοχές που έχουν προσελκύσει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για εγκατάσταση αιολικής παραγωγής, με βάση τις αιτήσεις των ανεξάρτητων παραγωγών στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (2009), είναι η περιοχή της Εύβοιας, η Ανατολική Πελοπόννησος και η περιοχή της Θράκης. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν συγκεκριμένα σχέδια για ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι περιορισμοί και να εγκατασταθούν τα μελλοντικά Αιολικά Πάρκα, περιβαλλοντικοί, νομικοί και οικονομικοί λόγοι οδηγούν σε σημαντικές καθυστερήσεις. Επομένως, αν και πάνω από 7000MW Αιολικών Πάρκων έχουν αδειοδοτηθεί απ'τη Ρυθμιστική Αρχή (2009), η πραγματική διείσδυση παραμένει περιορισμένη. Μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης παρατηρούνται κυρίως σε νησιωτικές περιοχές της χώρας, οι οποίες δεν είναι διασυνδεδεμένες με το ηπειρωτικό σύστημα. Για παράδειγμα στην Κρήτη, το μεγαλύτερο αυτόνομο σύστημα στην Ελλάδα, η παραγωγή Αιολικών Πάρκων καλύπτει το 20% περίπου της ετήσιας ζήτησης ενέργειας [4].

Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα της αιολικής ενέργειας είναι ότι δεν κατανέμεται ανάλογα με τη ζήτηση. Αυτό σημαίνει ότι, 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 και κατά συνέπεια η απόρριψη της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η χρήση μηχανισμών αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζονταν καθαρά ως αρνητικά φορτία, καθώς το μικρό ποσοστό συμμετοχής τους στη 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 επίδρασή της στη λειτουργία αλλά και στο σχεδιασμό των ΣΗΕ. Ξεκίνησε επομένως μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, των κανονισμών για τα Αιολικά Πάρκα που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών [6].

### **1.2.2 Τεχνολογίες Ανεμογεννητριών**

Ανάλογα με τη μηχανολογική τους διαμόρφωση, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις Α/Γ οριζοντίου άξονα (η πιο συνήθης περίπτωση) και τις Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα έχει ως εξής: Ο ανεμοκινητήρας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική, η οποία μεταφέρεται, μέσω του άξονα και πιθανόν του κιβωτίου ταχυτήτων στον άξονα της γεννήτριας που βρίσκεται στον θάλαμο μηχανισμών στην κορυφή του πύργου. Ο άξονας περιστροφής του ανεμοκινητήρα διατηρείται παράλληλος ως προς το πεδίο ροής του ανέμου με τη βοήθεια του συστήματος προσανατολισμού (yaw system) [7].

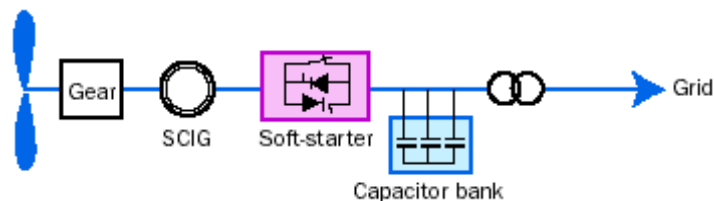
Με βάση τη συμπεριφορά τους σε διακυμάνσεις του ανέμου, οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών διαθέτουν ρυθμιστή που επιτρέπει τη μεταβολή των στροφών του δρομέα ανάλογα με την ταχύτητα του

άνεμου, προκειμένου να απορροφούν διαρκώς τη μέγιστη δυνατή ενέργεια από τον άνεμο. Επομένως, αυτή η αυξημένη ικανότητα των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών να αξιοποιούν βέλτιστα την αιολική ενέργεια, έχει οδηγήσει στην επικράτηση τους έναντι των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών. 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 Α/Γ με βάση την τεχνολογία που χρησιμοποιούν γίνεται παρακάτω:

*Τεχνολογία Α: Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών*

Οι ανεμογεννήτριες τεχνολογίας Α παρουσιάστηκαν στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του '80. Πρόκειται για την προηγούμενη γενιά ανεμογεννητριών, η οποία χαρακτηρίζεται από απλότητα και στιβαρότητα. Ο δρομέας κινείται από την έλικα μέσω κιβωτίου ταχυτήτων, ενώ ο στάτης είναι απευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο. Χρησιμοποιείται απλή μηχανή επαγωγής, συνήθως τύπου κλωβού (squirrel cage induction generator - SCIG), ως γεννήτρια απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.

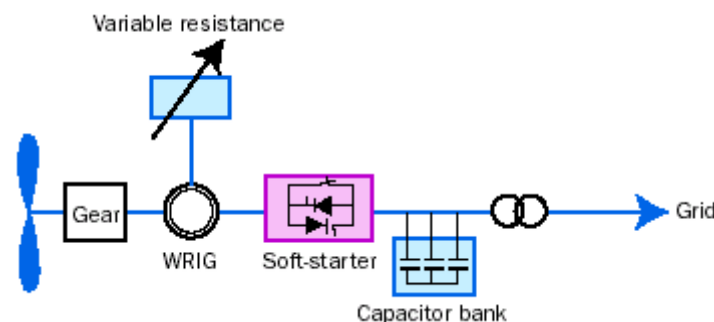
Οι ανεμογεννήτριες αυτές θεωρούνται σταθερών στροφών επειδή η ταχύτητα περιστροφής των μηχανών επαγωγής, αν και μεταβάλλεται με το σημείο λειτουργίας, είναι πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα (η ολίσθηση είναι μόλις 1-2%). Για τις ανεμογεννήτριες τεχνολογίας Α λαμβάνεται υπόψη η προστασία υπερτάχυνσης (overspeed protection) που αποσυνδέει την ανεμογεννήτρια όταν η ολίσθησή της ξεπεράσει το 5%.



**Σχήμα 1. 1** Α/Γ σταθερών στροφών

*Τεχνολογία Β: Ανεμογεννήτριες μεταβλητής αντίστασης δρομέα*

Σε αυτό το είδος ανεμογεννήτριας, η αντίσταση του δρομέα μπορεί να μεταβληθεί με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος. Με αυτό τον τρόπο, η ταχύτητα του δρομέα μπορεί να πάρει τιμές μέχρι και  $\pm 10\%$  της σύγχρονης.

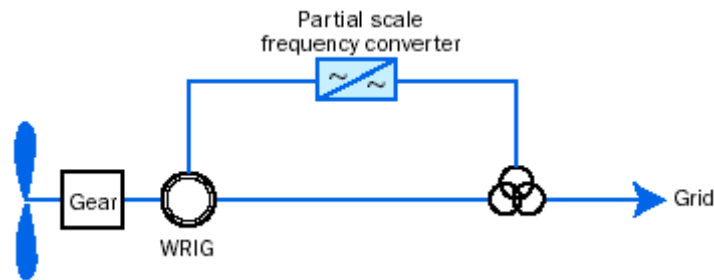


**Σχήμα 1. 2** Α/Γ μεταβλητής αντίστασης δρομέα



### Τεχνολογία Γ: Ασύγχρονες ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης

Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη διάταξη ηλεκτρομηχανικής μετατροπής που χρησιμοποιείται σήμερα στις ανεμογεννήτριες. Στις ανεμογεννήτριες τεχνολογίας Γ, η μηχανή επαγωγής είναι τυλιγμένου δρομέα με το στάτη απευθείας συνδεδεμένο στο δίκτυο, ενώ το τριφασικό τύλιγμα του δρομέα συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος AC/DC/AC, ο οποίος θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 1.3 Α/Γ μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Το 30-40% της ισχύος περνάει μέσα από το μετατροπέα και το υπόλοιπο διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο. Καθώς μόνο ένα μέρος της ισχύος περνά από το μετατροπέα, αυτός είναι μικρότερης ονομαστικής ισχύος, άρα και πιο οικονομικός σε σχέση με έναν πλήρη μετατροπέα.

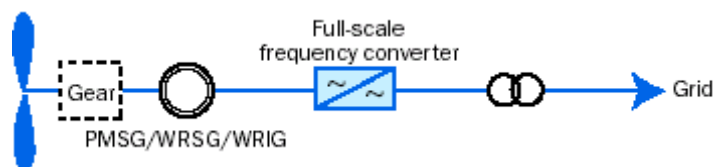
Με τον έλεγχο του μετατροπέα η ταχύτητα της γεννήτριας μπορεί να ποικίλει έως και 40% από τη σύγχρονη ταχύτητα [8]. Υπάρχει δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και αέργου ισχύος. Επομένως, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, σε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης, μπορεί να επιλεγεί η ταχύτητα που δίνει τη μέγιστη απολαβή ισχύος (maximum power tracking control). Οι ανεμογεννήτριες τεχνολογίας Γ έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν είτε το συντελεστή ισχύος είτε την τάση στους ακροδέκτες τους ή στο ζυγό σύνδεσης τους με το σύστημα, μέσω της διάταξης ηλεκτρονικών ισχύος που συνδέει το δρομέα της με το δίκτυο.

Όπως και στις απλές γεννήτριες επαγωγής χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους χρησιμοποιούν έλεγχο της γωνίας βήματος των περυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.

### Τεχνολογία Δ: Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα

Μια ανεμογεννήτρια τεχνολογίας Δ, μπορεί να είναι εφοδιασμένη με:

- Σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων,
  - με τύλιγμα πεδίου (wound rotor synchronous generator - WRSG).
  - μονίμων μαγνητών (permanent magnet synchronous generator - PMSG).
- Μηχανή επαγωγής,
  - τυλιγμένου δρομέα (wound rotor induction generator WRIG).
  - τύπου κλωβού (squirrel cage induction generator - SCIG).



Σχήμα 1. 4 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα

Ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα πλήρους ισχύος. Όντας τελείως απομονωμένη από το δίκτυο, η ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργεί σε ένα πολύ μεγάλο εύρος ταχυτήτων. Όπως και στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας τεχνολογίας Γ, υπάρχει επιλογή μεταξύ λειτουργίας σταθερού συντελεστή ισχύος ή ελέγχου της τάσης. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους χρησιμοποιούν επίσης έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.

### 1.3 Μηχανισμοί Ρύθμισης Αέργου Ισχύος

#### 1.3.1 Μετασηματιστές με ΣΑΤΥΦ

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.1, στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφορα επίπεδα τάσης τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια μετασηματιστών και αυτομετασηματιστών ισχύος. Οι μεγάλοι μετασηματιστές ισχύος ΥΤ/ΜΤ είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασηματισμού χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή της λήψεως στα τυλίγματα του μετασηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ζυγούς του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός του γίνεται αυτόματα, μέσω ηλεκτρονόμου που συγκρίνει μία προκαθορισμένη τάση αναφοράς με την τάση στο δευτερεύον. Αν διαπιστωθεί διαφορά, δίνεται εντολή ανύψωσης ή μείωσης της τάσης στο σύστημα αλλαγής. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασηματιστή, καθώς σε αυτήν την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές, ενώ υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δίνοντας τη δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Οι μετασηματιστές με ΣΑΤΥΦ ελέγχουν την τάση στην πλευρά διανομής. Τα ΣΑΤΥΦ είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασηματισμού τους κατά ένα βήμα τη φορά.

#### 1.3.2 Μηχανισμοί Αέργου Αντιστάθμισης

Το μεγαλύτερο ποσοστό των φορτίων τα οποία τροφοδοτούνται από ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι επαγωγικού χαρακτήρα και συνεπώς απαιτεί τη χορήγηση αέργου ισχύος από το σύστημα. Επιπλέον, πρόσθετη άεργος ισχύς καταναλώνεται στις απώλειες αέργου ισχύος του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Μια πολύ σημαντική συνέπεια από την κυκλοφορία αέργου ισχύος στο σύστημα είναι η πτώση τάσης από την παραγωγή προς το φορτίο [2].

Οι εγκάρσιοι πυκνωτές αντιστάθμισης παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των τάσεων του δικτύου σε ικανοποιητικά επίπεδα, εξαιτίας της ισχυρής εξάρτησης της τάσης από την παροχή αέργου ισχύος.

Οι στατοί εγκάρσιοι πυκνωτές, χρησιμοποιούνται ευρέως ως πηγές αέργου ισχύος, λόγω του χαμηλού κόστους και των μικρών απωλειών που παρουσιάζουν. Η αέργος ισχύς που παρέχουν δεν μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά μόνο κατά βήματα, ενώ εξαρτάται από το τετράγωνο της τάσης του ζυγού στο οποίο συνδέονται. Οι μηχανισμοί των στατών πυκνωτών είναι πολύ σημαντικοί στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος στο σύστημα και διατηρούν τα επίπεδα των τάσεων και τις ροές αέργου ισχύος σε επιθυμητά επίπεδα, παίζοντας έτσι ένα σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση τάσεως.

Μέχρι και πριν από λίγα χρόνια αυτές οι συσκευές ελέγχονταν μηχανικά, γι' αυτό και ήταν σχετικά αργές. Είναι πολύ χρήσιμες στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του ΣΗΕ, αλλά από πλευράς δυναμικού ελέγχου είναι πολύ αργές προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν τις μεταβατικές ταλαντώσεις. Η πρόοδος που συντελέστηκε στα ηλεκτρονικά ισχύος οδήγησε στην ανάπτυξη των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems – FACTS). Τα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς είναι συστήματα μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος που ενσωματώνουν ελεγκτές ηλεκτρονικών ισχύος και άλλους στατικούς ελεγκτές, προκειμένου να ενισχύσουν τη δυνατότητα ελέγχου και να αυξήσουν την ικανότητα μεταφοράς ισχύος [18].

Στα ευέλικτα συστήματα μεταφοράς που ελέγχονται από μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, ανήκει ο ελεγχόμενος σύγχρονος αντισταθμιστής (STATic synchronous COMpensator – STATCOM). Ο μετατροπέας STATCOM έχει τη δυνατότητα να εξασφαλίζει χωρητική και επαγωγική αντιστάθμιση, να ελέγχει το ρεύμα εξόδου στην περιοχή λειτουργίας του και να παρέχει πλήρως χωρητικό ρεύμα υπό οποιαδήποτε τάση δικτύου (πρακτικά και μηδενική). Η μεταβολή της αέργου ισχύος από τον STATCOM, βασίζεται στη λειτουργία του μετατροπέα πηγής τάσης (Voltage Source Converter – VSC), ο οποίος παρουσιάζεται σε επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου.

## **1.4 Ευστάθεια Τάσης**

### **1.4.1 Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης**

Η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να διατηρεί σταθερές αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του, τόσο κάτω από ονομαστική κατάσταση λειτουργίας, όσο και έπειτα από μια διαταραχή. Επίσης, για το πρόβλημα της αστάθειας τάσης έχει προταθεί ο παρακάτω ορισμός, ο οποίος περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου [9]:

*Η αστάθεια τάσης προκαλείται από την 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 στην ισχύ που μπορούν να διακινήσουν. Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, το όριο αυτό καθορίζει κατά πόσο ένα σύστημα κινδυνεύει να βρεθεί σε κατάσταση αστάθειας τάσης. Όταν το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παραβιαστεί, ο οποιοσδήποτε μηχανισμός αποκατάστασης του φορτίου αντί να αυξήσει την καταναλισκόμενη ισχύ, τείνει να τη μειώσει. Στο φαινόμενο αυτό βρίσκεται η ουσία της αστάθειας τάσης.

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων είναι ένα από τα κύρια αίτια πρόκλησης της αστάθειας τάσης. Μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητά τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεων του συστήματος, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ, οι κινητήρες επαγωγής και τα θερμοστατικά φορτία.

Ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης, εμφανίζεται με τη μορφή της συνεχούς μείωσης (σπανιότερα ανόδου) των τάσεων σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Η επιτάχυνση αυτού του φαινομένου προκαλεί τελικά απότομες βυθίσεις στις τάσεις, οδηγώντας στο φαινόμενο που ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η έννοια της κατάρρευσης έχει οριστεί ως εξής [9]:

*Με τον όρο κατάρρευση εννοείται μια απότομη καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται συνήθως σε μία αστάθεια που εξελίσσεται σε ταχύτερη χρονική κλίμακα από την αρχικά θεωρούμενη.*

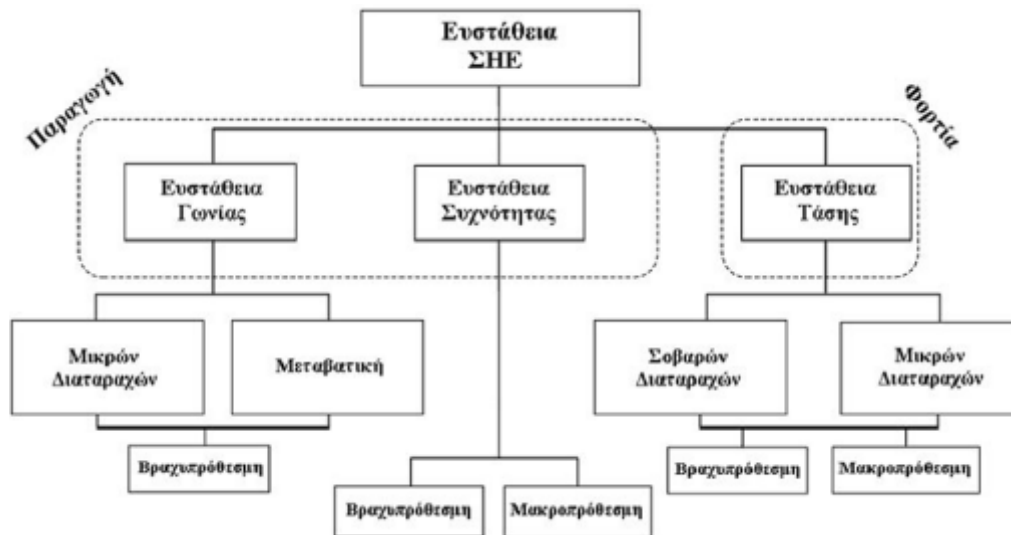
Η αστάθεια τάσης ξεκινά ως ένα τοπικό φαινόμενο. Ωστόσο, οι συνέπειές της μπορεί να έχουν ένα πιο διαδεδομένο αντίκτυπο. Από την άλλη, η κατάρρευση τάσης είναι πιο περίπλοκη από μία απλή αστάθεια τάσης και συνήθως είναι το αποτέλεσμα μιας αλληλουχίας γεγονότων που συνοδεύουν την αστάθεια τάσης και οδηγούν ένα σημαντικό κομμάτι του ΣΗΕ να λειτουργεί με χαμηλές τάσεις. Η πιθανή αστάθεια τάσης μπορεί εύκολα να ευνοηθεί από τα χαρακτηριστικά και τις συνθήκες του συστήματος, με τα πιο σημαντικά να είναι [10]:

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

#### **1.4.2 Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας ΣΗΕ**

Ενώ η ευστάθεια ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να αποτελεί ενιαίο πρόβλημα, θα ήταν δύσκολο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί με έναν ενιαίο τρόπο. Η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας σε διάφορες μορφές είναι αναγκαία, αφού η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που ο καθένας επιδρά με διαφορετικό τρόπο στο σύστημα και απαιτεί διαφορετική αντιμετώπιση. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχ. 1.5, ενώ ο διαχωρισμός τους γίνεται σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια [10]:

- 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.



Σχήμα 1. 5 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* [10]. 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 διαφόρων συνεχών ή διακριτών διατάξεων, όπως είναι τα ΣΑΤΥΦ. 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 [10].

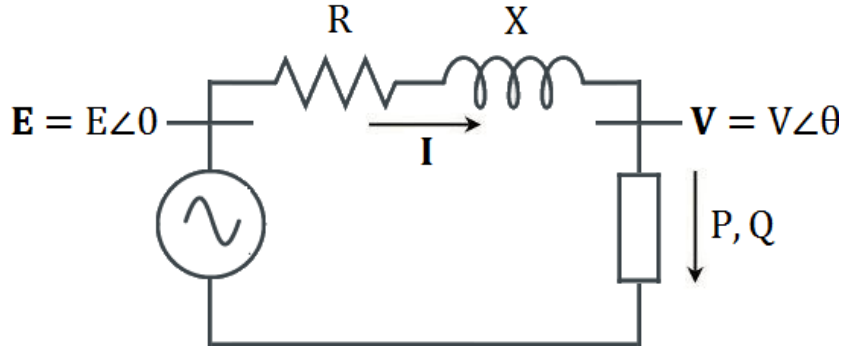
Η *ευστάθεια τάσης μικρών διαταραχών* αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να διατηρεί το επίπεδο τάσης σε συνθήκες μικρών διαταραχών, όπως σταδιακή αύξηση του φορτίου. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από το καταναλισκόμενο φορτίο και τις αλληλεπιδράσεις διατάξεων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η 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 [10].

### 1.4.3 Μέγιστη μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV

Όπως έχει αναφερθεί, ένας βασικός παράγοντας στην εμφάνιση αστάθειας τάσης αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [9]. Το σύστημα έχει την ικανότητα να παρέχει μια μέγιστη ποσότητα ισχύος από το ζυγό A στο ζυγό B ή από μια περιοχή σε μια άλλη του δικτύου, 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 ενός ακτινικού δικτύου (Σχ. 1.6), το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και ένα φορτίο.

Για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι η μεταφορά της ισχύος στο δίκτυο γίνεται χωρίς ωμικές απώλειες ( $R=0$ ) μέσω της αντίδρασης  $X$ . Επίσης, θεωρείται ότι η πηγή τάσης παρέχει σταθερή τάση  $E$ . Το μέτρο και η γωνία της τάσης του φορτίου είναι  $V$  και  $\theta$  αντίστοιχα.



Σχήμα 1. 6 Ακτινικό Δίκτυο

Σύμφωνα με το Σχ. 1.6 είναι:

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

όπου με έντονα στοιχεία συμβολίζονται οι φασιθέτες. Η φαινόμενη ισχύς που απορροφάται από το φορτίο είναι:

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

το οποίο αναλύεται ως

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

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

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) λαμβάνεται η διτετράγωνη εξίσωση:

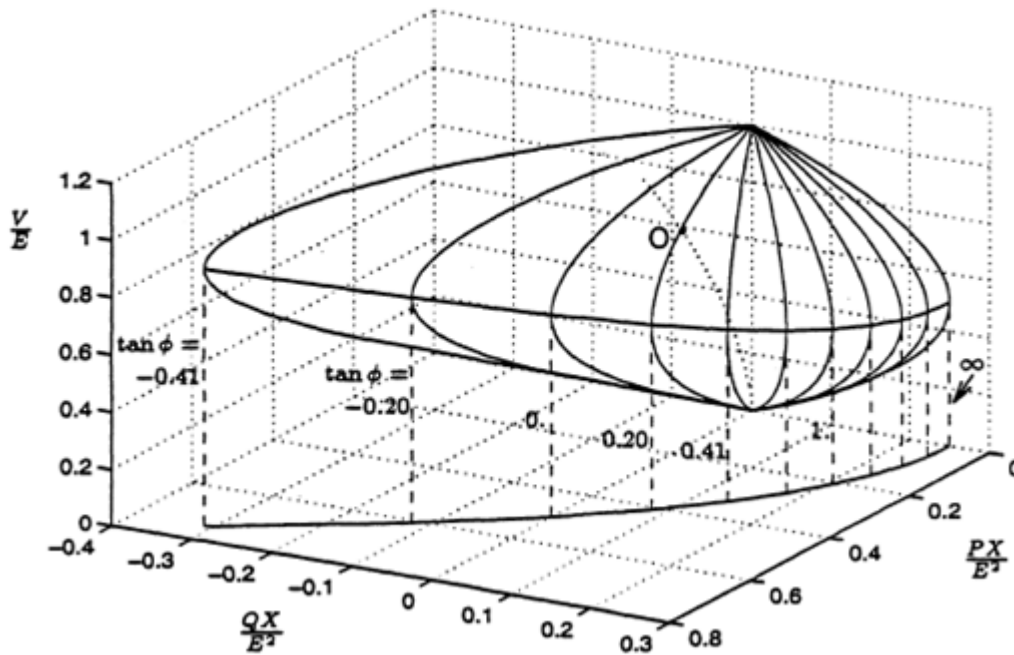
$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.5)$$

Για την ύπαρξη λύσης της εξίσωσης (1.5) πρέπει η διακρίνουσα να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός:

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

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

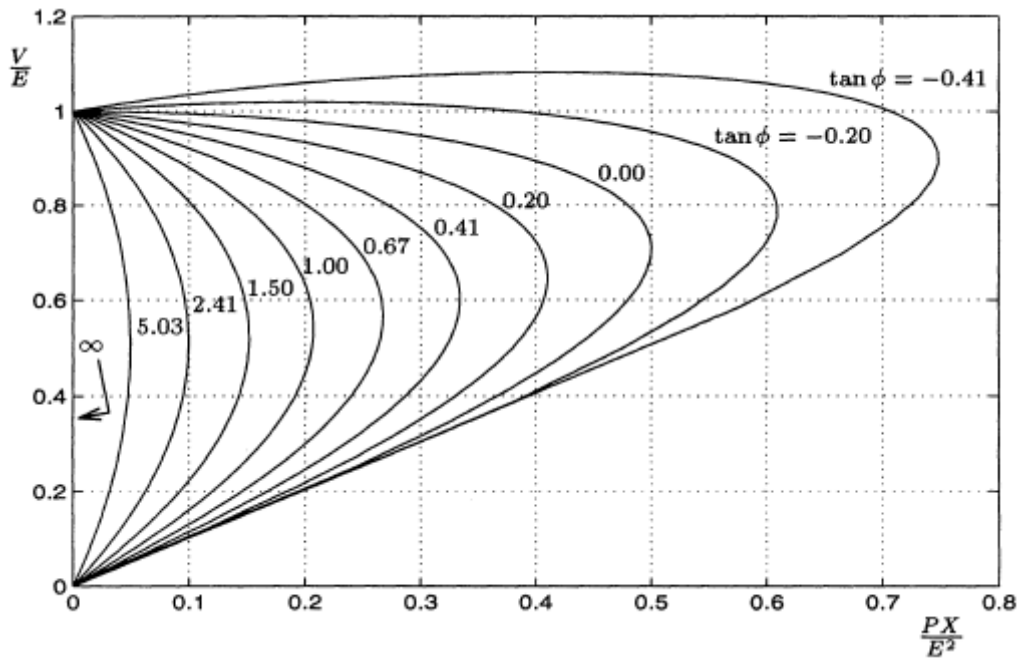
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q}} \quad (1.7)$$



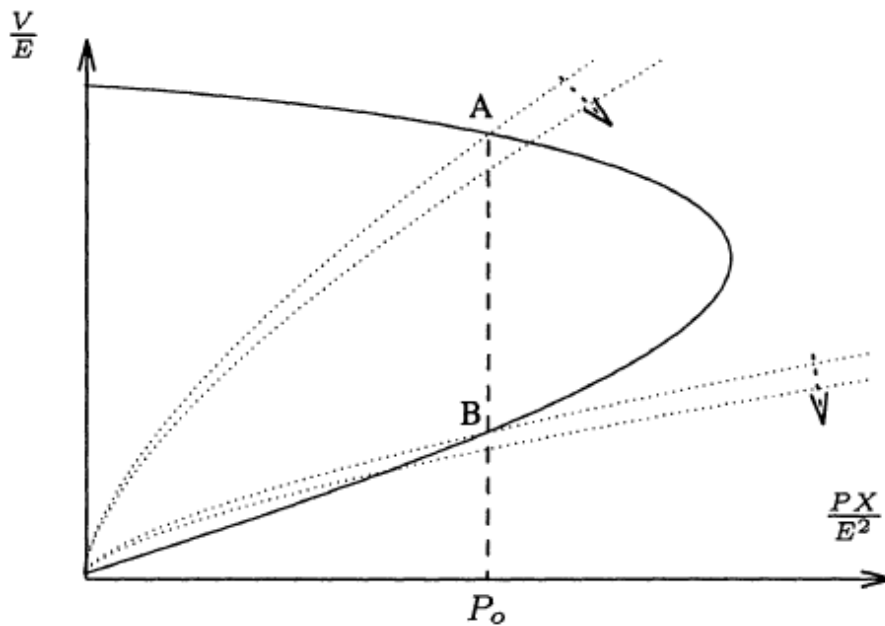
Σχήμα 1.7 Τάση συναρτήσει ενεργών και άεργων ισχύων φορτίου

Στον τρισδιάστατο χώρο  $(P, Q, V)$ , η εξίσωση (1.7) ορίζει την επιφάνεια δύο διαστάσεων που φαίνεται στο Σχ. 1.7. 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 ίδιες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Οι «μεσημβρινοί» του Σχ. 1.7 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  $V$  συναρτήσει της ενεργού ισχύος  $P$ , με μεταβλητό συντελεστή ισχύος. Οι καμπύλες αυτές, οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 1.8, ονομάζονται *καμπύλες ισχύος-τάσης* (καμπύλες  $PV$ ) και παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατανόηση και την ανάλυση της αστάθειας τάσης.



Σχήμα 1. 8 Καμπύλες PV



Σχήμα 1. 9 Καμπύλη PV

Παρατηρώντας τις καμπύλες PV του Σχ. 1.8, συμπεραίνονται τα εξής [9]:

- 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 την τάση της γεννήτριας  $E$ . Η δεύτερη δεν είναι αποδεκτή για κατάσταση μόνιμης λειτουργίας, διότι αντιστοιχεί σε ασταθές σημείο λειτουργίας. Αυτό γίνεται καλύτερα κατανοητό από το Σχ. 1.9. Στο σχήμα αυτό, οι διακεκομμένες καμπύλες είναι καμπύλες ζήτησης ενεργού ισχύος του φορτίου συναρτήσεως της τάσης. Τα σημεία A και B αποτελούν



δύο σημεία λειτουργίας τα οποία χαρακτηρίζονται από την ίδια ισχύ  $P_0$ , αλλά από διαφορετική ζήτηση. Θεωρείται μια μικρή αύξηση της ζήτησης του φορτίου. Στην περίπτωση που το σύστημα βρίσκεται στο σημείο A, η αυξημένη ζήτηση προκαλεί μια πτώση τάσης και οδηγεί σε υψηλότερη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Εμφανίζει δηλαδή, την αναμενόμενη απόκριση της λειτουργίας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο B, παρόλα αυτά, η μεγαλύτερη ζήτηση συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση της τάσης και της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου. Αν λοιπόν υποθεθεί ότι υπάρχει ένας μηχανισμός που τείνει να αυξήσει την ισχύ του φορτίου προκειμένου να επιτύχει μια συγκεκριμένη κατανάλωση, το σημείο B καθίσταται ασταθές.

- Όσο αυξάνεται η αντιστάθμιση του φορτίου (που αντιστοιχεί σε μικρότερα  $\tan\varphi$ ), 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 τάσης και κοντά στην ονομαστική, δυσκολεύοντας έτσι την ανίχνευση της αστάθειας τάσης.
- Για υπέρ-αντισταθμισμένα φορτία ( $\tan\varphi < 0$ ), ένα τμήμα της καμπύλης  $PV$  δείχνει ότι η τάση αυξάνει με την αύξηση της ισχύος φορτίου. Αυτό συμβαίνει διότι υπό αρνητικό  $\tan\varphi$ , 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  $\tan\varphi$ , τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της  $PV$  καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

Αν θεωρηθεί ότι το φορτίο συμπεριφέρεται ως σύνθετη αγωγιμότητα και ότι μεταβάλλεται με σταθερό συντελεστή ισχύος ( $\cos\varphi = \text{σταθ}$ ), η αποδιδόμενη ενεργός ισχύς στο φορτίο δίνεται από τη σχέση:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l E^2}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan\varphi)^2} \quad (1.8)$$

όπου  $Z_l = R_l + jX_l = R_l(1 + j\tan\varphi)$  είναι η σύνθετη αντίσταση του φορτίου.

Η συνθήκη ακροτάτου της (1.8) είναι:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0$$

Και μετά από υπολογισμούς:

$$R_l^2(1 + \tan^2 \varphi) = R^2 + X^2$$

Η παραπάνω σχέση είναι ισοδύναμη με:

$$|Z_l| = |Z| \quad (1.9)$$

Η δεύτερη παράγωγος της (1.5) δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_l^2} = -2R_l(1 + \tan^2 \varphi)$$

η οποία είναι πάντα αρνητική, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η ενεργός ισχύς παρουσιάζει μέγιστο στο σημείο μηδενισμού της παραγώγου της. Διατυπώνεται λοιπόν το θεώρημα μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (με σταθερό συντελεστή ισχύος) που διακινείται σε μία γραμμή μεταφοράς:

*Για σταθερό συντελεστή ισχύος, η ισχύς του φορτίου μεγιστοποιείται όταν η σύνθετη αντίσταση του φορτίου γίνει ίση με τη σύνθετη αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.*

Για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου και  $R=0$ , η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς προκύπτει με την αντικατάσταση της συνθήκης μεγίστου (1.9) στη σχέση (1.8):

$$P_{max} = \frac{E^2}{4X} \quad (1.10)$$

Η σχέση (1.10), η οποία δίνει τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου στο δίκτυο του Σχ. 1.6, θα χρησιμοποιηθεί σε ακτινικό δίκτυο που εξετάζεται σε επόμενα κεφάλαια της εργασίας

## 1.5 Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ένα συνεχές σύστημα το οποίο εμφανίζει δυναμική συμπεριφορά, μπορεί να αναλυθεί με ένα σύνολο  $N$  διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες συνήθως γράφονται στη μορφή:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1.11)$$

όπου  $\mathbf{x}$  είναι το  $N \times 1$  διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και κάθε  $f_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) είναι μια συνεχής μη γραμμική συνάρτηση όλων των  $x_i$ . Η χρονική απόκριση ενός φυσικού συστήματος συνδέεται με μία λύση της συνήθους διαφορικής εξίσωσης (1.11) για μια αρχική συνθήκη, η οποία δίνει το διάνυσμα κατάστασης τη χρονική στιγμή  $t=0$ :

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1.12)$$

Η αρχική συνθήκη (1.12) και η διαφορική εξίσωση (1.11) συνιστούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών. Είναι αναμενόμενο ότι για κάθε αρχική συνθήκη υπάρχει μία λύση του μη γραμμικού συστήματος (1.11). Οι συνθήκες κάτω από τις οποίες αυτός ο ισχυρισμός είναι σωστός, περιγράφονται στο θεώρημα ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης [9].

Ένα γενικό δυναμικό μοντέλο της μορφής που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται παρακάτω. Το μοντέλο περιγράφεται σε συμπυκνωμένη, διανυσματική μορφή, με πορεία από πιο τα γρήγορα προς τα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα.

1. *Ακαριαία απόκριση (Δίκτυο)*. Τα μεταβατικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής φύσεως, είναι πολύ γρήγορα συγκριτικά με το χρονικό διάστημα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στις μελέτες ευστάθειας τάσης. Επομένως, θεωρούνται πρακτικά ακαριαία μετά την εμφάνιση μιας διαταραχής ή αλλαγής στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος. Έτσι, για την παράσταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υποτίθεται ακαριαία απόκριση και το δίκτυο περιγράφεται από ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων:

$$0 = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.13)$$

όπου  $\mathbf{g}$  είναι  $m$  ομαλές συναρτήσεις και  $\mathbf{y}$  το διάνυσμα των τάσεων των ζυγών. Τα διανύσματα  $\mathbf{g}$  και  $\mathbf{y}$  έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Τα διανύσματα  $x$ ,  $z_c$  και  $z_d$  διευκρινίζονται στη συνέχεια. Σημειώνεται ότι στις εξισώσεις (1.13) συμπεριλαμβάνονται οι εξισώσεις των μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος.

2. *Βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Η βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των σύγχρονων γεννητριών και των ρυθμιστών τους, των επαγωγικών κινητήρων και των συνδέσμων συνεχούς ρεύματος. Τα δυναμικά φαινόμενα μετά από μια διαταραχή σ' αυτή την κλίμακα διαρκούν συνήθως από ένα έως μερικά δευτερόλεπτα και συχνά αναφέρονται ως βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα. Τα βραχυπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα περιγράφονται από τις ακόλουθες διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.14)$$

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

3. *Μακροπρόθεσμα δυναμικά φαινόμενα.* Η μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα είναι η κλίμακα των φαινομένων, των ρυθμιστών και των διατάξεων προστασίας που δρουν συνήθως από μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα έως μερικά λεπτά μετά από την εμφάνιση μιας διαταραχής. Οι σχετικοί μηχανισμοί σχεδιάζεται να δρουν μετά από την απόσβεση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων, για την αποφυγή περιττών δράσεων ή ασταθών αλληλεπιδράσεων με τα δυναμικά φαινόμενα βραχυπρόθεσμης κλίμακας. Μερικά παραδείγματα μηχανισμών που περιλαμβάνονται σε αυτή την κατηγορία είναι τα ΣΑΤΥΦ, η δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, η ζεύξη συστοιχιών πυκνωτών. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις παραπάνω διατάξεις αποτελούνται από συνεχείς διαφορικές εξισώσεις μεγάλης χρονικής σταθεράς και από διακριτές εξισώσεις διαφορών, και έχουν την μορφή:

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.15)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (1.16)$$

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 (1.13)-(1.16) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

## 1.6 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού των μηχανισμών αστάθειας τάσης αποτελεί η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Με βάση αυτό το κριτήριο, η αστάθεια τάσης χωρίζεται σε *βραχυπρόθεσμη* και *μακροπρόθεσμη* [9].

### 1.6.1 Βραχυπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αστάθεια τάσης προκαλείται από την απόπειρα των φορτίων να αποκαταστήσουν την ισχύ που καταναλώνουν έπειτα από μια διαταραχή. Στη 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 διάστημα αυτό 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* [11].

Οι μηχανές επαγωγής παίζουν σημαντικό ρόλο στα φαινόμενα αστάθειας τάσης στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα για τους εξής κυρίως λόγους:

- Είναι φορτία με μικρή αδράνεια και γρήγορη επαναφορά (της τάξεως του δευτερολέπτου).
- Είτε λειτουργούν ως κινητήρες είτε ως γεννήτριες, καταναλώνουν άεργο ισχύ για την εγκατάσταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο διάκενό τους. Γι' αυτό λοιπόν, η εγκατάσταση ασύγχρονων μηχανών στο δίκτυο συνοδεύεται συνήθως από κατάλληλες διατάξεις αέργου αντιστάθμισης.
- Κινδυνεύουν να παρουσιάσουν αστάθεια με τη μορφή επιβράδυνσης (λειτουργία κινητήρα) ή υπερεπιτάχυνσης (λειτουργία γεννήτριας), όταν η τερματική τους τάση είναι χαμηλή ή η μηχανική τους ροπή αρκετά μεγάλη.

Στα καινούργια Αιολικά Πάρκα εγκαθίστανται συνήθως ανεμογεννήτριες επαγωγής μεταβλητών στροφών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της τερματικής τάσης και επομένως της καταναλισκόμενης αέργου ισχύος, μέσω κατάλληλων μετατροπών ηλεκτρονικών ισχύος. Πολλά Αιολικά Πάρκα, χρησιμοποιούσαν παλαιότερα γεννήτριες σταθερών στροφών. Οι τελευταίες, από πλευράς ευστάθειας τάσης, εμφανίζουν την ίδια σχεδόν συμπεριφορά με τους κινητήρες επαγωγής. Η διαφορά έγκειται στην επιτάχυνσή τους (αντί για επιβράδυνση), σε περίπτωση απώλειας σημείου ισορροπίας. Επιπλέον, εάν μία ασύγχρονη μηχανή οδηγηθεί σε αστάθεια ενώ παραμένει συνδεδεμένη στο δίκτυο, μπορεί να συμπαρασύρει σε αστάθεια και γειτονικές μηχανές, με αποτέλεσμα τη μερική ή ολική κατάρρευση του συστήματος.

Το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης αστάθειας τάσης είναι ένα σύγχρονο ζήτημα, το οποίο αναμένεται να πάρει ακόμα μεγαλύτερες διαστάσεις λόγω:

- Της αυξημένης χρήσης κινητήρων επαγωγής, οι οποίοι εξοπλίζουν ευρέως τα συστήματα ψύξης και κλιματισμού.
- Της διείσδυσης φορτίων, των οποίων η κατανάλωση είναι ανεξάρτητη της τάσης και ελέγχεται με ηλεκτρονικά ισχύος.
- Της εκτεταμένης χρήσης συστημάτων πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος.
- Της αυξημένης χρήσης γραμμών συνεχούς ρεύματος (DC) στο επίπεδο Υψηλής Τάσης (HVDC).
- Της εντατικότερης χρήσης των διαθέσιμων δικτύων μεταφοράς.

### **1.6.2 Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης**

Έπειτα από μια διαταραχή, θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε βραχυπρόθεσμο σημείο ισορροπίας, όταν τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν αποσβεσθεί, όταν δηλαδή στην εξίσωση (1.14) ισχύει:

$$f(x, y, z_c, z_d) = 0 \quad (1.17)$$

Μετά τη βραχυπρόθεσμη ισορροπία, οι μακροπρόθεσμες αργές δυναμικές, οι οποίες περιγράφονται από τις εξισώσεις (1.15) και (1.16), καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος. Οι γρήγορες δυναμικές συνιστώσες του συστήματος θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται ευσταθώς στις αλλαγές των μακροπρόθεσμων και επομένως, οι εξισώσεις (1.14) μπορούν να αντικατασταθούν από αλγεβρικές εξισώσεις ισορροπίας (1.17). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει η λογική πίσω από την οιονεί στατική προσέγγιση στη μακροπρόθεσμη κλίμακα, η οποία θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα.

Οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που εμφανίζονται από την εξέλιξη των παραπάνω αργών δυναμικών φαινομένων μπορεί να οδηγήσουν στην μακροπρόθεσμη αστάθεια τάσης [9]. Σημαντικό ρόλο στην εμφάνιση αυτού του είδους αστάθειας τάσης παίζουν τα ΣΑΤΥΦ των μετασχηματιστών, τα οποία με τις ρυθμιστικές τους λειτουργίες επηρεάζουν την απόκριση του συστήματος.

## 1.7 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 (1.13)-(1.16) αποτελούν ένα εργαλείο αναπαράστασης της συμπεριφοράς ενός ΣΗΕ και η επίλυση τους δίνει τη δυνατότητα μιας λεπτομερούς ανάλυσης των μηχανισμών αστάθειας που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Παρά τη συνεχή αύξηση της υπολογιστικής δύναμης που μπορεί να προσφέρει σήμερα η τεχνολογία, για ένα μεγάλο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χρειάζεται κάποια απλοποίηση, προκειμένου να αναλυθεί το σύστημα στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Αυτή η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (1.13)-(1.16), 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 [9] 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 εξέλιξής τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όσο τα γρήγορα βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές  $z_c$  και  $z_d$  των εξισώσεων (1.15) και (1.16) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνεται το απλοποιημένο βραχυπρόθεσμο μοντέλο:

$$0 = g(x, y, z_c, z_d) \quad (1.18)$$

$$\dot{x} = f(x, y, z_c, z_d) \quad (1.19)$$

Από την άλλη, το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Εφόσον το ενδιαφέρον στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορεί να θεωρηθεί ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν ήδη φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις

διαφορικές εξισώσεις (1.14) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.20)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.21)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (1.22)$$

$$\mathbf{z}_d(\mathbf{k} + 1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(\mathbf{k})) \quad (1.23)$$

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. Στην παρούσα εργασία μάλιστα, το οιονεί στατικό σύστημα αποτελεί την οιονεί στατική προσομοίωση που έχει υλοποιηθεί.

## 1.8 Πρόγραμμα WPSTAB για την μακροπρόθεσμη ανάλυση ευστάθειας

### 1.8.1 Προσδιορισμός Σημείων Ισορροπίας

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (1.20) και (1.21), οι εξισώσεις ισορροπίας των βραχυπρόθεσμων δυναμικών φαινομένων αντικαθιστούν τις εξισώσεις ροής φορτίου με ένα διευρυμένο σύστημα εξισώσεων. Η επίλυση των εξισώσεων (1.20)-(1.21) στο WPSTAB γίνεται με την αριθμητική μέθοδο Newton-Raphson [12].

Το διάνυσμα  $\mathbf{X}$  των μεταβλητών κατάστασης στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, αποτελείται από τις γωνίες δρομέα των σύγχρονων γεννητριών  $\delta_G$  και τις ολισθήσεις των κινητήρων επαγωγής  $s_M$  (εάν υπάρχουν), δηλαδή:

$$\mathbf{X} = [\delta_G^T \quad s_M^T]^T \quad (1.24)$$

ενώ το διάνυσμα  $\mathbf{y}$  των αλγεβρικών μεταβλητών αποτελείται από τα μέτρα  $\mathbf{V}$ , τις φασικές γωνίες  $\boldsymbol{\theta}$  των τάσεων των ζυγών του συστήματος καθώς και τη συχνότητα του συστήματος  $\omega_{sys}$ , δηλαδή

$$\mathbf{y} = [\mathbf{V}^T \quad \boldsymbol{\theta}^T \quad \omega_{sys}]^T \quad (1.25)$$

Ένα σημείο ισορροπίας  $[\mathbf{V}^T \quad \boldsymbol{\theta}^T \quad \delta_G^T \quad s_M^T \quad \omega_{sys}]^T$  προκύπτει επιλύοντας επαναληπτικά μια ακολουθία γραμμικών συστημάτων της μορφής:

$$\mathbf{J}_R \begin{bmatrix} \boldsymbol{\theta}^{(j+1)} - \boldsymbol{\theta}^{(j)} \\ \mathbf{V}^{(j+1)} - \mathbf{V}^{(j)} \\ \boldsymbol{\delta}_G^{(j+1)} - \boldsymbol{\delta}_G^{(j)} \\ \mathbf{s}_M^{(j+1)} - \mathbf{s}_M^{(j)} \\ \omega_{sys}^{(j+1)} - \omega_{sys}^{(j)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_P^{(j)} \\ G_Q^{(j)} \\ F_G^{(j)} \\ F_M^{(j)} \\ G_{sys}^{(j)} \end{bmatrix} \quad j = (0, 1, 2, \dots) \quad (1.26)$$

όπου  $\mathbf{J}_R$  ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος των εξισώσεων ισορροπίας και  $G_P, G_Q, F_G, F_M, G_{sys}$  οι εξισώσεις ισορροπίας που αντιστοιχούν στην ενεργό ισχύ, την άεργο ισχύ, την ενεργό ισχύ των γεννητριών και των κινητήρων και το γενικό ισοζύγιο ισχύος του συστήματος. Με τον δείκτη  $j$  συμβολίζονται οι τιμές των μεταβλητών και των συναρτήσεων στην  $j$ -ανακύκλωση. Το γραμμικό σύστημα (1.26) επιλύεται με τη μέθοδο της ευθείας και αντιστρόφου αντικαταστάσεως. Η μέθοδος αυτή απαιτεί την τριγωνική παραγοντοποίηση του Ιακωβιανού πίνακα  $\mathbf{J}_R$ , η οποία πραγματοποιείται με τη μέθοδο απαλοιφής Gauss.

Η επίλυση στο WPSTAB γίνεται χρησιμοποιώντας την τεχνική των αραιών πινάκων, δεδομένου ότι το μεγαλύτερο μέρος του  $\mathbf{J}_R$  είναι ο πίνακας της ροής φορτίου (1.20), ο οποίος είναι εξαιρετικά αραιός.

Οι αρχικές τιμές των μεταβλητών  $V, \theta, \delta_G, s_M, \omega_{sys}$  προέρχονται είτε από επίλυση του προβλήματος αρχικών συνθηκών, είτε από τις προηγούμενες τιμές των αργών μεταβλητών κατάστασης  $z_c, z_d$  κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Οι αργές μεταβλητές κατάστασης του συστήματος παραμένουν σταθερές κατά την επίλυση των βραχυπρόθεσμων εξισώσεων ισορροπίας.

## 1.8.2 Προσομοίωση στη Μακροπρόθεσμη Χρονική Κλίμακα

Το πρόγραμμα WPSTAB χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στη μακροπρόθεσμη κλίμακα (από μερικά λεπτά της ώρας έως μερικές ώρες), εστιάζοντας στην ακριβή παράσταση των μηχανισμών και διατάξεων του συστήματος που προκαλούν το πρόβλημα της αστάθειας τάσης. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη μέθοδο οιονεί στατικών μεταβολών για να παραστήσει τα γρήγορα μεταβατικά φαινόμενα με τις αντίστοιχες εξισώσεις ισορροπίας. Τα αργά μεταβατικά φαινόμενα από την άλλη, παριστάνονται συνήθως με εξισώσεις διαφορών.

Η διαδικασία προσομοίωση έχει ως εξής: Σε κάθε βήμα της προσομοίωσης επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ολοκληρώνονται οι διαφορικές εξισώσεις στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα, ενώ παράλληλα ανανεώνονται τα δεδομένα του συστήματος κάθε φορά που συμβαίνει μια αλλαγή σε διακριτές μεταβλητές ή σε παραμέτρους του συστήματος. Εάν δεν υπάρχουν μακροπρόθεσμες διαφορικές εξισώσεις (1.22), η επίλυση απλοποιείται.

Η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας στη βραχυπρόθεσμη χρονική κλίμακα (συνθήκες ισορροπίας (1.20) και αλγεβρικές εξισώσεις (1.21)) πραγματοποιείται όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Οι διατάξεις του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα που παριστάνονται είναι τα συστήματα αλλαγής τάσης υπό φορτίο των μετασχηματιστών και οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζεύξης των στατών πυκνωτών.:

Το χρονικό βήμα  $\Delta t$  μετάβασης από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη επιλέγεται έτσι ώστε:

- όλες οι διακριτές μεταβάσεις, οι οποίες εκφράζονται με τις εξισώσεις διαφορών (1.23) να λαμβάνουν χώρα σε χρονικά διαστήματα πολλαπλάσια του  $\Delta t$ , ώστε να εξασφαλίζεται η χρονική ακρίβεια των μεταβάσεων.
- να είναι υποπολλαπλάσιο της μικρότερης σταθεράς χρόνου των διαφορικών εξισώσεων (1.22) για να εξασφαλίζει την ευστάθεια της αριθμητικής ολοκλήρωσης, στην περίπτωση που παριστάνονται μακροπρόθεσμες δυναμικές με διαφορικές εξισώσεις [12].

Η ανανέωση του Ιακωβιανού πίνακα  $J_R$  κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα πραγματοποιείται μόνο όταν:

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

Με τον τρόπο αυτό εξοικονομείται υπολογιστικός χρόνος, δεδομένου ότι η δυσκολότερη υπολογιστικά διαδικασία είναι η τριγωνική παραγοντοποίηση του  $J_R$ .

## 1.9 Έλεγχος με Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος

### 1.9.1 Μετατροπείς Πηγής Τάσης

Ο μετατροπέας πηγής τάσης (Voltage-Source Converter-VSC), παρέχει μια ρυθμιζόμενη εναλλασσόμενη τάση, χρησιμοποιώντας ελεγχόμενα ημιαγώγιμα στοιχεία που διαθέτουν ικανότητα έναυσης και σβέσης (IGBTs, GTOs). Η συνδεσμολογία της πλευράς συνεχούς ρεύματος (DC) στους μετατροπείς πηγής τάσης αποτελείται συνήθως από έναν πυκνωτή, προκειμένου η συνεχής τάση να διατηρείται σταθερή. Οι μετατροπείς αυτοί λειτουργούν σε ΧΤ ή και σε ΜΤ.

Ο μετατροπέας πηγής τάσης λειτουργεί με σταθερή τάση και μεταβλητό ρεύμα στην πλευρά εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και είναι ουσιαστικά ελεγχόμενη πηγή σταθερής τάσης. Έχει την δυνατότητα να λειτουργεί με χωρητικό ή επαγωγικό συντελεστή ισχύος, δηλαδή να παράγει ή να απορροφά άεργο ισχύ ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου εναλλασσόμενου ρεύματος. Επίσης, μπορεί να παράγει ή να απορροφά ενεργό ισχύ, λειτουργώντας αντίστοιχα ως πηγή ή ως φορτίο, αρκεί βέβαια η ισχύς αυτή να αναπληρώνεται (π.χ. συσσωρευτής στην DC πλευρά). Έτσι, ο VSC μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια, αφού τα  $P$  και  $Q$  μπορούν να έχουν και τα δύο πρόσημα και ως εκ τούτου, η ισχύς μπορεί να έχει οποιαδήποτε κατεύθυνση, ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου [13].

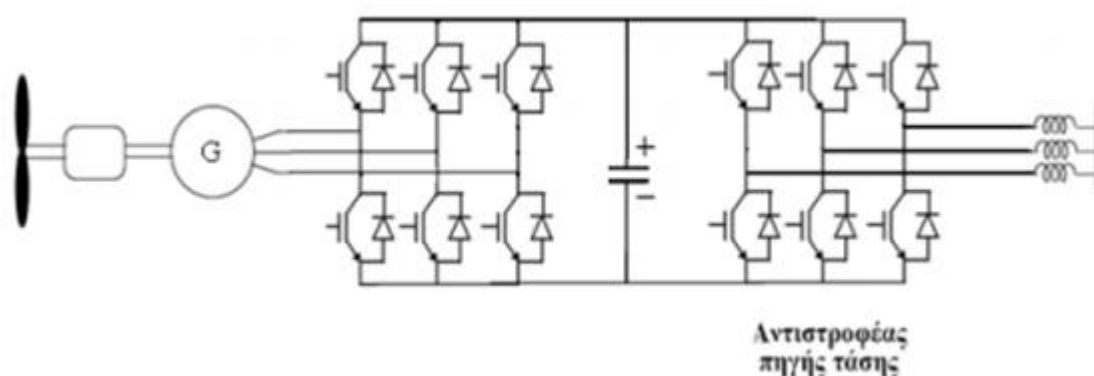
Όπως προαναφέρθηκε, για τη διατήρηση της τάσης στην πλευρά συνεχούς ρεύματος (DC) σε σταθερό επίπεδο, γίνεται χρήση μιας χωρητικότητας η οποία αποθηκεύει για πολύ μικρό χρονικό διάστημα ή προσδίδει ενέργεια στο σύστημα, αν η τάση είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη της ονομαστικής αντίστοιχα. Ο ίδιος πυκνωτής λειτουργεί ως φίλτρο των αρμονικών χωρίς επιπλέον κόστος. Η αλλαγή της ροής ισχύος γίνεται με την αντιστροφή της κατεύθυνσης του συνεχούς ρεύματος, ενώ η πολικότητα της συνεχούς τάσης παραμένει σταθερή.



