



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

**Έργος Υποστήριξη Συστήματος Μεταφοράς από
Διεσπαρμένες Πηγές**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Σουξές

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



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

Έργος Υποστήριξη Συστήματος Μεταφοράς από Διεσπαρμένες Πηγές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεόδωρος Σουξές

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

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Οκτωβρίου 2015.

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

(Υπογραφή)

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

.....
Θεόδωρος Σουξές

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

Copyright © Θεόδωρος Σουξές, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Ευχαριστίες

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

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Βουρνά, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση του για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Τον ευχαριστώ που μου έδωσε τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα ιδιαίτερα επιμορφωτικό, σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα της επιστήμης του ηλεκτρολόγου μηχανικού, καθώς και για το ότι ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να βοηθήσει και να μοιραστεί τις γνώσεις του. Οι συναντήσεις και οι συζητήσεις μας συνέβαλαν καθοριστικά στο αποτέλεσμα και στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ιδιαίτερης σημασίας για μένα είναι το γεγονός ότι στα πλαίσια της συνεργασίας αυτής, πέραν ενός άξιου καθηγητή γνώρισα έναν αξιόλογο άνθρωπο, στον οποίον από την πλευρά μου εύχομαι τα καλύτερα.

Εν συνεχεία, δε θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω τους αγαπημένους φίλους και συμφοιτητές μου, Αθανάσιο Σιαμπάνο, Κωνσταντίνο Κρέτση, Ιωάννα Τζιάλλα, Παναγιώτα Μεγαγιάννη, Παναγιώτη Κατσαμπάνη και Μαρία Κακατσάκη, που ήταν δίπλα μου αυτά τα χρόνια και οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκε μου παρείχαν στήριξη και βοήθεια.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την οικογένεια μου, Παναγιώτη Σουξέ, Ελένη Σπυριδοπούλου, Αθανάσιο Σουξέ και Γεώργιο Σουξέ, χωρίς την ηθική, ψυχολογική και οικονομική στήριξη της οποίας όλα αυτά τα χρόνια, δεν θα μπορούσα να βρίσκομαι σε αυτή τη θέση. Τους ευχαριστώ που βρίσκονταν πάντα στο πλευρό μου όταν τους χρειαζόμουν, καθώς και για την συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου παρείχαν σε όλες τις επιλογές μου.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η επίδραση που μπορεί να ασκήσει η Διεσπαρμένη Παραγωγή Αιολικών Πάρκων στο όριο φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Με άλλα λόγια, εξετάζεται η ενδεχόμενη αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει, μέσω της άεργης υποστήριξης του συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές. Για την επίτευξη κάτι τέτοιου, απαραίτητη είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος μέσω κατάλληλης προσομοίωσης. Η προσομοίωση γίνεται με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Το σύστημα που επελέγει περιλαμβάνει ένα σχετικά ασθενές δίκτυο μεταφοράς, στο μέσο του οποίου θεωρήθηκε η δυνατότητα σύνδεσης ενός Αιολικού Πάρκου μέσω γραμμής διανομής και υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσεως. Χρησιμοποιήθηκαν τα υπάρχοντα δεδομένα για δύο Αιολικά Πάρκα της περιοχής της Πελοποννήσου, το πάρκο της Ελίκης και το πάρκο των Διδύμων. Για τον προσδιορισμό της παραγόμενης ισχύος θεωρείται ένα στιγμιότυπο καλοκαιρινού φορτίου αιχμής, το οποίο συμπίπτει κατά κανόνα με περίοδο άπνοιας, για αυτό και η τιμή της παραγόμενης ενεργού ισχύος είναι μικρή για τα δύο Αιολικά Πάρκα. Το δίκτυο σύνδεσης κάθε πάρκου περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ που ελέγχει την τάση της πλευράς μέσης τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης συνδεδεμένες στον αντίστοιχο ζυγό και μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Οι διατάξεις αυτές ρυθμίζουν την άεργο ισχύ που εγχέεται από το Αιολικό Πάρκο.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια ελέγχου. Αρχικά προσδιορίζεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς του συστήματος δοκιμής χωρίς καμία μορφή ελέγχου του ζυγού υψηλής τάσης, ώστε να καθοριστούν τα βασικά μεγέθη για σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου και να μπορέσει να τεκμηριωθεί η αύξηση που επιφέρει ο αυτόματος έλεγχος της υψηλής τάσης. Εν συνεχεία, εξετάζεται η επιρροή που ασκεί ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης και παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτεί συνεχή κανάλια επικοινωνίας μεγάλης ακρίβειας, ταχύτητας και αξιοπιστίας, για αυτό και προτείνεται ένα νέο εφικτό σενάριο ελέγχου το οποίο πλεονεκτεί έναντι του συνεχούς ελέγχου. Εξετάζεται η επίδραση που έχει στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ του συστήματος η προτεινόμενη ευφυής μορφή ελέγχου Εντολής Άεργης Υποστήριξης και τελικά τα περιθώρια ασφαλείας προκύπτουν ίδια με το συνεχή έλεγχο.

Τέλος, εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο Αιολικών Πάρκων σε συνεχή μεταβολή του φορτίου και αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος, η οποία συνδέεται με τη δυναμική του μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο ζυγό σύνδεσης του φορτίου. Θεωρώντας κάποιες παραδοχές υπολογίζεται η συνθήκη αστάθειας/προσαρμογής του συστήματος και εξετάζεται εάν συμπίπτει με την εκδήλωση της πραγματικής αστάθειας του συστήματος της προσομοίωσης.

Λέξεις Κλειδιά:

Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς, Αιολικά Πάρκα, Περιθώρια Ασφαλείας, Άεργη Υποστήριξη, Ευστάθεια/Αστάθεια Τάσης, Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ, Συστοιχίες Πυκνωτών, Διεσπαρμένη Παραγωγή

Abstract

In the current diploma thesis, the impact that Wind Farms' Distributed Source can have in the load limit of a transmission system is examined. In other words, the possible Security Margin increase is examined, in terms of long-term voltage instability risk, that may occur through the reactive support of the transmission system from Distributed Sources. To achieve that, it is necessary to study the system behavior through appropriate simulation. The simulation software that is being used is the programming language MATLAB.

The system that was chosen includes a relatively weak transmission grid and it is considered that in the middle of this grid a wind farm is connected through a distribution feeder and a MV/HV substation. Already existing data were used for two wind farms in the region of Peloponnese, referring to the wind farms of Elike and Didyma. To determine the wind farm's generated power, a summer peak load snapshot is considered, which coincides generally with periods of apnea, so the value of the generated active power is small for the two Wind Farms. The network grid of each wind farm includes a power transformer equipped with LTC that controls the voltage of the medium voltage side of the secondary of the transformer, Switchable Capacitor Banks connected to the same bus and power electronic converters AC/DC/AC. These devices regulate and control the reactive power injected by the wind farms.

For simulation purposes, three different control scenarios are considered. First, the Maximum Power Transfer of the test system without any form of high voltage bus control is determined, in order to establish the fundamentals for comparison of test control techniques and also to be able to substantiate the increase made by the automatic control of high voltage. Then, the influence of the continuous control of high voltage is examined and the expected increase in the maximum power transfer is observed. However, the major drawback of this approach is that it requires a continuous communication channel of high accuracy, speed and reliability, that is the reason why a new possible control scenario is proposed, which has advantages over the continuous control strategy. The impact that this intelligent reactive support strategy has at the Maximum Power Transfer was examined and the results were that the safety margins were found equal to the ones calculated through the continuous control strategy.

Finally, the behavior of the two wind farms in the continuous load change is examined and the stability of the system is analyzed. The system's stability is associated with the dynamics of the transformer equipped with LTC that is added to the load bus. Taking some assumptions into consideration, the adaption/ instability condition is calculated and after that it is examined if the event of the actual instability of the simulation system coincides with the calculated condition.

Keywords

Maximum Power Transfer, Wind Farms, Security Margins, Reactive Support, Voltage Stability/Instability, Transformers with Load Tap Changer, Switchable Capacitor Banks, Distributed Sources

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1	ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	15
1.1.1	Σύστημα Παραγωγής	15
1.1.2	Σύστημα Μεταφοράς	16
1.1.3	Δίκτυο Διανομής	17
1.1.4	Μετασχηματιστές με Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο	17
1.2	ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΑΣΗΣ	17
1.2.1	Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης	17
1.2.2	Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης	18
1.2.3	Ευστάθεια Συνεχών και Διακριτών Συστημάτων	20
1.3	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ	22
1.3.1	Διαχωρισμός Χρονικών Κλιμάκων	22
1.3.2	Μέθοδοι Αντιμετώπισης Αστάθειας Τάσης	22
1.4	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΕΣ PV	24
1.5	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ	27
1.6	ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ	29
1.6.1	Περιγραφή	29
1.6.2	Εφαρμογή Online Voltage Security Assessment (VSA)	31
1.7	ΧΡΗΣΗ ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΩΝ ΑΕΡΓΩΝ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	33
1.8	ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	34
2	ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ	37
2.1	ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	37
2.2	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	39
2.2.1	Ανορθωτές	39
2.2.2	Αντιστροφείς	40
2.2.3	Μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ	42
2.2.4	Μετατροπείς Πηγής Τάσης και Πηγής Ρεύματος	43
2.3	ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	44
2.3.1	Γενικά	44
2.3.2	Βασικοί Τύποι Ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών	45
2.3.3	Σύνδεση Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα Μεταφοράς	47

2.4	ΈΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	47
2.4.1	Ρύθμιση Ενεργού-Αέργου Ισχύος.....	47
2.4.2	Όρια Λειτουργίας και Ονομαστικά Μεγέθη.....	48
3	ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	49
3.1	ΧΡΟΝΙΚΕΣ ΚΛΙΜΑΚΕΣ.....	49
3.1.1	Διαφορικές και Αλγεβρικές Εξισώσεις.....	49
3.1.2	Οιονεί Στατική Προσέγγιση.....	50
3.1.3	Περιγραφή Συνιστωσών ΣΗΕ.....	51
3.2	ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ	53
3.2.1	Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ	53
3.2.2	Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Πυκνωτών.....	55
3.2.3	Παράσταση Μετατροπένων Ηλεκτρονικών Ισχύος.....	56
3.3	ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΔΙΑΝΟΜΗΣ/ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ	57
4	ΤΥΠΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ	
	ΔΙΕΣΠΑΡΜΕΝΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ	63
4.1	ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ-ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΤΑΣΗΣ.....	63
4.2	ΓΕΝΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	64
4.2.1	Δομή Συστήματος.....	64
4.2.2	Δεδομένα Δικτύου Σύνδεσης	65
4.3	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΕΛΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΔΥΜΩΝ	66
4.4	ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΚΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	67
4.4.1	Αναγωγή Thevenin από την πλευρά της Διεσπαρμένης Παραγωγής .	68
4.4.2	Εξισώσεις Συστήματος.....	71
4.5	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	72
4.5.1	Περιγραφή Ρυθμιστών/Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου.....	72
4.5.2	Τρόποι Ελέγχου	73
4.5.2.1	Συνεχής Ρύθμιση Υψηλής Τάσης	73
4.5.2.2	Εντολή Υποστήριξης Δικτύου Μεταφοράς	73
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΥΠΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	75
5.1	ΜΕΓΙΣΤΗ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΧΩΡΙΣ ΈΛΕΓΧΟ	76
5.1.1	Α/Π Ελίκης	76
5.1.2	Α/Π Διδύμων	82
5.2	ΣΥΝΕΧΗΣ ΈΛΕΓΧΟΣ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ.....	88
5.2.1	Α/Π Ελίκης	88
5.2.2	Α/Π Διδύμων	94

5.3	ΕΝΤΟΛΗ ΑΕΡΓΟΥ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ.....	100
5.3.1	Α/Π Ελίκης	100
5.3.2	Α/Π Διδύμων	106
5.4	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΜΕΤΑΦΕΡΟΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ	113
6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ	117
6.1	ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	117
6.1.1	Περιγραφή Συστήματος.....	117
6.1.2	Ισοδύναμο Thevenin από το ζυγό του Φορτίου	118
6.1.3	Υπολογισμός Συνθήκης Αστάθειας Ακτινικού Συστήματος	122
6.1.4	Υπολογισμός Ενεργού Ισχύος Α/Π με μοντέλο Πηγής Τάσεως.....	124
6.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΟΥ	125
6.2.1	Α/Π Ελίκης	125
6.2.1.1	Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	125
6.2.2	Α/Π Διδύμων	131
6.2.2.1	Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	131
6.3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΑΘΕΙΑΣ	138
6.3.1.1	Α/Π Ελίκης	138
6.3.1.2	Α/Π Διδύμων	142
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ	147
7.1	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΚΥΡΙΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	147
7.2	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	149
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	151

1

Εισαγωγή

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων, των μέσων και του εξοπλισμού που διατίθενται για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ιδιωτών και βιομηχανιών για χώρες ή περιοχές. Η λειτουργία ενός ΣΗΕ έγκειται στην παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο των αντίστοιχων καταναλωτών. Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας σπάνια πραγματοποιείται στην αρχική της μορφή και συνήθως μετατρέπεται σε πιο άμεσα αξιοποιήσιμες μορφές ενέργειας, όπως η θερμική, η μηχανική ή απλά ο φωτισμός. Το πλεονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκεται στην δυνατότητα της εύκολης μεταφοράς και της ελεγχιμότητας που προσφέρει με σχετικά μεγάλο βαθμό απόδοσης και αξιοπιστίας. Η ορθή λειτουργία ενός ΣΗΕ προϋποθέτει την τήρηση κάποιων βασικών αρχών και απαιτήσεων [1],[2]:

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

1.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Αν και τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά τον κόσμο διαφέρουν ως προς το μέγεθος και τα στοιχεία που τα αποτελούν, όλα έχουν τα ίδια βασικά χαρακτηριστικά και παρόμοια δομή. Συγκεκριμένα όλα τα ΣΗΕ αποτελούνται από τρία διακριτά υποσυστήματα. Αυτά είναι το Σύστημα Παραγωγής, το Σύστημα Μεταφοράς και το Δίκτυο Διανομής.

1.1.1 Σύστημα Παραγωγής

Το Σύστημα Παραγωγής περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής, στους οποίους μια μορφή πρωτογενούς ενέργειας μετατρέπεται σε κινητική και κατόπιν σε ηλεκτρική με

την βοήθεια των γεννητριών. Ανάλογα με την μορφή της πρωτογενούς αυτής ενέργειας οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε [2], [3] :

- Θερμοηλεκτρικούς, όπου η θερμότητα, προερχόμενη από καύση ορυκτών καυσίμων ή πυρηνική σχάση μετατρέπεται με την βοήθεια στροβίλων σε κινητική που οδηγεί την σύγχρονη γεννήτρια. Ανάλογα με το μέσο που χρησιμοποιούν οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί χωρίζονται περαιτέρω σε ατμοηλεκτρικούς και πυρηνικούς, οι οποίοι χρησιμοποιούν τον ατμό, καθώς και στους πετρελαϊκούς-ντιζελοηλεκτρικούς, που χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) οι οποίες μπορεί να είναι είτε εμβολοφόρες Ντιζελογεννήτριες (Ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη – ΗΖ) είτε αεριοστροβίλοι (gas turbines).
- Υδροηλεκτρικούς, όπου η απαραίτητη κινητική ενέργεια προέρχεται από την μετατροπή της δυναμικής ενέργεια του νερού καθώς αυτό διέρχεται μέσα από διάφορους τύπους υδροστροβίλων. Ανάλογα με τον τρόπο που ρέει το νερό, τους διακρίνονται σε σταθμούς φυσικής ροής, ρυθμιζόμενης ροής και αντλητικούς.
- Εναλλακτικούς, όπου γίνεται χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες βρίσκονται στην φύση σε πρακτικά ανεξάντλητες ποσότητες και καθώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανθρώπινης δραστηριότητας γίνονται περισσότερο από αισθητές, αναμένεται η χρήση τους να αυξηθεί δραματικά τα επόμενα χρόνια. Ανάλογα με την μορφή της πρωτογενούς μορφής οι περισσότερο διαδεδομένες εφαρμογές των ΑΠΕ στα σημερινά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι τα αιολικά πάρκα, όπου χρησιμοποιείται η κινητική ενέργεια του ανέμου με την βοήθεια ανεμογεννητριών και οι σταθμοί που χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια, είτε απευθείας σαν φωτεινή ενέργεια οπότε αναφέρονται ως φωτοβολταϊκά πάρκα, είτε μετατρέποντας την πρώτα σε θερμότητα οπότε ηλιοθερμικοί σταθμοί.

Το σύστημα παραγωγής ενός ΣΗΕ περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης σε Υψηλή Τάση (ΥΤ) για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

1.1.2 Σύστημα Μεταφοράς

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται από εγκαταστάσεις ισχύος που αναλαμβάνουν τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής στα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης από όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Οι εγκαταστάσεις αυτές περιλαμβάνουν γραμμές υψηλής τάσης, υποσταθμούς για το μετασχηματισμό των διάφορων επιπέδων τάσεων του συστήματος και υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης σε Μέση Τάση (ΜΤ) προς τροφοδότηση των περιοχών κατανάλωσης. Η υψηλή τάση που επικρατεί στο δίκτυο μεταφοράς βοηθά στη μείωση των απωλειών και συνεπώς σε οικονομικότερη λειτουργία. Οι πιο διαδεδομένες ονομαστικές τάσεις μεταφοράς σήμερα περιλαμβάνουν τιμές όπως 66 kV, 110 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV, 275 kV, 345 kV, 400 kV, 500 kV και 750 kV [2]. Επίσης, το σύστημα μεταφοράς τροφοδοτεί και βιομηχανικούς καταναλωτές ΥΤ, οι οποίοι διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της τάσης και δικά τους εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης. Το σύστημα παραγωγής και μεταφοράς αναφέρεται συχνά ως διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα (bulk power system) [1].

1.1.3 Δίκτυο Διανομής

Το Δίκτυο Διανομής παραλαμβάνει την ενέργεια που μεταφέρεται στις μείζονες περιοχές φορτίου μέσω του Συστήματος Μεταφοράς και τη διανέμει μέσα στην εξυπηρετούμενη περιοχή, φθάνοντας μέχρι τον τελευταίο καταναλωτή. Το Δίκτυο Διανομής χωρίζεται σε δυο βαθμίδες: την διανομή Μέσης Τάσης ή πρωτεύουσα διανομή και την διανομή Χαμηλής Τάσης ή δευτερεύουσα διανομή. Η τροφοδότηση του δικτύου διανομής γίνεται από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους σταθμούς ΜΤ/ΧΤ καθώς και τους καταναλωτές Μέσης Τάσης. Ανάλογα με τον τύπο περιοχής που τροφοδοτούν μπορούν να είναι είτε υπόγεια είτε εναέρια, ενώ λόγω του μεγάλου πλήθους των στοιχείων που διαθέτουν, λειτουργούν ακτινικά χάριν απλότητας της προστασίας και της ροής ενέργειας στα δίκτυα αυτά [4]. Η έννοια του συστήματος διανομής έχει αλλάξει με τα χρόνια. Με τη χρησιμοποίηση όλο και υψηλότερων τάσεων για τη διανομή, πολλά δίκτυα που παλαιότερα έπαιζαν τον ρόλο της μεταφοράς ενέργειας χαρακτηρίζονται πλέον δίκτυα υπομεταφοράς και αποτελούν μέρος των δικτύων διανομής [2].

Τέλος, παρουσιάζονται οι Μετασχημαστές με ΣΑΤΥΦ, επειδή η χρήση τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθης.

1.1.4 Μετασχηματιστές με Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο

Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφορα επίπεδα τάσης τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια μετασχηματιστών και αυτομετασχηματιστών ισχύος. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος υπερυψηλής τάσης/υψηλής τάσης ή υψηλής τάσης/μέσης τάσης είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή της λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και σε όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασυνδέσεως ή υποβιβασμού του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός τους γίνεται αυτόματα. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, καθώς σε αυτήν την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δημιουργώντας την δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ ελέγχουν συνήθως την τάση στη πλευρά διανομής. Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού τους κατά ένα βήμα τη φορά.

1.2 Ευστάθεια Τάσης

1.2.1 Η Έννοια της Ευστάθειας Τάσης

Ευστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του ΣΗΕ να διατηρεί την κατάσταση λειτουργίας του, τόσο κάτω από κανονικές συνθήκες όσο και μετά από μια διαταραχή που υφίσταται. Πιο συγκεκριμένα, η ευστάθεια τάσης αναφέρεται στην ικανότητα ενός ΣΗΕ να διατηρεί αποδεκτές τάσεις σε όλους τους ζυγούς του, τόσο στην κανονική κατάσταση λειτουργίας, όσο και έπειτα από διαταραχή του συστήματος.

Επίσης, ένας ορισμός της αστάθειας τάσης έχει προταθεί στο [5], ο οποίος περιγράφει τα βασικά χαρακτηριστικά του φαινομένου και είναι ο εξής:

Η αστάθεια τάσης προκαλείται από τη απόπειρα των δυναμικών φορτίων να απορροφήσουν ισχύ μεγαλύτερη από το όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος του συνδυασμένου συστήματος μεταφοράς και παραγωγής.

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

Η δυναμική συμπεριφορά των φορτίων είναι ένας από τους κύριους λόγους πρόκλησης αστάθειας τάσης. Μετά από εμφάνιση διαταραχής στο σύστημα, τα φορτία τείνουν να αποκαταστήσουν την καταναλισκόμενη ισχύ είτε άμεσα, μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα τους, είτε έμμεσα, μέσω διατάξεως του συστήματος, όπως Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ), κινητήρες επαγωγής και θερμοστατικά φορτία. Άλλες διατάξεις ελέγχου του συστήματος, όπως η προστασία υπερδιέγερσης των σύγχρονων γεννητριών, συμβάλλουν επίσης σημαντικά στο φαινόμενο της αστάθειας τάσης [5].

Ένα φαινόμενο αστάθειας τάσης εμφανίζεται με μορφή διαρκούς πτώσης (ή σπανίως ανόδου) των τάσεων σε ορισμένους ζυγούς του συστήματος. Η επιτάχυνση αυτού του φαινομένου προκαλεί, εν τέλει, απότομη βύθιση στις τάσεις, οδηγώντας στο φαινόμενο που ονομάζεται κατάρρευση τάσης. Η έννοια της κατάρρευσης έχει οριστεί ως εξής [5]: Με τον όρο κατάρρευση εννοούμε μια απότομη (πρακτικά ακαριαία) καταστροφική μετάβαση της κατάστασης ενός συστήματος, η οποία οφείλεται συνήθως σε μία αστάθεια που εξελίσσεται σε ταχύτερη χρονική κλίμακα από την αρχικά θεωρούμενη. Ωστόσο, η κατάρρευση τάσης μπορεί να είναι ή και να μην είναι το τελικό αποτέλεσμα της αστάθειας τάσης.

Η αστάθεια τάσης ξεκινά ως ένα τοπικό φαινόμενο. Ωστόσο, οι συνέπειες 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 [1]:

1. Μεγάλες αποστάσεις μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης
2. Λειτουργία ΣΑΤΥΦ σε καταστάσεις χαμηλού επιπέδου τάσεων μεταφοράς
3. Δυσμενή χαρακτηριστικά φορτίων (συμπεριφορά σταθερής ισχύος)
4. Κακός συντονισμός του συνόλου των συστημάτων προστασίας και Ελέγχου

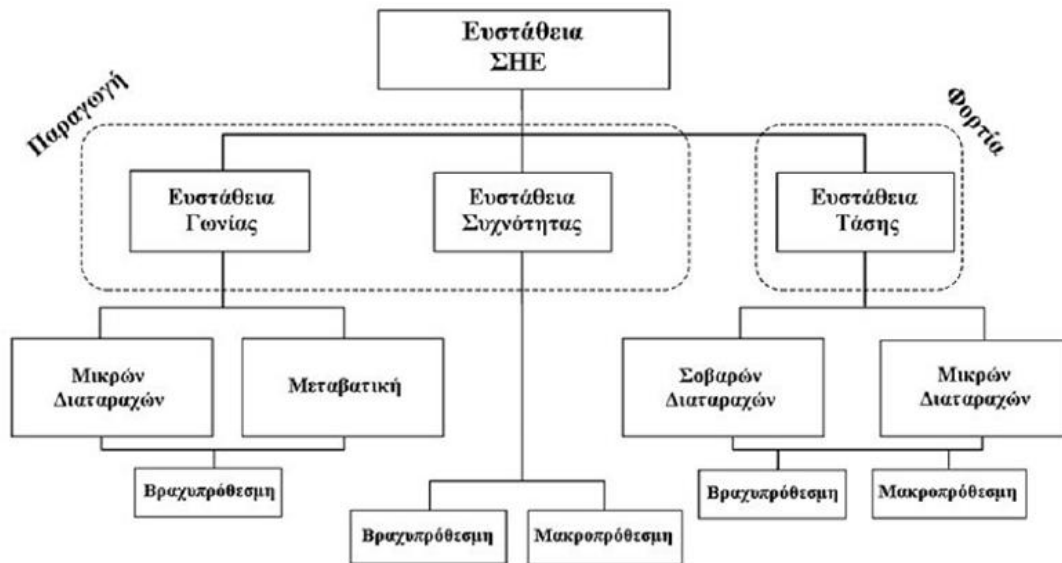
1.2.2 Διαχωρισμός Φαινομένων Ευστάθειας Τάσης

Ενώ η ευστάθεια ενός ΣΗΕ αποτελεί ενιαίο πρόβλημα, είναι δύσκολο και σχεδόν αδύνατο να μελετηθεί συνολικά. Η κατηγοριοποίηση της ευστάθειας σε διάφορες μορφές αποδείχτηκε αναγκαία, αφού η αστάθεια ενός ΣΗΕ μπορεί να οφείλεται σε πολλούς παράγοντες που ο καθένας επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο το σύστημα και χρήζει διαφορετικής αντιμετώπισης. Οι κατηγορίες αυτές φαίνονται στο Σχ. 1.1, ενώ ο διαχωρισμός τους έγινε σύμφωνα με τα παρακάτω κριτήρια [1]:

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

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

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



Σχ. 1.1: Κατηγοριοποίηση των μορφών αστάθειας

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

Ένα άλλο πολύ σημαντικό κριτήριο διαχωρισμού της ευστάθειας τάσης αποτελεί η χρονική κλίμακα στην οποία εξελίσσονται τα δυναμικά φαινόμενα. Με βάση αυτό το

κριτήριο η ευστάθεια τάσης χωρίζεται σε βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη [5]. Μια πιο αναλυτική περιγραφή της κάθε κατηγορίας παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα 1.3.

1.2.3 Ευστάθεια Συνεχών και Διακριτών Συστημάτων

Θεωρείται το παρακάτω σύστημα αποτελούμενο από n συνήθεις διαφορικές εξισώσεις:

$$\dot{x} = f(x) \quad (1.1)$$

όπου x το διάνυσμα κατάστασης, διαστάσεως $(nx1)$, και κάθε f_i ($i = 1, \dots, n$) είναι στη γενική περίπτωση μία μη γραμμική, συνεχής και διαφορίσιμη συνάρτηση όλων των μεταβλητών κατάστασης x_i ($i = 1, \dots, n$).

Η απόκριση στο πεδίο του χρόνου ενός φυσικού συστήματος που περιγράφεται από εξισώσεις της μορφής (1.1), προκύπτει από την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων για μία δεδομένη αρχική συνθήκη ($t = 0$):

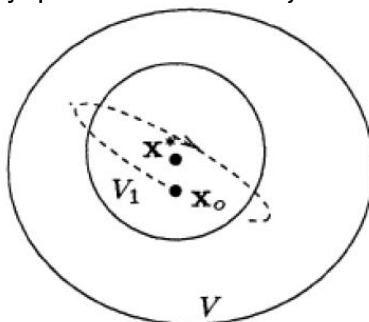
$$x(0) = x_0 \quad (1.2)$$

Το διάνυσμα κατάστασης προσδιορίζει ένα σημείο στο χώρο κατάστασης, στο χώρο δηλαδή που έχει ως συντεταγμένες του όλες τις μεταβλητές κατάστασης. Η λύση $x(t)$ που προκύπτει για την αρχική συνθήκη x_0 μπορεί να παρασταθεί ως μία καμπύλη στο χώρο κατάστασης, που ονομάζεται τροχιά του συστήματος. Η λύση $x(t)$ που αντιστοιχεί σε $t > 0$ καλείται θετική τροχιά και αυτή που αντιστοιχεί σε $t < 0$ καλείται αρνητική τροχιά. [5]

Ένα σημείο x^* αποτελεί σημείο ισορροπίας του συστήματος (1.1) αν ικανοποιηθεί η συνθήκη:

$$f(x^*) = 0 \quad (1.3)$$

Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ευσταθές αν όλες οι λύσεις με αρχική συνθήκη κοντά στο x^* παραμένουν κοντά στο x^* και αυτές για όλο το χρόνο. Ο παρακάτω ορισμός της ευστάθειας οφείλεται στον Lyapunov και απεικονίζεται στο σχήμα 1.2:



Σχ. 1.2: Ορισμός Ευστάθειας

Ένα σημείο ισορροπίας x^* είναι ευσταθές αν για κάθε γειτονιά V του x^* μπορούμε να βρούμε μια γειτονιά V_1 του x^* τέτοια ώστε για κάθε $x_0 \in V_1$ η λύση $x(t)$ υπάρχει στο V για κάθε $t > 0$.

Επιπλέον λέμε ότι ένα σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές όταν όλες οι τροχιές με $x_0 \in V_1$ προσεγγίζουν το x^* καθώς $t \rightarrow \infty$. Ένα σημείο ισορροπίας καλείται ασταθές όταν δεν είναι ευσταθές.

Η κατά Lyapunov ευστάθεια, όπως προκύπτει από τα παραπάνω, είναι μια τοπική ιδιότητα του συστήματος, αφορά δηλαδή περιοχές κοντά στα σημεία ισορροπίας. Εποπτικότερη εικόνα για τη συνολική συμπεριφορά του συστήματος ως προς την ευστάθειά του δίνεται από τη μελέτη του πορτρέτου φάσεων, από όπου μπορεί να προσδιοριστεί η περιοχή εκείνη από την οποία όλες οι τροχιές του συστήματος καταλήγουν σε ένα ευσταθές σημείο ισορροπίας. Η περιοχή αυτή που χαρακτηρίζεται ως περιοχή A καλείται περιοχή έλξης του x^* , γιατί όλες οι τροχιές του συστήματος με αρχικές συνθήκες $x_0 \in A$ τείνουν σε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας x^* .

Στα συνεχή γραμμικά συστήματα, όπως αυτό της μορφής:

$$\dot{x} = Ax \quad (1.4)$$

καθώς και στα αντίστοιχα διακριτά γραμμικά συστήματα:

$$x_{k+1} = Ax_k \quad (1.5)$$

η ευστάθεια του σημείου ισορροπίας ($x^* = 0$) καθορίζεται από τις ιδιοτιμές του πίνακα κατάστασης A .

Οι ιδιοτιμές μπορεί να είναι πραγματικές ή μιγαδικές. Εάν ο πίνακας A είναι πραγματικός (υπόθεση που ισχύει σε όλα τα φυσικά συστήματα όπως είναι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας), οι μιγαδικές ιδιοτιμές εμφανίζονται πάντα σε συζυγή ζεύγη. Αν όλες οι ιδιοτιμές έχουν αρνητικά πραγματικά μέρη, το σημείο ισορροπίας είναι ασυμπτωτικά ευσταθές. Αν έστω και μία ιδιοτιμή έχει θετικό πραγματικό μέρος, το σημείο ισορροπίας είναι ασταθές. Σημειώνεται ότι στα γραμμικά συστήματα η περιοχή έλξης ενός ασυμπτωτικά ευσταθούς σημείου ισορροπίας είναι όλος ο χώρος των καταστάσεων. [5]

Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, το πλήθος των σημείων ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα ποικίλει. Συγκεκριμένα, ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να έχει ένα, περισσότερα του ενός ή κανένα σημείο ισορροπίας. Επιπρόσθετα, η περιοχή έλξης ενός σημείου ισορροπίας σε ένα μη γραμμικό σύστημα μπορεί να είναι περιορισμένη. Συνεπώς η ύπαρξη ευσταθούς σημείου ισορροπίας δεν είναι επαρκής συνθήκη για να εγγυηθεί την ευσταθή απόκριση του συστήματος.

Στις περισσότερες περιπτώσεις μη γραμμικών συστημάτων, η μελέτη της ευστάθειας των σημείων ισορροπίας διευκολύνεται με γραμμικοποίηση του συστήματος γύρω από μία περιοχή του εξεταζόμενου σημείου ισορροπίας. Αν ορισθεί:

$$\Delta x = x - x^* \quad (1.6)$$

και διατηρηθεί μόνο ο όρος πρώτης τάξης του αναπτύγματος Taylor γύρω από το x^* , το αντίστοιχο γραμμικοποιημένο σύστημα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (1.7)$$

Ο πίνακας κατάστασης A στην περίπτωση αυτή είναι ο Ιακωβιανός πίνακας του συστήματος, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^*} = f_x(x^*) \quad (1.8)$$

Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη ευστάθειας των σημείων ισορροπίας του μη γραμμικού συστήματος ανάγεται στη μελέτη ευστάθειας του γραμμικοποιημένου συστήματος γύρω από κάθε σημείο ισορροπίας, δηλαδή στον υπολογισμό των ιδιοτιμών του πίνακα A .

1.3 Μηχανισμοί Αστάθειας Τάσης

1.3.1 Διαχωρισμός Χρονικών Κλιμάκων

Τα φαινόμενα τα οποία μπορεί να οδηγήσουν ένα ΣΗΕ σε αστάθεια τάσης ποικίλουν. Για το λόγο αυτό διαχωρίζονται μεταξύ τους ανάλογα με το χρόνο εξέλιξής τους στις ακόλουθες κατηγορίες [5]:

- Ακαριαία φαινόμενα: φαινόμενα τα οποία είναι κυρίως ηλεκτρομαγνητικά, εμφανίζονται σε χρονικά διαστήματα που είναι πολύ μικρότερα από 1 δευτερόλεπτο και θεωρούνται ευσταθή και σε ισορροπία. Στα φαινόμενα αυτά εντάσσονται και οι Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος.
- Βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα: στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα φαινόμενα τα οποία διαρκούν για χρόνο λίγων δευτερολέπτων, συνήθως από 1-10 δευτερόλεπτα.
- Μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα: είναι τα φαινόμενα που εμφανίζονται μετά από τις ηλεκτρομηχανικές ταλαντώσεις που ανήκουν στα βραχυπρόθεσμα και η διάρκειά τους είναι από 10s έως μερικά λεπτά.

Τα ακαριαία φαινόμενα αναφέρονται γενικότερα στο δίκτυο του συστήματος, σε στατικά φορτία και στους Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος. Τα βραχυπρόθεσμα αφορούν τις γεννήτριες, τους αυτόματους ρυθμιστές τάσης και στροφών, καθώς και τους κινητήρες επαγωγής. Στα μακροπρόθεσμα φαινόμενα έχουμε τα ΣΑΤΥΦ, τα Συστήματα Προστασίας Υπερδιέγερσης (ΣΠΥ), τη δευτερεύουσα ρύθμιση και έλεγχο της τάσης, το γενικότερο προγραμματισμό της παραγωγής, καθώς και θερμοστατικά φορτία και τους κύκλους των φορτίων γενικά.

Όταν χρησιμοποιείται το λεπτομερές μοντέλο ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μελετώνται τα μεταβατικά φαινόμενα των χρονικών κλιμάκων, όπως αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται περισσότερο είναι αυτό των δύο χρονικών κλιμάκων, στο οποίο γίνεται μελέτη των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Στο μοντέλο αυτό, μπορούν να εφαρμοστούν και μερικές απλοποιήσεις έτσι ώστε κάθε φορά να μελετάται αποκλειστικά μία από τις δύο κατηγορίες φαινομένων. Αν είναι επιθυμητό να μελετηθούν αποκλειστικά τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα, αυτό που γίνεται είναι να εισαχθεί ένα προσεγγιστικό μοντέλο το οποίο θεωρεί ότι τα μακροπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα εξελίσσονται σε μία πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα κι έτσι μπορούν να θεωρηθούν σταθερά στο μικρό διάστημα της τάξης κάποιων δευτερολέπτων που χρησιμοποιείται στη βραχυπρόθεσμη ανάλυση. Από την άλλη, όταν επιδιώκεται να μελετηθεί το σύστημα από τη σκοπιά της μακροπρόθεσμης ανάλυσης, οι υπολογισμοί μπορεί να επιταχυνθούν αμελώντας τη δυναμική δράση των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντικατάσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των βραχυπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων με τις εξισώσεις ισορροπίας. Θεωρείται δηλαδή ότι τα φαινόμενα αυτά έχουν ήδη εξελιχθεί και έχουν φτάσει σε σημείο ισορροπίας. Αυτό δεν είναι τίποτα άλλο από την Οιονεί Στατική Ανάλυση (Quasi-Steady-State), η οποία χρησιμοποιείται σε μελέτες που αφορούν κυρίως τη μακροπρόθεσμη ευστάθεια τάσης [5].

1.3.2 Μέθοδοι Αντιμετώπισης Αστάθειας Τάσης

Οι μέθοδοι οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση φαινομένων αστάθειας τάσης (που μπορεί να οδηγήσουν και σε κατάρρευση τάσης), χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες [5]. Αυτές αφορούν τα μέτρα πρόληψης κατά το σχεδιασμό του

συστήματος, τα οποία μπορούν να ληφθούν για να μην εκδηλωθούν φαινόμενα αστάθειας τάσης, τους χειρισμούς που γίνονται αφού εκδηλωθεί το φαινόμενο της αστάθειας τάσης ή υπάρχουν ενδείξεις ότι είναι πολύ πιθανό να εκδηλωθεί αστάθεια τάσης, οι οποίοι γίνονται αυτόματα, και τέλος τις ενέργειες που γίνονται σε πραγματικό χρόνο έτσι ώστε να υπάρχει ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Στην πρώτη κατηγορία της πρόληψης και των μέτρων στο σχεδιασμό του συστήματος ανήκουν οι παρακάτω μηχανισμοί που περιγράφονται αναλυτικά στο [1]:

1. Συσκευές Αντιστάθμισης Αέργου Ισχύος: Αναφέρεται σε πυκνωτές και συστήματα αυτόματης ζεύξης τα οποία τροφοδοτούν το σύστημα με άεργο ισχύ. Επαρκή περιθώρια ευστάθειας πρέπει να διασφαλίζονται μέσω μίας κατάλληλης επιλογής των συστημάτων αντιστάθμισης. Η επιλογή της θέσης, της ικανότητας και του είδους της αντιστάθμισης θα πρέπει να βασίζεται σε μία λεπτομερή μελέτη έτσι ώστε να καλύπτει και τις πιο δυσμενείς συνθήκες, για τις οποίες το σύστημα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά. Τα κριτήρια σχεδίασης που βασίζονται στη μέγιστη επιτρεπτή πτώση τάσης μετά από κάποιο ενδεχόμενο, δεν είναι συνήθως ικανοποιητικά, όσον αφορά τη σκοπιά της ευστάθειας τάσης. Το περιθώριο ευστάθειας θα πρέπει να βασίζεται στις αποστάσεις των καταναλώσεων ενεργού και αέργου ισχύος από τις τιμές που οδηγούν σε αστάθεια.

2. Επιλογή Σημείου Αναφοράς και Δευτερεύουσα Ρύθμιση Τάσης: Σε πολλές περιπτώσεις, η επιλογή ως σημείου αναφοράς (δηλαδή του ζυγού που ελέγχεται από τον αυτόματο ρυθμιστή τάσης) ενός ζυγού απομακρυσμένου από την πηγή αέργου ισχύος, έχει ευνοϊκά αποτελέσματα ως προς την ευστάθεια τάσης. Γενικά η μετακίνηση του σημείου ρυθμιζόμενης τάσης πιο κοντά στα φορτία είναι ευεργετική. Με τη δευτερεύουσα ρύθμιση τάσης υπάρχει η δυνατότητα κεντρικού ελέγχου, από το διαχειριστή του συστήματος, της διέγερσης των γεννητριών, και εν γένει της παραγωγής αέργου ισχύος, κάτι το οποίο μπορεί να λειτουργήσει θετικά ως προς την ευστάθεια τάσης.

Στη δεύτερη κατηγορία, αυτή των χειρισμών μετά την ανίχνευση ενδείξεων εμφάνισης αστάθειας τάσης ανήκουν τα παρακάτω:

1. Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ): Επειδή προκαλούν αποκατάσταση του φορτίου μέσω της ρύθμισης της τάσης, όταν υπάρξουν σοβαρές διαταραχές, τα ΣΑΤΥΦ μπορεί να έχουν αρνητική επίδραση στην ευστάθεια τάσης, καθώς η προσπάθεια τους για αποκατάσταση του φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω μείωση της τάσης μεταφοράς, αφού το σύστημα δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ζήτησης ισχύος του φορτίου. Συνεπώς, εάν συμβεί αυτό και παρατηρηθεί αρνητική επίδραση, τότε η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ απενεργοποιείται με σκοπό την αντιμετώπιση αστάθειας τάσης. Διαφορετικά, το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί κανονικά, επενεργώντας θετικά στην ευστάθεια του συστήματος [5].

Στην τρίτη κατηγορία που αφορά την παρακολούθηση για τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος υπάρχουν τα εξής μέτρα [1]:

1. Διατήρηση Περιθωρίων Ευστάθειας: Το σύστημα πρέπει να λειτουργεί με επαρκή περιθώρια ευστάθειας τάσης με τον κατάλληλο προγραμματισμό των αποθεμάτων αέργου ισχύος. Δεν υπάρχει μέχρι τώρα κάποια ενιαία αποδεκτή κατευθυντήρια γραμμή για την επιλογή των περιθωρίων που πρέπει να επιλεγούν. Αν τα περιθώρια δεν είναι επαρκή τότε είναι αναγκαίος ο περιορισμός της μεταφοράς ισχύος και η ενεργοποίηση μονάδων παραγωγής για να παρέχουν υποστήριξη τάσης σε κρίσιμες περιοχές.

2. Διατήρηση Εφεδρείας Αέργου Ισχύος: Οι γεννήτριες πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μακριά από τη μέγιστη τιμή διέγερσης ώστε να έχουν δυνατότητα να αυξήσουν την

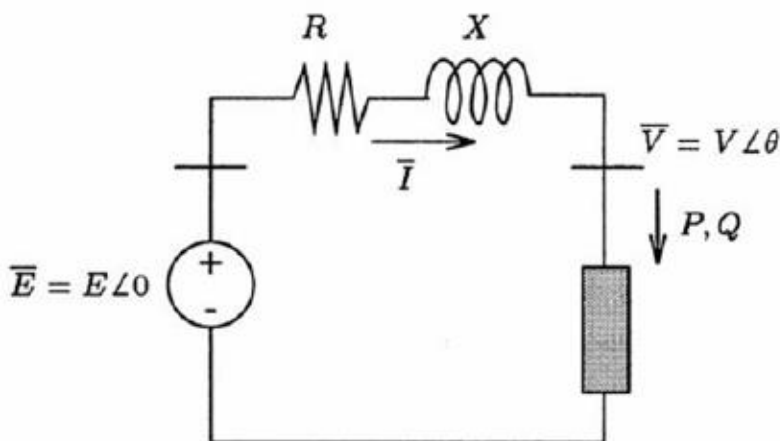
άεργο ισχύ. Η απαιτούμενη εφεδρεία πρέπει να διατηρείται σε όλες τις μονάδες μιας περιοχής.

3. Ενέργειες του Διαχειριστή: Επερχόμενοι διαχειριστές πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίσουν τις πρώτες ενδείξεις μίας αστάθειας τάσης και να λάβουν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας, όπως ο έλεγχος της τάσης και της μεταφερόμενης ισχύος, αλλά και της αποκοπής φορτίου στη χειρότερη περίπτωση. Η διαρκής παρακολούθηση και ανάλυση για την αναγνώριση πιθανών προβλημάτων ευστάθειας και τα πιθανά διορθωτικά μέτρα είναι πολύτιμα.

1.4 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς και Καμπύλες PV

Ένας βασικός παράγοντας στην εμφάνιση αστάθειας τάσης ενός συστήματος αποτελεί η αδυναμία μεταφοράς της απαιτούμενης ισχύος για την κάλυψη των φορτίων [5]. Το σύστημα έχει την ικανότητα να μεταφέρει μια μέγιστη ενεργό ή άεργο ισχύ, η οποία αναφέρεται ως μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς. Η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς ενός συστήματος προσδιορίζεται βάσει των διατάξεων και της τοπολογίας του. Η βασική ιδέα προκύπτει από την ανάλυση του ακτινικού δικτύου του Σχ. 1.3, το οποίο αποτελείται από μια ιδανική πηγή τάσης και ένα φορτίο.

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



Σχ. 1.3: Ακτινικό δίκτυο

Σύμφωνα με το Σχ. 1.3 προκύπτει:

$$\tilde{V} = \tilde{E} - jX\tilde{I} \quad (1.9)$$

Η φαινόμενη ισχύς S που απορροφάται από το φορτίο είναι:

$$S = P + jQ = \tilde{V}\tilde{I}^* = \tilde{V} \frac{\tilde{E}^* - \tilde{V}^*}{-jX} = \frac{j}{X} (EV \cos\theta + jEV \sin\theta - V^2) \quad (1.10)$$

το οποίο αναλύεται ως:

$$P = -\frac{EV}{X} \sin\theta \quad (1.11)$$

και

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos\theta \quad (1.12)$$

Οι εξισώσεις (1.11) και (1.12) είναι οι εξισώσεις ροής ισχύος ή ροής φορτίου ενός δικτύου χωρίς απώλειες. Για δεδομένο φορτίο (P,Q), οι παραπάνω εξισώσεις λύνονται ως προς V και θ, με χρήση των οποίων μπορούν να προσδιοριστούν και τα υπόλοιπα μεγέθη.

Απαλοίφοντας την γωνία θ από τις εξισώσεις (1.11) και (1.12) λαμβάνουμε τη γνωστή διτετράγωνη εξίσωση:

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.13)$$

Για την ύπαρξη τουλάχιστον μίας λύσης της εξίσωσης (1.13) πρέπει η διακρίνουσα να είναι μη αρνητική και ως εκ τούτου:

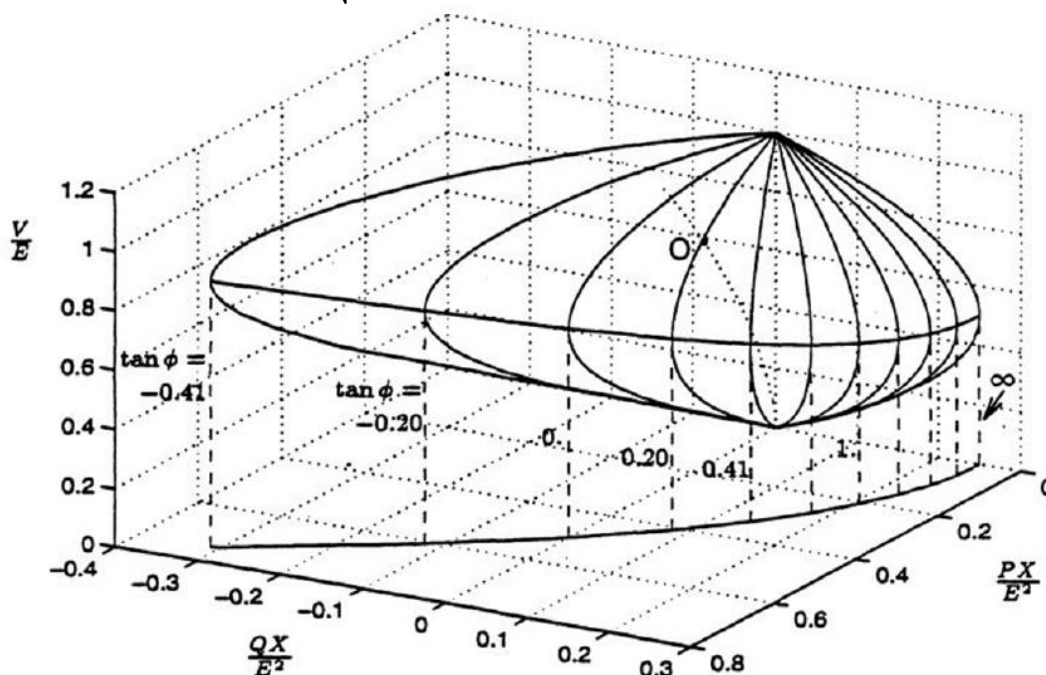
$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (1.14)$$

η οποία μπορεί να απλοποιηθεί ως ακολούθως:

$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (1.15)$$

Υποθέτοντας εν συνεχεία ότι η ανίσωση (1.15) ικανοποιείται, οι δύο λύσεις της διτετράγωνης εξίσωσης (1.13) δίνονται από τον εξής τύπο:

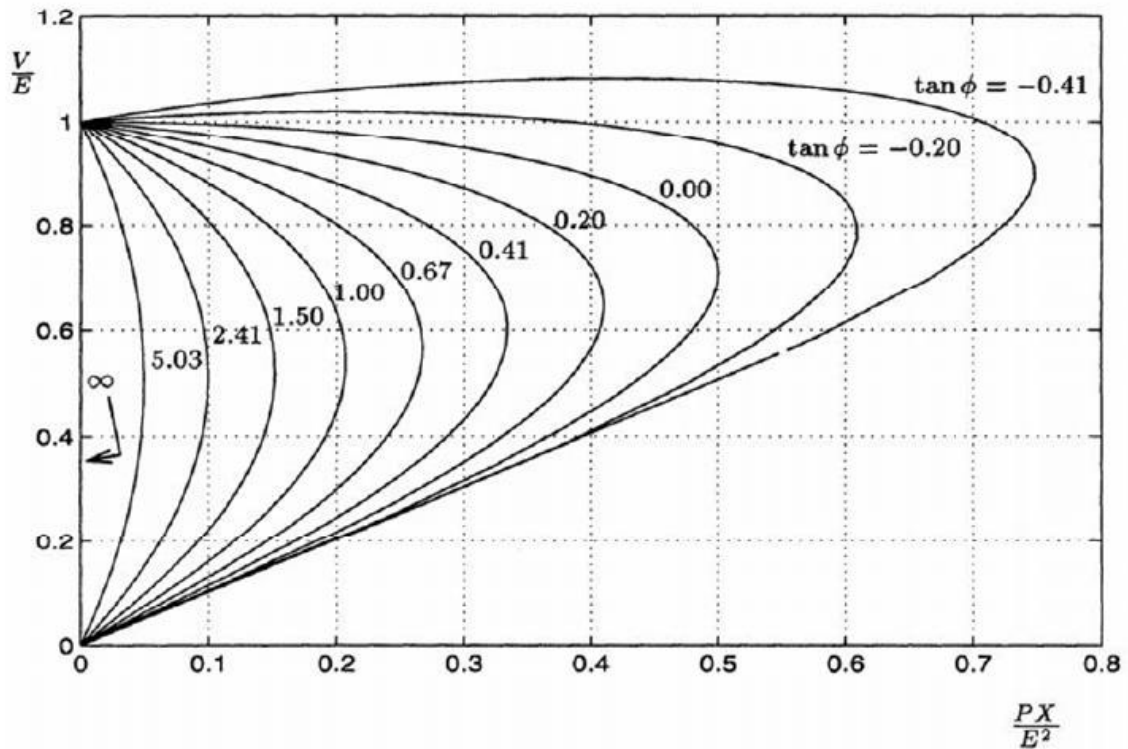
$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\left(\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q\right)}} \quad (1.16)$$



Σχ. 1.4: Τάση συναρτήσει ενεργών και αέργων ισχύων φορτίου

Στον τρισδιάστατο χώρο (P,Q,V), η εξίσωση (1.16) ορίζει την επιφάνεια δύο διαστάσεων που φαίνεται στο Σχ. 1.4. Το πάνω μέρος της επιφάνειας αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «+» στην εξίσωση (1.16), ή αλλιώς στη λύση υψηλής τάσης, ενώ το κάτω μέρος αντιστοιχεί στη λύση με το πρόσημο «-» στην εξίσωση (1.16), ή αλλιώς στη λύση χαμηλής τάσης. Ο «ισημερινός» της επιφάνειας, κατά μήκος του οποίου οι δύο λύσεις είναι όμοιες, αντιστοιχεί στα σημεία μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

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



Σχ. 1.5: Καμπύλες PV

Από τις καμπύλες PV του Σχ. 1.5 μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα [5]:

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

ισχύος αντισταθμίζεται από την αντίστοιχη παραγωγή της αέργου. Όσο πιο αρνητικό το $\tan\phi$, τόσο μεγαλύτερο και το τμήμα της PV καμπύλης που συμβαίνει το παραπάνω φαινόμενο.