Στην εργασία αυτή, οι μετατροπείς αυτοί προορίζονται για τη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο.

### 1.9.2 Μετατροπείς AC/DC/AC

Οι μετατροπείς εναλλασσόμενου ρεύματος/συνεχούς ρεύματος/εναλλασσόμενου ρεύματος (AC/DC/AC), αποτελούνται συνήθως από έναν ανορθωτή AC/DC, ένα μετατροπέα DC/DC κι έναν αντιστροφέα DC/AC. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη τοπολογία AC/DC/AC στη σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο, είναι αυτή της σύνδεσης δύο όμοιων μετατροπέων τύπου πηγής τάσης (VSCs), γνωστή ως μετατροπέας back-to-back (Σχ. 1.10). Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανορθωτής, ενώ από την πλευρά του δικτύου ως αντιστροφέας. Στη διάταξη αυτή η ροή ισχύος είναι αμφίπλευρη. Προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της ισχύος εξόδου, θα πρέπει να διατηρείται σταθερή η τάση του πυκνωτή, ενώ παράλληλα θα πρέπει ο έλεγχος του μετατροπέα της γεννήτριας να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να οδηγείται η γεννήτρια σε ταχύτητες περιστροφής που δίνουν βέλτιστη λειτουργία.



Σχήμα 1. 10 Μετατροπέας AC/DC/AC με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, στην παρούσα εργασία οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος AC/DC/AC θεωρούνται πως λειτουργούν ως πηγές τάσεως. Η τάση εναλλασσόμενου ρεύματος του μετατροπέα θεωρείται σταθερή κατά μέτρο, αλλά μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποια μορφή ελέγχου. Η ρύθμιση αυτή θεωρείται πως γίνεται ακαριαία, χωρίς δηλαδή να προχωρήσει ο χρόνος σε περίπτωση προσομοίωσης.

### 1.9.3 Ρύθμιση Ενεργού και Αέργου Ισχύος

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος μπορούν να ελέγχουν ξεχωριστά την ενεργό και άεργο ισχύ που παρέχουν ή καταναλώνουν. Έτσι, μπορούν να ελέγχουν ρεύματα ή τάσεις προσαρμόζοντας κατάλληλα τη ροή ισχύος. Επειδή οι μετατροπείς στην πραγματικότητα συνθέτουν την κυματομορφή εναλλασσόμενου ρεύματος ή τάσεως, έχουν πολύ γρήγορη αντίδραση, και μπορούν να ρυθμίσουν τάση, ρεύμα ή ισχύ εντός μια περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος (20ms για σύστημα 50Hz). Στην εργασία αυτή θα θεωρηθεί ότι για τις εξισώσεις του δικτύου στην ημιτονοειδή οιοειδή μόνιμη κατάσταση, όπου τάσεις και ρεύματα παριστάνονται ως φασιθέτες, ο έλεγχος που ασκούν οι μετατροπείς είναι πρακτικά ακαριαίος και ότι περιλαμβάνεται στις αλγεβρικές εξισώσεις (1.15).

Στην διάταξη του μετατροπέα AC/DC/AC, ο έλεγχος ενεργού ισχύος φροντίζει ώστε η ισχύς που προέρχεται από την πηγή εισόδου (π.χ. ανεμογεννήτρια) να μεταφέρεται στο δίκτυο εναλλασσόμενου ρεύματος χωρίς να υπερφορτίζεται ο πυκνωτής στην DC πλευρά. Ο ανεξάρτητος έλεγχος αέργου ισχύος γίνεται με κατάλληλη μεταβολή της ενεργού τιμής της εναλλασσόμενης τάσης. Αυτή μπορεί να μεταβάλλεται ώστε να ελέγχεται κάποια απομακρυσμένη τάση ή να διατηρείται ο συντελεστής ισχύος (συνήθως στη μονάδα). Τέλος, μπορεί να μεταβάλλεται προκειμένου να ελέγχεται το μέτρο του ρεύματος (μετατροπέας πηγής ρεύματος).

Οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος δεν έχουν δυνατότητα έστω χρονικά περιορισμένης υπερφόρτισης. Σε περίπτωση λοιπόν που ζητηθεί από το ρυθμιστή τάσεως/αέργου ισχύος τιμή ρεύματος μεγαλύτερη από την ονομαστική, αυτή περιορίζεται αυτόματα. Ο περιοριστής σε αυτή την εργασία υλοποιείται με μείωση της τάσης του μετατροπέα πηγής τάσης μέχρις ότου το ρεύμα επιστρέψει σε επιτρεπτή τιμή. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα τείνει να ξεπεράσει το επιτρεπόμενο όριο, ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος. Θεωρείται ότι η δράση του ελεγκτή ρεύματος γίνεται ακαριαία.

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος οφείλει να καλύπτει την ονομαστική φαινόμενη ισχύ υπό ονομαστική τάση. Συνεπώς, θεωρώντας  $S_n$  ονομαστική φαινόμενη ισχύ και  $V_n$  ονομαστική τάση του μετατροπέα (στο ανά μονάδα σύστημα), το μέγιστο όριο του ρεύματος είναι:

$$I_{lim} = \frac{S_n}{V_n} \quad (1.27)$$

## 1.10 Αντικείμενο και δομή της εργασίας

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η επίδραση της μεταβλητότητας της ενεργού παραγωγής Αιολικών Πάρκων στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και κατά συνέπεια στο όριο ευστάθειας τάσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [4], εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης από άποψη ασφάλειας τάσης του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος μέσω της διεσπαρμένης παραγωγής, με εφαρμογή στην περιοχή της Πελοποννήσου. Το στιγμιότυπο λειτουργίας του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος που εξετάστηκε, αφορούσε την περίπτωση μιας κρίσιμης διαταραχής τον Ιούνιο του 2010. 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 η δυνατότητα αύξησης του ορίου φόρτισης μέσω παροχής αέργου ισχύος από 7 Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου. Η εργασία έδειξε ότι είναι καταρχήν δυνατή η βελτίωση της ευστάθειας τάσης της Πελοποννήσου, με κατάλληλο έλεγχο των Αιολικών Πάρκων.

Στη συνέχεια, άλλη διπλωματική εργασία [13] εξέτασε το ενδεχόμενο αύξησης του περιθωρίου ασφαλείας ως προς τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει μέσω της άεργης υποστήριξης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησε τα υπάρχοντα δεδομένα για δύο Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου, τα οποία θεωρήθηκε ότι συνδέονται σ' ένα ασθενές ακτινικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργούν σε ένα στιγμιότυπο καλοκαιρινού φορτίου αιχμής, το οποίο συμπίπτει με περίοδο άπνοιας. Θεωρήθηκε δηλαδή ότι τα Αιολικά Πάρκα έχουν σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή. Αξιολογήθηκε η επιρροή που ασκεί ο

ενδεχόμενος συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης στο όριο φόρτισης του συστήματος, σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει καμιά μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης. Το γεγονός ότι η εφαρμογή του συνεχούς ελέγχου της υψηλής τάσης είναι πρακτικά ανέφικτη στις περισσότερες περιπτώσεις, δεδομένου ότι απαιτεί συνεχή κανάλια επικοινωνίας μεγάλης ταχύτητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας, οδήγησε σε μία νέα απλουστευμένη προτεινόμενη στρατηγική. Η νέα στρατηγική, απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή, σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης, όπως όταν η ΥΤ της γραμμής μεταφοράς παραβιάσει ένα κατώφλι ελάχιστης τάσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αξιοποιεί τον κώδικα σε Matlab που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας [13], για να προσομοιώσει το ίδιο σύστημα δοκιμών και να αξιολογήσει την επίδραση της μεταβλητής ενεργού παραγωγής από τα δύο εξεταζόμενα Αιολικά Πάρκα, στο όριο φόρτισης του συστήματος. Για την εκτίμηση της συνεισφοράς κάθε Αιολικού Πάρκου, υλοποιούνται τρεις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα: α) ρύθμιση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, β) ρύθμιση της τάσης του Αιολικού Πάρκου και γ) ευφυής έλεγχος με εντολή μέγιστης άεργης υποστήριξης σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης [13]. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή των χρονοσειρών ενεργού παραγωγής, αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής [6] και προσομοιώνει τη λειτουργία και τον έλεγχο μιας ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται επίσης με τα ακραία σενάρια της σταθερής χαμηλής (άπνοια) και υψηλής (ισχυρός άνεμος) ενεργού παραγωγής.

Επιπλέον, εξετάζεται το σύστημα δοκιμών και με τις δύο γραμμές διανομής των Αιολικών Πάρκων συνδεδεμένες στην ίδια γραμμή μεταφοράς. Η ταυτόχρονη συνεισφορά και των δύο πάρκων στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος παρουσιάζει ενδιαφέρον, δεδομένου ότι η εντολή άεργης υποστήριξης και οι αυτόματοι έλεγχοι απαιτούν κάποιας μορφής συντονισμό, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις.

Για την προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιείται πρόγραμμα που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB [13] και επίσης το πρόγραμμα προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα WPSTAB [12].

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Το Κεφάλαιο 1 είναι εισαγωγικό και δίνει το θεωρητικό υπόβαθρο και το πλαίσιο μέσα στο οποίο κινείται το περιεχόμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται η δομή και η λειτουργία ενός ΣΗΕ και δίνεται έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Αιολικά Πάρκα. Εισάγεται η έννοια της ευστάθειας τάσης και αναλύονται τα όρια μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ορίζεται το πρόβλημα της αστάθειας τάσης και γίνεται η διάκριση των χρονικών κλιμάκων στις οποίες εξελίσσεται το φαινόμενο. Επίσης, παρουσιάζεται η δυναμική παράσταση ενός ΣΗΕ και το οιονεί στατικό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Στο σύστημα αυτό, βασίζεται και η ανάλυση του προγράμματος προσομοίωσης στη μακροπρόθεσμη κλίμακα WPSTAB.

Στο Κεφάλαιο 2, περιγράφεται το μηχανικό και ηλεκτρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της αιολικής ισχύος σε ηλεκτρική, με στόχο την ανάλυση Αιολικών Πάρκων με μεταβλητό άνεμο. Η ανάλυση αφορά ασύγχρονη ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης και συμπεριλαμβάνει τη δράση των ρυθμιστών. Στο μοντέλο εισάγονται δύο συσχετισμένες

χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου και εξάγονται οι αντίστοιχες χρονοσειρές παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες αξιοποιούνται στην υπόλοιπη ανάλυση και τις προσομοιώσεις της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 3, δίνεται η δομή του συστήματος δοκιμών που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις. Το σύστημα αυτό αποτελείται από μία γραμμή μεταφοράς, στο μέσο της οποίας συνδέεται μέσω γραμμής διανομής MT η αιολική παραγωγή. Παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών σύνδεσης και των Αιολικών Πάρκων, τα οποία προέρχονται από δύο πραγματικά Αιολικά Πάρκα που είναι συνδεδεμένα στο Ελληνικό σύστημα, στην περιοχή της Πελοποννήσου. Η γραμμή σύνδεσης κάθε πάρκου αποτελείται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και περιλαμβάνει μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ. Στον ζυγό ΜΤ του υποσταθμού υπάρχουν αυτόματοι στατοί πυκνωτές αντιστάθμισης. Το Αιολικό Πάρκο και οι επί μέρους ελεγκτές των ανεμογεννητριών έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την έγχυση αέργου ισχύος στον ισοδύναμο ζυγό σύνδεσης του πάρκου. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου. Προκειμένου να αναδειχθεί η βελτίωση που προσφέρει στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η σύνδεση και ο έλεγχος της διεσπαρμένης παραγωγής, το σύστημα προσομοιώνεται αρχικά με την γραμμή διανομής του Αιολικού Πάρκου αποσυνδεδεμένη από το σύστημα μεταφοράς. Στη συνέχεια, γίνεται η εκτίμηση της συνεισφοράς του κάθε πάρκου χωριστά στο όριο φόρτισης του συστήματος, με τον ρυθμιστή του πάρκου να διατηρεί μοναδιαίο το συντελεστή ισχύος της παραγωγής.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab, για τις περιπτώσεις όπου τα Αιολικά Πάρκα προσφέρουν υπηρεσίες αέργου υποστήριξης στο σύστημα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, αναλύεται το σενάριο όπου ο ρυθμιστής αέργου ισχύος διατηρεί σταθερή την τάση του Α/Π, αλλά και η στρατηγική με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης. Στόχος είναι η εκτίμηση της επίδρασης της έγχυσης αέργου ισχύος στο όριο φόρτισης του συστήματος. Ως ενεργός παραγωγή των Α/Π λαμβάνονται οι χρονοσειρές ισχύος που εξήχθησαν από το μοντέλο του Κεφαλαίου 2. Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση της ενεργού παραγωγής στην υποστήριξη του συστήματος.

Στο Κεφάλαιο 5, το τυπικό σύστημα που εξετάστηκε στα Κεφάλαια 3 και 4 σε περιβάλλον Matlab αναλύεται στο πρόγραμμα WPSTAB, που είναι σχεδιασμένο για την μακροπρόθεσμη ανάλυση ευστάθειας. Αρχικά, ελέγχεται η συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στα δύο λογισμικά και εντοπίζονται επί μέρους διαφοροποιήσεις στην απόκριση. Στη συνέχεια, το σύστημα προσομοιώνεται στο WPSTAB για διαφορετικά αναλογικά κέρδη του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης των ανεμογεννητριών. Επίσης, εισάγεται ένα νέο τυπικό σύστημα, στο οποίο συνδέονται στο ίδιο δίκτυο μεταφοράς δύο Αιολικά Πάρκα και λειτουργούν ταυτόχρονα, με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της σύνδεσής τους στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 6, συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των Κεφαλαίων 3, 4 και 5. Επίσης, δίνονται οι προοπτικές για περαιτέρω διερεύνηση των ζητημάτων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

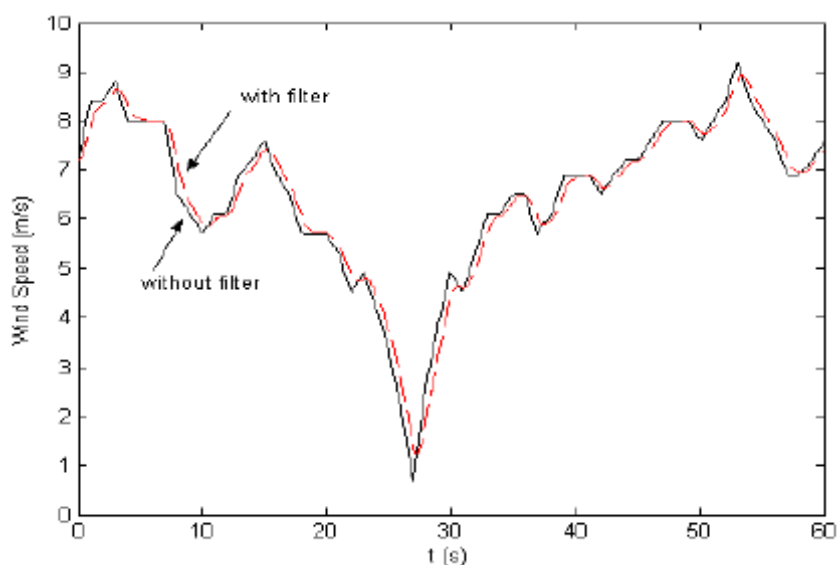
# Ανάλυση Αιολικού Πάρκου με Μεταβλητό Άνεμο

Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφεται το μηχανικό και ηλεκτρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη έρευνα [6] σε περιβάλλον Simulink και το οποίο χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της αιολικής ισχύος σε ηλεκτρική. Η ανάλυση αφορά ασύγχρονη ανεμογεννήτρια διπλής τροφοδότησης και συμπεριλαμβάνει τη δράση των ρυθμιστών. Στο μοντέλο εισάγονται δύο συσχετισμένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου και εξάγονται οι αντίστοιχες χρονοσειρές παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, οι οποίες θα αξιοποιηθούν στην υπόλοιπη ανάλυση και τις προσομοιώσεις της παρούσας εργασίας.

### 2.1 Μηχανικό Μοντέλο Ανεμοκινητήρα

Θεωρείται ότι οι ανεμογεννήτριες δέχονται ως είσοδο μια χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου. Οι χρονοσειρές έχουν συχνότητα δειγματοληψίας 1Hz και η μετατροπή του διακριτού σήματος σε συνεχές για τις ανάγκες της προσομοίωσης γίνεται με γραμμική παρεμβολή.

Η ταχύτητα του ανέμου που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είναι η ισοδύναμη «μέση» ταχύτητα που βλέπει ολόκληρος ο δρομέας της ανεμογεννήτριας και όχι η ταχύτητα σε ένα σημείο [14]. Επίσης, η ανάλυση των επόμενων κεφαλαίων αφορά τη σύνδεση και λειτουργία Αιολικού Πάρκου και όχι μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας. Επομένως, πριν την είσοδο του μοντέλου της γεννήτριας, παρεμβάλλεται συνάρτηση μεταφοράς πρώτης τάξεως (φίλτρο) με χρονική σταθερά  $T=0,5s$  για την εξομάλυνση του σήματος. Στο Σχ. 2.1 διακρίνεται η επίδραση του εφαρμοζόμενου φίλτρου στη χρονοσειρά [8].



Σχήμα 2. 1 Επίδραση Φίλτρου Χρονικής Σταθεράς  $T=0,5s$

Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει τη μετατροπή (ενός μέρους) της αιολικής ισχύος σε μηχανική ισχύ του περιστρεφόμενου άξονα του ανεμοκινητήρα:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.1)$$

όπου

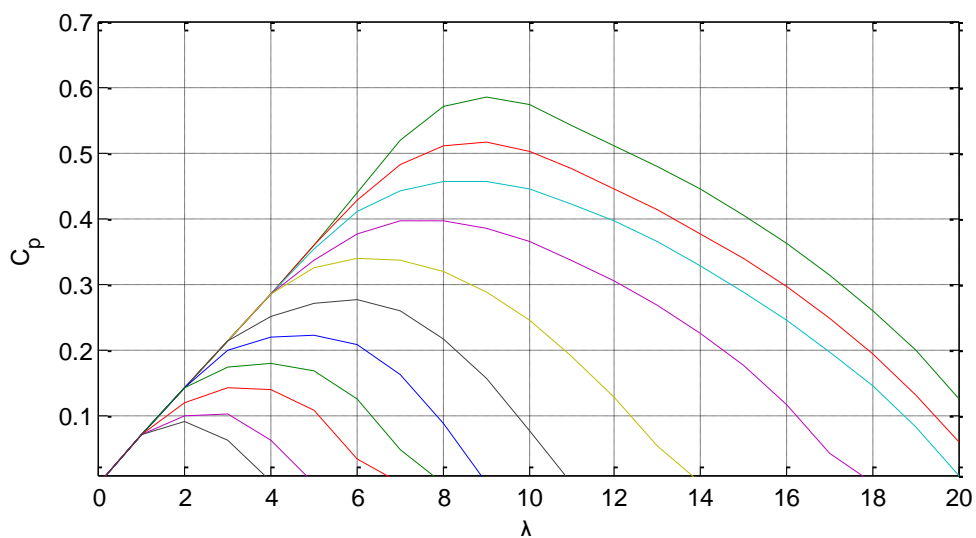
- $P_m$  είναι η έξοδος της μηχανικής ισχύος από τον ανεμοκινητήρα.
- $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα (τυπικά  $1,225\text{kg/m}^3$ ).
- $A=\pi R^2$ , όπου  $R$  είναι η ακτίνα της έλικας του ανεμοκινητήρα.
- $V_w$  είναι η ταχύτητα του ανέμου (m/s).
- $C_p$  είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης που εξαρτάται από τον λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  και από τη γωνία ελέγχου βήματος  $\beta$  (pitch control angle).

Η ισχύς μετατρέπεται στο ανά μονάδα σύστημα (αμ) με βάση την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  ορίζεται ως

$$\lambda = \frac{\omega_R R}{V_w} \quad (2.2)$$

όπου  $\omega_R$ , η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα σε rad/s.

Η πυκνότητα του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου και η ακτίνα της έλικας του ανεμοκινητήρα δεν μπορούν να ελεγχθούν. Συνεπώς, για τη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου του ανεμοκινητήρα, με βάση τη σχέση (2.1), η μοναδική παράμετρος που μπορεί να ελεγχθεί είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής απόδοσης ( $C_p$ ). Ο συντελεστής  $C_p$  αντανακλά το γεγονός ότι η ισχύς που αξιοποιείται είναι μόνο ένα μέρος της διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Η θεωρητική μέγιστη τιμή του  $C_p$  είναι 0,593 (Όριο του Betz) [3], ενώ πρακτικά επιτυγχάνονται τιμές που βρίσκονται κοντά στο 0,4. Οι καμπύλες  $C_p$ - $\lambda$  του ανεμοκινητήρα που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση φαίνονται στο Σχ. 2.2 και προέρχονται από δεδομένα κατασκευαστή [15].



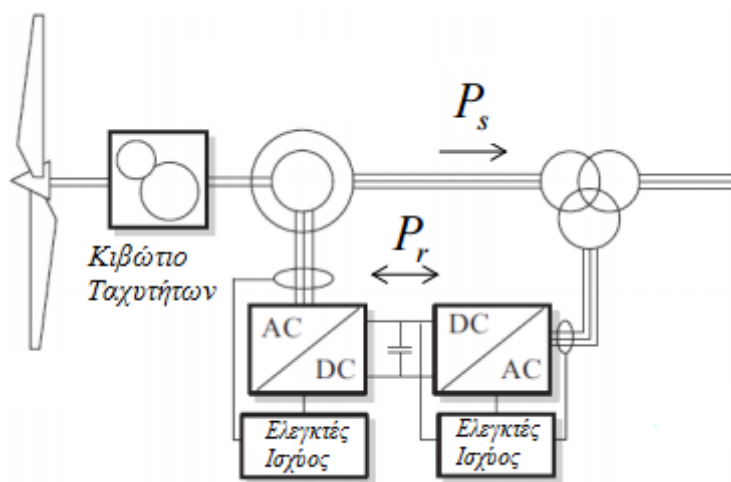
Σχήμα 2. 2 Καμπύλες  $C_p$ - $\lambda$ , Μοντέλο Ανεμοκινητήρα

## 2.2 Μοντέλο Γεννήτριας και Ρυθμιστών

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφ. 1, η πιο διαδεδομένη διάταξη ηλεκτρομηχανικής μετατροπής που χρησιμοποιείται σήμερα στις ανεμογεννήτριες είναι οι Ασύγχρονες Γεννήτριες Διπλής Τροφοδότησης (ΑΓΔΤ – Doubly Fed Asynchronous Generator). Η ΑΓΔΤ είναι μια ασύγχρονη μηχανή τυλιγμένου δρομέα, της οποίας τόσο ο στάτης όσο και ο δρομέας συνδέονται στο δίκτυο. Ο στάτης συνδέεται απευθείας, όπως στις κλασσικές μηχανές επαγωγής, ενώ ο δρομέας συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας (AC/DC/AC), όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3.

Λειτουργώντας το κύκλωμα του δρομέα σε μεταβλητή συχνότητα, επιτυγχάνεται μεταβλητή μηχανική ταχύτητα περιστροφής της ανεμογεννήτριας. Η συνολική ενεργός ισχύς της μηχανής είναι το άθροισμα της ισχύος του στάτη και (μέσω του μετατροπέα) του δρομέα. Δεδομένου ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύος περνάει από το μετατροπέα, αυτός είναι μειωμένης ονομαστικής ισχύος (περίπου ένα τρίτο της συνολικής) και άρα μειωμένου κόστους σε σχέση με ένα μετατροπέα πλήρους ισχύος [6].

Με τον έλεγχο του μετατροπέα, η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να ποικίλει έως και 40% από τη σύγχρονη ταχύτητα. Είναι εφικτός ο ανεξάρτητος έλεγχος της ενεργού και αέργου ισχύος. Υπό δεδομένη τερματική τάση, η ενεργός ισχύς δεν ορίζει μονοσήμαντα την ταχύτητα περιστροφής και την άεργο ισχύ. Υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας της μηχανής με ένα συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος, αλλά και η δυνατότητα ελέγχου της τάσης.



Σχήμα 2.3 Ανεμογεννήτρια Διπλής Τροφοδότησης

### 2.2.1 Εξισώσεις Ασύγχρονης Μηχανής Διπλής Τροφοδότησης στην Οιονεί Ημιτονοειδή Κατάσταση

Υποθέτοντας συμμετρική, οιονεί ημιτονοειδή κατάσταση και αγνοώντας τις ωμικές απώλειες του στάτη ( $R_s=0$ ), προκύπτουν οι ακόλουθες εξισώσεις τάσεων (2.3)-(2.6) στο σύγχρονο πλαίσιο  $dq$  για την ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης, με σύμβαση κινητήρα (σε αμ):

$$u_{ds} = -\omega_s \psi_{qs} \quad (2.3)$$

$$u_{qs} = \omega_s \psi_{ds} \quad (2.4)$$

$$u_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \quad (2.5)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \quad (2.6)$$

όπου

- $u$ ,  $i$  και  $\psi$  συμβολίζουν τάση, ρεύμα και πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο, αντίστοιχα.
- οι δείκτες  $s$  και  $r$  συμβολίζουν μεγέθη στάτη και δρομέα, αντίστοιχα.
- $\omega_s$  και  $\omega_r$  είναι η ηλεκτρική γωνία του στάτη και του δρομέα, αντίστοιχα.

Ο άξονας  $q$  προπορεύεται κατά  $90^\circ$  του άξονα  $d$ . Ο συντελεστής  $1/\omega_b$  εμφανίζεται επειδή στο ανά μονάδα σύστημα όλα τα μεγέθη είναι σε ανά μονάδα εκτός από τον χρόνο. Για τις συνιστώσες της πεπλεγμένης μαγνητικής ροής του στάτη ισχύουν:

$$\psi_{ds} = X_{ss} i_{ds} + X_M i_{dr} \quad (2.7)$$

$$\psi_{qs} = X_{ss} i_{qs} + X_M i_{qr} \quad (2.8)$$

όπου

- $X_M$  είναι η αντίδραση μαγνήτισης της μηχανής.
- $X_{ss} = X_M + X_{ls}$  είναι η σύγχρονη αντίδραση του στάτη.
- $X_{ls}$  είναι η αντίδραση σκέδασης του στάτη.

Χρησιμοποιώντας σύμβαση κινητήρα, η ισχύς που απορροφά ο στάτης είναι :

$$P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \quad (2.9)$$

$$Q_s = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \quad (2.10)$$

Δεδομένου ότι αμελούνται οι θερμικές απώλειες και οι μεταβολές της μαγνητικής ενέργειας του στάτη, η σχέση (2.9) αναπαριστά και την ισχύ διακένου  $P_g$  που μεταφέρεται από τον στάτη στον δρομέα. Η συνολική ισχύς που απορροφά η μηχανή είναι:

$$P = P_s + P_{is} \quad (2.11)$$

$$Q = Q_s + Q_{is} \quad (2.12)$$

όπου  $P_{is}$  και  $Q_{is}$  είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς που απορροφά ο μετατροπέας πλευράς δικτύου. Η ενεργός και η άεργος ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου είναι:

$$P_{is} = u_{ds} i_{dis} + u_{qs} i_{qis} \quad (2.13)$$

$$Q_{is} = u_{qs} i_{dis} - u_{ds} i_{qis} \quad (2.14)$$

όπου  $i_{dis}$  και  $i_{qis}$  είναι οι συνιστώσες του ρεύματος του μετατροπέα πλευράς δικτύου στο σύγχρονο πλαίσιο  $dq$ . Τα ρεύματα του στάτη απαλείφονται από τις (2.9), (2.10), μέσω των (2.7), (2.8) και αντικαθίστανται οι πεπλεγμένες ροές μέσω των (2.3), (2.4) :

$$P_s = -\frac{X_M}{X_{ss}} (u_{ds} i_{dr} + u_{qs} i_{qr}) \quad (2.15)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2}{X_{ss} \omega_s} + \frac{X_M}{X_{ss}} (u_{ds} i_{qr} - u_{qs} i_{dr}) \quad (2.16)$$



Οι (2.11), (2.12), μέσω των (2.13), (2.14), (2.15) και (2.16) οδηγούν στην παρακάτω έκφραση της συνολικής ενεργού και αέργου ισχύος που απορροφά η μηχανή:

$$P = -u_{ds} \left( \frac{X_M}{X_{SS}} i_{dr} - i_{dis} \right) - u_{qs} \left( \frac{X_M}{X_{SS}} i_{qr} - i_{qis} \right) \quad (2.17)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_{SS} \omega_s} + u_{ds} \left( \frac{X_M}{X_{SS}} i_{qr} - i_{qis} \right) - u_{qs} \left( \frac{X_M}{X_{SS}} i_{dr} - i_{dis} \right) \quad (2.18)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι :

$$T_e = -\frac{X_M}{\omega_s X_{SS}} (u_{ds} i_{dr} + u_{qs} i_{qr}) \quad (2.19)$$

## 2.2.2 Διανυσματικός Έλεγχος Μετατροπέα Πλευράς Δρομέα και Δικτύου

Για τη μηχανή διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιείται διανυσματικός έλεγχος, οι βασικές εξισώσεις του οποίου παρουσιάζονται παρακάτω. Το πλαίσιο για τον διανυσματικό έλεγχο μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένο είτε με την πεπλεγμένη μαγνητική ροή του στάτη, είτε με την τερματική τάση. Αμελώντας τα μεταβατικά φαινόμενα και την ωμική αντίσταση του στάτη, τα δύο πλαίσια ταυτίζονται. Θεωρώντας λοιπόν ότι ο άξονας  $d$  του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς βρίσκεται επί του διανύσματος της πεπλεγμένης ροής του στάτη, με βάση τις παραπάνω παραδοχές, ο άξονας  $q$  συμπίπτει με το διάνυσμα της τερματικής τάσης  $V_s$ . Επομένως, προκύπτει ότι  $u_{ds}=0$ ,  $u_{qs}=V_s$ , οπότε από την (2.19):

$$T_e = -\frac{X_M}{\omega_s X_{SS}} V_s i_{qr} \Rightarrow i_{qr} = -\frac{X_{SS}}{X_M} \frac{\omega_s}{V_s} T_e \quad (2.20)$$

και από την (2.16):

$$Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s X_{SS}} - \frac{X_M}{X_{SS}} V_s i_{dr} \Rightarrow i_{dr} = \frac{V_s}{\omega_s X_M} - \frac{X_{SS}}{X_M} \frac{Q_s}{V_s} \quad (2.21)$$

δηλαδή η κάθετη συνιστώσα  $i_{qr}$  του ρεύματος του δρομέα είναι ανάλογη της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και η ορθή συνιστώσα  $i_{dr}$  καθορίζει την άεργο ισχύ που καταναλώνει ο στάτης. Επομένως, με την κατάλληλη ρύθμιση των  $i_{qr}$  και  $i_{dr}$  μέσω του μετατροπέα πλευράς δρομέα, επιτυγχάνεται η επιθυμητή ενεργός και άεργος ισχύς του στάτη αντίστοιχα. Εφόσον οι μετατροπείς που χρησιμοποιούνται είναι τύπου πηγής τάσης, η ρύθμιση μπορεί να γίνει με τη χρήση δύο PI ελεγκτών, έξοδος των οποίων είναι οι τάσεις  $u_{qr}$  και  $u_{dr}$ .

Όσον αφορά τον έλεγχο του μετατροπέα πλευράς δικτύου, χρησιμοποιώντας το ίδιο πλαίσιο αναφοράς (με τον άξονα  $q$  επί του διανύσματος της τερματικής τάσης) και αμελώντας οποιαδήποτε ενδιάμεση σύνθετη αντίσταση, προκύπτουν:

$$P_{is} = V_s i_{qis} \quad (2.22)$$

$$Q_{is} = V_s i_{dis} \quad (2.23)$$

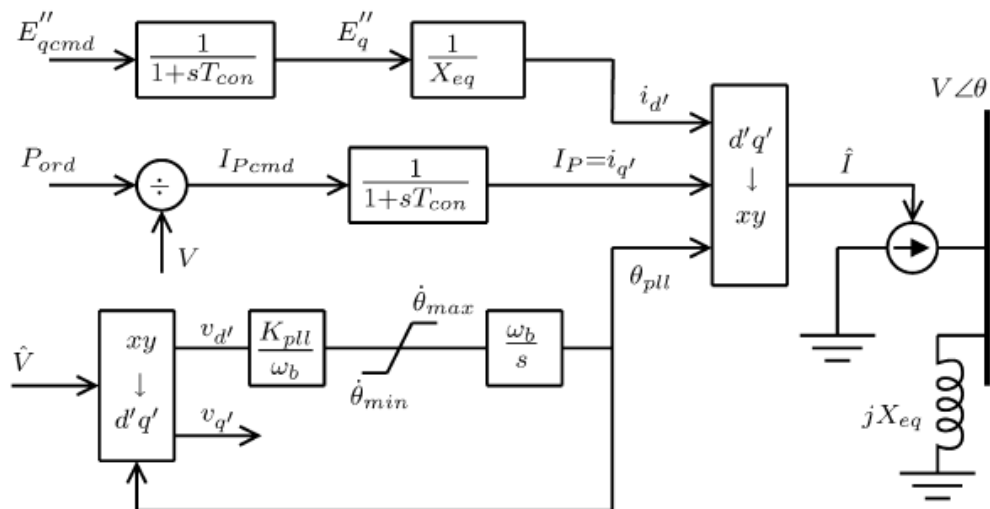
Ελέγχοντας επομένως το ρεύμα στους άξονες  $d$  και  $q$ , ελέγχεται η άεργος και η ενεργός ισχύς, αντίστοιχα. Η ενεργός ισχύς ελέγχεται μέσω της κάθετης συνιστώσας του ρεύματος  $i_{qis}$ , έτσι ώστε τάση του πυκνωτή στην DC πλευρά να διατηρείται σταθερή. Εφόσον

χρησιμοποιούνται μετατροπείς τύπου πηγής τάσης, η ρύθμιση γίνεται με τη χρήση δύο PI ελεγκτών, έξοδος των οποίων είναι οι τάσεις  $u_{qis}$  και  $u_{dis}$  αντίστοιχα.

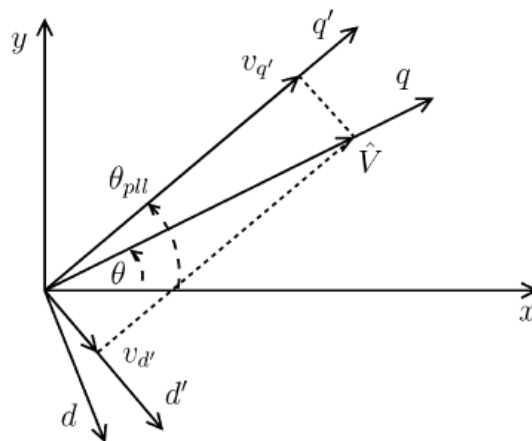
Τέλος, η υλοποίηση του διανυσματικού ελέγχου απαιτεί μια εκτίμηση της γωνίας της τερματικής τάσης, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση ενός βρόχου κλειδώματος φάσης (Phase Locked Loop, PLL). Επίσης, απαιτεί μέτρηση της γωνίας του δρομέα, ώστε να γίνει η μετατροπή από το πλαίσιο  $dq$  σε πραγματικές μεταβλητές στο δρομέα.

### 2.2.3 Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Διπλής Τροφοδότησης

Στο Σχ. 2.4 φαίνεται το διάγραμμα βαθμίδων του μοντέλου της γεννήτριας. Οι παράμετροι του σχήματος, μαζί με τις υπόλοιπες παραμέτρους του μοντέλου, δίνονται στον Πιν. 2.1 [6]. Αν και τα μεταβατικά φαινόμενα του δρομέα αμελούνται, στο μοντέλο χρησιμοποιούνται δύο χρονικές καθυστερήσεις ( $T_{con}=20ms$ ) που αναπαριστούν την καθυστέρηση των αντίστοιχων βρόχων ελέγχου. Επίσης, λαμβάνεται υπόψιν η καθυστέρηση στην ευθυγράμμιση του  $dq$  πλαισίου με την τερματική τάση. Έτσι, στο Σχ. 2.5 το πλαίσιο που καθορίζεται από το βρόχο κλειδώματος φάσης (PLL) του μετατροπέα, συμβολίζεται με  $d'q'$  και συμπίπτει με το  $dq$  στη μόνιμη κατάσταση, όταν είναι  $\theta_{pll}=\theta$ ,  $u_d=0$  και  $u_q=V$ .



Σχήμα 2. 4 Μοντέλο Γεννήτριας Διπλής Τροφοδότησης με βρόχο κλειδώματος φάσης



Σχήμα 2. 5 Σύγχρονα πλαίσια αναφοράς

**Πίνακας 2. 1** Παράμετροι μοντέλου ΑΓΔΤ με λεπτομερείς βρόχους ελέγχου

$S_{nom}$	1,667MVA	$P_{nom}$	1,5MW	$\omega_b$	100π
$T_{con}$	0,02s	$X_{eq}$	0,8	$K_{pll}$	30
$\dot{\theta}_{max}$	0,1ω <sub>b</sub>	$\dot{\theta}_{min}$	-0,1ω <sub>b</sub>	$T_w$	5s
$K_{ptrq}$	3	$K_{itrq}$	0,6	$T_{pc}$	0,05s
$K_{pp}$	150	$K_{ip}$	25	$K_{pc}$	3,33
$K_{ic}$	33,3	$P_{max}$	1,12	$P_{min}$	0,1
$\beta_{max}$	27°	$\beta_{min}$	0°	$\dot{\beta}_{max}$	10°/s
$\dot{\beta}_{min}$	-10°/s	$T_r$	0,05s	$T_u$	0,05s
$K_{pu}$	18	$K_{iu}$	5	$T_c$	0,15s
$T_p=T_{fp}$	0,3s	$Q_{max}$	0,296	$Q_{min}$	-0,436
$V_{max}$	1,1	$V_{min}$	0,9	$K_{Oi}$	0,5
$XI_{Qmax}$	0,4	$XI_{Qmin}$	-0,5	$K_{Vi}$	40
$H_g$	0,962s	$H_t$	3,395s	$D_{ig}$	2,344
$K_{tg}$	1,387	$P$	4	$P$	1,225kg/m <sup>3</sup>
$R$	35,25m	$GB$	1:90		

Στο Σχ. 2.4, η αντίδραση  $X_{eq}$  είναι η ισοδύναμη αντίδραση Norton, όταν η μηχανή αναπαρίσταται σαν ελεγχόμενη πηγή ρεύματος. Αντίστοιχα, η  $E_q''$  είναι μια ισοδύναμη τάση που ελέγχει την έγχυση αέργου ισχύος. Τέλος,  $P_{ord}$  είναι η εντολή έγχυσης ενεργού ισχύος που ζητείται από τον έλεγχο στροφών. Η συνολική έγχυση ρεύματος στο δίκτυο στο πλαίσιο  $d'q'$  του PLL είναι:

$$I_{tot} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P - \frac{V}{jX_{eq}} \quad (2.24)$$

απ'όπου προκύπτει:

$$I_{tot} = \frac{E_q'' - u_q}{X_{eq}} + j\left(I_P + \frac{u_d}{jX_{eq}}\right) \quad (2.25)$$

Σημειώνεται εδώ ότι στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι φασιθέτες συμβολίζονται με έντονα στοιχεία.

Η ενεργός και η άεργος ισχύς υπολογίζονται ως:

$$P = u_d \frac{E_q''}{X_{eq}} + u_q I_P \quad (2.26)$$

$$Q = u_q \frac{E_q''}{X_{eq}} - u_d I_P - \frac{V^2}{X_{eq}} \quad (2.27)$$

Στη μόνιμη κατάσταση ( $\theta_{pll}=\theta$  στο Σχ. 2.5), το ρεύμα  $I_P$  καθορίζει την ενεργό ισχύ και η τάση  $E_q''$  την άεργο ισχύ. Συγκρίνοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις με τις (2.17), (2.18), το ρεύμα  $I_P$  μπορεί να αντιστοιχηθεί με τον όρο  $\left(\frac{X_M}{X_{ss}} i_{qr} - i_{qis}\right)$  και το  $\frac{E_q''}{X_{eq}}$  με τον όρο  $\left(\frac{X_M}{X_{ss}} i_{dr} - i_{dis}\right)$ . Η αντιστοίχιση αυτή υποθέτει ότι στο μοντέλο που εξετάζεται εδώ, εκτός από τα μεταβατικά

του στάτη και του δρομέα, αμελούνται και οι ωμικές απώλειες. Επίσης, θεωρείται ότι η συχνότητα του δικτύου δεν απομακρύνεται σημαντικά από την ονομαστική της τιμή.

Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.2, με τον διανυσματικό έλεγχο των μετατροπέων πλευράς δρομέα και δικτύου που περιγράφηκε παραπάνω, οι συνιστώσες  $d$  και  $q$  του ρεύματος των δύο μετατροπέων ελέγχουν συνολικά τέσσερα μεγέθη: Το  $i_{qr}$  ελέγχει την ηλεκτρομαγνητική ροπή (ή τη συνολική ενεργό ισχύ), το  $i_{dr}$  την άεργο ισχύ του στάτη, το  $i_{qis}$  την ενεργό και το  $i_{dis}$  την άεργο ισχύ του μετατροπέα πλευράς δικτύου, αντίστοιχα.

Εφόσον η τάση του DC πυκνωτή θεωρηθεί σταθερή, η ενεργός ισχύς του μετατροπέα πλευράς δικτύου ισούται με την ενεργό ισχύ του μετατροπέα πλευράς δρομέα. Στο μοντέλο αυτής της ενότητας αμελούνται τα μεταβατικά του δρομέα και η δυναμική του DC πυκνωτή. Επομένως η γεννήτρια και οι δύο μετατροπείς εξετάζονται σαν ενιαίο σύνολο. Συνεπώς, οι συνιστώσες που ελέγχουν ενεργό και άεργο ισχύ ομαδοποιούνται και τα ελεγχόμενα μεγέθη είναι πλέον δύο αντί για τέσσερα.

Στο πλαίσιο  $d'q'$  είναι για την πηγή Norton:

$$\mathbf{I}_{NO} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P = I_{NO} \angle \varphi \quad (2.28)$$

Στο σύγχρονο πλαίσιο  $xy$  του δικτύου είναι:

$$\mathbf{I}_{NO} = I_{NO} \angle (\varphi + \theta_{pll} - 90^\circ) \quad (2.29)$$

και η αντίστοιχη τάση Thevenin:

$$\mathbf{V}_T = jX_{eq} \mathbf{I}_{NO} = X_{eq} I_{NO} \angle (\varphi + \theta_{pll}) \quad (2.30)$$

Επομένως, το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί ως μια τάση πίσω από μια ισοδύναμη αντίδραση. Αν το PLL θεωρηθεί ακαριαίο, τότε  $\theta_{pll} = \theta$  και η έγχυση ρεύματος στο δίκτυο είναι (πλαίσιο  $dq$ ):

$$\mathbf{I}_{tot} = \frac{E_q''}{X_{eq}} + jI_P - \frac{V}{X_{eq}} \quad (2.31)$$

Η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα είναι:

$$P = VI_P \quad (2.32)$$

$$Q = V \frac{E_q'' - V}{X_{eq}} \quad (2.33)$$

## 2.2.4 Μοντέλο Δύο Στρεφόμενων Μαζών

Στη συνέχεια, η μηχανική και ηλεκτρική ισχύς εισάγονται στη διαφορική εξίσωση του άξονα της μηχανής. Η ταχύτητα του δρομέα του ανεμοκινητήρα συμβολίζεται με  $\omega_i$  και η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας με  $\omega_g$ . Η μηχανική και η ηλεκτρομαγνητική ροπή υπολογίζονται απλά διαιρώντας τη μηχανική και την ηλεκτρική ισχύ με τις ταχύτητες  $\omega_i$  και  $\omega_g$  αντίστοιχα. Θεωρείται το μηχανικό μοντέλο δύο στρεφόμενων μαζών του Σχ. 2.6, ανηγμένο στον άξονα της γεννήτριας. Όλες δηλαδή οι μεταβλητές που αναφέρονται στον ανεμοκινητήρα έχουν αναχθεί στην πλευρά υψηλών στροφών του κιβωτίου ταχυτήτων. Το

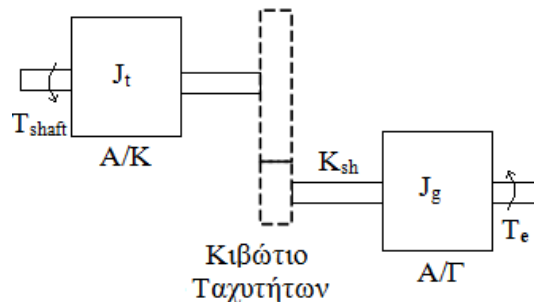
μοντέλο αυτό προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια προσομοίωσης, καθώς ο άξονας υψηλών στροφών είναι σημαντικά άκαμπτος. Επομένως, είναι αποδεκτό το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια να αντιμετωπιστούν ως μια ενιαία αδράνεια. Με σύμβαση κινητήρα, ισχύουν:

$$2H_g \frac{d}{dt} \omega_g = T_e - T_{shaft} \quad (2.34)$$

$$\frac{1}{\omega_{el}} \frac{d}{dt} \Delta\theta = \omega_g - \omega_t \quad (2.35)$$

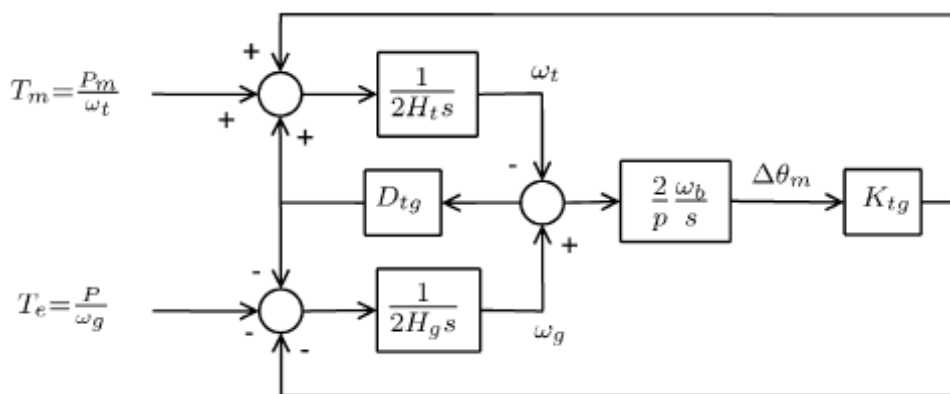
$$2H_t \frac{d}{dt} \omega_t = T_{shaft} - \frac{P_m}{\omega_t} \quad (2.36)$$

$$T_{shaft} = K_{sh} \Delta\theta + D_{sh} (\omega_g - \omega_t) \quad (2.37)$$



Σχήμα 2. 6 Σύστημα δύο στρεφόμενων μαζών

Οι παράμετροι  $H_t$  και  $H_g$  αντιπροσωπεύουν την ανηγμένη αδράνεια (σε s) του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας αντίστοιχα. Ο όρος  $\Delta\theta$  είναι η στρεπτική παραμόρφωση του άξονα (σε rad). Οι μεταβλητές  $P_m$ ,  $T_{shaft}$  και  $T_e$  αντιπροσωπεύουν την ισχύ του ανεμοκινητήρα, τη ροπή του άξονα και την ηλεκτρική ροπή της γεννήτριας (σε αμ). Με  $K_{sh}$  συμβολίζεται ο συντελεστής ελαστικότητας του άξονα. Ο συντελεστής απόσβεσης,  $D_{sh}$ , προσεγγίζει τις απώλειες κατά την περιστροφική κίνηση. Το βαθμωτό διάγραμμα του συστήματος των δύο μαζών φαίνεται στο Σχ. 2.7.

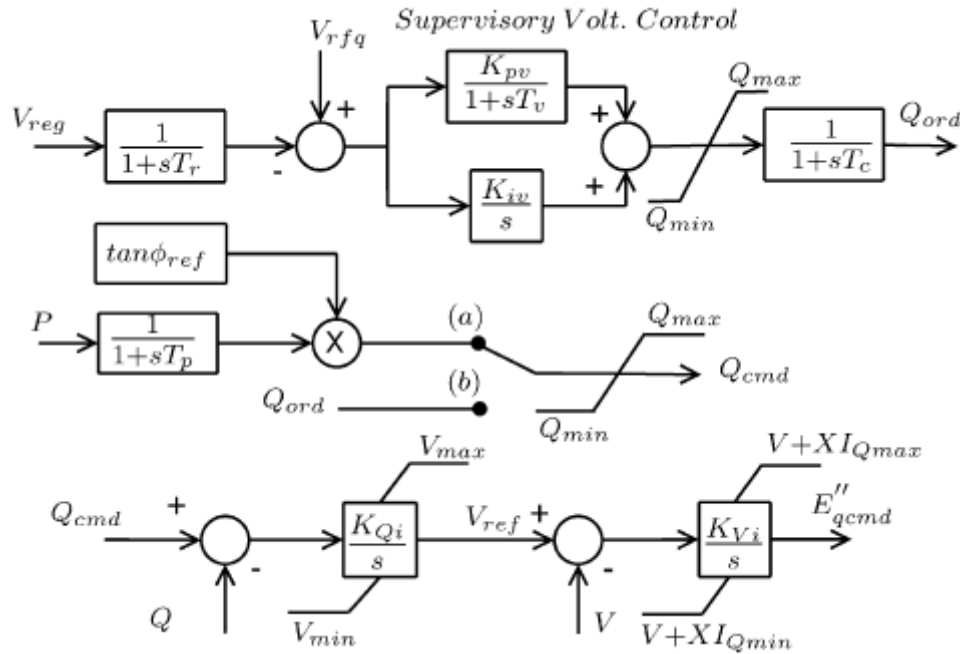


Σχήμα 2. 7 Μοντέλο Συστήματος δύο μαζών

## 2.2.5 Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος

Στο Σχ. 2.8 παρουσιάζεται ο ρυθμιστής αέργου ισχύος της ανεμογεννήτριας, ο οποίος βασίζεται στο γεγονός ότι με τη συνιστώσα  $i_{dr}$  του ρεύματος δρομέα ελέγχεται η αέργος ισχύς

του στάτη  $Q_s$ , σύμφωνα με τη σχέση (2.21). Ο έλεγχος μπορεί να είναι είτε σταθερού συντελεστή ισχύος (ο διακόπτης του Σχ. 2.8 είναι στη θέση *a*) ή σταθερής τάσης (διακόπτης στη θέση *b*). Και στις δύο περιπτώσεις, η άεργος ισχύς  $Q_{cmd}$  που ζητείται να παράγει η γεννήτρια, είναι η τιμή αναφοράς για έναν ολοκληρωτικό ελεγκτή.



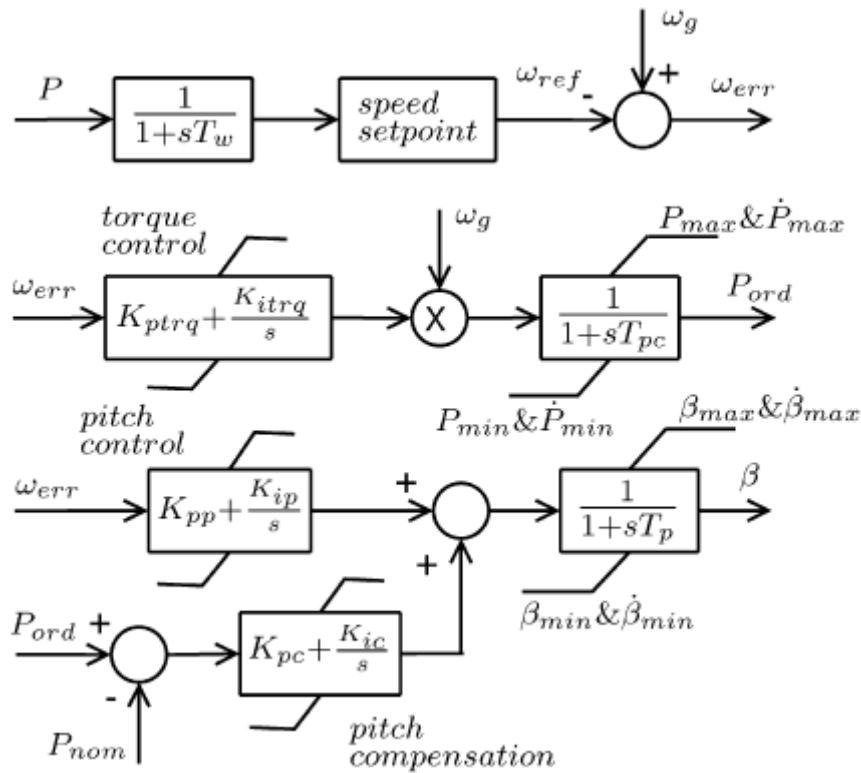
Σχήμα 2. 8 Έλεγχος Αέργου Ισχύος

## 2.2.6 Ρυθμιστής γωνίας βήματος πτερυγίων και ταχύτητας

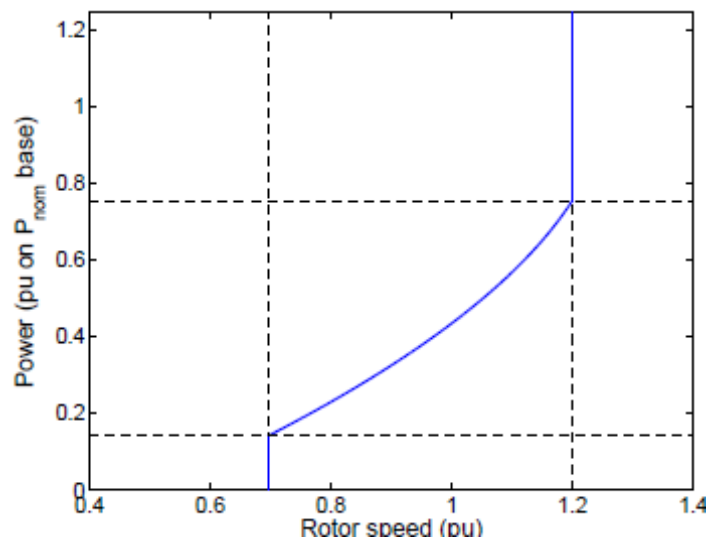
Οι βρόχοι ελέγχου της ταχύτητας και της γωνίας βήματος φαίνονται στο Σχ. 2.9. Ο έλεγχος στροφών γίνεται με βάση τη μέτρηση της παραγόμενης ενεργού ισχύος  $P$ . Η ταχύτητα αναφοράς  $\omega_{ref}$  προκύπτει από την καμπύλη ελέγχου στροφών του Σχ. 2.10 ακολουθώντας τις μεταβολές της ηλεκτρικής ισχύος. Ο ελεγκτής είναι αρκετά αργός ( $T_w = 5s$ ), ώστε να μην υπάρχει υπερβολική μηχανική καταπόνηση της γεννήτριας. Η καμπύλη του Σχ. 2.10 μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας ορίζεται ως εξής [15]:

$$\omega_{ref} = -0.67P^2 + 1.42P + 0.51 \quad (2.38)$$

Ο ρυθμιστής της γωνίας βήματος (pitch control) είναι ένας αναλογικός-ολοκληρωτικός (PI) ελεγκτής με είσοδο το σφάλμα ταχύτητας ( $\omega_{err}$ ) και έξοδο την επιθυμητή γωνία βήματος ( $\beta$ ). Αυτό σημαίνει ότι η γωνία  $\beta$  μπορεί να μεταβάλλεται και σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Συνεπώς, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι στη μόνιμη κατάσταση σε τέτοιες ταχύτητες ανέμου, το  $\beta$  θα έχει την ελάχιστη τιμή, ώστε να επιτυγχάνεται ο μέγιστος αεροδυναμικός συντελεστής. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιείται κι ένας επιπλέον βρόχος αντιστάθμισης (pitch compensation). Έτσι, στη μόνιμη λειτουργία με ισχύ κάτω της ονομαστικής, το σφάλμα του PI ελεγκτή αντιστάθμισης είναι αρνητικό και η γωνία βήματος περιορίζεται στην ελάχιστη τιμή της.