1.5 Χαρακτηριστικές Φορτίου και Φαινόμενα Αστάθειας Τάσης

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

Γενικά, τα φορτία καταναλώνουν ισχύ με βάση την τάση και την συχνότητα. Εφόσον εδώ εξετάζονται φαινόμενα αστάθειας τάσης, η εξάρτηση από την συχνότητα δεν λαμβάνεται υπόψη. Η ισχύς εξαρτάται από την τάση V του ζυγού που βρίσκεται συνδεδεμένο και από μια αδιάστατη και ανεξάρτητη μεταβλητή ζήτησης z , που εκφράζει το σύνολο του συνδεδεμένου εξοπλισμού. Η παραπάνω σχέση ονομάζεται χαρακτηριστική φορτίου και εκφράζεται με τη γενική μορφή [5]:

$$P = P(V, z) \quad (1.17)$$

$$Q = Q(V, z) \quad (1.18)$$

Η σχέση (1.17) ονομάζεται *χαρακτηριστική ενεργού φορτίου* και η (1.18) *χαρακτηριστική αέργου φορτίου*. Διαχωρίζονται έτσι από τις αντίστοιχες χαρακτηριστικές συστήματος που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (εξίσωση (1.13) και Σχ 1.5).

Μια από τις πιο δημοφιλείς χαρακτηριστικές φορτίου είναι αυτή της *εκθετικής μορφής* και εκφράζεται ως [1],[5]:

$$P = zP_o \left(\frac{V}{V_o}\right)^a \quad (1.19)$$

και

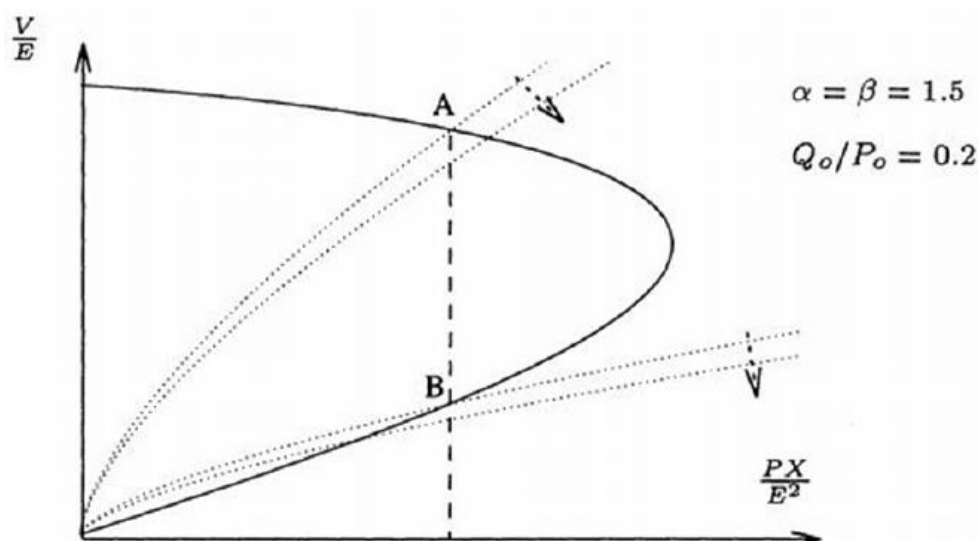
$$Q = zQ_o \left(\frac{V}{V_o}\right)^\beta \quad (1.20)$$

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

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

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η ευσταθής λειτουργία ενός συστήματος προϋποθέτει την ύπαρξη ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης. Η ισορροπία αυτή αντιπροσωπεύεται από την τομή των δύο χαρακτηριστικών καμπυλών του Σχ. 1.7. Η

μελέτη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας από πλευρά αστάθειας τάσης, πηγάζει, κυρίως, από την πιθανή διαταραχή αυτής της ισορροπίας.



Σχ. 1.6: Καμπύλες PV δικτύου και φορτίου

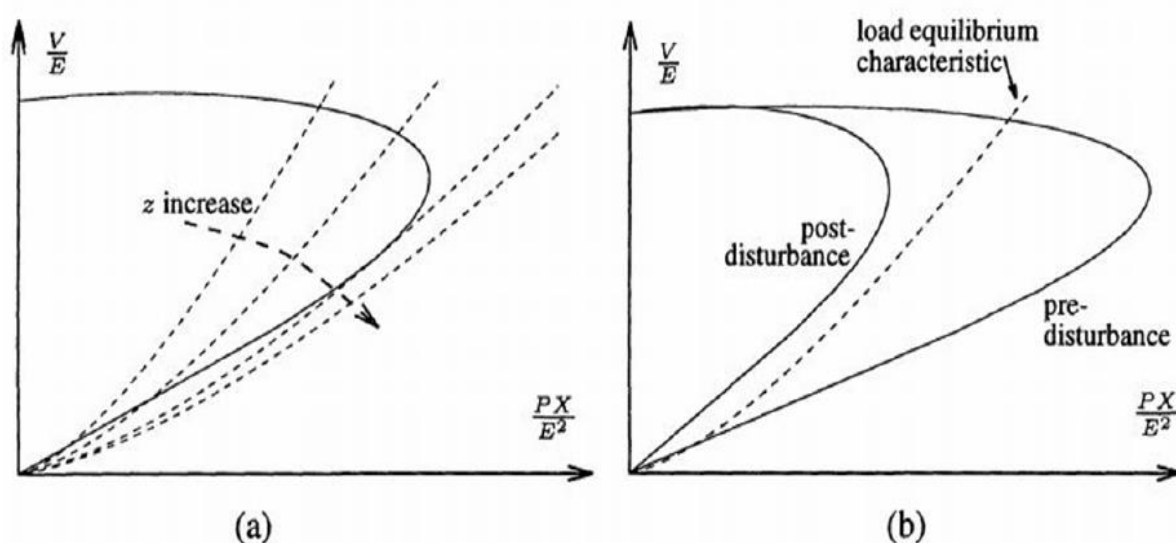
Η διαταραχή αυτή μπορεί να έχει πολλές μορφές. Στο Σχ. 1.7α απεικονίζεται η απώλεια της ισορροπίας του συστήματος μέσω της συνεχής αύξησης της ζήτησης z και, εν τέλει, της απώλειας της τομής των δύο χαρακτηριστικών.

Στο Σχ. 1.7β φαίνεται άλλο ένα πιθανό σενάριο αστάθειας. Εδώ εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος μετά από την εμφάνιση μιας μεγάλης διαταραχής με τη χαρακτηριστική του φορτίου να παραμένει σταθερή. Οι διαταραχές αυτές συμβολίζουν, συνήθως, απώλειες διατάξεων μεταφοράς ή/και παραγωγής. Στο ακτινικό δίκτυο του Σχ. 1.2, αυτό αντιστοιχεί σε αύξηση της τιμής αντίδρασης X ή/και σε μείωση της τάσης E . Σύμφωνα με το Σχ. 1.7β, η διαταραχή προκάλεσε συρρίκνωση της καμπύλης PV του συστήματος. Έτσι, η σταθερή, κατά τα άλλα, χαρακτηριστική του φορτίου δεν τέμνει πλέον την PV καμπύλη του συστήματος, δηλώνοντας ότι το σύστημα δεν βρίσκεται πλέον σε θέση να παρέχει την απαιτούμενη από τα φορτία ισχύ. Η κατάρρευση της τάσης προκαλείται από την αδυναμία απόκτησης σημείου λειτουργίας του συστήματος μετά τη διαταραχή.

Με τη βοήθεια του Σχ. 1.7α, ορίζεται και η έννοια του ορίου φόρτισης ενός συστήματος [5],[6]. Ως όριο φόρτισης θεωρείται το σημείο στο οποίο η χαρακτηριστική του φορτίου εφάπτεται στην καμπύλη PV του συστήματος. Η αύξηση του φορτίου πέρα από το όριο φόρτισης οδηγεί σε αποτυχία λειτουργίας του συστήματος. Ας σημειωθεί επίσης ότι, υπό φορτίο σταθερής ισχύος ($\alpha = \beta = 0$), το όριο φόρτισης του συστήματος συμπίπτει με τη μέγιστη μεταφερόμενη ισχύ.

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

συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούν σημαντική ένδειξη λειτουργικής ασφάλειας.



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

1.6 Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα

1.6.1 Περιγραφή

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

Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην βόρεια Ελλάδα το 2004 ήταν περίπου 10700 MW, με το 48% να βασίζεται σε καύση λιγνίτη, το 29% σε υδροηλεκτρική παραγωγή, το 14% σε καύση φυσικού αερίου, το 7% σε καύση πετρελαίου και το 2% σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην νότια Ελλάδα ήταν περίπου 2860 MW, με τη μεγαλύτερη συμμετοχή να λαμβάνουν τα εργοστάσια στο Λαύριο, τον Άγιο Γεώργιο, το Αλιβέρι και το εργοστάσιο της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο [12].



Σχ. 1.8: Μονογραμμικό Διάγραμμα Ελληνικού Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ

Στο Σχ. 1.8 απεικονίζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος. Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται κυρίως από γραμμές υπερυψηλής τάσης 400 kV (ΥΥΤ) και υψηλής τάσης 150 kV (ΥΤ). Το δίκτυο διανομής λειτουργεί στο επίπεδο μέσης τάσης 20 kV (ΜΤ). Οι υποσταθμοί διανομής (ΥΤ/ΜΤ) είναι εξοπλισμένοι με μετασχηματιστές 150/20 kV, με λειτουργία Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) για τον έλεγχο της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών έχουν σταθερές λήψεις και οι αυτομετασχηματιστές 400/150 kV έχουν ΣΑΤΥΦ χωρίς αυτόματη ρύθμιση που λειτουργούν με χειρισμό. Οι ανάγκες για αντιστάθμιση αέργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων. Συστοιχίες πυκνωτών συνολικής ισχύος 4150 MVA_r είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών, ενώ έχουν εγκατασταθεί και επιπρόσθετες συστοιχίες ΥΤ, συνολικής ισχύος 450 MVA_r σε σταθμούς παραγωγής. Επίσης έχουν εγκατασταθεί πηνία ΥΤ σε υποσταθμούς για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου. Τα φορτία του συστήματος βρίσκονται κατά κανόνα συγκεντρωμένα στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών διανομής, ενώ υπάρχουν και βιομηχανικά φορτία συνδεδεμένα απευθείας στην ΥΤ [13].

Από τον Οκτώβριο του 2004, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ηπειρωτικό Ευρωπαϊκό Σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών γραμμών μεταφοράς με τις γειτονικές χώρες. Πιο συγκεκριμένα, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα συνδέεται με τη ΠΓΔΜ μέσω δύο γραμμών 400 kV από τη Θεσσαλονίκη και τη Μελίτη, στο Durbono και Bitola, αντίστοιχα. Στα βορειοανατολικά υπάρχει μια σύνδεση με την Αλβανία μέσω δύο γραμμών μεταφοράς, μια των 400 kV από την περιοχή της Καρδιάς στο Zemblak και μια των 150 kV από τον Υ/Σ Μούρτου στον ΥΗΣ Bistrica. Η σύνδεση με τη Βουλγαρία επιτυγχάνεται μέσω μιας γραμμής μεταφοράς 400 kV μεταξύ Θεσσαλονίκης και Blagoevgrad. Επιπλέον, το Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα μέσω υποβρύχιου καλωδίου συνεχούς ρεύματος 500 kV με την Ιταλία και από τις 18 Σεπτεμβρίου του 2010 συνδέεται και με το σύστημα της Τουρκίας, με γραμμή μεταφοράς 400 kV διπλού κυκλώματος [13].

Η μεγάλη γεωγραφική απόσταση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα ασφάλειας του Συστήματος. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών με την αύξηση του φορτίου, λόγω κλιματιστικών και άλλων παρόμοιων συσκευών. Η οικονομική ύφεση του 2010 μετρίασε το παραπάνω πρόβλημα και η αιχμή του φορτίου παρουσίασε μια σχετική μείωση, η οποία αναμένεται να αυξηθεί και πάλι μελλοντικά [12]. Επιπλέον προσπάθειες για την επίλυση του προβλήματος έχουν γίνει από τη μεριά του ΑΔΜΗΕ μέχρι σήμερα, κυρίως με τη μορφή ένταξης νέων μονάδων παραγωγής στο Νότιο σύστημα, της ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης και της διεσπαρμένης παραγωγής [13]. Παρόλα αυτά, καθυστέρηση σημαντικών έργων, όπως η αντικατάσταση των γραμμών μεταφοράς της Πελοποννήσου σε επίπεδα τάσης 400 kV, δεν διευκολύνουν την κατάσταση. Επομένως, κατά καιρούς, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα ήρθε αντιμέτωπο με αρκετές κρίσιμες καταστάσεις λειτουργίας, με τη σημαντικότερη να είναι η διακοπή (black-out) του Ιουλίου 2004 [14], ένα μήνα πριν από την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας.

1.6.2 Εφαρμογή Online Voltage Security Assessment (VSA)

Στα σύγχρονα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας η εμφάνιση φαινομένων αστάθειας τάσης έχει αναδειχθεί σε σημαντικό κίνδυνο για την πρόκληση τοπικών ή εκτεταμένων διακοπών στην τροφοδοσία των καταναλωτών. Με στόχο την πρόβλεψη και την εκτίμηση κινδύνων για την ασφάλεια τάσης του Ελληνικού διασυνδεδεμένου

συστήματος, έχει εγκατασταθεί στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας του ΑΔΜΗΕ μια εφαρμογή Εκτίμησης Ασφάλειας Τάσεως (Voltage Security Assessment – VSA) σε πραγματικό χρόνο [20]. Σκοπός της εφαρμογής VSA είναι η εκτίμηση της επίδρασης ενδεχόμενων διαταραχών στο Σύστημα και ο προσδιορισμός των ορίων ασφαλείας με όρους ποσοτήτων μεταφοράς και κατανάλωσης ισχύος. Η εφαρμογή στηρίζεται στη μέθοδο της Οιονεί Στατικής Προσέγγισης που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την ταχεία χρονική προσομοίωση ενός ΣΗΕ και είναι κατάλληλη για την ανάλυση φαινομένων αστάθειας τάσης που εξελίσσονται στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα. Η εφαρμογή αυτή αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο της Λιέγης και το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος OMASES [21]. Το εργαλείο αυτό εγκαταστάθηκε στο Εθνικό Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας το 2003 και βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία από τον Ιανουάριο του 2005 [20].

Οι κυριότερες λειτουργίες της εφαρμογής online VSA είναι [21]:

1. *Φιλτράρισμα των διαταραχών.* Η οιονεί στατική προσέγγιση προσφέρει ταχύτητα υπολογισμών, αλλά σε περίπτωση μεγάλου αριθμού διαταραχών, η προσομοίωση τους μπορεί να απαιτεί σημαντικό χρόνο. Επομένως στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόζεται μια απλούστερη διαδικασία επιλογής των διαταραχών που είναι πιθανόν επιβλαβείς. Η αναγνώριση γίνεται με τη μέθοδο της ροής φορτίου και τον προσδιορισμό των χαμηλών τάσεων μετά τη διαταραχή. Για το Ελληνικό Σύστημα δεν χρειάστηκε να γίνει επιλογή ή φιλτράρισμα των $N-1$ διαταραχών.
2. *Προσδιορισμός Ορίων Ασφαλούς Λειτουργίας.* Για μια προκαθορισμένη κατεύθυνση καταπόνησης στο σύστημα (π.χ. αύξηση φορτίων και παραγωγής), το όριο ασφαλούς λειτουργίας αναφέρεται στο σημείο λειτουργίας του συστήματος που αντιπροσωπεύει την μεγαλύτερη καταπόνηση και είναι ικανό να αντέξει οποιαδήποτε διαταραχή από το σύνολο που εξετάζεται. Κατά τον προσδιορισμό των ορίων ασφαλούς λειτουργίας, οι καταστάσεις καταπόνησης λαμβάνονται από υπολογισμό ροής ισχύος πριν τη διαταραχή και η επίδραση της κάθε διαταραχής αναλύεται μέσω της οιονεί στατικής προσέγγισης. Η καταπόνηση πριν τη διαταραχή υποθέτει πλήρη επαναφορά φορτίου, ενώ η διαδικασία προσδιορισμού των ορίων ασφαλούς λειτουργίας πραγματοποιείται με δυαδική αναζήτηση (binary search), σε περίπτωση μίας διαταραχής ή με ταυτόχρονη δυαδική αναζήτηση (simultaneous binary search) σε περίπτωση συνόλου διαταραχών. Μια πιο λεπτομερής περιγραφή των τεχνικών αυτών υπάρχει στο [21].
3. *Υπολογισμός Ορίων Φόρτισης.* Το όριο φόρτισης ενός συστήματος δείχνει την ποσότητα καταπόνησης που μπορεί να αντέξει ένα σύστημα πριν καταρρεύσει. Παρά την ύπαρξη θεωρητικών μεθόδων, το on-line VSA υπολογίζει τα όρια φόρτισης μέσω προσομοίωσης, με την επιβολή καταπόνησης στο σύστημα, αυξάνοντας σε μορφή ράμπας το φορτίο και την παραγωγή και παρακολουθώντας τη χρονική απόκριση του συστήματος. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται σε μορφή καμπυλών PV, των οποίων η χρησιμότητα αναλύθηκε στην Ενότητα 1.4. Υπολογίζονται δύο είδη ορίων φόρτισης: α) όρια φόρτισης πριν τη διαταραχή, που χρησιμοποιούνται ως αναφορά για τον χειριστή του συστήματος σε συνθήκες απουσίας διαταραχής, β) όρια φόρτισης μετά τη διαταραχή, τα οποία υπολογίζονται για τις επικίνδυνες μόνο διαταραχές, δηλαδή εκείνες με τα χαμηλότερα περιθώρια ασφαλείας.

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

πραγματοποιείται από το δεύτερο λογισμικό πακέτο WPSTAB που αναπτύχθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

1.7 Χρήση Διεσπαρμένων Άεργων Πόρων για την Ενίσχυση Δικτύου Μεταφοράς

Η χρήση πόρων που συνδέονται στο σύστημα διανομής για την άεργη υποστήριξη του δικτύου μεταφοράς αποτελεί ένα νέο ενδιαφέρον θέμα στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ευρέως γνωστό ότι ένας ραγδαία αυξανόμενος αριθμός μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής συνδέεται σε γραμμές διανομής μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος. Επίσης, στα συστήματα διανομής συνδέονται στατοί αντισταθμιστές, ενδεχομένως μετασχηματιστές στερεάς κατάστασης, ηλεκτρονικά ελεγχόμενα φορτία, κλπ. Όλες αυτές οι συσκευές χρησιμοποιούν υπό φυσιολογικές συνθήκες τα αποθέματα αέργου ισχύος τους για να διατηρήσουν τον συντελεστή ισχύος εντός επιθυμητών ορίων (κοντά στη μονάδα), προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες, είτε σε άλλες περιπτώσεις για να ελέγχουν τις τοπικές τάσεις του δικτύου. Αυτό ωστόσο αφήνει ένα μεγάλο περιθώριο ανεκμετάλλευτης άεργης υποστήριξης που θα μπορούσε να είναι μεγάλου ενδιαφέροντος για το δίκτυο μεταφοράς, ειδικά στην περίπτωση αστάθειας τάσης ή ανεπαρκούς περιθωρίου μεταφερόμενης ισχύος.

Το πρόβλημα που εξετάζεται στην εργασία είναι ότι τα υπάρχοντα αποθέματα άεργης ισχύος δεν μπορούν να υλοποιηθούν σε αποδοτικό βαθμό, εάν πρώτα δεν επιλυθούν διάφορα τεχνικά προβλήματα. Μια καταρχήν απαρίθμηση των εν λόγω προκλήσεων είναι η ακόλουθη:

1. Οι διεσπαρμένες πηγές άεργης υποστήριξης πρέπει να εξοπλιστούν με δυνατότητες αυτομάτου ελέγχου. Αυτό δεν αποτελεί μεγάλο πρόβλημα, αφού οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος έχουν εγγενώς ενσωματωμένες δυνατότητες ελέγχου.
2. Οι επενδυτές πρέπει να έχουν κατάλληλα κίνητρα για την παροχή άεργης υποστήριξης, για να ενεργοποιούν τις συσκευές τους και να εκτελούν τους απαιτούμενους ελέγχους.
3. Καθώς αρκετές πηγές μπορεί να μοιράζονται την ίδια διασυνδετική γραμμή, είναι σημαντικό να συντονιστούν μεταξύ τους. Για παράδειγμα, εάν μία συσκευή εγχέει άεργο ισχύ και μία άλλη ρυθμίζει την τάση, τότε η δεύτερη θα ακυρώσει την δράση της πρώτης με την απορρόφηση της επιπρόθετης άεργης ισχύος για την ρύθμιση της τάσης.
4. Το ίδιο ισχύει και για τους υπάρχοντες μηχανισμούς ελέγχου των γραμμών διανομής, όπως τα αυτόματα Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) στους μετασχηματιστές, οι Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Συστοιχιών Πυκνωτών, κλπ. Ο αυτόματος έλεγχος αυτών των μηχανισμών και διατάξεων πρέπει να ληφθεί υπόψη και ενδεχομένως να μεταβληθεί καταλλήλως ώστε να λειτουργούν συντονισμένα με την παροχή άεργης υποστήριξης στο δίκτυο μεταφοράς.
5. Σε όλες τις περιπτώσεις πρόβλημα είναι η ηλεκτρική και φυσική απόσταση μεταξύ αντικειμένου ελέγχου (τάση δικτύου μεταφοράς) και μέσων ελέγχου (εφεδρικοί πόροι στο σύστημα διανομής). Η φυσική απόσταση δημιουργεί δηλαδή ταυτόχρονα προβλήματα επικοινωνίας αλλά και αποδοτικότητας στη χρήση των πόρων.
6. Η παρουσία φορτίων που μεταβάλλονται με την τάση πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη σε ενδεχόμενες περιπτώσεις ευστάθειας τάσης.

Σχετικά με τις ανωτέρω προκλήσεις, γίνονται οι ακόλουθες αρχικές παρατηρήσεις-παραδοχές:

1. Οι περισσότεροι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος έχουν εγγενώς ενσωματωμένες δυνατότητες ελέγχου. Σε κάθε περίπτωση, το πλήρες κόστος αυτομάτου ελέγχου μπορεί να θεωρηθεί μικρό ή ακόμη και αμελητέο. Όσον αφορά τη διαθέσιμη άεργο ισχύ, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος πρέπει ούτως ή άλλως να είναι τουλάχιστον ίση με την ενεργό ονομαστική ισχύ της αντίστοιχης διεσπαρμένης πηγής παραγωγής. Έτσι, η άεργος υποστήριξη είναι ευκολότερη σε περιπτώσεις μειωμένης ενεργού παραγωγής. Στην περίπτωση διεσπαρμένης παραγωγής, όταν η παραγόμενη ενεργός ισχύς είναι μεγάλη (οπότε το περιθώριο άεργου υποστήριξης είναι μικρό) απαιτείται μικρότερη μεταφορά ενέργειας προς το φορτίο. Αντίθετα, όταν η παραγόμενη ενεργός ισχύς είναι χαμηλή, η μεταφερόμενη ισχύς αυξάνει και η άεργη υποστήριξη (που είναι πλέον διαθέσιμη από τις διεσπαρμένες πηγές) είναι περισσότερο χρήσιμη.
2. Ο διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς μπορεί να παρέχει οικονομική αποζημίωση στους παρόχους άεργης υποστήριξης στο δίκτυο διανομής με βάση την προστιθέμενη αξία στο σύστημα μεταφοράς. Στην εργασία αυτή θα γίνει προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί η άεργος υποστήριξη ως επιπλέον MW ικανότητας μεταφοράς, κάτι που μπορεί να εκφραστεί με οικονομικά μεγέθη σε μεταγενέστερο στάδιο.
3. Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι υπάρχει μία μόνο ελεγχόμενη άεργη έγχυση ισχύος σε μία διασυνδετική γραμμή (ή ισοδύναμα ότι όλες οι άεργες συσκευές ελέγχου συνεργάζονται καταλλήλως, έτσι ώστε να αποκρίνονται από κοινού). Επίσης, αμελούνται τα φορτία της γραμμής που σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να έχουν καθοριστική συμβολή.
4. Το ΣΑΤΥΦ του μετασχηματιστή ελέγχει το δευτερεύον του μετασχηματιστή διανομής (MT). Ο έλεγχος αυτός δεν επιδρά δυσμενώς στην προαναφερθείσα άεργη υποστήριξη που παρέχεται στο δίκτυο μεταφοράς, αλλά πρέπει να ληφθεί υπόψη για τον κατάλληλο συντονισμό των δράσεων ελέγχου.
5. Οι αυτόματοι μηχανισμοί ζεύξης-απόζευξης συστοιχιών πυκνωτών θεωρούνται στην παρούσα εργασία ότι ελέγχουν την άεργη ισχύ της γραμμής MT [4], και ως εκ τούτου είναι έμμεσα συντονισμένα με την άεργη υποστήριξη.
6. Η ηλεκτρική απόσταση μεταξύ άεργης πηγής υποστήριξης και συστήματος μεταφοράς λαμβάνεται υπόψη με την ακριβή παράσταση της ηλεκτρικής γραμμής MT και του μετασχηματιστή. Ένας έξυπνος τρόπος για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των τηλεπικοινωνιών, αποφεύγοντας την ανάγκη για τηλεμετρία και γενικά τα πολύπλοκα δίκτυα επικοινωνίας, θα συζητηθεί σε ξεχωριστή ενότητα, καθώς αυτή αποτελεί μια σημαντική συμβολή της εργασίας.

1.8 Σκοπός και Δομή της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης που μπορεί να ασκήσει η Διεσπαρμένη Παραγωγή Αιολικών Πάρκων στο όριο φόρτισης ενός συστήματος μεταφοράς. Με άλλα λόγια, εξετάζεται η ενδεχόμενη αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει, μέσω της άεργης υποστήριξης του συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες πηγές. Για την επίτευξη κάτι τέτοιου, απαραίτητη είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του συστήματος μέσω κατάλληλης προσομοίωσης. Η προσομοίωση έγινε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού MATLAB.

Το σύστημα που επελέγει περιλαμβάνει ένα σχετικά ασθενές δίκτυο μεταφοράς, στο μέσο του οποίου θεωρήθηκε η δυνατότητα σύνδεσης ενός Αιολικού Πάρκου μέσω γραμμής διανομής και υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσεως. Χρησιμοποιήθηκαν τα

υπάρχοντα δεδομένα για δύο Αιολικά Πάρκα της περιοχής της Πελοποννήσου, το πάρκο της Ελίκης και το πάρκο των Διδύμων, τα οποία συνδέονται εναλλακτικά με βάση τα πραγματικά χαρακτηριστικά της γραμμής σύνδεσης μέσης τάσης του καθενός, του υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσεως και της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Για τον προσδιορισμό της παραγόμενης ισχύος θεωρείται ένα στιγμιότυπο καλοκαιρινού φορτίου αιχμής, το οποίο συμπίπτει κατά κανόνα με περίοδο άπνοιας, για αυτό και η τιμή της παραγόμενης ενεργού ισχύος είναι μικρή για τα δύο Αιολικά Πάρκα.

Το δίκτυο σύνδεσης κάθε πάρκου περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ που ελέγχει την τάση της πλευράς μέσης τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης συνδεδεμένες στον αντίστοιχο ζυγό και μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ. Οι διατάξεις αυτές ρυθμίζουν την άεργο ισχύ που εγχέεται από το Αιολικό Πάρκο.

Αρχικά προσδιορίζεται η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς του συστήματος δοκιμής χωρίς καμία μορφή ελέγχου του ζυγού υψηλής τάσης, ώστε να καθοριστούν τα βασικά μεγέθη για σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου και να μπορέσει να τεκμηριωθεί η αύξηση που επιφέρει ο αυτόματος έλεγχος της υψηλής τάσης.

Εν συνεχεία, εξετάζεται η επιρροή που ασκεί ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης μέσω του ελέγχου της τάσεως του Αιολικού Πάρκου και παρατηρείται η αναμενόμενη αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος που επιφέρει αυτή η μορφή ελέγχου. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτεί συνεχή κανάλια επικοινωνίας μεγάλης ακρίβειας, ταχύτητας και αξιοπιστίας, και αυτό μπορεί να προβεί ένας πολύ περιοριστικός παράγοντας, καθιστώντας την εφαρμογή αυτού του σεναρίου πρακτικά ανέφικτη στις περισσότερες περιπτώσεις.

Για αυτό τον λόγο εξετάζεται στη συνέχεια ένα νέο πιθανό απλουστευμένο σενάριο επικοινωνίας και στρατηγικής ελέγχου της Υψηλής Τάσης, που απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από το Αιολικό Πάρκο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς. Η επίδραση που έχει στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς του συστήματος δοκιμής η προτεινόμενη ευφυής μορφή ελέγχου, δηλαδή η εντολή άεργης υποστήριξης συγκρίνεται με το συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης όσον αφορά τα περιθώρια ευστάθειας.

Τέλος, προστίθεται στον ζυγό σύνδεσης του φορτίου ένας μετασχηματιστής εξοπλισμένος με ΣΑΤΥΦ. Εξετάζεται πιο λεπτομερώς η ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς όπως μεταβάλλεται με τη συνεχή αύξηση του φορτίου. Η ευστάθεια συνδέεται με τη δυναμική του ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο συγκεκριμένο ζυγό φορτίου. Εξετάζεται η συμπεριφορά κάθε Αιολικού Πάρκου στη μεταβολή του φορτίου και αναλύεται η αστάθεια του συστήματος που εμφανίζεται όταν προκύπτει η μέγιστη μεταφερόμενη ισχύς.

Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 1 δίνονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία που αφορούν την οργάνωση και την δομή των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Συνοψίζονται οι μηχανισμοί αστάθειας τάσης που μπορεί να εμφανίζονται σε ένα ΣΗΕ και ορίζεται το πρόβλημα αστάθειας τάσης. Μάλιστα, για την κατανόηση των μηχανισμών αστάθειας στα ΣΗΕ, αναλύονται τα όρια Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος σε συνδυασμό με τις καμπύλες *PV* του δικτύου και των φορτίων, καθώς και οι χαρακτηριστικές τάσεις των τελευταίων. Στο τελευταίο μέρος του κεφαλαίου αναφέρεται το πρόβλημα που εμφανίζεται στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα και τέλος αναλύονται διάφορα προβλήματα της χρήση διεσπαρμένων έργων πόρων για την ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς, καθώς και οι αντίστοιχες λύσεις τους.

Στο Κεφάλαιο 2 ορίζεται η Διεσπαρμένη Παραγωγή και αναλύονται οι κυριότεροι Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος, όπως ανορθωτές, αντιστροφείς, μετατροπείς ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ και μετατροπείς πηγής τάσεως/ρεύματος. Παρουσιάζονται γενικές έννοιες της Αιολικής Ενέργειας και συνοψίζονται οι βασικοί τύποι ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που χρησιμοποιούνται, καθώς και ο τρόπος σύνδεσης των Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα Μεταφοράς. Τέλος, περιγράφεται ο έλεγχος που ασκούν οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος στην ρύθμιση της ενεργού και αέργου ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 3 συνοψίζεται η παράσταση ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας και αναλύονται οι διάφορες χρονικές κλίμακες. Περιγράφονται ορισμένες βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, όπως το Δίκτυο Μεταφοράς/Διανομής, οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος, οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ και η αυτόματη ζεύξη πυκνωτών. Επίσης αναλύονται οι διατάξεις ρύθμισης αέργου ισχύος και τέλος παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος της προσομοίωσης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η γενική δομή ενός τυπικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή. Παρουσιάζονται τα δύο Αιολικά Πάρκα που χρησιμοποιούνται στην προσομοίωση και δίνονται όλα τα δεδομένα του δικτύου σύνδεσης της προσομοίωσης. Έπειτα, γίνεται κατάστρωση και επίλυση των εξισώσεων του εξεταζόμενου συστήματος. Περιγράφονται οι ρυθμιστές, τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου και η γενικότερη στρατηγική ελέγχου που αποτελούν το μοντέλο που εξετάζεται. Τέλος, αναλύονται οι δύο μορφές ελέγχου που υλοποιούνται στην προσομοίωση, δηλαδή η συνεχής ρύθμιση της υψηλής τάσης και η εντολή άεργης υποστήριξης του δικτύου μεταφοράς που προτάθηκε ως μία ευφυή μορφή ελέγχου.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις του συστήματος που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Εξετάζεται η επίδραση που έχουν στη Μέγιστη Μεταφορά Ισχύος του συστήματος δοκιμής οι τρεις μορφές ελέγχου του ζυγού ΥΤ στον υποσταθμό σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αφού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος χωρίς έλεγχο του ζυγού υψηλής τάσης, το κεφάλαιο συνεχίζει εξετάζοντας τα σενάρια συνεχούς ρύθμισης της υψηλής τάσης και εντολής αέργου υποστήριξης. Τέλος, γίνεται σύγκριση των μεθόδων ελέγχου και συνοψίζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την επίδραση στο όριο μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος.

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς που συμβαίνει λόγω της συνεχούς αύξησης του φορτίου. Αρχικά, παρουσιάζεται η γενική δομή του εξεταζόμενου τυπικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή, με την ενσωμάτωση ενός μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ στο ζυγό του φορτίου. Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός της συνθήκης αστάθειας του ακτινικού συστήματος που είναι απαραίτητη για ανάλυση ευστάθειας. Ακολούθως, πραγματοποιούνται οι προσομοιώσεις του συστήματος που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου, με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Αφού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος του προσαρμοσμένου συστήματος, τέλος γίνεται ανάλυση της αστάθειας για τα δύο διαφορετικά Αιολικά Πάρκα που εξετάζονται.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις των Κεφαλαίων 5 και 6, και αναφέρονται οι προοπτικές, καθώς και η δυνατότητα επέκτασης της παρούσας εργασίας.

2

Διεσπαρμένη Παραγωγή και Μετατροπείς Ισχύος

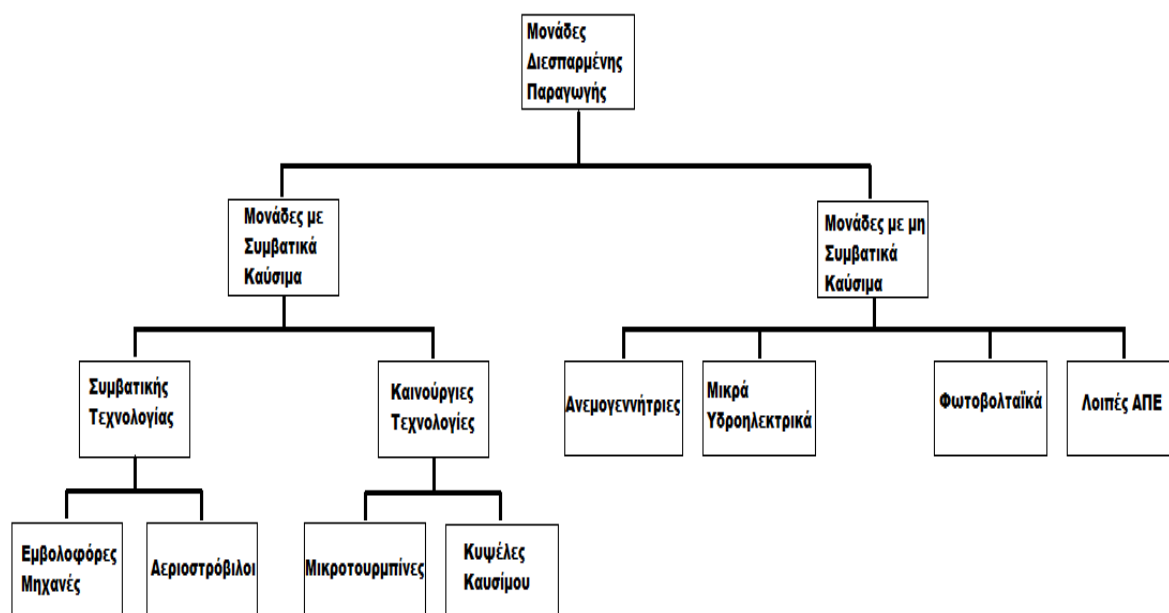
2.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Η διεσπαρμένη παραγωγή είναι μια έννοια για την οποία στη βιβλιογραφία συναντώνται διάφοροι ορισμοί οι οποίοι δεν συμφωνούν απόλυτα μεταξύ τους. Κάποιοι ορισμοί εστιάζουν στο επίπεδο της τάσης στην οποία γίνεται η σύνδεση ενώ άλλοι εστιάζουν στο ότι η διεσπαρμένη παραγωγή συνδέεται στο σύστημα διανομής, απευθείας στα σημεία που υπάρχουν φορτία. Στη παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τον ακόλουθο ορισμό [19]:

Ως διεσπαρμένη παραγωγή ορίζονται οι μονάδες παραγωγής με ονομαστική δυνατότητα παροχής ισχύος από 1kW έως 100 MW, που κατά κανόνα συνδέονται στο δίκτυο διανομής και δεν σχεδιάζονται ή ελέγχονται από το κέντρο ελέγχου ενέργειας.

Ο παραπάνω ορισμός αναφέρει ρητά ότι η διεσπαρμένη παραγωγή δεν υπόκειται στον έλεγχο του διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι η διεσπαρμένη παραγωγή αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή (ή μέση) κλίμακα σε διάφορα σημεία του δικτύου ή στο ακραίο τμήμα του δικτύου διανομής από τη πλευρά του καταναλωτή (ΧΤ).

Συχνά η Διεσπαρμένη Παραγωγή αναφέρεται σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή τεχνολογίας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Είναι όμως δυνατό για την υλοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε τεχνολογία παραγωγής. Οι ΑΠΕ αποτελούν γενικά συστήματα διεσπαρμένης παραγωγής, αν εξαιρεθούν τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια μεγάλης κλίμακας ή τα μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Εκτός όμως από τις ΑΠΕ, στη διεσπαρμένη παραγωγή εντάσσονται και άλλες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν συμβατικά καύσιμα. Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι κυριότερες τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής [3]:



Σχήμα 2.1 Τεχνολογίες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής

Οι κύριοι λόγοι για την ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής την τελευταία δεκαετία είναι [8]:

- Είναι ευέλικτες εφαρμογές, που μπορούν συνήθως να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του επί τόπου πληθυσμού, ελαχιστοποιώντας την ανάγκη για μεγάλες μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Ο εξοπλισμός είναι απλός στην κατασκευή και τη συντήρηση και έχει μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.
- Η πλειοψηφία αυτών είναι φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα.

Η διεσπαρμένη παραγωγή μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να συνεισφέρει στον έλεγχο της τάσης με την παροχή ή απορρόφηση αέργου ισχύος ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό χάρη στους μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις για τη σύνδεση των διεσπαρμένων παραγωγών με το δίκτυο. Η συνεισφορά της διεσπαρμένης παραγωγής στον έλεγχο της τάσης είναι μικρή στην περίπτωση που οι διεσπαρμένοι παραγωγοί συνδέονται σε ένα ισχυρό δίκτυο. Ωστόσο, σε περιπτώσεις που η σύνδεση γίνεται σε σημεία που το δίκτυο είναι αδύναμο, η διεσπαρμένη παραγωγή είναι σε θέση να συνεισφέρει σημαντικά στον έλεγχο της τάσης. Φυσικά η παραγωγή ή κατανάλωση αέργου ισχύος για τον έλεγχο της τάσης έχει επιπτώσεις στη παραγωγή ενεργού ισχύος από τους διεσπαρμένους παραγωγούς, οπότε κάποια οικονομικά οφέλη θα πρέπει να προβλεφθούν για τους παραγωγούς για την παροχή αυτής της επικουρικής υπηρεσίας.

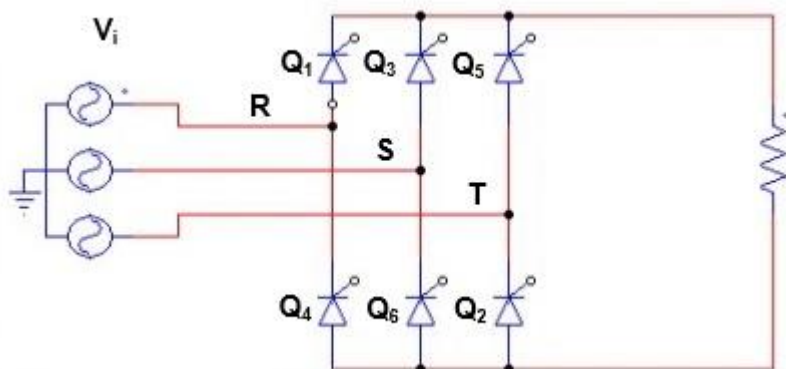
Στην επόμενη ενότητα αναφέρονται οι τεχνολογίες σύνδεσης των διεσπαρμένων πηγών με Ηλεκτρονικά Ισχύος και πιο συγκεκριμένα περιγράφονται οι μετατροπείς πηγής τάσης και πηγής ρεύματος, και ακολούθως με κύριο ενδιαφέρον στις Ανεμογεννήτριες και τα Αιολικά Πάρκα, που αποτελούν τη μορφή διεσπαρμένης παραγωγής που εξετάζεται στην εργασία.

2.2 Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος

2.2.1 Ανορθωτές

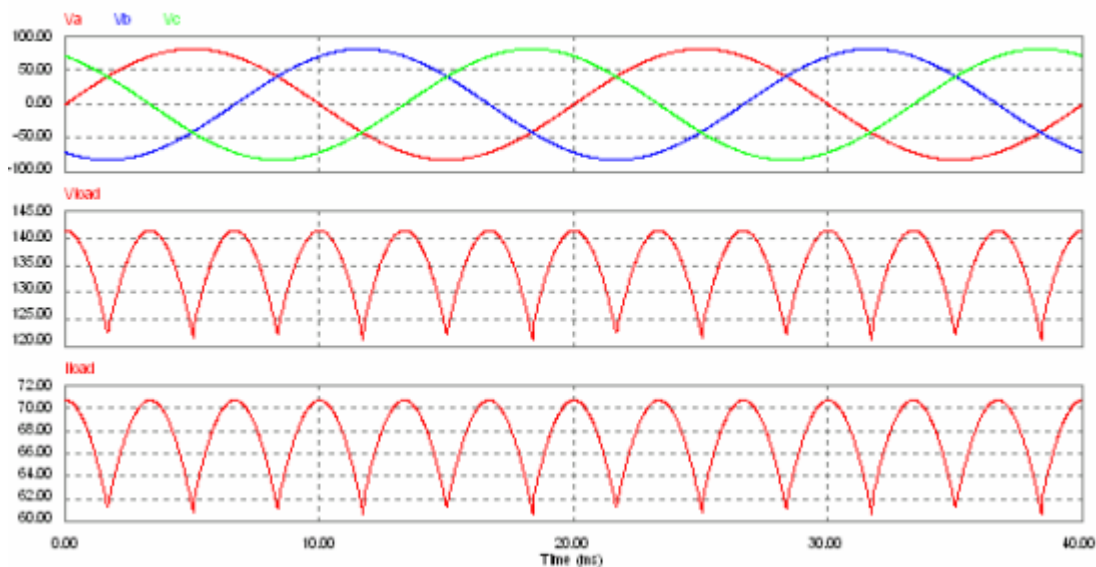
Οι ηλεκτρονικές αυτές διατάξεις μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση σε συνεχή. Στη κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται οι μη ελεγχόμενες ανορθώσεις, οι οποίες υλοποιούνται με διόδους, και οι ελεγχόμενες ανορθώσεις, οι οποίες υλοποιούνται με θυρίστορ [22], [23]. Στις ελεγχόμενες ανορθώσεις η τάση εξόδου της ανόρθωσης μπορεί να ελέγχεται σε αντίθεση με την αντίστοιχη μη ελεγχόμενη. Στην μη ελεγχόμενη ανόρθωση η τάση εξόδου μεταβάλλεται σύμφωνα με τις μεταβολές της τάσης τροφοδοσίας σε αντίθεση με την αντίστοιχη ελεγχόμενη, όπου η τάση εξόδου με τον κατάλληλο έλεγχο μπορεί να κρατείται σε σταθερή τιμή. Η ελεγχόμενη ανόρθωση λόγω του ότι χρησιμοποιεί ελεγχόμενα ημιαγωγικά στοιχεία (δηλαδή θυρίστορ) έχει τη δυνατότητα ελέγχου της τάσης εξόδου της.

Στο Σχ. 2.2 παρουσιάζεται η τριφασική ελεγχόμενη ανόρθωση με θυρίστορ (Σχ. 2.2α), καθώς και οι βασικότερες κυματομορφές της (Σχ. 2.2β). Κατά τη λειτουργία της ανόρθωσης αυτής πάντοτε άγει ένα θυρίστορ από την πάνω ομάδα και ένα από την κάτω ομάδα και με αυτό τον τρόπο τα θυρίστορ ως διακόπτες εφαρμόζουν μια ακολουθία πολικών τάσεων του δικτύου στο φορτίο. Η ακολουθία αγωγής των θυρίστορ για ένα κύκλο λειτουργίας (δηλαδή για μία περίοδο τάσης τροφοδοσίας) είναι $Q_1 Q_2 - Q_2 Q_3 - Q_3 Q_4 - Q_4 Q_5 - Q_5 Q_6 - Q_6 Q_2$ και ο κύκλος επαναλαμβάνεται. Για παράδειγμα, όταν άγει το ζευγάρι των θυρίστορ $Q_1 Q_2$ τότε αυτά συνδέουν την πολική τάση τροφοδοσίας V_{RT} στα άκρα του φορτίου. Επίσης, όταν άγει το ζευγάρι $Q_2 Q_3$ τότε αυτά συνδέουν την τάση τροφοδοσίας V_{ST} στα άκρα του φορτίου. Επομένως, τα έξι ζευγάρια των θυρίστορ δημιουργούν στα άκρα του φορτίου έξι παλμούς πολικών τάσεων, όπως φαίνεται και στις κυματομορφές του Σχ. 2.2(β).



Σχήμα 2.2 Τριφασική Ελεγχόμενη Ανόρθωση
α) Ηλεκτρονική Διάταξη Ισχύος

Το κύκλωμα της ανόρθωσης αυτής αποτελεί μια από τις καλύτερες επιλογές στη μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Αυτό οφείλεται στις δυνατότητες παροχής υψηλής ισχύος εξόδου και της μικρής κυμάτωσης της τάσης εξόδου. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της ανόρθωσης αυτής είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετασχηματιστής εισόδου χωρίς να υπάρχει το πρόβλημα του μαγνητικού κορεσμού. Για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου η τάση εξόδου αποτελείται από έξι παλμούς. Για το λόγο αυτό η ανόρθωση αυτή ονομάζεται πολλές φορές ανόρθωση έξι παλμών ή 6-παλμική ανορθωτική διάταξη.



Σχήμα 2.2 Τριφασική Ελεγχόμενη Ανόρθωση
β) Βασικότερες Κυματομορφές

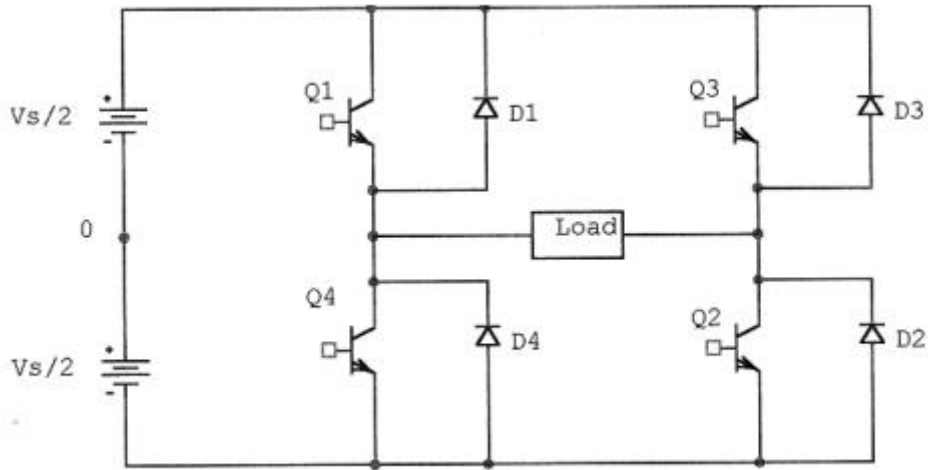
2.2.2 Αντιστροφείς

Οι ηλεκτρονικές αυτές διατάξεις μετατρέπουν μία συνεχή τάση σε μονοφασική ή τριφασική εναλλασσόμενη μεταβλητής ενεργού τιμής και μεταβλητής συχνότητας [22], [23].

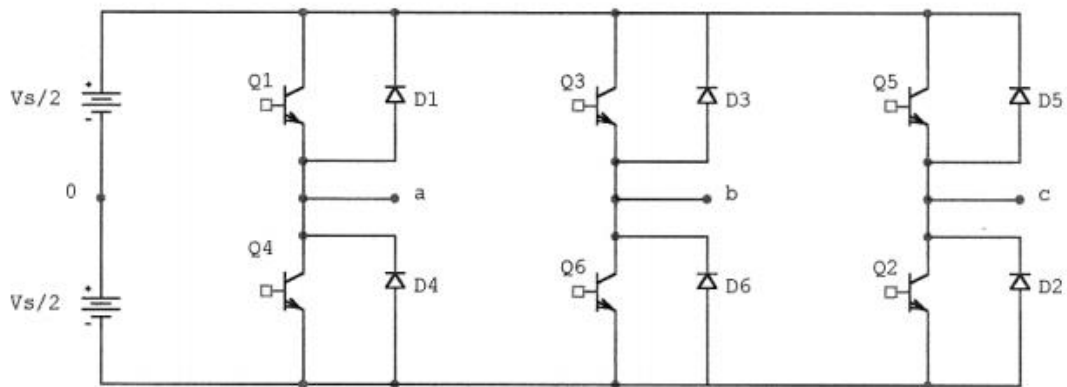
Η τάση εξόδου μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή με σταθερή ή μεταβλητή συχνότητα. Μεταβλητή τάση μπορεί να παραχθεί, μεταβάλλοντας τη συνεχή τάση εισόδου και κρατώντας το κέρδος σταθερό. Αν η τάση εισόδου είναι σταθερή, η τάση εξόδου μπορεί να παραχθεί με τεχνικές διαμόρφωσης εύρους παλμών (Pulse Width Modulation-PWM). Η είσοδος του αντιστροφέα μπορεί να είναι μια πηγή τάσης και τότε λέγεται αντιστροφέας τροφοδοτούμενος από πηγή τάσης (Voltage Fed Inverter), ή μια πηγή ρεύματος και ονομάζεται αντιστροφέας τροφοδοτούμενος από πηγή ρεύματος (Current Fed Inverter).

Στα Σχ. 2.3 και 2.4 παρουσιάζονται τα ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος των πλέον διαδεδομένων αντιστροφένων. Όπως φαίνεται, η τάση εισόδου του αντιστροφέα είναι συνεχούς ρεύματος και μπορεί να προέρχεται από ένα συσσωρευτή, από την έξοδο μιας ανορθωτικής διάταξης ή από κάποια άλλη πηγή συνεχούς ρεύματος. Η τάση εξόδου του αντιστροφέα γίνεται εναλλασσόμενη μέσω των ημιαγωγικών διακοπών Q. Αυτοί οι ημιαγωγικοί διακόπτες ισχύος ανοιγοκλείνουν έτσι ώστε να παράγεται εναλλασσόμενη τάση στην έξοδό τους και κατά συνέπεια στα άκρα του φορτίου.

Οι ημιαγωγικοί διακόπτες Q μπορεί να είναι τρανζίστορ ισχύος, MOSFET ισχύος, IGBT, GTO, MCT θυρίστορ ή κάποιο άλλο διακοπτικό στοιχείο ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ φορτίου. Σημειώνεται ότι λειτουργούν ως διακόπτες που μπορεί να βρίσκονται είτε στην κατάσταση αγωγής είτε στην κατάσταση αποκοπής. Οι δίοδοι στα άκρα των διακοπών Q χρειάζονται για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από το φορτίο προς την είσοδο, οπότε ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ανόρθωση μέσω των διόδων. Ο αντιστροφέας έχει αμφίπλευρη δυνατότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή μπορεί να λειτουργεί και ως ανορθωτής) [22], [23].



Σχήμα 2.3 Ηλεκτρονικό Κύκλωμα Ισχύος Μονοφασικού Αντιστροφέα



Σχήμα 2.4 Ηλεκτρονικό Κύκλωμα Ισχύος Τριφασικού Αντιστροφέα

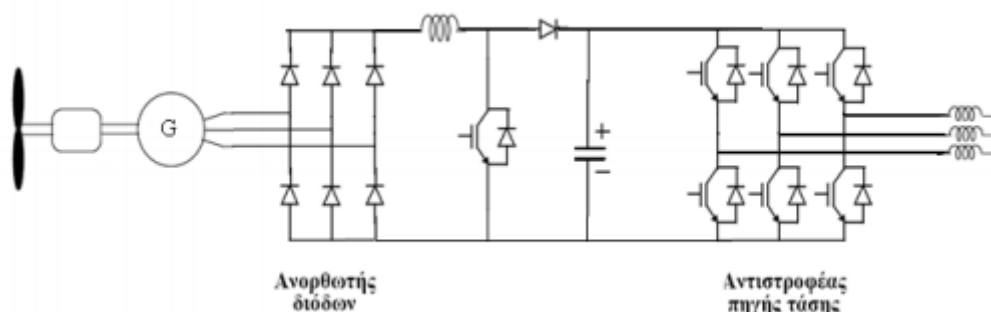
Για επεξήγηση της λειτουργίας του αντιστροφέα χρησιμοποιείται ως παράδειγμα ο μονοφασικός αντιστροφέας του Σχ. 2.3. Αρχικά, δίνοντας θετικούς παλμούς οδήγησης ή έναυσης στις πύλες των MOSFET Q_1, Q_4 , αυτά μεταβαίνουν στην κατάσταση αγωγής με αποτέλεσμα να συνδέσουν την τάση εισόδου συνεχούς ρεύματος στα άκρα του φορτίου, με αποτέλεσμα να δημιουργείται στα άκρα του φορτίου ένας θετικός παλμός τάσης V_s και εύρους ίσου με τη χρονική διάρκεια αγωγής των Q_1, Q_4 . Κατά τη φάση αυτή δεν άγουν οι διακόπτες Q_2, Q_3 . Στη συνέχεια αφαιρούνται οι παλμοί οδήγησης από τους Q_1, Q_4 και εφαρμόζονται θετικοί παλμοί οδήγησης ίδιας χρονικής διάρκειας στους διακόπτες Q_2, Q_3 που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργήσει στα άκρα του φορτίου έναν αρνητικό παλμό τάσης V_s και εύρους όσο είναι το εύρος του θετικού παλμού. Όταν επιθυμείται η τάση στα άκρα του φορτίου να έχει μηδενική τιμή, τότε για αυτή τη χρονική διάρκεια πρέπει να άγει είτε το ζευγάρι Q_1Q_2 είτε το ζευγάρι Q_3Q_4 . Αυξομειώνοντας το εύρος του θετικού και αρνητικού παλμού συμμετρικά ταυτόχρονα, υπάρχει δυνατότητα αυξομείωσης της ενεργού τιμής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Επίσης, αυξομειώνοντας την περίοδο λειτουργίας του αντιστροφέα υπάρχει δυνατότητα αυξομείωσης της συχνότητας της τάσης εξόδου. Επομένως, μέσω των παλμών οδήγησης των ημιαγωγικών διακοπών που προέρχονται από το κύκλωμα ελέγχου, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής εναλλασσόμενης τάσης μεταβλητής ενεργού τιμής και συχνότητας. [22], [23]

Συνοψίζοντας, ο αντιστροφέας είναι μια ηλεκτρονική γεννήτρια ισχύος η οποία δέχεται στην είσοδό της τάση συνεχούς ρεύματος και παράγει στην έξοδό της τάση εναλλασσόμενου ρεύματος μεταβλητής ενεργού τιμής και συχνότητας.

2.2.3 Μετατροπείς EP/ΣΡ/EP

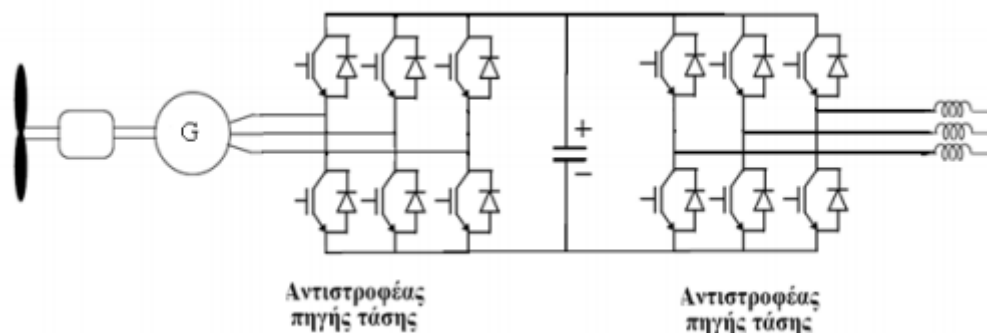
Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετατροπέων εναλλασσομένου ρεύματος/συνεχούς ρεύματος/εναλλασσομένου ρεύματος (EP/ΣΡ/EP), αποτελούμενοι συνήθως από έναν ανορθωτή EP/ΣΡ, ένα μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ κι έναν αντιστροφέα ΣΡ/EP. Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται δύο πολύ συνηθισμένοι τύποι μετατροπέων EP/ΣΡ/EP που χρησιμοποιούνται στη σύνδεση ανεμογεννητριών στο δίκτυο.

Στο Σχ. 2.5 απεικονίζεται μια σύγχρονη γεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω μιας τριφασικής ανόρθωσης, ενός μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ κι ενός αντιστροφέα. Ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ προβαίνει στον έλεγχο στροφών της ανεμογεννήτριας, ώστε να επιτυγχάνεται στην έξοδο η μέγιστη δυνατή ηλεκτρική ισχύς (Maximum Power Point Tracking). Η συνεχής τάση της γεννήτριας ανορθώνεται μέσω του τριφασικού ανορθωτή διόδων και ύστερα ο μετατροπέας ΣΡ/ΣΡ ελέγχει το ρεύμα οδηγώντας την Α/Γ στην καμπύλη βέλτιστης αεροδυναμικής ισχύος. [24]



Σχήμα 2.5 Μετατροπέας EP/ΣΡ/EP με απλή ανόρθωση, μετατροπέα ΣΡ/ΣΡ ανύψωσης τάσης και αντιστροφέα τύπου πηγής τάσης

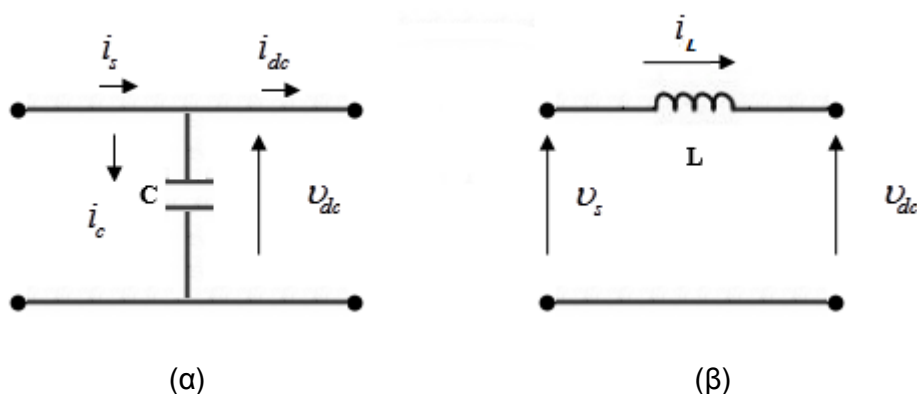
Μια εξίσου συχνά χρησιμοποιούμενη τοπολογία είναι αυτή της σύνδεσης δύο όμοιων μετατροπέων τύπου πηγής τάσης (Voltage Source Inverter-VSI), όπως εξηγείται και στην επόμενη υποενοότητα, γνωστή ως μετατροπέας back-to-back (Σχ. 2.6). Ο μετατροπέας από την πλευρά της γεννήτριας λειτουργεί ως ανορθωτής, ενώ 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. Η τοπολογία του Σχ. 2.6 αποτελεί τον τύπο Μετατροπέα EP/ΣΡ/EP που χρησιμοποιείται στην εργασία. [24]



Σχήμα 2.6 Μετατροπέας EP/ΣΡ/EP με σύνδεση back-to-back αντιστροφέων

2.2.4 Μετατροπείς Πηγής Τάσης και Πηγής Ρεύματος

Υπάρχουν δύο βασικά είδη τριφασικών μετατροπέων: οι μετατροπείς πηγής τάσης (voltage source converters, VSC) και οι μετατροπείς πηγής ρεύματος (current source converters, CSC). Το πρώτο είδος μετατροπέα υλοποιείται με διατάξεις αποτελούμενες από διακοπτικά στοιχεία (GTOs, IGBTs), ενώ το δεύτερο είδος υλοποιείται με διατάξεις βασισμένες σε θυρίστορ. Οι μετατροπείς EP/ΣP/EP, που απαρτίζονται από έναν ανορθωτή EP/ΣP και ένα αντιστροφέα EP/ΣP, διαχωρίζονται ανάλογα με τον τύπο της πλευράς συνεχούς ρεύματος σε μετατροπείς τύπου πηγής τάσης και σε μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος. Η συνδεσμολογία της πλευράς συνεχούς ρεύματος μπορεί να αποτελείται από πυκνωτή ή μπαταρία (σταθερή τάση, μετατροπέας πηγής τάσης, Σχ.2.7α) ή από αυτεπαγωγή (σταθερό ρεύμα, μετατροπέας πηγής ρεύματος, Σχ.2.7β). Στην εργασία αυτή οι μετατροπείς αυτοί προορίζονται για τη σύνδεση διεσπαρμένης παραγωγής στο δίκτυο [16].



Σχήμα 2.7 Πλευρά ΣP

(α) Μετατροπείς τύπου πηγής τάσης
(β) Μετατροπείς τύπου πηγής ρεύματος

Οι μετατροπείς πηγής ρεύματος λειτουργούν με σταθερή τιμή συνεχούς ρεύματος, ενώ η διεύθυνση και η ποσότητα της ενεργού ισχύος που μεταφέρεται καθορίζεται αντίστοιχα από το πρόσημο και το μέτρο της συνεχούς τάσης. Με λίγα λόγια, ο μετατροπέας φαίνεται από την πλευρά του δικτύου συνεχούς ρεύματος ως μια σταθερή πηγή ρεύματος που αλλάζει το πρόσημο και το μέτρο της τάσης στα άκρα της ανάλογα με την ισχύ που καλείται να μεταφέρει ο μετατροπέας. Συνεπώς, απαιτεί την χρήση πηνίου ως μέσου για την διατήρηση του ρεύματος σταθερού και φίλτρα συνεχούς ρεύματος για την εξομάλυνση της κυμάτωσης. Λόγω αυτού του πηνίου, υπάρχει έμφυτη η δυνατότητα περιορισμού των ρευμάτων σφάλματος. Επίσης, η πολικότητα του συνεχούς ρεύματος είναι σταθερή, ενώ οι αλλαγές στη ροή ισχύος πραγματοποιούνται μέσω της αντιστροφής της συνεχούς τάσης.

Τέλος, η αναγκαιότητα παροχής αέργου ισχύος για τη λειτουργία αυτών των μετατροπέων είναι αυτή που τους περιορίζει από τη φύση τους σε λειτουργία μόνο 2 τεταρτημορίων. Με άλλα λόγια, μόνο η ροή της ενεργού μπορεί να ελεγχθεί. Αυτό αποτελεί μια ειδοποιό διαφορά ανάμεσα στις δυο τεχνολογίες, όπως περιγράφεται και ακολούθως.[16]

Οι μετατροπείς πηγής τάσης λειτουργούν με σταθερή τάση και μεταβλητό ρεύμα στην πλευρά εναλλασσομένου ρεύματος (AC) και είναι ουσιαστικά ελεγχόμενες πηγές σταθερής τάσης. Ο μετατροπέας VSC μπορεί να λειτουργεί με χωρητικό ή επαγωγικό συντελεστή ισχύος, δηλαδή να παράγει ή να απορροφά άεργο ισχύ ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου εναλλασσομένου ρεύματος. Επίσης μπορεί να παράγει ή να απορροφά ενεργό ισχύ λειτουργώντας αντίστοιχα ως πηγή ή φορτίο. Έτσι, ο μετατροπέας μπορεί να λειτουργεί και στα τέσσερα τεταρτημόρια, αφού οι 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.

Από τη πλευρά συνεχούς ρεύματος (DC) για τη διατήρηση της τάσης σε σταθερό επίπεδο, γίνεται χρήση μιας χωρητικότητας, η οποία αποθηκεύει 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 [16].

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, στην παρούσα εργασία οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος (EP/ΣΡ/EP) 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 (π.χ. ρύθμιση απομακρυσμένης τάσης). Η ρύθμιση αυτή θεωρείται πως γίνεται ακαριαία, χωρίς δηλαδή να προχωρήσει ο χρόνος σε περίπτωση προσομοίωσης.

2.3 Αιολική Παραγωγή

2.3.1 Γενικά

Τα τελευταία χρόνια, η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων από τη μία και η αναπόφευκτη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων από την άλλη, έχουν οδηγήσει στη ραγδαία εξάπλωση και ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Η αιολική ενέργεια, συγκεκριμένα, έχει διεισδύσει σε πολλά σύγχρονα ΣΗΕ φτάνοντας σε ποσοστά μέχρι και 140% (Δανία) της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Ελλάδα, μεγάλα ποσοστά διείσδυσης παρατηρούνται κυρίως σε νησιωτικές περιοχές όπως η Κρήτη (περίπου 30% της ηλεκτρικής ενέργειας). [9]

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πραγματοποιείται από αιολικά πάρκα. Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών που συνδέονται μεταξύ τους με ένα δίκτυο μέσης τάσης. Ένας υποσταθμός, ο οποίος εγκαθίσταται σε κοντινή απόσταση, ανυψώνει, μέσω μετασχηματιστή, την τάση σε υψηλή, και έτσι συνδέει όλη την εγκατάσταση σε ένα δίκτυο μεταφοράς. Μια πιο αναλυτική περιγραφή της συνδεσμολογίας των Αιολικών Πάρκων γίνεται στην ενότητα 2.3.2. Πολλές φορές, τα αιολικά πάρκα εγκαθίστανται για ενεργειακή υποστήριξη σε αυτόνομα δίκτυα που περιλαμβάνουν ντιζελοηλεκτρικούς σταθμούς με υψηλό κόστος καυσίμου, ενώ σε σπανιότερες περιπτώσεις είναι υπεύθυνα για την αποκλειστική τροφοδότηση απομονωμένων περιοχών. Ωστόσο, η κατασκευή αιολικών πάρκων δεν είναι πάντα καλοδεχόμενη κυρίως λόγω προβλημάτων αισθητικής ρύπανσης και άλλων επιδράσεων στο τοπικό περιβάλλον [9].

Χαρακτηριστική ιδιαιτερότητα της αιολικής ενέργειας είναι ότι δεν μπορεί να αξιοποιηθεί ανάλογα με τη ζήτηση. Αυτό σημαίνει ότι, για λόγους οικονομίας, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να δέχεται, σε κάθε περίπτωση, το σύνολο της ισχύος που προσφέρουν τα αιολικά πάρκα. Για να αποφευχθεί ένα πιθανό πλεόνασμα παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος, απαιτείται η χρήση μηχανισμών διαχείρισης ισχύος, όπως η εξαγωγή της πλεονάζουσας ισχύος σε γειτονικά ΣΗΕ, ή ακόμη και η αποθήκευση [9].

Τα πρώτα χρόνια της ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες αντιμετώπιζονταν καθαρά ως αρνητικά φορτία, καθώς το μικρό ποσοστό συμμετοχής

τους στην συνολική παραγωγή δεν είχε σημαντικό αντίκτυπο στην ομαλή λειτουργία των ΣΗΕ. Με τον καιρό, η συνεχής αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας άρχισε να κάνει αισθητή την επίδραση της όχι μόνο στη λειτουργία αλλά και στο σχεδιασμό των ΣΗΕ. Ξεκίνησε, επομένως, μια διαδικασία αλληλεπίδρασης μεταξύ των ΣΗΕ, των κανονισμών για τα αιολικά πάρκα που εκδίδουν οι διαχειριστές και των κατασκευαστών των ανεμογεννητριών [15].

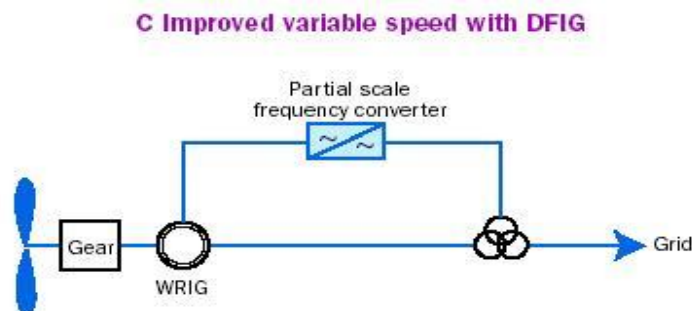
Οι ανεμογεννήτριες διαχωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες καθορίζουν την συμπεριφορά τους σε διακυμάνσεις του ανέμου: ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών και ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Τα μειονεκτήματα της πρώτης κατηγορίας οδήγησαν στην γενίκευση της κατασκευής και χρήσης των ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών. Η κατηγορία αυτή επιτρέπει τη μεταβολή των στροφών του δρομέα της ανεμογεννήτριας, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου και έτσι μπορεί να αυξήσει σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια από το ίδιο αιολικό πεδίο σε σχέση με τις μονάδες σταθερών στροφών. Η παροχή ισχύος στο σύστημα από τις ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών πραγματοποιείται είτε μέσω ασύγχρονων γεννητριών διπλής τροφοδότησης, είτε μέσω σύγχρονων γεννητριών με πλήρη μετατροπέα ηλεκτρικών ισχύος. Μια πιο αναλυτική περιγραφή των δύο συνδεσμολογιών γίνεται ακολούθως.

2.3.2 Βασικοί Τύποι Ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών

Οι δύο βασικοί τύποι ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών αναλύονται ακολούθως [15]:

- Ασύγχρονες ανεμογεννήτριες διπλής τροφοδότησης (DFIG -τύπου Γ)

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 (Σχ. 2.8). Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο μετατροπείς πηγής τάσης με διαμόρφωση εύρους παλμών (Pulse Width Modulation) οι οποίοι έχουν κοινή πλευρά συνεχούς ρεύματος (DC). Η συνολική ισχύς είναι το άθροισμα που διοχετεύεται από το στάτη και –μέσω του μετατροπέα- από το δρομέα, ο οποίος μετατροπέας διαστασιοποιείται για το 25-30% της ισχύος του στάτη, ανάλογα με το εύρος των στροφών και των απαιτήσεων σε άεργο ισχύ. Καθώς μόνο ένα μέρος της ισχύος περνά από το μετατροπέα, ο μετατροπέας είναι μικρότερης ονομαστικής ισχύος, άρα και πιο οικονομικός σε σχέση με έναν πλήρη μετατροπέα. [15]



European market share (cum): 45%

Σχήμα 2.8 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας

Με τον έλεγχο του μετατροπέα η ταχύτητα της γεννήτριας μπορεί να ποικίλει έως και $\pm 30\%$ από την σύγχρονη ταχύτητα. Υπάρχει δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος. Ο μετατροπέας πλευράς δικτύου ρυθμίζει το ενεργό ρεύμα, που εγχέει στο δίκτυο, έτσι ώστε η τάση συνεχούς ρεύματος (DC) να παραμένει σταθερή και μπορεί επίσης να παρέχει άεργο ισχύ. Επομένως, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών, σε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη μηχανή διπλής τροφοδότησης υπό δεδομένη τερματική τάση η ενεργός ισχύς δεν ορίζει μονοσήμαντα την ταχύτητα περιστροφής και την άεργο ισχύ. Υπάρχει η δυνατότητα για λειτουργία της μηχανής με ένα συγκεκριμένο συντελεστή ισχύος, αλλά μπορεί και να πραγματοποιηθεί επίσης έλεγχος της τάσης. Όπως και στις απλές γεννήτριες επαγωγής χρησιμοποιείται μειωτήρας στροφών (κιβώτιο ταχυτήτων). Συνήθως οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους χρησιμοποιούν έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.

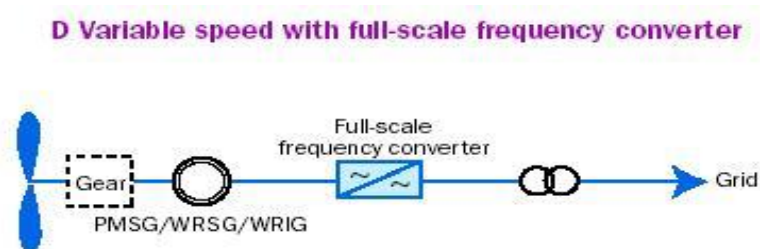
Οι ανεμογεννήτριες τύπου Γ θεωρείται ότι έχουν δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής υπό χαμηλή τάση.

- Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα (FC-τύπου Δ)

Μια ανεμογεννήτρια τεχνολογίας Δ (Σχ. 2.9) μπορεί να είναι εφοδιασμένη με:

- ❖ σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων με:
 - τύλιγμα διεγέρσεως (WRSG)
 - μόνιμων μαγνητών (PMSG)
- ❖ μηχανή επαγωγής τυλιγμένου δρομέα
 - τυλιγμένου δρομέα (WRIG)
 - τύπου κλωβού (SCIG)

Συνήθως όμως χρησιμοποιούνται σύγχρονες μηχανές για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή (ο μετατροπέας ισχύος απεμπλέκει πλήρως τη συχνότητα της γεννήτριας από τη συχνότητα του δικτύου). Επιπλέον, οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να έχουν τύλιγμα διεγέρσεως ή να είναι μόνιμων μαγνητών και επιτρέπουν αποφυγή του κιβωτίου ταχυτήτων.



European market share (cum): 15%

Σχήμα 2.9 Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα

Ο στάτης συνδέεται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα πλήρους ισχύος. Με το να είναι 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. Συνήθως και οι ανεμογεννήτριες αυτού του είδους χρησιμοποιούν

έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων για τον περιορισμό της ισχύος στις υψηλές ταχύτητες ανέμου [15].

Όπως και οι ανεμογεννήτριες τύπου Γ, οι ανεμογεννήτριες με πλήρη μετατροπέα θεωρείται ότι έχουν δυνατότητα αδιάλειπτης παροχής υπό χαμηλή τάση.

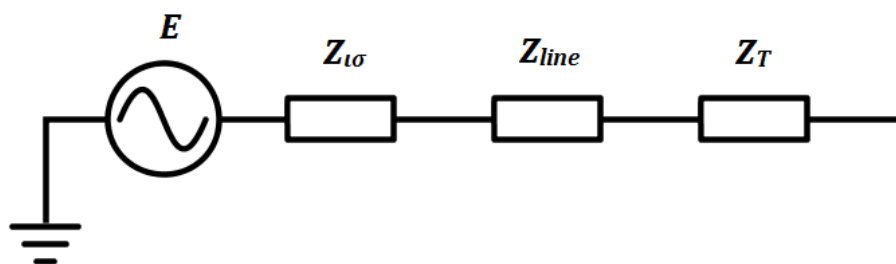
Ανεξάρτητα από την τεχνολογία των ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων, στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι συνεισφέρουν με έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος μέχρι την τιμή που επιτρέπουν τα ονομαστικά τους μεγέθη (μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα). Ο τρόπος ρύθμισης της αέργου ισχύος των αιολικών πάρκων αναλύεται εκτενώς σε επόμενη ενότητα.

2.3.3 Σύνδεση Αιολικών Πάρκων στο Σύστημα Μεταφοράς

Τα αιολικά πάρκα θεωρείται ότι συνδέονται με το σύστημα μεταφοράς μέσω γραμμής διανομής μέσης τάσεως και υποσταθμού υψηλής/μέσης τάσεως.[15]

Οι επιμέρους ανεμογεννήτριες του πάρκου παριστάνονται από μια ισοδύναμη μηχανή, η οποία συνδέεται στο σημείο κοινής σύνδεσης (ζυγός μέσης τάσης του αιολικού πάρκου) μέσω της σύνθετης αντίστασης $Z_{i\sigma}$. Ο ζυγός μέσης τάσης του αιολικού πάρκου συνδέεται στη συνέχεια με γραμμή ή καλώδιο μέσης τάσεως σύνθετης αντίστασης Z_{line} στον υποσταθμό ΜΤ/ΥΤ, ο μετασχηματιστής του οποίου έχει σύνθετη αντίσταση Z_T . Δεν παριστάνεται ξεχωριστά ο μετασχηματιστής ανύψωσης της ανεμογεννήτριας, διότι περιλαμβάνεται στο $Z_{i\sigma}$ (Σχήμα 2.10).

Για τον προσδιορισμό της σύνθετης αντίστασης του συνολικού κλάδου μεταξύ υποσταθμού ΜΤ/ΥΤ και γεννήτριας αιολικού πάρκου λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα του εκάστοτε Αιολικού Πάρκου.



Σχήμα 2.10 Ισοδύναμο Κύκλωμα Διασυνδέσεων Α/Π

2.4 Έλεγχος με Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος

2.4.1 Ρύθμιση Ενεργού-Αέργου Ισχύος

Οι μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος μπορούν να ελέγχουν ξεχωριστά την ενεργό (P) και άεργο ισχύ (Q) που παρέχουν ή καταναλώνουν. Έτσι, μπορούν να ελέγχουν ρεύματα ή τάσεις προσαρμόζοντας τη ροή ισχύος. Επειδή οι μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος στην πραγματικότητα συνθέτουν την κυματομορφή εναλλασσομένου ρεύματος ή τάσεως, έχουν πολύ γρήγορη αντίδραση, και μπορούν να ρυθμίσουν τάση, ρεύμα ή ισχύ εντός μια περιόδου του εναλλασσομένου ρεύματος

(20ms για σύστημα 50Hz). Στην εργασία αυτή θα θεωρηθεί ότι για τις εξισώσεις του δικτύου στην ημιτονοειδή οιονεί μόνιμη κατάσταση, όπου τάσεις και ρεύματα παριστάνονται ως φασιθέτες, ο έλεγχος που ασκούν οι μετατροπείς είναι πρακτικά ακαριαίος.

Ο έλεγχος ενεργού ισχύος P φροντίζει ώστε η ισχύς που προέρχεται από την πηγή εισόδου (π.χ. Ανεμογεννήτρια) να μεταφέρεται στο δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος χωρίς να υπερφορτίζεται ο πυκνωτής (Σχ. 2.5-2.6). Ο ανεξάρτητος έλεγχος αέργου ισχύος διενεργείται με κατάλληλη μεταβολή της ενεργού τιμής της τάσεως εναλλασσομένου ρεύματος. 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).

2.4.2 Όρια Λειτουργίας και Ονομαστικά Μεγέθη

Οι μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος δεν έχουν δυνατότητα έστω χρονικά περιορισμένης υπερφόρτισης. Σε περίπτωση που ζητηθεί από το δίκτυο τιμή ρεύματος μεγαλύτερη από την ονομαστική, αυτή περιορίζεται αυτόματα με τη μετατροπή της πηγής τάσεως σε πηγή ρεύματος. Ο περιοριστής αυτός θεωρείται σε αυτή την εργασία ότι υλοποιείται με μείωση της τάσης του μετατροπέα μέχρι το ρεύμα να επιστρέψει στην επιτρεπτή τιμή. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα του μετατροπέα I_W τείνει να ξεπεράσει το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, I_{max} , ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος στην αποδεκτή τιμή. Όπως και παραπάνω, έχει θεωρηθεί ότι ο ελεγκτής ρεύματος δρα 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:

$$I_{max}(\alpha. \mu.) = S_n / V_n \quad (2.1)$$

3

Παράσταση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

3.1 Χρονικές Κλίμακες

3.1.1 Διαφορικές και Αλγεβρικές Εξισώσεις

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

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (3.1)$$

όπου \mathbf{x} το $(N \times 1)$ διάνυσμα κατάστασης του συστήματος και \mathbf{f} οι N διανυσματικές, συνήθως μη γραμμικές, συναρτήσεις του διανύσματος \mathbf{x} . Το διάνυσμα κατάστασης \mathbf{x} είναι συνάρτηση του χρόνου και λύση της διαφορικής εξίσωσης (3.1) για κάποιες αρχικές τιμές.

Σύμφωνα με τη γενική θεωρία των διαφορικών εξισώσεων, γνωρίζοντας ένα σύνολο αρχικών συνθηκών $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$, είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε μια λύση $\mathbf{x}(t)$, με την προϋπόθεση ότι τα κριτήρια ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης ικανοποιούνται [5].

Τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούν δυναμικά συστήματα, των οποίων η πολυπλοκότητα και η ποικιλομορφία δεν επιτρέπουν την εύκολη και ολοκληρωμένη περιγραφή τους μέσω των εξισώσεων (3.1) και μόνο. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη αλγεβρικών εξισώσεων επιβάλλει περιορισμούς στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Επομένως, αντί των παραπάνω εξισώσεων (3.1) καταστρώνονται αλγεβρικές-διαφορικές εξισώσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των ΣΗΕ. Επίσης, συνήθως είναι και ο διαχωρισμός των εξισώσεων αυτών με βάση τη χρονική κλίμακα ως εξής [5]:

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

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (3.2)$$

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

2. *Εξισώσεις βραχυπρόθεσμης χρονικής κλίμακας.* Οι εξισώσεις αυτές αναφέρονται στα γρήγορα δυναμικά φαινόμενα που έχουν διάρκεια λίγων δευτερολέπτων μετά από την εμφάνιση διαταραχής στο σύστημα. Είναι διαφορικές εξισώσεις πρώτης τάξης και οι σταθερές χρόνου που τις χαρακτηρίζουν είναι της τάξεως δευτερολέπτου, δικαιολογώντας έτσι και την βραχυπρόθεσμη απόκριση τους. Συνήθως περιγράφουν την μεταβατική συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών, των ρυθμιστών τάσης, των κινητήρων επαγωγής αλλά και διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος, όπως των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς. Τα αντίστοιχα φαινόμενα αναφέρονται ως *βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα*. Οι βραχυπρόθεσμες διαφορικές εξισώσεις περιγράφονται ως:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (3.3)$$

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

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

$$\dot{\mathbf{z}}_c = \mathbf{h}_c(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{z}_d(k+1) = \mathbf{h}_d(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}_c, \mathbf{z}_d(k)) \quad (3.5)$$

όπου \mathbf{z}_c και \mathbf{z}_d είναι τα διανύσματα κατάστασης για τα συνεχή και τα διακριτά μακροπρόθεσμα φαινόμενα αντίστοιχα. Ο δείκτης k εκφράζει τη χρονική στιγμή $t_k = k\Delta T$, όπου ΔT η περίοδος λειτουργίας του διακριτού συστήματος.

Το σύνολο των εξισώσεων (3.2)-(3.5) συνθέτει το πλήρες δυναμικό μοντέλο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1.2 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 (3.2)-(3.5) 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, μια προσομοίωση του παραπάνω συστήματος εξισώσεων δεν διευκολύνει πάντοτε την ανάλυση των φαινομένων.

Η ανάγκη για μια πιο απλοποιημένη και γρήγορη μέθοδο επίλυσης των εξισώσεων (3.2)-(3.5), οδήγησε στο διαχωρισμό τους σε δύο συστήματα ελαττωμένης τάξης και πολυπλοκότητας, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα στην οποία ανήκουν τα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται. Τα δύο αυτά υποσυστήματα προκύπτουν με εφαρμογή της τεχνικής των οιονεί στατικών μεταβολών [5] και είναι το *βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα* και το *οιονεί στατικό σύστημα* στη μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα.

Κατά την ανάλυση στη βραχυπρόθεσμη κλίμακα, χρησιμοποιείται το βραχυπρόθεσμο προσεγγιστικό σύστημα. Το μοντέλο αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι τα αργά δυναμικά φαινόμενα, λόγω του αργού ρυθμού εξέλιξης τους, μπορούν να θεωρηθούν σταθερά, όταν τα γρήγορα, βραχυπρόθεσμα φαινόμενα βρίσκονται στη διαδικασία μετάβασης. Σύμφωνα με το παραπάνω, οι μακροπρόθεσμες μεταβλητές z_c και z_d των εξισώσεων (3.4) και (3.5) θεωρούνται σταθερές και επομένως λαμβάνουμε το απλοποιημένο μοντέλο:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(x, y, z_c, z_d) \quad (3.6)$$

$$\dot{x} = \mathbf{f}(x, y, z_c, z_d) \quad (3.7)$$

Το οιονεί στατικό σύστημα χρησιμοποιείται για την ανάλυση του συστήματος στη μακροπρόθεσμη χρονική. Εφόσον το ενδιαφέρον μας στρέφεται στα δυναμικά φαινόμενα που εξελίσσονται με αργό ρυθμό, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι τα βραχυπρόθεσμα μεταβατικά φαινόμενα έχουν φτάσει σε ισορροπία. Αντικαθιστώντας, επομένως, τις διαφορικές εξισώσεις (3.3) με αντίστοιχες αλγεβρικές συνθήκες ισορροπίας, προκύπτει το μοντέλο της οιονεί στατικής προσέγγισης:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(x, y, z_c, z_d) \quad (3.8)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{f}(x, y, z_c, z_d) \quad (3.9)$$

$$\dot{z}_c = \mathbf{h}_c(x, y, z_c, z_d) \quad (3.10)$$

$$z_d(k+1) = \mathbf{h}_d(x, y, z_c, z_d(k)) \quad (3.11)$$

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 έχουμε υλοποιήσει.

3.1.3 Περιγραφή Συνιστωσών ΣΗΕ

Στη συνέχεια περιγράφονται ορισμένες βασικές συνιστώσες ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας:

1. Δίκτυο Μεταφοράς/Διανομής (Αλγεβρικές Εξισώσεις Δικτύου):

Για την παράσταση του δικτύου Μεταφοράς και Διανομής γίνεται η υπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται στην Ημιτονοειδή Μόνιμη Κατάσταση (ΗΜΚ) κατά την οποία όλα τα ηλεκτροδυναμικά μεταβατικά φαινόμενα έχουν εξαλειφθεί και όλο το σύστημα έχει σταθερή συχνότητα (εξισώσεις ακαριαίας απόκρισης). Όταν συμβαίνει αυτό οι τάσεις και τα ρεύματα του δικτύου μπορούν να περιγραφούν από τους αντίστοιχους παραστατικούς μιγαδικούς αριθμούς (φασιθέτες-rphasors) με χρονομεταβλητό μέτρο και φάση, ενώ τα δεδομένα του δικτύου (π.χ. γραμμές μεταφοράς) μπορούν να αναπαρασταθούν μέσω σύνθετων αντιστάσεων. Επομένως εφαρμογή του Νόμου Ρευμάτων του Kirchhoff σε κάθε ένα ζυγό, ενός συστήματος N ζυγών συνολικά, δίνει σε μητρική μορφή τις ακόλουθες μιγαδικές αλγεβρικές εξισώσεις:

$$\hat{\mathbf{I}} = \mathbf{Y}\hat{\mathbf{V}} \quad (3.12)$$

όπου $\hat{\mathbf{I}}$ είναι το N -διάστατο διάνυσμα των εγχύσεων ρεύματος, $\hat{\mathbf{V}}$ το N -διάστατο διάνυσμα των τάσεων των ζυγών και \mathbf{Y} ο πίνακας αγωγιμοτήτων του συστήματος, διάστασης $(N \times N)$. Αντικαθιστώντας τις εγχύσεις ρευμάτων συναρτήσει των εγγεόμενων ισχύων και των τάσεων, βάση του τύπου:

$$\tilde{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\tilde{V}_i^*} \quad (3.13)$$

και εκτελώντας τις πράξεις στην σχέση (3.13), χωρίζοντας πραγματικά και φανταστικά μέρη, παίρνουμε συνολικά $2N$ μη γραμμικές πραγματικές εξισώσεις ρών φορτίου που συνδέουν τις ισχύεις, τις τάσεις και τις γωνίες όλου του συστήματος και αποτελούν τις αλγεβρικές του εξισώσεις (3.2), οι οποίες σε συνεκτική μορφή μπορούν να γραφούν στην μορφή:

$$\mathbf{g}(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0} \quad (3.14)$$

όπου \mathbf{P} , \mathbf{Q} οι ενεργός και άεργος ισχύς αντίστοιχα και \mathbf{V} , $\boldsymbol{\theta}$ το μέτρο και η φάση των τάσεων. Περισσότερα σχετικά με την μορφή των εξισώσεων ρών φορτίου και τον συστηματικό τους προσδιορισμό θα δοθούν στα επόμενα κεφάλαια.

2. Μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος:

Οι μετατροπείς Ηλεκτρονικών Ισχύος, όπως αναφέρθηκε και στο 2^ο κεφάλαιο, εντάσσονται στα ακαριαία δυναμικά φαινόμενα που έχουν διάρκεια μικρότερη της περιόδου του εναλλασσόμενου ρεύματος (20ms για 50Hz). Στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι η απόκρισή τους γίνεται χωρίς καμία χρονική καθυστέρηση. Επομένως, παραλείπεται η μεταβατική ανάλυση και χρησιμοποιούνται μόνο οι εξισώσεις ισορροπίας με βάση τον τρόπο ελέγχου. Συγκεκριμένα, η ακαριαία δράση επιτρέπει στο σύστημα να γίνεται ο έλεγχος επαναληπτικά, την ίδια χρονική στιγμή, μέχρις ότου να επιτευχθεί η επιθυμητή ρύθμιση.

3. Συστήματα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ):

Τα ΣΑΤΥΦ είναι σχετικά αργοί διακριτοί μηχανισμοί, που αλλάζουν μόνο ένα βήμα την φορά, όταν η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός μιας νεκρής ζώνης περισσότερο από μια προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση (π.χ. 10s). Πρόκειται για εξισώσεις μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας, αφού αναφέρονται στα πιο αργά δυναμικά φαινόμενα που εκδηλώνονται αρκετά μετά από κάποια διαταραχή. Θεωρούμε ότι δεν υπάρχει επιπρόσθετη μηχανική καθυστέρηση ενεργοποίησης των ΣΑΤΥΦ, δηλαδή αφότου η ελεγχόμενη τάση βρεθεί εκτός νεκρής ζώνης για χρόνο ΔT , τότε γίνεται επανέλεγχος (χρονική στιγμή t_k^-) και αν βρεθεί εκ νέου εκτός νεκρής ζώνης η τάση, τότε μεταβάλλεται ακαριαία μέσω των Ηλεκτρονικών Ισχύος το βήμα του ΣΑΤΥΦ (χρονική στιγμή t_k^+). Προφανώς για t_k^- , αλλά και για t_k^+ γίνεται επίλυση των εξισώσεων που συνδέονται με τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος και τις συνιστώσες του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Αναλυτικότερη επεξήγηση των εξισώσεων και της λειτουργίας των ΣΑΤΥΦ γίνεται στην επόμενη ενότητα.

4. Αυτόματη Ζεύξη Πυκνωτών:

Ο αυτόματος μηχανισμός ζεύξης-απόζευξης συστοιχιών πυκνωτών αποτελεί επίσης έναν αργό διακριτό μηχανισμό και ως εκ τούτου το μοντέλο του εντάσσεται στις εξισώσεις μακροπρόθεσμης χρονικής κλίμακας. Όταν η ελεγχόμενη τάση ή ισχύς βρεθεί εκτός μιας επιθυμητής νεκρής ζώνης, για διάρκεια περισσότερο από μία προκαθορισμένη χρονική καθυστέρηση (π.χ. 60s), τότε λειτουργεί ο αυτόματος μηχανισμός ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών. Όπως και στην περίπτωση των ΣΑΤΥΦ, επενεργεί ακαριαία χωρίς πρόσθετη καθυστέρηση ενεργοποίησης, δηλαδή αμέσως μόλις φτάσει στο πέρας της χρονικής καθυστέρησης. Γίνεται επανέλεγχος

(χρονική στιγμή t_k^-) και αν βρεθεί εκ νέου εκτός νεκρής ζώνης, τότε γίνεται η ζεύξη ή απόζευξη συστοιχιών πυκνωτών(χρονική στιγμή t_k^+). Προφανώς για t_k^- , αλλά και για t_k^+ γίνεται επίλυση των εξισώσεων που συνδέονται με με τους μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος και τις συνιστώσες του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Αναλυτικότερη επεξήγηση των εξισώσεων και της λειτουργίας των συστοιχιών πυκνωτών γίνεται στην επόμενη ενότητα.

3.2 Παράσταση Διατάξεων Ρύθμισης Αέργου Ισχύος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διατάξεις και οι αντίστοιχες εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση.

3.2.1 Μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ

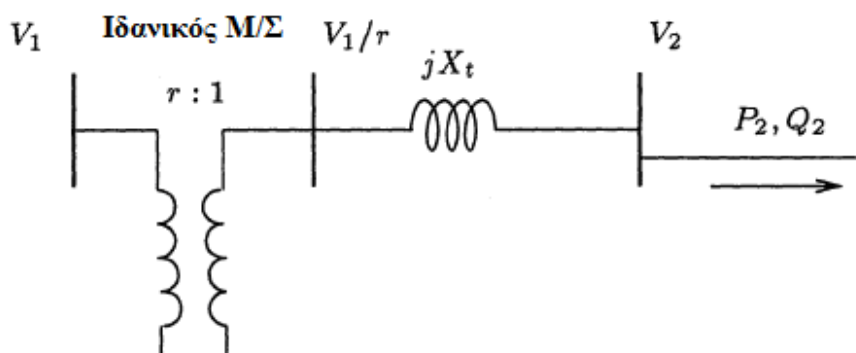
Στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν διάφορα επίπεδα τάσης τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με την βοήθεια μετασχηματιστών και αυτομετασχηματιστών ισχύος. Οι μεγάλοι μετασχηματιστές ισχύος υπερυψηλής τάσης/υψηλής τάσης ή υψηλής τάσης/μέσης τάσης είναι συνήθως εφοδιασμένοι με μηχανισμούς μεταβολής της σχέσης μετασχηματισμού χωρίς διακοπή του φορτίου. Η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται με αλλαγή της λήψεως στα τυλίγματα του μετασχηματιστή, δεδομένου ότι η επαγόμενη ανά σπείρα τάση είναι σταθερή. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να διατηρηθεί μια κατά προσέγγιση σταθερή τάση στους σπουδαιότερους ή και σε όλους τους ζυγούς των υποσταθμών διασυνδέσεως ή υποβιβασμού του δικτύου. Το Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο ή ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με ηλεκτροκινητήρες και ο χειρισμός τους γίνεται αυτόματα. Συνήθως ο μηχανισμός αυτός είναι εγκατεστημένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή, καθώς σε αυτήν την πλευρά κυκλοφορούν μικρότερα ρεύματα που επιτρέπουν ευκολότερες μεταγωγές και υπάρχουν περισσότερες σπείρες, δημιουργώντας την δυνατότητα ακριβέστερης ρύθμισης της τάσης. Οι μετασχηματιστές με ΣΑΤΥΦ ελέγχουν συνήθως την τάση στη πλευρά διανομής. Οι μετασχηματιστές αυτοί είναι αργοί, διακριτοί μηχανισμοί αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού τους κατά ένα βήμα τη φορά. Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ότι ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού έχει περιορισμένο εύρος τιμών:

$$r_{min} \leq r \leq r_{max} \quad (3.15)$$

Τυπικές τιμές του κάτω ορίου είναι 0.8-0.9 α.μ και του άνω ορίου 1.1-1.2 α.μ. Το μέγεθος του βήματος κάθε φορά είναι συνήθως 0.5%-1.5%.

Θεωρώντας ότι η αντίδραση μαγνητίσεως του μετασχηματιστή μπορεί να αμεληθεί, αγνοώντας τις ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων και θεωρώντας σταθερή αντίδραση σκεδάσεως X_i , το ισοδύναμο κύκλωμα του ΣΑΤΥΦ φαίνεται στο Σχήμα 3.1.

Υπάρχουν δύο μοντέλα για την αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς των μετασχηματιστών με ΣΑΤΥΦ. Το ένα είναι το διακριτό μοντέλο, σύμφωνα με το οποίο ο λόγος μετασχηματισμού μεταβάλλεται ασυνεχώς και με ένα βήμα τη φορά. Το δεύτερο μοντέλο είναι το συνεχές, το οποίο είναι προσεγγιστικό σε σχέση με το διακριτό μοντέλο.



Σχήμα 3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ με ΣΑΤΥΦ

Στο διακριτό μοντέλο όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ, θεωρούμε ότι αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους Δr . Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου, έστω t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$, οι οποίες δίνονται από τον ακόλουθο επαναληπτικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (3.16)$$

Σημειώνεται ότι το t_k μπορεί να είναι ανεξάρτητη μεταβλητή και το ΔT_k δεν είναι απαραίτητα σταθερό, αφού μπορεί να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της συσκευής και το σφάλμα της τάσης.

Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος του ΣΑΤΥΦ τις χρονικές στιγμές t_{k+1} , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$\begin{aligned} r_{k+1} &= r_k + \Delta r, \quad \text{εάν } V_2 > V_{2o} + \frac{d}{2} \text{ και } r_k < r_{\max} \\ r_{k+1} &= r_k - \Delta r, \quad \text{εάν } V_2 < V_{2o} - \frac{d}{2} \text{ και } r_k > r_{\min} \\ r_{k+1} &= r_k, \quad \text{διαφορετικά} \end{aligned} \quad (3.17)$$

όπου V_{2o} είναι η τάση αναφοράς του δευτερεύοντος και d το εύρος της νεκρής ζώνης της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Θεωρείται ότι η λήψη για την αλλαγή του λόγου μετασχηματισμού βρίσκεται στο πρωτεύον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1. Η νεκρή ζώνη είναι μια περιοχή τιμών γύρω από την τάση αναφοράς. Όταν το σφάλμα της τάσης ξεπεράσει τα όρια της νεκρής ζώνης τότε το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται.

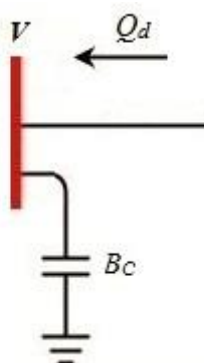
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το διακριτό μοντέλο μετασχηματιστή. Το ΣΑΤΥΦ λειτουργεί με αρχική καθυστέρηση T_{d1} και μετέπειτα χρονική καθυστέρηση T_{d2} . Η T_{d1} είναι συνήθως μεγαλύτερη, για αποφυγή λανθασμένων και περιττών αλλαγών στη λήψη κατά τη διάρκεια μεταβατικών φαινομένων.

Στον αλγόριθμο που περιγράφεται στην ενότητα 3.3 θα χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή t_{lcc} που αποτελεί μετρητή της χρονικής διάρκειας για την οποία η ρυθμιζόμενη τάση V_2 βρίσκεται εκτός ορίων. Προκειμένου να κινηθεί το ΣΑΤΥΦ, θα πρέπει καθόλη τη διάρκεια χρονικής καθυστέρησης των ΣΑΤΥΦ, ΔT_k , να παραβιάζεται ο ανισωτικός περιορισμός (3.17).

3.2.2 Αυτόματοι Μηχανισμοί Ζεύξης-Απόζευξης Πυκνωτών

Οι μηχανισμοί αυτοί 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.

Το ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης του αυτόματου μηχανισμού ζεύξης συστοιχιών πυκνωτών φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα σύνδεσης συστοιχιών πυκνωτών

Γενικά οι συστοιχίες πυκνωτών με αυτόματη ζεύξη μπορούν να ρυθμίζουν τάση, όπως τα ΣΑΤΥΦ, αν όμως συνδεθούν στον ίδιο ζυγό με τα ΣΑΤΥΦ είναι προτιμότερο να ρυθμίζουν άεργο ισχύ. Έτσι, στην εργασία αυτή η λειτουργία της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης των πυκνωτών περιγράφεται από τις ακόλουθες διακριτές εξισώσεις, έχοντας λάβει ως βάση ελέγχου την έγχυση αέργου ισχύος στον εκάστοτε ζυγό που είναι συνδεδεμένες οι συστοιχίες πυκνωτών:

$$\begin{aligned}
 B_{C,k+1} &= B_{C,k} + \Delta B_C, \text{ αν } Q_d > \Delta Q_C \text{ και } B_{C,k} < B_{Cmax} \\
 B_{C,k+1} &= B_{C,k} - \Delta B_C, \text{ αν } Q_d < 0 \text{ και } B_{C,k} > B_{Cmin} \\
 B_{C,k+1} &= B_{C,k}, \text{ διαφορετικά}
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

όπου

Q_d : η ροή αέργου ισχύος στον ελεγχόμενο ζυγό

$B_{C,k}$: η αγωγιμότητα της συστοιχίας

ΔB_C : το βήμα μεταβολής της αγωγιμότητας των πυκνωτών

ΔQ_C : Η νεκρή ζώνη για τη ρύθμιση αέργου ισχύος

V_B : η βασική τάση

και

$$\Delta Q_C = V_B^2 \Delta B_C
 \tag{3.19}$$

Ο αυτόματος μηχανισμός λειτουργεί με μια χρονική καθυστέρηση T_{msc} για κάθε ζεύξη ή απόζευξη, συνήθως πολλαπλάσια μεγαλύτερη της χρονικής καθυστέρησης ΔT_k των ΣΑΤΥΦ για να αποτραπούν τυχόν άσκοπες ρυθμίσεις. Γενικά η χρονική καθυστέρηση για τη σύνδεση των πυκνωτών πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να μην επηρεάζεται η λειτουργία των ΣΑΤΥΦ. Εξάλλου επειδή οι χειρισμοί ζεύξης – απόζευξης δημιουργούν μεταβατικά φαινόμενα θα πρέπει να αποφεύγεται, κατά το δυνατόν, η συχνή λειτουργία τους. Τα όρια B_{Cmax} και B_{Cmin} αντιπροσωπεύουν τη συνολική μέγιστη και ελάχιστη, αντίστοιχα, διαθέσιμη αγωγιμότητα.

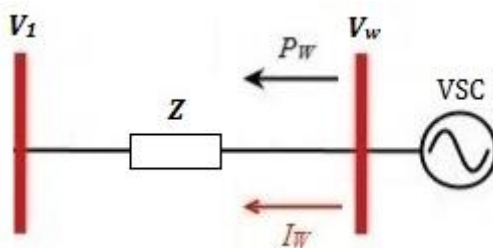
Στον αλγόριθμο που περιγράφεται στην ενότητα 3.3 θα χρησιμοποιηθεί η μεταβλητή t_c που αποτελεί μετρητή της χρονικής διάρκειας για την οποία η ελεγχόμενη ροή αέργου ισχύος Q_d βρίσκεται εκτός ορίων. Προκειμένου να γίνει ζεύξη ή απόζευξη

συστοιχίας πυκνωτών, θα πρέπει καθόλη τη διάρκεια χρονικής καθυστέρησης του αυτομάτου μηχανισμού ζεύξης/απόζευξης πυκνωτών, T_{msc} , να παραβιάζεται ο ανισωτικός περιορισμός (3.18).

3.2.3 Παράσταση Μετατροπέων Ηλεκτρονικών Ισχύος

Χωρίς βλάβη της γενικότητας, στην παρούσα εργασία οι μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος θεωρούνται πως λειτουργούν ως ρυθμιζόμενες πηγές εναλλασσόμενης τάσεως (βλέπε Κεφάλαιο 2). Η τάση (ενεργός τιμή) εναλλασσόμενου ρεύματος του μετατροπέα μπορεί να μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποιο κανόνα ελέγχου (π.χ. ρύθμιση ρεύματος ή απομακρυσμένης τάσης). Η ρύθμιση αυτή θεωρείται πως γίνεται ακαριαία, χωρίς δηλαδή να προχωρήσει ο χρόνος σε περίπτωση προσομοίωσης.

Στην παρούσα εργασία αρχικά θεωρείται (Σχ.3.3) ότι η τάση V_W του μετατροπέα πηγής τάσης ρυθμίζεται συνεχώς ώστε να ελέγχεται μία τάση στο δίκτυο (έστω V_1). Αντίστοιχα, ο έλεγχος ενεργού ισχύος του μετατροπέα χρησιμοποιείται για να εγχέεται στο δίκτυο η ενεργός ισχύς P_W που παράγεται από το αιολικό πάρκο (μείον τυχόν απώλειες).



Σχήμα 3.3 Παράσταση κυκλώματος σύνδεσης μετατροπέα πηγής τάσης

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο, 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 υλοποιείται με μείωση της τάσης V_W του μετατροπέα πηγής τάσης μέχρις ότου το ρεύμα επιστρέψει στην επιτρεπτή τιμή. Συγκεκριμένα, όταν το ρεύμα I_W τείνει να ξεπεράσει το επιτρεπόμενο όριο, ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας με σκοπό την μείωση του ρεύματος. Όπως και παραπάνω, έχει θεωρηθεί ότι ο ελεγκτής ρεύματος δρα ακαριαία.

Ακολούθως περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας του περιοριστή ρεύματος:

- Εάν το ρεύμα του μετατροπέα ηλεκτρονικών ισχύος I_W υπερβεί το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο, I_{max} , τότε προσαρμόζεται ακαριαία η τάση του μετατροπέα πηγής τάσης V_W , μέχρις ότου επανέλθει ξανά εντός των επιθυμητών ορίων η τιμή του ρεύματος, δηλαδή μέχρις ότου ισχύσει: $I_W = I_{max}$
- Προφανώς από την στιγμή που επενεργήσει ο περιοριστής ρεύματος, δεν είναι δυνατός ο οποιοσδήποτε έλεγχος τάσεως/αέργου ισχύος.