Σχήμα 2. 9 Έλεγχος ταχύτητας και βήματος έλικας

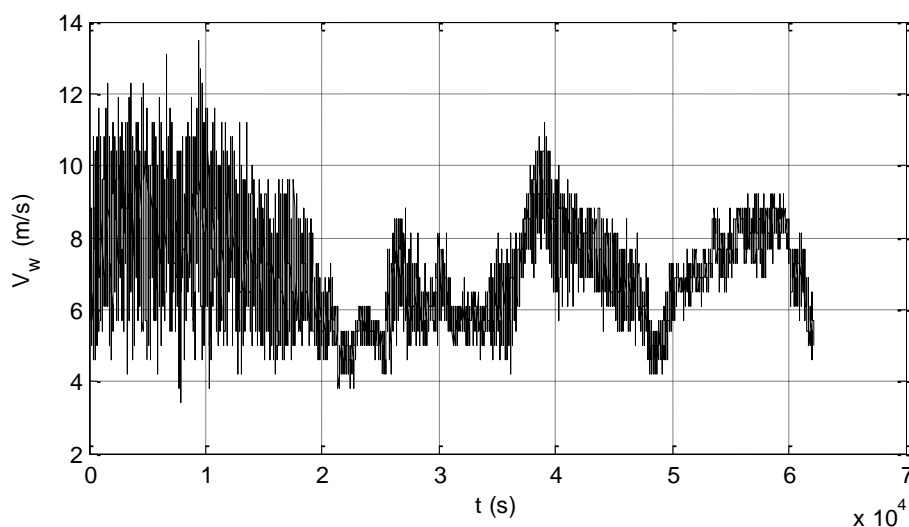


Σχήμα 2. 10 Καμπύλη ελέγχου στρωφών

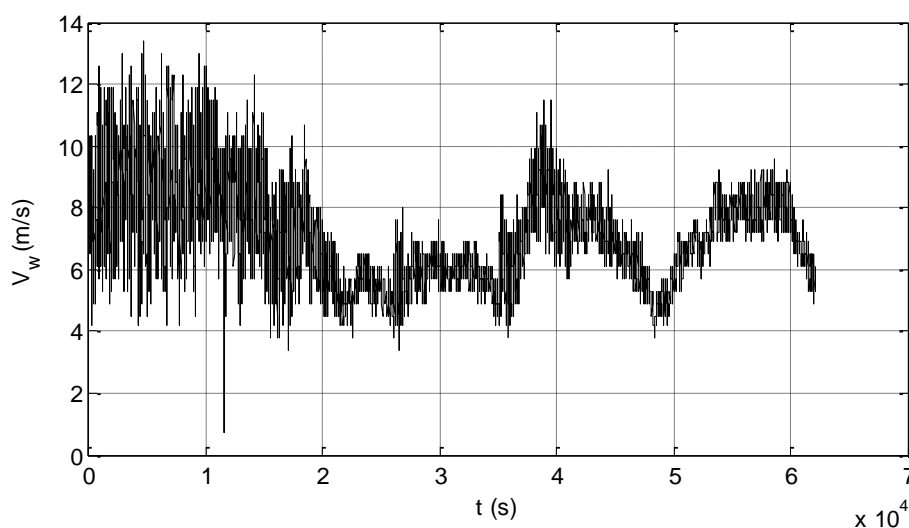
### 2.3 Εξεταζόμενες Χρονοσειρές Ενεργού Ισχύος

Στην ενότητα αυτή, εισάγονται δύο χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου στο μοντέλο του Simulink το οποίο παρουσιάστηκε παραπάνω. Οι ανεμοσειρές είναι δεδομένες από το ερευνητικό έργο [8] και προέκυψαν από ανεμολογικές μετρήσεις σε δύο Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου. Τα δύο Αιολικά Πάρκα βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους, επομένως οι αντίστοιχες χρονοσειρές είναι συσχετισμένες. Στα Σχ. 2.11 και 2.12 φαίνονται οι δύο χρονοσειρές, στις οποίες έχουν ληφθεί μετρήσεις με συνολική διάρκεια 17 ώρες και 15

λεπτά (62112s). Συγκρίνοντας τις δύο γραφικές παραστάσεις, είναι εμφανής η ομοιότητα των ρευμάτων του ανέμου στο χρόνο για τις περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα τα δύο πάρκα, κάτι που αναδεικνύει τη συσχέτιση των δεδομένων που αναφέρθηκε.



Σχήμα 2. 11 Χρονοσειρά Ανέμου 1



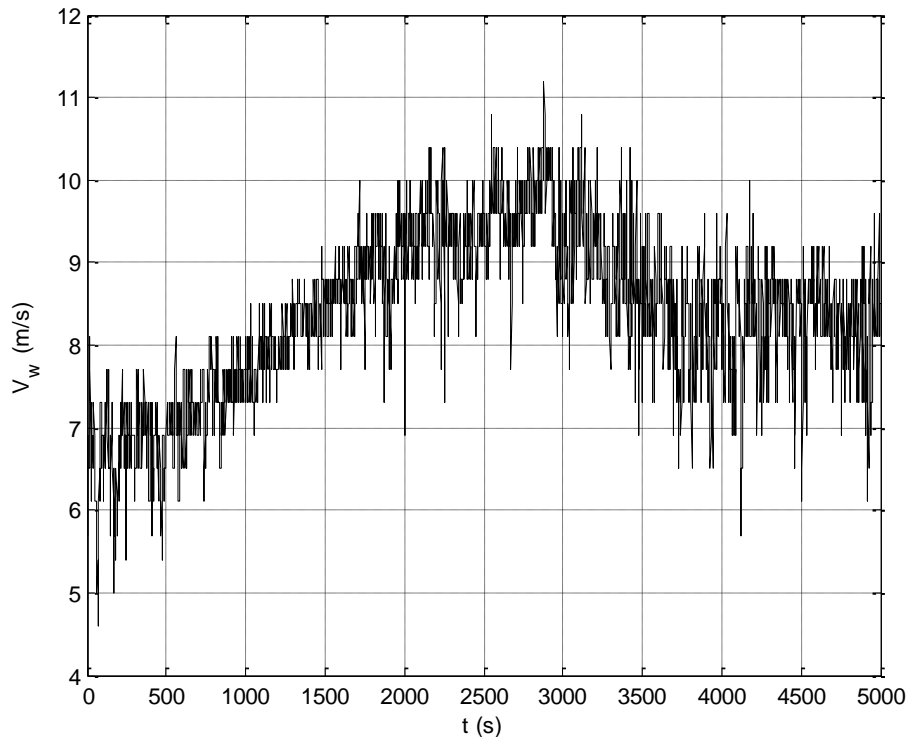
Σχήμα 2. 12 Χρονοσειρά Ανέμου 2

Από το σύνολο των 62112s των δύο χρονοσειρών ανέμου, επιλέχθηκε τμήμα χρονικής διάρκειας 1 ώρα και 23 λεπτών (5000s), το οποίο εμφανίζει μεγάλη μεταβλητότητα στις τιμές που λαμβάνει. Συγκεκριμένα, για λόγους διατήρησης της ιδιότητας της συσχέτισης, επιλέχθηκε το ίδιο τμήμα 36112s-41112s και στις δύο περιπτώσεις. Τα επιλεγμένα τμήματα από τις πλήρεις χρονοσειρές φαίνονται στα Σχ. 2.13 και 2.14.

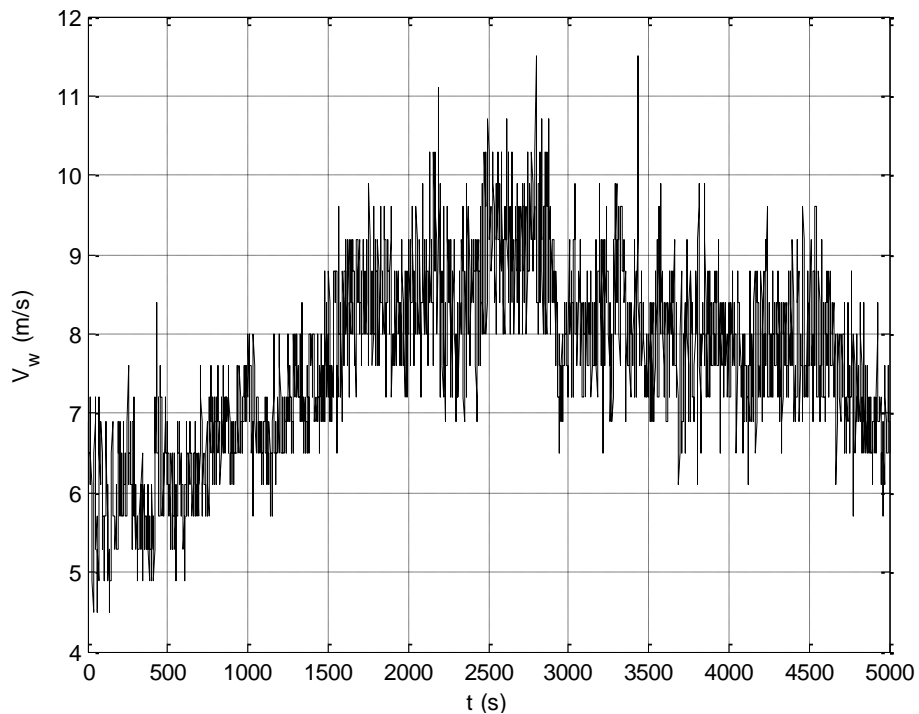
Η πρώτη χρονοσειρά (Σχ. 2.13), λαμβάνει τιμές ταχυτήτων ανέμου από 4,6m/s έως 11,2m/s, ενώ η δεύτερη χρονοσειρά (Σχ. 2.14), παίρνει τιμές από 4,5m/s έως 11,5m/s. Η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου στο πρόγραμμα προσομοίωσης έχει ληφθεί ίση με  $V_{wnom}=11\text{m/s}$ . Αν εξαιρεθούν επομένως οι σχεδόν ακαριαίες αιχμές τις οποίες εξομαλύνει το εφαρμοζόμενο



φίλτρο, παρατηρείται ότι η ταχύτητα του ανέμου δεν ξεπερνά την ονομαστική της τιμή σε κανένα σημείο της προσομοίωσης.



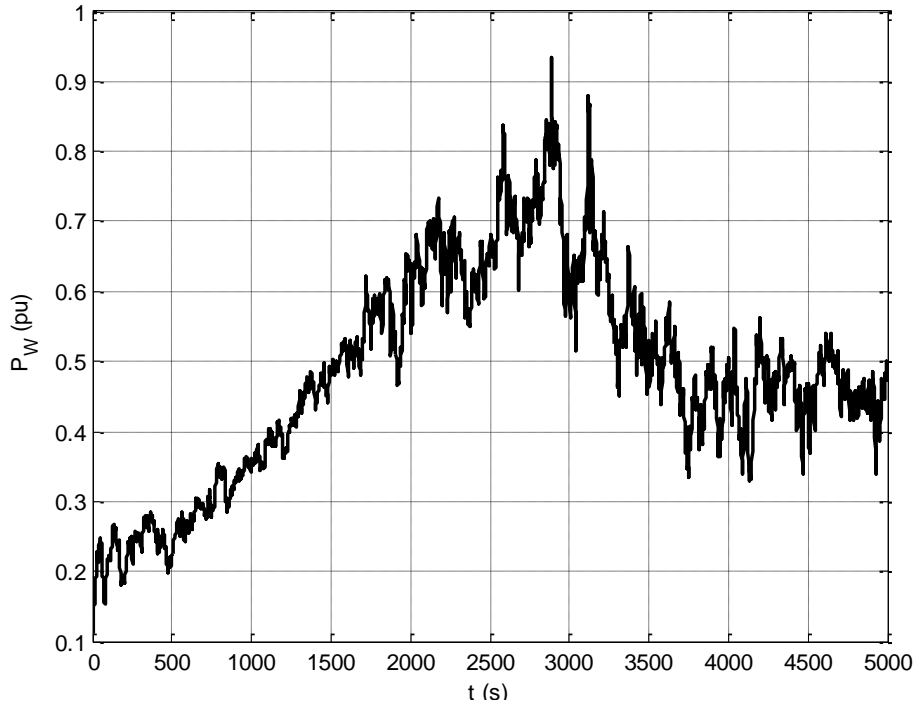
**Σχήμα 2. 13** Επιλεγμένο τμήμα Χρονοσειράς Ανέμου 1



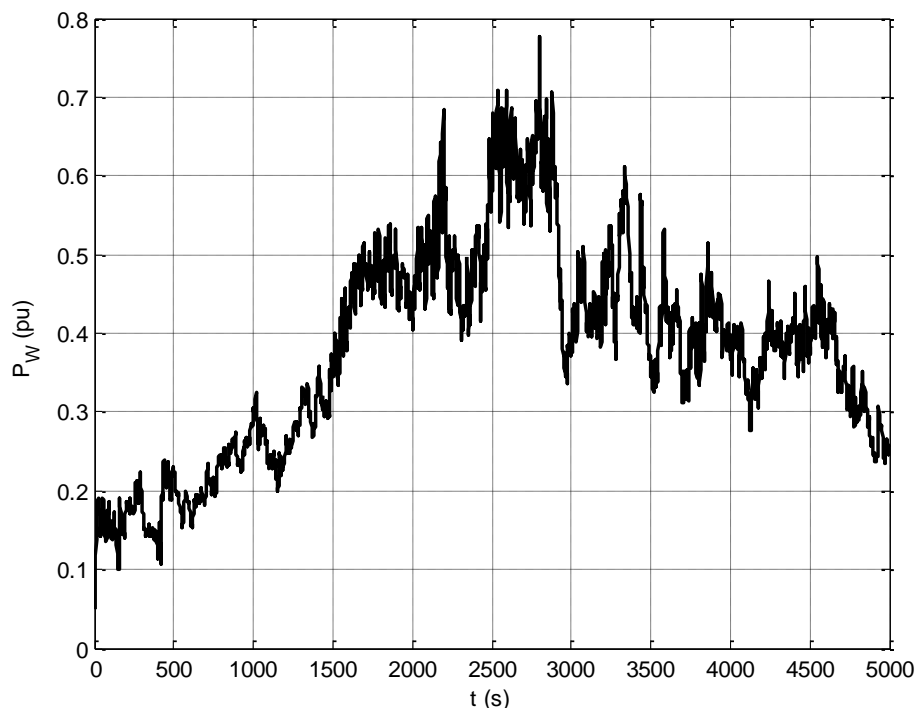
**Σχήμα 2. 14** Επιλεγμένο τμήμα Χρονοσειράς Ανέμου 2

Το μοντέλο μετατροπής δέχεται ως εισόδους του τη χρονοσειρά ανέμου και την τάση στο σημείο σύνδεσης της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο. Για τις ανάγκες της εργασίας, η τάση στο

σημείο σύνδεσης στο δίκτυο θεωρείται σταθερή και μοναδιαία. Οι εξαγόμενες χρονοσειρές της αιολικής παραγωγής φαίνονται στα Σχ. 2.15 και 2.16. Η χρονοσειρά ενεργού ισχύος του Σχ. 2.15 παίρνει τιμές από 0,1124αμ έως 0,9348αμ, ενώ εκείνη του Σχ. 2.16 λαμβάνει τιμές από 0,0489αμ έως 0,776αμ. Επομένως, ο έλεγχος γωνίας του βήματος της έλικας παραμένει ανενεργός κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Από τη σύγκριση των Σχ. 2.13-2.15 και Σχ. 2.14-2.16, παρατηρείται ότι η ίδια η ανεμογεννήτρια λειτουργεί ως βαθυπερατό φίλτρο, εξομαλύνοντας τις διακυμάνσεις της μηχανικής ισχύος.



Σχήμα 2. 15 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 1



Σχήμα 2. 16 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 2

Οι εξαγόμενες από το μοντέλο χρονοσειρές ενεργού ισχύος θα αξιοποιηθούν στο υπόλοιπο της παρούσας εργασίας για προσομοίωση και ανάλυση ενός τυπικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο συνδέεται μια γραμμή διανομής μέσης τάσης με διεσπαρμένη παραγωγή. Χρειάζεται εδώ να τονιστεί ότι το μοντέλο χρησιμοποιείται ουσιαστικά ως εργαλείο για την εξαγωγή μιας ρεαλιστικής χρονοσειράς ενεργού παραγωγής, ώστε οι προσομοιώσεις που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια να προσεγγίζουν την πραγματικότητα.



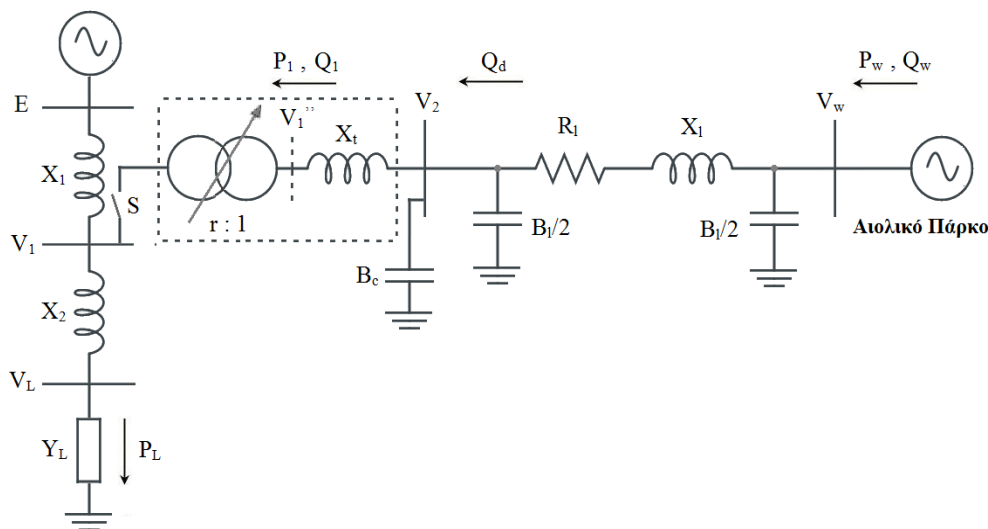
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

# Δομή και Ανάλυση Συστήματος Δοκιμών και Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς

Στο κεφάλαιο αυτό, δίνεται η περιγραφή του συστήματος δοκιμών που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις της εργασίας. Παρουσιάζονται τα δεδομένα των γραμμών σύνδεσης και των Αιολικών Πάρκων, ενώ επίσης αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (ΣΑΤΥΦ, συστοιχίες πυκνωτών, ρυθμιστής ενεργού και αέργου ισχύος του Αιολικού Πάρκου). Προκειμένου να αναδειχθεί η βελτίωση που προσφέρει στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η σύνδεση και ο έλεγχος της διεσπαρμένης παραγωγής, το σύστημα προσομοιώνεται αρχικά με την γραμμή διανομής του Αιολικού Πάρκου αποσυνδεδεμένη από το σύστημα μεταφοράς. Στη συνέχεια, γίνεται η εκτίμηση της συνεισφοράς του κάθε πάρκου χωριστά στο όριο φόρτισης του συστήματος, με τον ρυθμιστή του πάρκου να διατηρεί μοναδιαίο το συντελεστή ισχύος της παραγωγής.

### 3.1 Δομή και Δεδομένα Συστήματος Δοκιμών

Το σύστημα που εξετάζεται σε αυτή τη διπλωματική εργασία έχει τη γενική δομή του Σχ. 3.1. Πρόκειται για ένα ακτινικό δίκτυο διανομής, που αποτελείται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ και τη γραμμή διανομής μέσης τάσης, στην οποία συνδέεται το Αιολικό Πάρκο (αποκλειστική γραμμή σύνδεσης Α/Π). Η γραμμή διανομής συνδέεται στο μέσο ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει μία σταθερή πηγή τάσης  $E$ , η οποία αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο Thevenin του διασυνδεδεμένου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Το δίκτυο μεταφοράς αντιπροσωπεύουν δύο ίσες αντιδράσεις  $X_1=X_2=X$  στην πλευρά της πηγής και του φορτίου αντίστοιχα, ως προς το σημείο σύνδεσης του υποσταθμού.



Σχήμα 3. 1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών

Θεωρείται ότι το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί απομακρυσμένο φορτίο, το οποίο λαμβάνεται ως μία μεταβλητή αγωγιμότητα  $Y_L$ , απευθείας συνδεδεμένη στον ζυγό φορτίου υψηλής τάσης (YT). Για λόγους απλότητας, υποτίθεται μοναδιαίος συντελεστής ισχύος (πρακτικά πλήρης αντιστάθμιση) φορτίου, δηλαδή  $Y_L=G_L$ . Για τον εντοπισμό των συνθηκών μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, προσομοιώνεται μια συνεχής μεταβολή της αγωγιμότητας του φορτίου σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης 0,1% ανά περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή ανά 1s.

Στο Σχ. 3.1 εμφανίζεται ο διακόπτης  $S$ , ώστε το σύστημα μεταφοράς να μπορεί να εξεταστεί μόνο του, χωρίς τον υποσταθμό YT/MT και τη διεσπαρμένη παραγωγή του Αιολικού Πάρκου. Έτσι, στην περίπτωση που ο διακόπτης  $S$  είναι ανοικτός, το σύστημα διαμορφώνεται ως ένα απλοποιημένο σύστημα δύο ζυγών.

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει, θεωρούνται δύο διαφορετικές γραμμές διανομής που συνδέουν Αιολικό Πάρκο στο σύστημα του Σχ. 3.1. Τα δεδομένα των γραμμών σύνδεσης των Α/Π #1 και #2, όπως και τα ονομαστικά τους χαρακτηριστικά, συνοψίζονται στον Πιν. 3.1. Τα στοιχεία προέρχονται από δύο πραγματικά Αιολικά Πάρκα που βρίσκονται στην περιοχή της Πελοποννήσου. Τα δύο πάρκα επιλέχθηκαν λόγω των διαφορετικών χαρακτηριστικών που παρουσιάζουν, όπως διακρίνεται στον Πιν. 3.1. Το Αιολικό Πάρκο #1 είναι ονομαστικής ισχύος 18,9MVA και συνδέεται μέσω μιας μακράς γραμμής διανομής (μήκους 15km) στον υποσταθμό YT/MT. Το Αιολικό Πάρκο #2 είναι σχεδόν διπλάσιας ισχύος (36MVA) και συνδέεται πολύ κοντά στον υποσταθμό. Θεωρείται επιπλέον ότι η αιολική παραγωγή των Α/Π #1 και #2 προσδιορίζονται από τις χρονοσειρές ενεργού ισχύος των Σχ. 2.15 και 2.16 αντίστοιχα, που προέκυψαν από το μοντέλο μετατροπής του Κεφ. 2 και οι οποίες θεωρούνται ως είσοδος στο σύστημα.

Η βάση ισχύος στην οποία είναι ανηγμένα όλα τα μεγέθη, ισούται με  $S_B=100MVA$ . Ο λόγος μεταξύ της ισχύος βραχυκυκλώσεως στο σημείο σύνδεσης της αποκλειστικής γραμμής και της ονομαστικής ισχύος του Α/Π ( $S_{SCR}$ ), μας δίνει μια ιδέα για το κατά πόσο το δίκτυο που εξετάζεται είναι ασθενές.

$$S_{SCR} = \frac{S_{B/K}}{S_n} \quad (3.1)$$

όπου

$$S_{B/K} = \frac{E^2}{X} \quad (3.2)$$

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι όταν ο λόγος  $S_{SCR}$  είναι μικρότερος του 20, το σύστημα χαρακτηρίζεται ως ασθενές [16]. Αυτό που ενδιαφέρει στη μελέτη που επιχειρεί η παρούσα εργασία, είναι η επίδραση που ασκεί η μεταβλητότητα του φορτίου στη λειτουργία του συστήματος, ενώ η (3.1) δεν λαμβάνει καθόλου υπόψιν της το φορτίο. Επομένως, υπολογίζεται η ισχύς βραχυκυκλώσεως στο φορτίο:

$$S_{B/K Load} = \frac{E^2}{2X} \approx 240MVA \quad (3.3)$$

Η τιμή αυτή είναι συγκρίσιμη με τις ονομαστικές ισχύεις των δύο Αιολικών Πάρκων (Πιν. 3.1) και δίνει λόγους βραχυκυκλώσεως κοντά στο 10 για τα δύο Α/Π. Επομένως, όπου αναφέρεται ότι το σύστημα που εξετάζεται είναι ασθενές, εννοείται ότι υπάρχει περιορισμένη ικανότητα

φόρτισης του δικτύου και ότι κάθε μεταβολή στο φορτίο έχει σημαντική επίδραση στη λειτουργία του συστήματος.

Η γραμμή σύνδεσης του Αιολικού Πάρκου αποτελείται από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ, ο οποίος περιλαμβάνει μετασχηματιστή 150/20kV. Ο μετασχηματιστής ισχύος έχει ονομαστική ισχύ 50MVA, επαγωγική αντίδραση ανηγμένη στα ονομαστικά μεγέθη του Μ/Σ ίση με 0,2αμ και είναι εξοπλισμένος με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Στον ζυγό ΜΤ του υποσταθμού υπάρχουν αυτόματοι πυκνωτές αντιστάθμισης τριών βαθμίδων ισχύος 4MVA η κάθε μία, για τοπική άεργη υποστήριξη του δικτύου. Τέλος, η γραμμή διανομής 20kV συνδέει τον υποσταθμό με την ισοδύναμη γεννήτρια που αναπαριστά το Α/Π. Η συνολική ωμική αντίσταση  $R_l$  και η συνολική επαγωγική αντίδραση  $X_l$ , αναπαριστούν το ισοδύναμο μεταξύ του Α/Π και του υποσταθμού ΜΤ. Υποτίθεται ότι το Α/Π και οι επί μέρους ελεγκτές των ανεμογεννητριών, έχουν τη δυνατότητα να ρυθμίζουν την έγχυση αέργου ισχύος στον ισοδύναμο ζυγό του Α/Π, ενώ η έγχυση ενεργού ισχύος  $P_w$  αναπαριστά τη συνολική ενεργό παραγωγή του Α/Π.

**Πίνακας 3. 1** Δεδομένα Γραμμών Σύνδεσης Α/Π #1 και #2 (αμ σε  $S_B=100MVA$ )

Α/Π	$S_n$ (MVA)	$X$ (αμ)	$X_l$ (αμ)	$R_l$ (αμ)	$X_l$ (αμ)	$B_l$ (αμ)
#1	18,9	0,2	0,4	0,43	1	0,0004
#2	36	0,2	0,4	0,02	0,2	0

**Πίνακας 3. 2** Δεδομένα Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου (αμ σε  $S_B=100MVA$ )

$\Delta T$	$\Delta r$	$r_{min}$	$r_{max}$	$\Delta T_k$	$B_c$	$T_{msc}$	$Q_d^{lim}$	$V_w^{lim}$	$V_l^{lim}$
10s	0,00625	0,8	1,2	10s	0,04	60s	0,04	1,1	0,9

## 3.2 Παράσταση Διατάξεων Ρύθμισης Αέργου Ισχύος

Οι τρεις αυτόματοι μηχανισμοί ελέγχου στο σύστημα του Σχ. 3.1 (ΣΑΤΥΦ, αυτόματες συστοιχίες πυκνωτών, ρυθμιστής αέργου ισχύος Α/Π) περιγράφονται και μοντελοποιούνται σε αυτή την ενότητα. Χρειάζεται να ληφθεί υπόψιν ότι οι μηχανισμοί δεν μπορεί να δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους, αλλά απαιτείται κάποιας μορφής συντονισμός προκειμένου να αποφεύγονται ανεπιθύμητες αλληλεπιδράσεις (π.χ. ταλαντώσεις).

### 3.2.1 Παράσταση ΣΑΤΥΦ

Εκτός από τον υποβιβασμό του επιπέδου της τάσης, οι μετασχηματιστές στους υποσταθμούς διανομής επιτελούν και ρόλο ελέγχου της τάσης διανομής, γι' αυτό και είναι εφοδιασμένοι με λήψεις για την αλλαγή της σχέσης μετασχηματισμού. Στους μικρούς μετασχηματιστές διανομής, η αλλαγή αυτή των λήψεων γίνεται μόνο με τον μετασχηματιστή εκτός τάσεως. Σε αυτήν την περίπτωση, λαμβάνονται συνήθως υπόψιν τα στατιστικά δεδομένα όλης της προηγούμενης περιόδου για τα επίπεδα της τοπικής τάσης ώστε να γίνει η διορθωτική παρέμβαση.

Στους μεγαλύτερους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ του δικτύου, όπως είναι και ο μετασχηματιστής του συστήματος που εξετάζεται, ο έλεγχος γίνεται με αλλαγή της τάσης υπό φορτίο. Το σύστημα αλλαγής της τάσης υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ), λειτουργεί με

ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός του γίνεται αυτόματα, μέσω ηλεκτρονόμου που συγκρίνει μία προκαθορισμένη τάση αναφοράς με την τάση στο δευτερεύον. Αν διαπιστωθεί διαφορά δίνει κατάλληλη εντολή ανύψωσης ή μείωσης της τάσης στο σύστημα αλλαγής.

Γενικά, ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ περιλαμβάνει δύο σταθερές χρονικές καθυστερήσεις, μία αρχική καθυστέρηση  $T_{D0}$  και μια επόμενη καθυστέρηση  $T_{D1}$ . Η χρονική καθυστέρηση που μεσολαβεί για την πρώτη αλλαγή της λήψης του μετασχηματιστή είναι ίση με  $T_{D0}+T_{D1}$ , ενώ για τις επόμενες αλλαγές η καθυστέρηση είναι ίση με  $T_{D1}$ . Η ρύθμιση του λόγου μετασχηματισμού περιορίζεται από το πάνω και κάτω όριο  $r_{max}$  και  $r_{min}$  αντίστοιχα, που αντιστοιχούν στην εξάντληση των διαθέσιμων λήψεων του τυλίγματος του ΣΑΤΥΦ.

Το ΣΑΤΥΦ του συστήματος στο Σχ. 3.1 ελέγχει την πλευρά μέσης τάσης ( $V_2$ ) του μετασχηματιστή, ώστε η τελευταία να βρίσκεται εντός μιας νεκρής ζώνης  $V_{2min}$  έως  $V_{2max}$ , αλλάζοντας κατάλληλα τον λόγο μετασχηματισμού. Στον Πιν. 3.2 φαίνεται ότι η χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ ορίζεται ίση με  $\Delta T=10s$  για κάθε κίνηση, ενώ έχει θεωρηθεί μηδενική αρχική χρονική καθυστέρηση. Τα όρια του λόγου μετασχηματισμού  $r$  ορίζονται  $r_{min}=0,8\alpha\mu$  μέχρι  $r_{max}=1,2\alpha\mu$ , ενώ το βήμα μεταβολής είναι σταθερό και ισούται με  $\Delta r=0,00625\alpha\mu$  (Πιν.3.2). Ο διακριτός έλεγχος του ΣΑΤΥΦ μοντελοποιείται μέσω της παρακάτω εξίσωσης διαφορών:

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & \text{αν } V_2 > V_{2max} = V_{20} + d \text{ και } r_k < r_{max} \\ r_k - \Delta r, & \text{αν } V_2 < V_{2min} = V_{20} - d \text{ και } r_k > r_{min} \\ r_k, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου

- $V_2$ , η τάση δευτερεύοντος του μετασχηματιστή.
- $r_k$ , ο λόγος μετασχηματισμού τη χρονική στιγμή  $t_k=k\Delta t$ .
- $\Delta r$ , το βήμα αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού.
- $2d$  το εύρος νεκρής ζώνης της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Έχει θεωρηθεί  $d=\Delta r=0,00625\alpha\mu$ .

### 3.2.2 Παράσταση Αυτομάτων Μηχανισμών Ζεύξης-Απόζευξης Πυκνωτών

Οι μηχανισμοί αυτοί παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση των τάσεων και της αέργου ισχύος σε ικανοποιητικά επίπεδα. Βέβαια, η ευνοϊκή επίδραση των συνδεδεμένων πυκνωτών μειώνεται από το γεγονός ότι σε ενδεχόμενη μείωση της τάσης, η παροχή αέργου ισχύος μειώνεται με το τετράγωνο της τάσης. Η διαδικασία σύνδεσης και αποσύνδεσης των πυκνωτών γίνεται με μια χρονική καθυστέρηση  $T_{msc}$ , συνήθως αρκετών δεκάδων δευτερολέπτων, ώστε να αποτραπούν ανεπιθύμητες ή άσκοπες ρυθμίσεις και παράλληλα να αφήνεται επαρκές χρονικό διάστημα για να ρυθμιστούν οι τάσεις από άλλους μηχανισμούς, όπως τα ΣΑΤΥΦ.

Στο σύστημα του Σχ. 3.1 οι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι τριών βαθμίδων, αγωγιμότητας  $B_c=0,04\alpha\mu$  η κάθε μία, συνδεδεμένοι στον ζυγό ΜΤ του υποσταθμού, όπως φαίνεται στον Πιν. 3.2. Η χρονική καθυστέρηση ζεύξης ή απόζευξης των πυκνωτών ορίζεται στα  $T_{msc}=60s$  (Πιν. 3.2), για αποφυγή αλληλεπιδράσεων με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ. Η αέργος υποστήριξη πραγματοποιείται με την αυτόματη ζεύξη κάθε βαθμίδας, η οποία εφαρμόζεται ανάλογα με την τιμή της αέργου ισχύος της γραμμής μέσης τάσης που προέρχεται απ' το Αιολικό Πάρκο ( $Q_d$ ). Ο μηχανισμός αυτόματης ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών επιλέγεται να επιτηρεί την



άεργο ισχύ  $Q_d$ , διότι η τάση διανομής  $V_2$  ελέγχεται από το ΣΑΤΥΦ. Ο διακριτός έλεγχος της ζεύξης των αυτομάτων πυκνωτών μοντελοποιείται μέσω της παρακάτω εξίσωσης διαφορών:

$$B_{c,k+1} = \begin{cases} B_{c,k} + \Delta B_c, & \text{αν } Q_d > \Delta Q_c \text{ και } B_{c,k} < B_{c,max} \\ B_{c,k} - \Delta B_c, & \text{αν } Q_d < 0 \text{ και } B_{c,k} > B_{c,min} \\ B_{c,k}, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (3.5)$$

όπου

- $Q_d$ , η ροή αέργου ισχύος στον ελεγχόμενο ζυγό.
- $B_{c,k}$ , η αγωγιμότητα της συστοιχίας τη χρονική στιγμή  $t_k = k\Delta t$ .
- $\Delta B_c$ , το βήμα μεταβολής της αγωγιμότητας των πυκνωτών.
- $\Delta Q_c$ , η νεκρή ζώνη για τη ρύθμιση της αέργου ισχύος.

Η νεκρή ζώνη, η υπέρβαση της οποίας καθορίζει την στιγμή ζεύξης ή απόζευξης των πυκνωτών είναι (Πιν. 3.2):

$$Q_d^{lim} = \Delta Q_c = V_B^2 \Delta B_c = 0,04\alpha\mu \quad (3.6)$$

Στόχος δηλαδή του μηχανισμού είναι να διατηρηθεί η  $Q_d$  θετική αλλά μικρότερη του  $Q_d^{lim}$ . Η φορά της ροής ισχύος θεωρείται θετική από το Αιολικό Πάρκο προς το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3.2.3 Παράσταση Μετατροπέα Ηλεκτρονικών Ισχύος

Ανεξάρτητα από τον τύπο των ανεμογεννητριών, θεωρείται ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς ρυθμίζονται ακαριαία σε σχέση με το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση (1s). Επομένως, ο μετατροπέας πρακτικά μπορεί να κάνει όσες ρυθμίσεις χρειάζονται στο σύστημα, χωρίς να αυξάνει ο χρόνος της προσομοίωσης. Οι λεπτομερείς βρόχοι ελέγχου των ρυθμιστών της ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης έχουν ήδη δοθεί στην Ενότητα 2.2. Ειδικότερα, ο ρυθμιστής αέργου ισχύος (Σχ. 3.2), έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί είτε ρύθμιση του συντελεστή ισχύος ή ρύθμιση της τάσης του ζυγού MT του πάρκου, μέσω της δράσης ενός ολοκληρωτικού ελεγκτή.

Στην περίπτωση ρύθμισης της τάσης του Αιολικού Πάρκου, ως εξίσωση ισορροπίας λαμβάνεται η:

$$V_w = V_{ref} \quad (3.7)$$

η οποία ικανοποιείται δεδομένου ότι ο ολοκληρωτικός ελεγκτής δεν αφήνει σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση. Η αντίστοιχη εξίσωση ισορροπίας για ρύθμιση συντελεστή ισχύος είναι η:

$$Q_w = P_w \tan\phi_{ref} \quad (3.8)$$

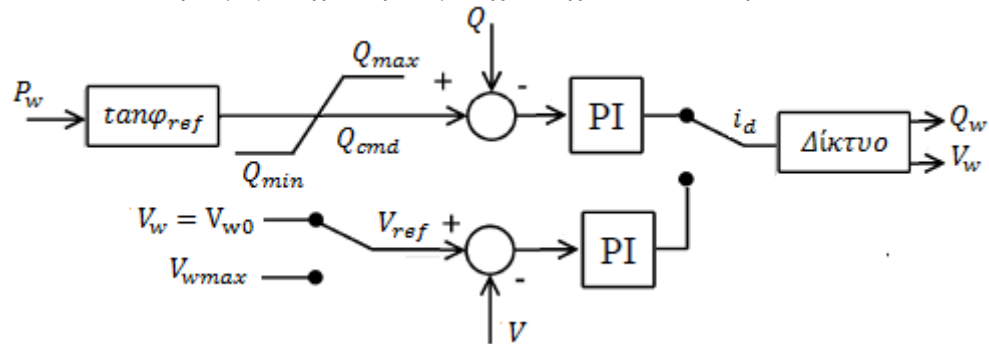
Στη λειτουργία με ρύθμιση του συντελεστή ισχύος της παραγωγής, μετά τον υπολογισμό της παραγόμενης αέργου ισχύος από την (3.8) για μια δεδομένη χρονική στιγμή, προσδιορίζεται η τάση  $V_w$  που αντιστοιχεί στη σταθερή  $Q_w$  και εισάγεται στις αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου. Επομένως σε κάθε περίπτωση, ως μεταβλητή κατάστασης του ρυθμιστή αέργου ισχύος λαμβάνεται η τάση του Αιολικού Πάρκου  $V_w$ , όπως θα εξηγηθεί σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

Θεωρείται ότι ο ελεγκτής αέργου ισχύος έχει τη δυνατότητα να αυξάνει την τάση  $V_w$  του σημείου σύνδεσης του Α/Π στο δίκτυο μέσης τάσης σε μια κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, όταν δηλαδή η υψηλή τάση  $V_1$  του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο  $V_1^{lim}$ . Η συγκεκριμένη στρατηγική απαιτεί ένα διακριτό σήμα που ζητάει μέγιστη άεργο υποστήριξη από τη διεσπαρμένη παραγωγή (στην περίπτωσή μας από το Α/Π). Μόλις το σήμα ληφθεί, η ελεγχόμενη τάση  $V_w$  αυξάνει στη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή  $V_w^{lim}$ . Εναλλακτικά, το σήμα μέγιστης άεργης υποστήριξης μπορεί να σταλεί από τον διαχειριστή του συστήματος, σε όποια χρονική στιγμή εκτιμηθεί ότι υπάρχει έκτακτη ανάγκη. Ας σημειωθεί ότι τίθεται μια χρονική καθυστέρηση 10s, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι ενδεχόμενες ακαριαίες μεταβολές της  $V_1$  που επανέρχονται αμέσως εντός των επιθυμητών ορίων, δεν ενεργοποιούν τον έλεγχο. Η λογική έλεγχου με την οποία προσαρμόζεται η τάση  $V_w$  του Α/Π, εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_w = V_w^{lim}, \text{ εάν } V_1 < V_1^{lim} \quad (3.9)$$

όπου

- $V_1^{lim}$ : κάτω όριο ελέγχου της υψηλής τάσης  $V_1$  για μέγιστη άεργο υποστήριξη.
- $V_w^{lim}$ : όριο μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης Αιολικού Πάρκου.



Σχήμα 3. 2 Ρυθμιστής Αέργου Ισχύος

Φυσικά, οι δυνατότητες του μετατροπέα για έλεγχο της αέργου ισχύος περιορίζονται από την ικανότητα φόρτισής του. Στην παρούσα εργασία, αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την πραγματική τεχνολογία των ανεμογεννητριών των Αιολικών Πάρκων, θεωρείται ότι συνεισφέρουν έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος μέχρι την τιμή που επιτρέπουν τα ονομαστικά τους μεγέθη (μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα). Συνεπώς, σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου επιτρεπόμενου ρεύματος  $I^{lim}$  του μετατροπέα, μειώνεται ακαριαία η τάση  $V_w$ , μέχρι να επιτευχθεί η επαναφορά του ρεύματος εντός των επιθυμητών ορίων ( $I_w < I^{lim}$ ). Προφανώς, από τη στιγμή που επενεργήσει ο περιοριστής ρεύματος, δεν είναι δυνατός ο έλεγχος τάσεως/αέργου ισχύος, οπότε ο ρυθμιστής αέργου ισχύος διατηρεί την τιμή του ρεύματος στο όριο.

Ο ρυθμιστής ενεργού ισχύος, φροντίζει η ενεργός ισχύς του μετατροπέα να ισούται με την ενεργό παραγωγή του πάρκου, η οποία αποτελεί είσοδο στο σύστημα. Συγκεκριμένα, κατά τη μελέτη του συστήματος με μεταβλητή αιολική παραγωγή, θεωρείται ότι η ενεργός ισχύς του μετατροπέα κάθε χρονική στιγμή ισούται με την τιμή της αντίστοιχης χρονοσειράς ισχύος του Κεφ. 2 εκείνη τη στιγμή. Η ενεργός παραγωγή στο μοντέλο της Ενότητας 2.2 (Σχ. 2.4) ρυθμίζεται από την εντολή έγχυσης ενεργού ισχύος  $P_{ord}$  που ζητείται από τον ρυθμιστή στροφών.

### 3.3 Επίλυση Αλγεβρικών Εξισώσεων

Συνοπτικά, οι αλγεβρικές εξισώσεις του δικτύου συμβολίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} V_1 &= g_1(V_w, r, B_c) \\ V_2 &= g_2(V_w, r, B_c) \\ Q_d &= g_3(V_w, r, B_c) \\ I_w &= g_4(V_w, r, B_c) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Θεωρείται δηλαδή ότι τα μεγέθη  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $Q_d$ ,  $I_w$  προσδιορίζονται όταν είναι γνωστές οι μεταβλητές κατάστασης  $V_w$ ,  $r$ ,  $B_c$  του συστήματος. Συγκεκριμένα, η  $V_w$  είναι η μεταβλητή κατάστασης του ρυθμιστή αέργου ισχύος του μετατροπέα πηγής τάσεως,  $r$  είναι η μεταβλητή κατάστασης του ΣΑΤΥΦ που προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.4) και  $B_c$  είναι η μεταβλητή κατάστασης του μηχανισμού ζεύξης των στατών πυκνωτών, που προσδιορίζεται από την εξίσωση (3.5). Η ενεργός ισχύς  $P_w$  και η αγωγιμότητα του φορτίου  $Y_L$  θεωρούνται γνωστές σε κάθε βήμα και αποτελούν τις εισόδους του συστήματος.

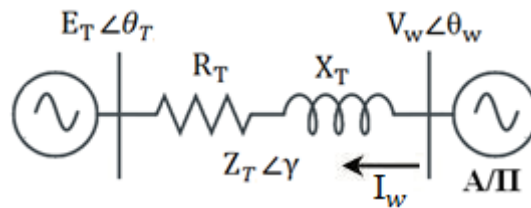
Για την επίλυση των εξισώσεων (3.10), το σύστημα του Σχ. 3.1 ανάγεται στην πλευρά ΜΤ και υπολογίζεται το ισοδύναμο Thevenin, όπως φαίνεται από την πλευρά του Αιολικού Πάρκου. Ο αναλυτικός υπολογισμός της τάσης και της σύνθετης αντίστασης Thevenin έχει υλοποιηθεί στην εργασία [13]. Η τάση και η (ωμική και επαγωγική) αντίσταση Thevenin, οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 3.3, δίνονται εδώ ως συναρτήσεις:

$$\begin{aligned} E_T &= f_E(E, Y_L, r, B_c) \\ \theta_T &= f_\theta(E, Y_L, r, B_c) \\ R_T &= f_R(E, Y_L, r, B_c) \\ X_T &= f_X(E, Y_L, r, B_c) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Για το μέτρο και τη γωνία της σύνθετης αντίστασης Thevenin ( $Z_T$ ), ισχύουν:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} \quad (3.12)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{X_T}{R_T} \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.3 Ισοδύναμο Thevenin Συστήματος στην πλευρά του Αιολικού Πάρκου

Από το Σχ. 3.3, είναι δυνατός ο υπολογισμός της μιγαδικής ισχύος του Α/Π ως εξής:

$$S_w = V_w I_w^* = V_w \left( \frac{V_w - E_T}{Z_T} \right)^* = \frac{V_w^2 - V_w E_{TH} \angle (\theta_w - \theta_{TH})}{Z_{TH} \angle -\gamma} \quad (3.14)$$

Ορίζονται

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma \quad (3.15)$$

$$\Delta\theta = \theta_T - \theta_w \quad (3.16)$$

Επομένως η (3.14) γίνεται:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_w &= P_w + jQ_w = \frac{V_w^2}{Z_T} \angle \left( \frac{\pi}{2} - \beta \right) - \frac{V_w E_T}{Z_T} \angle \left( \frac{\pi}{2} - \Delta\theta - \beta \right) \\ &= \frac{V_w^2}{Z_T} \sin\beta - \frac{V_w E_T}{Z_T} \sin(\Delta\theta + \beta) + j \left[ \frac{V_w^2}{Z_T} \cos\beta - \frac{V_w E_T}{Z_T} \cos(\Delta\theta + \beta) \right] \end{aligned} \quad (3.17)$$

Η γωνία  $\Delta\theta$  προκύπτει από την επίλυση της  $P_w$ , η οποία είναι το πραγματικό μέρος της (3.17):

$$\Delta\theta = \sin^{-1} \left( \frac{-P_w + R_T \frac{V_w^2}{Z_T}}{\frac{V_w E_T}{Z_T}} \right) - \beta \quad (3.18)$$

Η άεργος ισχύς  $Q_w$  είναι το φανταστικό μέρος της σχέσης (3.17):

$$Q_w = \frac{V_w^2}{Z_T} \cos\beta - \frac{V_w E_T}{Z_T} \cos(\Delta\theta + \beta) \quad (3.19)$$

Επίσης, η γωνία της τάσης του Αιολικού Πάρκου  $\theta_w$  υπολογίζεται απευθείας από την (3.16). Επομένως, μπορούν να καταστρωθούν οι εξισώσεις τάσεων, ρευμάτων και ισχύος του συστήματος. Το ρεύμα του Αιολικού Πάρκου, του πρώτου παράλληλου κλάδου αγωγιμότητας  $B_l/2$  και της γραμμής διανομής, είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{I}_w = \frac{P_w - jQ_w}{\mathbf{V}_w^*} \quad (3.20)$$

$$\mathbf{I}_{b2} = j \frac{B_l}{2} \mathbf{V}_w \quad (3.21)$$

$$\mathbf{I}_l = \mathbf{I}_w - \mathbf{I}_{b2} \quad (3.22)$$

Η τάση στο ζυγό ΜΤ του Υ/Σ ( $V_2$ ) ισούται με:

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_w - \mathbf{I}_l (R_l + jX_l) \quad (3.23)$$

Το ρεύμα που διέρχεται από τις συστοιχίες πυκνωτών, το ρεύμα του δεύτερου παράλληλου κλάδου αγωγιμότητας  $B_l/2$  και το ρεύμα του μετασχηματιστή ισχύος, είναι αντίστοιχα:

$$\mathbf{I}_c = jB_c \mathbf{V}_2 \quad (3.24)$$

$$\mathbf{I}_{b1} = j \frac{B_l}{2} \mathbf{V}_2 \quad (3.25)$$

$$\mathbf{I}_t = \mathbf{I}_l - \mathbf{I}_{b1} - \mathbf{I}_c \quad (3.26)$$

Η υψηλή τάση  $V_1$  ισούται με:

$$\mathbf{V}_1'' = \mathbf{V}_2 - jX_t \mathbf{I}_t \quad (3.27)$$

$$\mathbf{V}_1 = r \mathbf{V}_1'' \quad (3.28)$$

Η ενεργός ισχύς που εγχέεται στο ζυγό υψηλής τάσης μέσω του Αιολικού Πάρκου είναι:

$$P_1 = P_w - I_l^2 R_l \quad (3.29)$$

Το ρεύμα και η ενεργός ισχύς του φορτίου και του δικτύου είναι αντίστοιχα:

$$I_L = \frac{V_1}{\frac{1}{G_L} + jX} \quad (3.30)$$

$$I_e = \frac{I_t}{r} - I_L \quad (3.31)$$

$$P_L = \frac{I_L^2}{G} \quad (3.32)$$

$$P_e = P_L - P_1 \quad (3.33)$$

Τέλος, η τάση του ζυγού φορτίου είναι ίση με:

$$V_L = V_1 - jXI_L \quad (3.34)$$

Συνεπώς, όλες οι μεταβλητές της (3.10) προσδιορίζονται μετά την επίλυση της (3.18) που είναι συνάρτηση της  $V_w$  και του ισοδύναμου Thevenin (3.11).

Στον Πιν. 3.3, φαίνεται η αρχικοποίηση του συστήματος για τα δύο Αιολικά Πάρκα. Οι αρχικές τιμές της υψηλής τάσης  $V_{10}$  του υποσταθμού και της ενεργού και αέργου ισχύος στο ζυγό υψηλής τάσης του υποσταθμού ( $P_{10}$  και  $Q_{10}$  αντίστοιχα), είναι δεδομένα από ένα στιγμιότυπο του συστήματος για κάθε ένα από τα δύο Αιολικά Πάρκα. Η αρχική μέση τάση του υποσταθμού  $V_{20}$  προσδιορίζεται από την επίλυση της παρακάτω διτετράγωνης εξίσωσης για ακτινικό δίκτυο (Ενότητα 1.4.3):

$$(V_{20}^2)^2 + (2(Q_1(X_t + X_l) + P_1R_l) - V_w^2)V_{20}^2 + (R_l^2 + (X_t + X_l)^2)(P_1^2 + Q_1^2) = 0 \quad (3.35)$$

Τα υπόλοιπα μεγέθη του δικτύου αρχικοποιούνται σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις.

**Πίνακας 3. 3** Αρχικοποίηση Δικτύου (αμ σε  $S_B=100\text{MVA}$ )

A/Π	E	$P_{L0}$	$r_0$	$V_{10}$	$P_{10}$	$Q_{10}$	$V_{20}$	$V_{2max}$	$V_{2min}$	$V_{w0}$
#1	0,9703	0	0,9938	0,9722	0,0210	0,0091	0,9821	0,9883	0,9758	1,0008
#2	0,9778	0	0,9875	0,9808	0,0176	0,0144	0,999	1,0052	0,9927	1,0022

### 3.4 Προσομοίωση σε Matlab

Η προσομοίωση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έγινε με βάση το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στην εργασία [13] σε περιβάλλον Matlab. Ο κώδικας τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε το χρονικό βήμα της προσομοίωσης να είναι 1s, ίσο δηλαδή με την περίοδο δειγματοληψίας των χρονοσειρών ενεργού παραγωγής των Αιολικών Πάρκων.

Σε κάθε χρονικό βήμα, επιλύονται οι αλγεβρικές εξισώσεις (3.10) με δεδομένες τις τιμές των μεταβλητών κατάστασης  $V_w$ ,  $r$ ,  $B_c$  του συστήματος και εισόδους την ενεργό παραγωγή  $P_w$  και την αγωγιμότητα του φορτίου  $G_L$ . Εάν παραβιάζεται το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος, ενεργοποιείται η προστασία υπερφόρτισης του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος και η τάση του Αιολικού Πάρκου  $V_w$  μειώνεται στο ίδιο χρονικό βήμα, ώστε να διατηρήσει το ρεύμα στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή. Έπειτα από κάθε μεταβολή στη μεταβλητή κατάσταση  $V_w$ , επιλύονται εκ νέου οι εξισώσεις (3.10).

Στη συνέχεια, επιλύεται η εξίσωση (3.4) της λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, μέσω του ελέγχου της τάσης διανομής  $V_2$  του υποσταθμού. Το βήμα αυτό υλοποιείται μόνο μία φορά σε κάθε χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Έπειτα από την ολοκλήρωση του δράσης του ΣΑΤΥΦ, επιλύονται εκ νέου οι εξισώσεις (3.10).