Ο τύπος λειτουργίας καθορίζεται από μία λογική μεταβλητή *flag* η οποία χρησιμοποιείται στον αλγόριθμο που περιγράφεται στην ενότητα 3.3 και φαίνεται στις εξισώσεις (3.20α, 3.20β) ακολούθως. Όταν ο έλεγχος της τάσης είναι ενεργός (3.20α), η λογική μεταβλητή παίρνει την τιμή 1 ($flag = 1$). Εάν ο ανισωτικός περιορισμός (Σχέση 3.20α) παραβιάζεται, δηλαδή το ρεύμα του μετατροπέα τείνει να ξεπεράσει

επιτρεπόμενο όριο, η λογική μεταβλητή $flag$ παίρνει τιμή 0 (Σχέση 3.20β), οπότε ενεργοποιείται ο έλεγχος του ρεύματος.

Θεωρώντας ολοκληρωτικό έλεγχο της τάσης V_1 και του ρεύματος I_W , η περιγραφή της λειτουργίας ελέγχου τάσεως/ρεύματος του μετατροπέα φαίνεται από τις εξισώσεις:

$$flag = 1: \quad V_1 = V_{ref}, \quad \text{εάν } I_W \leq I_{max} \quad (3.20\alpha)$$

$$flag = 0: \quad I_W = I_{max}, \quad \text{εάν } V_1 < V_{ref} \quad (3.20\beta)$$

Εάν η τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη του μεγίστου επιτρεπόμενου ορίου, τότε η τάση V_W ρυθμίζει την ελεγχόμενη τάση V_1 μέχρις ότου να την φτάσει στην τιμή αναφοράς (3.20α), ενώ εάν η υψηλή τάση V_1 είναι μικρότερη της τάσεως αναφοράς V_{ref} (3.20β), τότε η τάση V_W ρυθμίζει το ρεύμα του μετατροπέα στη μέγιστη τιμή. Με αυτόν τον τρόπο το ρεύμα δεν υπερβαίνει ποτέ τη μέγιστη τιμή του.

Ο έλεγχος της τάσεως ή του ρεύματος (Σχέσεις 3.20) πραγματοποιείται στη παρούσα εργασία με διακριτό τρόπο. Συνεπώς, οι ισότητες στις εξισώσεις (3.20) δεν επιβάλλονται ακριβώς, αλλά με μία μικρή ανοχή ε . Έτσι, για τον έλεγχο της τάσεως εισάγεται μια νεκρή ζώνη εύρους 2ε ως εξής:

$$V_{ref} - \varepsilon < V_1 < V_{ref} + \varepsilon \quad (3.21)$$

Οι Σχέσεις (3.20) μέσω της (3.21) μετασχηματίζονται ως εξής (όταν $flag = 1$ και άρα $I_W \leq I_{max}$):

$$V_W = V_W - \Delta V_W, \quad \text{εάν } V_1 > V_{1ref} + \varepsilon \quad (3.22\alpha)$$

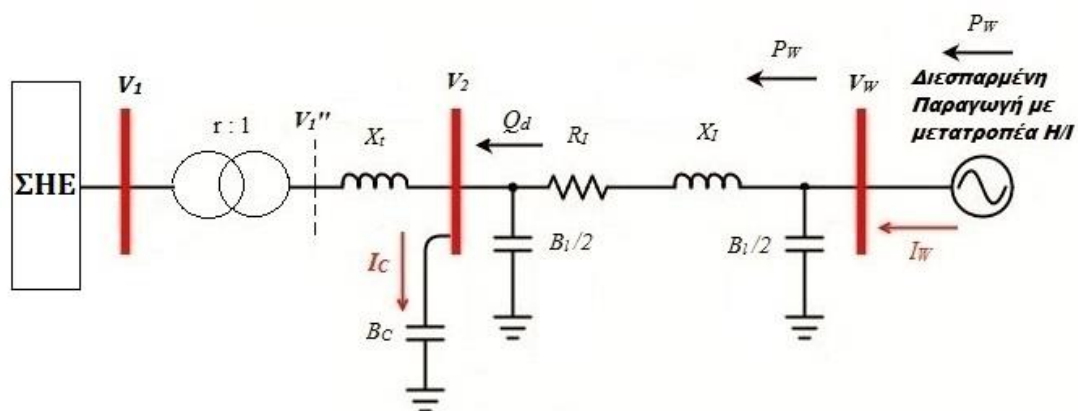
$$V_W = V_W + \Delta V_W, \quad \text{εάν } V_1 < V_{1ref} - \varepsilon \quad (3.22\beta)$$

Για τον έλεγχο του ρεύματος δεν επιτρέπεται υπέρβαση του μεγίστου επιτρεπόμενου ορίου, I_{max} , συνεπώς ο έλεγχος υλοποιείται ως εξής (όταν $flag = 0$):

$$V_W = V_W - \Delta V_W, \quad \text{εάν } I_W > I_{max} \quad (3.23)$$

Σημειώνεται τέλος ότι ο περιοριστής ρεύματος δρα ακαριαία, αφού μεταβάλλει την τιμή του ρεύματος και δεν επιτρέπει στο ρεύμα του μετατροπέα να υπερβεί τη μέγιστη τιμή του.

3.3 Μέθοδος Προσομοίωσης Γραμμής Διανομής/Μετατροπέα



Σχήμα 3.4 Μονογραμμικό Διάγραμμα Γραμμής Σύνδεσης Διεσπαρμένης Παραγωγής

Το σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει την γενική δομή που φαίνεται στο Σχ. 3.4. Αποτελείται από μία γραμμή διανομής συνδεδεμένη στο μέσο ενός δικτύου μεταφοράς. Το συγκεκριμένο σχετικά ασθενές δίκτυο που θα εξεταστεί αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.

Το δίκτυο σύνδεσης κάθε πάρκου περιλαμβάνει ένα μετασχηματιστή ισχύος εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, η χρονική καθυστέρηση του οποίου ορίζεται για την παρούσα προσομοίωση ίση με ΔT_k για κάθε κίνηση, συμπεριλαμβανομένου και της αρχικής. Τα όρια του λόγου μετασχηματισμού r ορίζονται ως r_{min} και r_{max} και το βήμα του ως Δr . Η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή ορίζεται ως X_t . Η υπό έλεγχο τάση είναι η V_2 της πλευράς μέσης τάσης του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και το εύρος ζώνης d της έχει οριστεί ίσο με το διπλάσιο του βήματος του λόγου μετασχηματισμού.

Το σύστημα περιλαμβάνει επίσης συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης με αγωγιμότητα B_C , συνδεδεμένες στον ζυγό μέσης τάσης V_2 . Η χρονική καθυστέρηση ζεύξης ή απόζευξης κάθε συστοιχίας ορίζεται ως T_{msc} .

Τέλος, το δίκτυο σύνδεσης του Σχ.3.4 περιλαμβάνει το Αιολικό Πάρκο και την γραμμή διανομής μέσης τάσης με συνολική ωμική αντίσταση R_l και συνολική επαγωγική αντίδραση X_l .

Οι εξισώσεις δικτύου του Σχ. 3.4 συμβολίζονται συνοπτικά ως εξής:

$$\begin{aligned} V_1 &= g_1(V_w, P_w, r, B_C) \\ V_2 &= g_2(V_w, P_w, r, B_C) \\ Q_d &= g_3(V_w, P_w, r, B_C) \\ I_w &= g_4(V_w, P_w, r, B_C) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Δηλαδή, τα μεγέθη V_1 , V_2 , Q_d και I_w προσδιορίζονται όταν είναι δεδομένα τα V_w, P_w, r και B_C .

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου προσομοίωσης του συστήματος του Σχ.3.4 πραγματοποιήθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Η προσομοίωση γίνεται σε διακριτά βήματα με βάση την περίοδο λειτουργίας του ΣΑΤΥΦ, μιας και αυτή αποτελεί την μικρότερη περίοδο αλλαγής των μεταβλητών του συστήματος (μακροπρόθεσμη χρονική κλίμακα).

Σε κάθε χρονικό βήμα t_k , ακολουθούνται τα παρακάτω αλγοριθμικά βήματα:

Βήμα 1: Επιλύονται οι εξισώσεις δικτύου (Εξισώσεις 3.24) με δεδομένη την τάση V_w του μετατροπέα, την ενεργό ισχύ που εγχέεται από το Αιολικό Πάρκο P_w , τον λόγο μετασχηματισμού τους ΣΑΤΥΦ r και την συνολική αγωγιμότητα των πυκνωτών που έχουν συνδεθεί στο ζυγό μέσης τάσης, $B_{C_{total}}$. Οι ακριβείς εξισώσεις εξαρτώνται από τη δομή του εξεταζόμενου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (Σχ. 3.4) και για το συγκεκριμένο σύστημα δοκιμής που θα χρησιμοποιηθεί παρατίθενται στην ενότητα 4.4. Η λογική μεταβλητή $flag$ που ορίστηκε στην Σχέση (3.20) έχει αρχική τιμή 1 ($flag = 1$), οπότε θεωρείται αρχικά ενεργός ο έλεγχος της τάσης. Επίσης, οι μεταβλητές t_{tc} και t_c έχουν αρχική τιμή 0, ως μετρητές χρονικής καθυστέρησης.

Βήμα 2: Όταν $flag = 1$ υλοποιούνται διαδοχικά οι εξισώσεις (3.22) έως ότου επιτευχθεί η σχέση (3.21). Εάν ο ανισωτικός περιορισμός (Σχέση 3.20α) παραβιάζεται, δηλαδή $I_w > I_{max}$, τότε η λογική μεταβλητή $flag$ παίρνει τιμή 0 (Σχέση 3.20β), οπότε ενεργοποιείται ο έλεγχος του ρεύματος και ακολουθεί το Βήμα 3. Το Βήμα 2 επαναλαμβάνεται χωρίς να προχωράει ο χρόνος ($t = t_k$) ως εξής:

Όσο $(V_1 < V_{1ref} - \varepsilon)$ και $(flag = 1)$
 $V_W = V_W + \Delta V_W$
 Επίλυση Εξισώσεων (3.24)
 Εάν $(I_W > I_{max})$
 $flag = 0$

τέλος

τέλος

Όσο $(V_1 > V_{1ref} + \varepsilon)$ και $(flag = 1)$
 $V_W = V_W - \Delta V_W$
 Επίλυση Εξισώσεων (3.24)
 Εάν $(I_W > I_{max})$
 $flag = 0$

τέλος

τέλος

Βήμα 3: Όταν $flag = 0$ υλοποιείται διαδοχικά η εξίσωση (3.23) έως ότου επιτευχθεί ο ανισωτικός περιορισμός (Σχέση 3.20α). Όταν η τάση V_1 υπερβεί τη νεκρή της ζώνη και άρα εισέλθει εντός των επιθυμητών ορίων, η λογική μεταβλητή $flag$ παίρνει την τιμή 1 ($flag = 1$) οπότε γίνεται εκ νέου ενεργός ο έλεγχος της τάσης και επαναλαμβάνεται το Βήμα 2. Το Βήμα 3 επαναλαμβάνεται χωρίς να προχωράει ο χρόνος ($t = t_k^-$) ως εξής:

Όσο $(I_W > I_{max})$ και $(flag = 0)$
 $V_W = V_W - \Delta V_W$
 Επίλυση Εξισώσεων (3.24)
 Εάν $(V_1 > V_{1ref} - \varepsilon)$
 $flag = 1$

τέλος

τέλος

Βήμα 4: Υλοποιούνται οι εξισώσεις (3.17) μέσω του ελέγχου της τάσης διανομής του υποσταθμού μέσης τάσης V_2 . Το Βήμα 4 μπορεί να επενεργήσει μέχρι μία φορά σε κάθε χρονικό βήμα, χωρίς να προχωράει ο χρόνος ($t = t_k^+$), ως εξής:

Εάν $(V_2 > V_{2o} + \frac{d}{2})$ και $(r < r_{max})$
 Εάν $t_{ltc} = \Delta T_k$
 $r = r + \Delta r$
 Επίλυση Εξισώσεων (3.24)

αλλιώς

$t_{ltc} = t_{ltc} + \Delta T_k$

τέλος

αλλιώς_εάν $(V_2 < V_{2o} - \frac{d}{2})$ και $(r > r_{min})$
 Εάν $t_{ltc} = \Delta T_k$
 $r = r - \Delta r$
 Επίλυση Εξισώσεων (3.24)

αλλιώς

$t_{ltc} = t_{ltc} + \Delta T_k$

τέλος

αλλιώς

$t_{ltc} = 0$

τέλος

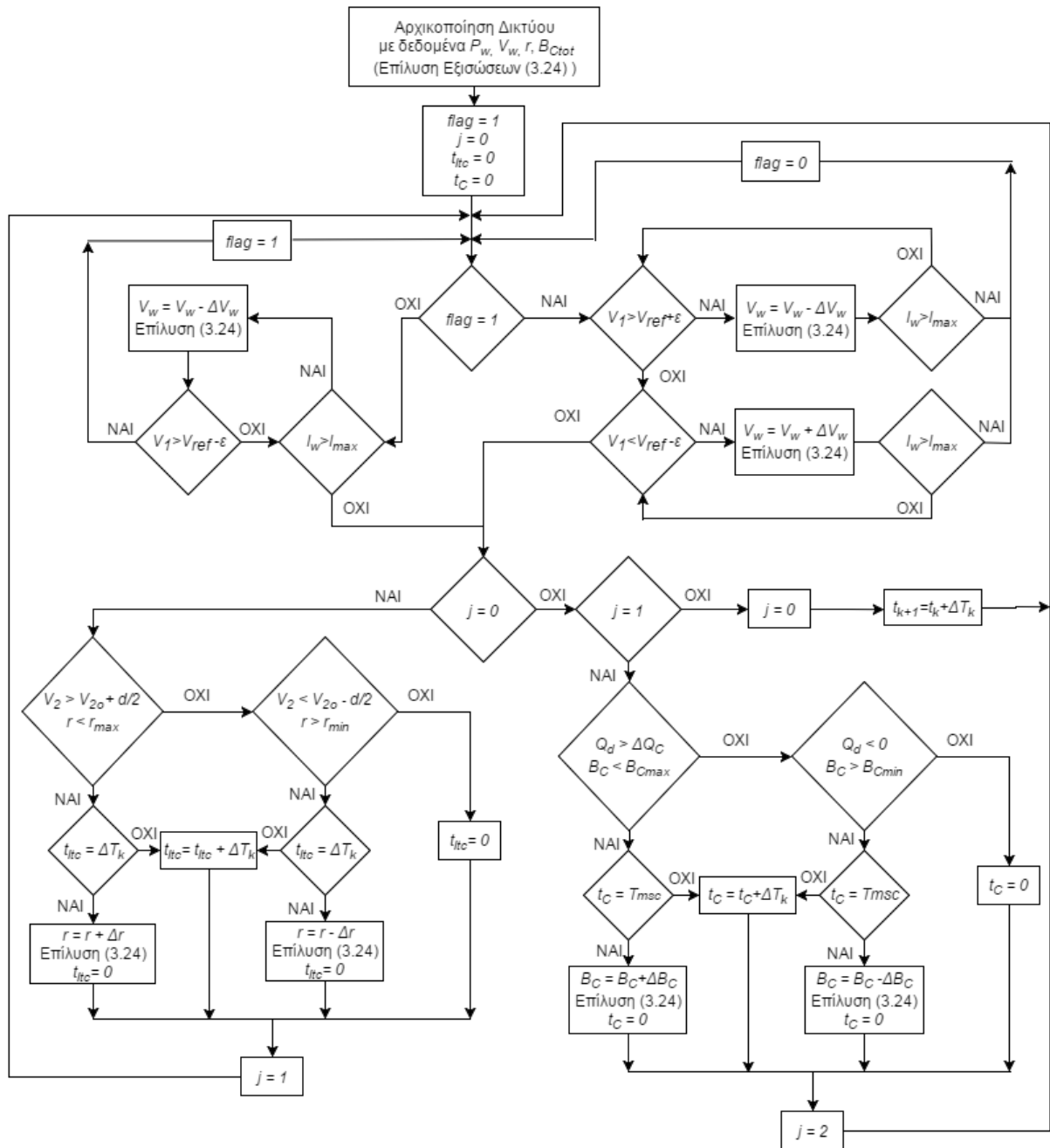
Με το πέρας του Βήματος 4 γίνεται επανέλεγχος των συνθηκών των Βημάτων 2 ή 3 (ανάλογα με την τιμή της λογικής μεταβλητής $flag$).

Βήμα 5: Υλοποιούνται οι εξισώσεις (3.18) μέσω του ελέγχου της ροής αέργου ισχύος Q_d . Το Βήμα 5 μπορεί να επενεργεί μία φορά, χωρίς να προχωράει ο χρόνος ($t = t_k^{++}$), ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \text{Εάν } (Q_d > \Delta Q_C) \text{ και } (B_C < B_{C_{max}}) \\
 & \quad \text{Εάν } t_C = T_{msc} \\
 & \quad B_C = B_C + \Delta B_C \\
 & \quad \text{Επίλυση Εξισώσεων (3.24)} \\
 & \quad \text{αλλιώς} \\
 & \quad t_C = t_C + \Delta T_k \\
 & \quad \text{τέλος} \\
 & \text{αλλιώς_εάν } (Q_d < 0) \text{ και } (B_C > B_{C_{min}}) \\
 & \quad \text{Εάν } t_C = T_{msc} \\
 & \quad B_C = B_C - \Delta B_C \\
 & \quad \text{Επίλυση Εξισώσεων (3.24)} \\
 & \quad \text{αλλιώς} \\
 & \quad t_C = t_C + \Delta T_k \\
 & \quad \text{τέλος} \\
 & \text{αλλιώς} \\
 & \quad t_C = 0 \\
 & \text{τέλος}
 \end{aligned}$$

Με το πέρας του Βήματος 5 γίνεται επανέλεγχος των συνθηκών των Βημάτων 2 ή 3 (ανάλογα με την τιμή της λογικής μεταβλητής $flag$) και ολοκληρώνεται η χρονική στιγμή t_k (μία περίοδος της προσομοίωσης).

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου της προσομοίωσης:



Σχήμα 3.5 Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Προσομοίωσης

4

Τοπικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής

Ενέργειας με Διεσπαρμένη Παραγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα απλό σύστημα δοκιμών και αξιολογείται η ικανότητα άεργης υποστήριξης από τη διεσπαρμένη παραγωγή. Ειδικότερα, η αύξηση της μέγιστης ενεργού μεταφοράς ισχύος κατά μήκος ενός ασθενούς διαδρόμου υπολογίζεται για δύο διαφορετικές διασυνδετικές γραμμές διανομής, που αναφέρονται σε δύο διαφορετικά Αιολικά Πάρκα. Γίνεται η παραδοχή ότι στην πλευρά υψηλής τάσης (ΥΤ) του μετασχηματιστή, η τάση ελέγχεται από την διεσπαρμένη πηγή αέργου ισχύος. Είναι φανερό ότι η αύξηση του περιθωρίου ευστάθειας στην περίπτωση χαμηλής έγχυσης ενεργού ισχύος από τη διεσπαρμένη παραγωγή είναι ανάλογη προς την ονομαστική φόρτιση του μετατροπέα.

4.1 Σύστημα Πελοποννήσου-Ανάλυση Ευστάθειας Τάσης

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

Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην βόρεια Ελλάδα το 2004 ήταν περίπου 10700 MW, με το 48% να βασίζεται σε καύση λιγνίτη, το 29% σε υδροηλεκτρική παραγωγή, το 14% σε καύση φυσικού αερίου, το 7% σε καύση πετρελαίου και το 2% σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η εγκατεστημένη παραγόμενη ισχύς στην νότια Ελλάδα ήταν περίπου 2860 MW, με τη μεγαλύτερη συμμετοχή να λαμβάνουν τα εργοστάσια στο Λαύριο, τον Άγιο Γεώργιο, το Αλιβέρι και το εργοστάσιο της Μεγαλόπολης στην Πελοπόννησο [12].

Το σύστημα μεταφοράς αποτελείται κυρίως από γραμμές των 400 kV της υπέρ-υψηλής τάσης (ΥΥΤ) και των 150 kV της υψηλής (ΥΤ) (οι γραμμές των 66 kV είναι ελάχιστες). Το δίκτυο διανομής λειτουργεί στο επίπεδο των 20 kV και χαρακτηρίζεται ως μέση τάση (ΜΤ). Οι υποσταθμοί διανομής (ΥΤ/ΜΤ) είναι εξοπλισμένοι με μετασχηματιστές 150/20 kV, με λειτουργία Συστήματος Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) για τον έλεγχο της τάσης στο δευτερεύον τύλιγμα. Οι μετασχηματιστές ανύψωσης των γεννητριών έχουν σταθερές λήψεις και οι αυτομετασχηματιστές 400/150 kV έχουν ΣΑΤΥΦ χωρίς αυτόματη ρύθμιση που λειτουργούν με χειρισμό. Οι ανάγκες για αντιστάθμιση αέργου ισχύος καλύπτονται με την εγκατάσταση στατών πυκνωτών και πηνίων. Συστοιχίες πυκνωτών συνολικής ισχύος 4150 MVA_r είναι εγκατεστημένες στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών, ενώ έχουν εγκατασταθεί και επιπρόσθετες συστοιχίες ΥΤ, συνολικής ισχύος 450 MVA_r σε σταθμούς παραγωγής. Επίσης, έχουν εγκατασταθεί πηνία ΥΤ σε υποσταθμούς για την αντιμετώπιση προβλημάτων εμφάνισης υψηλών τάσεων κατά τις ώρες χαμηλού φορτίου. Τα φορτία του συστήματος βρίσκονται κατά κανόνα συγκεντρωμένα στους ζυγούς ΜΤ των υποσταθμών διανομής, ενώ υπάρχουν και βιομηχανικά φορτία συνδεδεμένα απευθείας στην ΥΤ [13].

Η μεγάλη γεωγραφική απόσταση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης αποτελεί σημαντικό πρόβλημα ασφάλειας του Συστήματος, ειδικά όσον αφορά το προς εξέταση σύστημα της Πελοποννήσου, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών με την αύξηση του φορτίου, λόγω κλιματιστικών και άλλων παρόμοιων συσκευών. Η οικονομική ύφεση του 2010 μετρίασε το παραπάνω πρόβλημα και η αιχμή του φορτίου παρουσίασε μια σχετική μείωση, η οποία αναμένεται να αυξηθεί και πάλι μελλοντικά [12]. Επιπλέον προσπάθειες για την επίλυση του προβλήματος έχουν γίνει από τη μεριά του ΑΔΜΗΕ μέχρι σήμερα, κυρίως με τη μορφή ένταξης νέων μονάδων παραγωγής στο Νότιο σύστημα, της ένταξης πυκνωτών αντιστάθμισης και της διεσπαρμένης παραγωγής [13]. Παρόλα αυτά, καθυστέρηση σημαντικών έργων, όπως η αντικατάσταση των γραμμών μεταφοράς της Πελοποννήσου σε επίπεδα τάσης 400 kV, δεν διευκολύνουν την κατάσταση. Επομένως, κατά καιρούς, το Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα ήρθε αντιμέτωπο με αρκετές κρίσιμες καταστάσεις λειτουργίας, με τη σημαντικότερη να είναι η διακοπή (black-out) του Ιουλίου 2004 [14], ένα μήνα πριν από την έναρξη των Ολυμπιακών Αγώνων της Αθήνας.

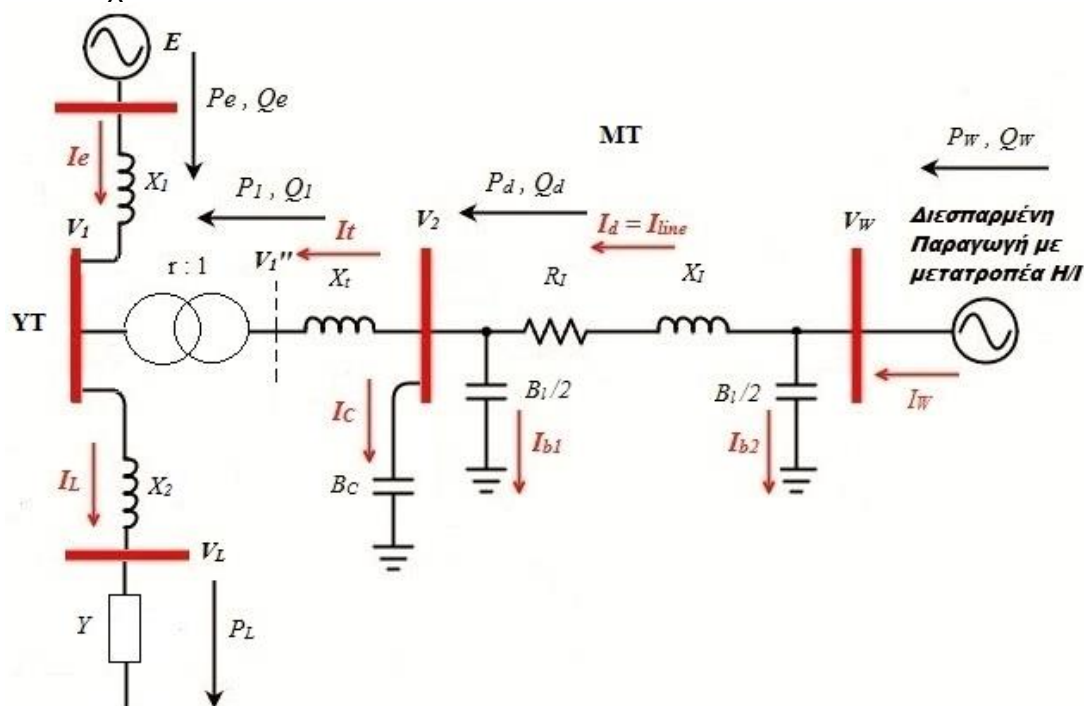
Μια προφανής λύση για το άνωθι πρόβλημα στο σύστημα της Πελοποννήσου (και γενικά στο Διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδος) αποτελεί η απόκτηση ικανοποιητικών περιθωρίων ασφάλειας του τοπικού δικτύου μετά τη διαταραχή, μέσω αύξησης του ορίου φόρτισης. Η αύξηση του ορίου φόρτισης επιτυγχάνεται μέσω άεργης υποστήριξης από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή της Πελοποννήσου και πιο συγκεκριμένα μέσω των Αιολικών Πάρκων που βρίσκονται εγκατεστημένα στην περιοχή. Τα Αιολικά Πάρκα μπορούν να αντισταθμίσουν ενδεχόμενη αστάθεια τάσης μέσω της κατάλληλης έγχυσης αέργου ισχύος, κάτι το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμη κι αν τα Αιολικά Πάρκα δεν βρίσκονται εντός λειτουργίας, μέσω των μετατροπών ισχύος που διαθέτουν.

4.2 Γενική Δομή Τοπικού Συστήματος

4.2.1 Δομή Συστήματος

Το σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία έχει τη γενική δομή που φαίνεται στο Σχ. 4.1. Αποτελείται από μία γραμμή διανομής συνδεδεμένη στο μέσο ενός αδύναμου δικτύου μεταφοράς, που αντιπροσωπεύεται από δύο ίσες αντιδράσεις

$X_1=X_2=X$ στην πλευρά της πηγής και του φορτίου του σημείου κοινής σύνδεσης αντίστοιχα.



Σχήμα 4.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Γραμμής Σύνδεσης Διεσπαρμένης Παραγωγής

Ως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1 ,το σύστημα μεταφοράς περιλαμβάνει μία σταθερή πηγής τάσης E , η οποία αντιπροσωπεύει το ισοδύναμο Thevenin ενός διασυνδεδεμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και περιλαμβάνει ένα απομακρυσμένο φορτίο. Το φορτίο θεωρείται ως μία μεταβλητή αγωγιμότητα απευθείας συνδεδεμένη στον ζυγό φορτίου υψηλής τάσης V_L .

4.2.2 Δεδομένα Δικτύου Σύνδεσης

Το δίκτυο σύνδεσης κάθε πάρκου αποτελείται από:

- Τον ζυγό Υψηλής Τάσης των $150kV$ και τον ζυγό Μέσης Τάσης των $20kV$.
- Ένα μετασχηματιστή ισχύος $50MVA$, $150/20kV$ εξοπλισμένο με ΣΑΤΥΦ, η χρονική καθυστέρηση του οποίου ορίζεται για την παρούσα προσομοίωση ίση με ΔT_k για κάθε κίνηση, συμπεριλαμβανομένου και της αρχικής (Πίνακας 4.1). Τα όρια του λόγου μετασχηματισμού r ορίζονται ως r_{min} και r_{max} και το βήμα του ως Δr . Η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή ορίζεται ως X_t και για τα δύο Αιολικά Πάρκα, στην ονομαστική ισχύ. Η υπό έλεγχο τάση είναι η V_2 της πλευράς MT του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή και το εύρος ζώνης d της έχει οριστεί ίσο με το βήμα του μετασχηματιστή.
- Τρεις συστοιχίες πυκνωτών αντιστάθμισης, αγωγιμότητας B_C η καθεμία, συνδεδεμένες στον ζυγό μέσης τάσης V_2 . Η χρονική καθυστέρηση ζεύξης ή απόζευξης των συστοιχιών ορίζεται στα T_{msc} για την αποφυγή αλληλεπίδρασης με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ.
- Μια γραμμή διανομής $20kV$ με συνολική ωμική αντίσταση R_l και συνολική επαγωγική αντίδραση X_l .
- Η βάση ισχύος στην οποία είναι ανηγμένα όλα τα μεγέθη, ισούται με $S_B = 100MVA$.

- Τον ζυγό ΜΤ V_w στον οποίο συνδέεται το Αιολικό Πάρκο.
- Οι δύο αντιδράσεις X_1, X_2 στην πλευρά της πηγής και του φορτίου του σημείου κοινής σύνδεσης αντίστοιχα είναι ίσες, $X_1 = X_2 = X$.
- Το φορτίο υπόκειται σε μια συνεχή μεταβολή σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης ΔG ανά περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή ανά 10s. Για λόγους απλότητας, θεωρούμε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος.

Στους ακόλουθους πίνακες δίνονται τα αριθμητικά δεδομένα της προσομοίωσης, όσον αφορά τους Ρυθμιστές και τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου της εργασίας (Πίνακας 4.1), τα δεδομένα των δύο Αιολικών Πάρκων (Πίνακας 4.2) και τέλος τα δεδομένα του σημείου αναφοράς του δικτύου (Πίνακας 4.3).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Δεδομένα Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου ($S_B=100MVA$)

ΔG (%)	ΔT (s)	Δr (%)	r_{min} (αμ)	r_{max} (αμ)	ΔT_k (s)	B_C (αμ)	T_{msc} (s)	Q_d (αμ)	V_{Wmax} (αμ)	ΔV_w (%)	V_{1lim} (αμ)
0.01	10	0.625	0.8	1.2	10	0.04	60	0,04	1.1	0,1	0.9

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 Δεδομένα Γραμμών Σύνδεσης Α/Π Ελίκης και Διδύμων ($S_B=100MVA$)

Αιολικό Πάρκο	S_n (MVA)	P_w (MW)	$X_1=X_2=X$ (αμ)	X_t (αμ)	R_l (αμ)	X_l (αμ)	B_l (%)	ΔV (%)	ΔV_2 (%)
Ελίκη	18.9	2.1	0.2	0.4	0.431	1.0	0,0411	0.1	0.625
Δίδυμα	36	1.76	0.2	0.4	0.015	0.2	0	0.1	0.625

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3 Αρχικοποίηση-Σημείο Αναφοράς Δικτύου ($S_B=100MVA$)

Α/Π	P_{Lo} (αμ)	r_o (αμ)	V_{1o} (αμ)	V_{1max} (αμ)	V_{1min} (αμ)	V_{2o} (αμ)	V_{2max} (αμ)	V_{2min} (αμ)	V_{wo} (αμ)
1	0	0.99375	0.9722	0.9732	0.9712	0.9821	0.9883	0.9758	1
2	0	0.98750	0.9808	0.9818	0.9798	0.9990	1.0052	0.9927	1

4.3 Αιολικά Πάρκα Ελίκης και Διδύμων

Θεωρούνται δύο διαφορετικές γραμμές διανομής που συνδέουν Αιολικά Πάρκα εξοπλισμένα με ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών. Τα δεδομένα των δύο γραμμών αφορούν δύο πραγματικά εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα στο σύστημα της Πελοποννήσου και συγκεκριμένα το Α/Π της Ελίκης και το Α/Π των Διδύμων, όπως συνοψίζονται και στον Πίνακα 4.2 [17]. Τα ονομαστικά επίπεδα των Α/Π εμφανίζονται επίσης στον Πίνακα 4.2, μαζί και με τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας των δύο γραμμών διανομής. Προφανώς οποιαδήποτε άλλη διασυνδετική γραμμή με ελεγχόμενη έγχυση ενεργού και αέργου ισχύος θα είχε παρόμοια συμπεριφορά.

Τα δύο εξεταζόμενα Αιολικά Πάρκα της Πελοποννήσου παρουσιάζουν τις ακόλουθες διαφορές, οι οποίες αποτελούν και τον λόγο επιλογής για παρατήρηση της συμπεριφοράς τους: Το Αιολικό Πάρκο των Διδύμων είναι μεγάλης ονομαστικής ισχύος ($S_n=36MW$), συνδέεται απευθείας στον υποσταθμό μέσης τάσης (μήκος γραμμής 0km) και ως εκ τούτου οι συνολικές αντιδράσεις της γραμμής έχουν μικρή ανά μονάδα τιμή. Αντιθέτως, το αιολικό πάρκο της Ελίκης είναι μικρότερης ονομαστικής ισχύος ($S_n=18.9MW$), δεν βρίσκεται απευθείας συνδεδεμένο στον υποσταθμό μέσης τάσης (μήκος γραμμής 15km) και ως εκ τούτου οι συνολικές αντιδράσεις της γραμμής έχουν μεγαλύτερη ανά μονάδα τιμή από το πάρκο των Διδύμων.

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4.2 , και στις δύο περιπτώσεις η ενεργός παραγωγή από τα Α/Π είναι μικρή. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί σε ένα στιγμιότυπο καλοκαιρινού φορτίου αιχμής του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος [17]. Καθώς το μέγιστο καλοκαιρινό φορτίο στην Ελλάδα συμπίπτει κατά κανόνα με περίοδο άπνοιας, είναι σημαντικό οι λειτουργοί των Α/Π να έχουν επαρκή κίνητρα ώστε να κρατήσουν τις ανεμογεννήτριές σε λειτουργία με σχεδόν μηδενική ενεργό παραγωγή, ούτως ώστε να βρίσκονται σε θέση να προσφέρουν άεργη υποστήριξη.

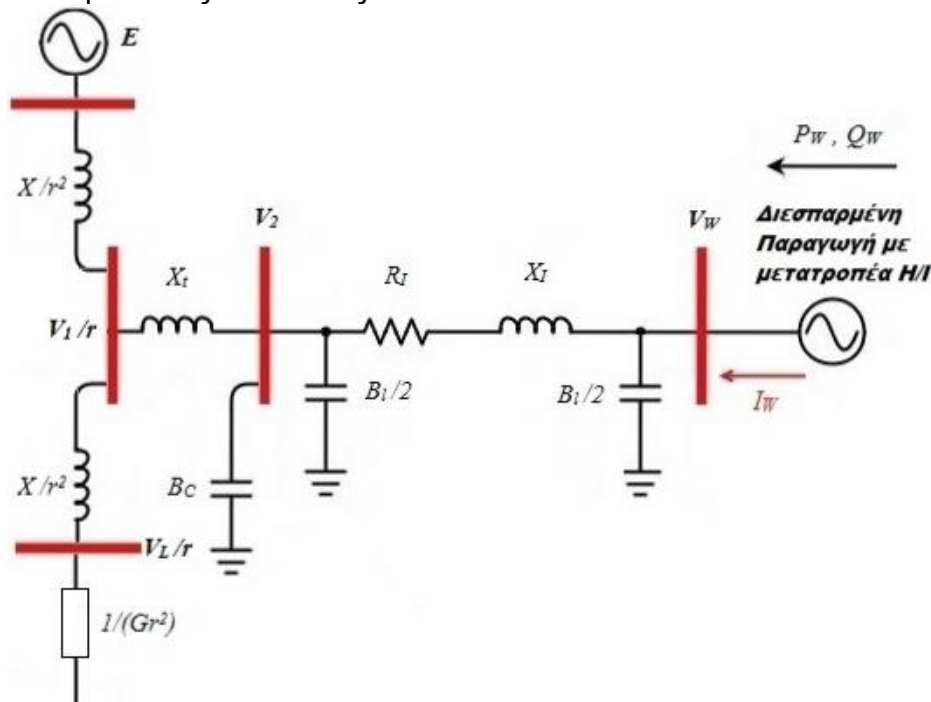
Στην περίπτωση των Ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με πλήρη μετατροπέα (Full-scale Frequency Converter (FC)), η οποία είναι η περίπτωση του Α/Π της Ελίκης, άεργη υποστήριξη μπορεί να παρέχεται ακόμη και αν οι γεννήτριες δεν λειτουργούν, υπό την προϋπόθεση ότι μπορούν να αποσυνδεθούν από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Στην περίπτωση, όμως, Ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδότησης (Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)), η οποία είναι η περίπτωση του Α/Π των Διδύμων, όλες οι ανεμογεννήτριες πρέπει να λειτουργούν για να παρέχουν την ζητούμενη άεργη υποστήριξη.

4.4 Κατάστροση κι Επίλυση Εξισώσεων Συστήματος

Οι γενικές εξισώσεις δικτύου που περιγράφηκαν στην ενότητα 3.3 (Σχέσεις 3.24) αναλύονται με ακρίβεια σε αυτή την ενότητα για το συγκεκριμένο τυπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στην εργασία (Σχ. 4.1).

Ο υπολογισμός της αέργου ισχύος Q_W των Αιολικών Πάρκων θα περιγραφεί στη συνέχεια, έχοντας θεωρηθεί, όπως αναφέρθηκε, ότι η ενεργός ισχύς P_W , που εγχέεται από τα δύο Α/Π είναι σταθερή και ίση με την τιμή που αναγράφεται στον Πίνακα 4.2.

Η τάση V_W των Α/Π θεωρείται μεταβλητή εισόδου και προσαρμόζεται σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, ανάλογα με τον τύπο ρύθμισης που ακολουθούμε. Ως εκ τούτου, αποτελεί στην αρχή κάθε επανάληψης του αλγορίθμου δεδομένη μεταβλητή κι έτσι προσομοιώνεται ως μία πηγή τάσης. Ο υπολογισμός επομένως της αέργου ισχύος Q_W των Α/Π γίνεται ως ακολούθως.

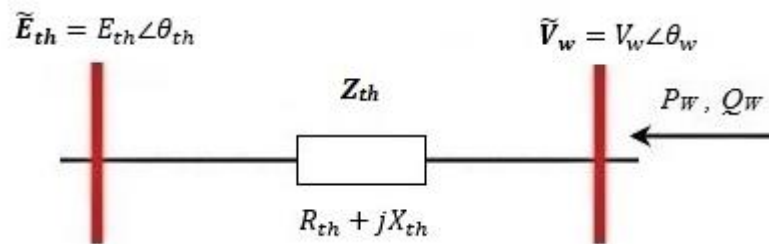


Σχήμα 4.2 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Ανηγμένο στο Δευτερεύον του Μ/Σ (ΜΤ)

4.4.1 Αναγωγή Thevenin από την πλευρά της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Αρχικά ανάγεται το σύστημα του Σχήματος 4.1 στην πλευρά ΜΤ (Σχ. 4.2). Για τον υπολογισμό της αέργου παραγωγής Q_W από τον μετατροπέα της διεσπαρμένης παραγωγής απαιτείται να γίνει το ισοδύναμο Thevenin από την μεριά της Διεσπαρμένης Παραγωγής, όπως φαίνεται από το ζυγό ΜΤ της ΔΠ (Σχ. 4.3).

Τα Α/Π που εξετάζουμε έχουν σταθερή ενεργό ισχύ και τάση κατά μέτρο σε κάθε χρονική περίοδο, για αυτό και θεωρούνται ως ζυγοί παραγωγής (PV ζυγοί). Ως εκ τούτου, μπορούμε να υπολογίσουμε το ισοδύναμο Thevenin του συστήματος ανηγμένο στην μεριά της πηγής τάσεως V_W ως ακολούθως:



Σχήμα 4.3 Ισοδύναμο Thevenin ΣΗΕ από την μεριά της Διεσπαρμένης Παραγωγής

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thevenin (Z_{TH}), θεωρείται η πηγή \tilde{E} βραχυκυκλωμένη, οπότε συνδέονται παράλληλα η αντίδραση X_1 με την σύνθετη αντίσταση που απαρτίζεται από το φορτίο και την X_2 , που όπως αναφέρθηκε η X_1 και η X_2 είναι ίσες με X . Ως εκ τούτου έχουμε:

$$Z_o = \frac{jX}{r^2} // \left(\frac{jX}{r^2} + \frac{1}{Gr^2} \right) = \frac{1}{r^2} \left[jX // \left(jX + \frac{1}{G} \right) \right] \quad (4.1)$$

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2, η σύνθετη αντίσταση Z_o συνδέεται εν σειρά με την αντίδραση του μετασχηματιστή X_t , επομένως:

$$Z_1 = Z_o + jX_t \quad (4.2)$$

Ακολούθως, παρατηρείται ότι η σύνθετη αντίσταση Z_1 συνδέεται παράλληλα με την αγωγιμότητα $B_l/2$ της γραμμής και την αγωγιμότητα των συστοιχιών πυκνωτών B_c που έχουν συνδεθεί στον ζυγό ΜΤ, κι έτσι:

$$Z_2 = Z_1 // \left(\frac{1}{jB_c} + \frac{2}{B_l} \right) = \frac{\left(\frac{Z_1}{j(B_c + \frac{B_l}{2})} \right)}{Z_1 + \frac{1}{j(B_c + \frac{B_l}{2})}} \quad (4.3)$$

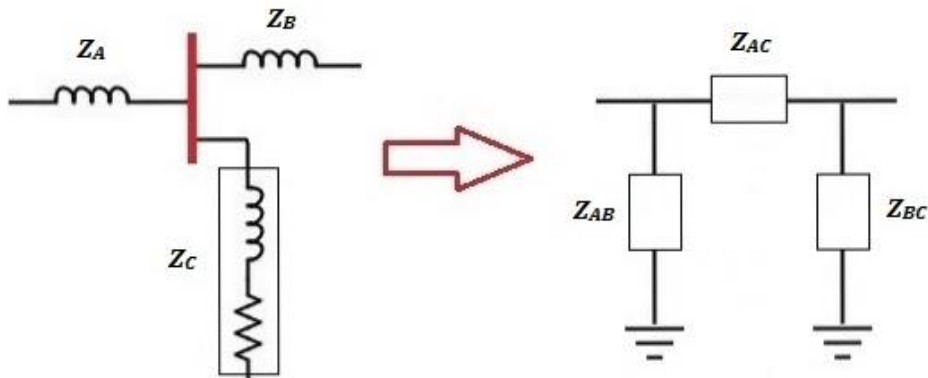
Έπειτα, η σύνθετη αντίσταση Z_2 συνδέεται παράλληλα με την συνολική αντίσταση και αντίδραση της γραμμής μέσης τάσης, επομένως:

$$Z_3 = Z_2 + (R_l + jX_l) \quad (4.4)$$

Τέλος, η σύνθετη αντίσταση Z_3 συνδέεται παράλληλα με την αγωγιμότητα $B_l/2$ της γραμμής, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2. Ως εκ τούτου έχουμε τελικά:

$$Z_{TH} = Z_3 // \left(\frac{2}{jB_l} \right) = \frac{\left(\frac{2Z_3}{jB_l} \right)}{Z_3 + \frac{2}{jB_l}} = Z_{TH} \angle \gamma \quad (4.5)$$

Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης τάσης Thevenin (\tilde{E}_{th}), αρχικά εφαρμόζουμε μετατροπή αστέρα σε τρίγωνο (Σχήματα 4.2,4.4) για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την επιθυμητή τάση Thevenin με απλή χρήση διαιρέτη τάσης ως ακολούθως:



Σχήμα 4.4 Μετατροπή Αστέρα σε Τρίγωνο της μεριάς ΥΤ

όπου

$$Z_A = \frac{jX}{r^2} \quad (4.6)$$

$$Z_B = \frac{jX}{r^2} + \frac{1}{Gr^2} \quad (4.7)$$

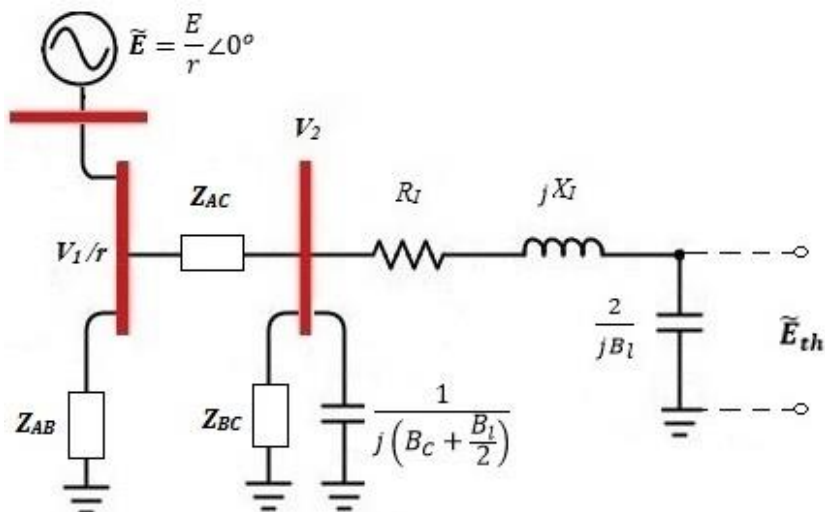
$$Z_C = jX_t \quad (4.8)$$

και

$$Z_{AC} = Z_A + Z_C + \frac{Z_A Z_C}{Z_B} \quad (4.9)$$

Τα Z_{AB} και Z_{BC} προκύπτουν αντίστοιχα με εναλλαγή των δεικτών, όπως είναι γνωστό.

Ως εκ τούτου, το σύστημά μας μετασχηματίζεται τελικά ως εξής (Σχήμα 4.5):



Σχήμα 4.5 Μετασχηματισμένο Σύστημα για υπολογισμό \tilde{E}_{th}

Σύμφωνα με το Σχήμα 4.5, η σύνθετη αντίσταση Z_{BC} συνδέεται παράλληλα με την αγωγιμότητα $B_l/2$ της γραμμής και την αγωγιμότητα των συστοιχιών πυκνωτών B_C που έχουν συνδεθεί στον ζυγό ΜΤ, κι έτσι:

$$Z_{01} = Z_{BC} // \frac{1}{j(B_C + \frac{B_l}{2})} = \frac{\frac{Z_{BC}}{j(B_C + \frac{B_l}{2})}}{Z_{BC} + \frac{1}{j(B_C + \frac{B_l}{2})}} \quad (4.10)$$

Εν συνεχεία, παρατηρείται ότι η σύνθετη αντίσταση Z_{01} συνδέεται παράλληλα με την συνολική αντίσταση και αντίδραση της γραμμής μέσης τάσης, καθώς και με την αγωγιμότητα $B_l/2$ της γραμμής. Επομένως:

$$Z_{02} = Z_{01} // (R_l + jX_l + \frac{2}{jB_l}) = \frac{Z_{01} (R_l + jX_l + \frac{2}{jB_l})}{Z_{01} + R_l + jX_l + \frac{2}{jB_l}} \quad (4.11)$$

Εφαρμόζοντας ακολούθως διαιρέτη τάσης προκύπτει:

$$\tilde{V}_2 = \frac{Z_{02}}{Z_{02} + Z_{AC}} \tilde{E} = \frac{Z_{02}}{Z_{02} + Z_{AC}} \frac{E}{r} \quad (4.12)$$

Άρα, τελικά, η τάση Thevenin ισούται με:

$$\tilde{E}_{th} = \frac{\frac{2}{jB_l}}{R_l + jX_l + \frac{2}{jB_l}} \tilde{V}_2 \quad (4.13)$$

Μέσω του υπολογισμού του ισοδύναμου Thevenin που υλοποιήσαμε πρωτίστως, ανάγουμε το σύστημά μας στην μορφή του Σχήματος 4.3. Υπολογίζουμε εν συνεχεία επομένως τη μιγαδική ισχύ των Αιολικών Πάρκων ως εξής:

$$\begin{aligned} S_w &= \tilde{V}_w \tilde{I}_w^* = \tilde{V}_w \frac{(\tilde{V}_w - \tilde{E}_{th})^*}{Z_{th}^*} = \frac{V_w^2 - \tilde{V}_w \tilde{E}_{th}^*}{Z_{th}^*} = \frac{V_w^2 - (V_w \angle \theta_w) (E_{th} \angle -\theta_{th})}{Z_{th} \angle -\gamma} \\ &= \frac{V_w^2 - (V_w E_{th}) \angle (\theta_w - \theta_{th})}{Z_{th} \angle -\gamma} = \frac{V_w^2 - (V_w E_{th}) \angle (\theta_w - \theta_{th})}{Z_{th} \angle -\gamma} \end{aligned}$$

Θεωρώντας ακολούθως ότι [18]:

$$\beta = \pi/2 - \gamma \quad (4.14)$$

και

$$\Delta\theta = \theta_{th} - \theta_w \quad (4.15)$$

τελικά προκύπτει:

$$\begin{aligned} S_w &= \frac{V_w^2}{Z_{th}} \angle \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) - \frac{V_w E_{th}}{Z_{th}} \angle \left(\frac{\pi}{2} - (\Delta\theta + \beta) \right) = \\ &= \frac{V_w^2}{Z_{th}} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) + j \sin \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \right) - \frac{V_w E_{th}}{Z_{th}} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2} - (\Delta\theta + \beta) \right) + j \sin \left(\frac{\pi}{2} - (\Delta\theta + \beta) \right) \right) \\ &= \frac{V_w^2}{Z_{th}} (\sin\beta + j\cos\beta) - \frac{V_w E_{th}}{Z_{th}} (\sin(\Delta\theta + \beta) + j\cos(\Delta\theta + \beta)) \quad (4.16) \end{aligned}$$

Ως εκ τούτου, και σύμφωνα με την αναφορά [18], η ενεργός και άεργος παραγωγή των δύο Αιολικών Πάρκων ισούται με:

$$P_w = \frac{V_w^2}{Z_{th}} \sin\beta - \frac{E_{th} V_w}{Z_{th}} \sin(\Delta\theta + \beta) = \frac{V_w^2}{Z_{th}^2} R_{th} - \frac{E_{th} V_w}{Z_{th}} \sin(\Delta\theta + \beta) \quad (4.17)$$

$$Q_w = \frac{V_w^2}{Z_{th}} \cos \beta - \frac{E_{th} V_w}{Z_{th}} \cos(\Delta\theta + \beta) = \frac{V_w^2}{Z_{th}^2} X_{th} - \frac{E_{th} V_w}{Z_{th}} \cos(\Delta\theta + \beta) \quad (4.18)$$

Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε επομένως την άεργο ισχύ Q_w , αρκεί να υπολογίσουμε την γωνία $\Delta\theta$, η οποία υπεισέρχεται στις άνωθι εξισώσεις. Έτσι, επιλύοντας ως προς αυτήν την εξίσωση (4.17), προκύπτει:

$$\Delta\theta = \arcsin \left(\frac{-P_w + R_{th} \frac{V_w^2}{Z_{th}^2}}{\frac{E_{th} V_w}{Z_{th}}} \right) - \beta \quad (4.19)$$

και άρα επιλύοντας την εξίσωση (4.18) υπολογίζουμε την επιθυμητή άεργο ισχύ.

Τέλος, η γωνία της τάσεως των Αιολικών Πάρκων, V_w , υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\theta_w = \theta_{th} - \Delta\theta \quad (4.20)$$

4.4.2 Εξισώσεις Συστήματος

Έχοντας ως δεδομένα την ενεργό ισχύ, την άεργο ισχύ, καθώς και την τάση του Αιολικού Πάρκου, P_w , Q_w και \tilde{V}_w αντίστοιχα, οι εξισώσεις του δικτύου (Σχήμα 4.1) υπολογίζονται ως ακολούθως.

Το ρεύμα του μετατροπέα, του παράλληλου κλάδου αγωγιμότητας και της γραμμής του συστήματος μεταφοράς είναι αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_w = \frac{P_w - jQ_w}{\tilde{V}_w^*} \quad (4.21)$$

$$\tilde{I}_{b2} = j \frac{1}{2} B_l \tilde{V}_w \quad (4.22)$$

$$\tilde{I}_{line} = \tilde{I}_d = \tilde{I}_w - \tilde{I}_{b2} \quad (4.23)$$

Η μέση τάση V_2 ισούται με:

$$\tilde{V}_2 = \tilde{V}_w - \tilde{I}_d (R_l + jX_l) \quad (4.24)$$

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

$$\tilde{I}_c = jB_c \tilde{V}_2 \quad (4.25)$$

$$\tilde{I}_{b1} = j \frac{1}{2} B_l \tilde{V}_2 \quad (4.26)$$

$$\tilde{I}_t = \tilde{I}_d - \tilde{I}_{b1} - \tilde{I}_c \quad (4.27)$$

Η ανηγμένη υψηλή τάση στην μεριά του δευτερεύοντος και η υψηλή τάση V_1 προκύπτουν ίσες με:

$$\tilde{V}_1'' = \tilde{V}_2 - j\tilde{I}_t X_t \quad (4.28)$$

$$\tilde{V}_1 = r \tilde{V}_1'' \quad (4.29)$$

Εν συνεχεία, η ενεργός ισχύς που εγχέεται στον ζυγό υψηλής τάσης μέσω των αιολικών πάρκων είναι:

$$P_1 = P_w - I_d^2 R_l \quad (4.30)$$

Το ρεύμα του φορτίου και το ρεύμα δικτύου είναι αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_L = \frac{\tilde{V}_1}{\frac{1}{G} + jX} \quad (4.31)$$

$$\tilde{I}_e = \frac{\tilde{I}_t}{r} - \tilde{I}_L \quad (4.32)$$

Η ενεργός ισχύς του φορτίου και του δικτύου προκύπτουν αντίστοιχα:

$$P_L = I_L^2 \frac{1}{G} \quad (4.33)$$

$$P_e = P_L - P_1 \quad (4.34)$$

Τέλος, η τάση του ζυγού του φορτίου είναι ίση με:

$$\tilde{V}_L = \tilde{V}_1 - j\tilde{I}_L X \quad (4.35)$$

4.5 Μέθοδοι Ελέγχου

4.5.1 Περιγραφή Ρυθμιστών/Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου

Οι διατάξεις και η γενικότερη στρατηγική ελέγχου που αποτελούν το μοντέλο του Σχ. 4.1 είναι οι εξής:

-Θεωρείται ότι το σύστημα υπόκειται σε ρύθμιση της υψηλής τάσης (V_1) μέσω του ελέγχου της τάσης του Αιολικού Πάρκου (V_W) με διάφορους τρόπους για τις ανάγκες της προσομοίωσης. Μία πιο πλήρης ανάλυση θα γίνει στην επόμενη ενότητα του κεφαλαίου για τις διαφορετικές αυτές ρυθμίσεις που λαμβάνουν χώρα.

-Η σύνδεση υλοποιείται μέσω ενός μετασχηματιστή 50 MVA, 150/20 kV, εξοπλισμένου με ΣΑΤΥΦ. Το ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση στην πλευρά ΜΤ (V_2) και έχει χρονική καθυστέρηση ΔT_k , για αποφυγή ακαριαίων υπερβάσεων στην πλευρά ΜΤ που ενδεχομένως να αντισταθμίζονται από άλλες μεταβολές του συστήματος ελέγχου μέσα σε αυτή τη χρονική περίοδο. Το βήμα του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ ισούται με Δr και η νεκρή του ζώνη εκτείνεται από r_{min} έως r_{max} , όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.2. Η τιμή της αντίδρασης του μετασχηματιστή είναι X_t και για τα δύο Αιολικά Πάρκα που θα ασχοληθούμε στην εργασία.

-Οι συστοιχίες των πυκνωτών βρίσκονται εγκατεστημένες στους ζυγούς ΜΤ του Υ/Σ (Σχ. 4.1) και αποτελούνται από τρεις βαθμίδες αγωγιμότητας B_c έκαστη, με συνολική επομένως δυνατότητα αντιστάθμισης $3B_c$ στον ζυγό ΜΤ. Η άεργη υποστήριξη πραγματοποιείται με την αυτόματη ζεύξη κάθε συστοιχίας, η οποία εφαρμόζεται ανάλογα με την τιμή της αέργου ισχύος μέσης τάσης. Η νεκρή ζώνη για τις συστοιχίες, η υπέρβαση της οποίας καθορίζει την στιγμή ζεύξης ή απόζευξης, ισούται με Q_d . Η χρονική καθυστέρηση για την ζεύξη ή την απόζευξη της κάθε συστοιχίας ορίζεται ως T_{msc} , έτσι ώστε να αποφευχθεί η αλληλεπίδραση με τις κινήσεις του ΣΑΤΥΦ.

-Η διάταξη ελέγχου του μετατροπέα παρακολουθεί την τιμή του ρεύματος του μετατροπέα Ηλεκτρονικών Ισχύος και προσαρμόζει την τάση του, V_W , ανάλογα με ποιά κριτήρια ικανοποιούνται. Εάν η τιμή του ρεύματος είναι μικρότερη του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου, τότε η τάση V_W ρυθμίζει την υψηλή τάση V_1 μέχρις ότου να την φτάσει στην τιμή αναφοράς, ενώ εάν η τιμή του ρεύματος υπερβεί το άνω όριο, τότε η τάση V_W ρυθμίζει το ρεύμα του μετατροπέα στη μέγιστη τιμή.

Κατά τη διάρκεια της μεταβολής του φορτίου και ως εκ τούτου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα Α/Π θεωρείται σταθερή και ίση με την τιμή που αναγράφεται στον Πίνακα 4.1.

4.5.2 Τρόποι Ελέγχου

4.5.2.1 Συνεχής Ρύθμιση Υψηλής Τάσης

Η στρατηγική συνεχούς ελέγχου της Υψηλής Τάσης διαμορφώνεται ως ακολούθως:

Η ελεγχόμενη τάση είναι η V_1 από την μεριά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή (Σχήμα 4.1). Ο έλεγχος υλοποιείται μέσω της προσαρμογής της τάσης V_W του ζυγού μέσης τάσης που συνδέεται το Αιολικό Πάρκο. Ο έλεγχος θεωρείται συνεχής και ακαριαίος, δηλαδή χωρίς καμία χρονική καθυστέρηση, και η τάση V_W υπόκειται σε έναν άνω περιορισμό, $V_W \leq V_{Wmax}$, το οποίο αποτελεί όριο υπερδιέγερσης.

Το εύρος επιθυμητών τιμών(νεκρή ζώνη) της τάσης ελέγχου V_1 ισούται με:

$$V_{1o} - \Delta V \leq V_1 \leq V_{1o} + \Delta V \quad (4.36)$$

όπου

V_{1o} : η τιμή αναφοράς της ελεγχόμενης υψηλής τάσης

$2\Delta V$: η νεκρή ζώνη ρύθμισης της τάσης V_1

Η λογική με την οποία προσαρμόζεται η τάση V_W του Α/Π τις χρονικές στιγμές t_k , δηλαδή στην εκάστοτε χρονική στιγμή που εξετάζουμε, αφού μεταβάλλεται όπως προείπαμε ακαριαία ($t_k^- \rightarrow t_k^+$), εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$\begin{aligned} V_{Wk} &= V_{Wk} + \Delta V_W, \text{ αν } V_{1k} < V_{1min} \text{ και } V_{Wk} < V_{Wmax} \\ V_{Wk} &= V_{Wk} - \Delta V_W, \text{ αν } V_{1k} > V_{1max} \text{ και } V_{Wk} < V_{Wmax} \\ V_{Wk} &= V_{Wmax}, \text{ αν } V_{Wk} \geq V_{Wmax} \end{aligned} \quad (4.37)$$

όπου

ΔV_W : βήμα μεταβολής της τάσης V_W

Ο συνεχής έλεγχος για μια μορφή προληπτικού ελέγχου, αφού, σύμφωνα με την αλλαγή του φορτίου ΔG (ράμπα), προβλέπει αρχικά όλα τα μεγέθη του δικτύου με έμφαση στην υψηλή τάση V_1 κι εν συνεχεία διορθώνει την τάση V_W ακαριαία, ούτως ώστε να βρίσκεται η μεταβλητή ελέγχου εντός νεκρής ζώνης. Έτσι, αφού είναι πολύ γρήγορος ο έλεγχος σε σχέση με τις άλλες μεταβλητές, θεωρείται ότι λειτουργεί ακαριαία όσες φορές κι αν επενεργήσει το βήμα ΔV , μέχρις ότου επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος, ή να εξαντληθούν τα όρια μεταβολής.

4.5.2.2 Εντολή Υποστήριξης Δικτύου Μεταφοράς

Προτείνεται εν συνεχεία ένα πιθανό απλουστευμένο σενάριο επικοινωνίας και στρατηγικής ελέγχου της Υψηλής Τάσης, που απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή (σε αυτή την περίπτωση από το Αιολικό Πάρκο). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι

εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς.

Το σήμα αίτησης άεργης υποστήριξης μπορεί να προέρχεται από το κέντρο ελέγχου της εκάστοτε περιοχής, από μια αυτόματη συσκευή παρακολούθησης ενός γεγονότος όπως η απώλεια της παραγωγής ή η απώλεια ενεργητικών στοιχείων της μεταφοράς, ή τέλος από μία συσκευή παρακολούθησης των συνθηκών χαμηλής τάσης του συστήματος μεταφοράς. Σε κάθε περίπτωση η ακριβής εφαρμογή κι εκτέλεση έχει μείνει έξω από αυτή την προκαταρκτική έρευνα.

Η ελεγχόμενη τάση είναι η V_1 από την μεριά του πρωτεύοντος του μετασχηματιστή (Σχήμα 4.1). Ο έλεγχος υλοποιείται μέσω της διακριτής και ακαριαίας προσαρμογής της τάσης V_W του ζυγού μέσης τάσης που συνδέεται το Αιολικό Πάρκο και η τάση V_W υπόκειται σε έναν άνω περιορισμό, $V_W \leq V_{wmax}$, το οποίο αποτελεί όριο υπερδιέγερσης.

Η λογική ευφυούς ελέγχου της υψηλής τάσης V_1 με την οποία προσαρμόζεται η τάση V_W του Α/Π εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$V_W = V_{wmax}, \text{ εάν } V_1 < V_{1lim} \text{ και } V_W \leq V_{wmax} \quad (4.38)$$

όπου

V_{1lim} : κάτω όριο ελέγχου της τάσης V_1

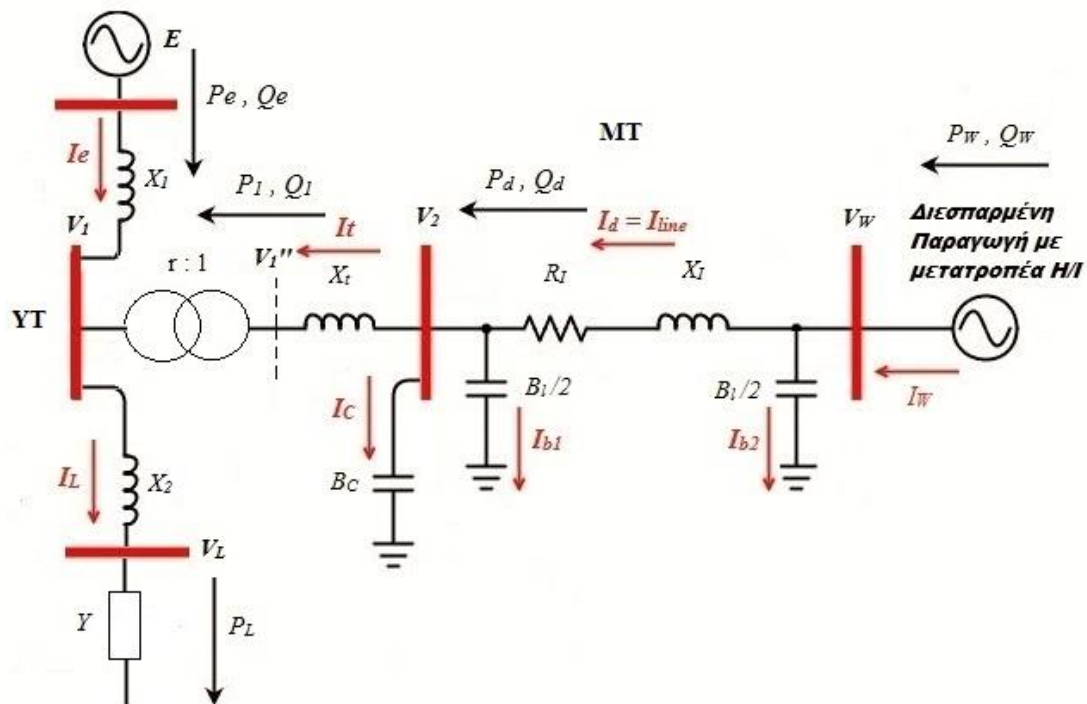
Πρόκειται ουσιαστικά για μία και μόνο διακριτή μετάβαση και αλλαγή της τάσεως του Αιολικού Πάρκου. Το σήμα που ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη αποστέλλεται μόνο όταν η υψηλή τάση του ζυγού του υποσταθμού πέσει κάτω από το 90%. Να επισημάνουμε τέλος ότι υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση της τάξεως των 10s μέχρις ότου επενεργήσει ο έλεγχος, για αποφυγή ακαριαίων υποδιεγέρσεων που ενδεχομένως να εξαλειφθούν και βρεθούν εντός των επιθυμητών ορίων μετά από αυτό το χρονικό διάστημα καθυστέρησης.

5

Προσομοιώσεις Τυπικών Συστημάτων

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η επίδραση που έχει στη Μέγιστη Μεταφορά Ισχύος του συστήματος δοκιμής ο συνεχής έλεγχος του ζυγού ΥΤ στον υποσταθμό σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Θεωρείται ότι υπάρχει τηλεμέτρηση και ταχύς (πρακτικά ακαριαίος) έλεγχος. Αρχικά εξετάζεται η ΜΜΙ χωρίς έλεγχο, ώστε να μπορεί να τεκμηριωθεί η αύξηση που επιφέρει ο αυτόματος έλεγχος της ΥΤ. Για να φτάσει το σύστημα σε συνθήκες μέγιστης μεταφοράς ισχύος και να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του συστήματος, το φορτίο υπόκειται σε μια συνεχή μεταβολή σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης ΔG ανά περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή ανά $10s$, μέχρις ότου το σύστημα ξεπεράσει το όριο ΜΜΙ. Υπενθυμίζουμε ότι κατά τη διάρκεια μεταβολής του φορτίου και ως εκ τούτου κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η ενεργός ισχύς που παράγεται από τα Α/Γ θεωρείται σταθερή και ίση με την τιμή που αναγράφεται στον Πίνακα 4.3.

Το μονογραμμικό διάγραμμα του Σχήματος 4.1 παρατίθεται στη συνέχεια για ευκολία στο Σχήμα 5.1:



Σχήμα 5.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Γραμμής Σύνδεσης ΔΠ

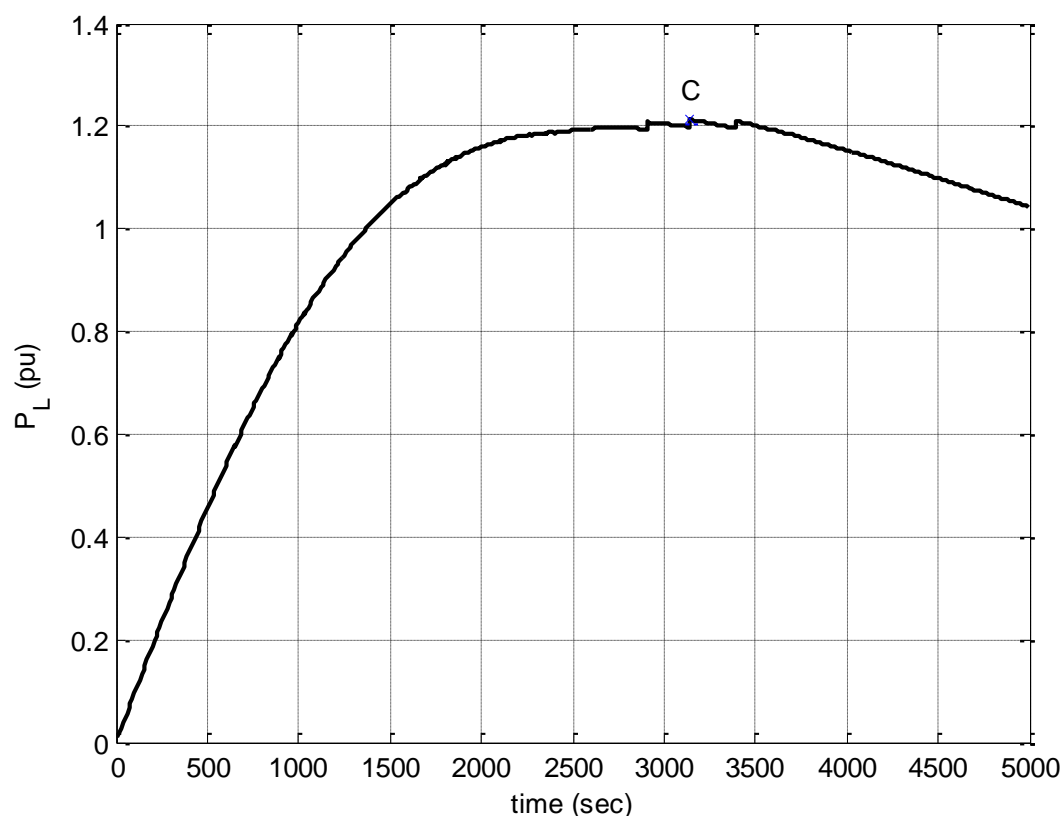
5.1 Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς Χωρίς Έλεγχο

Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει καμία στρατηγική ελέγχου στο σύστημά μας, με εξαίρεση την αυτόματη προσαρμογή όταν ενεργοποιηθεί ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα και σχετίζεται καθαρά με τη λειτουργία του.

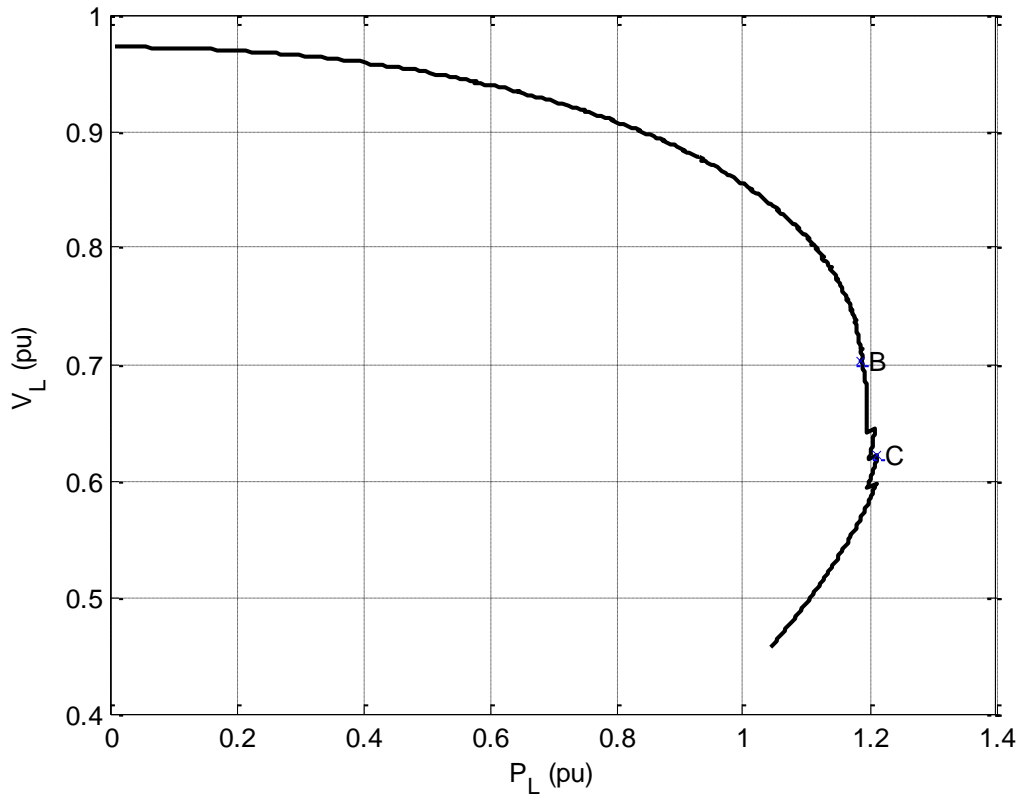
Ακολούθως, εξετάζεται η συμπεριφορά δύο διαφορετικών Αιολικών Πάρκων που προέρχονται από στοιχεία του ΑΔΜΗΕ.

5.1.1 Α/Π Ελίκης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Α/Π της Ελίκης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, χωρίς καμία μορφή ελέγχου. Στα Σχήματα 5.2-5.3 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό και το Σημείο B στο σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φθάνει στο κάτω όριό του και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς Χωρίς Έλεγχο ισούται τελικά με $121MW$ (Σχ. 5.2-5.3). Σημειώνεται από το Σχ. 5.3 ότι οι συνθήκες MMI επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδεδεικτών γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.



Σχήμα 5.2 Ισχύς Φορτίου (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

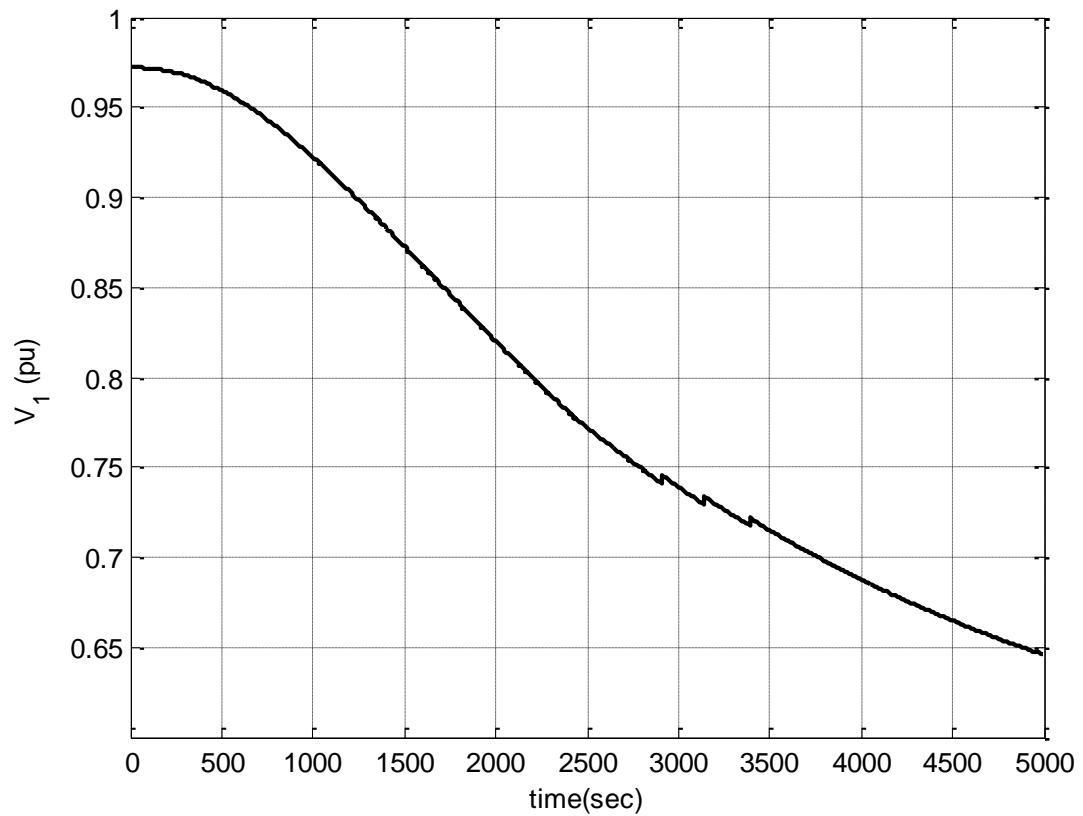


Σχήμα 5.3 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

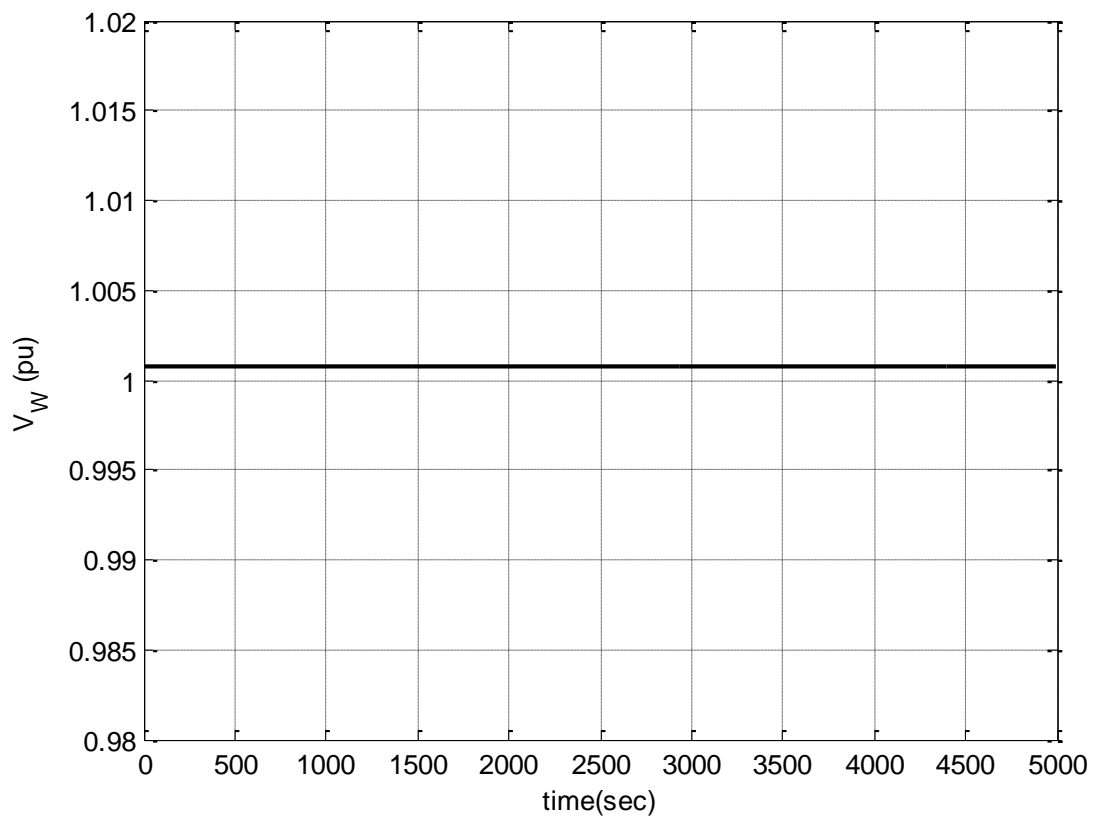
Στα Σχ. 5.4-5.6 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.4-5.6, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π της Ελίκης, όπως και το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, αφού δεν επενεργεί καμία μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης κι έτσι δεν γίνεται καμία προσαρμογή της τάσης του ζυγού ΜΤ του Αιολικού Πάρκου V_W , η οποία παραμένει σταθερή. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 5000s.

Αφού δεν υπάρχει μηχανισμός ρύθμισης της τάσης V_1 , παρατηρείται στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 5.4) η σταδιακή μείωση της τάσης από την αρχή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

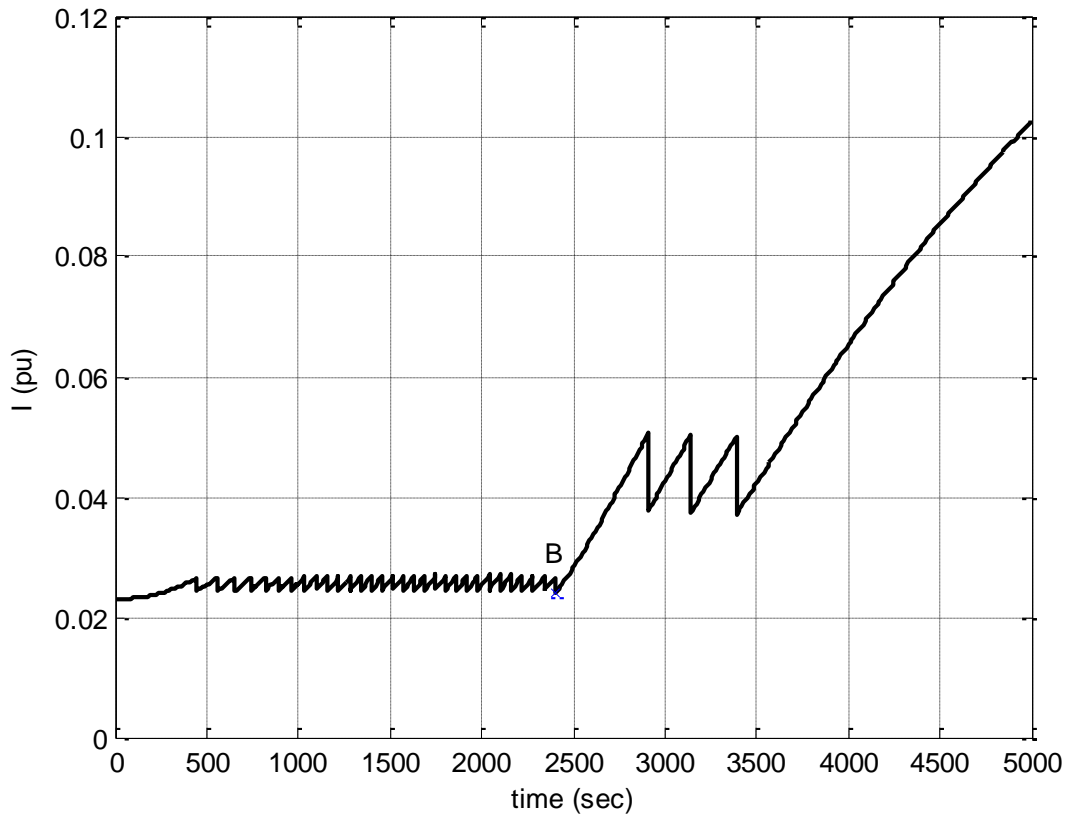
Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.6, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.7. Από την στιγμή που το βήμα του μετασχηματιστή φθάσει στο κάτω όριό του, την χρονική στιγμή $t=2400s$, (Σχ. 5.8, Σημείο Β: $r = r_{min}$) το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται.



Σχήμα 5.4 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

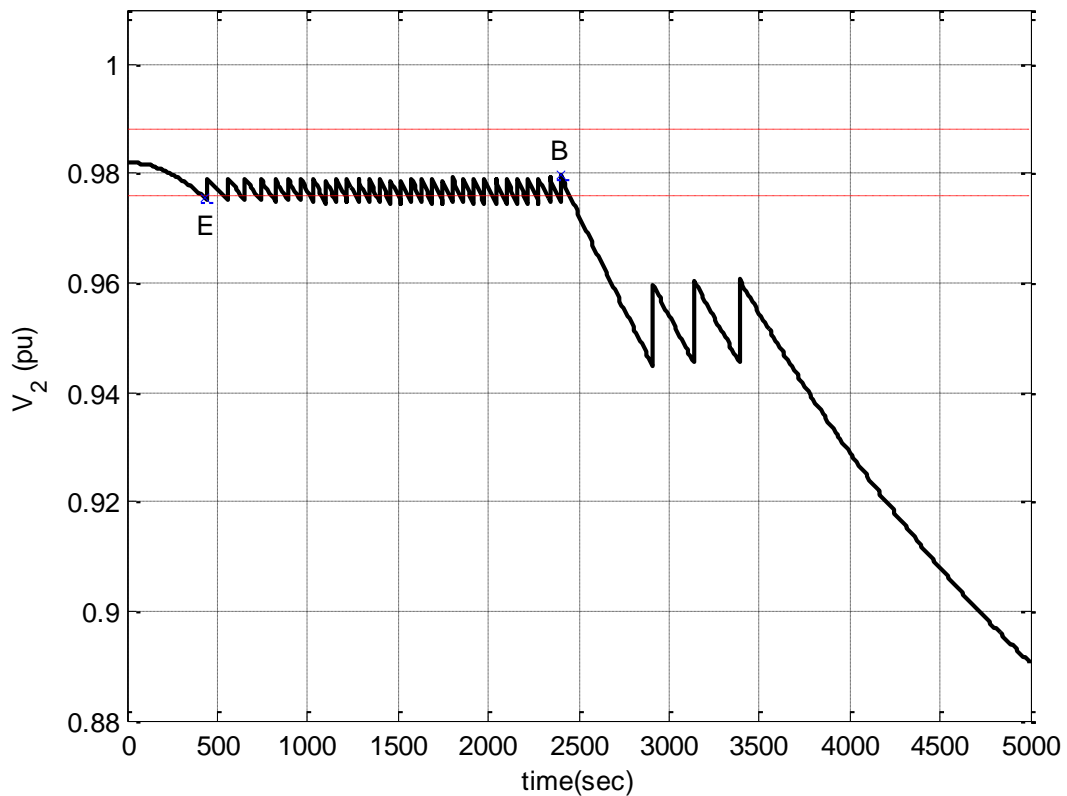


Σχήμα 5.5 Τάση ζυγού ΜΤ Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

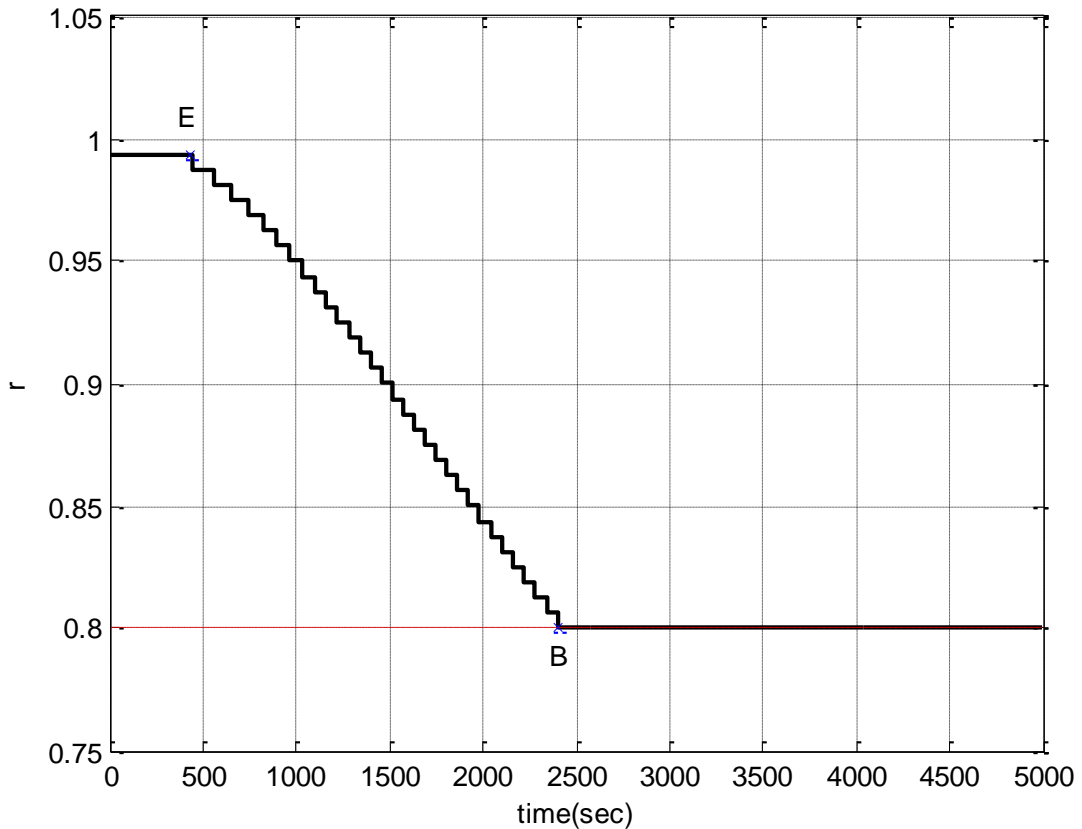


Σχήμα 5.6 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

Στα Σχ. 5.7-5.8 αναπαριστάται η χρονική απόκριση της τάσεως διανομής V_2 (MT) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r .



Σχήμα 5.7 Τάση ζυγού διανομής $Υ/Σ$ MT (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

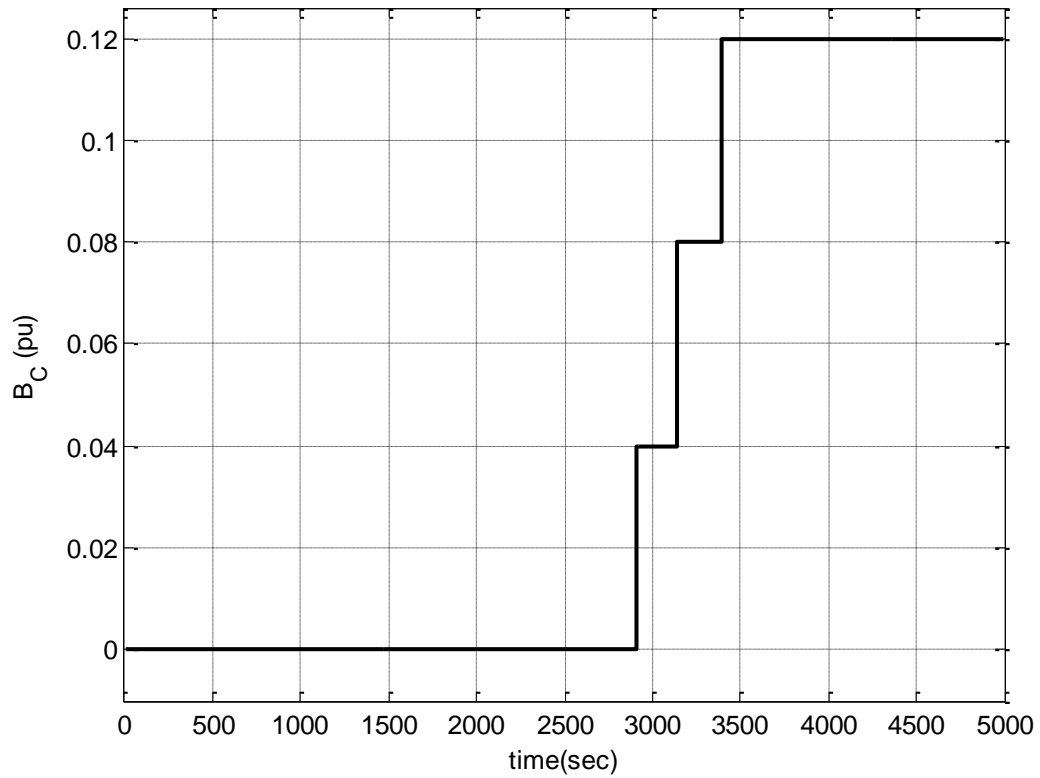


Σχήμα 5.8 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

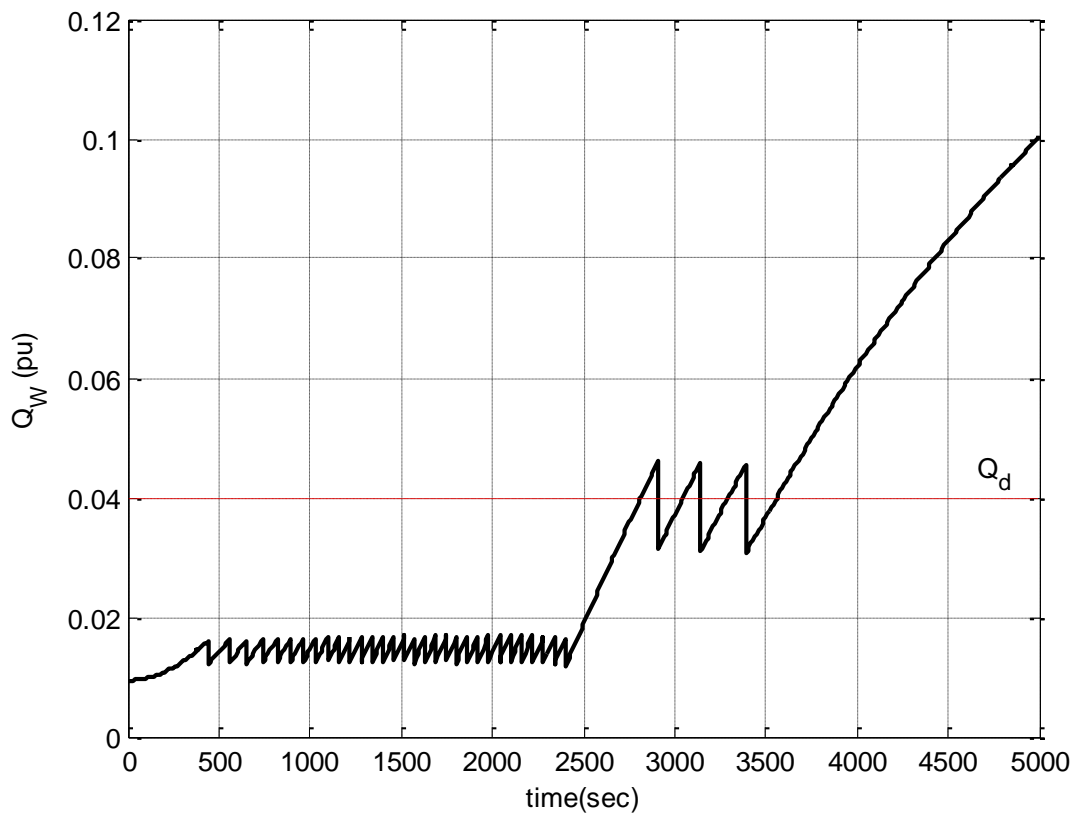
Με τη συνεχή μείωση της τάσης V_1 , όπως είναι λογικό, μειώνεται και η τάση V_2 του δευτερεύοντος. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (ΜΤ) ξεπερνάει το κάτω επιθυμητό όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος ΣΑΤΥΦ από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της επιθυμητής νεκρής ζώνης (Σημείο Ε: Σχ. 5.7-5.8, $t = 430s$). Ως εκ τούτου, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός των επιθυμητών ορίων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.7.

Με την συνεχή μείωση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, κάποια χρονική στιγμή πετυχαίνουμε το κάτω όριό του (Σημείο Β: $r = r_{min}$, $t = 2400s$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την ελάχιστη τιμή. Ακολουθώντας, παρατηρείται η μείωση της τάσης V_2 εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης, αφού ουσιαστικά απενεργοποιείται ο μηχανισμός στήριξης της.

Στα Σχ.5.9-5.10 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_C , καθώς και της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_W του Α/Π της Ελίκης:



Σχήμα 5.9 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Ελίκης

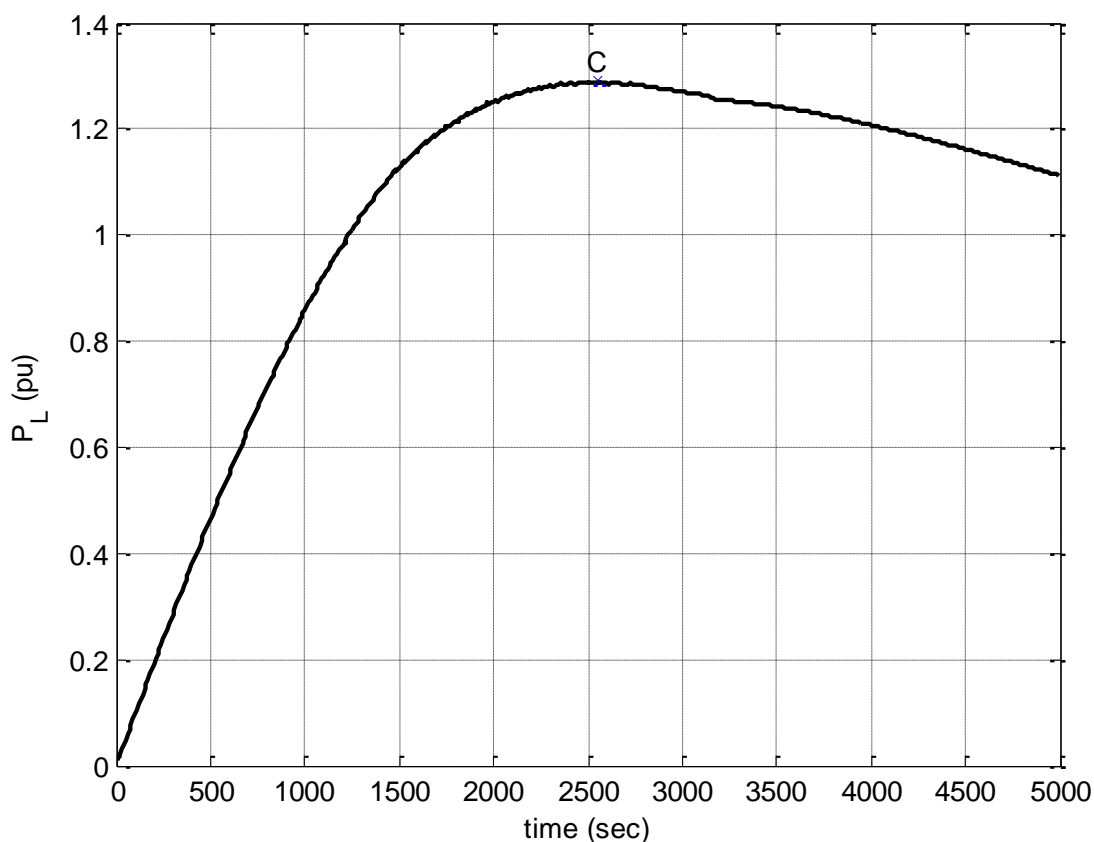


Σχήμα 5.10 Εγγεόμενη Αεργός Ισχύς Α/Π Ελίκης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

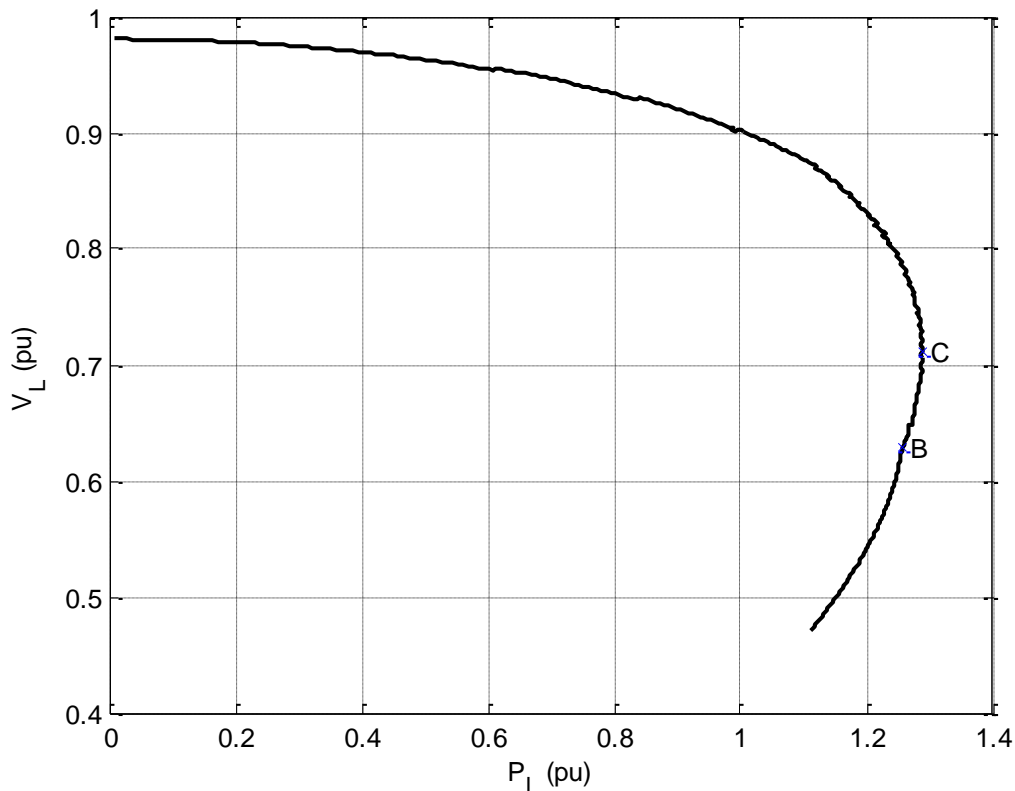
Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η άεργος ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.9, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 2910s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 3140s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 3390s$.

5.1.2 Α/Π Διδύμων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Α/Π των Διδύμων παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, χωρίς καμία μορφή ελέγχου. Στα Σχήματα 5.11-5.12 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό και το Σημείο B στο σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φθάνει στο κάτω όριό του και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς Χωρίς Έλεγχο ισούται τελικά με 129MW (Σχ. 5.11-5.12). Σημειώνεται από το Σχ. 5.12 ότι οι συνθήκες MMI επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδεδεικτών γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.



Σχήμα 5.11 Ισχύς Φορτίου (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Διδύμων

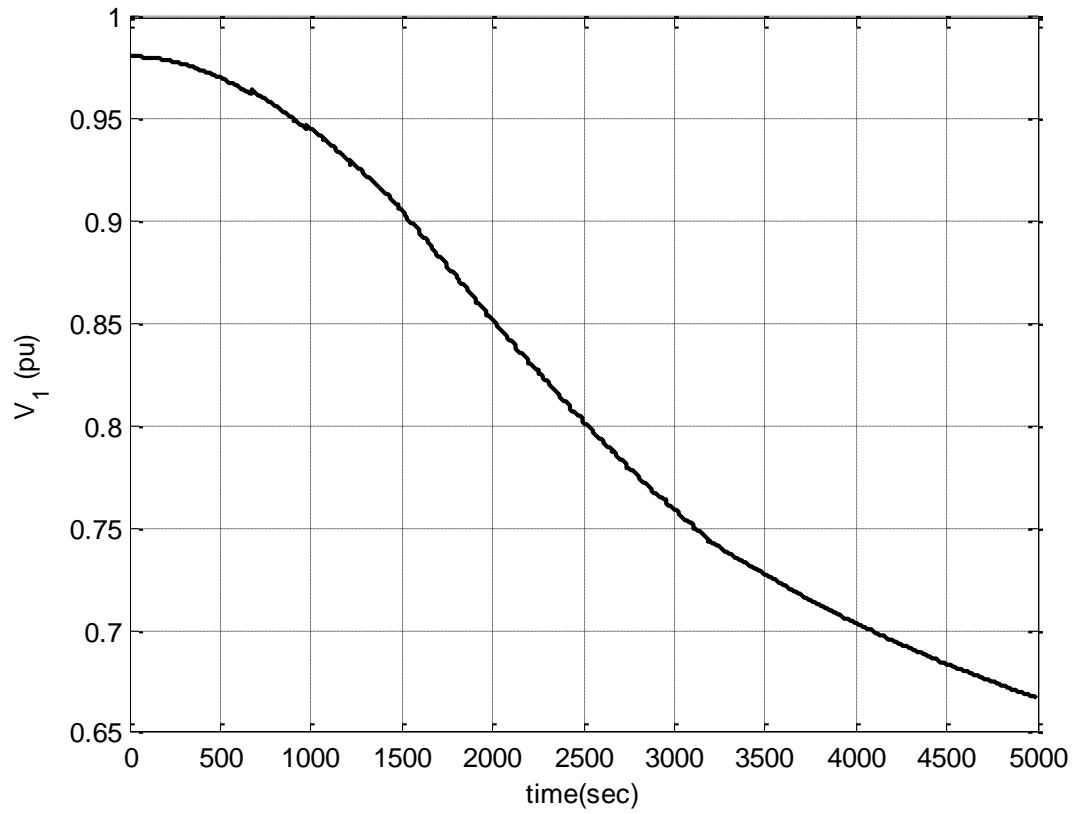


Σχήμα 5.12 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Διδύμων

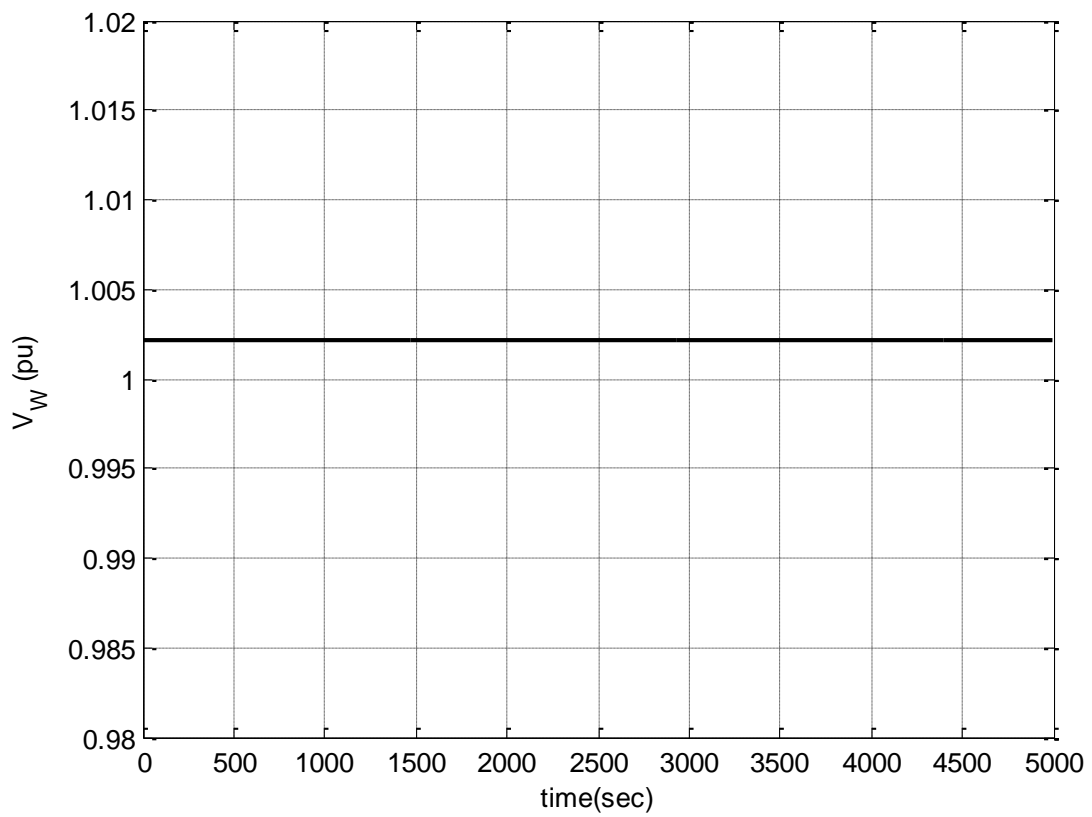
Στα Σχ. 5.13-5.15 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.13-5.15, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π των Διδύμων, όπως και το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο, αφού δεν επενεργεί καμία μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης κι έτσι δεν γίνεται καμία προσαρμογή της τάσης του ζυγού ΜΤ του Αιολικού Πάρκου V_W , η οποία παραμένει σταθερή. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 5000s.