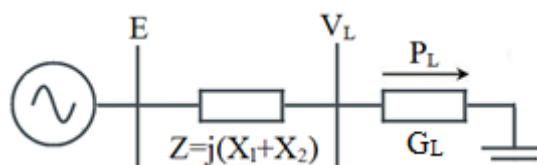
Τέλος, επιλύεται η εξίσωση (3.5) της λειτουργίας του αυτομάτου μηχανισμού των στατών πυκνωτών, μέσω του ελέγχου της ροής αέργου ισχύος της γραμμής μέσης τάσης  $Q_d$ . Το βήμα αυτό δεν επαναλαμβάνεται την ίδια χρονική στιγμή και μετά την ολοκλήρωσή του, επιλύονται για τελευταία φορά οι εξισώσεις (3.10) και ολοκληρώνεται μία περίοδος της προσομοίωσης.

### 3.5 Λειτουργία Χωρίς Αιολικό Πάρκο

Προκειμένου να αναδειχθεί η βελτίωση που προσφέρει στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η σύνδεση και ο έλεγχος των δύο Αιολικών Πάρκων, το σύστημα προσομοιώνεται αρχικά με την γραμμή της διεσπαρμένης παραγωγής αποσυνδεδεμένη από το σύστημα μεταφοράς (ανοικτός διακόπτης  $S$  στο Σχ. 3.1). Σ' αυτή τη λειτουργία επομένως, δεν υπάρχει υποστήριξη από τη διεσπαρμένη παραγωγή και το δίκτυο διαμορφώνεται ως απλοποιημένο σύστημα δύο ζυγών [17], όπως ακριβώς φαίνεται στο Σχ. 3.4. Σ' αυτή την περίπτωση, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για μοναδιαίο συντελεστή ισχύος φορτίου, με βάση τη σχέση (1.10) της Ενότητας 1.4.3 ισούται με:

$$P_{Lmax} = \frac{E^2}{2X_{o\lambda}} = \frac{E^2}{2(X_1 + X_2)} = \frac{E^2}{4X} \quad (3.36)$$

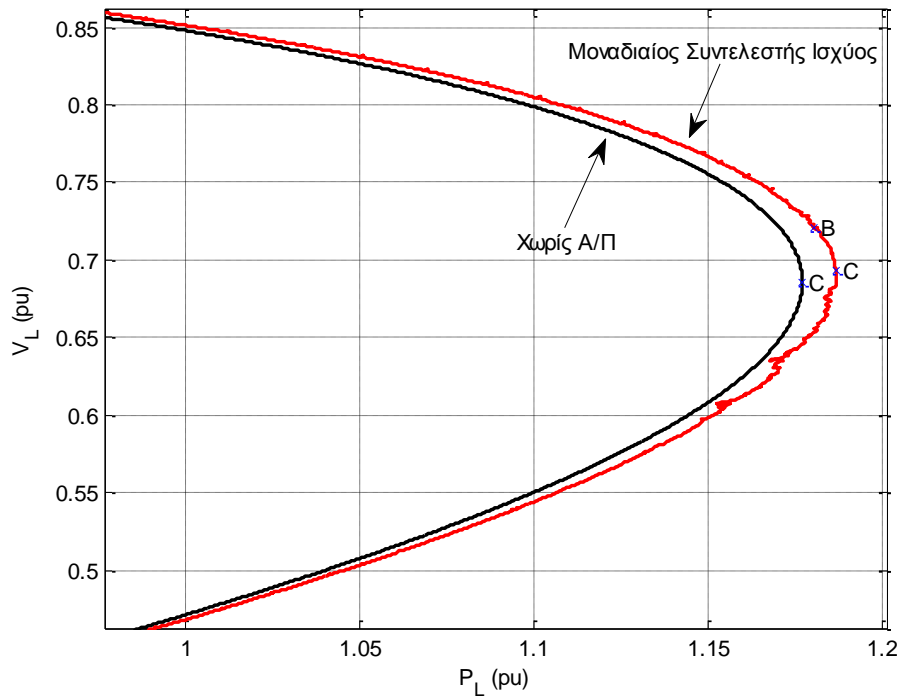
δεδομένου ότι  $X_1 = X_2 = X$ .



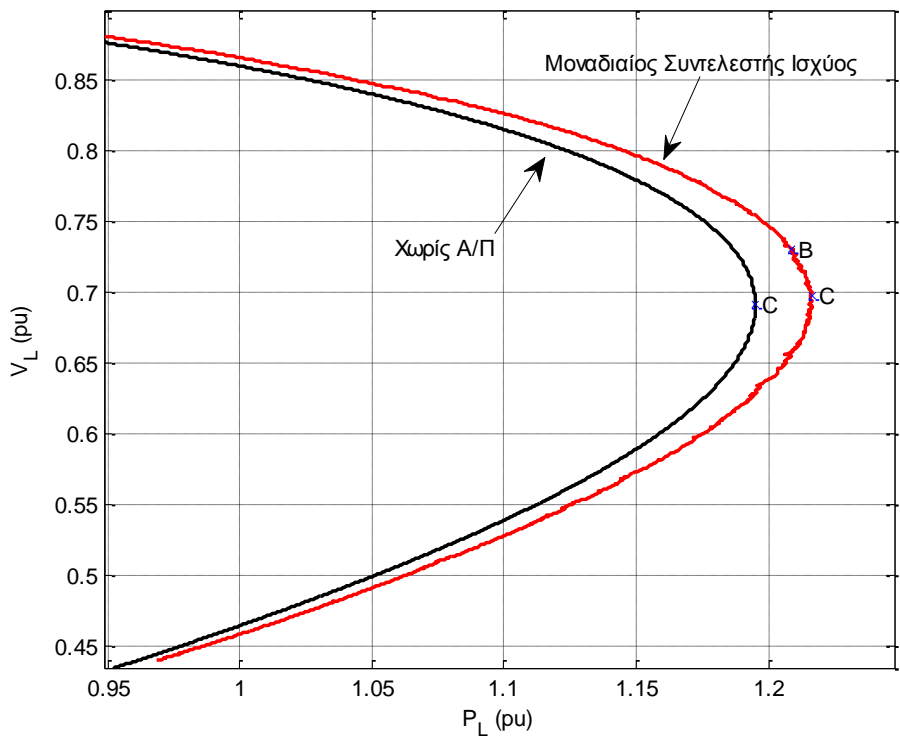
Σχήμα 3. 4 Σύστημα δύο ζυγών

Σημειώνεται ότι η ισοδύναμη σταθερή τάση  $E$  του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αρχικοποιείται σε διαφορετική τιμή για τα δεδομένα σύνδεσης κάθε Αιολικού Πάρκου, όπως φαίνεται στον Πιν. 3.3. Στην πραγματικότητα δηλαδή, εξετάζονται δύο διαφορετικά συστήματα, τα οποία είναι ίδια όμως ως προς τη δομή και τη συμπεριφορά του φορτίου.

Στα Σχ. 3.5 και 3.6 τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω, οι γραμμές με μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύουν τις καμπύλες ισχύος-τάσης του φορτίου ( $PV$  καμπύλες) για τα συστήματα του Α/Π #1 και του Α/Π #2 (με ανοικτό το διακόπτη  $S$  στο Σχ. 3.1). Στο εξής, το σημείο C στις γραφικές παραστάσεις θα υποδεικνύει το σημείο όπου συναντάται η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στο ζυγό του φορτίου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς (Σημείο C) που παρέχεται στην πρώτη περίπτωση είναι 117,69MW, ενώ στη δεύτερη 119,51MW. Η απόκλιση των δύο τιμών οφείλεται στη διαφορετική αρχικοποίηση της ισοδύναμης τάσης  $E$  που προαναφέρθηκε (Πιν. 3.3).



Σχήμα 3. 5 Καμπύλη PV Φορτίου, Α/Π #1



Σχήμα 3. 6 Καμπύλη PV Φορτίου, Α/Π #2

### 3.6 Α/Π με Μοναδιαίο Συντελεστή Ισχύος

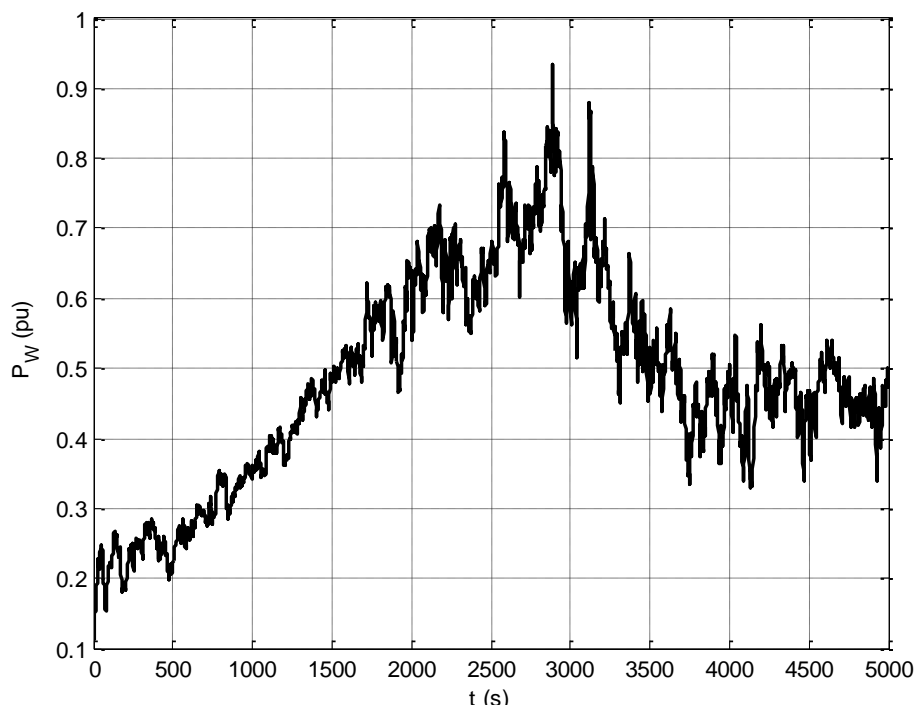
Στην ενότητα αυτή, θεωρείται η περίπτωση που το Αιολικό Πάρκο λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (Ενότητα 3.2.3) και μεταβλητή αιολική παραγωγή. Ως ενεργός παραγωγή

των Αιολικών Πάρκων #1 και #2, λαμβάνονται οι χρονοσειρές ισχύος των Σχ. 2.15 και 2.16 αντίστοιχα, οι οποίες για λόγους ευχέρειας του αναγνώστη επαναλαμβάνονται στα Σχ. 3.7 και 3.15. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται η τάση του ζυγού του Α/Π  $V_w$ , όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 3.2.3 και μέσω της σχέσης (3.19), στην οποία η άεργος ισχύς είναι προφανώς μηδενική.

### 3.6.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1

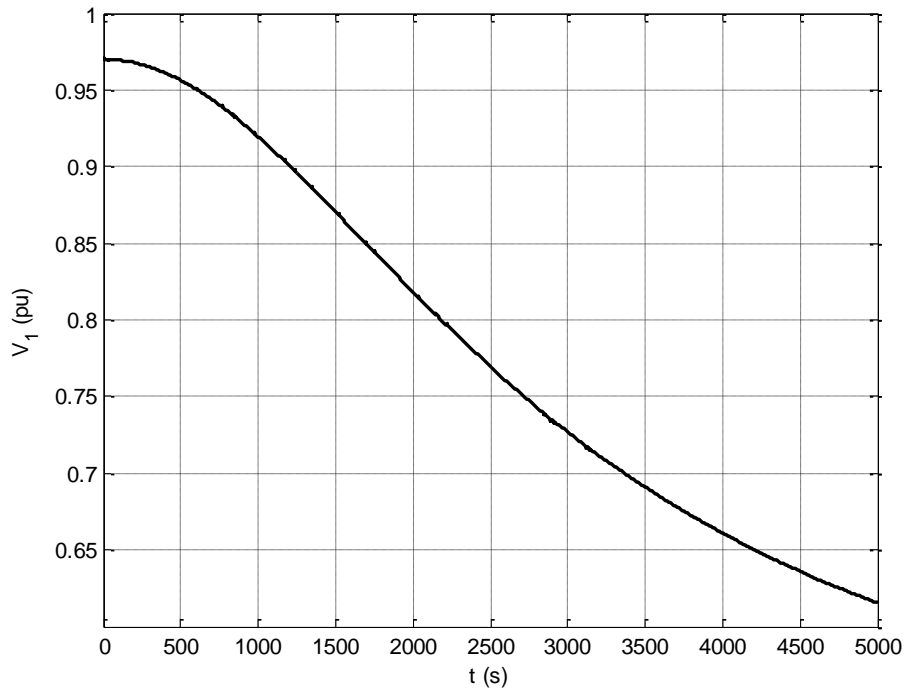
Στο Σχ. 3.5 είχε σχεδιαστεί η καμπύλη φορτίου-τάσης για την περίπτωση που το Α/Π #1 είναι αποσυνδεδεμένο από τη γραμμή μεταφοράς. Στο ίδιο σχήμα, η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του Α/Π #1 με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Όπως φαίνεται, η σύνδεση του Αιολικού Πάρκου ακόμη και χωρίς άεργο παραγωγή προσφέρει μια μικρή αύξηση στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς που παρέχεται γίνεται 118,67MW με το Αιολικό Πάρκο, αντί για 117,69MW στην περίπτωση που το Αιολικό Πάρκο είναι αποσυνδεδεμένο. Παρατηρείται σε αυτό το σημείο ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς επιτυγχάνεται σε χαμηλό επίπεδο τάσης δικτύου. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο για ένα απλό σύστημα, όπως αυτό που εξετάζεται εδώ για την εκτίμηση της ικανότητας φόρτισης του συστήματος.

Στα Σχ. 3.8-3.13 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος σε περιβάλλον Matlab, όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 3.4, για τη λειτουργία του Αιολικού Πάρκου #1 με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Εφόσον δεν επενεργεί μηχανισμός ρύθμισης της υψηλής τάσης  $V_l$ , παρατηρείται η σταδιακή μείωσή της με την αύξηση του φορτίου από την αρχή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης (Σχ. 3.8).



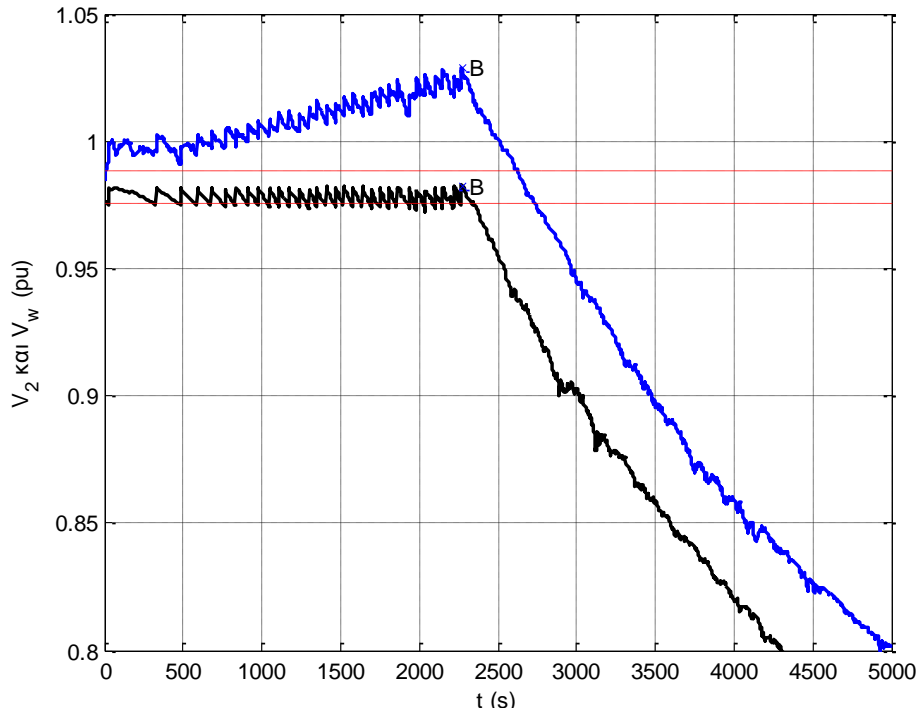
Σχήμα 3. 7 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος Α/Π #1



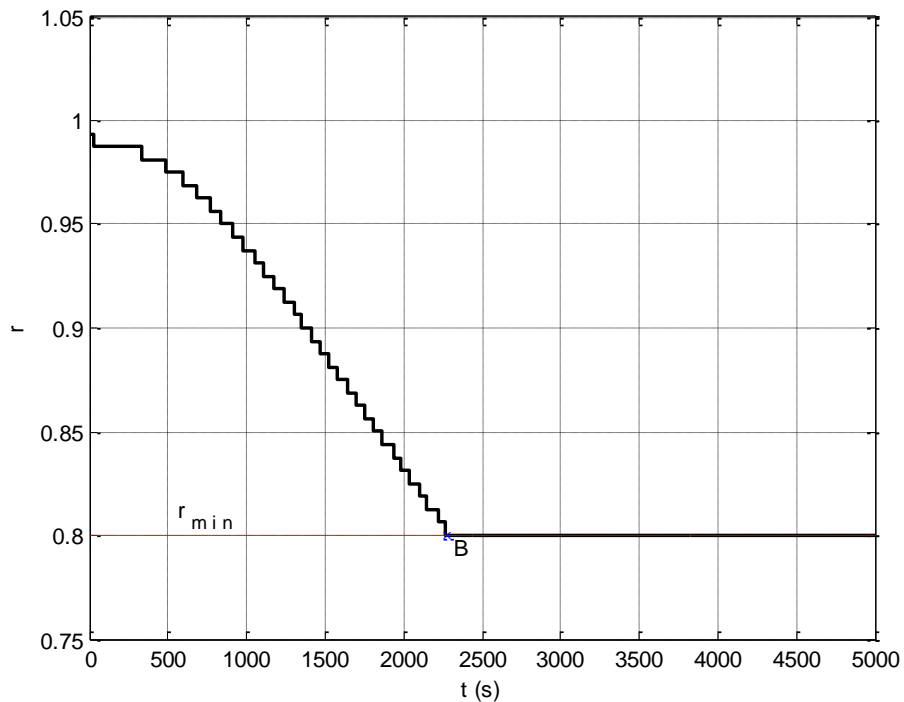


**Σχήμα 3. 8** Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #1)

Παράλληλα με την αύξηση του φορτίου, μειώνεται επίσης και η μέση τάση  $V_2$  του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ (Σχ. 3.9, μαύρο χρώμα). Για την αντιστάθμιση αυτής της μείωσης, ο μηχανισμός μεταβολής βήματος του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται με χρονική καθυστέρηση  $\Delta T=10s$  από την παραβίαση του κάτω ορίου της  $V_2$  και αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού (Σχ. 3.9-3.10). Το σημείο Β στην παρούσα εργασία θα αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή που εξαντλούνται οι διαθέσιμες λήψεις του ΣΑΤΥΦ. Αυτό συμβαίνει τη χρονική στιγμή 2270s, όπου ο λόγος του ΣΑΤΥΦ σταθεροποιείται στην κατώτερη τιμή του (Σχ. 3.10, Σημείο Β:  $r = r_{min}$ ). Από αυτό το σημείο και έπειτα, η τάση  $V_2$  μειώνεται κάτω από τα όρια νεκρής ζώνης και τελικά καταρρέει, αφού δεν υπάρχει πλέον δυνατότητα στήριξής της.



**Σχήμα 3. 9** Τάσεις ζυγού ΜΤ Υ/Σ και ζυγού σύνδεσης του Α/Π #1 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος)



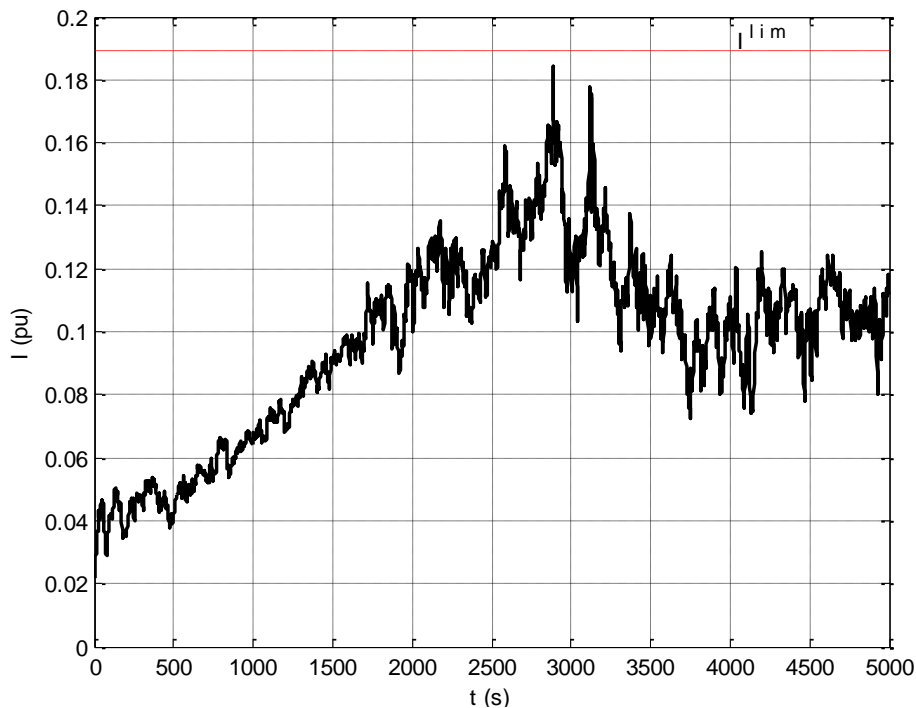
**Σχήμα 3. 10** Λόγος Μετασηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #1)

Η τάση του Α/Π #1 εμφανίζει αρχικά μια μικρή αύξηση (Σχ. 3.9, μπλε χρώμα), στο διάστημα μέχρι τα 2270s (Σημείο Β). Δεδομένου ότι στο διάστημα αυτό αυξάνεται η ενεργός παραγωγή  $P_w$  (Σχ. 3.7), αυξάνεται και όρος  $R_1 P_w$ . Η εκατοστιαία πτώση τάσης στη γραμμή διανομής, αγνοώντας τις εγκάρσιες χωρητικότητες είναι:

$$\varepsilon \approx \frac{R_l P_w + X_l Q_w}{V_w V_2} 100\% \quad (3.37)$$

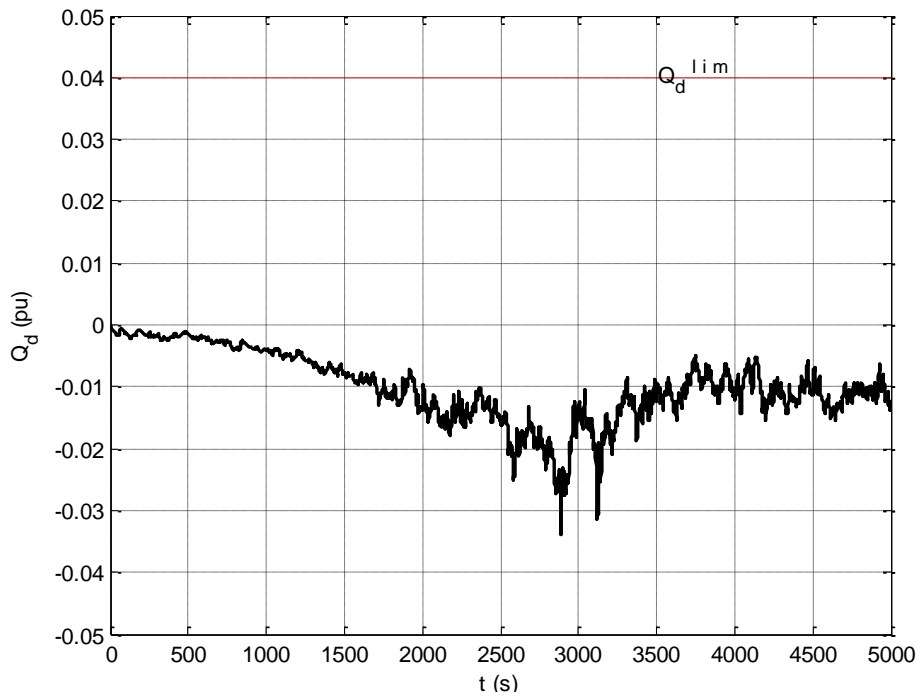
Το Αιολικό Πάρκο σ' αυτή την ενότητα δεν παράγει άεργο ισχύ, επομένως ο όρος  $X_l Q_w$  είναι μηδενικός. Επομένως, η αύξηση του όρου  $R_l P_w$  με το χρόνο οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερη πτώση τάσης στη γραμμή διανομής και προκαλεί μια υπέρταση στην παραγωγή, δεδομένου ότι η  $V_2$  διατηρείται σταθερή από το ΣΑΤΥΦ (Σχ. 3.9). Από το σημείο Β και έπειτα, η  $V_w$  μειώνεται συνεχώς, όπως είναι αναμενόμενο. Παρ' όλα αυτά, παρατηρείται ότι λόγω του σημαντικού παράγοντα  $R_l P_w$ , επιχειρεί να ακολουθήσει γενικά τις μεταβολές της ενεργού ισχύος καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό σημαίνει ότι, για παράδειγμα, μια αύξηση στην ενεργό ισχύ του Α/Π #1 οδηγεί αντίστοιχα, σε μια μικρή αύξηση της τάσης  $V_w$ .

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3.11, οι μεταβολές της ενεργού παραγωγής οδηγούν σε αντίστοιχες μεταβολές στο ρεύμα του μετατροπέα, λόγω της μηδενικής αέργου ισχύος και της μεγάλης μεταβλητότητας της ενεργού παραγωγής. Το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος  $I^{lim}=0,189\text{αμ}$ , όπως και το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π  $V_w^{lim}=1,1\text{αμ}$  (Σχ. 3.9), δεν συναντώνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



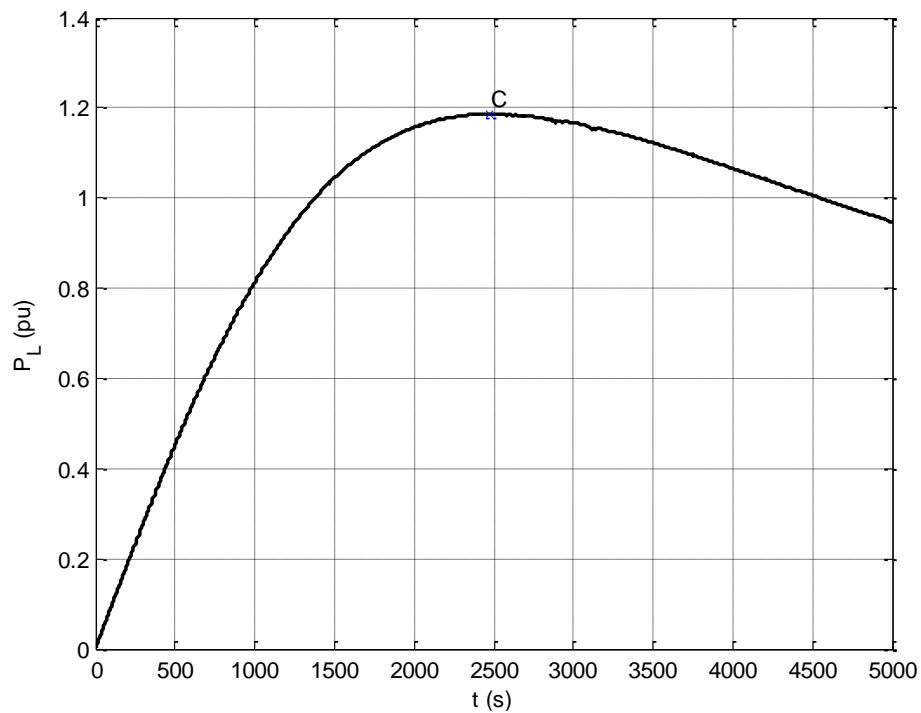
**Σχήμα 3. 11** Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #1 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος)

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει άεργος υποστήριξη από το Αιολικό Πάρκο, η γραμμή διανομής των 20kV απορροφά διαρκώς άεργο ισχύ από το δίκτυο (Σχ. 3.12), για την τροφοδότηση των απωλειών που συνεπάγονται οι επαγωγικές αντιδράσεις. Η ζεύξη των αυτομάτων πυκνωτών δεν εξετάζεται εδώ διότι, όπως έχει εξηγηθεί, σ' αυτή την εργασία ρυθμίζεται από την άεργο παραγωγή της γραμμής και απαιτεί ροή αέργου ισχύος στη γραμμή διανομής από το Αιολικό Πάρκο  $Q_d=4\text{MVA}$ . Τοπική παραγωγή αέργου ισχύος όμως δεν υπάρχει, αν εξαιρεθεί η αμελητέα επίδραση που προέρχεται από τις εγκάρσιες χωρητικότητες της γραμμής.



**Σχήμα 3. 12** Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #1)

Στο Σχ. 3.13 παρουσιάζεται η χρονοσειρά ισχύος που καταναλώνει το φορτίο. Το όριο φόρτισης (μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς) του συστήματος συναντάται στο σημείο C, τη χρονική στιγμή 2469s. Όπως έχει αναφερθεί, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στην περίπτωση αυτή ισούται με 118,67MW.

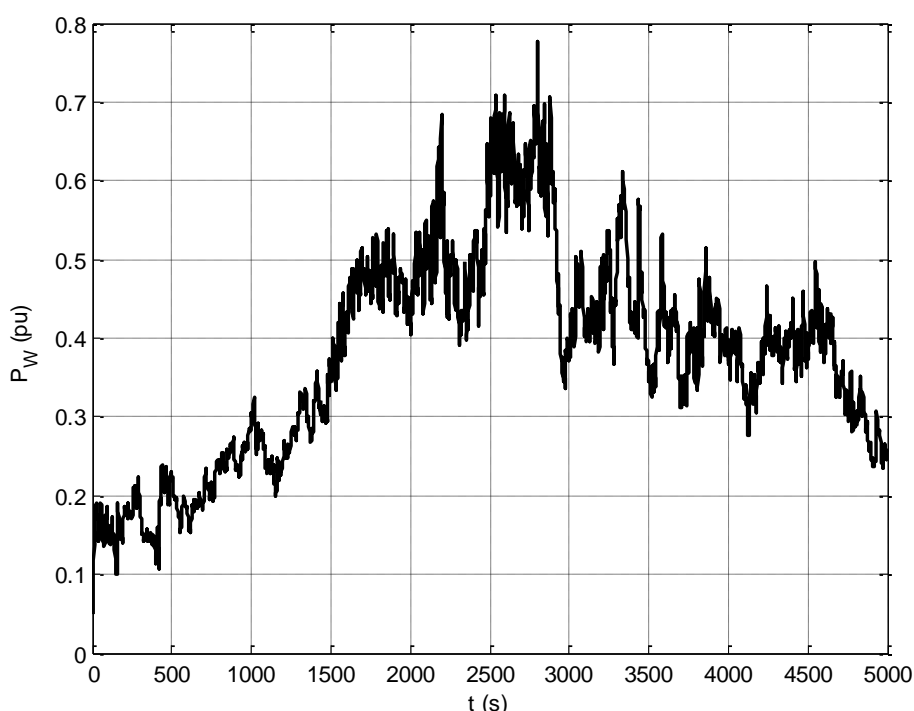


**Σχήμα 3. 13** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #1)

### 3.6.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2

Στο Σχ. 3.6 είχε παρουσιαστεί η καμπύλη φορτίου-τάσης για την περίπτωση που το Α/Π #2 είναι εκτός λειτουργίας. Στο σχήμα αυτό, η κόκκινη γραμμή αντιπροσωπεύει τη λειτουργία του Α/Π #2 με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Όπως και στην περίπτωση του Α/Π #1, το κλείσιμο του διακόπτη  $S$ , δηλαδή η σύνδεση του Α/Π #2 χωρίς άεργο όμως παραγωγή, προσφέρει μια μικρή αύξηση στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς που παρέχεται γίνεται 121,65MW με το Αιολικό Πάρκο, αντί για 119,51MW στην περίπτωση που το Αιολικό Πάρκο είναι αποσυνδεδεμένο.

Στα Σχ. 3.15-3.22 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την περίπτωση λειτουργίας του Α/Π #2 με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Όπως και προηγουμένως, επειδή δεν επενεργεί μηχανισμός ρύθμισης της υψηλής τάσης  $V_1$ , παρατηρείται η διαρκής μείωσή της με την αύξηση του φορτίου (Σχ. 3.15).

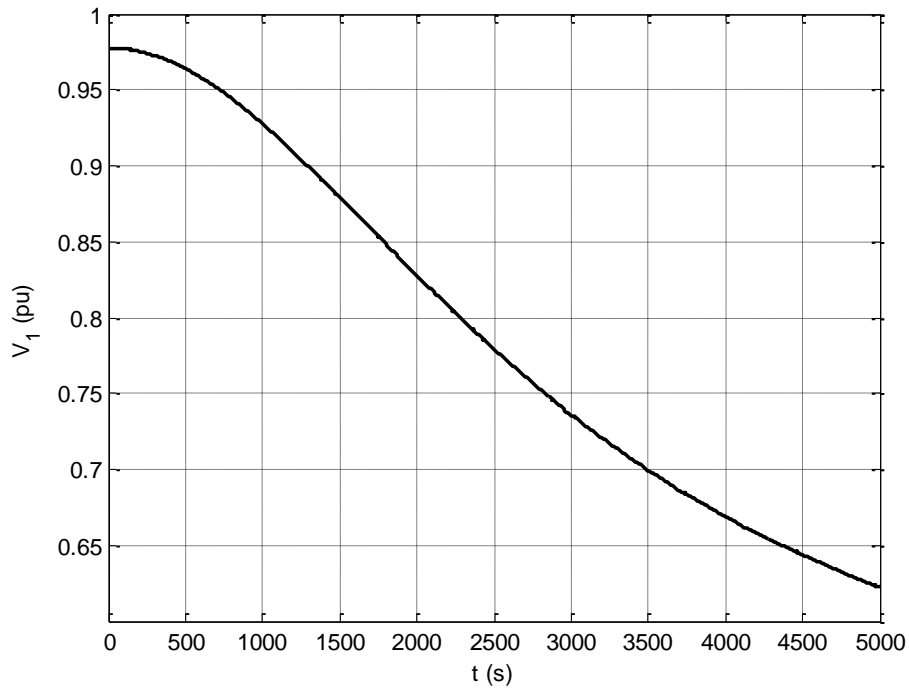


Σχήμα 3. 14 Χρονοσειρά Παραγωγής Ενεργού Ισχύος 2

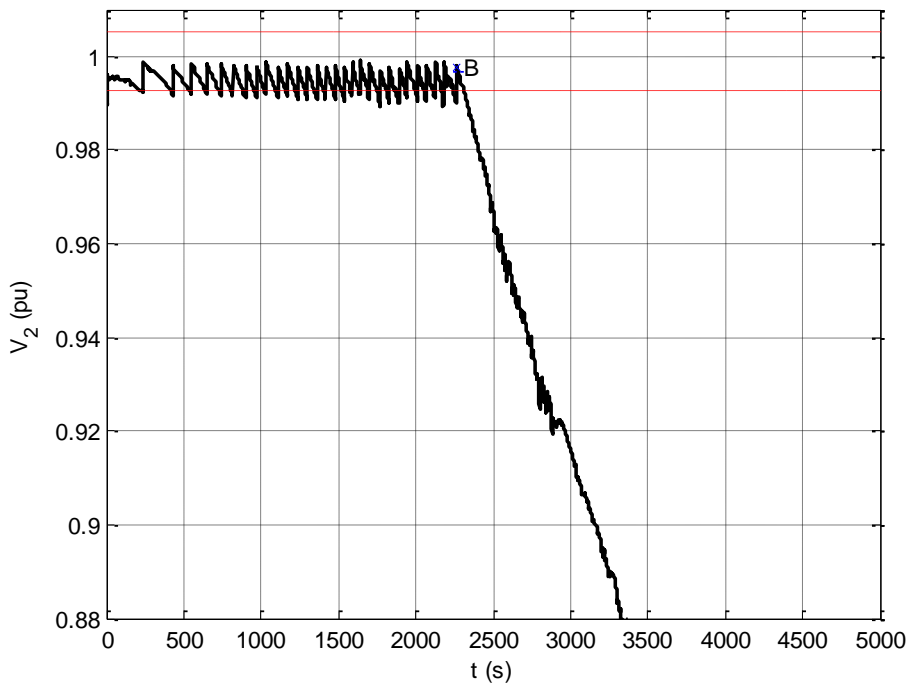
Το ΣΑΤΥΦ μειώνει το λόγο μετασχηματισμού του για την στήριξη της μέσης τάσης  $V_2$  του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ, η οποία επίσης μειώνεται με την αύξηση του φορτίου. Οι διαθέσιμες λήψεις του ΣΑΤΥΦ εξαντλούνται τη χρονική στιγμή 2260s (Σχ. 3.16-3.17, Σημείο Β). Από αυτό το σημείο και έπειτα, η τάση  $V_2$  μειώνεται συνεχώς, αφού δεν υπάρχει διαθέσιμος μηχανισμός αυτομάτου ελέγχου για να τη στηρίξει.

Η τάση του Α/Π #2 (Σχ. 3.18) διατηρείται σταθερή μέχρι το σημείο Β. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι, σε αντίθεση με τη μεγάλη γραμμή σύνδεσης του Α/Π #1, το Α/Π #2 συνδέεται απευθείας στον υποσταθμό χωρίς γραμμή διανομής σημαντικού μήκους. Επομένως, η ωμική αντίσταση  $R_l$  της γραμμής είναι αμελητέα, όπως φαίνεται στον Πιν. 3.1. Συνεπώς, παρά την αύξηση της ενεργού παραγωγής  $P_w$  με τον χρόνο (Σχ. 3.14), η αντίστοιχη αύξηση του όρου  $R_l P_w$  στην (3.37) είναι ασήμαντη και δεν έχει εμφανή επίδραση στην τάση

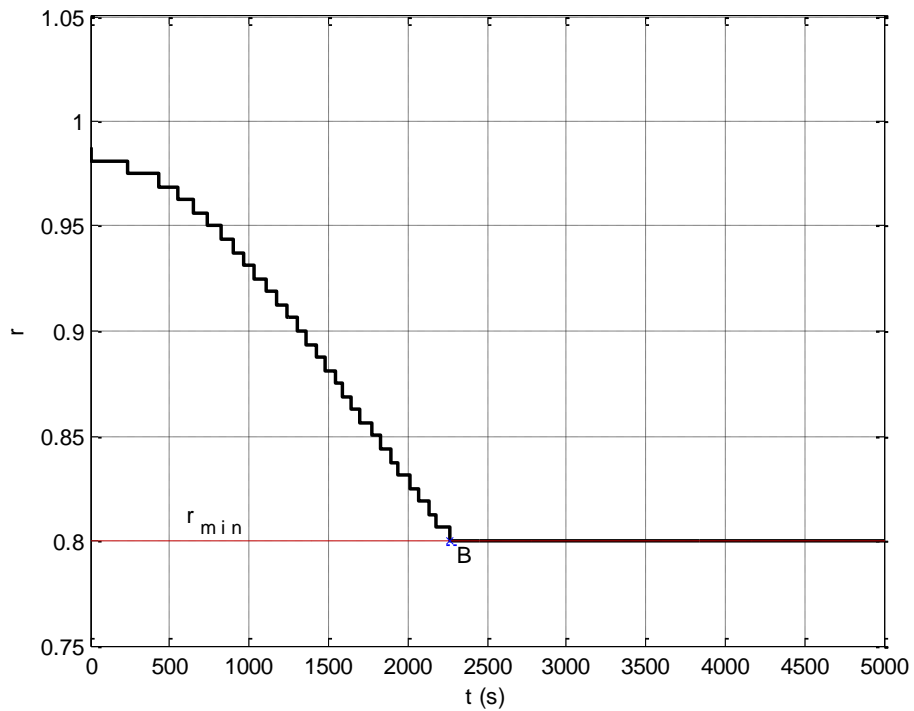
του Αιολικού Πάρκου #2, η οποία διατηρείται σταθερή. Η επίδραση του όρου  $X_l Q_w$  είναι προφανώς μηδενική, λόγω της λειτουργίας με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος στην παραγωγή. Από το σημείο Β βέβαια, που ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φτάνει το κάτω όριό του, η  $V_w$  μειώνεται συνεχώς μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.



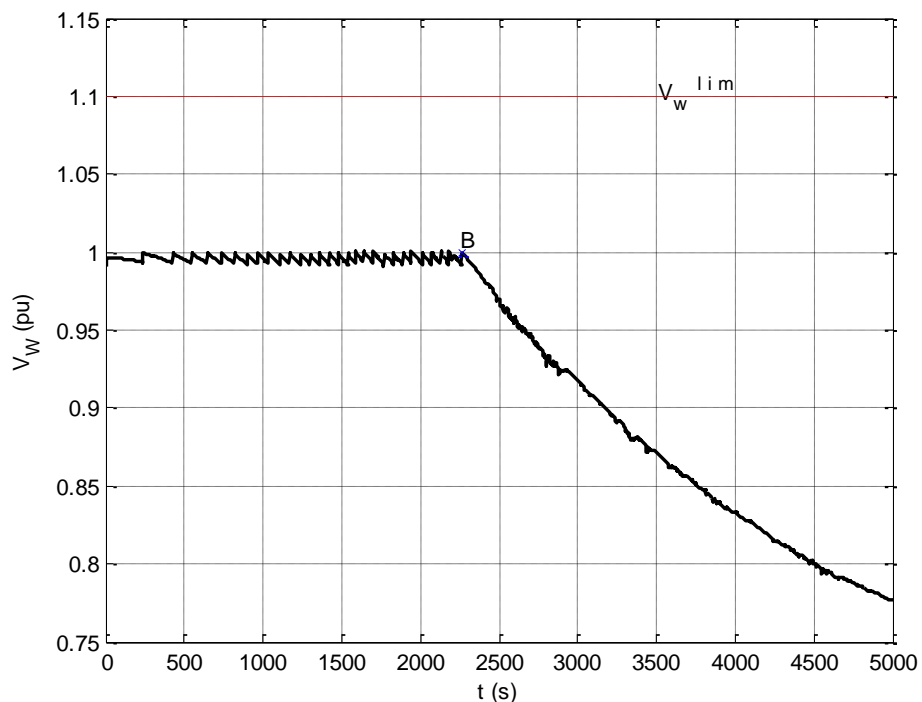
**Σχήμα 3. 15** Υψηλή Τάση Y/Σ σύνδεσης (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)



**Σχήμα 3. 16** Τάση ζυγού ΜΤ Y/Σ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)



Σχήμα 3. 17 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)

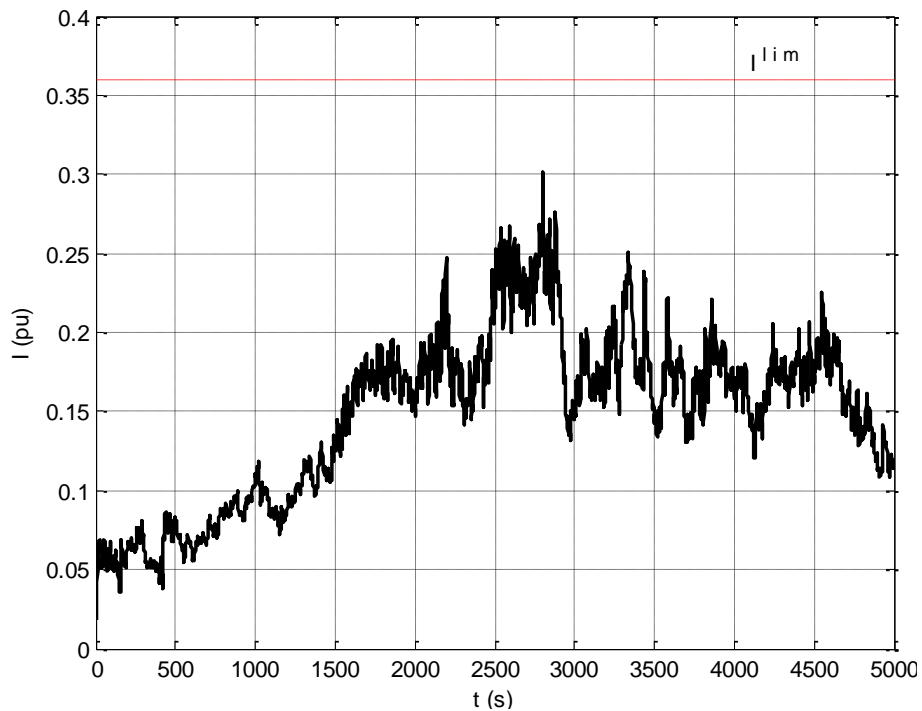


Σχήμα 3. 18 Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος)

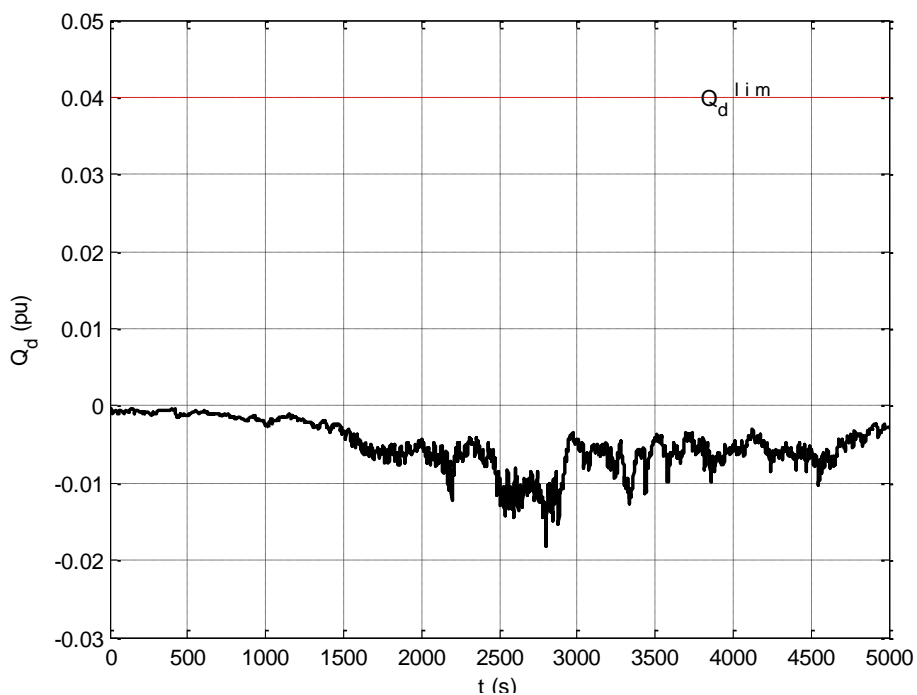
Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.19, μια αύξηση ή μείωση της ενεργού παραγωγής οδηγεί σε αντίστοιχη μεταβολή στο ρεύμα σε όλη τη διάρκεια των 5000s. Όπως και στην περίπτωση του πρώτου πάρκου, το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος  $I^{lim}$ , όπως και το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π  $V_w^{lim}$  (Σχ. 3.18), δεν παραβιάζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Στο Σχ. 3.20 φαίνεται ότι η γραμμή διανομής συνεχώς απορροφά άεργο ισχύ, για να τροφοδοτήσει τις επαγωγικές απώλειες. Το ίδιο κάνει και η γραμμή υψηλής τάσης του δικτύου μεταφοράς (Σχ. 3.21). Δεν γίνεται ζεύξη κάποιας συστοιχίας πυκνωτών, αφού γι' αυτό απαιτείται ροή αέργου ισχύος προς τον υποσταθμό  $Q_d=4\text{MVar}$ , ενώ από τη γραμμή διανομής συνεχώς απορροφάται άεργος ισχύς.

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς (Σημείο C), συναντάται τη χρονική στιγμή 2501s (Σχ. 3.22) και, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ισούται με 121,65MW.

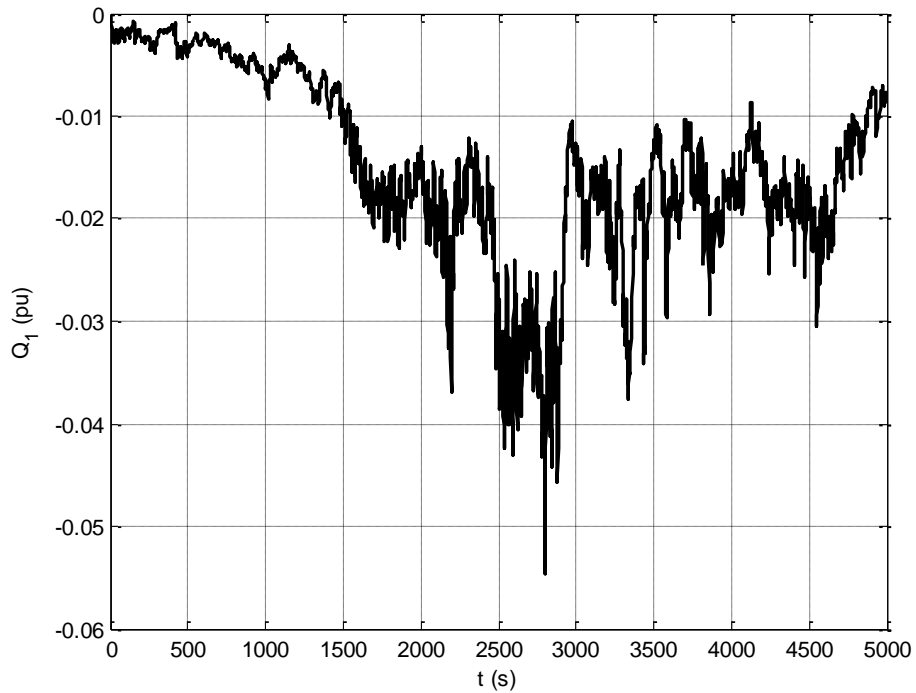


**Σχήμα 3. 19** Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #2 (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος)

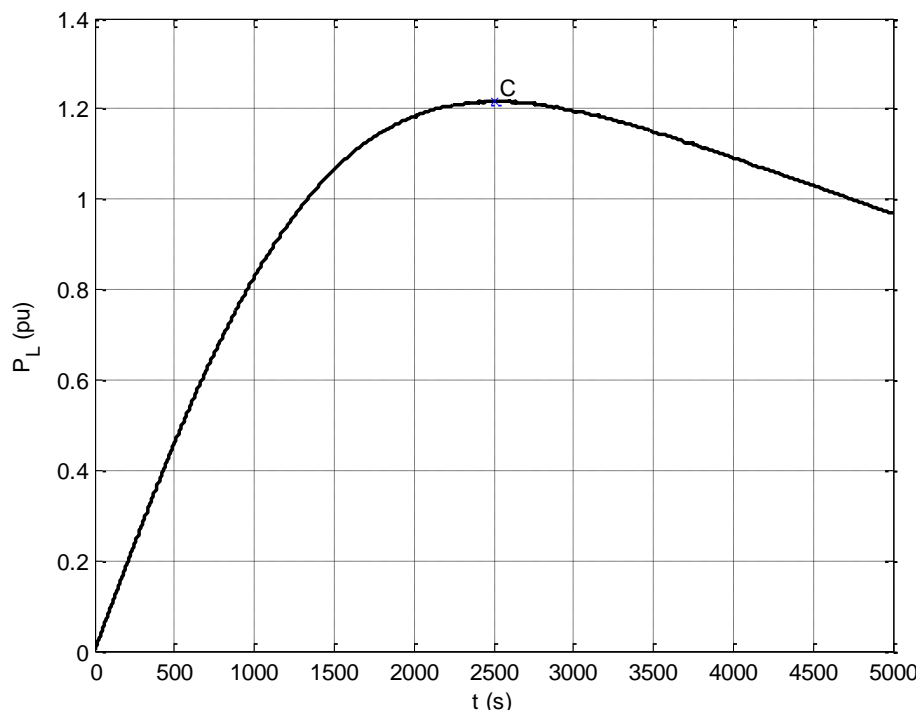


**Σχήμα 3. 20** Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)





**Σχήμα 3. 21** Άεργος Ισχύς Γραμμής ΥΤ (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)



**Σχήμα 3. 22** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος, Α/Π #2)

Συμπερασματικά, ακόμη και χωρίς άεργο υποστήριξη από το Αιολικό Πάρκο και χωρίς τη ζεύξη των στατών πυκνωτών, η ενεργός συμβολή του πάρκου από μόνη της αυξάνει σε ένα βαθμό τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στη γραμμή μεταφοράς. Η συνεισφορά βέβαια των 0,98MW και 2,14MW για τα πάρκα ονομαστικής ισχύος 18,9MW και 36MW αντίστοιχα, δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

---

### Επίδραση Άεργης Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab, όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 3.4, για τις περιπτώσεις όπου τα Αιολικά Πάρκα #1 και #2 προσφέρουν υπηρεσίες αέργου υποστήριξης στο σύστημα μεταφοράς. Συγκεκριμένα, αναλύεται το σενάριο όπου ο ρυθμιστής αέργου ισχύος διατηρεί σταθερή την τάση του Α/Π, αλλά και η στρατηγική με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης, όπως παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 3.2.3. Στόχος είναι η εκτίμηση της επίδρασης της έγχυσης αέργου ισχύος στο όριο φόρτισης του συστήματος. Ως ενεργός παραγωγή των Α/Π #1 και #2 λαμβάνονται οι χρονοσειρές ισχύος των Σχ. 2.15 και 2.16 του μοντέλου του Κεφ. 2, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εξετάζεται η επίδραση της ενεργού παραγωγής στην υποστήριξη του συστήματος.

#### 4.1 Επίδραση Ρύθμισης Τάσης Α/Π

Στην περίπτωση αυτή, η τάση του Αιολικού Πάρκου  $V_w$  ρυθμίζεται από το βρόχο ελέγχου αέργου ισχύος του ηλεκτρονικού μετατροπέα, ώστε να παραμένει συνεχώς σταθερή και ίση με  $V_{w0}$  (Πιν. 3.3). Θεωρώντας λοιπόν δεδομένη την τάση  $V_w$  και την ενεργό ισχύ κάθε χρονική στιγμή, γίνεται ο υπολογισμός της αέργου ισχύος του Α/Π ( $Q_w$ ), από την εξίσωση (3.19) του Κεφαλαίου 3.