Αφού δεν υπάρχει μηχανισμός ρύθμισης της τάσης V_1 , παρατηρείται στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 5.13) η σταδιακή μείωση της τάσης από την αρχή μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

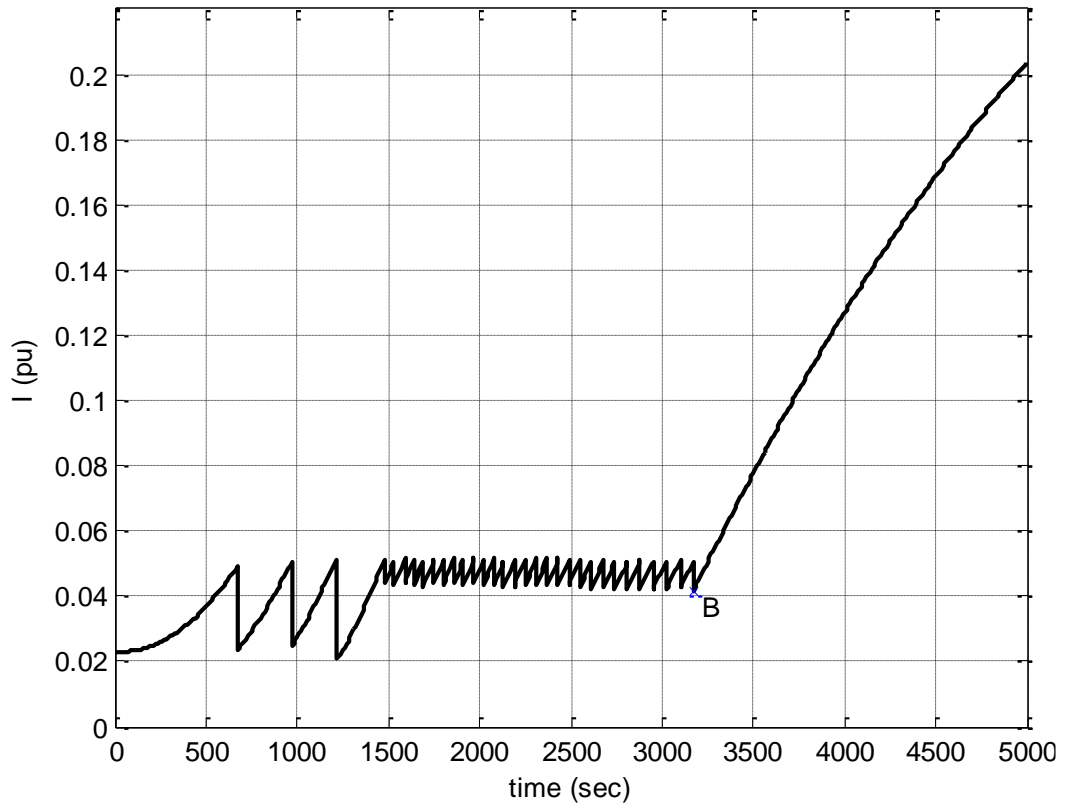
Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.15, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.16. Από την στιγμή που το βήμα του μετασχηματιστή φθάσει στο κάτω όριό του, την χρονική στιγμή $t=3170s$, (Σχ. 5.18, Σημείο Β: $r = r_{min}$) το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται, αλλά βρίσκεται ήδη αφότου οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς έχουν λάβει χώρα (Σχ. 5.12).



Σχήμα 5.13 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Γ Διδύμων

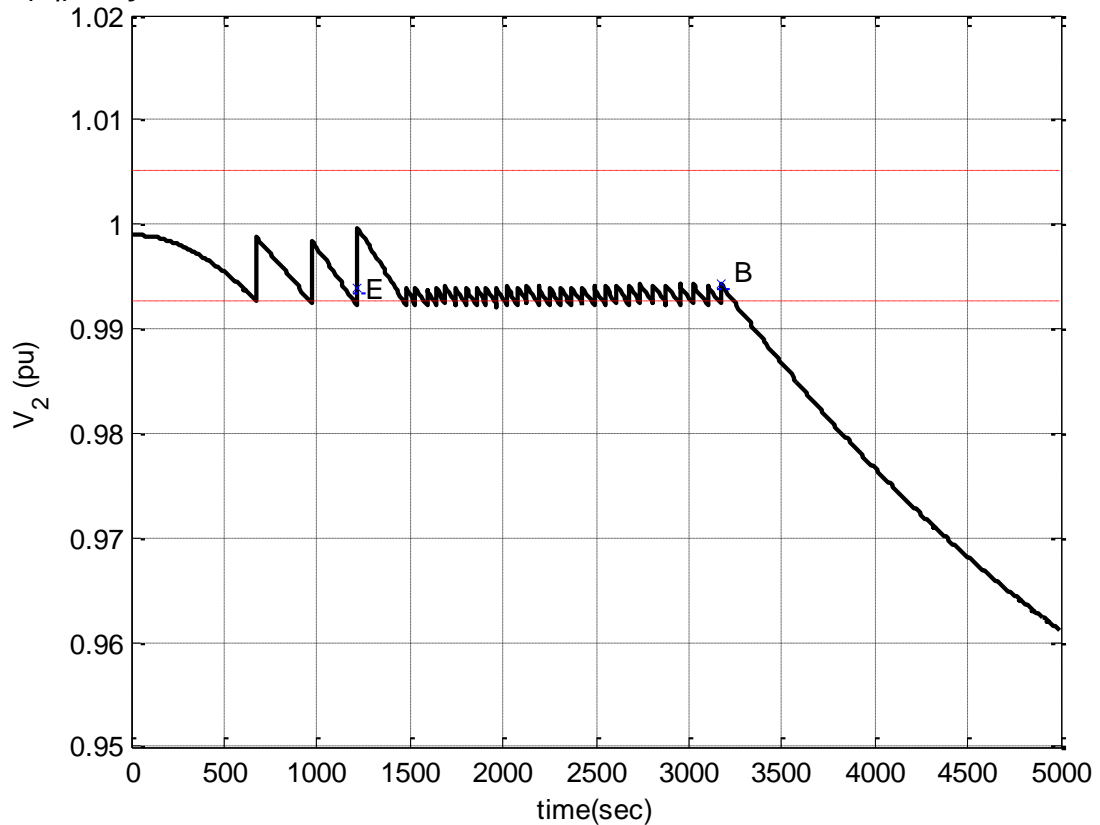


Σχήμα 5.14 Τάση ζυγού ΜΤ Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

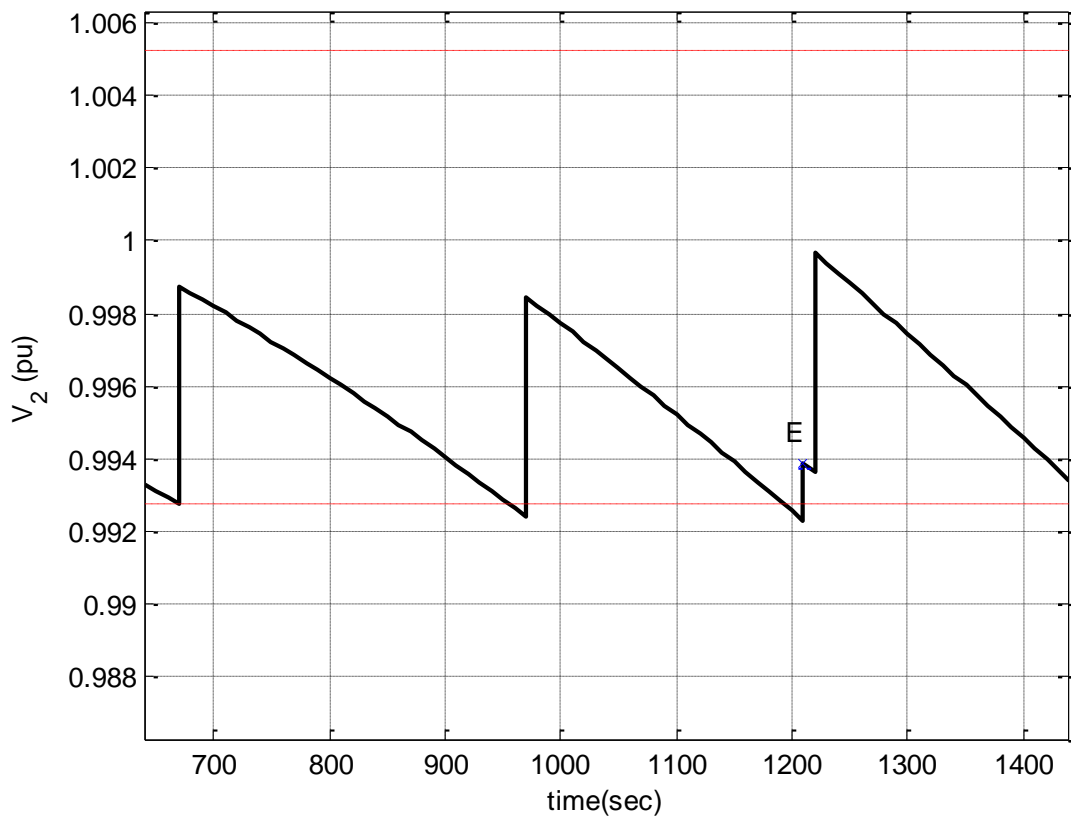


Σχήμα 5.15 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

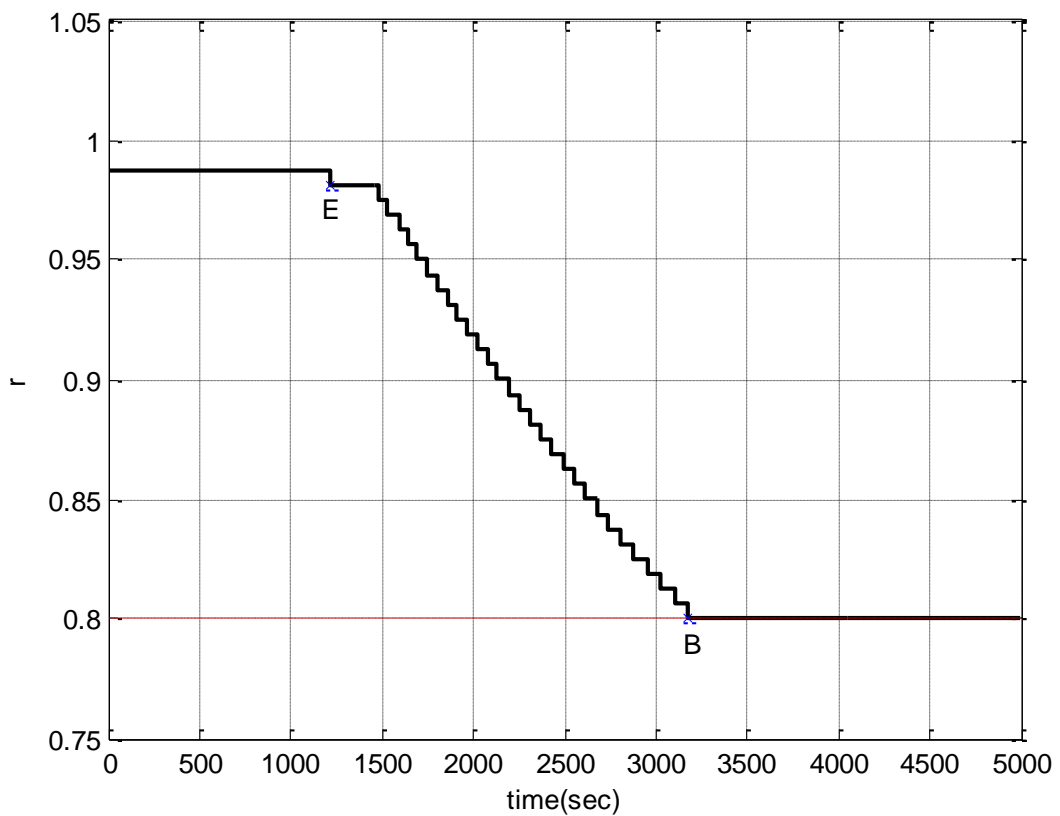
Στα Σχ. 5.16-5.18 αναπαριστάται η χρονική απόκριση της τάσεως διανομής V_2 (MT) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r .



Σχήμα 5.16 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ MT (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 5.17 Μεγέθυνση Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ ΜΤ (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)



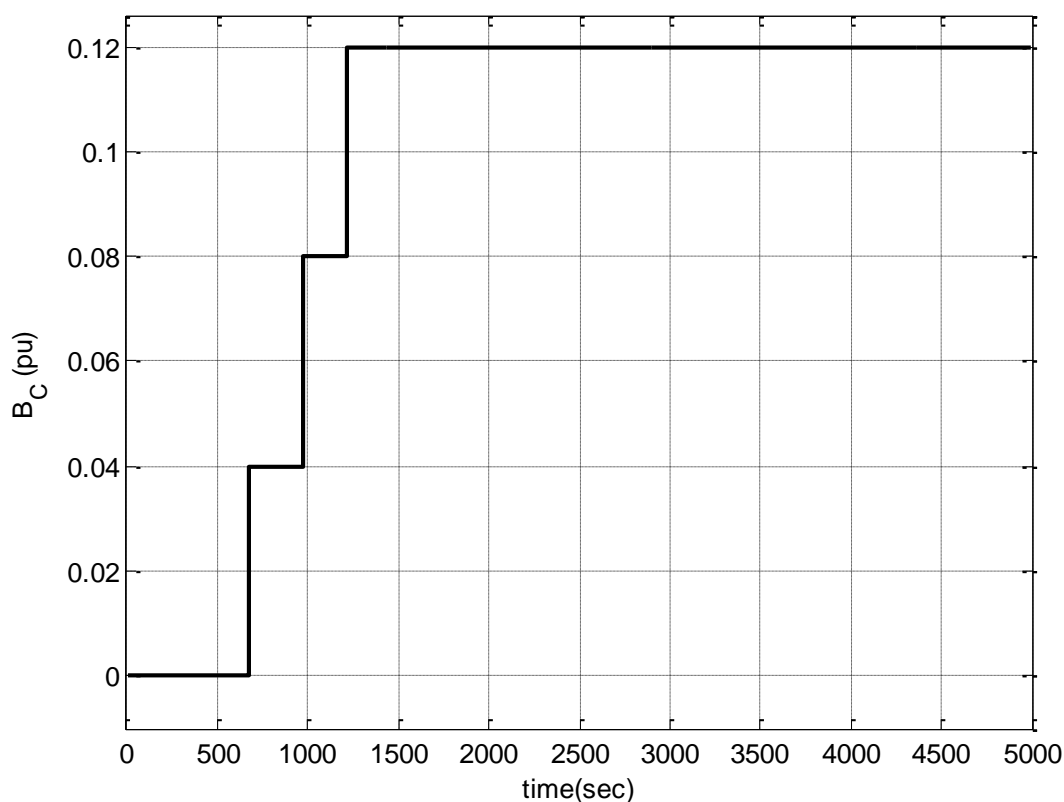
Σχήμα 5.18 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π 2

Με τη συνεχή μείωση της τάσης V_1 , όπως είναι λογικό, μειώνεται και η τάση V_2 του δευτερεύοντος. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (MT) ξεπερνάει το κάτω επιθυμητό όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος ΣΑΤΥΦ από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της επιθυμητής νεκρής ζώνης (Σημείο E: Σχ. 5.16-5.18, $t = 1210s$). Ως εκ τούτου, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός των επιθυμητών ορίων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.16.

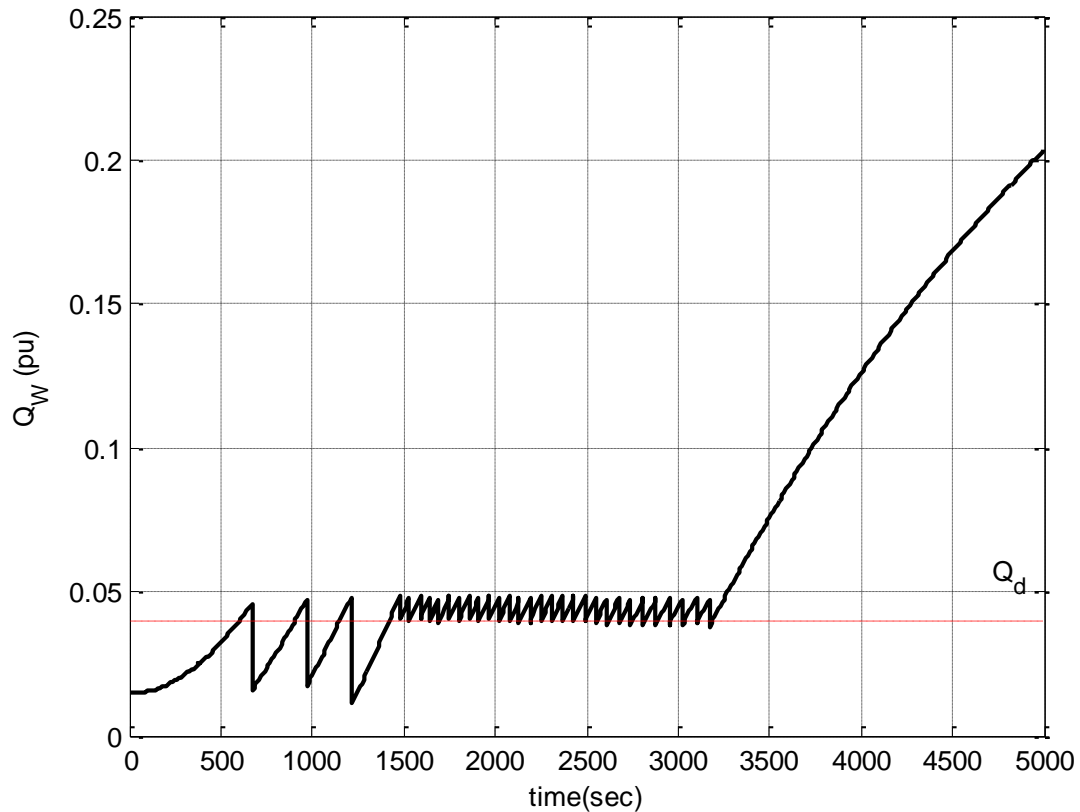
Παρατηρούμε μάλιστα στο Σχήμα 5.17, όπου αποτελεί μια μεγέθυνση της μέσης τάσης διανομής εκεί που επενεργούν οι 3 ζεύξεις των συστοιχιών πυκνωτών, ότι οι 2 πρώτες ζεύξεις λειτουργούν βοηθητικά και στο σύστημα ελέγχου της μέσης τάσης V_2 , αφού δεν επιτρέπουν τελικά να βρίσκεται για χρονικό διάστημα 10 δευτερολέπτων κάτω του επιθυμητού ορίου, αποτρέποντας έτσι την άσκοπη μείωση του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ για αντιστάθμιση της αντίστοιχης τάσης.

Με την συνεχή μείωση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, κάποια χρονική στιγμή πετυχαίνουμε το κάτω όριό του (Σημείο B: $r = r_{min}$, $t = 3170s$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την ελάχιστη τιμή. Ακολούθως, παρατηρείται η μείωση της τάσης V_2 εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης, αφού ουσιαστικά απενεργοποιείται ο μηχανισμός στήριξής της.

Στα Σχ.5.19-5.20 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_C , καθώς και της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_W του Α/Π των Διδύμων:



Σχήμα 5.19 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο), Α/Π 2



Σχήμα 5.20 Εγχεόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π Διδύμων (Χωρίς Αυτόματο Έλεγχο)

Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η άεργος ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.19, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 670s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 970s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 1220s$.

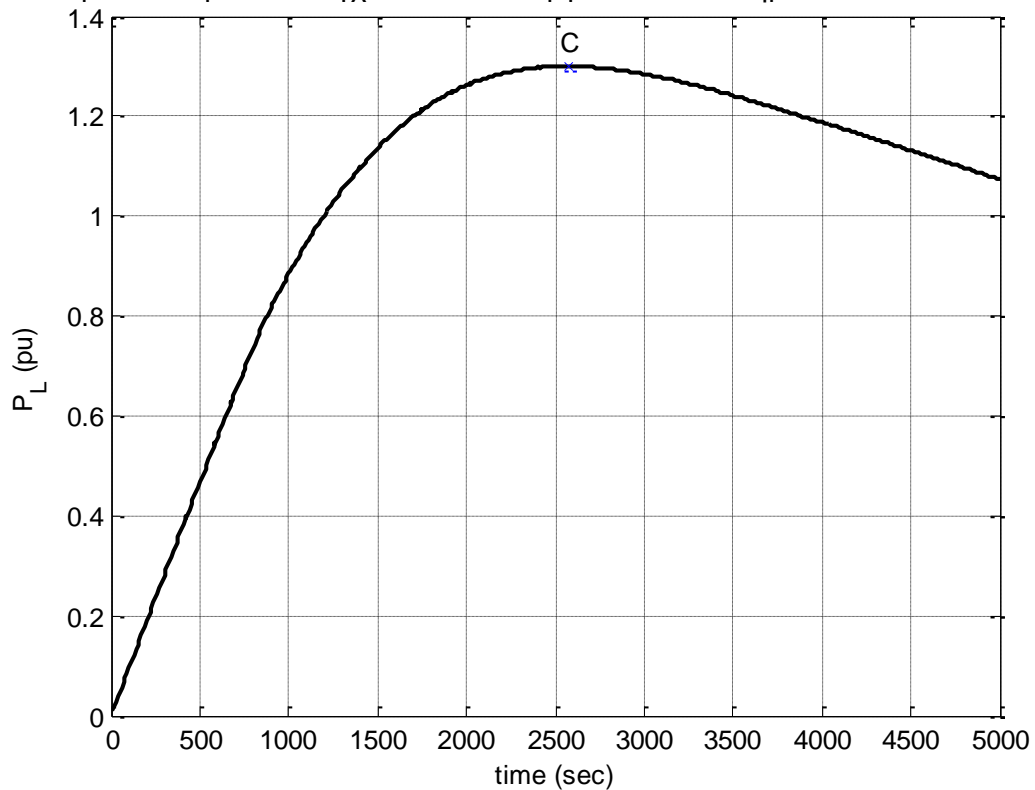
5.2 Συνεχής Έλεγχος Υψηλής Τάσης

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης στο σύστημά μας και ακολούθως εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο διαφορετικών Αιολικών Πάρκων που προέρχονται από στοιχεία του ΑΔΜΗΕ.

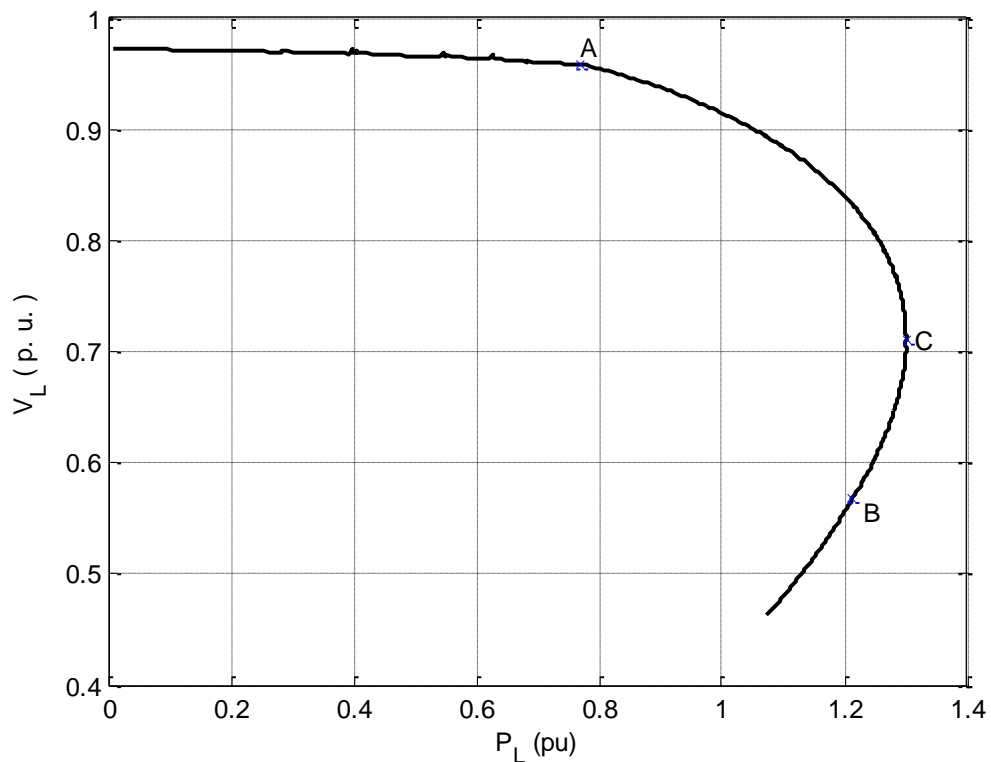
5.2.1 Α/Π Ελίκης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Α/Π της Ελίκης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, με συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης. Στα Σχήματα 5.21-5.22 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό, το Σημείο B στο σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φθάνει στο κάτω όριό του, r_{min} , και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή και το Σημείο A στο σημείο που η τάση του μετατροπέα φθάνει στη μέγιστη τιμή της, $V_{w,max}$, και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή αντίστοιχα. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με συνεχή έλεγχο ισούται τελικά με 130MW (Σχ. 5.21-5.22). Σημειώνεται από το Σχ. 5.22 ότι οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο αυτό

συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδεδειγμένων γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.



Σχήμα 5.21 Ισχύς Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

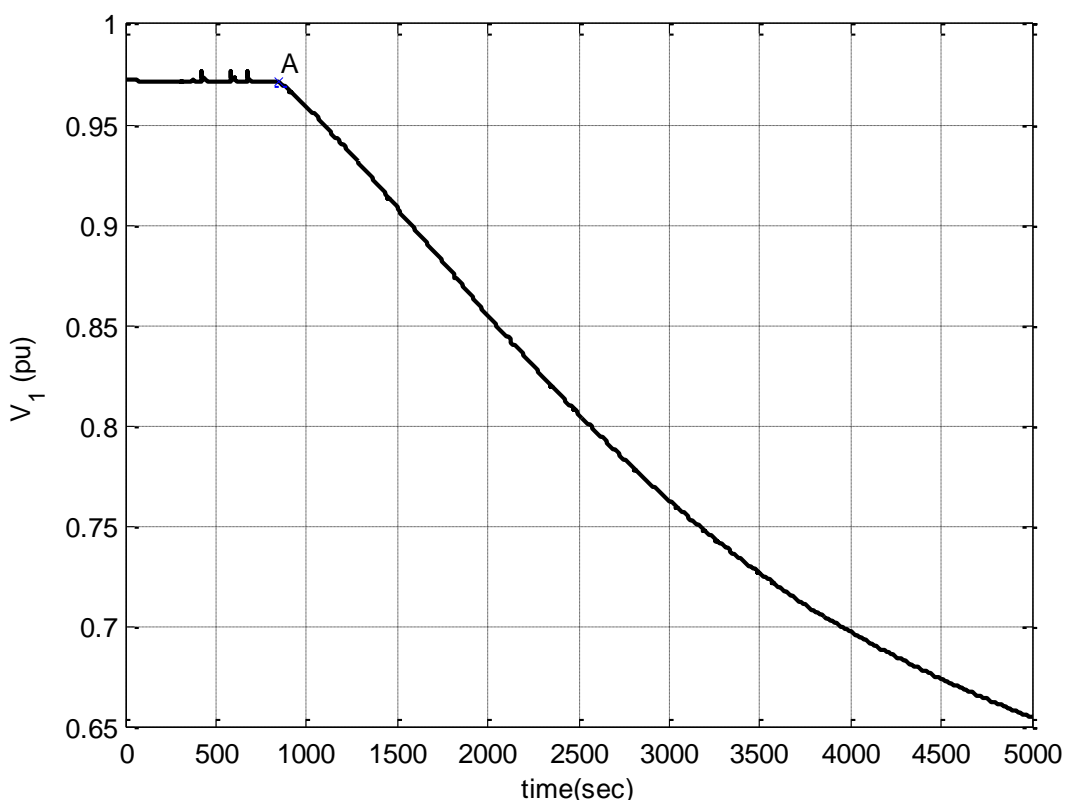


Σχήμα 5.22 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

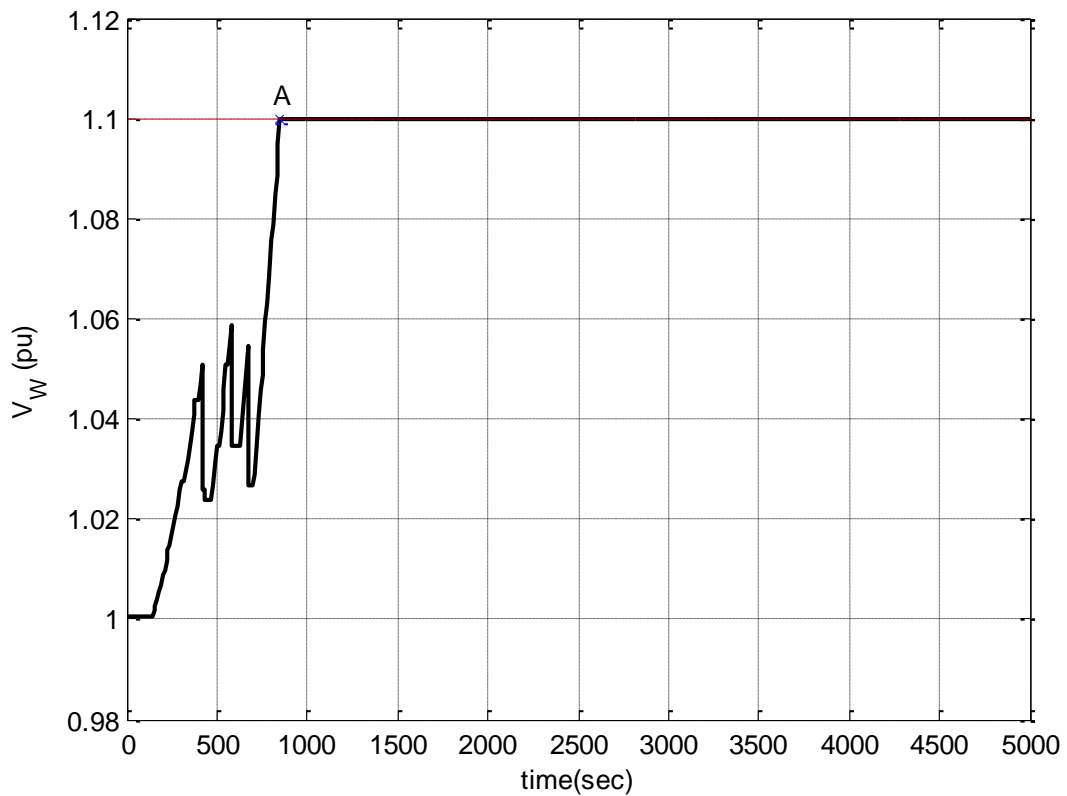
Στα Σχ. 5.23-5.25 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.23-5.25, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π της Ελίκης συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 850s$ (Σημείο Α: $V_W = V_W^{lim}$), ενώ το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 5000s.

Από την χρονική στιγμή $t = 850s$ κι έπειτα απενεργοποιείται ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης μέσω της προσαρμογής της V_W , αφού η τάση του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης φθάνει το μέγιστό της όριο και σταθεροποιείται σε αυτό (V_W^{lim}). Ως εκ τούτου, αφού πλέον δεν μπορεί να ρυθμιστεί η τάση V_1 , παρατηρούμε στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 5.18) ότι αρχίζει να μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης, κάτι το οποίο τελικά οδηγεί σε αστάθεια τάσεως του συστήματος.

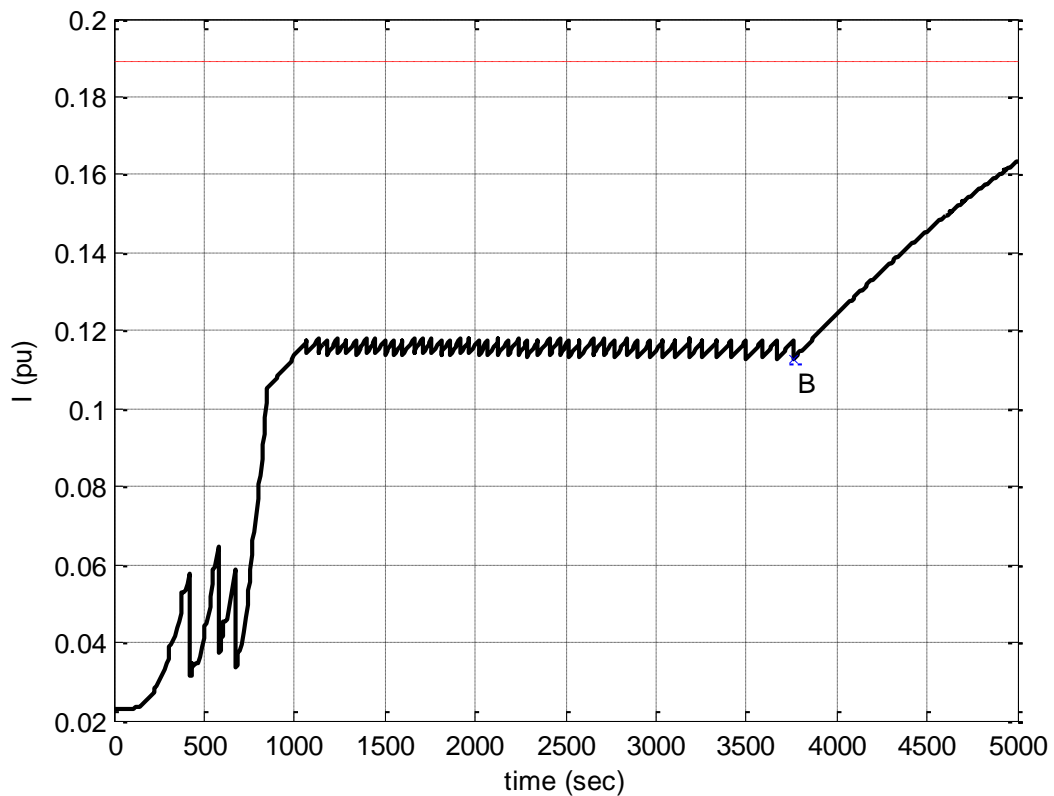
Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.25, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.26. Από την στιγμή που το βήμα του μετασχηματιστή φθάσει στο κάτω όριό του, την χρονική στιγμή $t=3760s$, (Σχ. 5.27, Σημείο Β: $r = r_{min}$) το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται. Το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται, αλλά βρίσκεται ήδη αφότου οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς έχουν λάβει χώρα (Σχ. 5.22).



Σχήμα 5.23 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

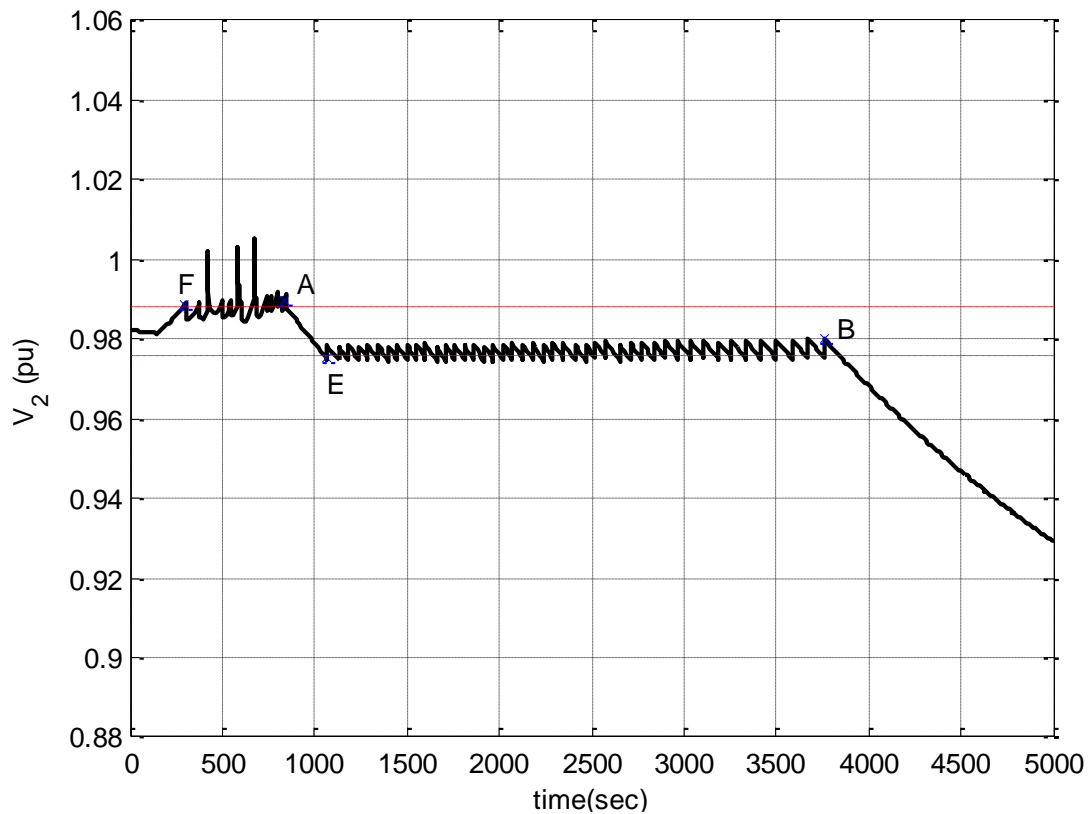


Σχήμα 5.24 Τάση ζυγού MT Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Συνεχής Έλεγχος)

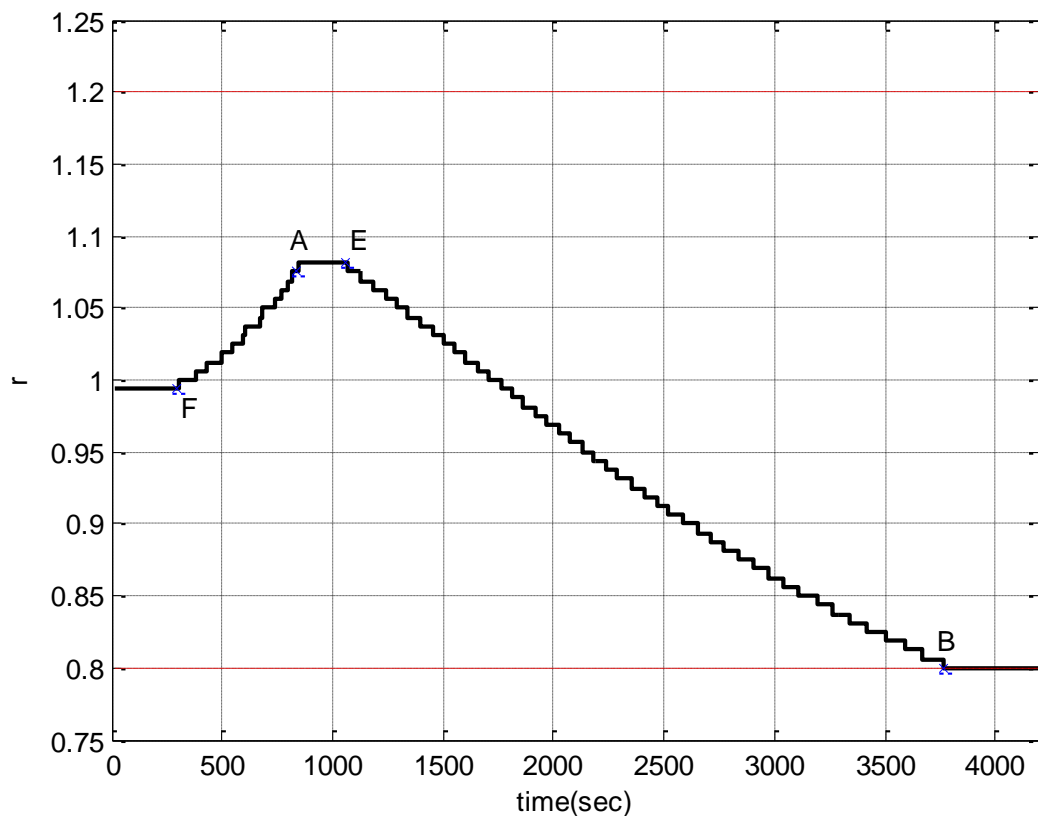


Σχήμα 5.25 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Συνεχής Έλεγχος)

Τα Σχ.5.26-5.27 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (ΜΤ) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.26 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ ΜΤ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

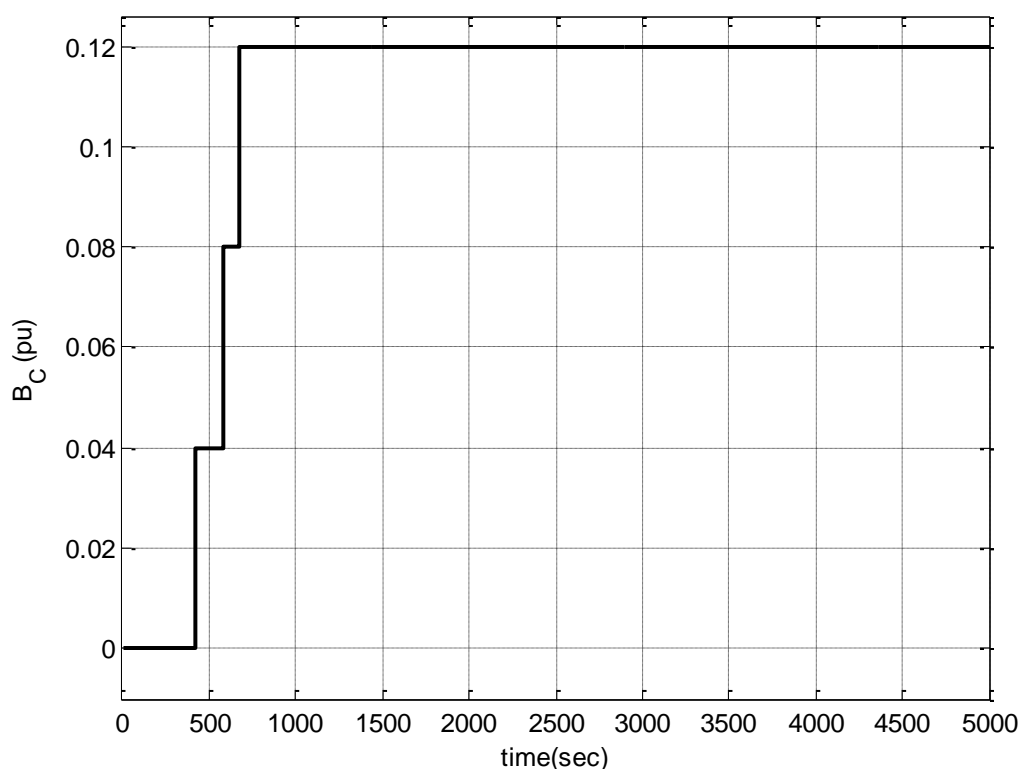


Σχήμα 5.27 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

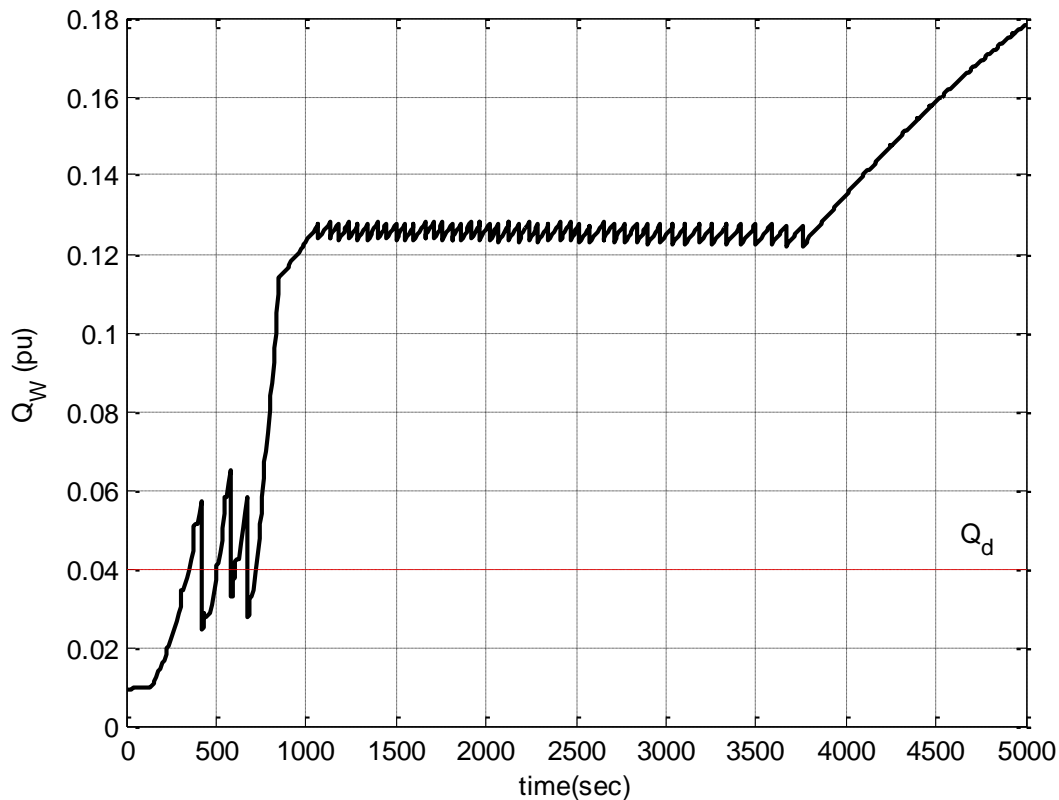
Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (MV) ξεπερνάει το άνω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο F: Σχ. 5.26-5.27, $t=290s$).

Το βήμα του μετασχηματιστή αρχίζει να αυξάνεται τότε, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχ. 5.26), η ταυτόχρονη αύξηση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου η προς έλεγχο τάση του αιολικού πάρκου φτάνει το άνω όριό της (Σημείο A: $V_W = V_{Wmax}$). Υπενθυμίζουμε ότι η τάση V_W , η οποία ρυθμίζεται ακαριαία μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, αυξάνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο για να ρυθμίσει αντίστοιχα την τάση V_1 (ΥΤ) εντός των επιθυμητών ορίων, μέχρι το Σημείο A ($t=850s$), όπου εν συνεχεία σταθεροποιείται στην τιμή του άνω ορίου. Τότε, η τάση V_1 αρχίζει να μειώνεται. Ως επακόλουθο, αρχίζει και η τάση V_2 να μειώνεται. Το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό, αφού η τάση V_2 βρίσκεται εντός νεκρής ζώνης. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει το κάτω της όριο (Σημείο E: Σχ. 5.26-5.27, $t=1060s$) και ως εκ τούτου μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός νεκρής ζώνης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.26.

Με την συνεχή μείωση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, κάποια χρονική στιγμή πετυχαίνουμε το κάτω όριό του (Σημείο B: $r = r_{min}$, $t = 3760s$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την ελάχιστη τιμή. Ακολούθως, παρατηρείται η μείωση της τάσης V_2 εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης, αφού ουσιαστικά απενεργοποιείται ο μηχανισμός στήριξης της.



Σχήμα 5.28 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



Σχήμα 5.29 Εγχεόμενη Άεργος Ισχύς Α/Π Ελίκης (Συνεχής Έλεγχος)

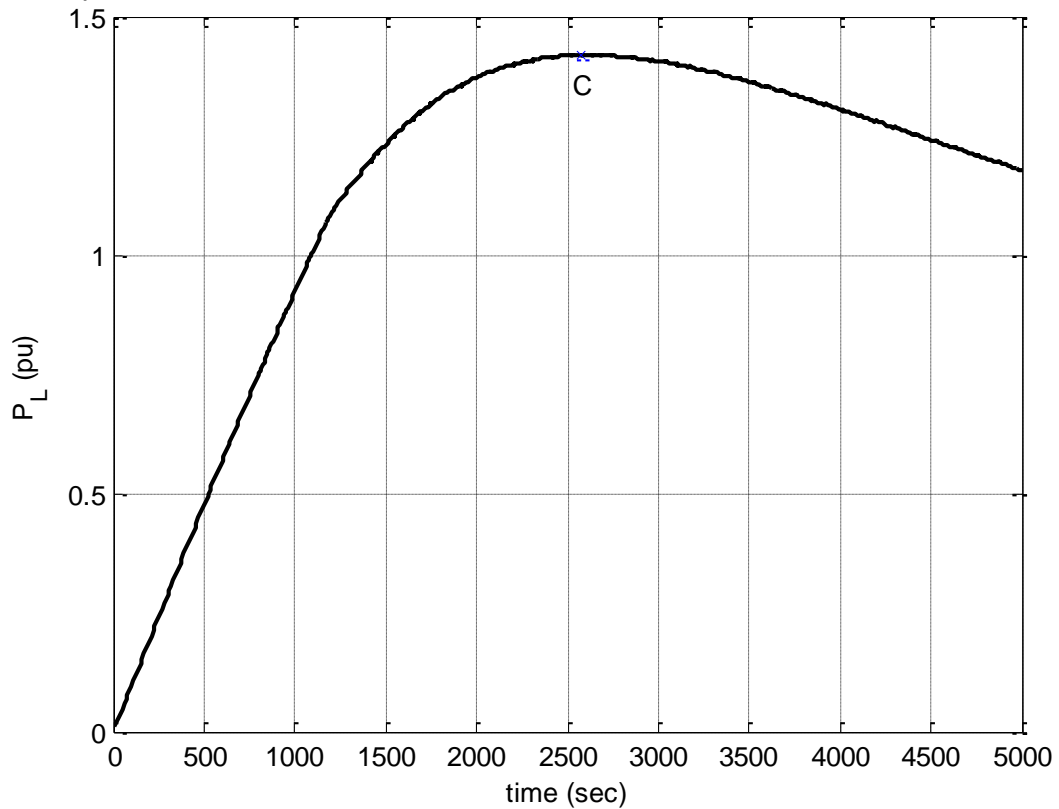
Στα Σχ.5.28-5.29 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_c , καθώς και της εγχεόμενης άεργου ισχύος Q_W του Α/Π της Ελίκης.

Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η άεργος ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.28, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 420s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 580s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 670s$.