##### 4.1.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ανάλυσης του συστήματος για λειτουργία του Α/Π #1 με συνεχή ρύθμιση τάσης από τον μετατροπέα του Α/Π #1. Συγκεκριμένα, στο Σχ. 4.1 φαίνεται αρχικά με μπλε χρώμα η ελεγχόμενη τάση  $V_w$ , η οποία ρυθμίζεται από τον ελεγκτή αέργου ισχύος ώστε κάθε χρονική στιγμή να ισούται με την τιμή  $V_{w0}$  (Πιν. 3.3). Η υψηλή τάση  $V_l$  του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ παραμένει μη ελεγχόμενη, όπως και στην περίπτωση παραγωγής με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, επομένως μειώνεται συνεχώς (Σχ. 4.2). Τις χρονικές στιγμές 3450s, 3610s και 3790s βέβαια, παρατηρείται η απότομη αύξηση της  $V_l$ . Η αλλαγή αυτή οφείλεται στη ζεύξη των τριών συστοιχιών πυκνωτών στις συγκεκριμένες χρονικές στιγμές (Σχ. 4.3).

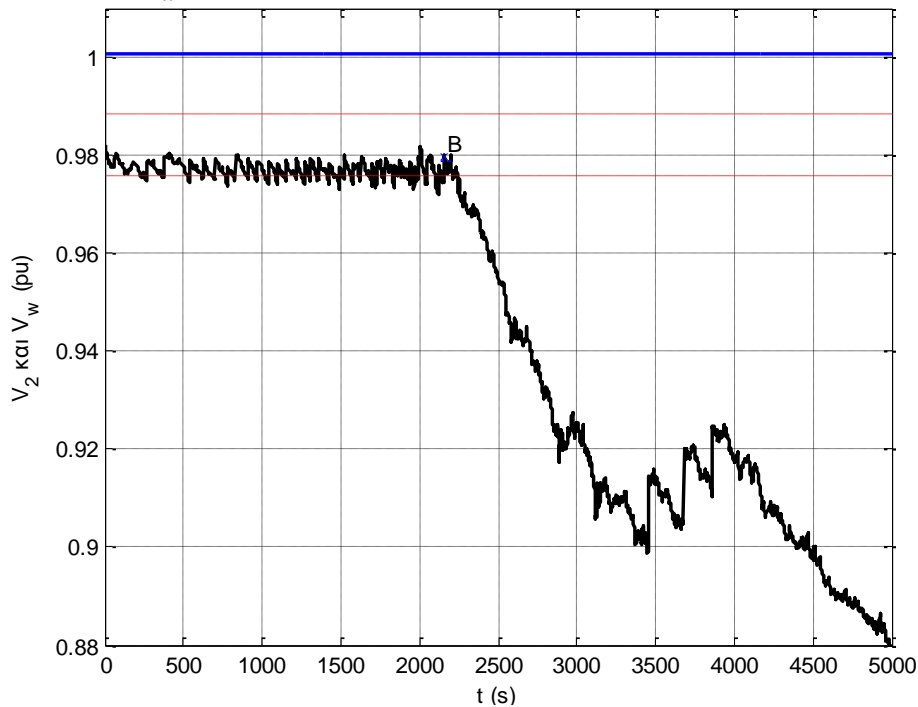
Στο Σχ. 4.1 φαίνεται επίσης με μαύρο χρώμα πως η μέση τάση  $V_2$  διατηρείται για ένα διάστημα εντός ορίων και στη συνέχεια αρχίζει και πέφτει, όταν οι διαθέσιμες λήψεις του ΣΑΤΥΦ εξαντλούνται (Σχ. 4.1, Σημείο Β). Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής και η έμμεση στήριξη που προσφέρουν οι πυκνωτές τις χρονικές στιγμές ζεύξης στη μέση τάση του υποσταθμού μέσω της συγκράτησης της ροής αέργου ισχύος προς τον υποσταθμό. Η ροή αέργου ισχύος στη γραμμή διανομής από το Αιολικό Πάρκο προς τον υποσταθμό ( $Q_d$ ) παρουσιάζεται στο Σχ. 4.4. Στην αρχή της προσομοίωσης και για όσο διάστημα η  $V_2$

ελέγχεται από το ΣΑΤΥΦ, παρατηρείται ότι η απορρόφηση αέργου ισχύος από τη γραμμή διανομής αυξάνεται, μέσω αύξησης της απορρόφησης αέργου ισχύος του Α/Π  $Q_w$  (Σχ. 4.5). Αυτό είναι αναμενόμενο, αν αναλογιστεί κανείς ότι με σταθερές τις τάσεις  $V_w$  και  $V_2$ , η παραγόμενη αέργου ισχύς από το Α/Π, με βάση τη σχέση (3.19) και αγνοώντας τις εγκάρσιες χωρητικότητες είναι κατά προσέγγιση:

$$Q_w \simeq \frac{V_w^2}{Z_l} \cos\beta - \frac{V_w V_2}{Z_l} \cos(\Delta\theta + \beta) \quad (4.1)$$

όπου

- $\beta = \frac{\pi}{2} - \gamma_l = 47,07^\circ$
- $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_w$



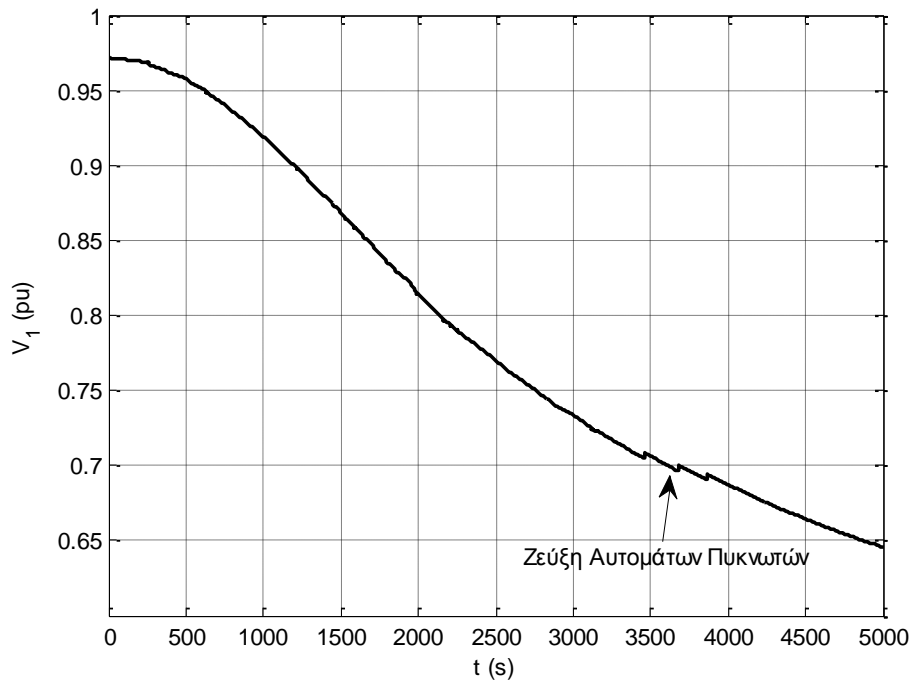
**Σχήμα 4.1** Τάσεις ζυγού ΜΤ Υ/Σ και ζυγού σύνδεσης του Α/Π #1 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)

Θεωρώντας επομένως τη  $V_2$  περίπου σταθερή, ο όρος που μεταβάλλεται στην (4.1) με τον χρόνο είναι η διαφορά των γωνιών της μέσης τάσης του υποσταθμού και της τάσης του Αιολικού Πάρκου  $\Delta\theta$ . Στην αρχή της προσομοίωσης ( $t=1s$ ) η διαφορά αυτή είναι  $\Delta\theta \simeq -1^\circ$ . Στη συνέχεια η  $\Delta\theta$  μειώνεται συνεχώς και τη χρονική στιγμή 2160s (Σημείο Β) ισούται με  $\Delta\theta \simeq -8,2^\circ$ . Συνεπώς, ο όρος  $\cos(\Delta\theta + \beta)$  στην (4.1) αυξάνεται συνεχώς και η παραγόμενη αέργου ισχύς  $Q_w$  μειώνεται. Η συνεχής μείωση της  $\Delta\theta$  έως το σημείο Β, οφείλεται στην αύξηση της ενεργού παραγωγής  $P_w$  στο ίδιο διάστημα. Με βάση τη σχέση (3.18), ισχύει:

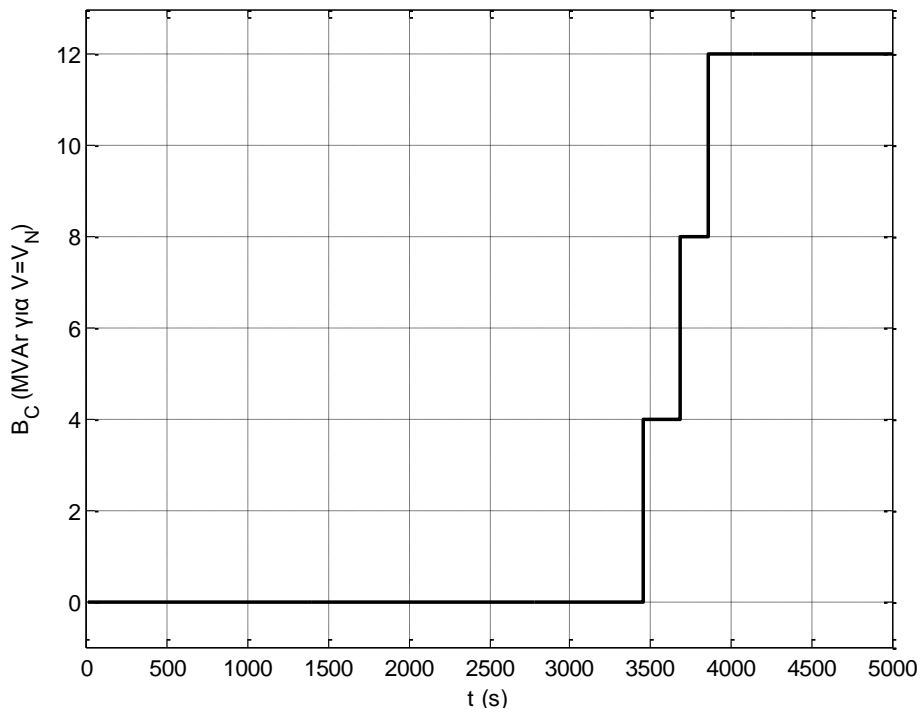
$$\Delta\theta \simeq \sin^{-1} \left( \frac{-P_w + R_l \frac{V_w^2}{Z_l}}{\frac{V_w V_2}{Z_l}} \right) - \beta \quad (4.2)$$

Στα Σχ. 4.4 - 4.5 είναι εμφανές ότι η επαγωγική αντίδραση της γραμμής διανομής  $X_l$ , οδηγεί σε σημαντικές άεργες απώλειες  $I^2 X_l$ , και συνεπώς σε μεγαλύτερη κατανάλωση αέργου ισχύος από τη γραμμή ( $Q_d$ ) σε σχέση με το Α/Π ( $Q_w$ ). Από το σημείο Β κι έπειτα, αυξάνεται η παραγωγή της  $Q_d$  μέσω της αύξησης της παραγόμενης αέργου ισχύος από το Α/Π (Σχ. 4.5),

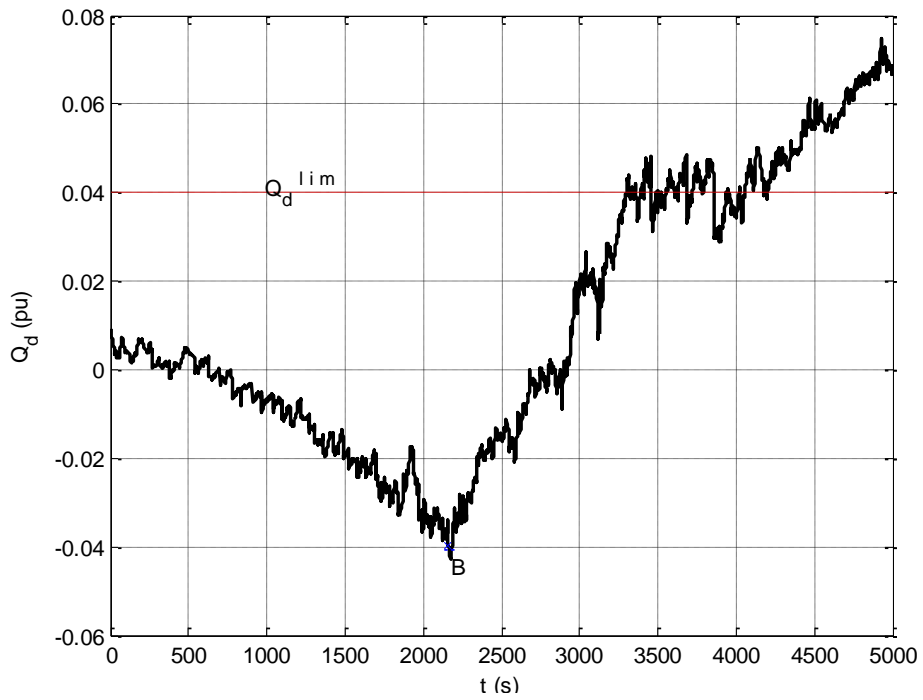
για την στήριξη της μέσης τάσης διανομής  $V_2$ , η οποία μειώνεται. Στο Σχ. 4.5 διακρίνεται επίσης ότι οι πυκνωτές παρακολουθούν την άεργο ισχύ  $Q_d$  της γραμμής MT και κάνουν ζεύξη μετά την παραβίαση του ορίου των 4MVA<sub>r</sub>. Οι αυτόματοι πυκνωτές συνδέονται στο ζυγό MT του Υ/Σ μετά το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος (Σημείο C), το οποίο εντοπίζεται στη χρονική στιγμή 2679s (Σχ. 4.6). Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ισούται σε αυτή την περίπτωση με 119,29MW.



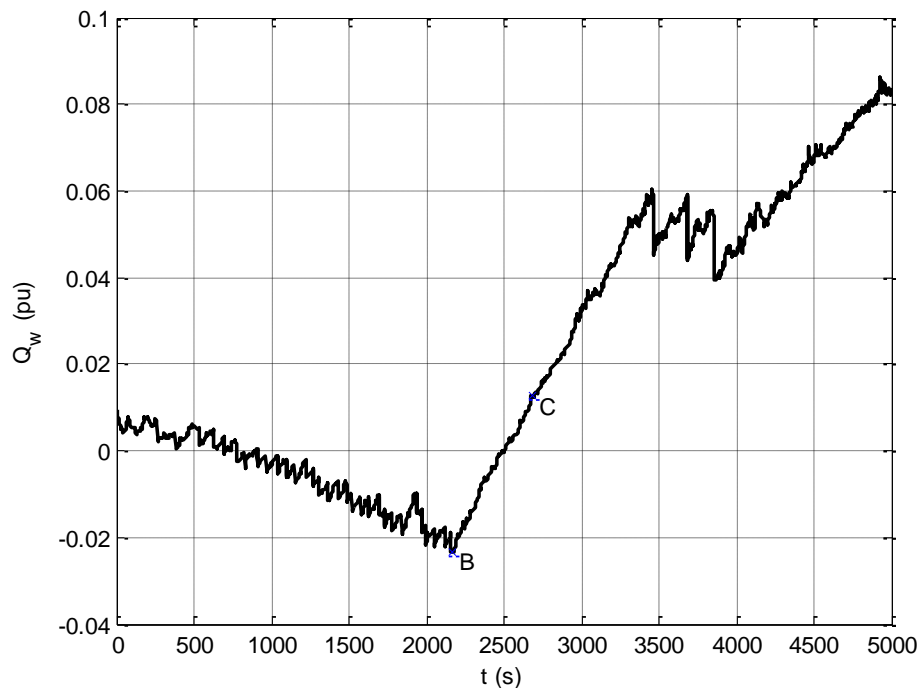
Σχήμα 4. 2 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1)



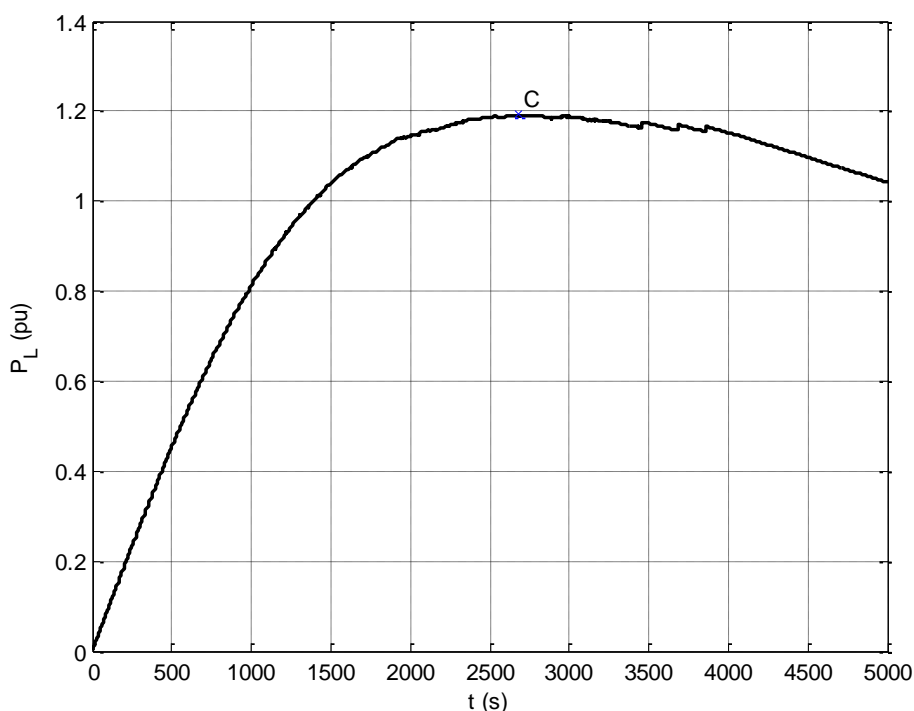
Σχήμα 4. 3 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1)



**Σχήμα 4. 4** Άεργος Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1)



**Σχήμα 4. 5** Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #1 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)



**Σχήμα 4. 6** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1)

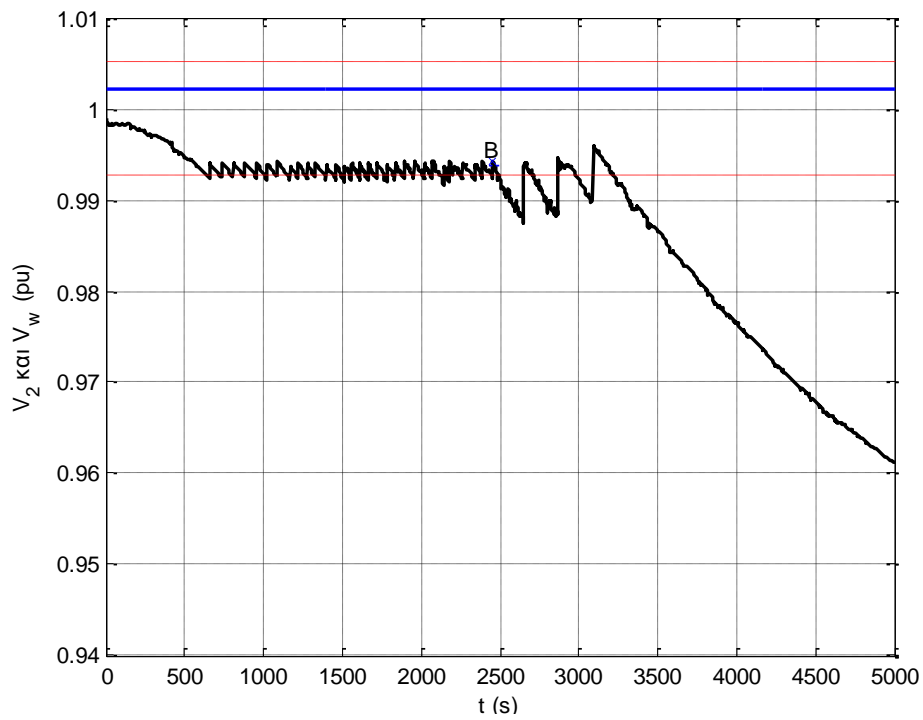
Συγκρίνοντας με την περίπτωση ρύθμισης μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, ο έλεγχος σταθερής τάσης Α/Π προσφέρει μια μικρή μόνο αύξηση (0,62MW) στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα παίζει το γεγονός ότι οι συστοιχίες πυκνωτών συνδέονται μετά το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

#### 4.1.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2

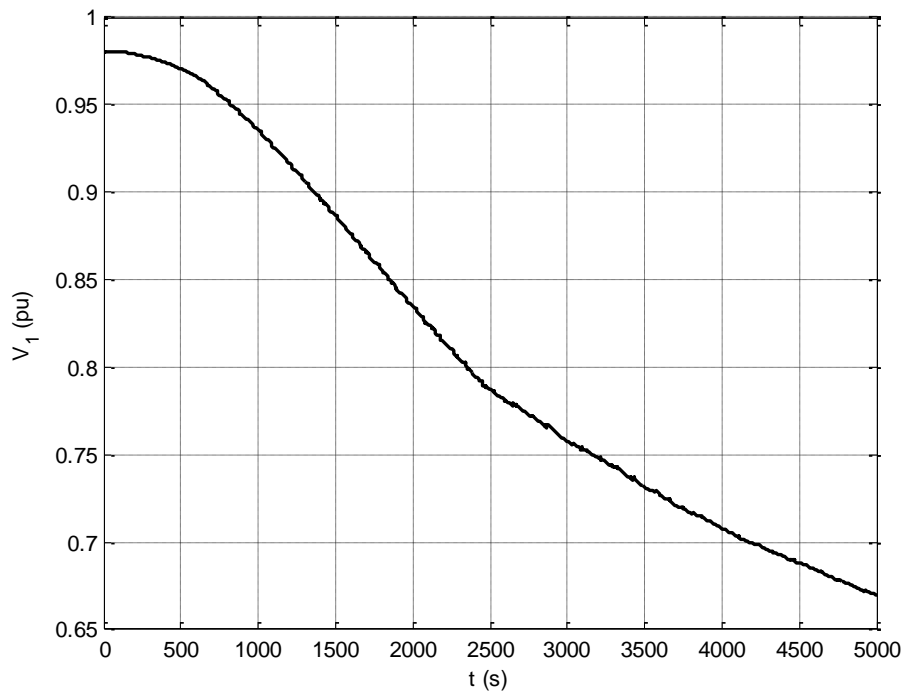
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος για ρύθμιση τάσης του Α/Π #2, στα Σχ. 4.7-4.12. Συγκεκριμένα, στο Σχ. 4.7 με μπλε χρώμα δίνεται η ελεγχόμενη τάση  $V_w$ , η οποία ρυθμίζεται ώστε να ισούται συνεχώς με την τιμή  $V_{w0}$  (Πιν 3.3), ενώ με μαύρο χρώμα φαίνεται η μέση τάση  $V_2$  του υποσταθμού, η οποία αρχικά διατηρείται για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα σταθερή, ενώ στη συνέχεια αρχίζει και πέφτει, όταν ο λόγος του ΣΑΤΥΦ φτάσει στο κάτω όριο  $r_{min}$  (Σχ. 4.7). Η υψηλή τάση  $V_1$  του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ δεν υπόκειται σε κάποιας μορφής έλεγχο, επομένως μειώνεται συνεχώς με την αύξηση του φορτίου (Σχ. 4.8). Τις χρονικές στιγμές 2650s, 2870s και 3090s, γίνεται η ζεύξη των τριών συστοιχιών πυκνωτών, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.9.

Η χρονική μεταβολή της ροής αέργου ισχύος προς τον υποσταθμό  $Q_d$ , παρουσιάζεται στο Σχ. 4.10. Παρατηρείται ότι μέχρι το σημείο Β, η  $Q_d$  παραβιάζει αρκετές φορές το όριο των 4MVA<sub>r</sub>, χωρίς να προκαλεί όμως τη ζεύξη κάποιας αυτόματης συστοιχίας πυκνωτών. Αυτό συμβαίνει διότι το διάστημα παραβίασης είναι μικρότερο από τη χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του μηχανισμού ( $T_{mse}=60s$ ). Στον ίδιο χρόνο όμως επενεργεί το ΣΑΤΥΦ με στόχο να επαναφέρει την τάση  $V_2$  εντός ορίων. Εμμέσως λοιπόν, η δράση του ΣΑΤΥΦ προκαλεί και τη συγκράτηση της ροής αέργου ισχύος στη γραμμή διανομής. Στο σημείο αυτό, αναδεικνύεται η σημασία της σωστής οργάνωσης και συνεργασίας των μηχανισμών ελέγχου. Σε αντίθετη περίπτωση, θα μπορούσαν να δημιουργηθούν ταλαντώσεις, οι οποίες θα οδηγούσαν ενδεχομένως σε μη αναγκαίες και αναποτελεσματικές κινήσεις από τους

μηχανισμούς ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, όπως διακρίνεται στα Σχ. 4.10-4.11, οι πυκνωτές συνδέονται μετά την εξάντληση των διαθέσιμων θέσεων του τυλίγματος του ΣΑΤΥΦ (Σημείο Β).

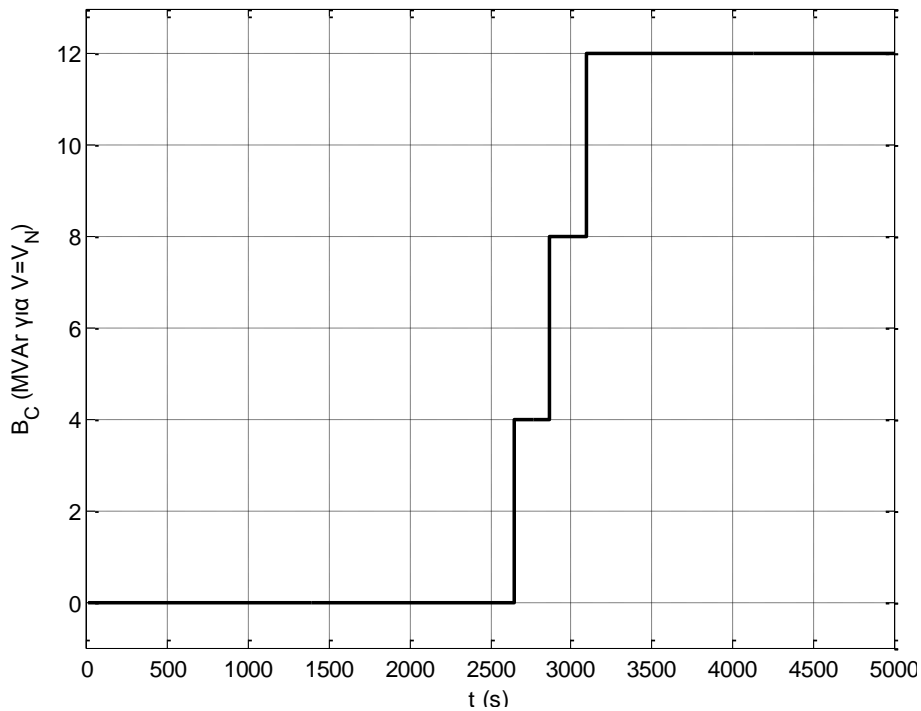


**Σχήμα 4. 7** Τάσεις ζυγού ΜΤ Υ/Σ και ζυγού σύνδεσης του Α/Π #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)

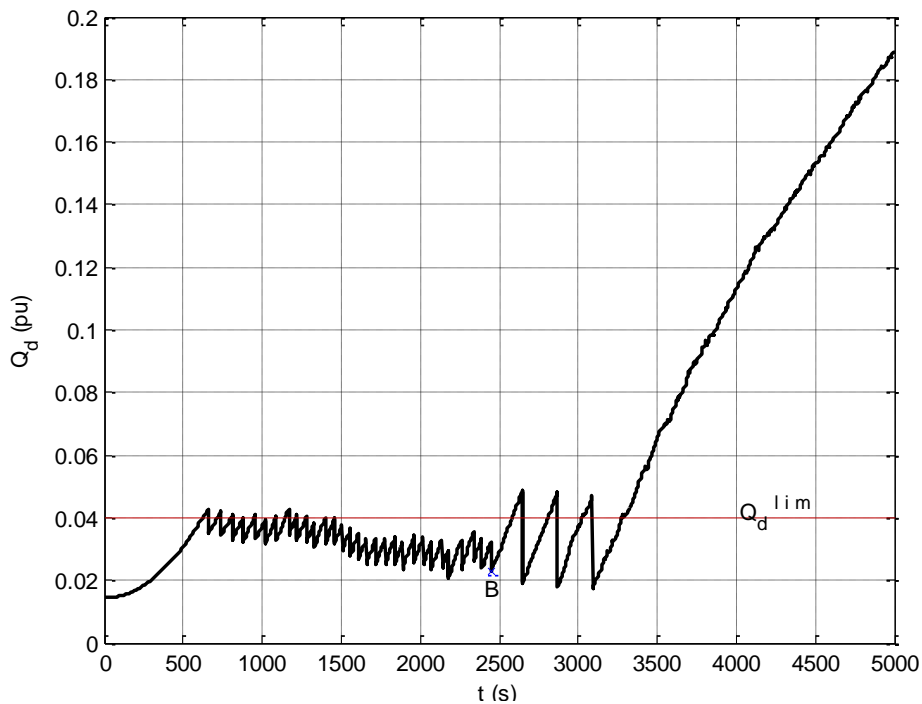


**Σχήμα 4. 8** Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2)





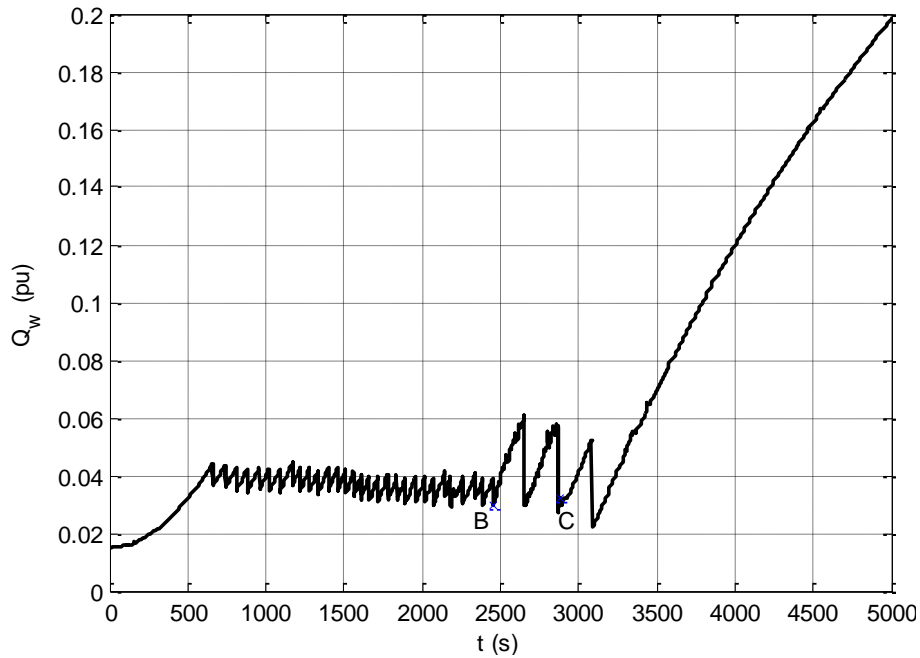
Σχήμα 4. 9 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2)



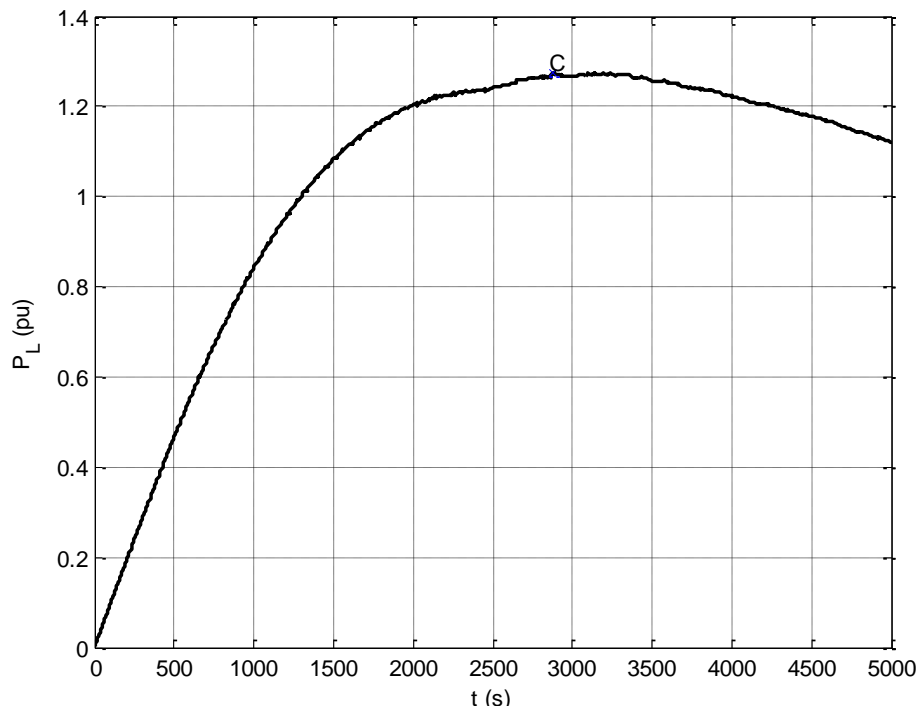
Σχήμα 4. 10 Αεργός Ισχύς Γραμμής ΜΤ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2)

Επίσης, επειδή όπως έχει ήδη αναφερθεί το Α/Π #2 συνδέεται απευθείας στον ζυγό μέσης τάσης χωρίς σημαντικό μήκος γραμμής διανομής, η ροή αέργου ισχύος  $Q_d$  είναι περίπου σταθερή και όμοια με την  $Q_w$ . Στο Σχ. 4.11, το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι εμφανές ότι επιτυγχάνεται μετά τη ζεύξη των δύο από τις τρεις διαθέσιμες βαθμίδες πυκνωτών. Συγκεκριμένα, το σημείο C εντοπίζεται, όπως φαίνεται και στην καμπύλη της

καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου (Σχ. 4.12), τη χρονική στιγμή 2881s. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς σ' αυτή την περίπτωση είναι ίση με 127,38MW. Σε σχέση με τη ρύθμιση μοναδιαίου συντελεστή ισχύος, επιτυγχάνεται αύξηση 5,73MW στο όριο φόρτισης του συστήματος. Σημειώνεται εδώ ότι το πλήθος των αυτομάτων πυκνωτών που έχουν συνδεθεί μέχρι τη χρονική στιγμή που συναντάται το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, επιδρά σημαντικά στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος.



**Σχήμα 4. 11** Παραγόμενη Αεργός Ισχύς Α/Π #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)



**Σχήμα 4. 12** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2)

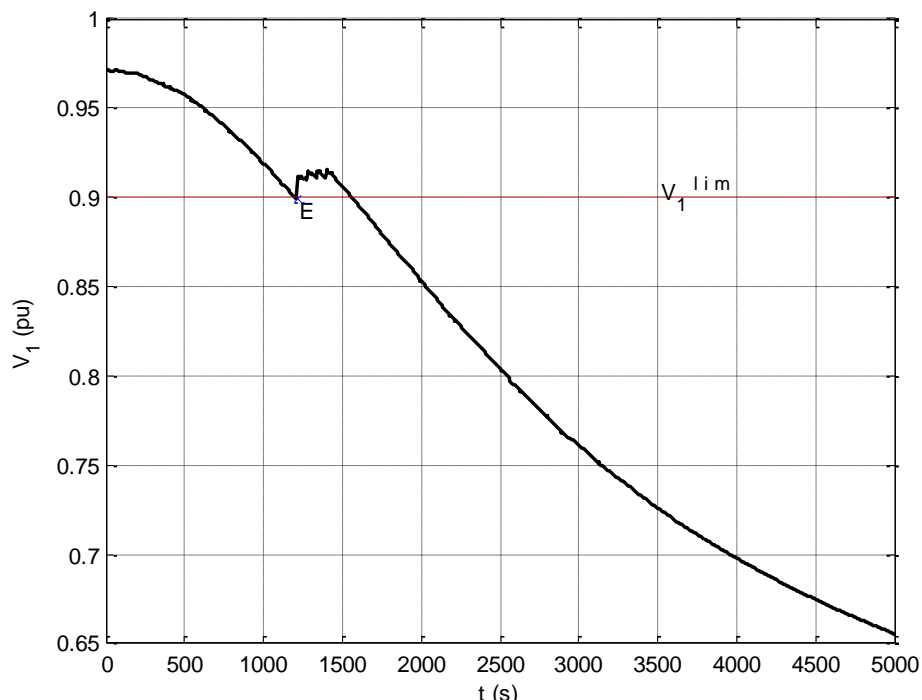
## 4.2 Έλεγχος Μέγιστης Άεργης Υποστήριξης

Η στρατηγική μέγιστης άεργης υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης, όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 3.2.3, υποθέτει ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ελέγχει την τάση του Αιολικού Πάρκου  $V_w$  στη μέγιστη δυνατή της τιμή  $V_w^{lim}$ , όταν η υψηλή τάση στο σημείο σύνδεσης στον υποσταθμό ( $V_I$ ) πέσει κάτω από το όριο  $V_I^{lim}$ . Η συνθήκη αυτή ικανοποιείται εφόσον δεν επενεργεί ο περιοριστής του μεγίστου ρεύματος του μετατροπέα. Στην εργασία αυτή, θεωρείται ότι η μέγιστη δυνατή τάση του Αιολικού Πάρκου  $V_w^{lim}$  είναι ίση με 110% της ονομαστικής, ενώ το  $V_I^{lim}$  θεωρείται ίσο με 90% της ονομαστικής.

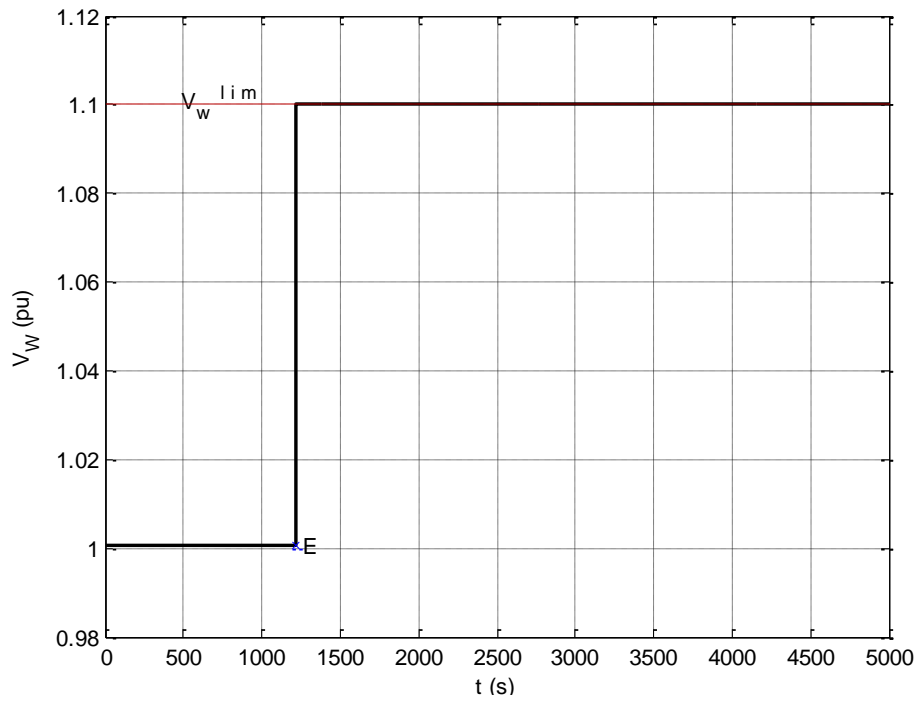
### 4.2.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης με το Αιολικό Πάρκο #1, για έλεγχο με μέγιστη άεργη υποστήριξη. Συγκεκριμένα, στα Σχ. 4.13-4.15 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης  $V_I$ , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π,  $V_w$  και  $I_w$  αντίστοιχα. Το σημείο Ε αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή κατά την οποία ενεργοποιείται η μέγιστη άεργη υποστήριξη. Η υψηλή τάση ( $V_I$ ) στο σημείο κοινής σύνδεσης, φτάνει το κάτω όριο  $V_I^{lim}$  τη χρονική στιγμή 1206s. Με καθυστέρηση 10s, αποστέλλεται η εντολή άεργης υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης, με αποτέλεσμα η τάση  $V_w$  του πάρκου να οδηγηθεί στην τιμή  $V_w^{lim}$ , στηρίζοντας έτσι την υψηλή τάση  $V_I$  (Σχ. 4.13-4.14).

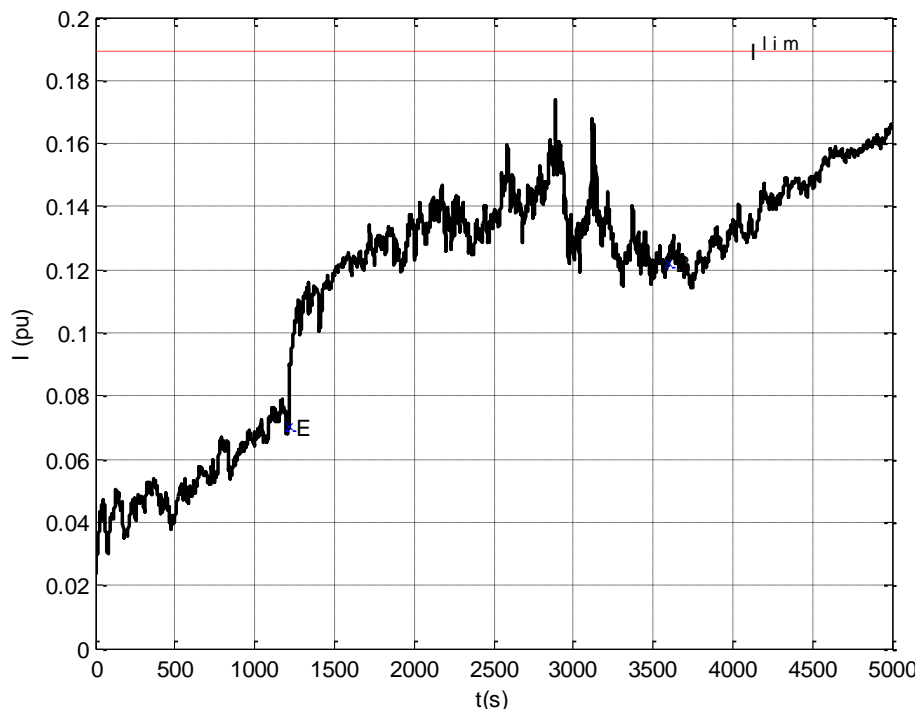
Το ρεύμα του μετατροπέα (Σχ. 4.15) αυξάνεται απότομα με την εντολή υποστήριξης, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί τις μεταβολές της  $P_w$ . Από τη στιγμή 3600s κι έπειτα, όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φτάνει στο κάτω του όριο (Σημείο Β, Σχ. 4.16-4.17), το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται συνεχώς έως και το τέλος της προσομοίωσης, λόγω της μεγάλης αύξησης της αέργου παραγωγής στο ίδιο διάστημα (Σχ. 4.18). Παρ' όλα αυτά, το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν παραβιάζεται στη διάρκεια της προσομοίωσης.



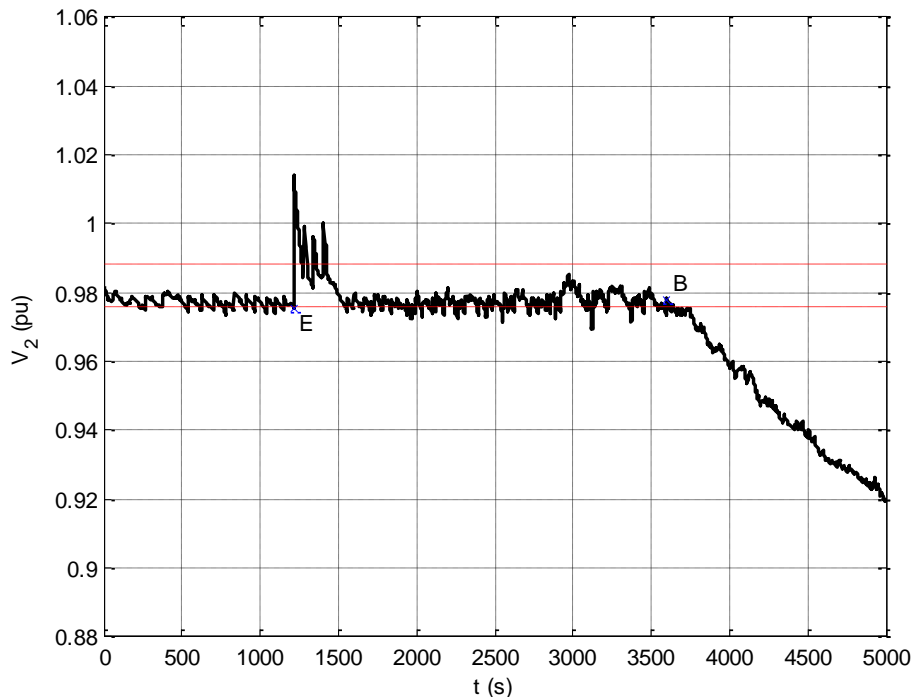
Σχήμα 4. 13 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)



Σχήμα 4. 14 ΜΤ στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)

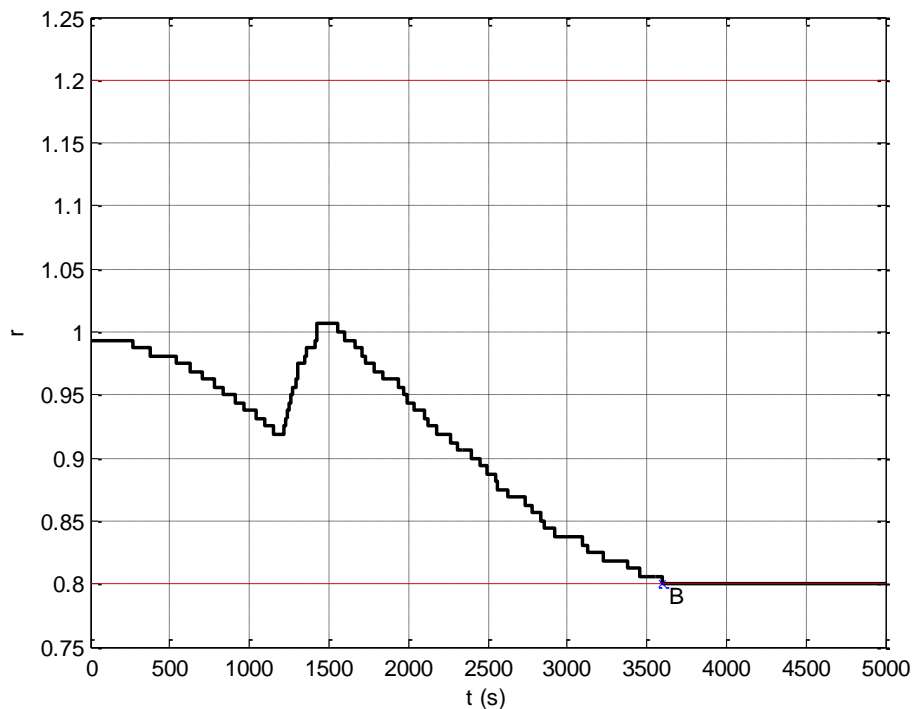


Σχήμα 4. 15 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



**Σχήμα 4. 16** Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

Στα Σχ. 4.16-4.17 παρουσιάζονται η μέση τάση του υποσταθμού  $V_2$  και οι μεταβολές βήματος του ΣΑΤΥΦ, αντίστοιχα. Το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται για πρώτη φορά τη χρονική στιγμή 270s, δηλαδή με 10s καθυστέρηση από τη στιγμή που η τάση  $V_2$  παραβιάζει το κάτω όριό της. Επομένως, ο λόγος μετασχηματισμού αρχίζει να μειώνεται συνεχώς, προκειμένου να διατηρηθεί η  $V_2$  σε σταθερά επίπεδα.



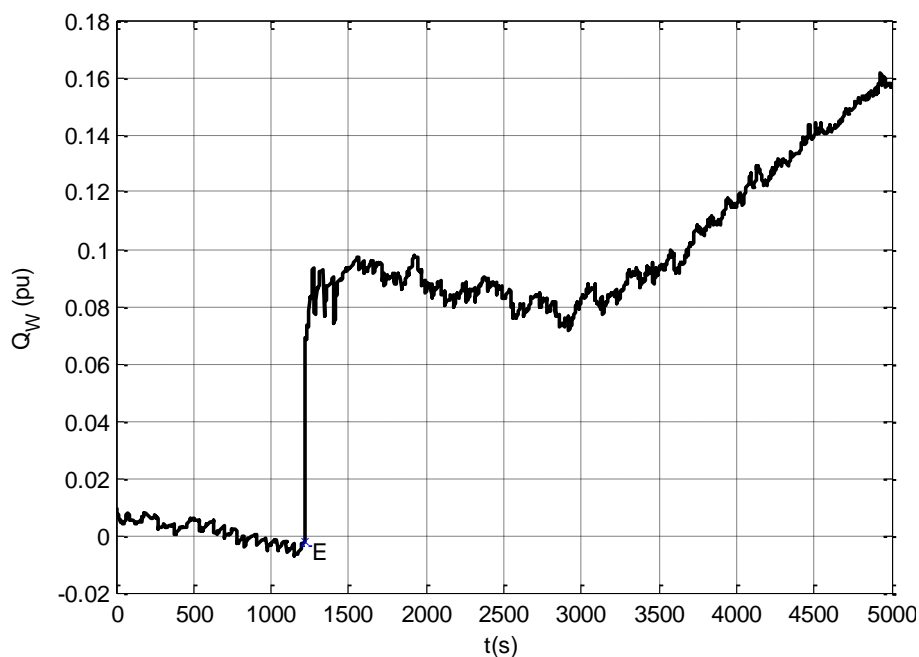
**Σχήμα 4. 17** Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

Με τη μέγιστη άεργη υποστήριξη του πάρκου από τη στιγμή 1216s, η  $V_2$  ξεπερνά απότομα το πάνω όριό της. Από το σημείο αυτό, ο λόγος μετασχηματισμού αρχίζει να αυξάνεται, με στόχο την επαναφορά της  $V_2$  εντός ορίων. Στο ίδιο διάστημα, λόγω της μεγάλης παροχής αέργου ισχύος από το πάρκο, παρατηρείται ότι γίνεται και η αυτόματη ζεύξη των τριών βαθμίδων των πυκνωτών.

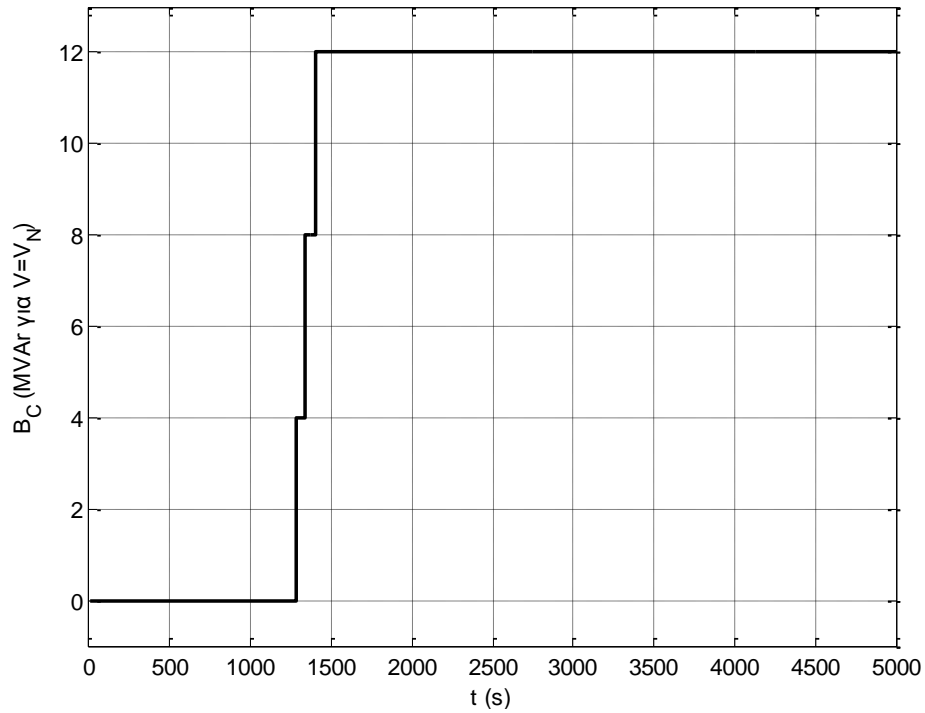
Τη στιγμή 1548s, η τάση  $V_2$  παραβιάζει εκ νέου το κάτω όριό της. Από αυτό το σημείο, ο λόγος μετασχηματισμού μειώνεται διαρκώς, μέχρι και την εξάντληση των διαθέσιμων λήψεων. Στο Σχ. 4.16 φαίνεται ότι ο έλεγχος του ΣΑΤΥΦ διατηρεί σε γενικές γραμμές σταθερή την τάση  $V_2$ . Από τη στιγμή 3600s όμως που εξαντλούνται οι διαθέσιμες λήψεις και επομένως δεν υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής του λόγου μετασχηματισμού, η τάση  $V_2$  μειώνεται συνεχώς.

Οι γραφικές παραστάσεις της εγχεόμενης αέργου ισχύος  $Q_w$  του Α/Π και της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών, παρουσιάζονται αντίστοιχα στα Σχ. 4.18-4.19. Παρατηρείται ότι κάθε φορά που η άεργος ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό ΜΤ του υποσταθμού ξεπερνάει το όριο  $Q_d^{lim}$  για χρονικό διάστημα 60s, συνδέεται και μια βαθμίδα πυκνωτών. Από τη χρονοσειρά της  $Q_w$ , μπορεί κανείς εύκολα να αντιληφθεί τη συνεισφορά αέργου ισχύος που οφείλεται στην λειτουργία υπό τη μέγιστη δυνατή τάση, μέσω της εντολής υποστήριξης.