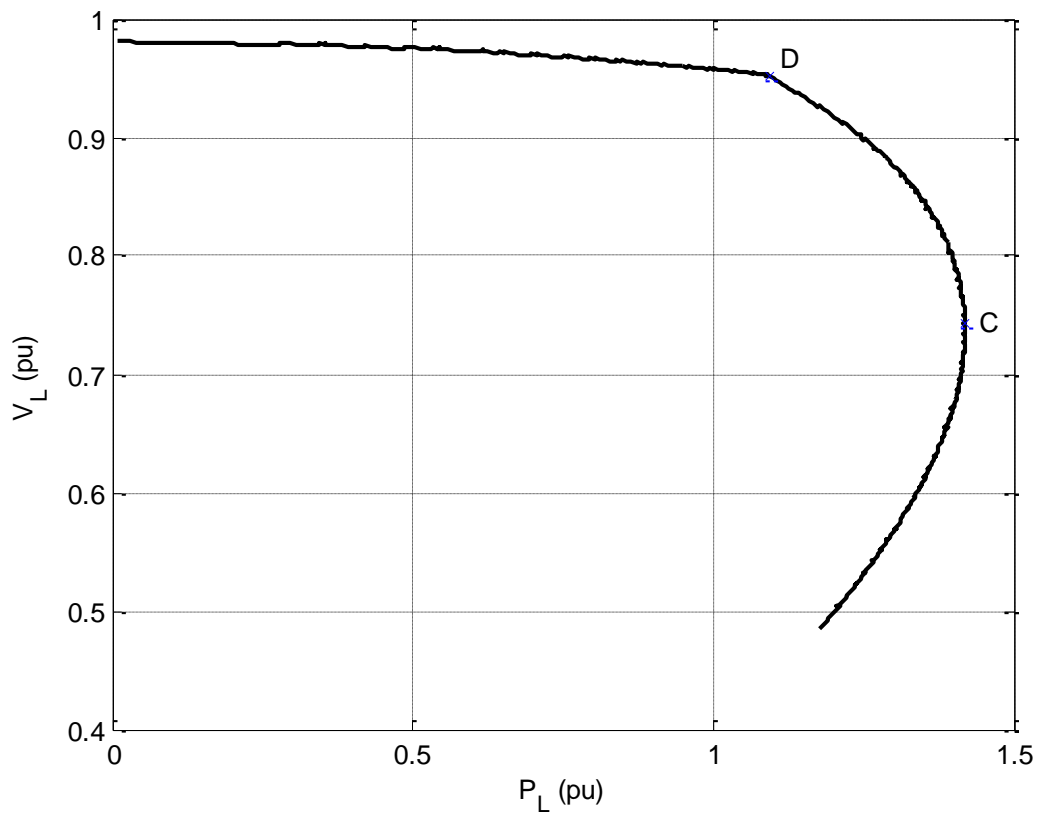
5.2.2 Α/Π Διδύμων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, με συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης. Στα Σχήματα 5.30-5.31 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό, το Σημείο B στο σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φθάνει στο άνω όριό του, r_{max} , και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή και το Σημείο D στο σημείο που ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα, δηλαδή εκεί που το ρεύμα του μετατροπέα φθάνει το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με συνεχή έλεγχο ισούται τελικά με $142MW$ (Σχ. 5.30-5.31). Σημειώνεται από το Σχ. 5.31 ότι οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της

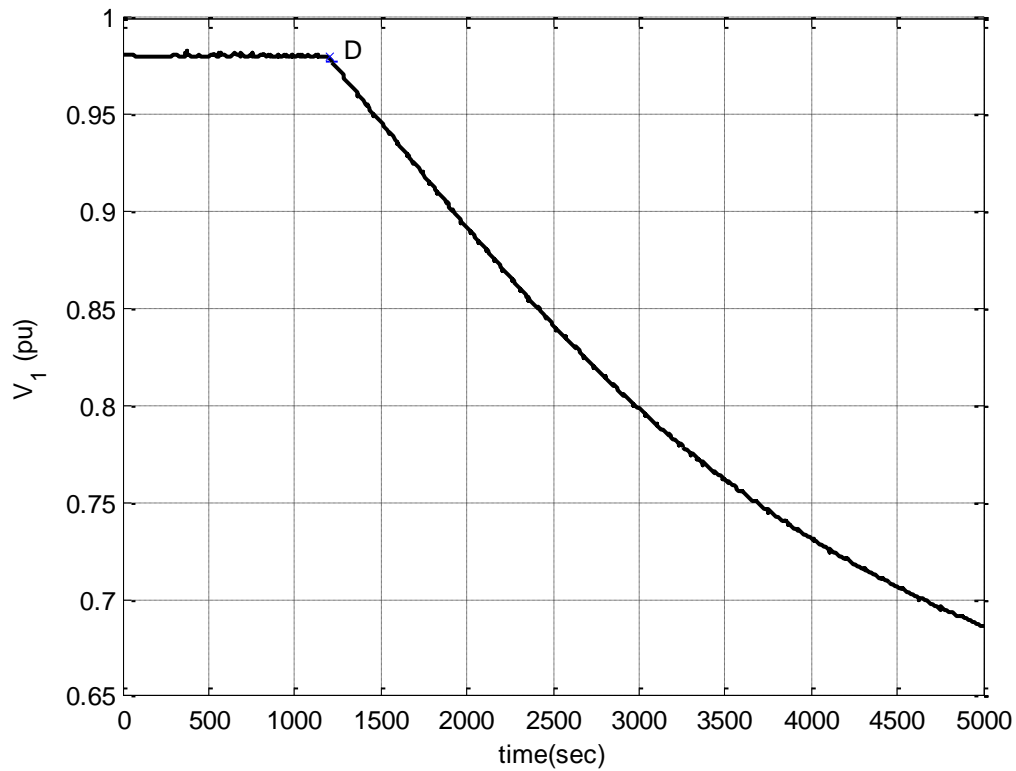
μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδετικών γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.



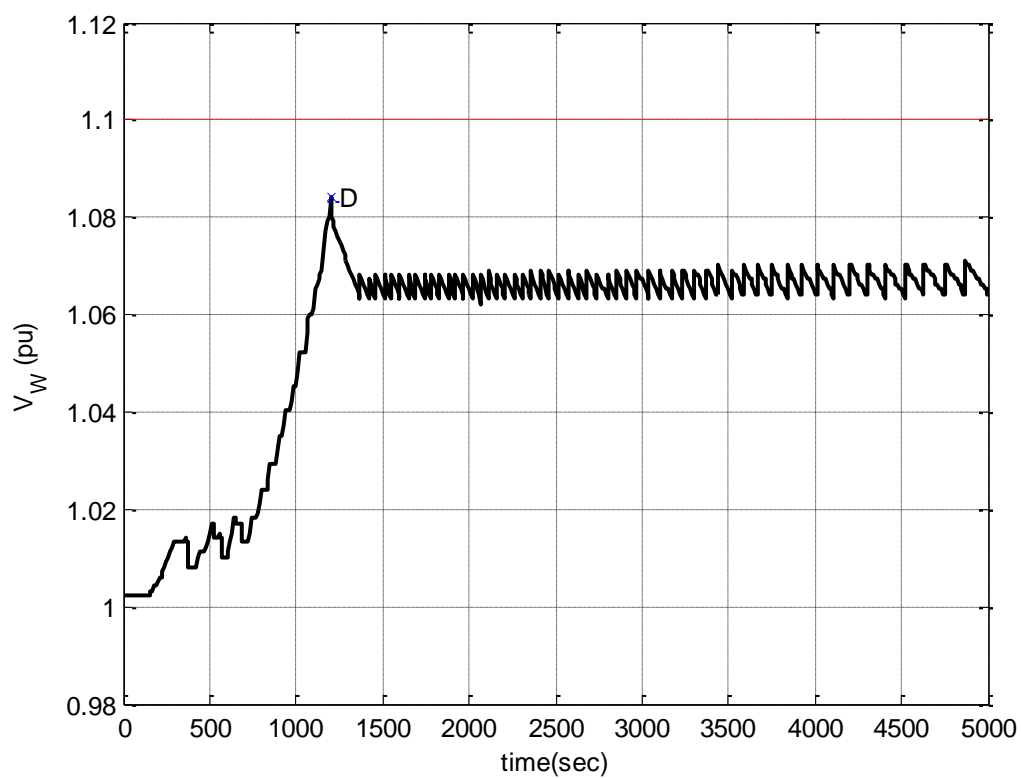
Σχήμα 5.30 Ισχύς Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



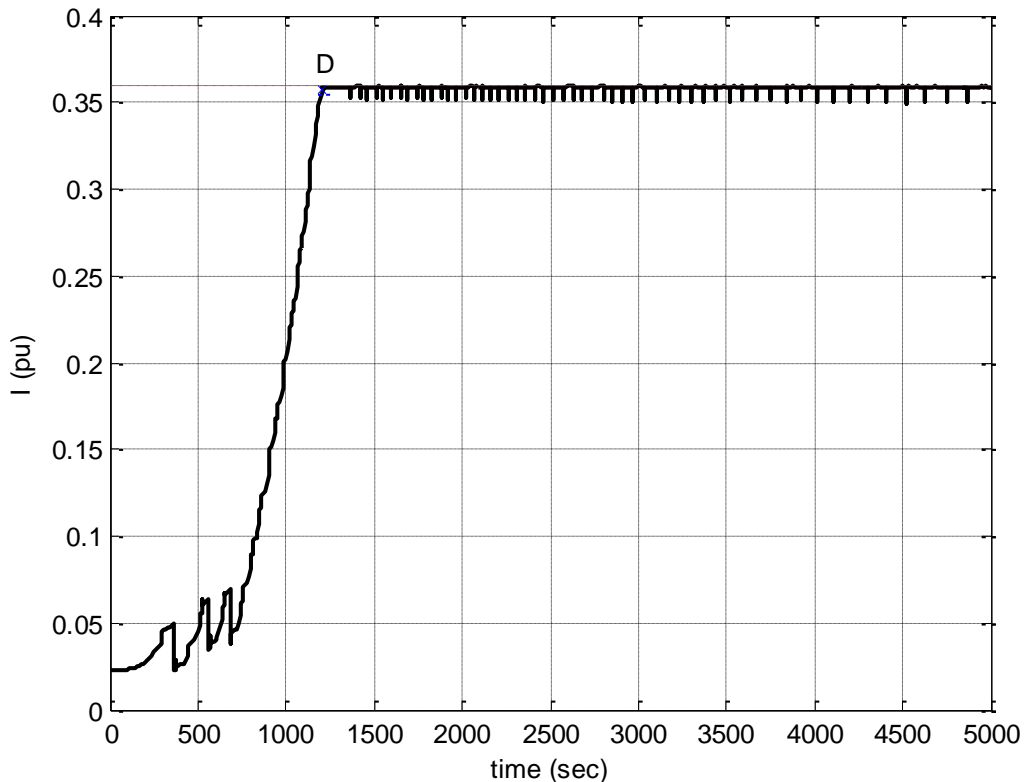
Σχήμα 5.31 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 5.32 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 5.33 Τάση ζυγού MT Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)



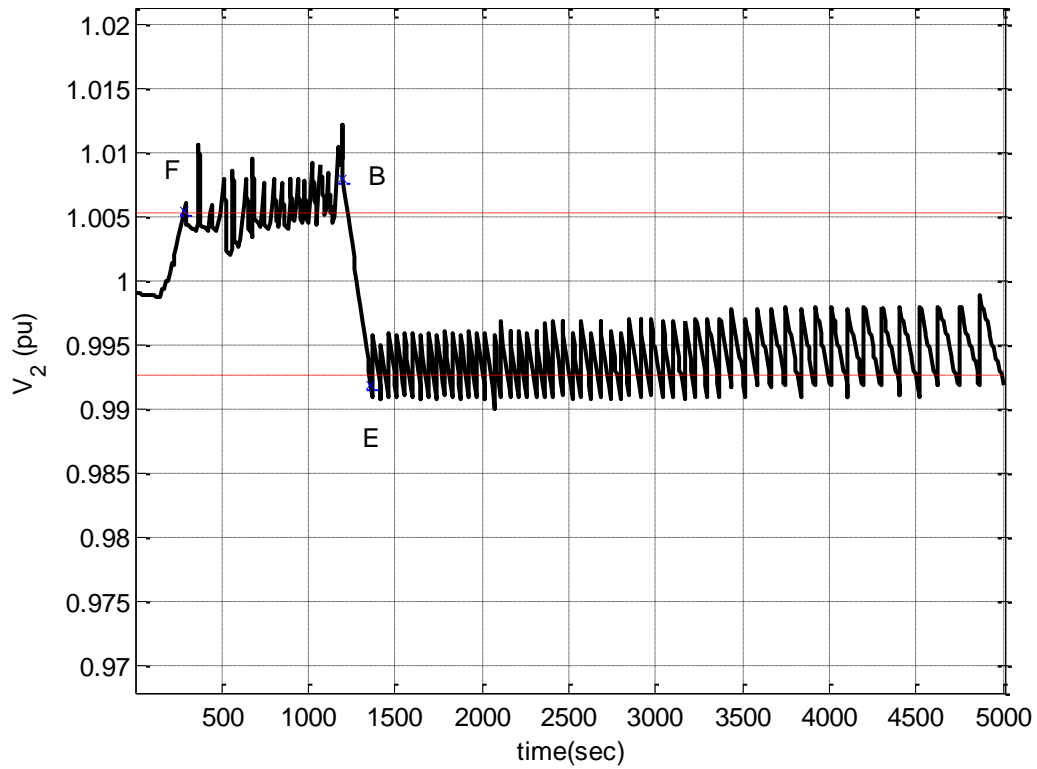
Σχήμα 5.34 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)

Στα Σχ. 5.32-5.34 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.32-5.34, το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 1200s$ (Σημείο D: $I_W = I_W^{lim}$), ενώ το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π των Διδύμων δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι $5000s$.

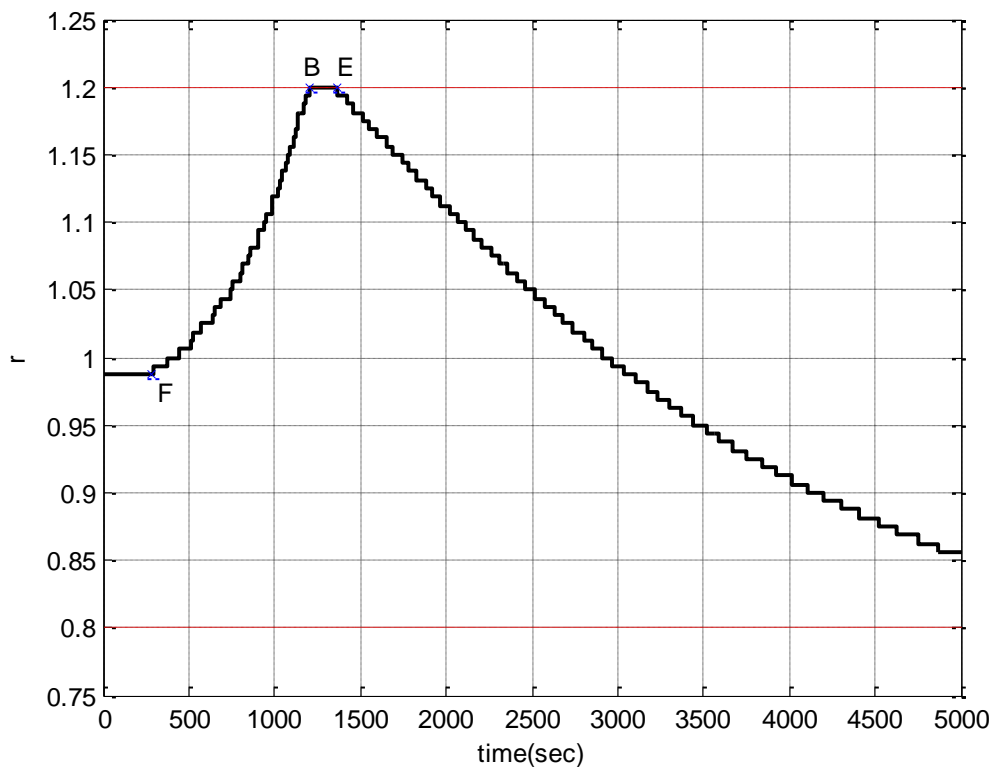
Από την χρονική στιγμή $t = 1200s$ κι έπειτα ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα και απενεργοποιείται ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης μέσω της προσαρμογής της V_W . Ως εκ τούτου, αφού πλέον δεν μπορεί να ρυθμιστεί η τάση V_1 , παρατηρούμε στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 5.32) ότι αρχίζει να μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης, κάτι το οποίο τελικά οδηγεί σε αστάθεια τάσεως του συστήματος.

Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.34, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα λειτουργεί επαναλαμβανόμενα και κρατάει την τιμή του ρεύματος του αιολικού πάρκου μικρότερη ή ίση του άνω ορίου (Σημείο D: $t=1200s$). Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι η τάση του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων παραμένει σχεδόν σταθερή ούτως ώστε να διατηρεί τη μέγιστη τιμή του ρεύματος (Σχ. 5.33), καθώς και ότι οι επαναλαμβανόμενες κινήσεις του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ κρατάνε τη δευτερεύουσα τάση V_2 (Μέση Τάση Διανομής) σχεδόν σταθερή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.35.

Τα Σχ.5.35-5.36 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (MT) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσεσι του χρόνου.



Σχήμα 5.35 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ ΜΤ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

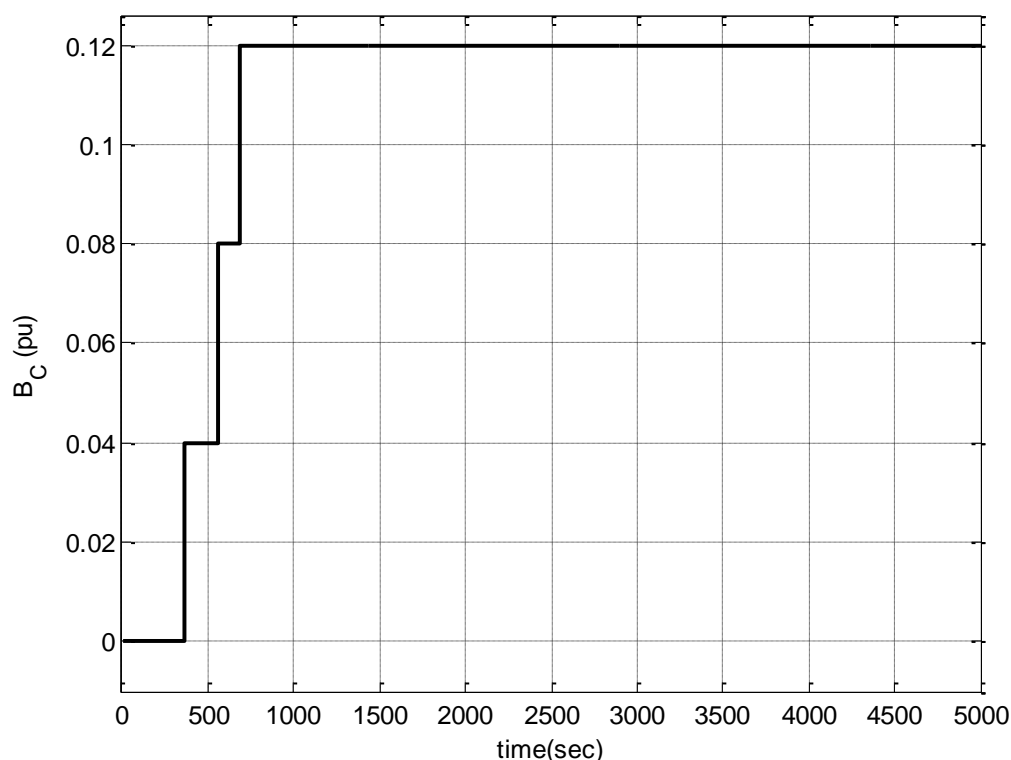


Σχήμα 5.36 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

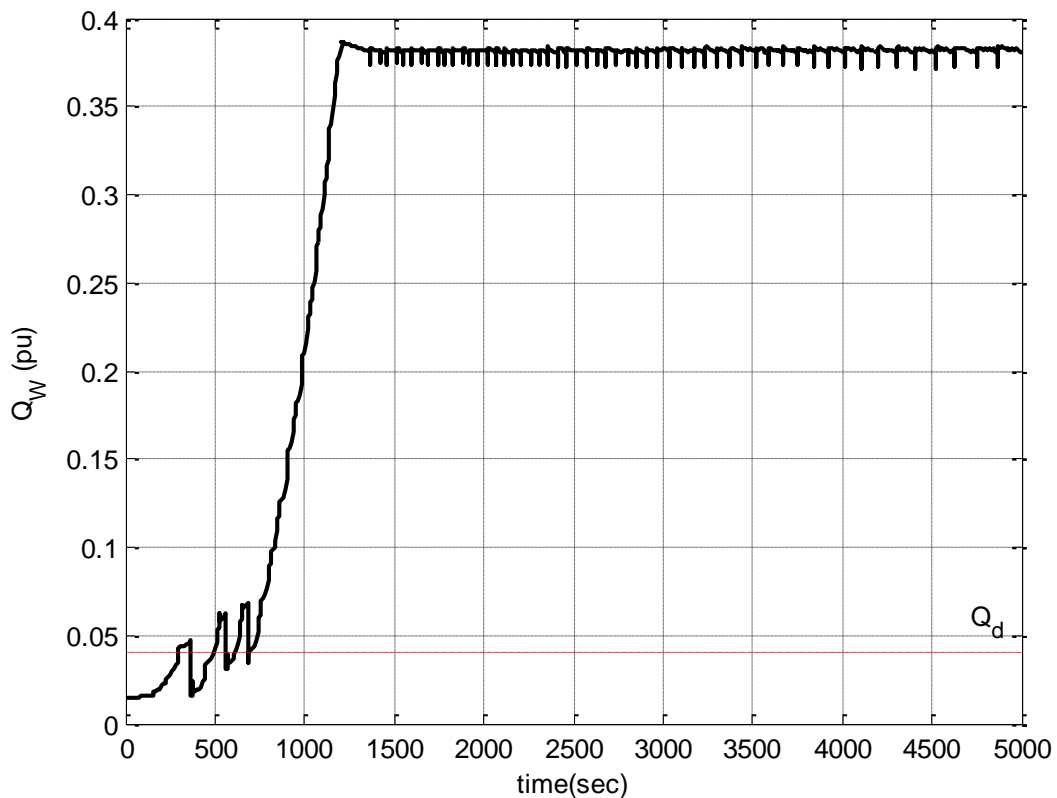
Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (MV) ξεπερνάει το άνω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο F: Σχ. 5.35-5.36, $t=280s$).

Το βήμα του μετασχηματιστή αρχίζει να αυξάνεται τότε, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχ. 5.35), η ταυτόχρονη αύξηση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου πετυχαίνουμε το άνω όριό του (Σημείο B: $r = r_{max}$, $t = 1210sec$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει. Ταυτόχρονα παρατηρείται ότι πριν από 10s ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα, αφού το ρεύμα ξεπερνάει για πρώτη φορά την μέγιστη τιμή του (Σημείο D), το οποίο προκαλεί την απενεργοποίηση του ελεγκτή ρυθμίσεως τάσης V_1 (ΥΤ). Τότε, η τάση V_1 αρχίζει να μειώνεται. Ως επακόλουθο, αρχίζει και η τάση V_2 να μειώνεται, ενώ εάν δεν είχε ενεργοποιηθεί ο περιοριστής εκείνη την χρονική στιγμή, τότε με την σταθεροποίηση του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ κανονικά θα είχαμε αύξηση της τάσης V_2 . Το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό για ένα χρονικό διάστημα, αφού η τάση V_2 βρίσκεται εντός νεκρής ζώνης. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει το κάτω της όριο (Σημείο E: Σχ. 5.35-5.36, $t=1360s$) και ως εκ τούτου μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός νεκρής ζώνης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.35.

Στα Σχ.5.37-5.38 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_C , καθώς και της εγχεόμενης αέρου ισχύος Q_W του Α/Π των Διδύμων.



Σχήμα 5.37 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 5.38 Εγχεόμενη Αεργος Ισχύς Α/Π Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)

Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η αεργος ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια $60s$, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.28, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 360s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 560s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 680s$.

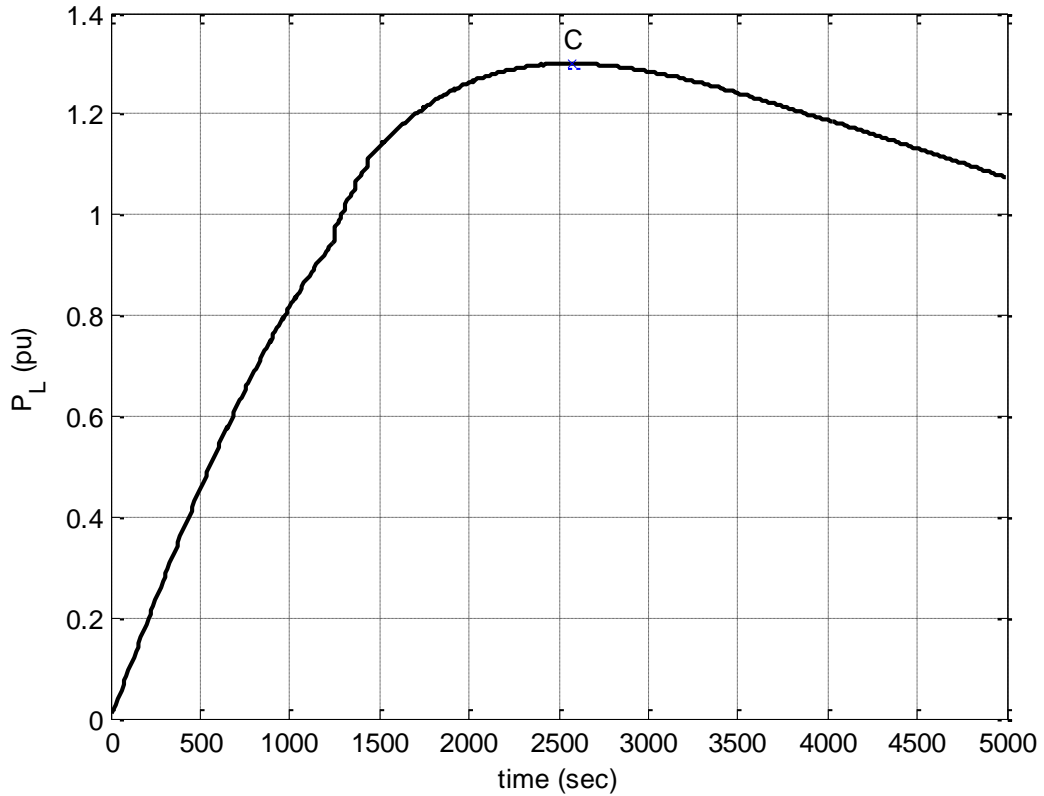
5.3 Εντολή Αέργου Υποστήριξης

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μία ευφυής μορφού ελέγχου της υψηλής τάσης μέσω εντολής αέργου υποστήριξης στο σύστημά μας, όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 4.5.2.2. Ακολούθως εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο διαφορετικών Αιολικών Πάρκων που προέρχονται από στοιχεία του ΑΔΜΗΕ.

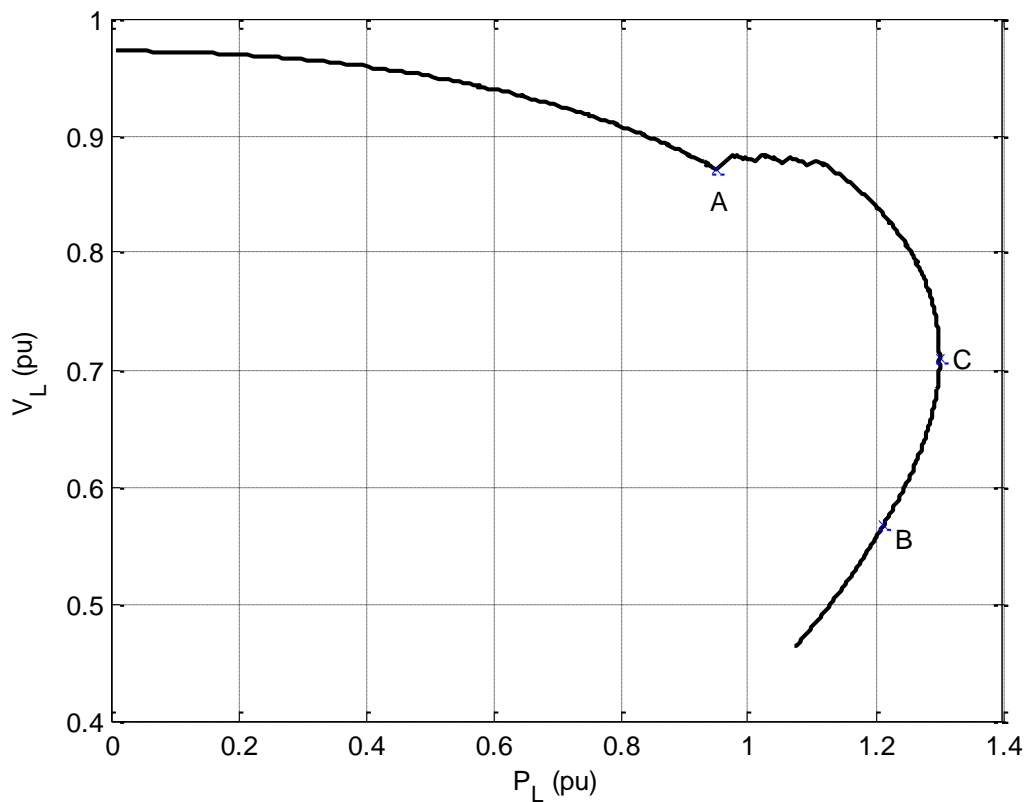
5.3.1 Α/Π Ελίκης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Στα Σχήματα 5.39-5.40 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό, το Σημείο B στο σημείο όπου ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φθάνει στο κάτω όριό του, r_{min} , και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή και το Σημείο A στο σημείο που η τάση του μετατροπέα φθάνει στη

μέγιστη τιμή της, $V_{w_{max}}$, και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή αντίστοιχα. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με την εντολή άεργης υποστήριξης ισούται τελικά με $130MW$, δηλαδή ίδια με την περίπτωση συνεχούς ελέγχου (Σχ. 5.39-5.40).



Σχήμα 5.39 Ισχύς Φορτίου (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π Ελίκης



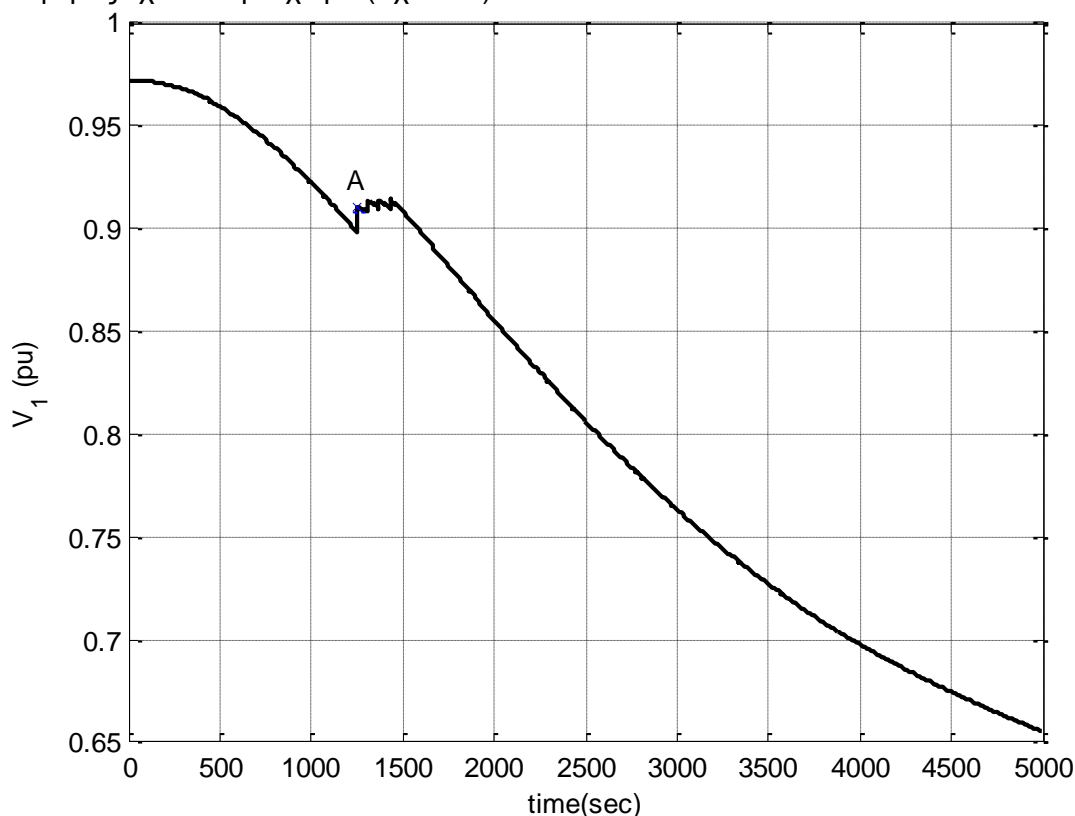
Σχήμα 5.40 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π Ελίκης

Αυτό αποτελεί κάτι το αξιοσημείωτο, αν λογίσουμε συγκριτικά το πόσο πιο οικονομική και ταυτόχρονα εύκολη είναι η προτεινόμενη ευφυής μέθοδος, συγκριτικά με τον συνεχή έλεγχο. Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούν πιο διεξοδικά τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου έναντι των δύο προηγούμενων.

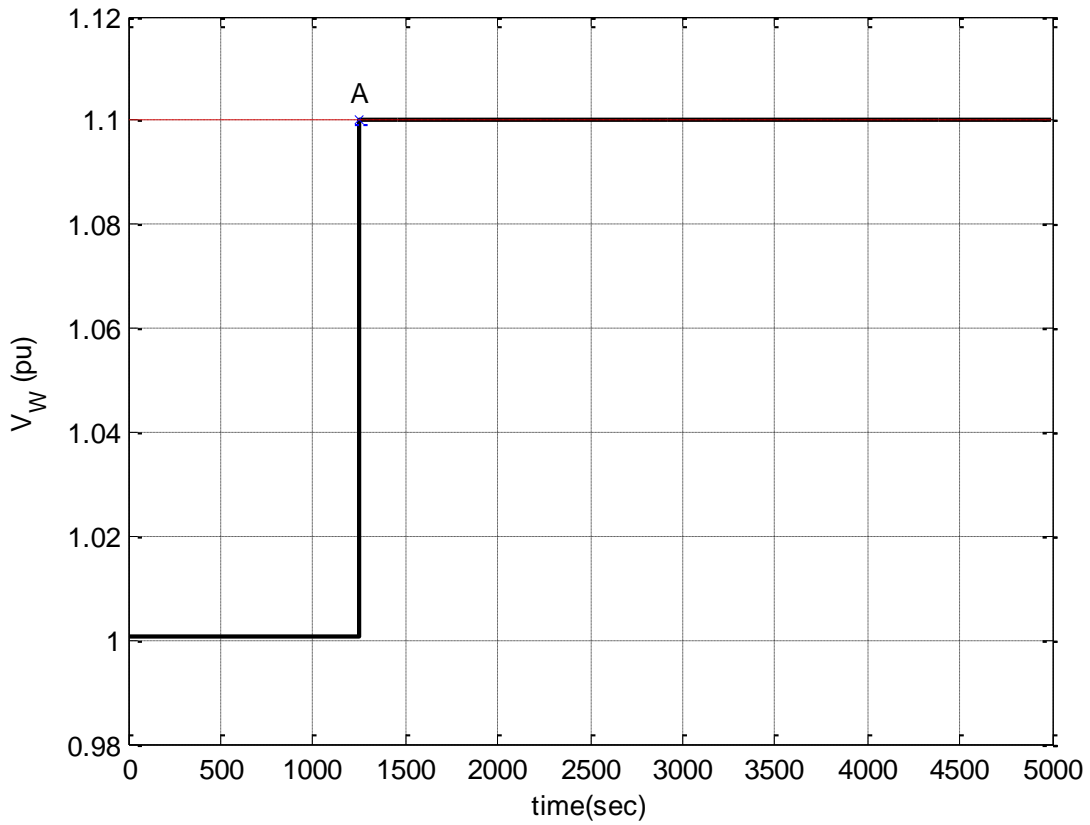
Στα Σχ. 5.41-5.43 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.41-5.43, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 1250s$ (Σημείο Α: $V_W = V_W^{lim}$), δηλαδή 10s αφότου η υψηλή τάση βρεθεί εκτός του κάτω ορίου V_1^{lim} (Σχήμα 5.41), το οποίο αποτελεί και τη διακριτή μετάβαση του ευφυούς ελέγχου που προαναφέραμε, ενώ το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 5000s.

Η τάση V_1 (Σχήμα 5.41) αρχίζει εξαρχής να μειώνεται σταδιακά, αφού δεν υπάρχει κάποια μορφή ελέγχου μέχρι στιγμής που να την συγκρατεί εντός της νεκρής ζώνης. Από την χρονική στιγμή $t = 1250s$, η τάση του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης φθάνει το μέγιστό της όριο και σταθεροποιείται σε αυτό ($V_W = V_W^{lim}$). Σε αυτή τη χρονική στιγμή γίνεται η μοναδική προσπάθεια επαναφοράς της υψηλής τάσης εντός της νεκρής ζώνης. Εν συνεχεία, όπως είναι λογικό, η υψηλή τάση μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.

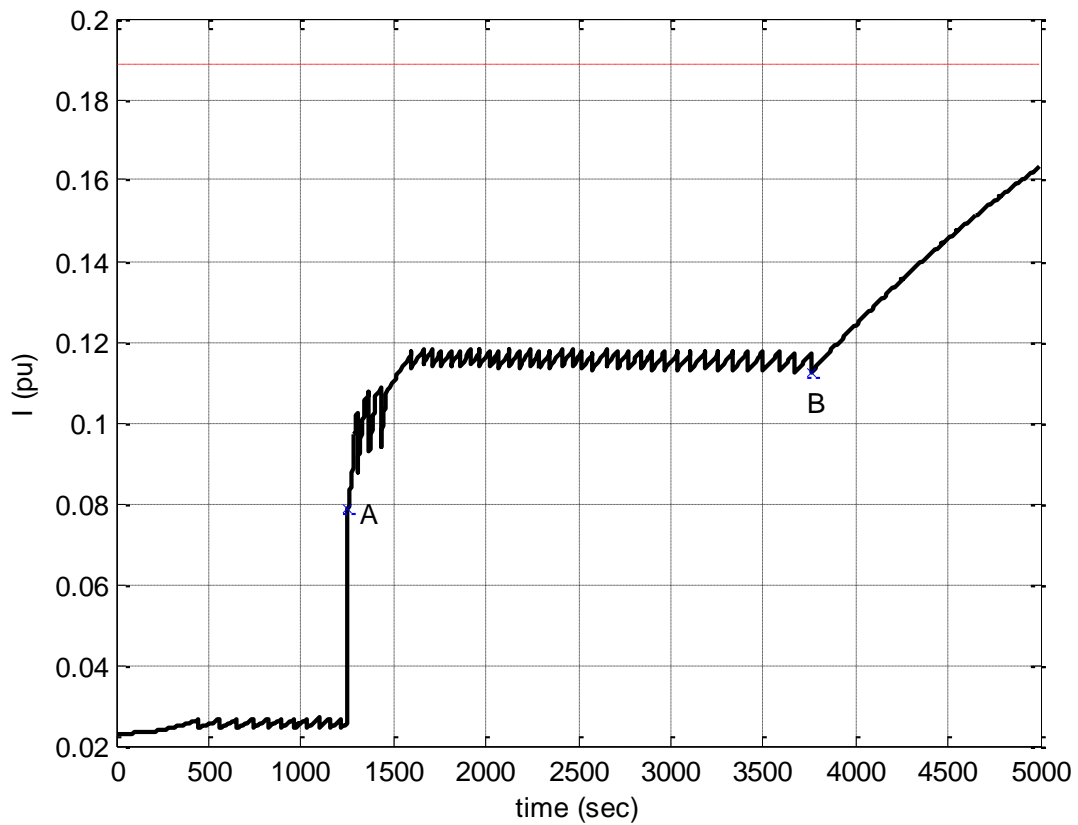
Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.43, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.44. Από την στιγμή που το βήμα του μετασχηματιστή φθάσει στο κάτω όριό του, την χρονική στιγμή $t=3760s$, (Σχ. 5.45, Σημείο Β: $r = r_{min}$) το ρεύμα αρχίζει να αυξάνεται, αλλά βρίσκεται ήδη αφότου οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος στο δίκτυο μεταφοράς έχουν λάβει χώρα (Σχ. 5.40).



Σχήμα 5.41 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Εντολή Αέργης Υποστήριξης), Α/Π Ελίκης

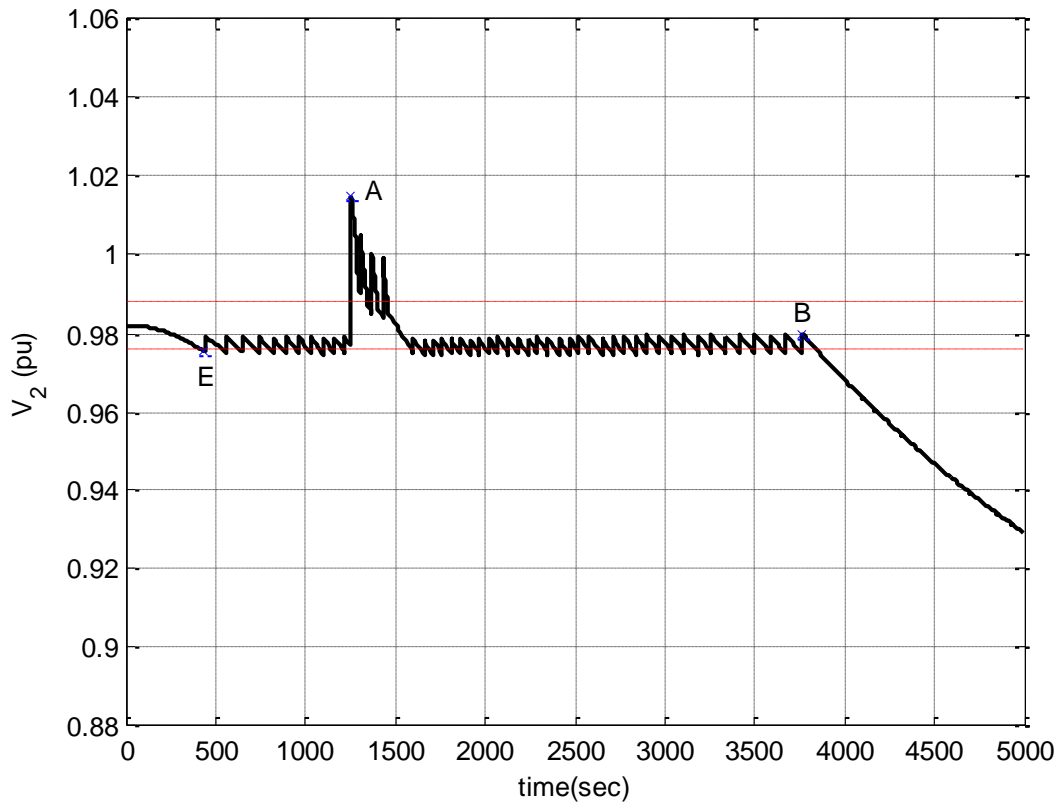


Σχήμα 5.42 Τάση ζυγού ΜΤ Α/Π Ελίκης (Εντολή Άεργης Υποστήριξης)

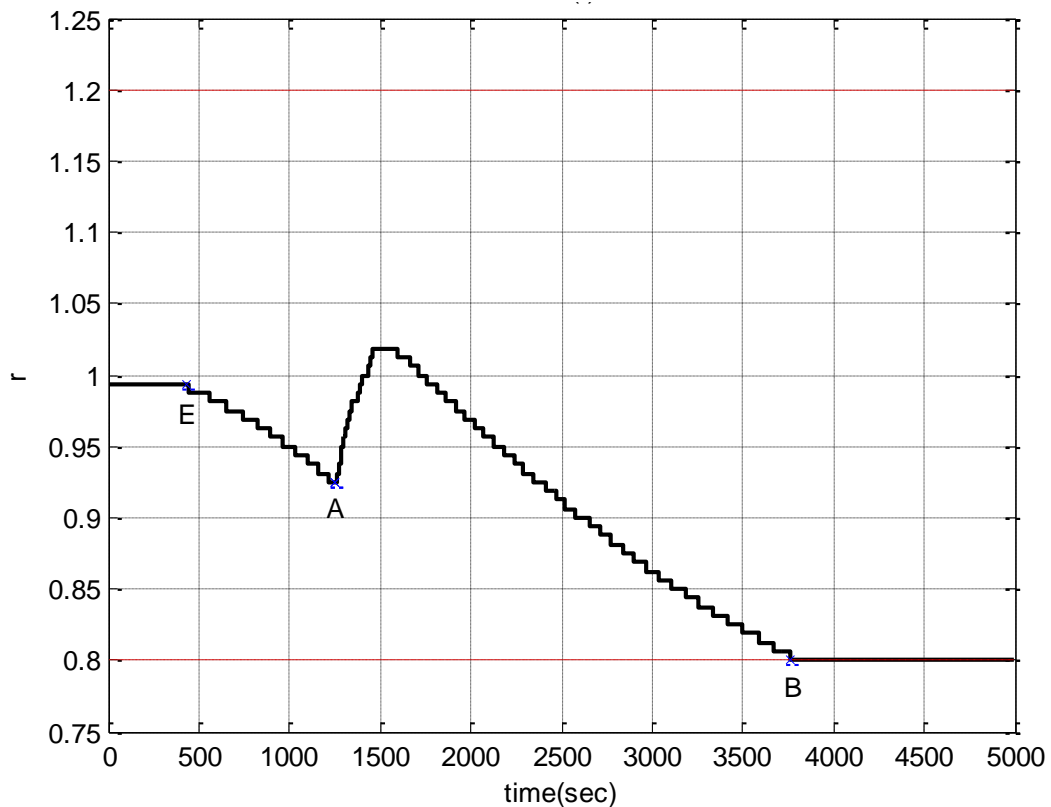


Σχήμα 5.43 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Εντολή Άεργης Υποστήριξης)

Τα Σχ.5.44-5.45 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (ΜΤ) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 5.44 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ ΜΤ (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π Ελίκης

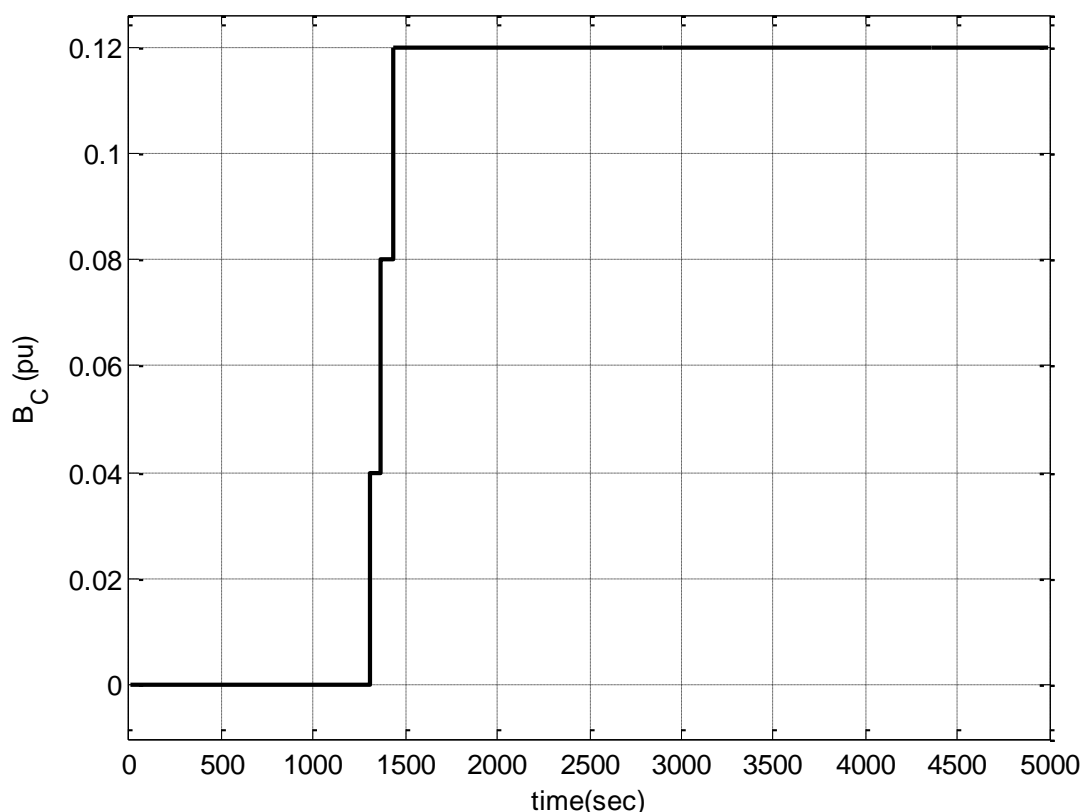


Σχήμα 5.45 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π 1

Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (MV) ξεπερνάει το άνω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο E: Σχ. 5.44-5.45, $t=430s$).

Ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνεται τότε, προσπαθώντας να αυξήσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχήμα 5.44), η ταυτόχρονη μείωση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου η προς έλεγχο τάση του αιολικού πάρκου φτάνει το άνω όριο της (Σημείο A: $V_W = V_W^{lim}$).

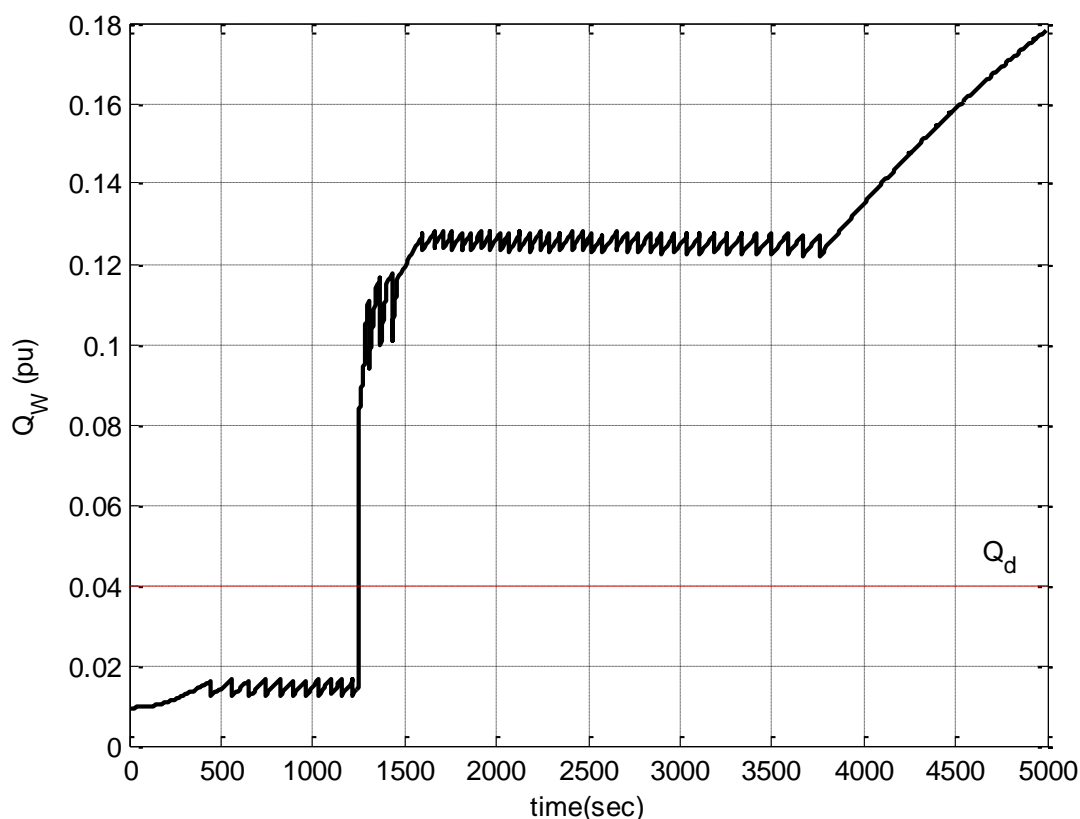
Ακολούθως, ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ αρχίζει να αυξάνεται, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη αύξηση της τάσης ελέγχου V_2 . Μάλιστα, σε αυτό το χρονικό διάστημα γίνεται και η ζεύξη των 3 συστοιχιών πυκνωτών και ως εκ τούτου μεγαλώνει ο χρόνος όπου συμβαίνει η αύξηση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ. Εν συνεχεία, από την στιγμή που η τάση ελέγχου V_2 βρεθεί εντός νεκρής ζώνης και για όσο χρονικό διάστημα συμβαίνει αυτό, το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει εκ νέου το κάτω της όριο (Σχ. 5.44-5.45, $t=1600s$) και ως επακόλουθο μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός των επιθυμητών ορίων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.44.



Σχήμα 5.46 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π 1

Με την συνεχή μείωση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ, κάποια χρονική στιγμή πετυχαίνουμε το κάτω όριο του (Σημείο Β: $r = r_{min}$, $t = 3760s$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την ελάχιστη τιμή. Ακολούθως, παρατηρείται η μείωση της τάσης V_2 εκτός των ορίων της νεκρής ζώνης, αφού ουσιαστικά απενεργοποιείται ο μηχανισμός στήριξής της.

Στα Σχ.5.46-5.47 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_c , καθώς και της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_w του Α/Π της Ελίκης.