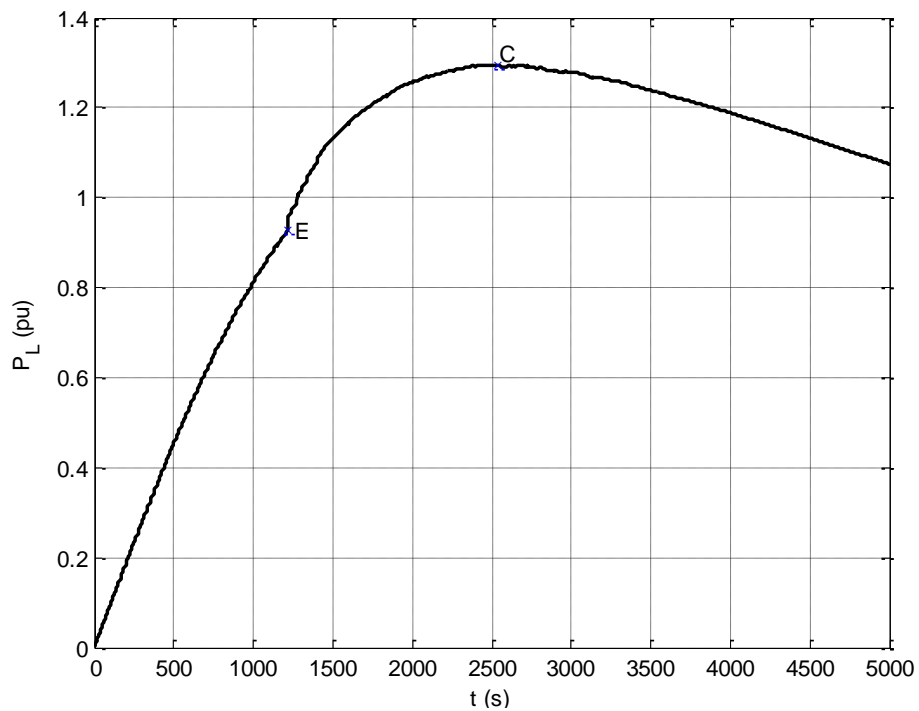
Το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος συναντάται τη χρονική στιγμή 2533s (Σχ. 4.20), μετά δηλαδή από την σύνδεση των διαθέσιμων αυτομάτων πυκνωτών. Το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι 129,48MW. Το όριο αυτό είναι μεγαλύτερο κατά 10,25MW σε σχέση με τη συνεχή ρύθμιση της τάσης του Α/Π. Η άεργος παραγωγή από το Α/Π #1 στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος είναι  $Q_w=8,62\text{MVA}_r$ , ενώ η έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό ΥΤ είναι  $Q_l=16,38\text{MVA}_r$ .



**Σχήμα 4. 18** Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)



Σχήμα 4. 19 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

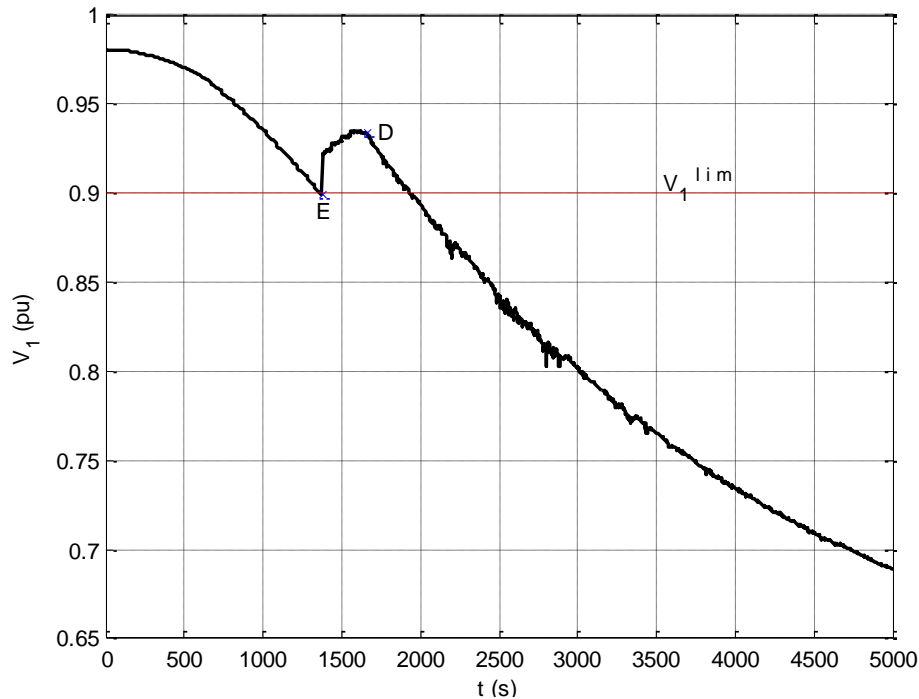


Σχήμα 4. 20 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

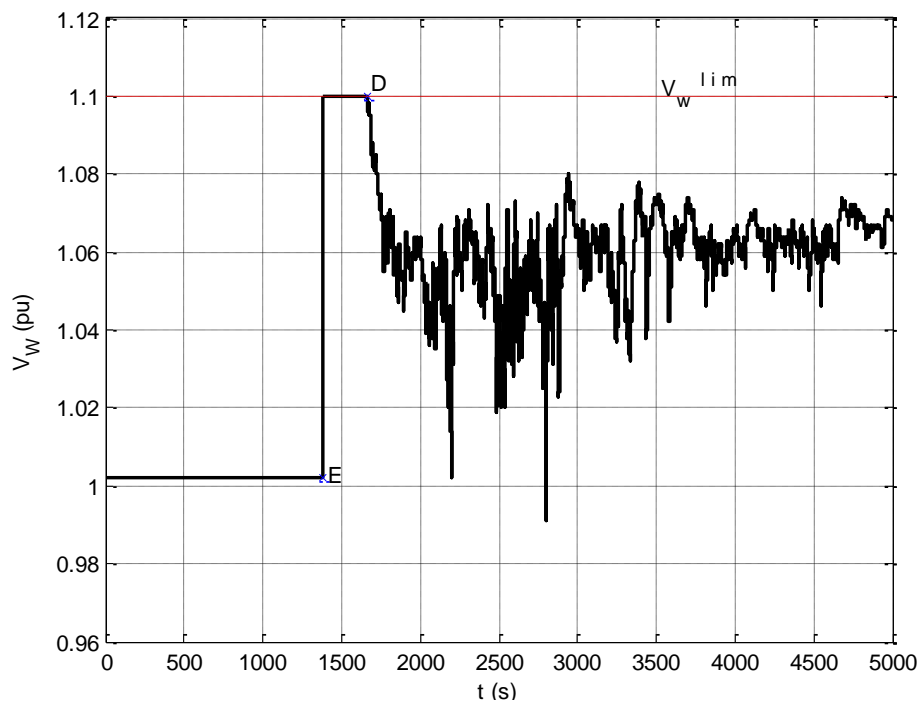
#### 4.2.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2

Στην παράγραφο αυτή, προσομοιώνεται η λειτουργία του συστήματος με το Αιολικό Πάρκο #2, για έλεγχο μέγιστη άεργης υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης. Η χρονική μεταβολή της υψηλής τάσης  $V_l$  στην προσομοίωση αυτή παρουσιάζεται στο Σχ. 4.21. Η  $V_l$  φτάνει στο κάτω

όριο  $V_I^{lim}$  τη χρονική στιγμή 1368s. Με καθυστέρηση 10s ενεργοποιείται ο μηχανισμός έκτακτης ανάγκης και αποστέλλεται η εντολή άεργης υποστήριξης (Σημείο E). Συνεπώς, η τάση  $V_w$  του πάρκου οδηγείται στην τιμή  $V_w^{lim}$  στηρίζοντας έτσι την υψηλή τάση  $V_I$  (Σχ. 4.22). Το σημείο D αντιστοιχεί στη χρονική στιγμή κατά την οποία παραβιάζεται το όριο του μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος του μετατροπέα. Όπως είναι εμφανές στα Σχ. 4.22-4.23, από αυτή τη χρονική στιγμή (1660s), ο ελεγκτής αέργου ισχύος αντιμετωπίζει την υπερφόρτιση, συγκρατώντας το ρεύμα στη μέγιστη τιμή, μέσω της μείωσης της  $V_w$ .

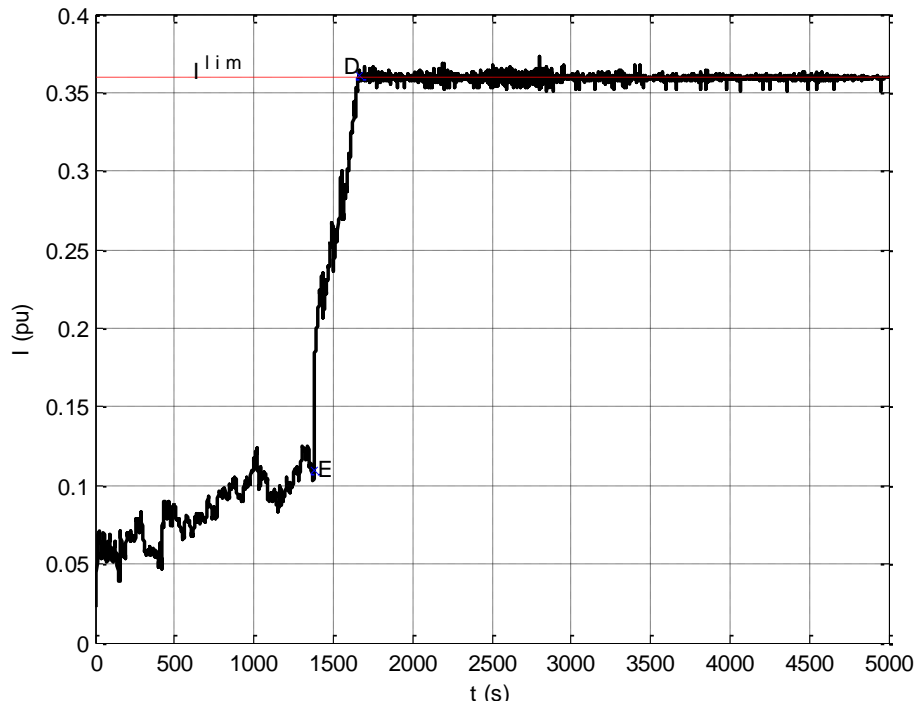


Σχήμα 4. 21 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)

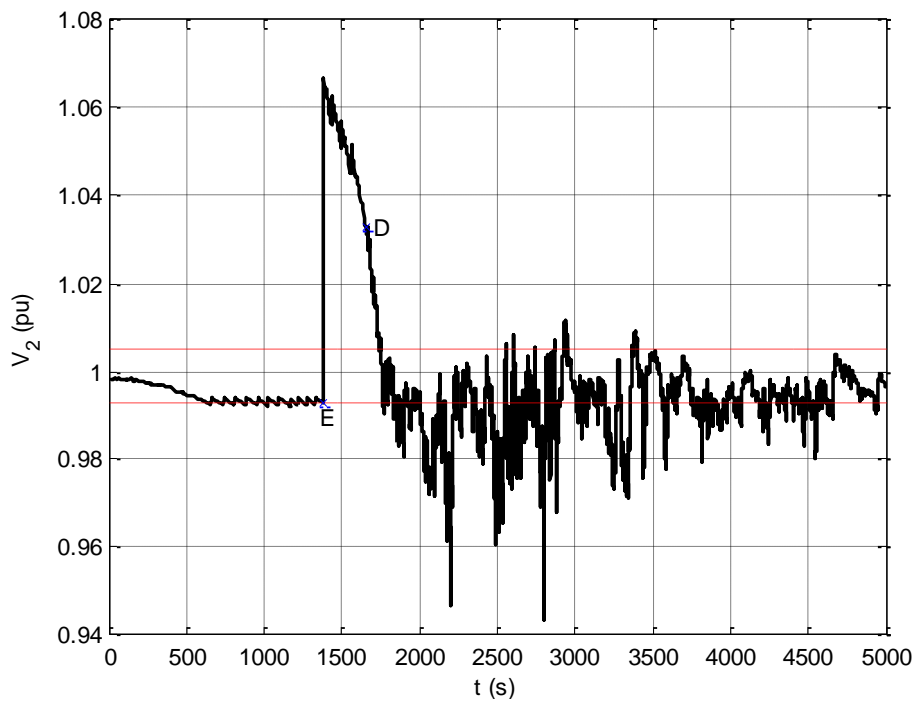


Σχήμα 4. 22 Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



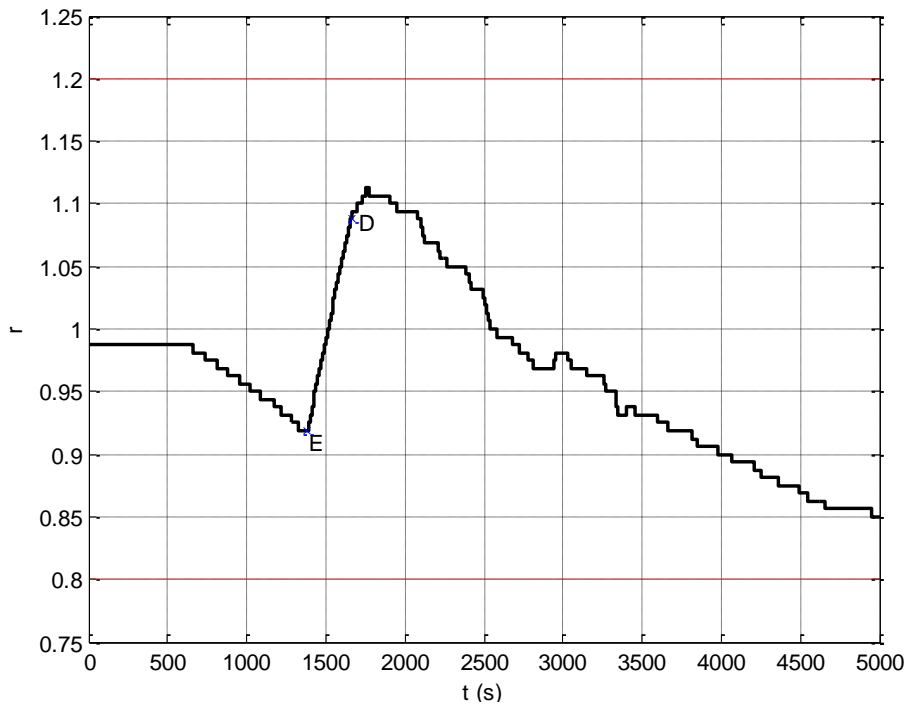


Σχήμα 4. 23 Ενεργός Τιμή Ρεύματος του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 4. 24 Τάση ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)

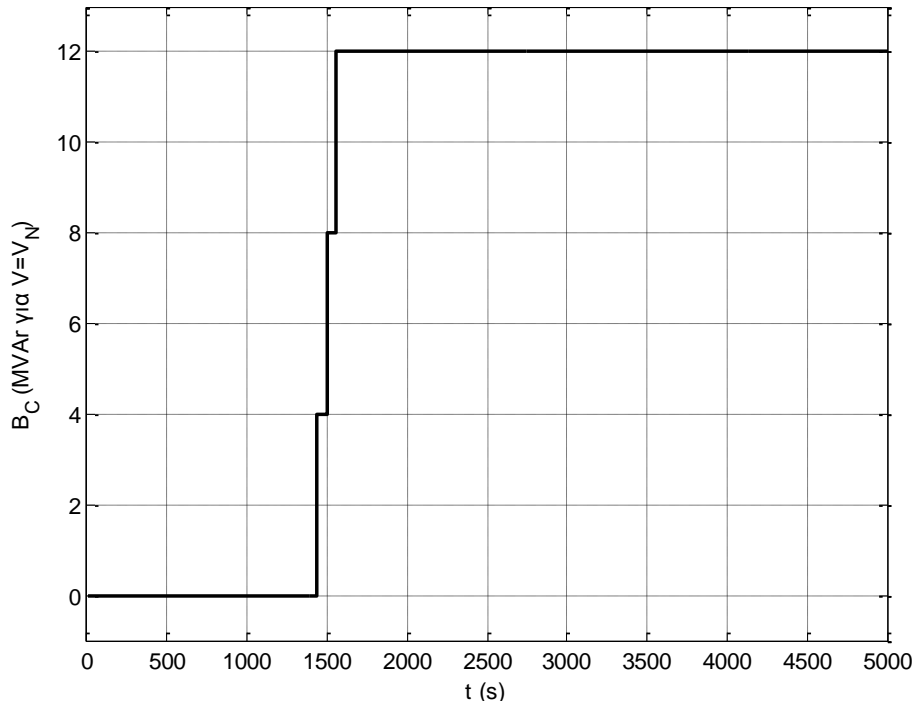
Στα Σχ. 4.24-4.25 παρουσιάζονται η τάση διανομής  $V_2$  και οι μεταβολές βήματος του ΣΑΤΥΦ, αντίστοιχα. Το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται για πρώτη φορά τη χρονική στιγμή 660s, δηλαδή με 10s καθυστέρηση από τη στιγμή που η τάση  $V_2$  παραβιάζει το κάτω όριό της. Έτσι, ο λόγος μετασχηματισμού αρχίζει να μειώνεται διαρκώς, ώστε η  $V_2$  να διατηρηθεί σε σταθερά επίπεδα.



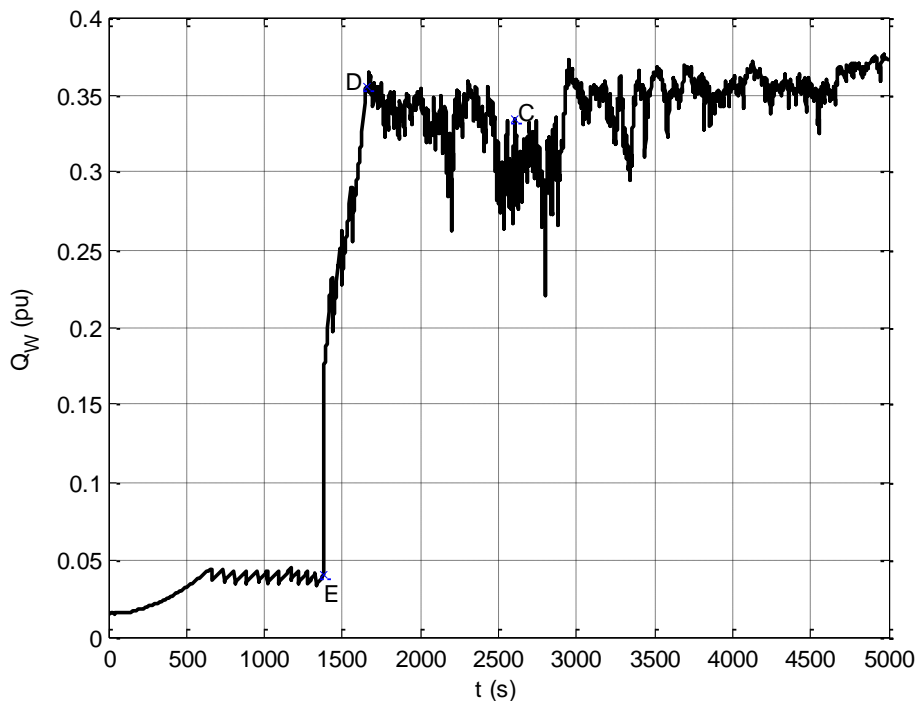
**Σχήμα 4. 25** Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)

Με τη μέγιστη άεργη υποστήριξη του πάρκου κατά τη χρονική στιγμή 1378s, η  $V_2$  υπερβαίνει το πάνω όριό της. Από τη στιγμή αυτή, ο λόγος μετασχηματισμού αρχίζει να αυξάνεται, με στόχο την επαναφορά της  $V_2$  εντός ορίων. Τη στιγμή 1766s, η τάση  $V_2$  παραβιάζει εκ νέου το κάτω όριό της. Από αυτό το σημείο κι έπειτα, ο λόγος μετασχηματισμού μειώνεται διαρκώς μέχρι το τέλος της προσομοίωσης.

Στα Σχ. 4.26-4.27 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης των τριών βαθμίδων των στατών πυκνωτών και της εγγερόμενης αέργου ισχύος  $Q_w$  του Αιολικού Πάρκου #2, αντίστοιχα. Οι συστοιχίες συνδέονται τις χρονικές στιγμές 1440s, 1500s, 1560s, δηλαδή με διαφορά 60s μεταξύ τους, διάστημα ίσο με την καθυστέρηση ζεύξης. Αυτό είναι αναμενόμενο, αφού λόγω της μέγιστης υποστήριξης η  $Q_d$  παραμένει διαρκώς πάνω από το όριο  $Q_d^{lim}=4\text{MVA}$ . Από τη χρονοσειρά της  $Q_w$ , μπορεί κανείς να αντιληφθεί τη συνεισφορά αέργου ισχύος που οφείλεται στην λειτουργία υπό τη μέγιστη δυνατή τάση, μέσω της εντολής αέργου υποστήριξης.

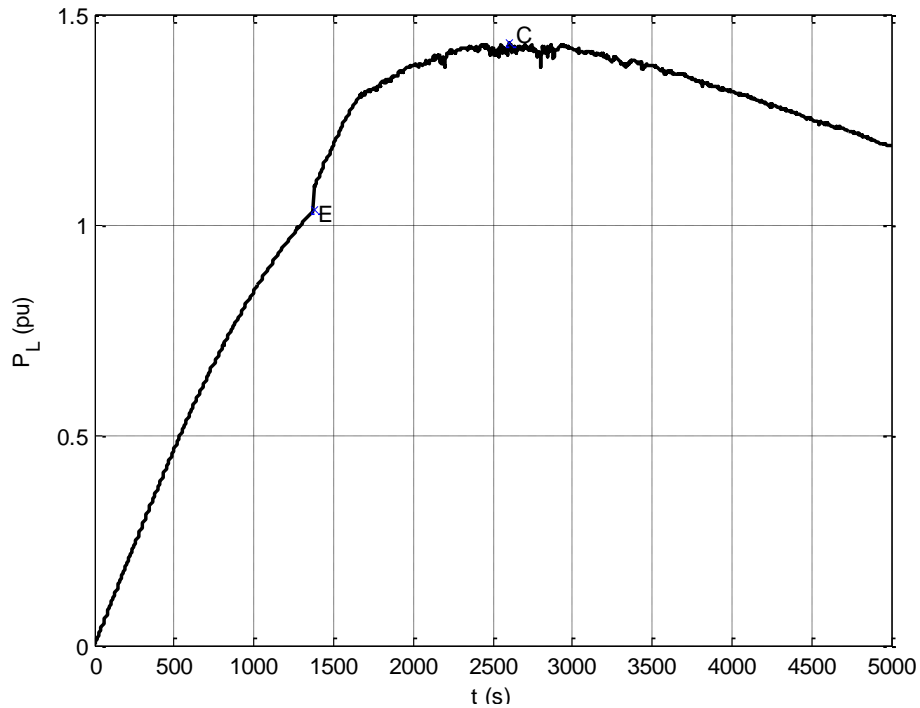


Σχήμα 4. 26 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)



Σχήμα 4. 27 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)

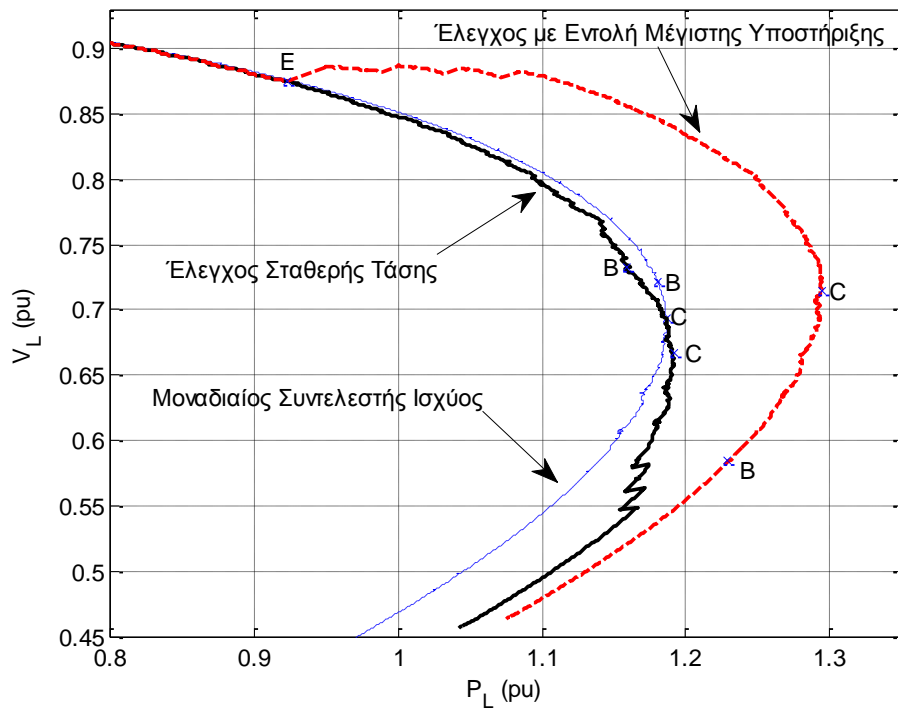
Το σημείο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος συναντάται τη χρονική στιγμή 2605s (Σχ. 4.28), μετά δηλαδή από την σύνδεση των αυτομάτων πυκνωτών. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ισούται με 143,03MW. Είναι δηλαδή αυξημένη κατά 15,65MW σε σχέση με τη λειτουργία ρύθμισης της τάσης του Α/Π #2.



Σχήμα 4. 28 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)

### 4.2.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Κεφαλαίων 3 και 4 ως προς τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του Σχ. 3.1. Στο Σχ. 4.29 και στον Πιν. 4.1 φαίνονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για το όριο φόρτισης του συστήματος στην περίπτωση του Α/Π #1.



Σχήμα 4. 29 PV Καμπύλη για Έλεγχο Σταθερής Τάσης και Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1

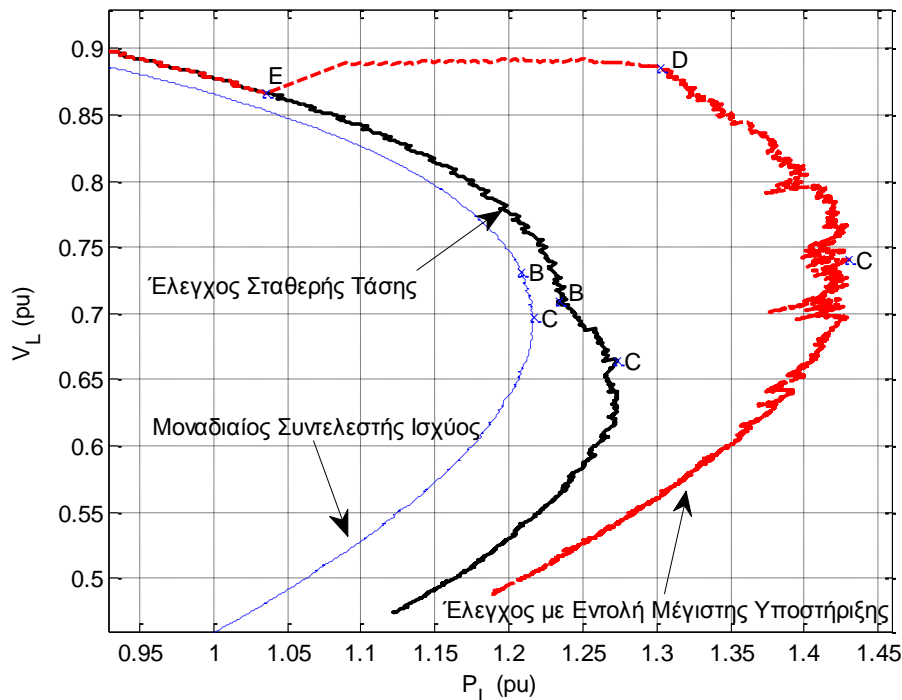
Ο έλεγχος εντολής μέγιστης υποστήριξης προσφέρει αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος κατά 10,25MW σε σχέση με τη συνεχή ρύθμιση της τάσης του Α/Π, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Αυτή η ποσότητα είναι σημαντική, αν αναλογιστεί κανείς ότι αντιστοιχεί σε ένα 54% της ονομαστικής ισχύος του πλήρους μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθεί το σήμα μέγιστης άεργης υποστήριξης (Σημείο E), η απόκριση είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις (η κόκκινη διακεκομμένη γραμμή ταυτίζεται με τη μαύρη έως το σημείο E).

Πίνακας 4. 1 MMI με Μεταβλητή Ενεργό Ισχύ (MW)

A/Π	Χωρίς A/Π	Μοναδιαίος Συντελεστής Ισχύος	Έλεγχος Σταθερής Τάσης	Έλεγχος με Εντολή Μέγιστης Υποστήριξης
#1	117,69	118,67	119,29	129,48
#2	119,51	121,65	127,38	143,03

Σημειώνεται εδώ ότι και στα δύο σενάρια αέργου υποστήριξης, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς αυξάνεται, όπως φαίνεται στον Πιν. 4.1. Συγκρίνοντας με τα σενάρια μηδενικής αέργου ισχύος, ο έλεγχος σταθερής τάσης Α/Π προσφέρει μια μικρή μόνο αύξηση στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα παίζει το γεγονός ότι οι συστοιχίες πυκνωτών στην περίπτωση αυτή συνδέονται μετά το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Στην περίπτωση του ελέγχου με μέγιστη άεργη υποστήριξη, η αύξηση που επιτυγχάνεται είναι όπως φάνηκε αξιοσημείωτη. Η εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης σε συνδυασμό με την αυτόματη ζεύξη των πυκνωτών, καθιστούν την άεργο ισχύ καθοριστική για το όριο φόρτισης του συστήματος. Η άεργος παραγωγή στο σημείο αυτό από το Α/Π #1 είναι  $Q_w=8,62\text{MVA}_r$ , ενώ η έγχυση αέργου ισχύος στο ζυγό YT είναι  $Q_l=16,38\text{MVA}_r$ .



Σχήμα 4. 30 PV Καμπύλη για Έλεγχο Σταθερής Τάσης και Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2

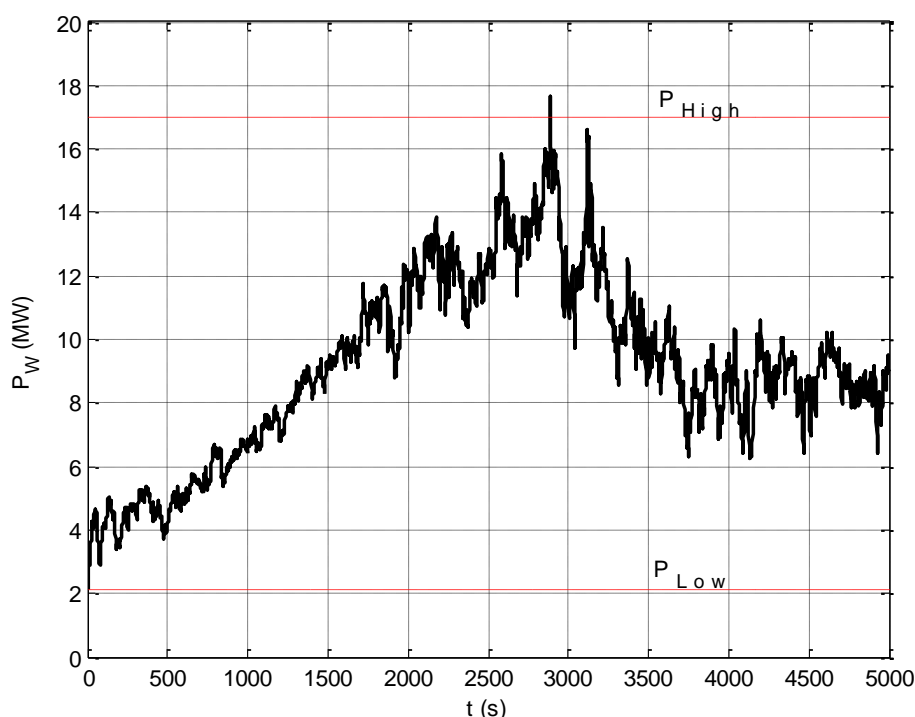
Στο Σχ. 4.30 και στον Πιν. 4.1 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα για το όριο φόρτισης του συστήματος στην περίπτωση του Α/Π #2. Ο έλεγχος εντολής μέγιστης άεργης υποστήριξης προσφέρει αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος κατά 15,65MW σε σχέση με τη λειτουργία ρύθμισης της τάσης του Α/Π #2. Αυτή η ποσότητα είναι σημαντική και αντιστοιχεί σε 43% της ονομαστικής ισχύος του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Παρατηρείται ότι μέχρι να ενεργοποιηθεί το σήμα μέγιστης άεργης υποστήριξης (Σημείο Ε), η απόκριση είναι και πάλι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις.

Συγκρίνοντας με τις περιπτώσεις μηδενικής άεργου ισχύος, ο έλεγχος σταθερής τάσης του Α/Π #2 προσφέρει μια μεγαλύτερη αύξηση στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος, σε σχέση με το Α/Π #1. Σημαντικό ρόλο σε αυτό το αποτέλεσμα παίζει το γεγονός ότι δύο απ' τις τρεις διαθέσιμες συστοιχίες πυκνωτών συνδέονται πριν από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και μόνο μία έπειτα. Έτσι, η άεργος υποστήριξη από το Α/Π βελτιώνεται σημαντικά και συνεπώς, αυξάνεται αντίστοιχα το όριο φόρτισης του συστήματος.

Στην περίπτωση του ελέγχου με μέγιστη άεργη υποστήριξη, η αύξηση που επιτυγχάνεται είναι όπως φάνηκε ακόμα πιο σημαντική. Η εντολή μέγιστης άεργου υποστήριξης σε συνδυασμό με την αυτόματη ζεύξη των πυκνωτών, αυξάνουν σημαντικά το όριο φόρτισης του συστήματος. Η άεργος παραγωγή στο σημείο αυτό από το Α/Π #2 είναι 33,36MVA<sub>r</sub>, ενώ η έγχυση άεργου ισχύος στο ζυγό ΥΤ είναι 34,31MVA<sub>r</sub>.

### 4.3 Επίδραση Ενεργού Παραγωγής στην Υποστήριξη του Συστήματος Μεταφοράς

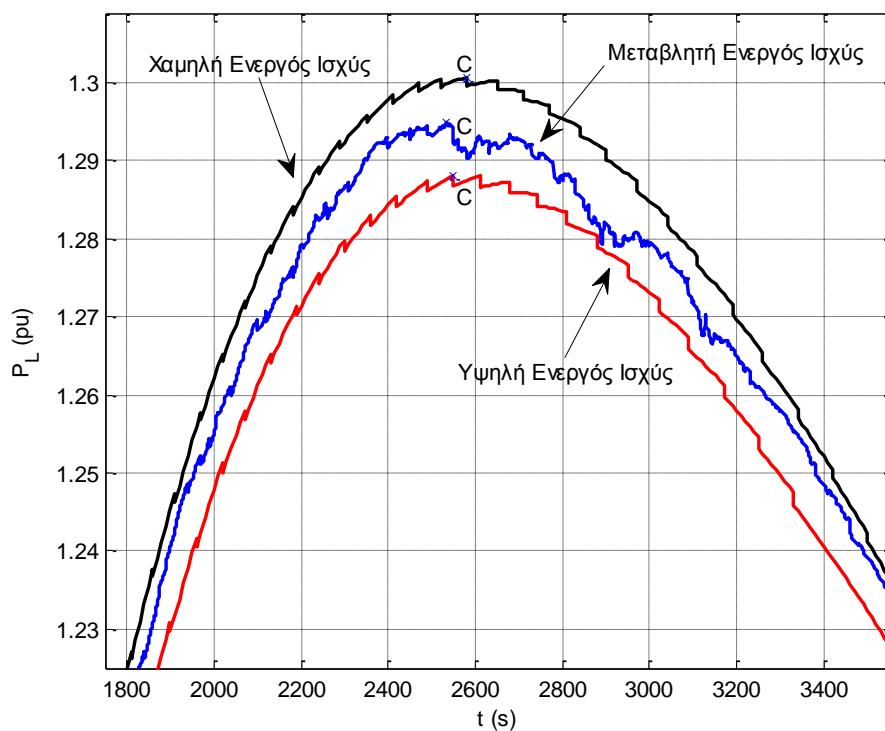
#### 4.3.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1



Σχήμα 4. 31 Χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή, Α/Π #1

Στην παράγραφο αυτή, η επίδραση της μεταβλητότητας του ανέμου στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, συγκρίνεται με δύο ακραία σενάρια ενεργού παραγωγής. Το ένα σενάριο υποθέτει σταθερή χαμηλή αιολική παραγωγή, που αντιστοιχεί σε περίοδο σχετικής άπνοιας, ενώ το δεύτερο προσομοιώνει την περίπτωση σταθερής υψηλής αιολικής παραγωγής (90% της ονομαστικής  $S_n$ ). Στο Σχ. 4.31 φαίνεται η ενεργός παραγωγή του Α/Π #1 για τις τρεις αυτές περιπτώσεις.

Στην ενότητα αυτή χρησιμοποιείται ο έλεγχος με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης, ο οποίος όπως φάνηκε είναι ο ευνοϊκότερος για το όριο φόρτισης του συστήματος. Τα αποτελέσματα ως προς τη μεταφερόμενη ισχύ στο φορτίο για λειτουργία του Αιολικού Πάρκου #1, φαίνονται στο Σχ. 4.32 και στον Πιν. 4.2. Παρατηρείται ότι οι καμπύλες της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου για τα δύο ακραία σενάρια περικλείουν την καμπύλη με την μεταβλητή ενεργό παραγωγή.



**Σχήμα 4. 32** Ισχύς Φορτίου για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

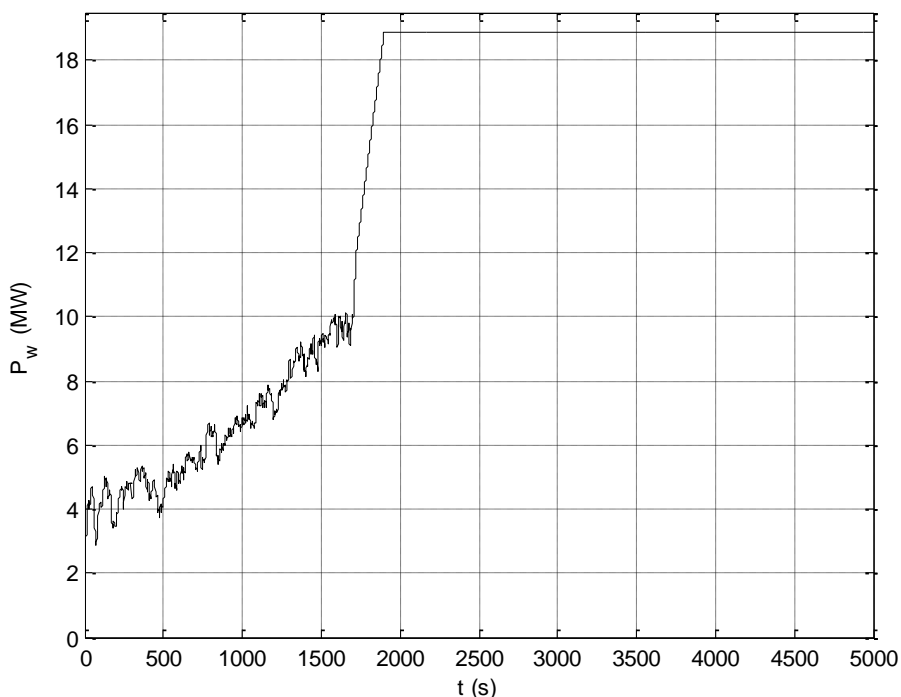
**Πίνακας 4. 2** MMI (MW) για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή ενεργό παραγωγή, Α/Π #1

Α/Π	Χαμηλή $P_w$ ( $P_w=2,1MW$ )	Μεταβλητή $P_w$ $P_{low} < P_w < P_{high}$	Υψηλή $P_w$ ( $P_w=17MW$ )
#1	130,07	129,48	128,81

Συγκρίνοντας τα Σχ. 4.31-4.32, φαίνεται ότι σε κάθε στιγμιαία μεταβολή της ενεργού παραγωγής του Α/Π, το καταναλισκόμενο φορτίο ανταποκρίνεται με μια αντίθετη κατεύθυνση μεταβολή. Έτσι για παράδειγμα, μια στιγμιαία αυξημένη αιολική παραγωγή οδηγεί σε μια μειωμένη καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου. Αυτή η συμπεριφορά του φορτίου οφείλεται στην αντίστοιχη μείωση της αέργου υποστήριξης και άρα της τάσης στο σύστημα μεταφοράς.

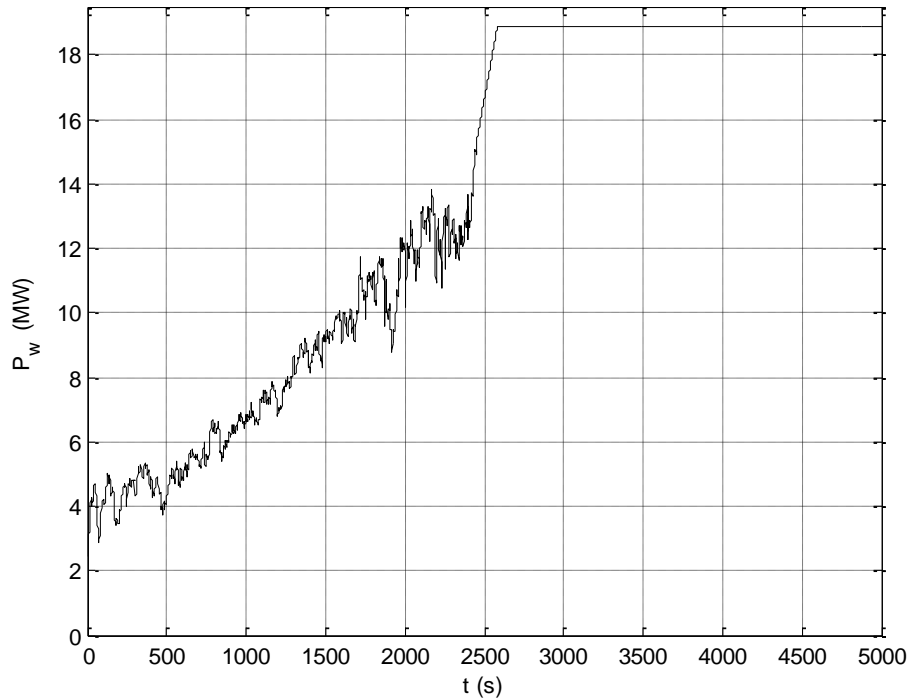
Από αυτή τη σκοπιά, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για μια μεταβλητή ενεργό παραγωγή φαίνεται στοχαστική και εξαρτάται από τις τιμές της εκάστοτε χρονοσειράς που χρησιμοποιείται. Βεβαίως, το περιθώριο αέργου υποστήριξης και η χρονική διαδοχή των διαφόρων ελέγχων του συστήματος, επιδρούν επίσης σημαντικά στο όριο φόρτισης του συστήματος.

Στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις χαμηλής, υψηλής και μεταβλητής φόρτισης λόγω της αντίστοιχης παραγωγής του Αιολικού Πάρκου #1, προστίθεται και η ακόλουθη: Η χρονοσειρά μεταβλητής παραγωγής θεωρείται ότι από κάποια χρονική στιγμή οδηγεί σε μια ράμπα που φτάνει την ονομαστική ισχύ (1αμ), στη μέγιστη δηλαδή αιολική παραγωγή. Στα Σχ. 4.33-4.34 παρουσιάζονται δύο τροποποιημένες χρονοσειρές, με την ονομαστική παραγωγή να επιτυγχάνεται στα 1900s και στα 2583s, αντίστοιχα.

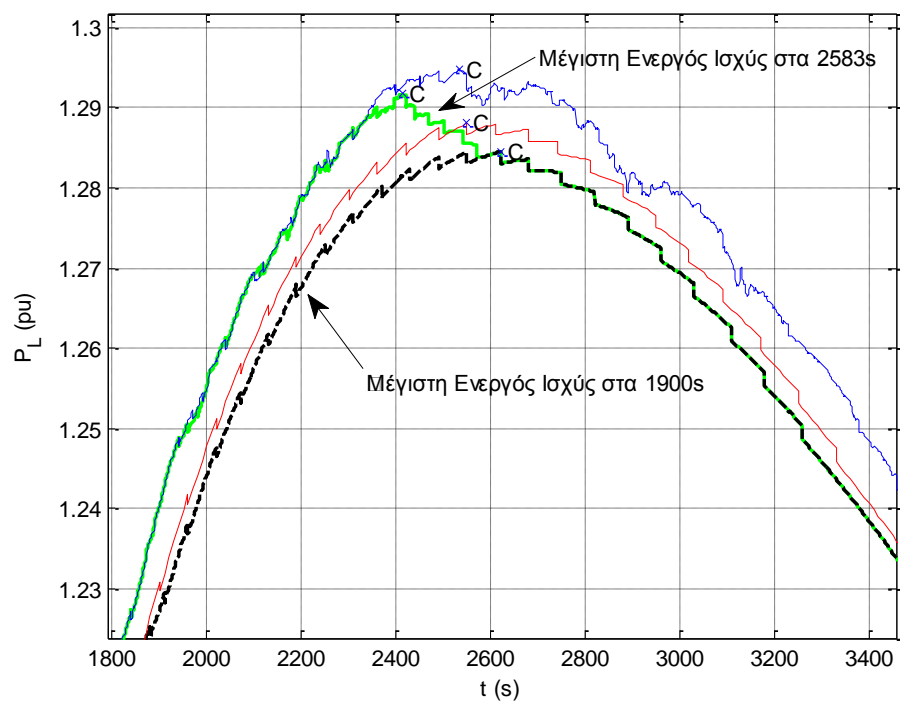


**Σχήμα 4. 33** 1η Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (μέγιστη αιολική παραγωγή στα 1900s), Α/Π #1





Σχήμα 4. 34 2η Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (μέγιστη αιολική παραγωγή στα 2583s), Α/Π #1



Σχήμα 4. 35 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένων χρονοσειρών (με μέγιστη αιολική παραγωγή), Α/Π #1

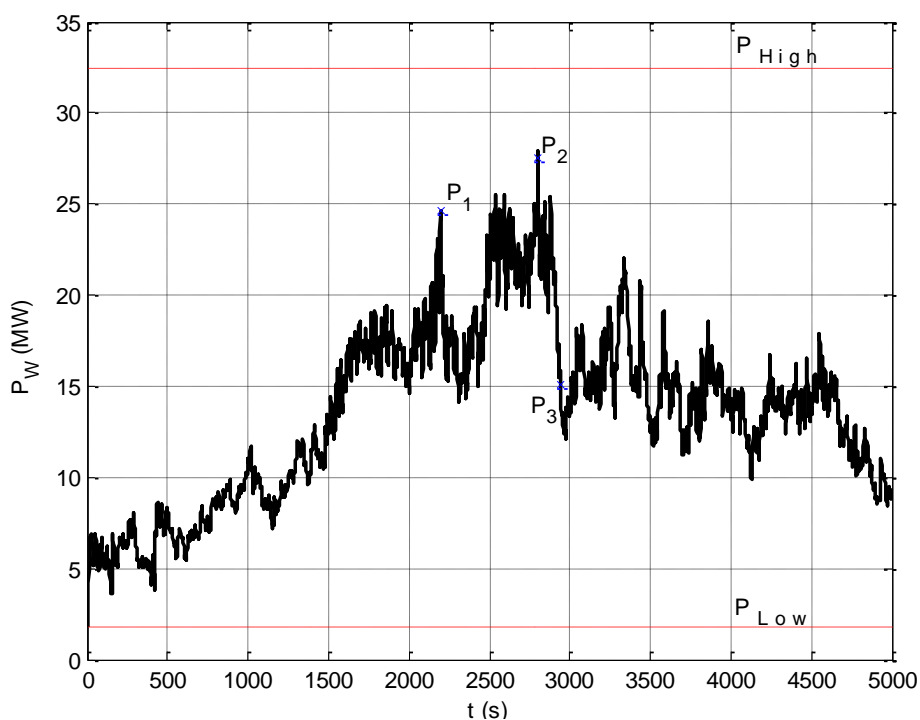
Τα αποτελέσματα ως προς την ισχύ του φορτίου φαίνονται στο Σχ. 4.35. Για λόγους σύγκρισης, διατηρήθηκαν στο σχήμα και οι περιπτώσεις της σταθερής υψηλής (90%) αιολικής παραγωγής, αλλά και της μεταβλητής παραγωγής του Σχ. 4.31. Παρατηρείται ότι η χρονική στιγμή κατά την οποία αρχίζει η ράμπα της αιολικής παραγωγής, αλλά και η χρονική διάρκεια μέχρι να φτάσει την ονομαστική τιμή, επηρεάζουν άμεσα τη μέγιστη μεταφερόμενη

ισχύ του συστήματος μεταφοράς. Επίσης, σημειώνεται ότι η καμπύλη ισχύος του φορτίου στο διάστημα που η αιολική παραγωγή είναι ίση με την ονομαστική ισχύ, δηλαδή από τη χρονική στιγμή 2583s κι έπειτα, είναι η ίδια για τις περιπτώσεις των δύο τροποποιημένων χρονοσειρών

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στην περίπτωση της χρονοσειράς του Σχ. 4.33 είναι 128,45MW, ενώ στην περίπτωση της χρονοσειράς του Σχ. 4.34 είναι 129,18MW. Συνεπώς, αναδεικνύεται κι εδώ ότι η στοχαστικότητα της αιολικής παραγωγής, επηρεάζει άμεσα το όριο φόρτισης του συστήματος μεταφοράς.

### 4.3.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζεται η επίδραση της ενεργού παραγωγής στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στο φορτίο του συστήματος για λειτουργία του Α/Π #2 και για τα σενάρια της σταθερής χαμηλής και σταθερής υψηλής (90% της ονομαστικής  $S_n$ ) αιολικής παραγωγής, όπως ακριβώς και στην περίπτωση του Α/Π #1. Στο Σχ. 4.36 φαίνεται η ενεργός ισχύς του Α/Π #2 και για τις τρεις περιπτώσεις.



Σχήμα 4. 36 Χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή, Α/Π #2

Όπως και στη λειτουργία του συστήματος με το Α/Π #1, χρησιμοποιείται ο έλεγχος με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης, ο οποίος είναι ο ευνοϊκότερος για το όριο φόρτισης του συστήματος. Τα αποτελέσματα ως προς την ισχύ του φορτίου φαίνονται στο Σχ. 4.37 και συνοψίζονται στον Πιν. 4.3. Σε αντίθεση με την ανάλυση του Α/Π #1, παρατηρείται ότι τα δύο ακραία σενάρια σταθερής χαμηλής και υψηλής αιολικής παραγωγής, δεν περικλείουν την καμπύλη με τη μεταβλητή ενεργό παραγωγή. Συγκεκριμένα, τα χρονικά διαστήματα στα οποία η αιολική παραγωγή είναι μειωμένη, όπως για παράδειγμα το διάστημα 2250-2450s αλλά και το διάστημα μετά τα 2900s, η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου αυξάνεται σημαντικά και ξεπερνά την καμπύλη ισχύος του φορτίου με τη σταθερή χαμηλή αιολική ισχύ.

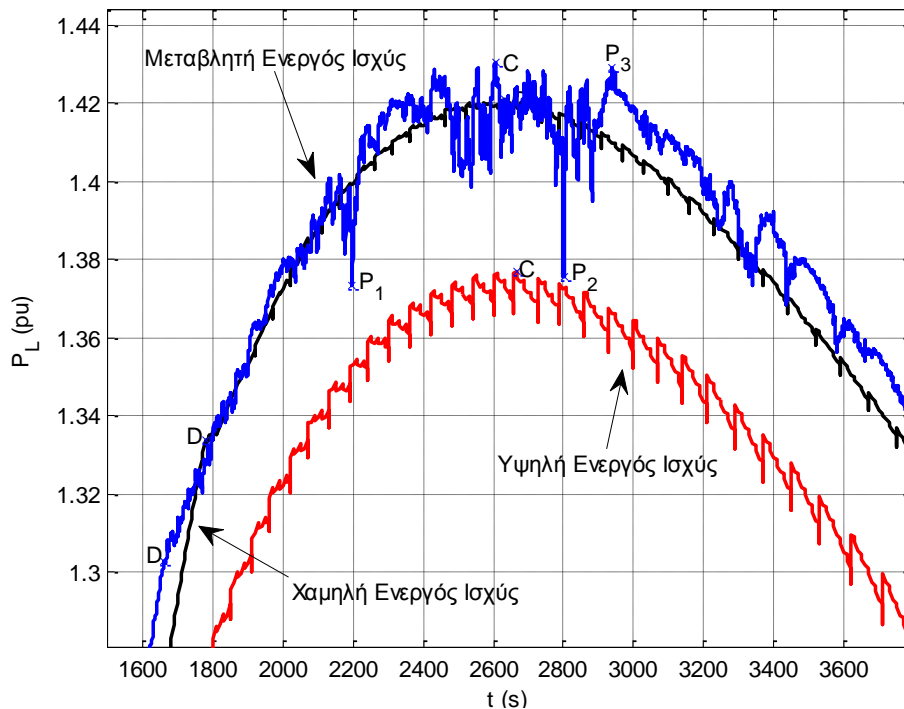
**Πίνακας 4. 3** MMI (MW) για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή ενεργό παραγωγή, Α/Π #2

A/Π	Χαμηλή Pw ( $P_w=1,76MW$ )	Μεταβλητή Pw $P_{low} < P_w < P_{high}$	Υψηλή Pw ( $P_w=32,4MW$ )
#2	142,08	143,03	137,68

Σημειώνεται ότι σε κάθε στιγμιαία μεταβολή της ενεργού παραγωγής του Α/Π #2, η καταναλισκόμενη ισχύς του φορτίου ανταποκρίνεται με μια αντίθετης κατεύθυνσης μεταβολή. Αυτό το φαινόμενο γίνεται εντονότερα αντιληπτό στα εξής σημεία της μεταβλητής χρονοσειράς αιολικής παραγωγής του Σχ. 4.36:

- $P_1$  ( $t_1=2195s$ ,  $P_{L1}=137,34MW$ )
- $P_2$  ( $t_2=2801s$ ,  $P_{L2}=137,56MW$ )
- $P_3$  ( $t_3=2940s$ ,  $P_{L3}=142,89MW$ )

Επειδή κατά την προσομοίωση του συστήματος με μεταβλητή παραγωγή παραβιάζεται το όριο του μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος, επενεργεί ο περιοριστής ρεύματος μέσω της προσαρμογής της τάσης του Α/Π  $V_w$ . Έτσι, η τάση  $V_w$  μειώνεται, προκειμένου να διατηρηθεί το ρεύμα κάτω από την μέγιστη τιμή του. Μάλιστα, τις στιγμές που η αιολική ισχύς αυξάνεται σημαντικά, όπως στα σημεία  $P_1$  και  $P_2$ , η  $V_w$  χρειάζεται να μειωθεί ακόμη περισσότερο. Συνεπώς, η άεργη υποστήριξη του Α/Π επίσης ελαττώνεται σε αυτό το σημείο και έτσι, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στη γραμμή μεταφοράς είναι μικρότερη. Στην περίπτωση του σημείου  $P_3$ , η πορεία είναι η αντίστροφη. Η αιολική ισχύς σ' αυτό το σημείο μειώνεται σημαντικά, επομένως η τάση  $V_w$  αυξάνεται με στόχο να επανέλθει στην τιμή  $V_w^{lim}$ . Αντίστοιχα λοιπόν αυξάνεται και η άεργος υποστήριξη του Α/Π, και κατά συνέπεια, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στη γραμμή μεταφοράς είναι μεγαλύτερη.

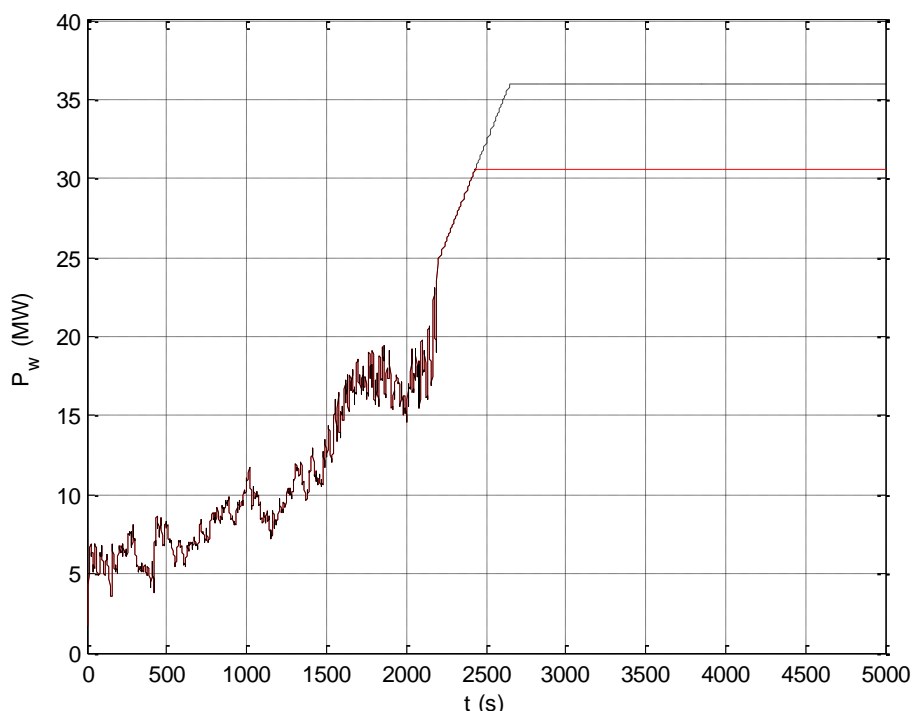


**Σχήμα 4. 37** Ισχύς Φορτίου για χαμηλή, υψηλή και μεταβλητή αιολική παραγωγή (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)

### 4.3.3 Διερεύνηση και αντιμετώπιση προβλημάτων ευστάθειας στο Α/Π #2

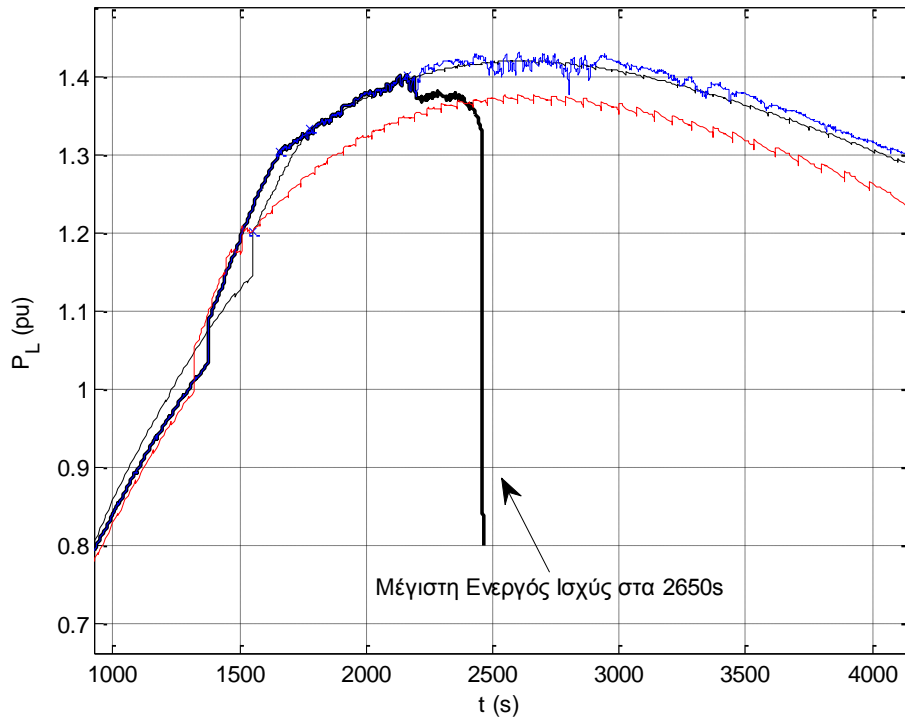
Στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις ενεργού παραγωγής προστίθεται και η ακόλουθη: Η χρονοσειρά μεταβλητής ενεργού παραγωγής οδηγείται από κάποια χρονική στιγμή κι έπειτα μέσω ράμπας στην ονομαστική της τιμή, σε μέγιστη δηλαδή αιολική παραγωγή. Στο Σχ. 4.38 παρουσιάζεται η τροποποιημένη χρονοσειρά με μαύρη διακεκομμένη γραμμή, με την ονομαστική παραγωγή να επιτυγχάνεται στα 2650s.

Τα αποτελέσματα ως προς την ισχύ που καταναλώνει το φορτίο φαίνονται στο Σχ. 4.39. Για λόγους σύγκρισης, διατηρήθηκαν στο σχήμα και οι περιπτώσεις της σταθερής χαμηλής και υψηλής (90%) αιολικής παραγωγής, αλλά και της μεταβλητής παραγωγής του Σχ. 4.36. Μέχρι τη χρονική στιγμή που η ράμπα δεν έχει ξεκινήσει, η απόκριση (μαύρο χρώμα) είναι προφανώς η ίδια με τη μπλε καμπύλη που αντιστοιχεί στη μεταβλητή παραγωγή του Σχ. 4.36. Παρατηρείται ότι από τη χρονική στιγμή 2410s το σύστημα εμφανίζει αστάθεια και καταρρέει. Όπως φαίνεται, το σύστημα στην προσπάθειά του να λειτουργήσει με την μέγιστη παραγωγή, αδυνατεί να ικανοποιήσει τις εξισώσεις που το διέπουν συνολικά (Ενότητα 3.3). Το ζήτημα αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, αλλά η λεπτομερής εξέτασή του ξεπερνά το στόχο της παρούσας εργασίας.



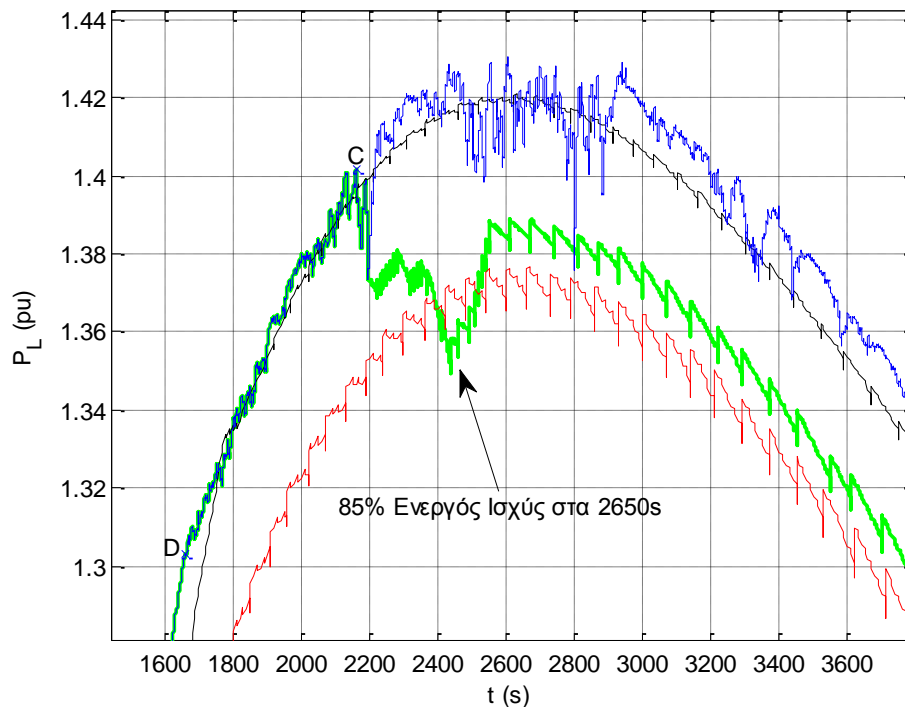
Σχ. 4.38 Τροποποιημένη Χρονοσειρά Ισχύος (με παραγωγή 1αμ στα 2650s), Α/Π #2

Πρακτικά, επειδή το πρόβλημα στην ουσία του σχετίζεται άμεσα όπως φάνηκε με την αυξημένη ενεργό παραγωγή, θεωρείται ένα νέο σενάριο στο οποίο η τροποποιημένη χρονοσειρά οδηγείται μέχρι το 85% της ονομαστικής ισχύος του Α/Π #2 (κόκκινη γραμμή στο Σχ. 4.38). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχ. 4.40.



Σχήμα 4. 39 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένης χρονοσειράς (με μέγιστη αιολική παραγωγή), Α/Π #2

Μετά τη μείωση κατά 15% της μέγιστης ενεργού παραγωγής στην οποία φτάνει η χρονοσειρά, δεν εμφανίζεται το πρόβλημα της αστάθειας. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στο φορτίο στην περίπτωση αυτή συναντάται τη χρονική στιγμή 2161s και ισούται με 140,18MW.



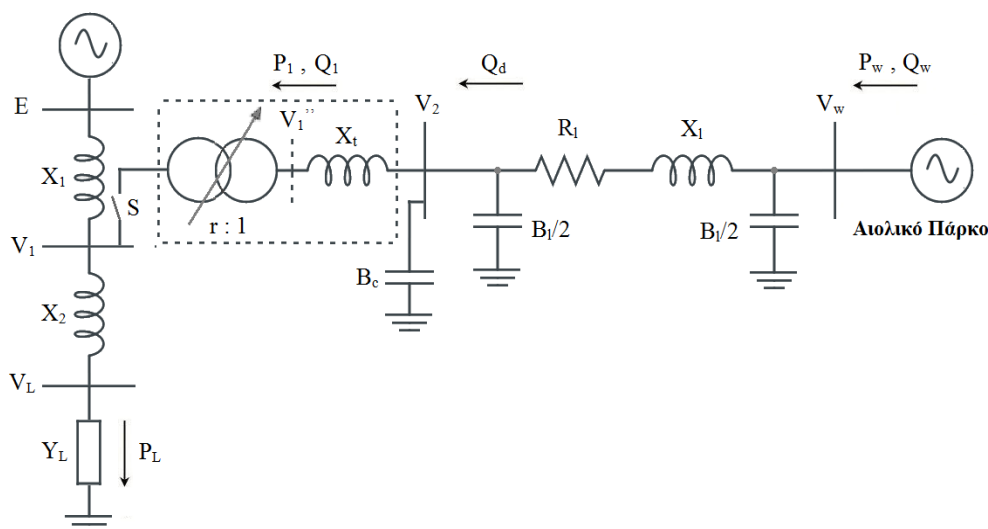
Σχήμα 4. 40 Ισχύς Φορτίου τροποποιημένης χρονοσειράς (με 0,85αμ αιολική παραγωγή), Α/Π #2



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Εφαρμογή με Πρόγραμμα Μακροπρόθεσμης Προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό, το σύστημα δοκιμών που εξετάστηκε στα Κεφ. 3 και 4 (Σχ. 5.1) με τη βοήθεια προγράμματος που αναπτύχθηκε σε γλώσσα Matlab, αναλύεται με το πρόγραμμα WPSTAB, που είναι σχεδιασμένο για τη μακροπρόθεσμη ανάλυση ευστάθειας τάσεως και του οποίου η περιγραφή δόθηκε στο Κεφ. 1. Αρχικά, ελέγχεται η συμφωνία των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων στα δύο λογισμικά και εντοπίζονται επί μέρους διαφοροποιήσεις στην απόκριση. Στη συνέχεια, το σύστημα προσομοιώνεται στο WPSTAB για διαφορετικά αναλογικά κέρδη του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης των ανεμογεννητριών. Επίσης, εξετάζεται η περίπτωση στην οποία συνδέονται στο ίδιο δίκτυο μεταφοράς και λειτουργούν ταυτόχρονα τα Αιολικά Πάρκα #1 και #2, με στόχο την εκτίμηση της επίδρασης της από κοινού σύνδεσής τους στο όριο φόρτισης του συστήματος.



Σχήμα 5. 1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών

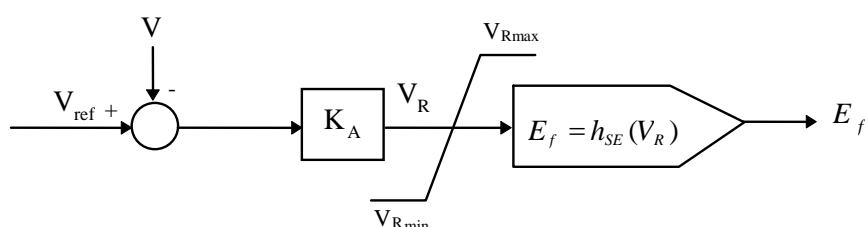
#### 5.1 Σύγκριση Αποκρίσεων

Στην ενότητα αυτή, διερευνάται ο βαθμός συμφωνίας των αποτελεσμάτων που δίνουν οι προσομοιώσεις σε περιβάλλον WPSTAB με εκείνα σε Matlab (Ενότητα 3.4). Αρχικά περιγράφονται οι διαφορές που εντοπίζονται στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της τάσης του Α/Π και για τον περιοριστή του ρεύματος του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δύο λογισμικά για τη λειτουργία του συστήματος του Σχ. 5.1. Η ανάλυση αφορά τις στρατηγικές ρύθμισης της τάσης  $V_w$  του Α/Π και της εντολής αέργου υποστήριξης εκτάκτου

ανάγκης. Οι προσομοιώσεις γίνονται χωριστά για τα Α/Π #1 και #2, τα οποία θεωρείται ότι έχουν τη σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή που δόθηκε στους Πιν 4.2 και 4.3 και η οποία είναι 2,1MW και 1,76MW αντίστοιχα.

### 5.1.1 Ρύθμιση Τάσης

Στο WPSTAB, ο έλεγχος της τάσης γίνεται μέσω του αναλογικού Αυτομάτου Ρυθμιστή Τάσης (APT) του Σχ. 5.2 [12].



Σχήμα 5. 2 Αναλογικός Ρυθμιστής Τάσης

όπου

- $K_A$ , το αναλογικό κέρδος του ρυθμιστή.
- $V_{Rmax}$ , η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της εξόδου του ρυθμιστή.
- $V_{Rmin}$ , η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της εξόδου του ρυθμιστή.
- $h_{SE}$ , η συνάρτηση μαγνητικού κορεσμού.

Υποτίθεται εδώ ότι η τάση διέγερσης είναι ίση με την έξοδο του ρυθμιστή (ο κορεσμός αμελείται), επομένως:

$$E_f = V_R = K_A(V_{ref} - V) \quad (5.1)$$

Αντίθετα, στην προσομοίωση που έγινε με πρόγραμμα σε Matlab στα Κεφ. 3 και 4, θεωρήθηκε ρυθμιστής με ολοκληρωτικό έλεγχο της τάσης του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος. Συνεπώς, για την αρχική σύγκριση το κέρδος του APT στο WPSTAB επιλέχθηκε πολύ μεγάλο ( $K_A=50.000$ ). Με αυτόν τον τρόπο, θεωρείται ότι το σφάλμα μονίμου καταστάσεως που αφήνει ο αναλογικός ρυθμιστής είναι αμελητέο. Συνεπώς, προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ότι λόγω του μεγάλου κέρδους πρακτικά ισχύει η συνθήκη ισορροπίας του ολοκληρωτικού ελέγχου:

$$V \simeq V_{ref} \quad (5.2)$$

### 5.1.2 Περιοριστής Ρεύματος Μετατροπέα

Στο πρόγραμμα προσομοιώσεων σε Matlab (Ενότητα 3.4), ο τρόπος λειτουργίας του περιοριστή ρεύματος περιγράφεται ως εξής: Εάν το ρεύμα του ηλεκτρονικού μετατροπέα υπερβεί το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, η τάση του μετατροπέα προσαρμόζεται ακαριαία, ρυθμίζοντας το ρεύμα μέχρις ότου η τιμή του επανέλθει εντός των επιθυμητών ορίων ( $I \leq I^{lim}$ ). Προφανώς, από τη στιγμή που επενεργεί η προστασία υπερφόρτισης, δεν είναι δυνατός οποιοσδήποτε έλεγχος τάσεως μέχρις ότου το ρεύμα βρεθεί ξανά εντός των ορίων, δίνοντας περιθώριο να μεταβληθεί η ελεγχόμενη τάση (μοντέλου ολοκληρωτικού ελέγχου).



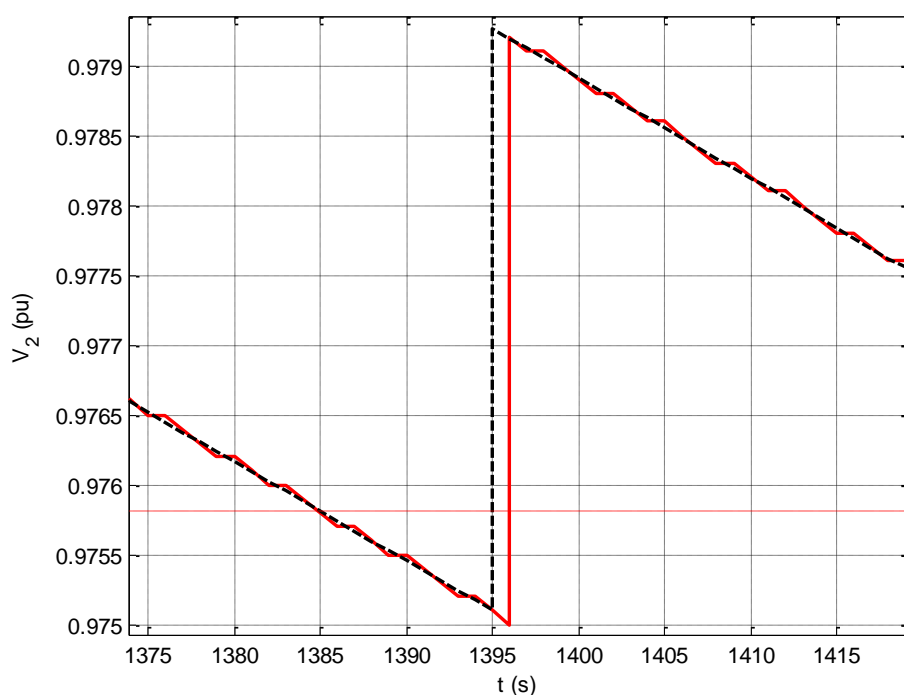
Στο WPSTAB, η υπερφόρτιση από την παραβίαση του ορίου ρεύματος, αντιμετωπίζεται μέσω του περιοριστή ρεύματος σύγχρονης μηχανής (Armature Current Limiter - ACL). Ο περιορισμός του ρεύματος επιτυγχάνεται μέσω μείωσης της αέργου ισχύος. Αυτό υλοποιείται μέσω μείωσης  $\Delta V_{ref}$  της τάσης αναφοράς του APT.

$$V_{ref,n} = V_{ref} - \Delta V_{ref} \quad (5.3)$$

Ο περιοριστής ενεργεί ξανά μόνο στο επόμενο βήμα, εφόσον το ρεύμα παραμένει πάνω από το όριο φόρτισης  $I^{lim}$ . Αν  $\Delta T$  είναι το χρονικό βήμα της προσομοίωσης, τότε ο ρυθμός μείωσης  $\Delta V_{ref}/\Delta T$  της τάσης αναφοράς  $V_{ref}$  στο μοντέλο του περιοριστή είναι προκαθορισμένος.

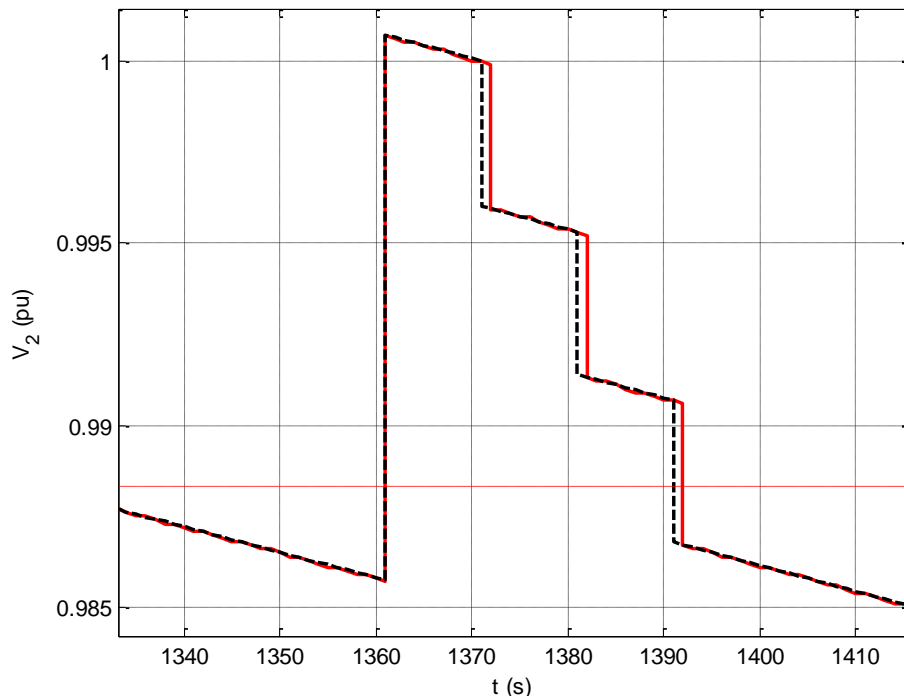
### 5.1.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Από τη σύγκριση των προσομοιώσεων, παρατηρείται ότι σημειώνονται μικρές διαφορές στις χρονικές στιγμές ενεργοποίησης των διαφόρων μηχανισμών ελέγχου τάσεως-αέργου ισχύος. Στο Σχ. 5.3 φαίνεται μια απόκλιση ενός δευτερολέπτου στη χρονική μεταβολή της μέσης τάσης  $V_2$  του υποσταθμού, που αντιστοιχεί σε διαφορά στο χρόνο δράσης του ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή του υποσταθμού. Συγκεκριμένα, στην απόκριση με κόκκινη γραμμή (WPSTAB), το ΣΑΤΥΦ ρυθμίζει τη  $V_2$  τη χρονική στιγμή 1396s. Παρατηρείται δηλαδή ότι τη στιγμή 1386s η  $V_2$  είναι για πρώτη φορά κάτω από την ελάχιστη τιμή της νεκρής ζώνης, δεδομένου ότι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του μηχανισμού είναι 10s. Αντίθετα, στη μαύρη διακεκομμένη γραμμή (προσομοίωση σε Matlab) η  $V_2$  τη χρονική στιγμή 1385s βρίσκεται οριακά εκτός της νεκρής ζώνης. Συνεπώς, το ΣΑΤΥΦ εντοπίζει το πρόβλημα χαμηλής τάσης για πρώτη φορά αυτή τη χρονική στιγμή και μειώνει το λόγο μετασχηματισμού τη στιγμή 1395s.



Σχήμα 5. 3 Τάση Ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1)

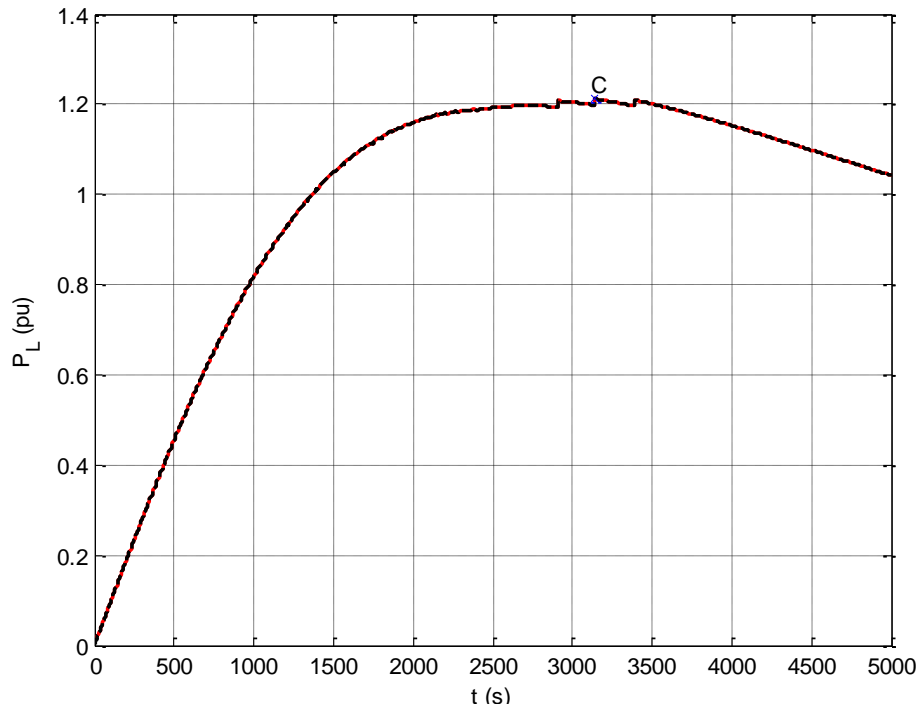
Ένα δεύτερο παράδειγμα διαφοροποίησης δίνεται στο Σχ. 5.4. Μετά τη ζεύξη της συστοιχίας πυκνωτών τη χρονική στιγμή 1361s, η  $V_2$  υπερβαίνει το άνω όριο της. Επομένως, επενεργεί ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ προκειμένου να επαναφέρει την τάση εντός της νεκρής ζώνης. Το ΣΑΤΥΦ στο πρόγραμμα προσομοίωσης σε Matlab, λαμβάνει ως  $V_2$  την στιγμή 1361s την τιμή 1,0007αμ που προκύπτει μετά την αλλαγή που επιφέρουν οι πυκνωτές. Έτσι, στα 1371s έχει ολοκληρωθεί η καθυστέρηση των 10s και αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού. Αντίθετα, στο WPSTAB η τιμή που θεωρεί το ΣΑΤΥΦ για τη  $V_2$  στα 1361s είναι 0,9857αμ, η οποία έχει ληφθεί ακριβώς πριν τη ζεύξη της συστοιχίας και η οποία όμως βρίσκεται εντός της νεκρής ζώνης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο έλεγχος να εντοπίζει το πρόβλημα αυξημένης τάσης στα 1362s και το ΣΑΤΥΦ να ενεργοποιείται στα 1372s.



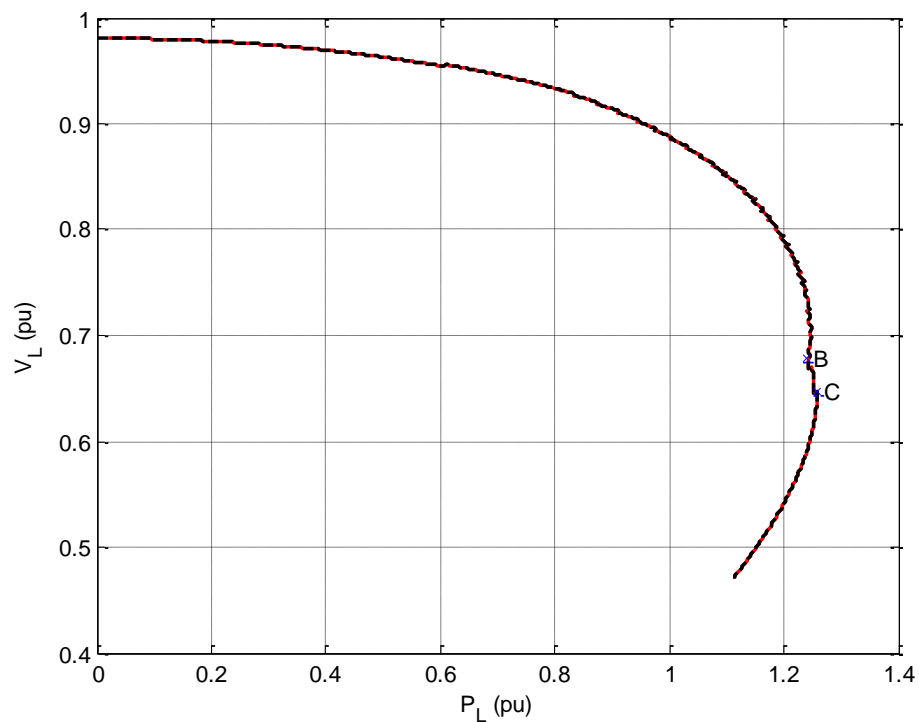
**Σχήμα 5. 4** Τάση Ζυγού ΜΤ Υ/Σ (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

Συμπερασματικά, ο τρόπος υλοποίησης των ελέγχων και του προγράμματος σε κάθε περίπτωση, φαίνεται πως οδηγεί σε μικρές χρονικές μετατοπίσεις.

Στο Σχ. 5.5 παρουσιάζεται η ισχύς του φορτίου για χαμηλή ενεργό παραγωγή του Α/Π #1, στην περίπτωση ελέγχου σταθερής τάσης  $V_w$ . Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η γενική εικόνα δείχνει πως η απόκριση σε Matlab και WPSTAB είναι πρακτικά η ίδια. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το Σχ. 5.6, όπου φαίνεται η PV καμπύλη για την αντίστοιχη λειτουργία με το Α/Π #2. Πράγματι, η χρονική διαδοχή των ελέγχων και η δυνατότητα φόρτισης του συστήματος, φαίνεται ίδια ανεξαρτήτως περιβάλλοντος προσομοίωσης.

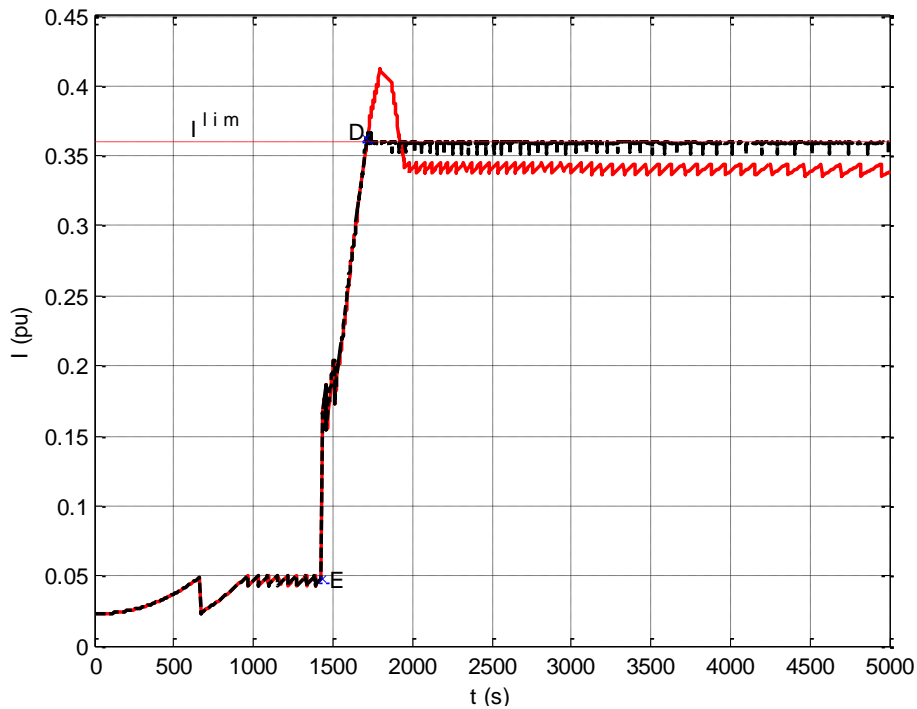


**Σχήμα 5. 5** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #1, WPSTAB-Matlab)

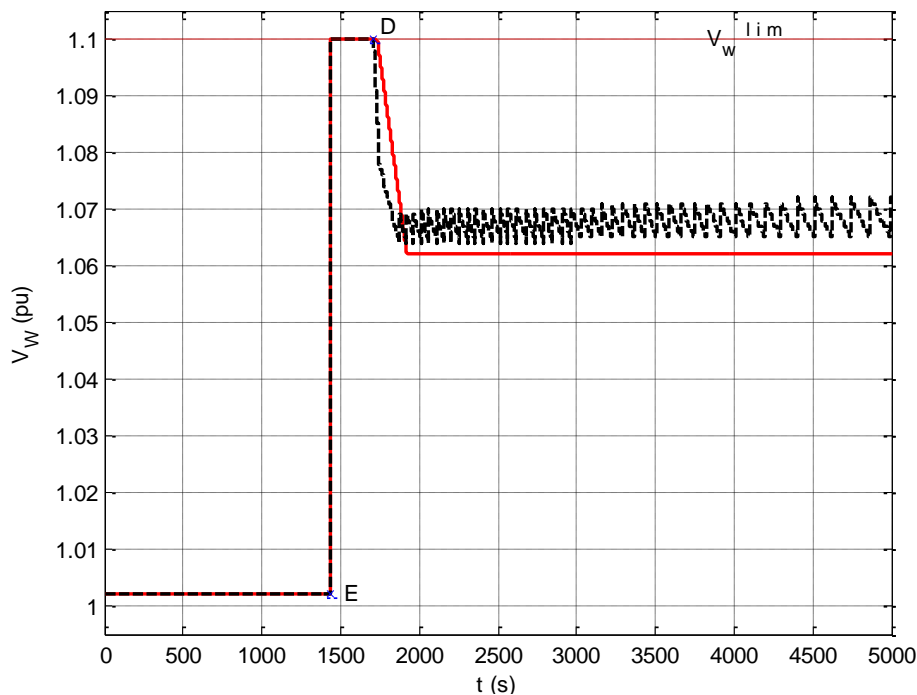


**Σχήμα 5. 6** PV Καμπύλη (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Α/Π #2, WPSTAB-Matlab)

Στα Σχ. 5.7-5.8 παρουσιάζονται το ρεύμα και η τάση του Α/Π #2 για λειτουργία με εντολή άεργης υποστήριξης, στα δύο προγράμματα προσομοίωσης.



**Σχήμα 5. 7** Ενεργός Τιμή Ρεύματος Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



**Σχήμα 5. 8** Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)

Στην περίπτωση αυτή, παρατηρείται μια μεγάλη διαφορά στην απόκριση του προγράμματος WPSTAB, η οποία πηγάζει από τον διαφορετικό τρόπο υλοποίησης του περιοριστή στα δύο λογισμικά. Αυτό που παρατηρείται στο Σχ. 5.8, είναι η αργή απόκριση της τάσης στο WPSTAB που οδηγεί σε υπερφόρτιση (Σχ. 5.7) για ένα χρονικό διάστημα (209s), το οποίο δεν μπορεί να γίνει ανεκτό από τα ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτή η μη ρεαλιστική απόκριση οφείλεται στο γεγονός ότι ο κώδικας για τον περιοριστή ρεύματος έχει δημιουργηθεί στο

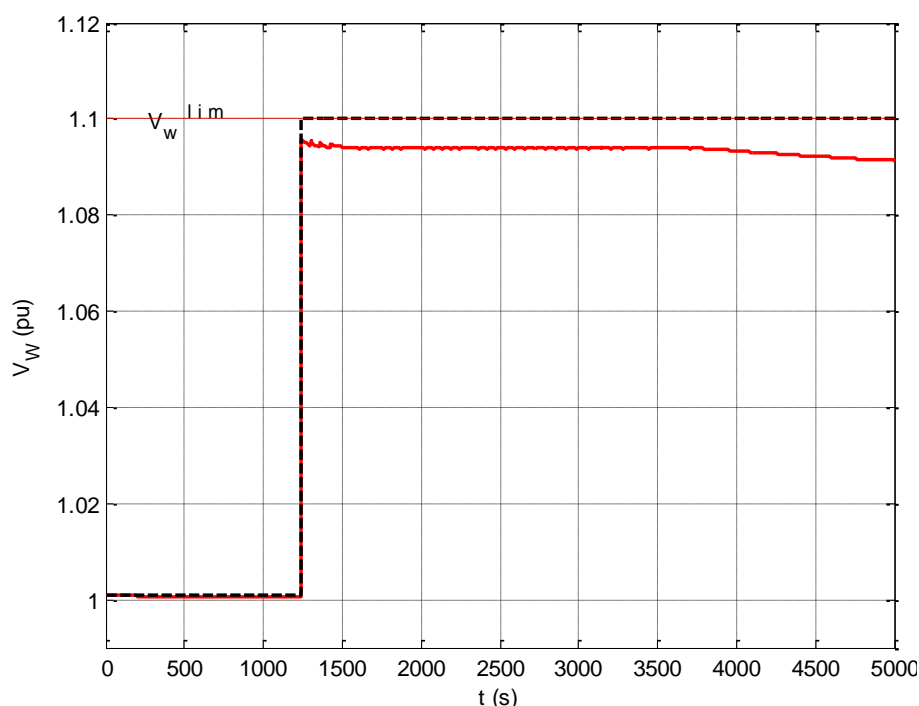
WPSTAB για την αντιμετώπιση υπερφόρτισης του στάτη σε σύγχρονες γεννήτριες συμβατικών μονάδων παραγωγής. Συνεπώς, δημιουργείται η ανάγκη νέου προγραμματισμού του αντίστοιχου περιοριστή ρεύματος για μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος. Ο σχεδιασμός του νέου μοντέλου αφήνεται για περαιτέρω έρευνα. Η απόκριση της τάσης με μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος πρέπει να είναι ακαριαία και συμφωνεί με το αποτέλεσμα που δίνει η υλοποίηση σε Matlab (μαύρη διακεκομμένη γραμμή).

## 5.2 Επίδραση αναλογικού κέρδους του Αυτομάτου Ρυθμιστή Τάσης

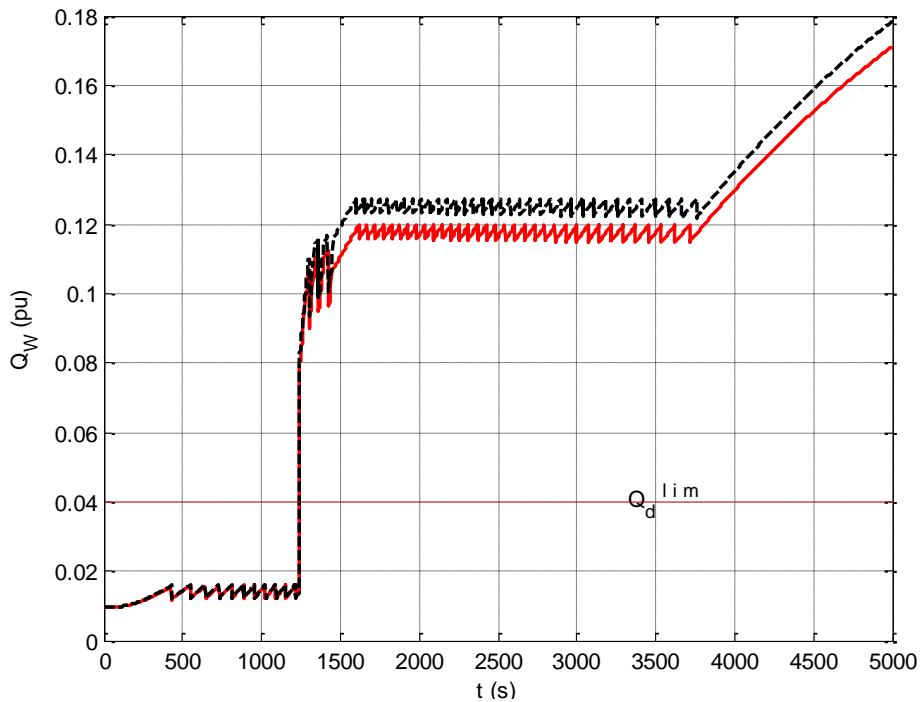
Στην ενότητα αυτή, η λειτουργία του συστήματος με εντολή αέργου υποστήριξης και σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή, υλοποιείται για δύο διαφορετικά κέρδη του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης, σε περιβάλλον WPSTAB. Τα αποτελέσματα για ένα πολύ μεγάλο αναλογικό κέρδος του APT ( $K_A=50.000$ ), το οποίο στη μόνιμη κατάσταση προσεγγίζει όπως αναφέρθηκε τον ολοκληρωτικό έλεγχο, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα για  $K_A=100$ .

### 5.2.1 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #1

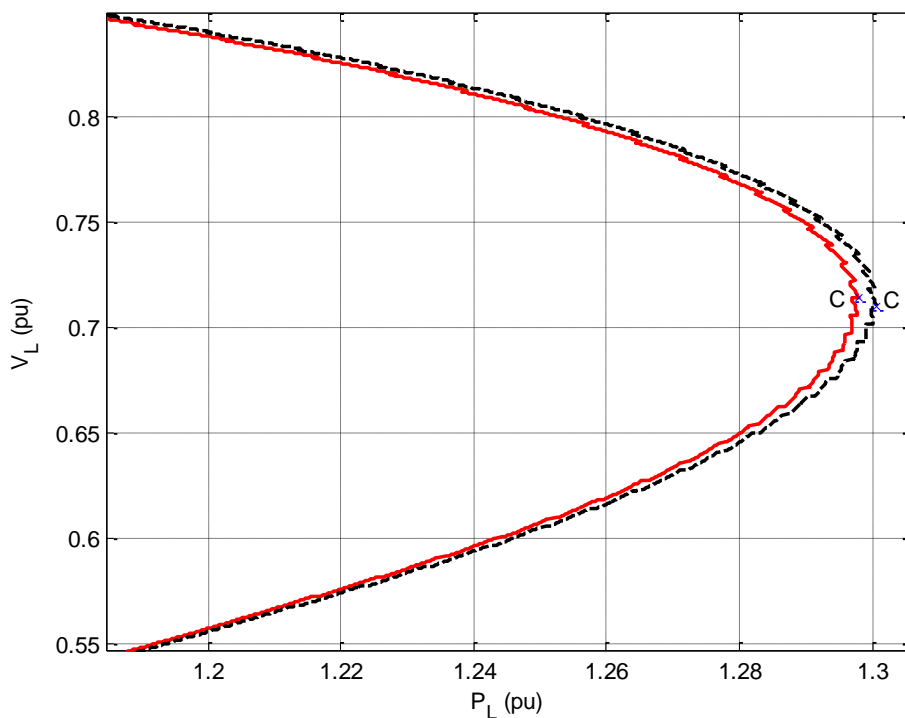
Η λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος για ράμπα φορτίου με ρυθμό αύξησης 0,1% ανά 1s έχει δοθεί στο Κεφ. 3. Στα Σχ. 5.9-5.11 φαίνονται διακεκομμένα (μαύρο χρώμα) τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος με  $K_A=50.000$ , ενώ με κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται η προσομοίωση για  $K_A=100$ .



Σχήμα 5. 9 Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 5. 10 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #1 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 5. 11 PV Καμπύλη (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

Από το Σχ. 5.9, είναι εμφανής η διαφορά που προκαλεί η μείωση του κέρδους του ΑΡΤ. Όταν  $K_A=100$ , η τάση έχει μια μόνιμη απόκλιση από την τάση αναφοράς  $V_{ref}$  (droop control). Το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο μετά την εντολή εκτάκτου ανάγκης, όπου απαιτείται μια σημαντική διακριτή μετάβαση της τάσης στη μέγιστη τιμή της. Η τάση αναφοράς δηλαδή από αυτή τη στιγμή κι έπειτα, είναι  $V_{ref}=V_w^{lim}=1,1\mu$ . Ενώ λοιπόν με  $K_A=50.000$  η τιμή αυτή επιτυγχάνεται αμέσως, παρατηρείται ότι στην περίπτωση που  $K_A=100$  το πάρκο δεν

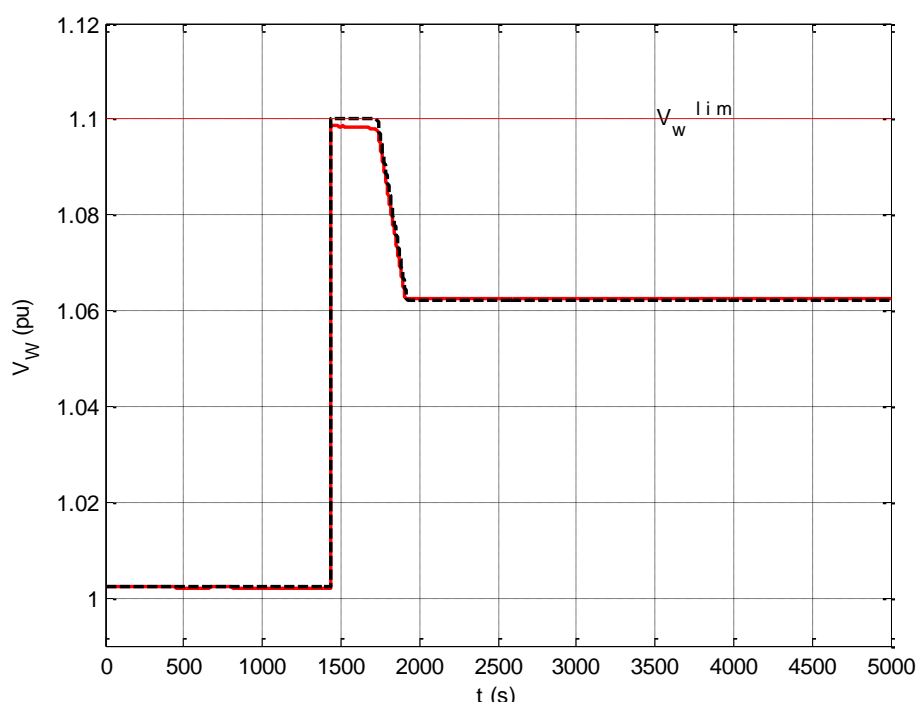
λειτουργεί υπό μέγιστη τάση. Το γεγονός αυτό επιδρά άμεσα στην δυνατότητα μέγιστης αέργου υποστήριξης του πάρκου και κατά συνέπεια στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ του δικτύου μεταφοράς, όπως φαίνεται στα Σχ. 5.10 και 5.11 αντίστοιχα.

Παρ' όλα αυτά, η επίδραση του πεπερασμένου κέρδους (droop control) δεν είναι σημαντική. Αρκεί να αναφερθεί ότι για  $K_A=50.000$  και  $K_A=100$ , η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι αντίστοιχα 130,07MW και 129,79MW. Η διαφορά δηλαδή μεταξύ των δύο περιπτώσεων είναι 0,28MW.

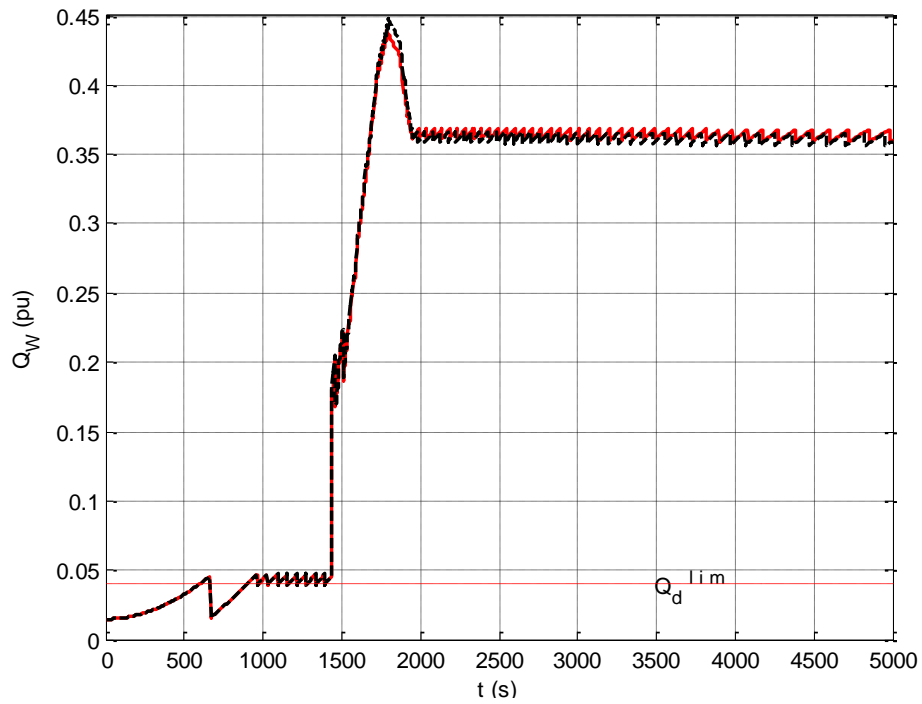
## 5.2.2 Προσομοίωση με Αιολικό Πάρκο #2

Στην ενότητα αυτή προσομοιώνεται η απόκριση του συστήματος (για τη ράμπα φορτίου που εξετάστηκε στα Κεφ. 3 και 4) με λειτουργία του Α/Π #2, για  $K_A=50.000$  και  $K_A=100$ . Η χρονική μεταβολή της τάσης του Α/Π #2  $V_w$ , η άεργος παραγωγή  $Q_w$  και η PV καμπύλη του φορτίου παρουσιάζονται στα Σχ. 5.12-5.14.

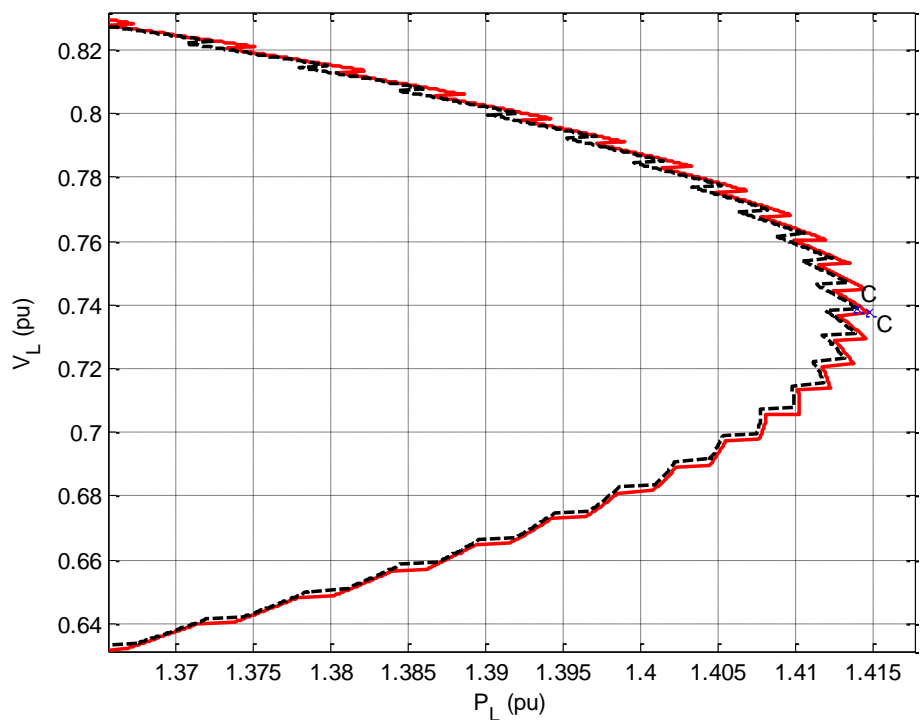
Με την εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης, η τάση οδηγείται στο  $V_w^{lim}$  όταν  $K_A=50.000$  και σε μέγιστη τιμή 1,0986αμ όταν  $K_A=100$ . Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη υπερφόρτιση στην πρώτη περίπτωση και επομένως η νέα τάση αναφοράς που επιβάλλει ο περιοριστής του ρεύματος είναι μικρότερη από ό,τι όταν  $K_A=100$ , ώστε να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα υπέρβασης του μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος. Αυτό σημαίνει τελικά ότι από τη στιγμή που θα επιτευχθεί η νέα τάση αναφοράς και για το υπόλοιπο της προσομοίωσης, για ένα χρονικό διάστημα δηλαδή περίπου 3100s, το Α/Π λειτουργεί με μεγαλύτερη τάση όταν  $K_A=100$ . Αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη άεργο υποστήριξη του συστήματος από την παραγωγή σε αυτό το σενάριο και τελικά μεγαλύτερη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.14. Αναφέρεται βέβαια ότι για  $K_A=50.000$  και  $K_A=100$ , η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς είναι αντίστοιχα 141,48MW και 141,40MW. Η διαφορά εδώ είναι επομένως 0,08MW, δεν έχει δηλαδή κάποια σημασία για τη λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 5. 12 Μέση Τάση στο ζυγό σύνδεσης του Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 5. 13 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 5. 14 PV Καμπύλη (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)



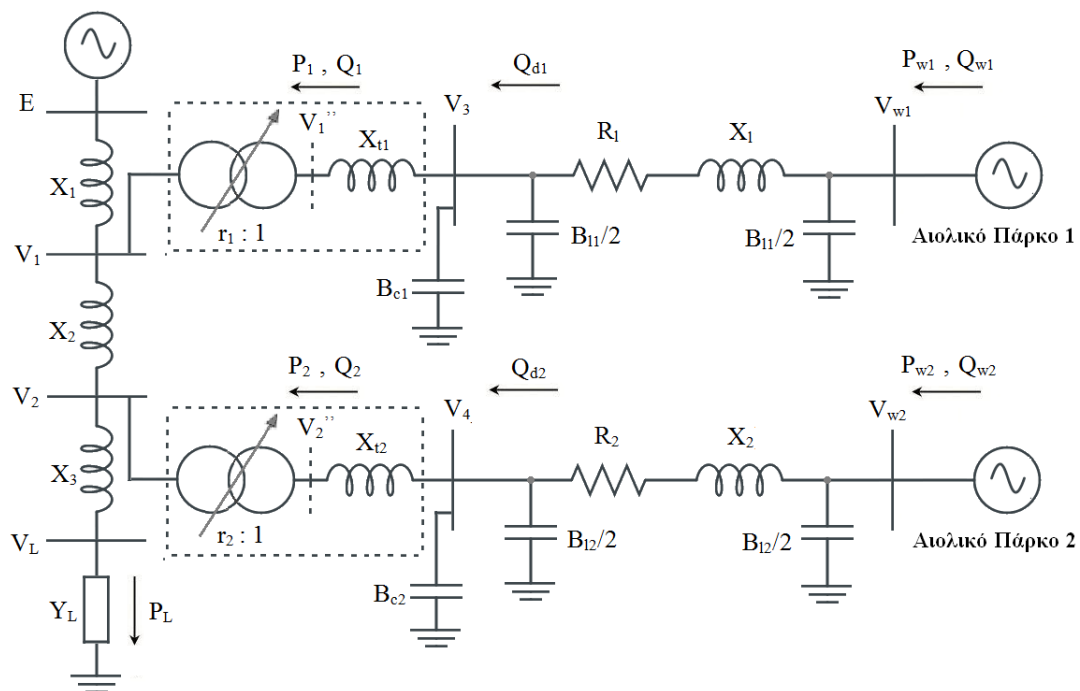
### 5.3 Λειτουργία Συστήματος με δύο Α/Π

Στην παράγραφο αυτή, θεωρείται ότι και τα δύο Αιολικά Πάρκα συνδέονται στο ίδιο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και λειτουργούν ταυτόχρονα. Εξετάζεται δηλαδή η επίδραση της σύνδεσης ενός δεύτερου πάρκου στην ίδια γραμμή μεταφοράς στο όριο φόρτισης του συστήματος. Όπως φαίνεται στον Πιν. 5.1, η γραμμή μεταφοράς έχει τα ίδια χαρακτηριστικά όπως και στο σύστημα του Σχ. 5.1 που χρησιμοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια (βλ. Ενότητα 3.1), δεδομένου ότι οι επαγωγικές αντιδράσεις ( $X_1, X_2, X_3$ ) που την αντιπροσωπεύουν έχουν το ίδιο άθροισμα (0,4αμ). Οι γραμμές διανομής των δύο πάρκων συνδέονται σε κοντινά σημεία του δικτύου, αφού μεταξύ τους υπάρχει μια μικρή μόνο επαγωγική αντίδραση (0,04αμ).

**Πίνακας 5. 1** Αντιδράσεις Δικτύου Μεταφοράς (αμ για  $S_B=100\text{MVA}$ )

$X_1$ (αμ)	$X_2$ (αμ)	$X_3$ (αμ)
0,18	0,04	0,18

Το μονογραμμικό διάγραμμα του συστήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 5.15. Τα Α/Π #1 και #2 θεωρείται ότι λειτουργούν σε περίοδο σχετικής άπνοιας. Επομένως, έχουν τη σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή που δόθηκε στους Πιν 4.2 και 4.3 και είναι 2,1MW και 1,76MW αντίστοιχα. Η μεταβολή που προσομοιώνεται στην ενότητα αυτή είναι ξανά η αύξηση της αγωγιμότητας του φορτίου με την αργή ράμπα που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.1. Η υλοποίηση γίνεται στο πρόγραμμα WPSTAB με αναλογικό κέρδος του APT  $K_A=100$ .

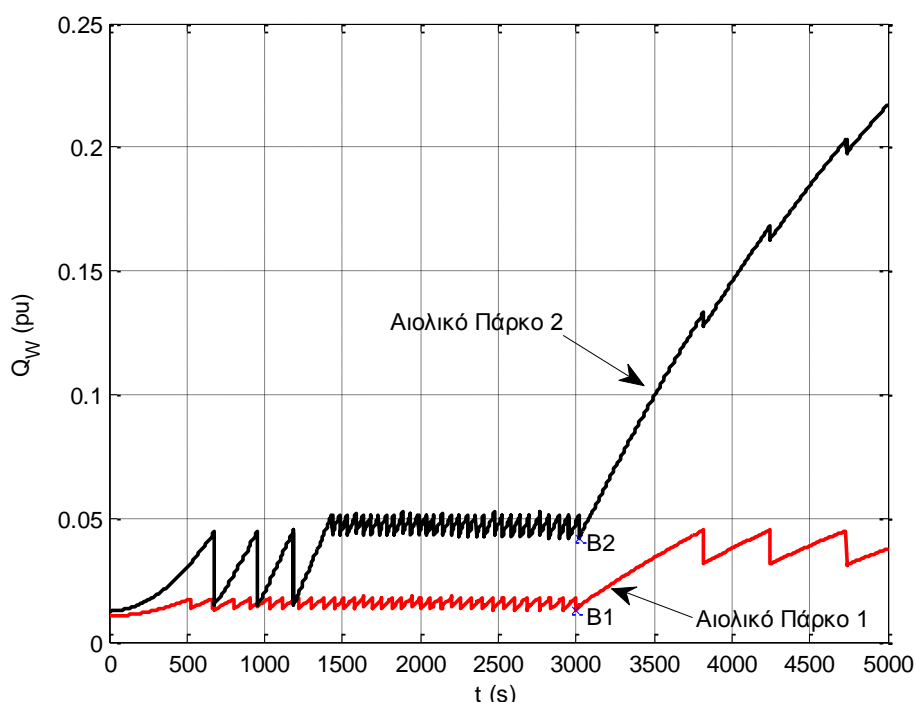


**Σχήμα 5. 15** Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Δοκιμών με δύο Αιολικά Πάρκα

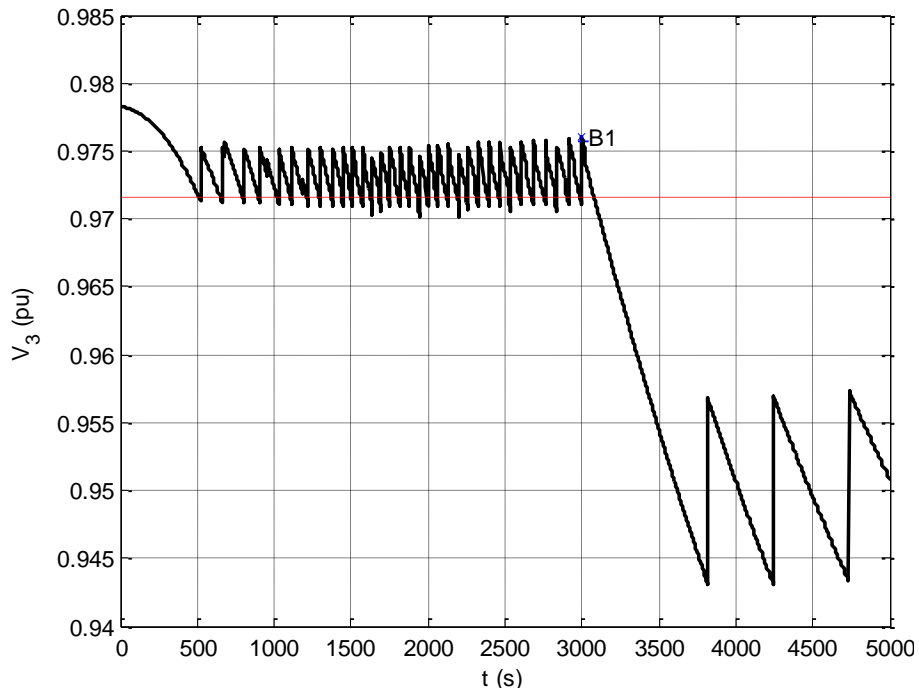
### 5.3.1 Λειτουργία με Ρύθμιση Τάσης A/Π

Στην παράγραφο αυτή θεωρείται ότι οι μετατροπείς των δύο Αιολικών Πάρκων ρυθμίζουν τις τάσεις στους ζυγούς σύνδεσης  $V_{w1}$  και  $V_{w2}$ . Στα Σχ. 5.16-5.19 παρουσιάζονται η άεργος παραγωγή των δύο A/Π και οι τάσεις  $V_3$ ,  $V_4$  στην πλευρά MT των δύο υποσταθμών.

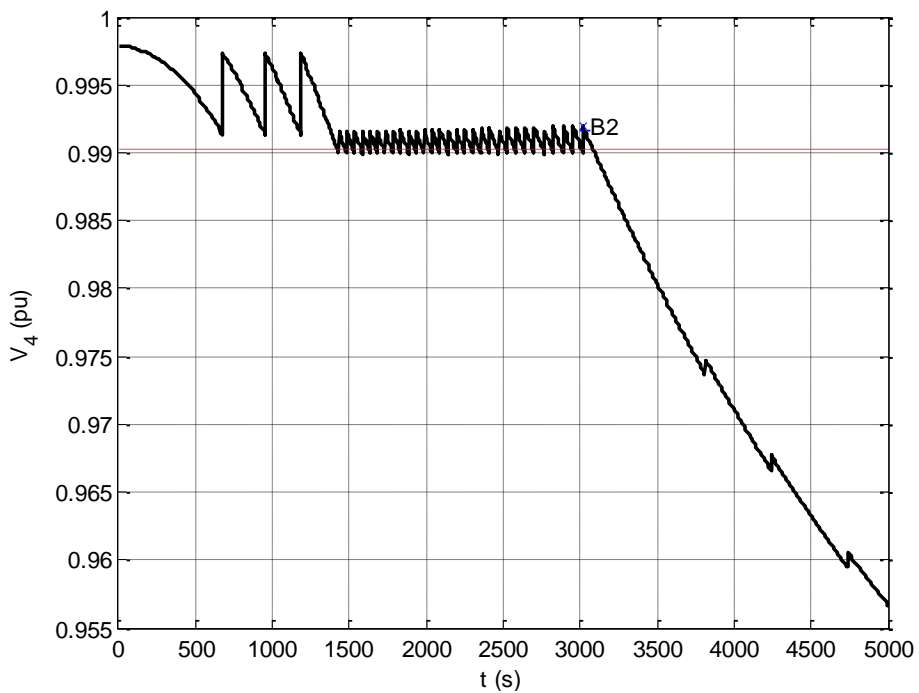
Τη χρονική στιγμή 522s, ενεργοποιείται το ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού του A/Π #1 για την στήριξη της τάσης  $V_3$ . Οι διαθέσιμες θέσεις του τυλίγματος του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού εξαντλούνται στο σημείο B1, τη χρονική στιγμή 3000s (Σχ. 5.16-5.17). Στη γραμμή σύνδεσης του A/Π #2, πρώτα ενεργοποιείται ο μηχανισμός αυτόματης ζεύξης των πυκνωτών, δεδομένου ότι η άεργος ισχύς υπερβαίνει για 60s το άνω όριο  $Q_d^{lim}$  πριν από την παραβίαση του ορίου της μέσης τάσης  $V_4$  (Σχ. 5.16-5.18). Ο αντίστοιχος μηχανισμός ζεύξης των στατών πυκνωτών δρα στη γραμμή του A/Π #1 τις χρονικές στιγμές 3817s, 4243s και 4735s. Είναι εμφανές ότι η ζεύξη των πυκνωτών στον ζυγό MT του υποσταθμού του Αιολικού Πάρκου #1 (Σχ. 5.15), επιδρά στις τάσεις του συστήματος και τελικά στην άεργο παραγωγή και του A/Π #2 τις ίδιες χρονικές στιγμές. Οι διαθέσιμες λήψεις του ΣΑΤΥΦ του υποσταθμού στη γραμμή του A/Π #2 εξαντλούνται στο σημείο B2, τη χρονική στιγμή 3017s.



Σχήμα 5. 16 Παραγόμενη Άεργος Ισχύς A/Π #1 και #2 (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)



**Σχήμα 5. 17** Τάση ζυγού MT Y/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Y/Σ A/Π #1)

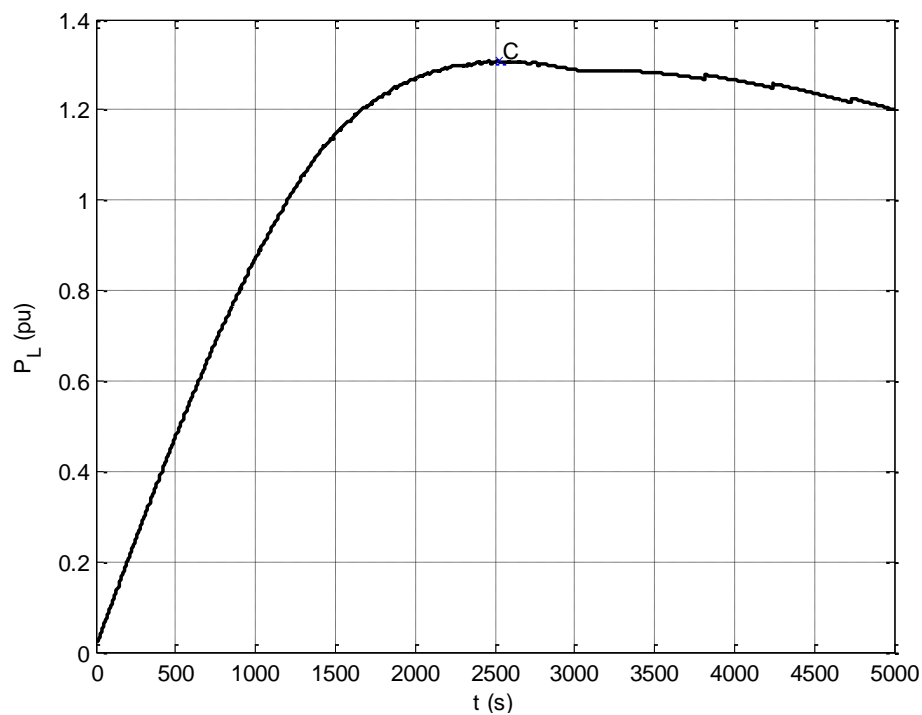


**Σχήμα 5. 18** Τάση ζυγού MT Y/Σ (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης, Y/Σ A/Π #2)

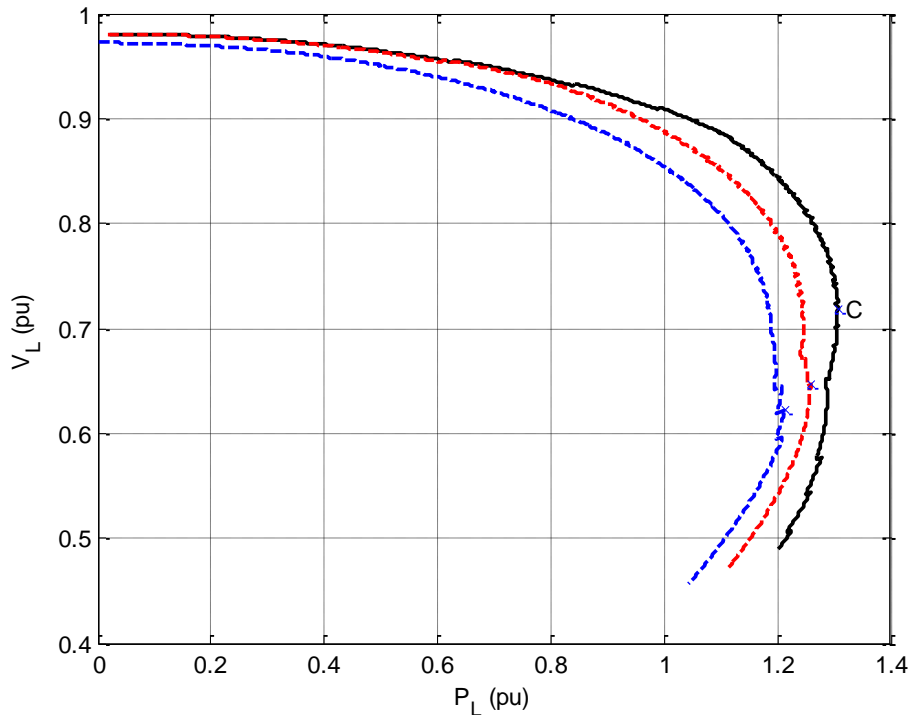
Στο Σχ. 5.19 φαίνεται η χρονοσειρά της ισχύος που καταναλώνει το φορτίο του συστήματος μεταφοράς. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς συναντάται τη χρονική στιγμή 2528s και ισούται με 130,86MW. Σημειώνεται εδώ ότι με τη σύνδεση μόνο του A/Π #1 στο μέσο της γραμμής μεταφοράς, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς με σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή και ρύθμιση τάσης είναι 121,25MW, ενώ με τη σύνδεση μόνο του A/Π #2 είναι 125,80MW. Η δυνατότητα φόρτισης του συστήματος επομένως αυξάνεται κατά 9,61MW και 5,06MW σε

σχέση με την σύνδεση μόνο του Α/Π #1 και #2 αντίστοιχα (Πιν. 5.2). Η βελτίωση που συνεισφέρει η σύνδεση του δεύτερου πάρκου σ' αυτή την περίπτωση φαίνεται και στο Σχ. 5.20, όπου διακεκομμένα με μπλε και κόκκινο χρώμα φαίνονται οι  $PV$  καμπύλες για τα πάρκα #1 και #2 χωριστά, ενώ με μαύρο χρώμα δίνεται η  $PV$  καμπύλη για ταυτόχρονη λειτουργία των δύο πάρκων. Παρατηρείται δηλαδή ότι η σύνδεση του δεύτερου πάρκου στο δίκτυο οδηγεί σε σημαντική αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος.

Βέβαια, τα σημεία σύνδεσης των δύο πάρκων στη γραμμή μεταφοράς, επηρεάζουν την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι ενδεχόμενη διαφοροποίηση των σημείων σύνδεσης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα παραπάνω αποτελέσματα.



**Σχήμα 5. 19** Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)



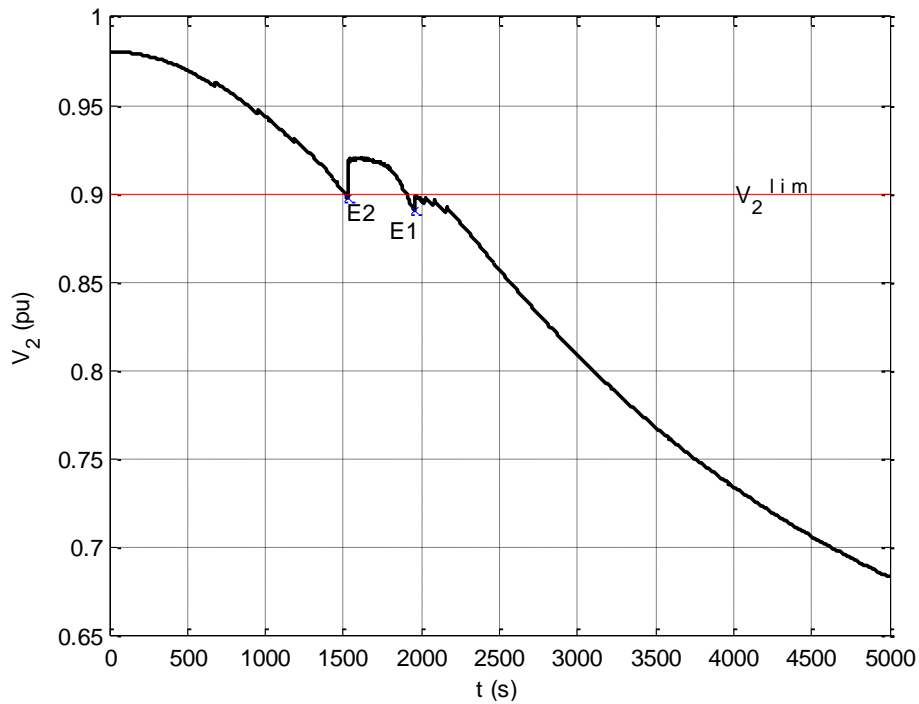
Σχήμα 5. 20 PV Καμπύλες (Συνεχής Ρύθμιση Τάσης)

Πίνακας 5. 2 MMI (MW) για σταθερή χαμηλή αιολική παραγωγή

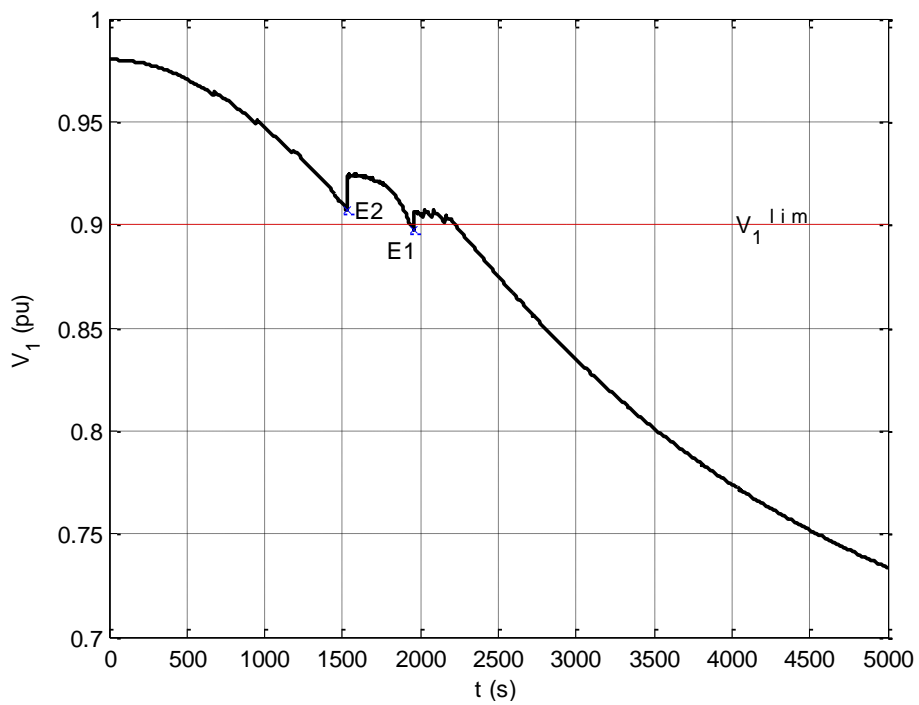
A/Π	Έλεγχος Σταθερής Τάσης	Έλεγχος με Εντολή Μέγιστης Υποστήριξης
#1	121,25	129,79
#2	125,80	141,40
#1 και #2	130,86	153,63

### 5.3.2 Έλεγχος με Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η ταυτόχρονη λειτουργία των δύο Αιολικών Πάρκων στο σύστημα του Σχ. 5.15 με εντολή μέγιστης άεργης υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στα Σχ. 5.21-5.25. Τη χρονική στιγμή 1520s, η υψηλή τάση  $V_2$  του υποσταθμού σύνδεσης του Α/Π #2 παραβιάζει το κάτω όριο της  $V_2^{lim}$ . Με 10s καθυστέρηση, αποστέλλεται η εντολή μέγιστης άεργου υποστήριξης στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος του Α/Π #2 (Σχ. 5.21). Αντίστοιχα, η παραβίαση του ορίου της υψηλής τάσης  $V_1$  του υποσταθμού σύνδεσης του Α/Π #1 γίνεται τη χρονική στιγμή 1952s (Σχ. 5.22) και οδηγεί στα 1962s το Α/Π #1 να προσφέρει τη μέγιστη δυνατή άεργη υποστήριξη, μέσω αύξησης της τάσης  $V_{w1}$  (Σχ. 5.23).

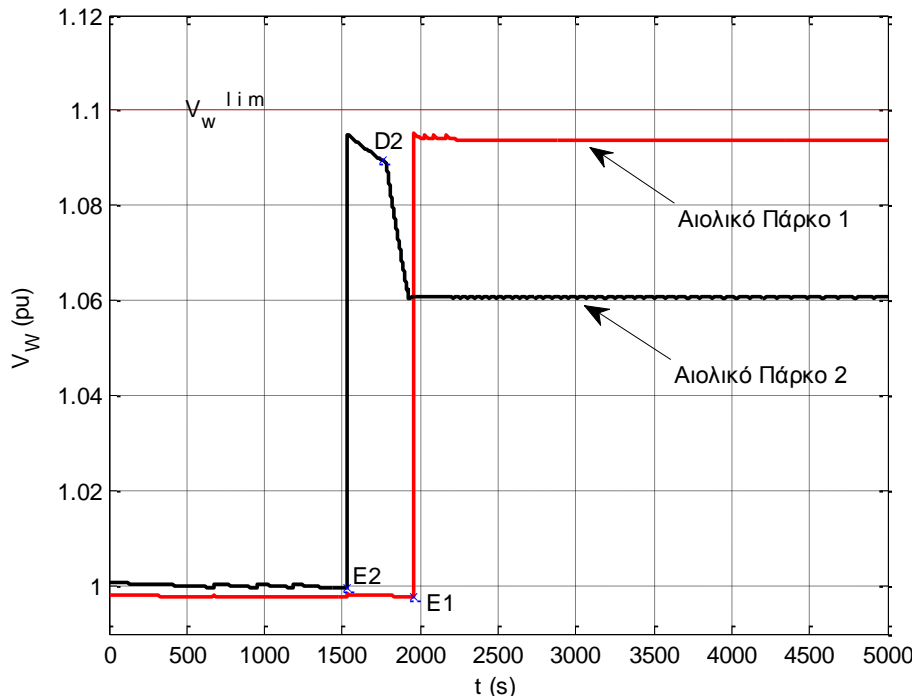


Σχήμα 5. 21 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #2)



Σχήμα 5. 22 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη, Α/Π #1)

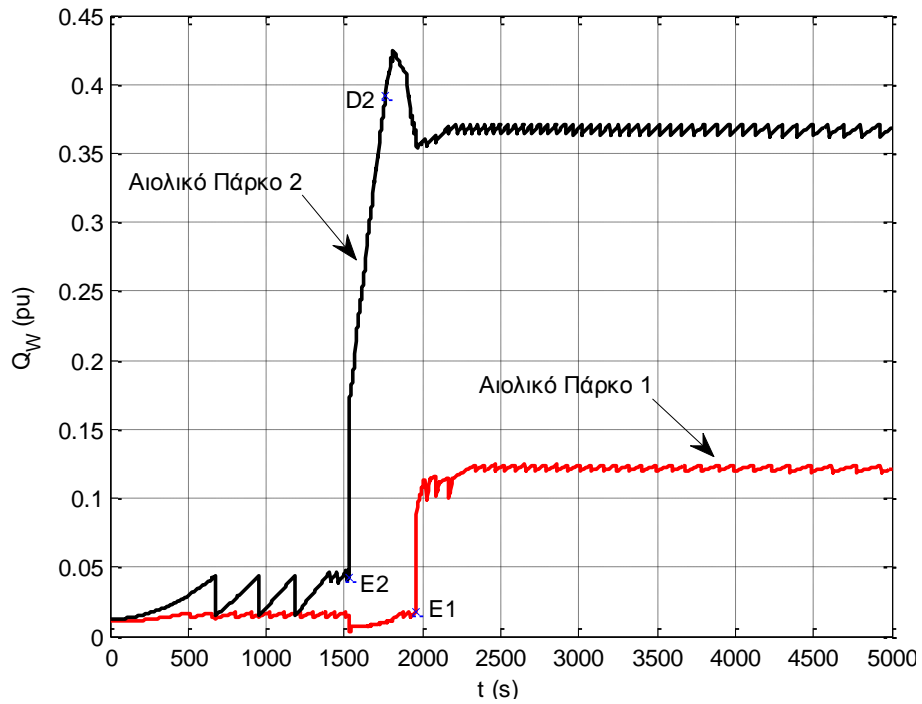
Στο Σχ. 5.23 φαίνονται οι τάσεις στους ζυγούς σύνδεσης των Α/Π #1 και #2. Παρά τις δύο εντολές για μέγιστες τάσεις  $V_{w1}^{lim}$  και  $V_{w2}^{lim}$ , παρατηρείται ότι σε κανένα από τα δύο Α/Π δεν επιτυγχάνεται η μέγιστη τιμή. Αυτό οφείλεται στον εφαρμοζόμενο έλεγχο του APT με  $K_A=100$ , που αφήνει σφάλμα από την τάση αναφοράς στη μόνιμη κατάσταση (droop control).



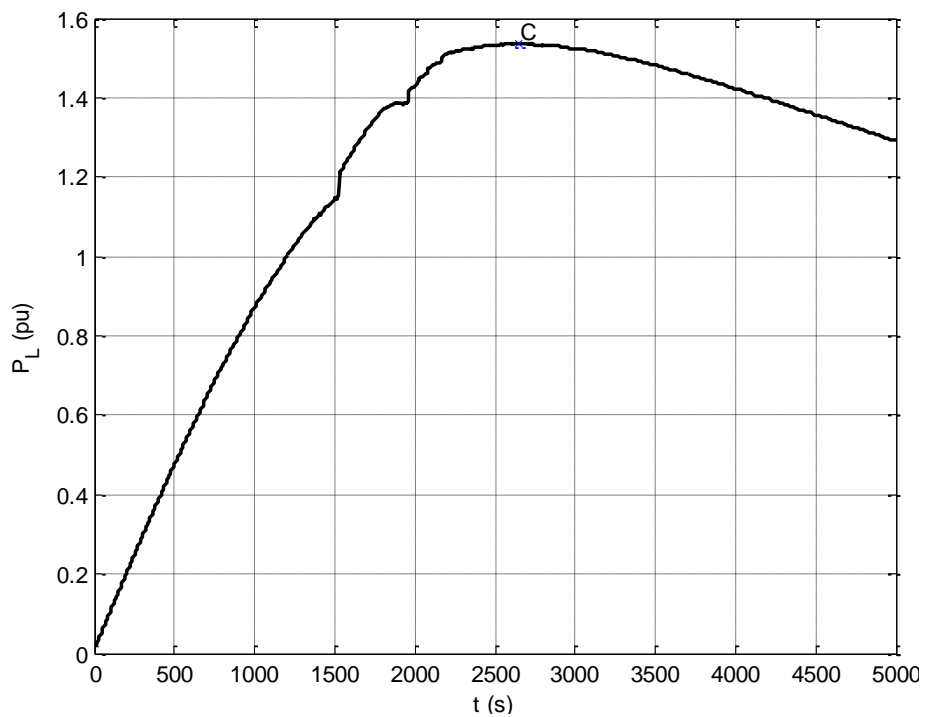
**Σχήμα 5. 23** ΜΤ στο ζυγό σύνδεσης των Α/Π #1 και #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)

Στον μετατροπέα του Α/Π #2, τη χρονική στιγμή 1762s παραβιάζεται το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος  $I^{lim}=0,36\text{αμ}$  (Σημείο D2). Επομένως, ενεργοποιείται η προστασία υπερφόρτισης και η τάση αναφοράς της  $V_{w2}$  μειώνεται κατάλληλα ώστε να περιοριστεί το ρεύμα κάτω από το όριο (Σχ. 5.23). Η υπερφόρτιση αντιμετωπίζεται με χρονική καθυστέρηση 166s, λόγω του μοντέλου περιοριστή του WPSTAB που χρησιμοποιείται και το οποίο δεν είναι το πλέον κατάλληλο, όπως εξηγήθηκε στην Ενότητα 5.1. Ωστόσο, το τελικό αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται μετά τον περιορισμό του ρεύματος είναι σωστό.

Η άεργος παραγωγή των δύο Α/Π φαίνεται στο Σχ. 5.24. Ο μηχανισμός ζεύξης των αυτομάτων πυκνωτών στον ζυγό μέσης τάσης του υποσταθμού του Α/Π #1 ενεργοποιείται τη χρονική στιγμή 679s, συγκρατώντας την άεργο ισχύ της γραμμής διανομής του Α/Π #1 κάτω από το όριο  $Q_{dl}^{lim}$ . Η άεργος ισχύς της γραμμής σύνδεσης του Α/Π #2, διατηρείται εντός των επιτρεπτών ορίων μέχρι και το σημείο E2. Από αυτό το σημείο, η άεργος ισχύς αυξάνεται απότομα και ξεπερνά το όριο, με αποτέλεσμα οι συστοιχίες να συνδεθούν η μία μετά την άλλη με χρονική διαφορά 60s, ίση δηλαδή με την καθυστέρηση ζεύξης.

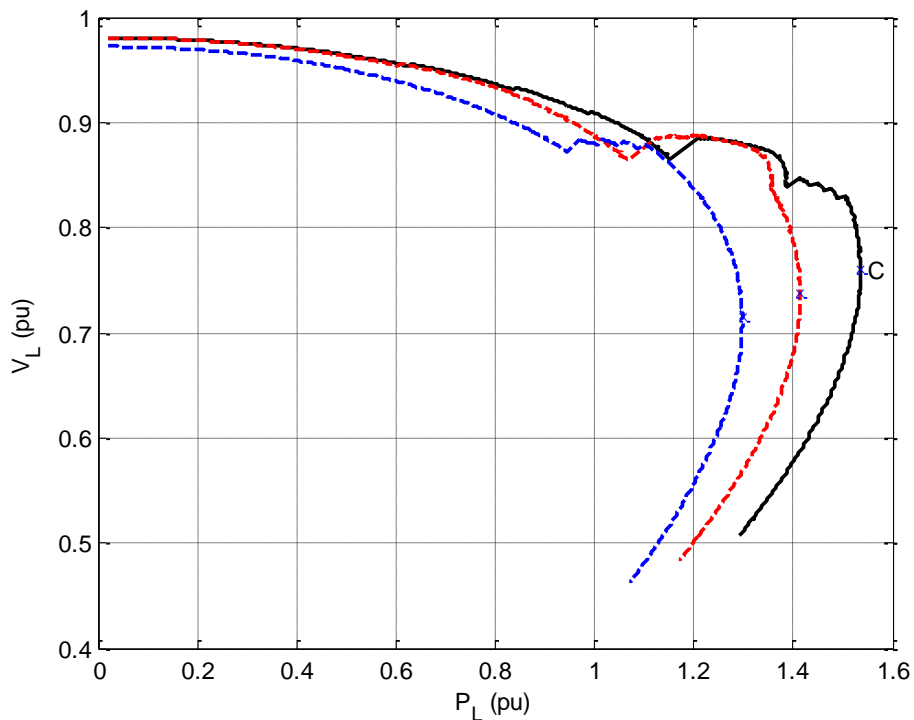


Σχήμα 5. 24 Παραγόμενη Αεργός Ισχύς Α/Π #1 και #2 (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)



Σχήμα 5. 25 Ενεργός Ισχύς του Φορτίου (Μέγιστη Άεργη Υποστήριξη)





**Σχήμα 5. 26** PV Καμπύλες (Μέγιστη Αεργη Υποστήριξη)

Στο Σχ. 5.25, είναι εμφανές ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς συναντάται τη χρονική στιγμή 2650s και ισούται με 153,63MW. Σημειώνεται ότι οι συστοιχίες των στατών πυκνωτών και των δύο υποσταθμών συνδέονται πριν το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, συμβάλλοντας έτσι σημαντικά στη διαμόρφωσή του. Υπενθυμίζεται εδώ ότι με τη σύνδεση μόνο του Α/Π #1 στο μέσο της γραμμής μεταφοράς, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς με σταθερή χαμηλή ενεργό παραγωγή ήταν 129,79MW, ενώ με τη σύνδεση μόνο του Α/Π #2 ήταν 141,40MW. Η βελτίωση που συνεισφέρει η σύνδεση του δεύτερου πάρκου στη λειτουργία με εντολή αέργου υποστήριξης φαίνεται και στο Σχ. 5.26, όπου (όπως και στο Σχ. 5.20) διακεκομμένα με μπλε και κόκκινο χρώμα φαίνονται οι PV καμπύλες για τα πάρκα #1 και #2 χωριστά, ενώ με μαύρο χρώμα δίνεται η PV καμπύλη για ταυτόχρονη λειτουργία των δύο πάρκων.

Συμπερασματικά, η δυνατότητα φόρτισης του συστήματος αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με την σύνδεση μόνο του ενός από τα δύο Αιολικά Πάρκα, όπως φάνηκε στα Σχ. 5.25-5.26 και συνοψίζεται στον Πιν. 5.2.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

---

## Συμπεράσματα-Προοπτικές

### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η επίδραση της μεταβλητότητας της ενεργού παραγωγής Αιολικών Πάρκων στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ και κατά συνέπεια στο όριο ευστάθειας τάσης ενός ασθενούς συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Χρησιμοποιήθηκαν τα υπάρχοντα δεδομένα των γραμμών σύνδεσης δύο Αιολικών Πάρκων που είναι συνδεδεμένα στην περιοχή της Πελοποννήσου. Το Α/Π #1 είναι ονομαστικής ισχύος 18,9MVA και συνδέεται μέσω μιας γραμμής διανομής μεγάλου μήκους στον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ. Το Α/Π #2 είναι σχεδόν διπλάσιας ισχύος (36MVA) και συνδέεται πολύ κοντά στον υποσταθμό. Για την προσομοίωση της βελτίωσης που προσφέρει η μεταβλητότητα του ανέμου στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος, δύο συσχετισμένες χρονοσειρές ταχυτήτων ανέμου θεωρήθηκαν ως είσοδοι στις ανεμογεννήτριες. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των χρονοσειρών ενεργού παραγωγής, προσομοιώνει τη λειτουργία και τον έλεγχο μιας ασύγχρονης ανεμογεννήτριας διπλής τροφοδότησης. Επίσης, εξετάστηκαν τα ακραία σενάρια της σταθερής χαμηλής (άπνοια) και υψηλής (ισχυρός άνεμος) ενεργού παραγωγής.

Για τον εντοπισμό των συνθηκών μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος, έγινε προσομοίωση μιας συνεχούς μεταβολής της αγωγιμότητας του φορτίου σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης 0,1% ανά 1s. Σε κάθε σενάριο που μελετήθηκε, έγινε αντιστοίχιση της ενεργού παραγωγής του Αιολικού Πάρκου με τη ράμπα του φορτίου, και από το σύνολο των αποτελεσμάτων η ανάλυση επικεντρώθηκε στην πληροφορία που αφορά τα χρονικά σημεία στα οποία ενεργοποιούνται οι μηχανισμοί αυτομάτου ελέγχου και τη χρονική στιγμή που επιτυγχάνεται το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο ζυγό του φορτίου. Η προσομοίωση έγινε με πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab, στο οποίο οι εξισώσεις ροής φορτίου έχουν αντικατασταθεί με ένα διευρυμένο σύστημα εξισώσεων, διότι στο σύστημα υπάρχουν και δρουν αυτόματοι μηχανισμοί ελέγχου, των οποίων ενδιαφέρει η συμπεριφορά και η μεταξύ τους συνεργασία, δεδομένου ότι ρυθμίζουν διαφορετικά μεγέθη του συστήματος.

Για την εκτίμηση της συνεισφοράς του Αιολικού Πάρκου, υλοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου του ηλεκτρονικού μετατροπέα: α) ρύθμιση με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, β) ρύθμιση της τάσης του Αιολικού Πάρκου και γ) ευφυής έλεγχος με εντολή μέγιστης άεργης υποστήριξης σε συνθήκες εκτάκτου ανάγκης.

Ας σημειωθεί ότι η αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο σύνολο των παρακάτω αποτελεσμάτων, αναφέρεται στη συγκεκριμένη ράμπα αύξησης του φορτίου και στις εφαρμοζόμενες χρονοσειρές, για δεδομένη τοπολογία δικτύου στην οποία τα Αιολικά Πάρκα συνδέονται στο μέσο της γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς στο φορτίο για λειτουργία των πάρκων #1 και #2 με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και για μεταβλητή ενεργό παραγωγή, βρέθηκε ίση με 118,67MW και 121,65MW αντίστοιχα (Πιν. 4.1). Επομένως, η σύνδεση των Αιολικών Πάρκων ακόμη και χωρίς άεργο υποστήριξη από το Αιολικό Πάρκο και χωρίς τη ζεύξη των στατών πυκνωτών, προσέφερε μια μικρή αύξηση (0,98MW και 2,14MW για τα Α/Π #1 και #2 αντίστοιχα) στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Η συνεισφορά βέβαια αυτή, αντιστοιχεί σε 5% και 6% σε σχέση με τις ονομαστικές ισχύεις των Α/Π #1 και #2, και συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί σημαντική.

Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς της γραμμής μεταφοράς για συνεχή ρύθμιση της τάσης του Α/Π και για μεταβλητή παραγωγή των Αιολικών Πάρκων #1 και #2 βρέθηκε 119,29MW και 127,38MW αντίστοιχα (Πιν 4.1). Συγκρίνοντας με την περίπτωση λειτουργίας με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, ο έλεγχος σταθερής τάσης προσέφερε μια αύξηση στην ικανότητα φόρτισης του συστήματος. Παρατηρείται ότι η αύξηση αυτή είναι σημαντικά μικρότερη στην περίπτωση του Α/Π #1 σε σχέση με το Α/Π #2 (3% και 16% των ονομαστικών ισχύων αντίστοιχα). Σημαντικό ρόλο στη διαφορά αυτή έπαιξε το γεγονός ότι στην περίπτωση του Α/Π #2, δύο απ' τις τρεις διαθέσιμες συστοιχίες πυκνωτών συνδέθηκαν πριν από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και μόνο μία έπειτα. Αντίθετα, στην περίπτωση του Α/Π #1 και οι τρεις συστοιχίες πυκνωτών συνδέθηκαν μετά το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος και επομένως δεν συνέβαλλαν στην αύξηση της ικανότητας φόρτισης του συστήματος. Η αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος σε σχέση με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει συνδεδεμένο Α/Π στο σύστημα μεταφοράς, είναι 8% και 22% για τις ονομαστικές των πάρκων #1 και #2.

Στην εργασία εξετάστηκε μία νέα μορφή ελέγχου, στην οποία δίνεται εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης στο Α/Π σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης. Η στρατηγική αυτή είναι μια προτεινόμενη μέθοδος που ενεργοποιείται από ένα διακριτό σήμα, όταν η ΥΤ της γραμμής μεταφοράς παραβιάσει ένα κατώφλι ελάχιστης τάσης. Ο έλεγχος αυτός προσέφερε περαιτέρω αύξηση του ορίου φόρτισης του συστήματος κατά 10,25MW και 15,65MW για τα Α/Π #1 και #2 αντίστοιχα, σε σχέση με τη συνεχή ρύθμιση της τάσης του Α/Π. Αυτές οι ποσότητες είναι σημαντικές, αν αναλογιστεί κανείς ότι αντιστοιχούν σε 54% και 43% της ονομαστικής ισχύος του αντίστοιχου Αιολικού Πάρκου. Συγκεκριμένα, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του συστήματος μεταφοράς για λειτουργία με τα Α/Π #1 και #2, είναι αντίστοιχα 129,48MW και 143,03MW (Πιν. 4.1). Συγκριτικά με την περίπτωση λειτουργίας με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος, η αύξηση του ορίου φόρτισης για λειτουργία του Α/Π #1 είναι της τάξης του 57%, ενώ για λειτουργία του Α/Π #2 είναι 59%.

Στη συνέχεια, η επίδραση της μεταβλητότητας του ανέμου στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ, συγκρίθηκε με τα δύο ακραία σενάρια της σταθερής χαμηλής και υψηλής ενεργού παραγωγής, για έλεγχο με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης. Οι καμπύλες της καταναλισκόμενης ισχύος του φορτίου για τα δύο ακραία σενάρια, περικλείουν την καμπύλη με τη μεταβλητή ενεργό παραγωγή στην προσομοίωση με το Α/Π #1. Κατά συνέπεια, το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για τη συγκεκριμένη χρονοσειρά μεταβλητής ενεργού παραγωγής του Α/Π #1, βρίσκεται ανάμεσα στα όρια που προκύπτουν για σταθερή υψηλή και χαμηλή ενεργό παραγωγή (Πιν. 4.2). Συμπερασματικά, η σύνδεση του Α/Π #1 στο δίκτυο για έλεγχο με εντολή μέγιστης αέργου υποστήριξης, οδήγησε σε μια αύξηση του ορίου φόρτισης κατά 59-66%, ανάλογα με την αιολική παραγωγή του πάρκου.

Στην περίπτωση του Αιολικού Πάρκου #2, αντίθετα, οι τιμές της καμπύλης ισχύος του φορτίου για μεταβλητή αιολική παραγωγή, τις χρονικές στιγμές που η αιολική παραγωγή μειώνεται σημαντικά, είναι μεγαλύτερες από τις τιμές της αντίστοιχης καμπύλης για χαμηλή ενεργό παραγωγή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς για τη δεδομένη μεταβλητή χρονοσειρά ενεργού παραγωγής του δεύτερου πάρκου, να προκύπτει μεγαλύτερη από τις τιμές που υπολογίζονται για τα δύο ακραία σενάρια παραγωγής (Πιν. 4.3). Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς του φορτίου αυξάνεται επομένως κατά 50-65% με την μεγαλύτερη αύξηση (65%) να αναφέρεται στην περίπτωση της μεταβλητής αιολικής παραγωγής. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται ότι μια στιγμιαία μεταβολή της ενεργού παραγωγής του συνδεδεμένου Αιολικού Πάρκου, οδηγεί την καταναλισκόμενη ισχύ του φορτίου σε μια αντίθετης κατεύθυνσης μεταβολή.

Στη διπλωματική εργασία διερευνήθηκε επίσης η σύμπτωση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που έγιναν σε περιβάλλον Matlab, με εκείνα σε πρόγραμμα μακροπρόθεσμης προσομοίωσης WPSTAB. Η σύγκριση ανέδειξε μικρές διαφορές στις χρονικές στιγμές ενεργοποίησης των διαφόρων μηχανισμών ελέγχου τάσεως-αέργου ισχύος, οι οποίες δεν επηρεάζουν τη γενική εικόνα. Γενικά, φάνηκε ότι η απόκριση στα δύο προγράμματα είναι πρακτικά η ίδια. Επίσης, η αλλαγή του αναλογικού κέρδους του αυτομάτου ρυθμιστή τάσης, παρά το γεγονός ότι ασκεί μια επίδραση στην απόκριση της τάσης του συνδεδεμένου Αιολικού Πάρκου, δεν επηρεάζει σημαντικά το όριο φόρτισης του συστήματος μεταφοράς. Αρκεί να σημειωθεί σχετικά ότι, μια μεγάλη αλλαγή του κέρδους από  $K_A=50.000$  σε  $K_A=100$ , επέφερε μια αμελητέα μείωση 0,28MW για το Α/Π #1 και 0,08MW για το Α/Π #2 στη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ στο φορτίο.

Τέλος, εξετάστηκε ένα σύστημα μεταφοράς στο οποίο συνδέονται ταυτόχρονα δύο Α/Π μέσω γραμμών διανομής. Στο σενάριο συνεχούς ρύθμισης της τάσης και των δύο Αιολικών Πάρκων, η δυνατότητα φόρτισης του συστήματος αυξήθηκε κατά 9,61MW και 5,06MW σε σχέση με την σύνδεση μόνο του Α/Π #1 ή του Α/Π #2 (Πιν. 6.4). Η βελτίωση αυτή μεταφράζεται σε 18% και 9% της αθροιστικής ονομαστικής ισχύος των δύο πάρκων (54,9MW). Η αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος για έλεγχο με μέγιστη άεργη υποστήριξη βρέθηκε 22% από τη σύνδεση μόνο του Α/Π #1 και 43% από τη σύνδεση μόνο του Α/Π #2, σε σχέση πάλι με την αθροιστική ονομαστική ισχύ των δύο πάρκων.

Παρατηρείται επομένως ότι η σύνδεση του δεύτερου πάρκου στο δίκτυο μεταφοράς, για έλεγχο με εντολή αέργου υποστήριξης εκτάκτου ανάγκης, οδήγησε σε αντίστοιχα σημαντική αύξηση του ορίου φόρτισης σε σχέση με τη σύνδεση του πρώτου (Πιν. 5.2). Βέβαια, πρέπει να σημειωθεί ότι τα σημεία σύνδεσης των δύο πάρκων στη γραμμή μεταφοράς, επηρεάζουν την αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο φορτίο. Αυτό σημαίνει ότι ενδεχόμενη διαφοροποίηση των σημείων σύνδεσης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα παραπάνω αποτελέσματα.

## 6.2 Προοπτικές Περαιτέρω Έρευνας

Η παρούσα εργασία, εξέτασε τη λειτουργία ενός συστήματος δοκιμών στο οποίο συνδέονται Αιολικά Πάρκα με μεταβλητή ενεργό παραγωγή. Η προσομοίωση της μεταβλητής παραγωγής έγινε με τη χρησιμοποίηση δύο χρονοσειρών ισχύος, οι οποίες εξήχθησαν από κατάλληλο μοντέλο στο Κεφάλαιο 2. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς σε μια χρονοσειρά ενεργού παραγωγής φαίνεται στοχαστική και εξαρτάται από τις τιμές της εκάστοτε χρονοσειράς που χρησιμοποιείται. Επομένως, πολύ χρήσιμα

συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συστήματος με μεταβλητή αιολική παραγωγή, θα μπορούσαν να εξαχθούν μέσω της εφαρμογής στο σύστημα διαφορετικών χρονοσειρών και την διεξαγωγή στατιστικής ανάλυσης, η οποία θα αναδείξει πιο συγκεκριμένα τη μορφή της παραπάνω εξάρτησης. Επίσης, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η στοχαστική μελέτη του συστήματος, με την έννοια του υπολογισμού στατιστικών μεγεθών για χρήση διαφορετικών κατανομών στην ενεργό παραγωγή των πάρκων.

Στο Κεφάλαιο 4, εντοπίστηκε ότι όταν το Αιολικό Πάρκο #2 λειτουργεί με μέγιστη ενεργό ισχύ για μεγάλη τιμή του φορτίου, οι εξισώσεις ισορροπίας του συστήματος δεν έχουν λύση με αποτέλεσμα το σύστημα να καταρρέει. Η αδυναμία αυτή οφείλεται σε μια αστάθεια, η οποία στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αντιμετωπίστηκε με μείωση κατά 15% της μέγιστης ισχύος με την οποία μπορεί να λειτουργεί το Αιολικό Πάρκο #2. Η παρέμβαση αυτή οδήγησε το σύστημα σε μια ευσταθή απόκριση στην συγκεκριμένη περίπτωση. Συνολικά όμως, προκύπτει η ανάγκη της περαιτέρω διερεύνηση του ζητήματος, με στόχο την πρόβλεψη της πιθανής εκδήλωσης αυτής της μορφής αστάθειας και την αυτόματη αντιμετώπισή της, μέσω της κατάλληλης προσαρμογής της ενεργού ισχύος του Αιολικού Πάρκου.

Στο πρόγραμμα WPSTAB δεν υπάρχει μοντέλο Αιολικού Πάρκου με έλεγχο ηλεκτρονικών ισχύος. Έτσι, οι προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 5 έγιναν με προσεγγιστικό τρόπο, αξιοποιώντας το μοντέλο της σύγχρονης γεννήτριας. Το μοντέλο αυτό όμως, δεν μπορεί να προσομοιώσει ρεαλιστικά τον περιοριστή μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα, αφού έχει αργή απόκριση και επομένως αποδέχεται την υπερφόρτιση για λίγα λεπτά. Στην κατεύθυνση αυτή, χρειάζεται να δημιουργηθεί ένα νέο μοντέλο για την αντιμετώπιση της υπερφόρτισης μετατροπέων στο WPSTAB, το οποίο θα λαμβάνει υπόψιν του κυρίως το γεγονός ότι οι ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις δεν μπορούν να ανεχθούν καταπόνηση μεγαλύτερη της ονομαστικής.

Τέλος, στην παρούσα εργασία εξετάστηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο, στο οποίο θεωρήθηκε ότι το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από μία σταθερή ισοδύναμη πηγή Thevenin. Στην πράξη όμως τα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι βροχοειδή και εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που εξετάστηκαν. Επομένως, η προσομοίωση με δύο Αιολικά Πάρκα σε ταυτόχρονη λειτουργία που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 5, μπορεί να διευρυνθεί για περισσότερα πάρκα και πιο σύνθετα δίκτυα, με βάση το μεγάλο εύρος δυνατοτήτων που προσφέρει το πρόγραμμα WPSTAB. Ενδιαφέρον για περαιτέρω έρευνα θα παρουσίαζε επίσης και η κατάλληλη τροποποίηση του προγράμματος WPSTAB, προκειμένου να δέχεται ως είσοδο τις χρονοσειρές μεταβλητής αιολικής παραγωγής και να προσομοιώνει περισσότερο ρεαλιστικά τη συμπεριφορά των Αιολικών Πάρκων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας.

# Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Αθήνα 2001.
- [2] Β. Κ. Παπαδιά, “Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής ενέργειας”, Τόμοι Ι, ΙΙ, Αθήνα 1985.
- [3] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, "Wind Energy Handbook", John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [4] Ι. Α. Αναγνωστόπουλος, "Επίδραση Αεργής Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα στο Όριο Φόρτισης Συστήματος", ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015.
- [5] ΑΔΜΗΕ, "Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2013-2020", Αθήνα, Οκτώβριος 2013.
- [6] Γ. Τσουράκη, "Συμβολή της Αιολικής Διείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος 2010.
- [7] Μ. Παπαδόπουλος, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές", ΕΜΠ, ΣΗΜΜΥ, 1997.
- [8] Ερευνητικό Έργο, "Ανάλυση Ευστάθειας Διασυνδεδεμένου Συστήματος υπό μεγάλη Αιολική Διείσδυση και Αξιολόγηση Μεταβατικής Συμπεριφοράς Ανεμογεννητριών σε βυθίσεις τάσεως", ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Τελική Έκθεση, Νοέμβριος 2007.
- [9] T. Van Cutsem and C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [10] P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [11] C.W. Taylor, "Power System Voltage Stability", EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill, 1994.
- [12] Κ. Βουρνάς, (Επιστημονικός Υπεύθυνος), "Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα", Αθήνα, Απρίλιος 1999.
- [13] Θ. Σουξές, "Άεργος Υποστήριξη συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές", Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2015.
- [14] J. G. Slootweg, H. Polinder, and W. L. Kling, "Representing Wind Turbine Electrical Generating Systems in Fundamental Frequency Simulations", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 18, No. 4, Dec. 2003.
- [15] P. Pourbeik (convener), CIGRE WG C4.601, "Modelling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power system control and dynamic performance", CIGRE Technical Brochure No.328, August 2007.

- [16] M. F. Farias, P. E. Battaiotto και M. G. Cendoya, "Wind Farm to Weak-Grid Connection using UPQC Custom Power Device", IEEE ICIT, 2010.
- [17] C. Vournas, (2015) "Maximum power transfer in the presence of network resistance", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2826-2827.
- [18] Π. Γεωργιάκης, "Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΣΕΑΒ, 2015.