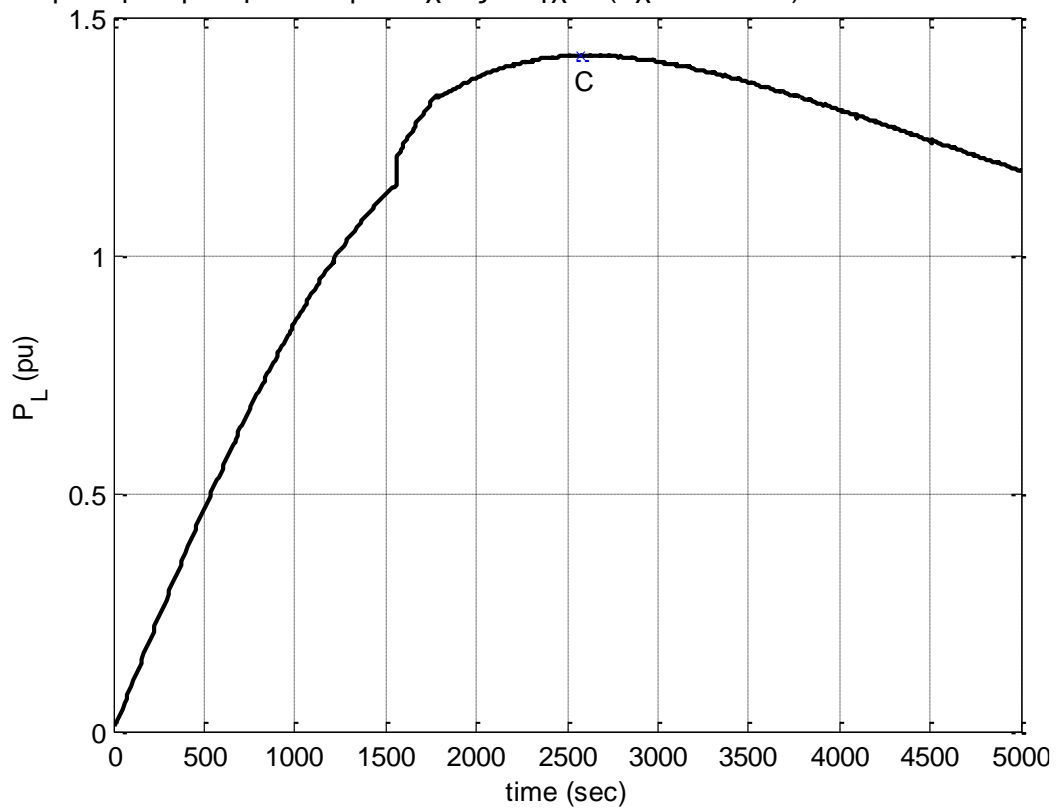
Σχήμα 5.47 Εγχεόμενη Αέργου Ισχύς Α/Π Ελίκης (Εντολή Αέργου Υποστήριξης)

Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η αέργου ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια $60s$, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.28, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 1310s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 1370s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 1430s$.

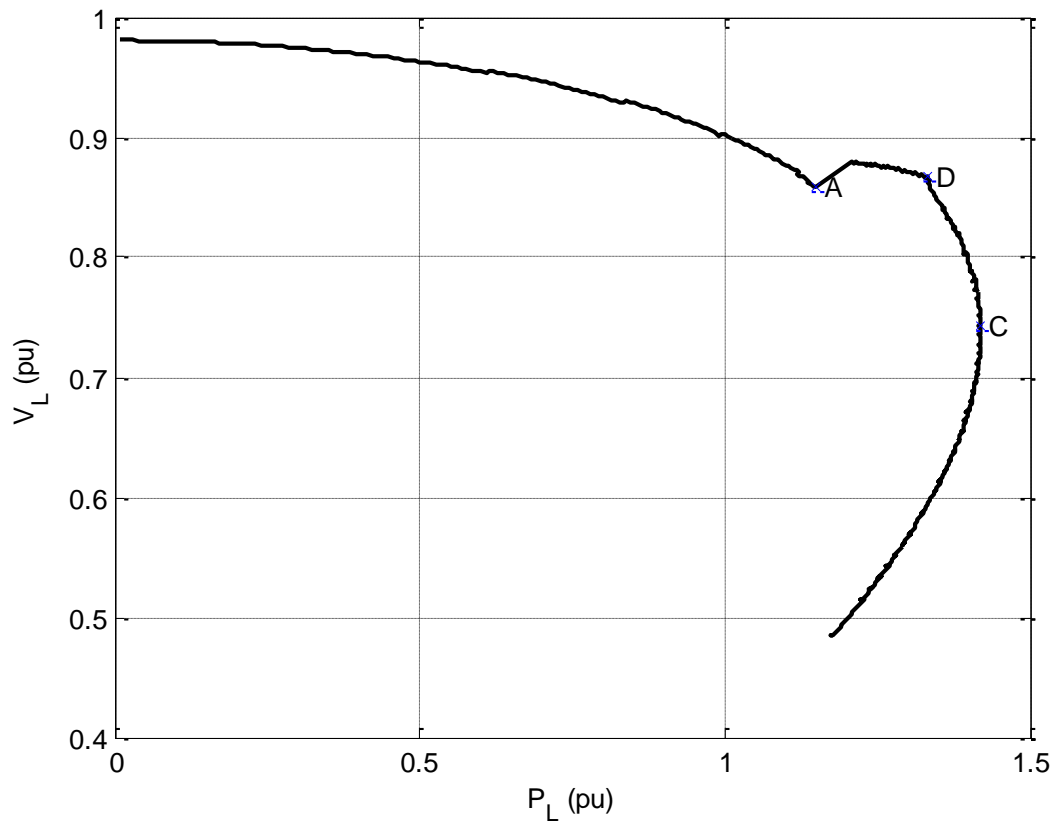
5.3.2 Α/Π Διδύμων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα. Στα Σχήματα 5.48-5.49 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύος του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που συναντάται στο ζυγό, το Σημείο D στο σημείο που ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα, δηλαδή εκεί που το ρεύμα του μετατροπέα φθάνει το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος και τέλος το Σημείο A στο σημείο που η τάση του μετατροπέα φθάνει στη μέγιστη τιμή της, $V_{w,max}$. Η Μέγιστη

Μεταφερόμενη Ισχύς με την εντολή αέργου υποστήριξης ισούται τελικά με 142MW, δηλαδή ίδια με την περίπτωση συνεχούς ελέγχου (Σχ. 5.48-5.49).



Σχήμα 5.48 Ισχύς Φορτίου (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π Διδύμων

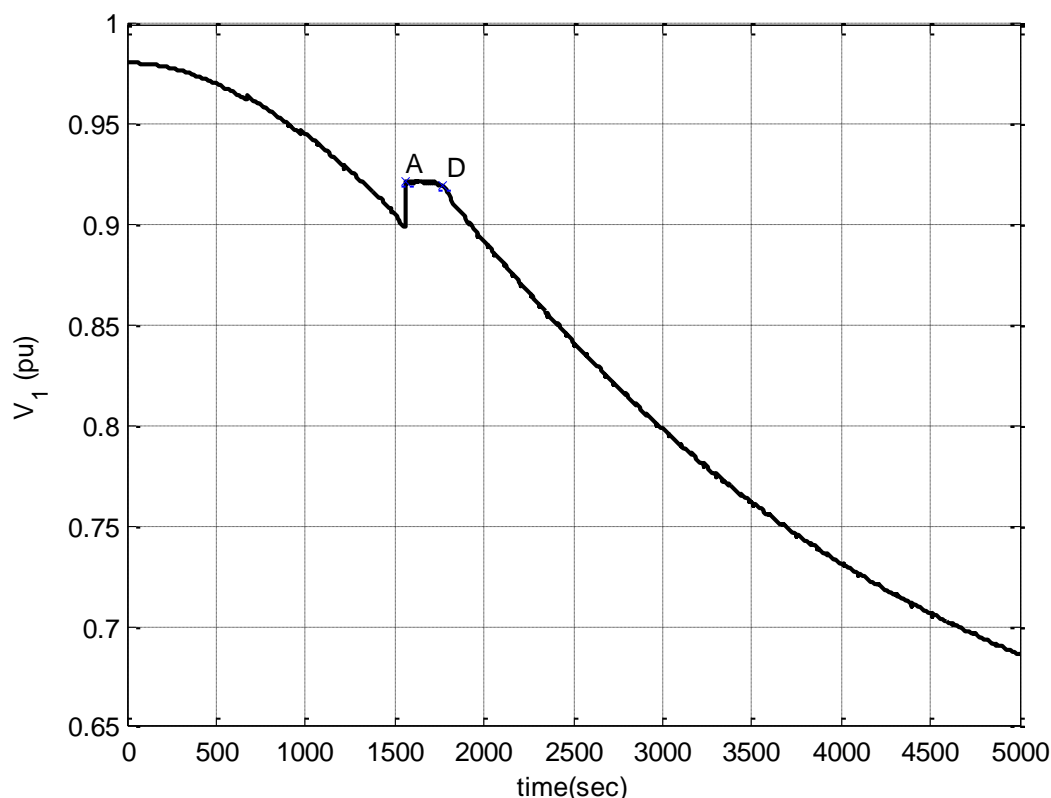


Σχήμα 5.49 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π Διδύμων

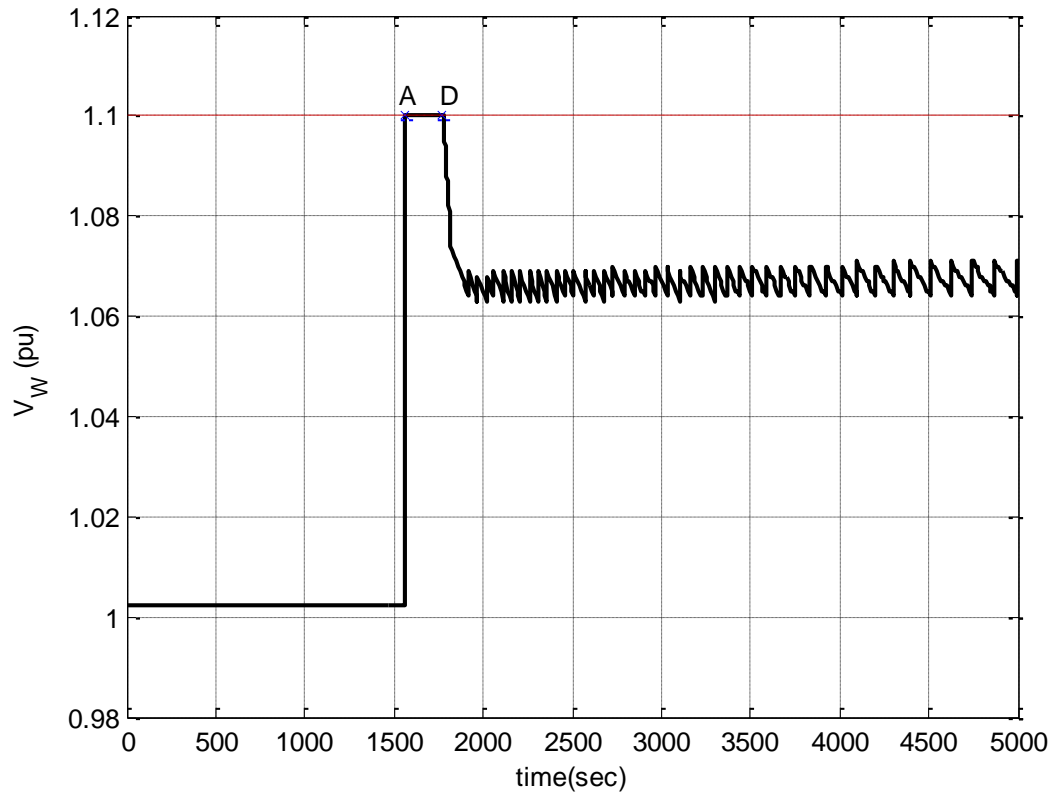
Αυτό αποτελεί κάτι το αξιοσημείωτο, αν λογίσουμε συγκριτικά το πόσο πιο οικονομική και ταυτόχρονα εύκολη είναι η προτεινόμενη ευφυής μέθοδος, συγκριτικά με τον συνεχή έλεγχο. Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούν πιο διεξοδικά τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου έναντι των δύο προηγούμενων.

Στα Σχ. 5.50-5.52 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 5.50-5.52, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 1560s$ (Σημείο Α: $V_W = V_W^{lim}$), δηλαδή 10s αφότου η υψηλή τάση βρεθεί εκτός του κάτω ορίου V_1^{lim} (Σχήμα 5.50), το οποίο αποτελεί και τη διακριτή μετάβαση του ευφυούς ελέγχου που προαναφέρθηκε και το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 1770s$ (Σημείο D: $I_W = I_W^{lim}$). Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 5000s.

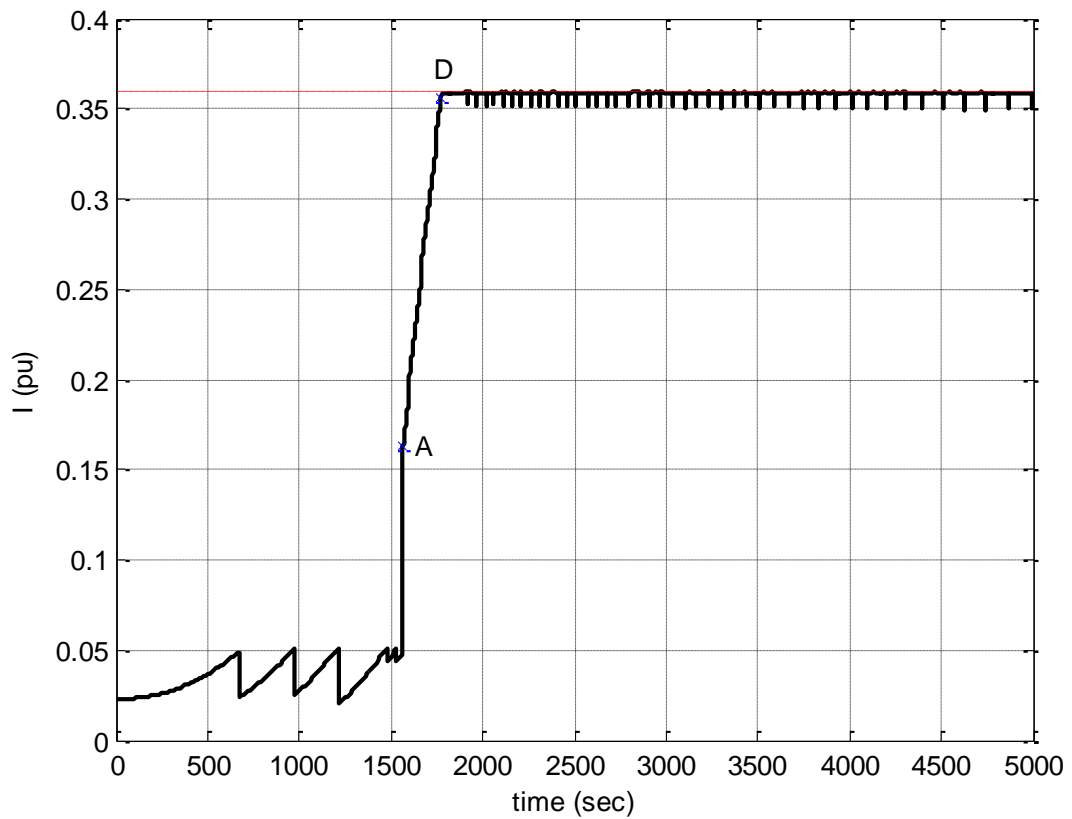
Η τάση V_1 (Σχ. 5.50) αρχίζει εξαρχής να μειώνεται σταδιακά, αφού δεν υπάρχει κάποια μορφή ελέγχου μέχρι στιγμής που να την συγκρατεί εντός της νεκρής ζώνης. Από την χρονική στιγμή $t = 1560s$, η τάση του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης φθάνει το μέγιστο της όριο και σταθεροποιείται σε αυτό ($V_W = V_W^{lim}$). Σε αυτή τη χρονική στιγμή γίνεται η μοναδική προσπάθεια επαναφοράς της υψηλής τάσης εντός της νεκρής ζώνης. Εν συνεχεία, από την στιγμή που ενεργοποιηθεί ο περιοριστής ρεύματος μετατροπέα, η υψηλή τάση μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.50 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Εντολή Αέργης Υποστήριξης), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 5.51 Τάση ζυγού ΜΤ Α/Π Διδύμων (Εντολή Άεργης Υποστήριξης)

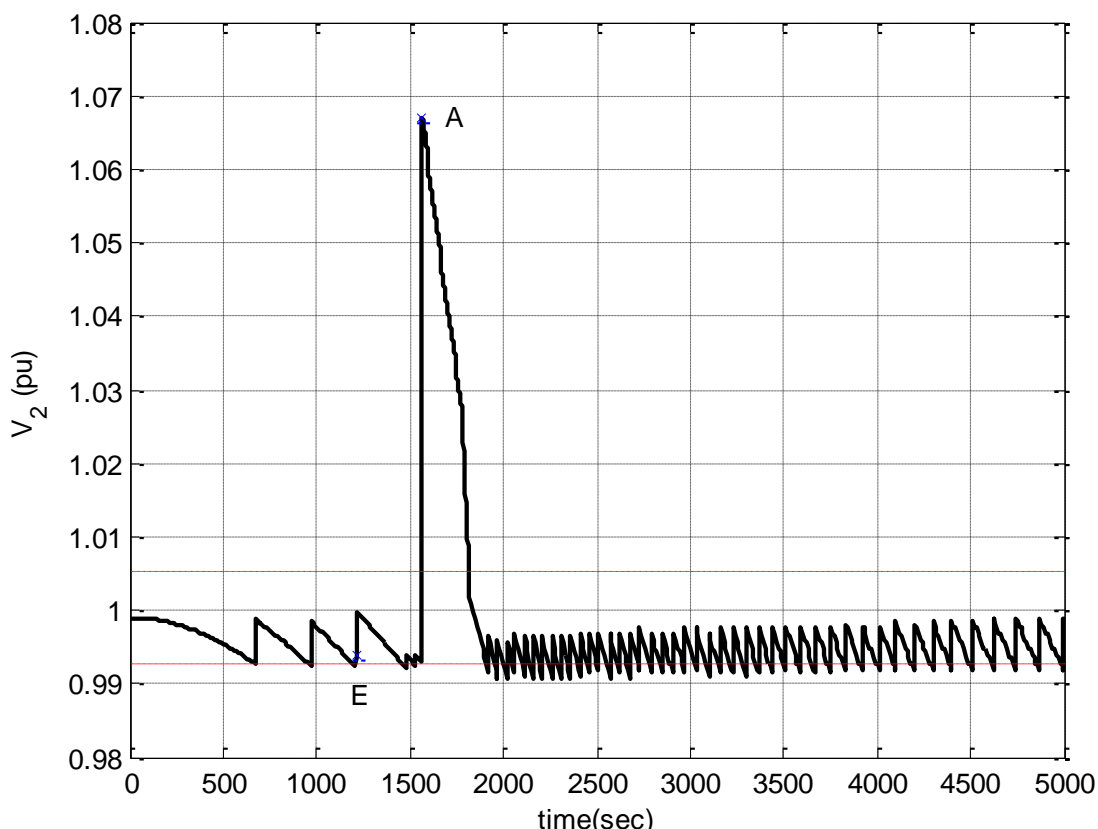


Σχήμα 5.52 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Εντολή Άεργης Υποστήριξης)

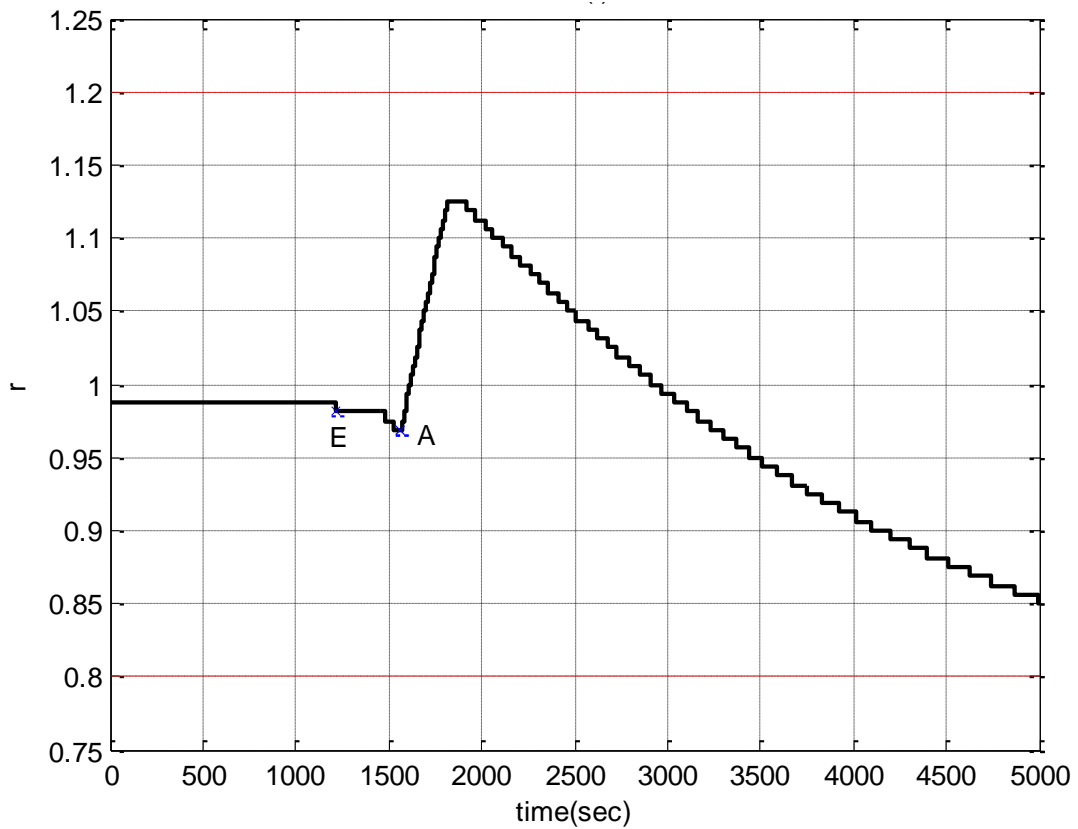
Όπως φαίνεται και στο Σχ.5.52 , το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης από την χρονική στιγμή $t=1770s$ κι έπειτα, αφού ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα λειτουργεί επαναλαμβανόμενα κρατώντας την τιμή του ρεύματος του αιολικού πάρκου μικρότερη ή ίση του άνω ορίου. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.53.

Τα Σχ.5.53-5.54 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (ΜΤ) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσει του χρόνου. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (ΜV) ξεπερνάει το κάτω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο Ε: Σχ. 5.53-5.54, $t=1210s$).

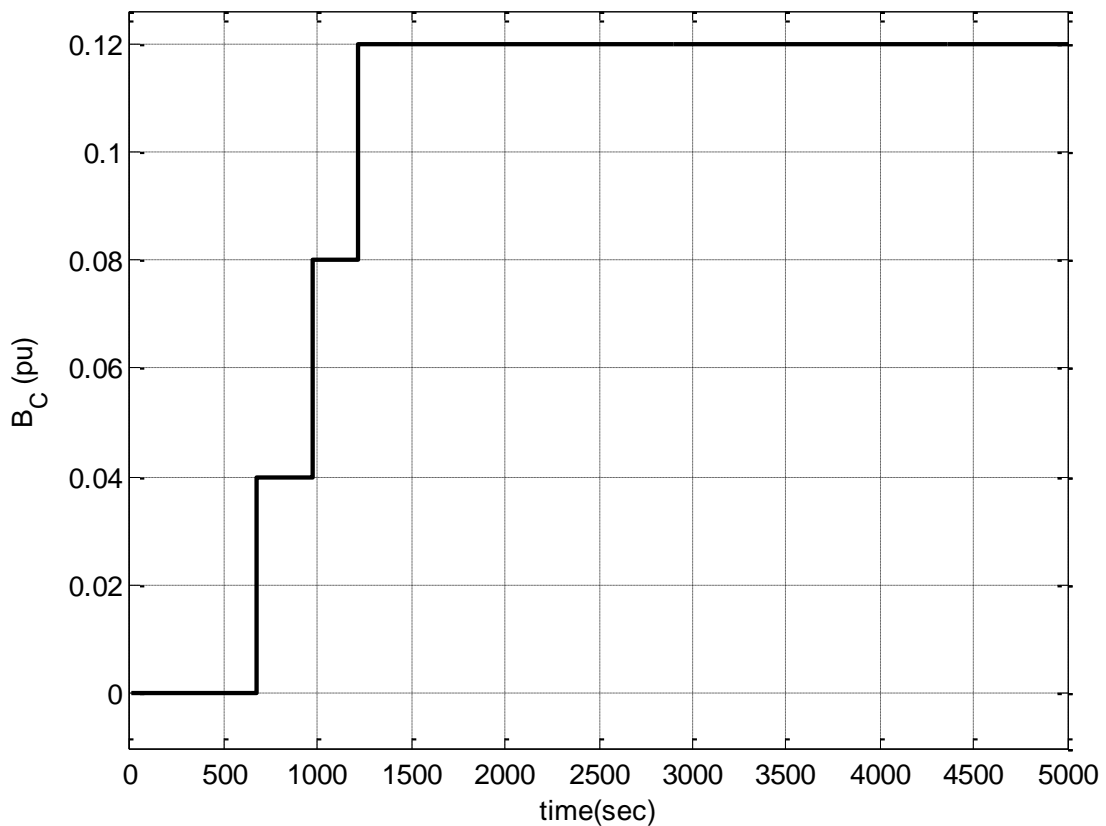
Ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνεται τότε, προσπαθώντας να αυξήσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Παρ'όλα αυτά, επειδή ταυτόχρονα γίνεται η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας των πυκνωτών, προτού αρχίσει να μειώνεται σταδιακά, αρχικά παραμένει σταθερό σε μία ελαφρώς μειωμένη τιμή από την αρχική. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχήμα 5.53), η ταυτόχρονη μείωση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου η προς έλεγχο τάση του αιολικού πάρκου φτάνει το άνω όριό της (Σημείο Α: $V_W = V_W^{lim}$).



Σχήμα 5.53 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ ΜΤ (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π 2



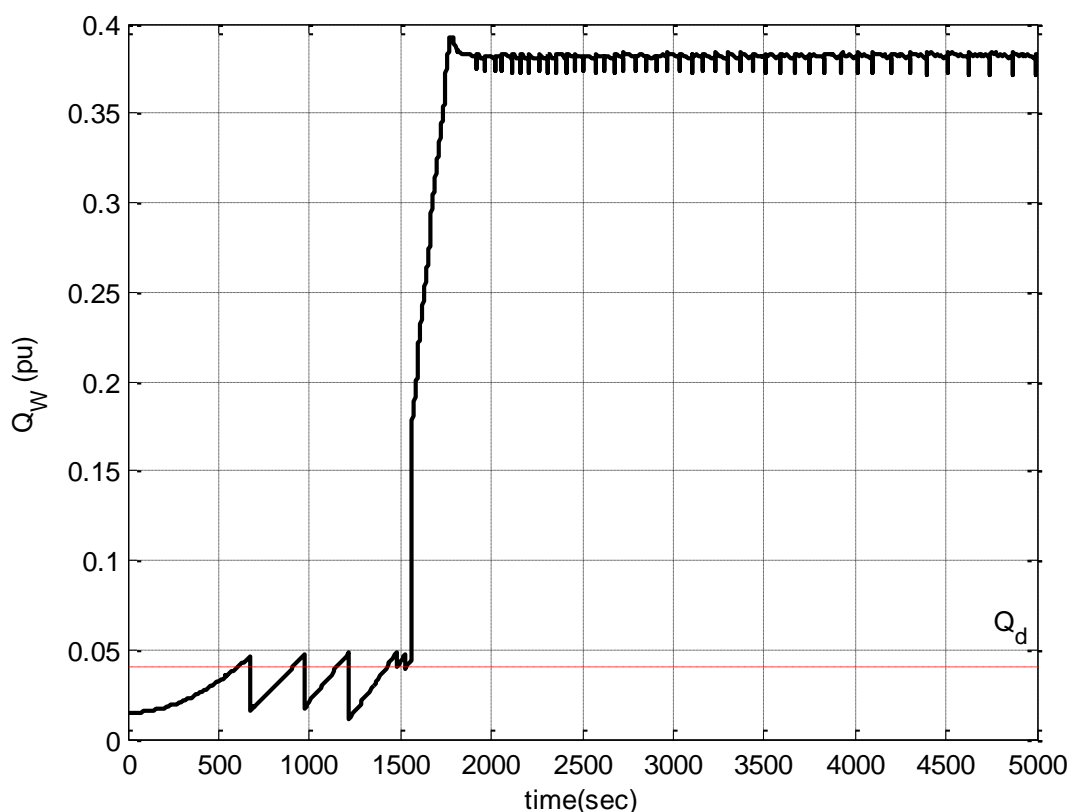
Σχήμα 5.54 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π 2



Σχήμα 5.55 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Εντολή Άεργης Υποστήριξης), Α/Π 2

Ακολουθώς, ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ αρχίζει να αυξάνεται, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη αύξηση της τάσης ελέγχου V_2 . Εν συνεχεία, από την στιγμή που η τάση ελέγχου V_2 βρεθεί εντός νεκρής ζώνης και για όσο χρονικό διάστημα συμβαίνει αυτό, το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει εκ νέου το κάτω της όριο (Σχ. 5.53-5.54, $t=1920s$) και ως επακόλουθο μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός των επιθυμητών ορίων, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.53.

Στα Σχ.5.55-5.56 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_c , καθώς και της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_w του Α/Π της Ελίκης.

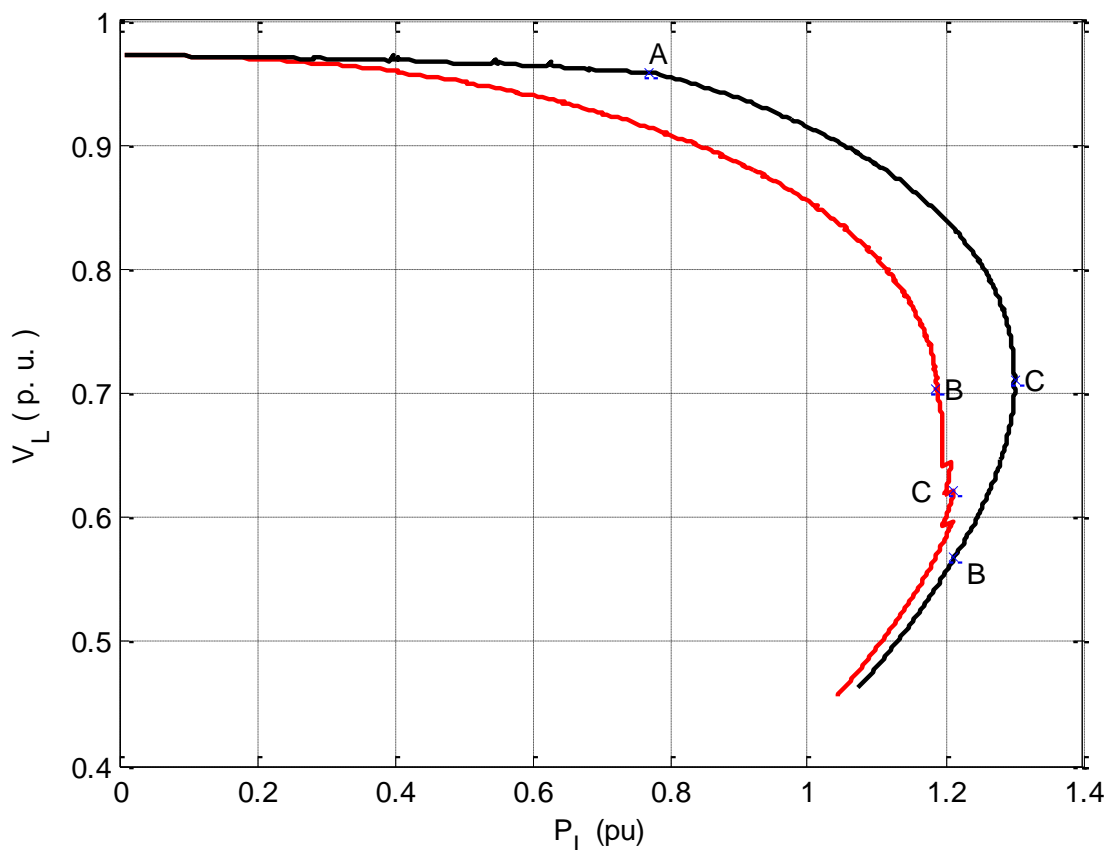


Σχήμα 5.56 Εγχεόμενη Αέργου Ισχύς Α/Π Διδύμων (Εντολή Αεργής Υποστήριξης)

Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε φορά που η αέργου ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 5.28, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 670s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 970s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 1220s$.

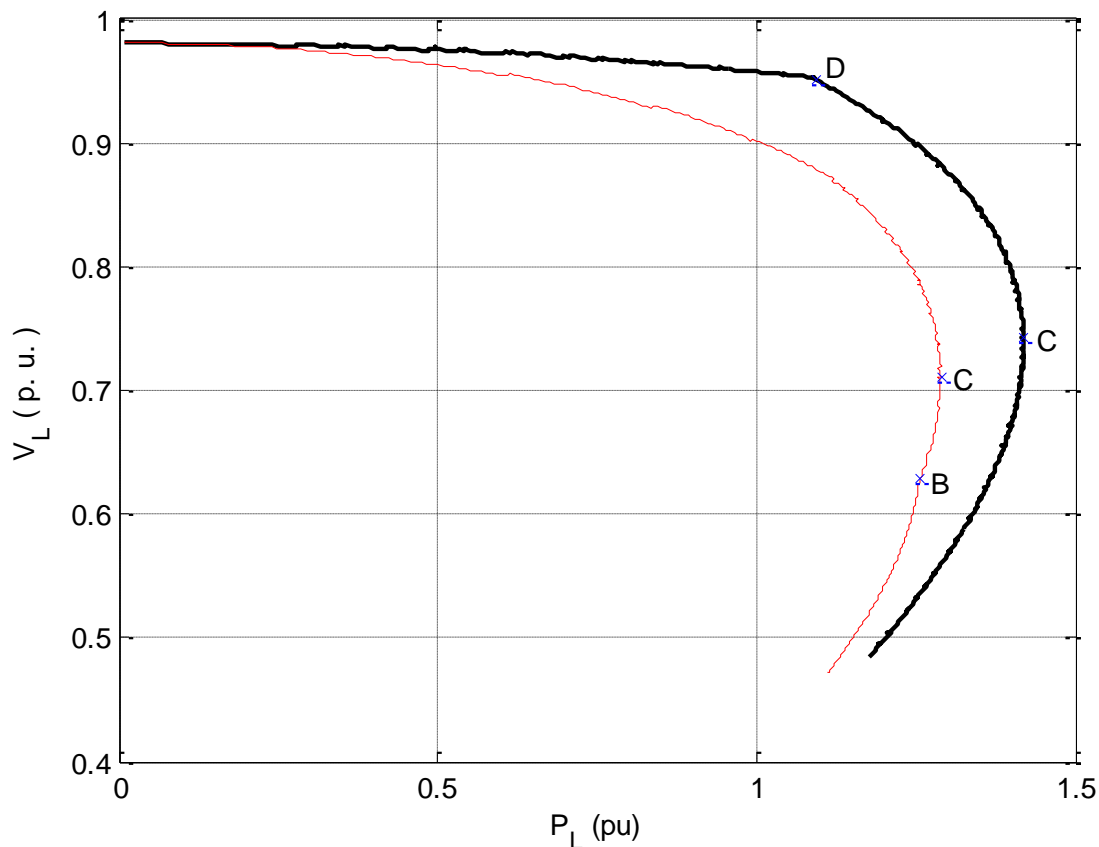
5.4 Σύγκριση Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος

Στο Σχ. 5.57 αναπαρίσται η καμπύλη ισχύος-τάσης (PV) με τον συνεχή έλεγχο του ζυγού υψηλής τάσης (V_1), μαζί με την PV καμπύλη θεωρώντας σταθερή έγχυση από τη διασυνδετική γραμμή, δηλαδή χωρίς άεργη υποστήριξη από το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης (χωρίς καμία μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης). Όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.57 και συνοψίζεται και στον Πίνακα 5.1, επιτυγχάνεται μία αύξηση περιθωρίου ισχύος της τάξης των 9 MW , η οποία είναι σχεδόν ίση με το μισό ($1/2$) της ονομαστικής ισχύος του μετατροπέα ($S_n = 18.9\text{ MW}$).



Σχήμα 5.57 Καμπύλες PV με συνεχή και χωρίς έλεγχο υψηλής τάσης Α/Π Ελίκης

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 5.58 αναπαριστούμε την καμπύλη ισχύος-τάσης (PV) με τον συνεχή έλεγχο του ζυγού υψηλής τάσης (V_1), μαζί με την PV καμπύλη χωρίς καμία μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης του Α/Π των Διδύμων. Ως φαίνεται και στο Σχήμα 5.58 και συνοψίζεται και στον Πίνακα 5.1, σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται μία αύξηση περιθωρίου ισχύος της τάξης των 13 MW , η οποία είναι σχεδόν ίση με το ένα τρίτο ($1/3$) της ονομαστικής ισχύος του μετατροπέα ($S_n = 36\text{ MW}$).



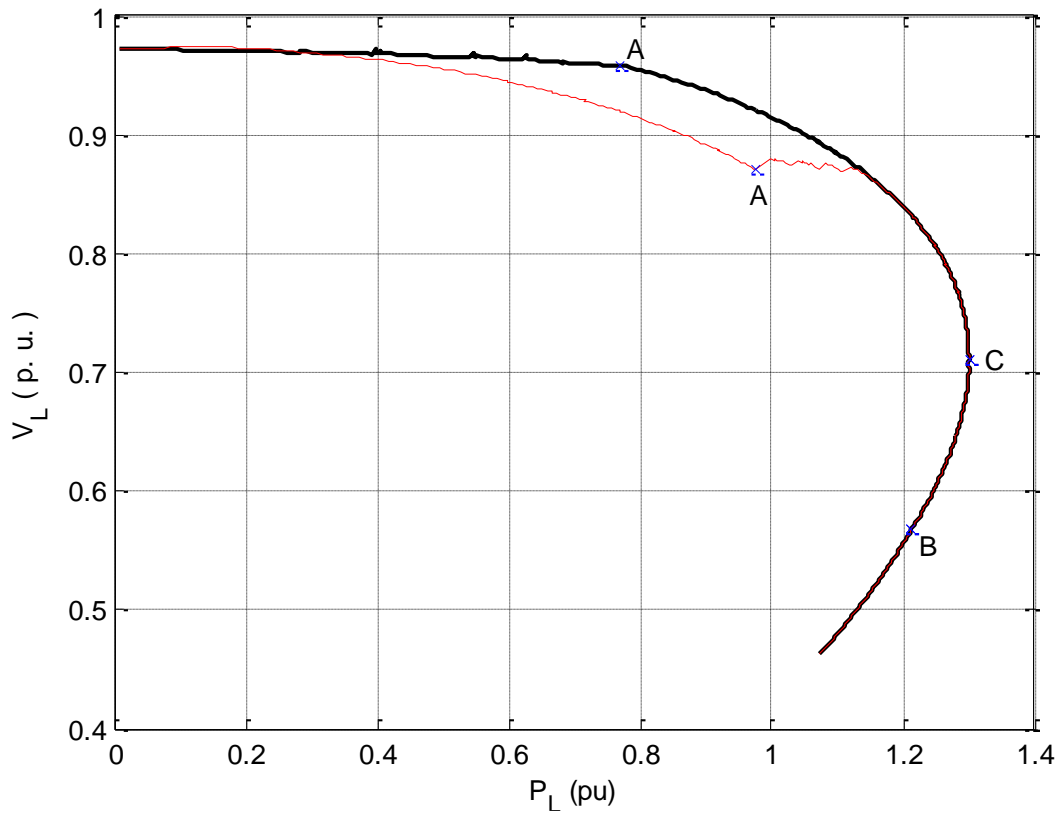
Σχήμα 5.58 Καμπύλες PV με συνεχή και χωρίς έλεγχο υψηλής τάσης Α/Π Διδύμων

Ως εκ τούτου, ο συνεχής έλεγχος του ζυγού της Υψηλής Τάσης μπορεί να αυξήσει την Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύ ενός αδύναμου δικτύου του Σχ. 4.1 κατά ένα παράγοντα μεταξύ 1/2 και 1/3 των ονομαστικών μεγεθών του μηχανισμού στήριξης (σε αυτή την περίπτωση του Αιολικού Πάρκου).

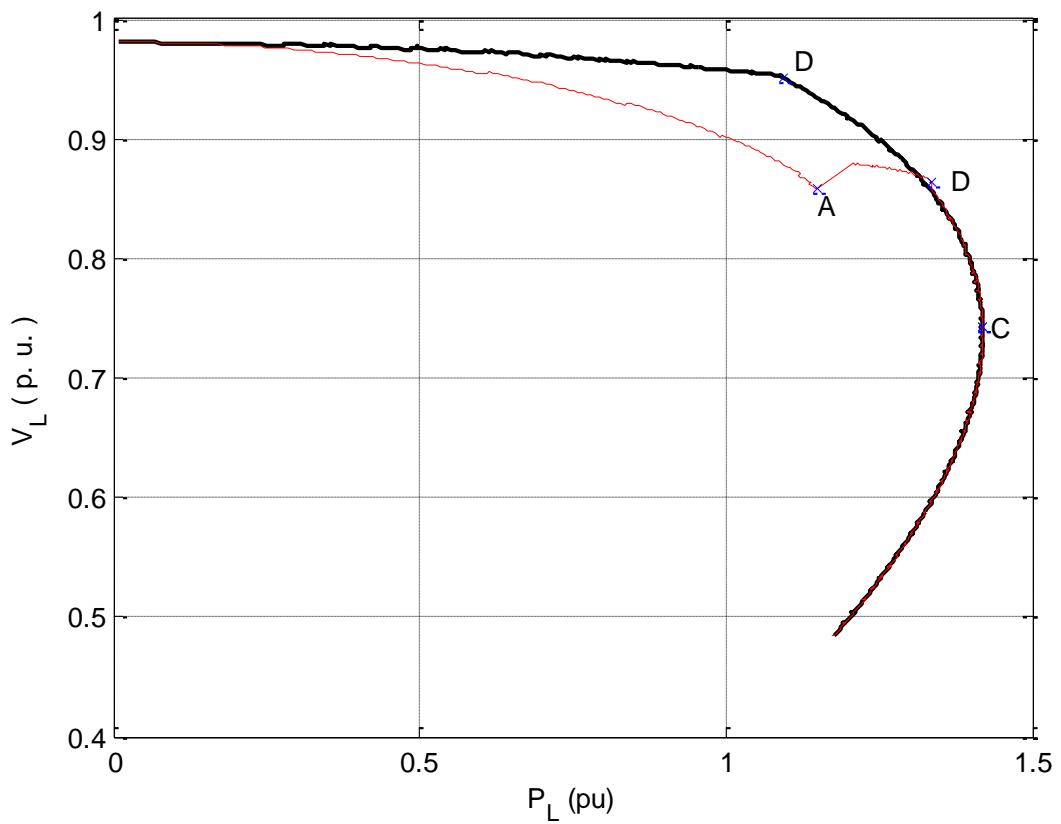
Το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτεί συνεχή κανάλια επικοινωνίας μεγάλης ακρίβειας, ταχύτητας και αξιοπιστίας, όπως για παράδειγμα μία σύνδεση οπτικών ινών μεταξύ υποσταθμού και Α/Π. Αυτό μπορεί να προβεί ένας πολύ περιοριστικός παράγοντας, καθιστώντας την εφαρμογή αυτού του σεναρίου πρακτικά ανέφικτη στις περισσότερες περιπτώσεις.

Από την άλλη μεριά, από την προσομοίωση του συνεχούς ελέγχου της τάσης γίνεται εμφανές ότι ο συνεχής έλεγχος της τάσης στην πλευρά της μεταφοράς έχει μικρή επίπτωση κατά τη διάρκεια συνθηκών μικρής μεταφερόμενης ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη ότι, προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος, τα διαθέσιμα όρια άεργης υποστήριξης πρέπει να επιτευχθούν, είτε σε όρους μέγιστης τάσης γραμμής σύνδεσης (Αιολικό Πάρκο Ελίκης) ή μέγιστου ρεύματος μετατροπέα (Αιολικό Πάρκο Διδύμων).

Για αυτό τον λόγο και κρίθηκε απαραίτητο ένα νέο πιθανό απλουστευμένο σενάριο επικοινωνίας και στρατηγικής ελέγχου της Υψηλής Τάσης, όπως προαναφέρθηκε και στην ενότητα 4.5.2, που απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή (σε αυτή την περίπτωση από το Αιολικό Πάρκο). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς. Αναπαρίσταται ακολούθως η καμπύλη ισχύος-τάσης (PV) με τον συνεχή έλεγχο του ζυγού υψηλής τάσης (V_1), μαζί με την PV καμπύλη θεωρώντας ευφυή έλεγχο της υψηλής τάσης, για το Α/Π της Ελίκης και των Διδύμων αντίστοιχα.



Σχήμα 5.59 Καμπύλες PV με συνεχή και ευφυή έλεγχο υψηλής τάσης A/Π Ελίκης



Σχήμα 5.60 Καμπύλες PV με συνεχή και ευφυή έλεγχο υψηλής τάσης A/Π Διδύμων

Όπως φαίνεται και στα Σχ. 5.59-5.60 και συνοψίζεται και στον Πίνακα 5.1, και για τις δύο εξεταζόμενα Αιολικά Πάρκα της εργασίας, ακριβώς οι ίδιες συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται με την περίπτωση συνεχούς ελέγχου της τάσης. Προφανώς υπάρχουν διαφορές στην χρονική συχνότητα διαφόρων ελέγχων, όπως φαίνεται και από τα σημεία όπου το μέγιστο όριο της τάσης του Α/Π συναντάται (Σημεία Α) ή από τα σημεία όπου το μέγιστο όριο ρεύματος του Α/Π συναντάται (Σημεία D στο Σχήμα 5.60), αλλά οι συνθήκες μέγιστης μεταφοράς ισχύος (Σημεία C) συμπίπτουν και στις δύο περιπτώσεις.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα των διαφορετικών μορφών ελέγχου της υψηλής τάσης του ζυγού του υποσταθμού στο σύστημά μας παρουσιάζονται ακολούθως:

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 Όριο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος (MW)

<i>Αιολικό Πάρκο</i>	<i>Χωρίς Έλεγχο</i>	<i>Συνεχής Έλεγχος Τάσης</i>	<i>Αύξηση Περιθωρίου</i>	<i>Έξυπνη Μορφή Ελέγχου</i>
<i>Ελίκη</i>	121	130	9	130
<i>Δίδυμα</i>	129	142	13	142

6

Ανάλυση Ευστάθειας

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς που συμβαίνει λόγω της συνεχούς αύξησης του φορτίου. Η ευστάθεια συνδέεται με τη δυναμική του ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο ζυγό σύνδεσης του φορτίου. Εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο Αιολικών Πάρκων στην αλλαγή του φορτίου και αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος. Για να βρεθούμε σε συνθήκες αστάθειας και να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά του συστήματος καθόλη τη διάρκεια μέχρι να επιτευχθεί αυτό, το φορτίο υπόκειται σε μια συνεχή μεταβολή σε μορφή ράμπας, με ρυθμό αύξησης 0.005% ανά περίοδο δειγματοληψίας, δηλαδή ανά 10s, μέχρις ότου το σύστημα οδηγηθεί σε αστάθεια.

6.1 Παράσταση Συστήματος με Μετασχηματιστή Φορτίου

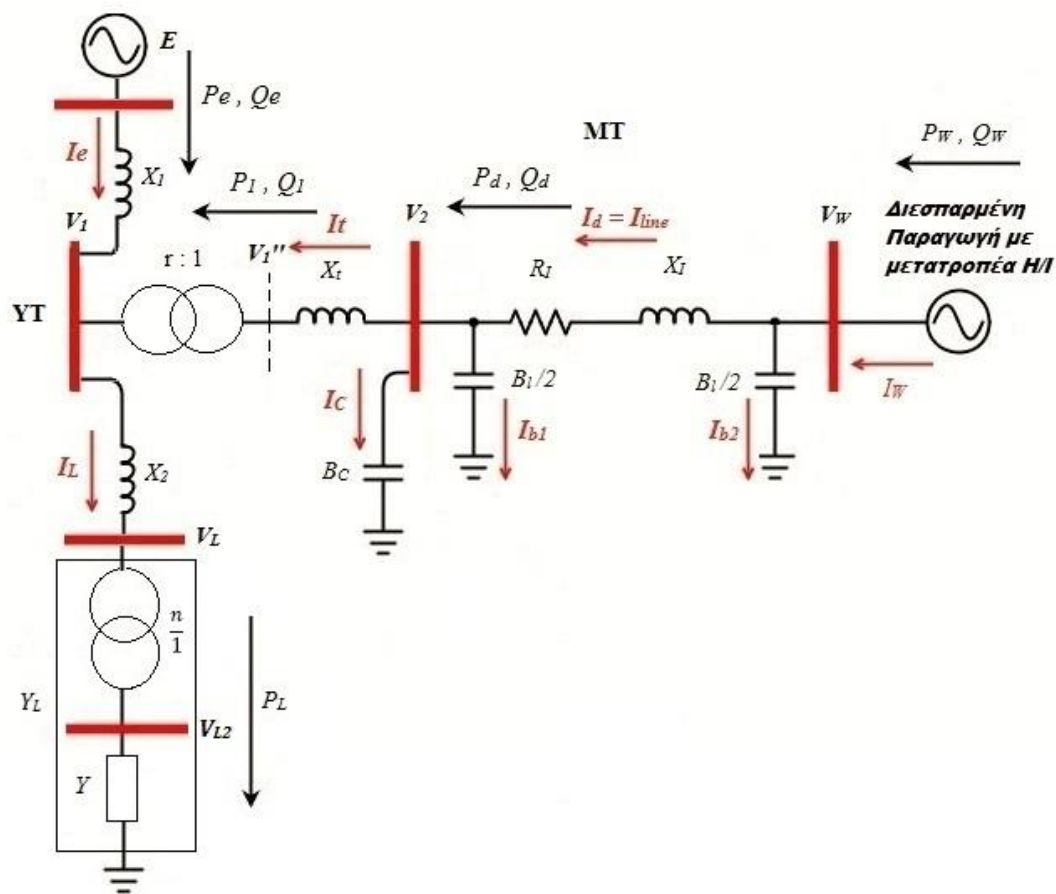
6.1.1 Περιγραφή Συστήματος

Όπως αναφέρθηκε στο 1^ο Κεφάλαιο, η ευστάθεια τάσεως σχετίζεται με τη δυναμική του φορτίου. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να γίνει ανάλυση ευστάθειας πρέπει να προστεθεί μία τουλάχιστον διάταξη αυτόματης επαναφοράς του φορτίου.

Συνεπώς, γίνεται προσαρμογή του προς εξέταση συστήματος με ενσωμάτωση ενός μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ στο ζυγό του φορτίου με μεταβλητό λόγο μετασχηματισμού n , όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Το βήμα του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ συμβολίζεται Δn και η νεκρή του ζώνη εκτείνεται από n_{min} έως n_{max} . Η χρονική καθυστέρηση του ΣΑΤΥΦ είναι ΔT_L για κάθε κίνηση, συμπεριλαμβανομένου και της αρχικής. Η επαγωγική αντίδραση του μετασχηματιστή θεωρείται ότι έχει περιληφθεί στην αντίδραση γραμμής X_L . Η υπό έλεγχο τάση από το ΣΑΤΥΦ είναι η V_{L2} της πλευράς του δευτερεύοντος του μετασχηματιστή, δηλαδή της πλευράς του φορτίου και και το εύρος ζώνης έχει οριστεί ίσο με το διπλάσιου του βήματος του ΣΑΤΥΦ.

Όπως και στο 5^ο Κεφάλαιο, το φορτίο θεωρείται ως μία μεταβλητή αγωγιμότητα συνδεδεμένη στον ζυγό φορτίου υψηλής τάσης V_L μέσω του προαναφερόμενου μετασχηματιστή κι ως εκ τούτου ανάγεται στο ζυγό του φορτίου, δηλαδή στην μεριά του πρωτεύοντος, ως εξής:

$$Y_L = n^2 Y \quad (6.1)$$



Σχήμα 6.1 Μονογραμμικό Διάγραμμα Γραμμής Σύνδεσης Διεσπαρμένης Παραγωγής με Μετασχηματιστή Φορτίου

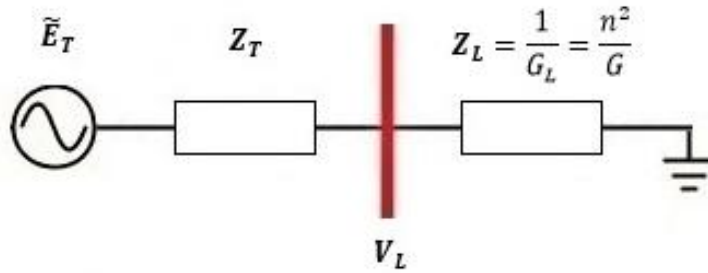
Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται τα αριθμητικά δεδομένα της προσομοίωσης, όσον αφορά το Μετασχηματιστή του Φορτίου για τα δύο Αιολικά Πάρκα (Πίνακας 6.1). Όλα τα υπόλοιπα αριθμητικά δεδομένα έχουν δοθεί προηγουμένως στο 4^ο Κεφάλαιο (Πίνακες 4.1-4.3).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 Δεδομένα Μετασχηματιστή ΣΑΤΥΦ του Φορτίου ($S_B=100MVA$)

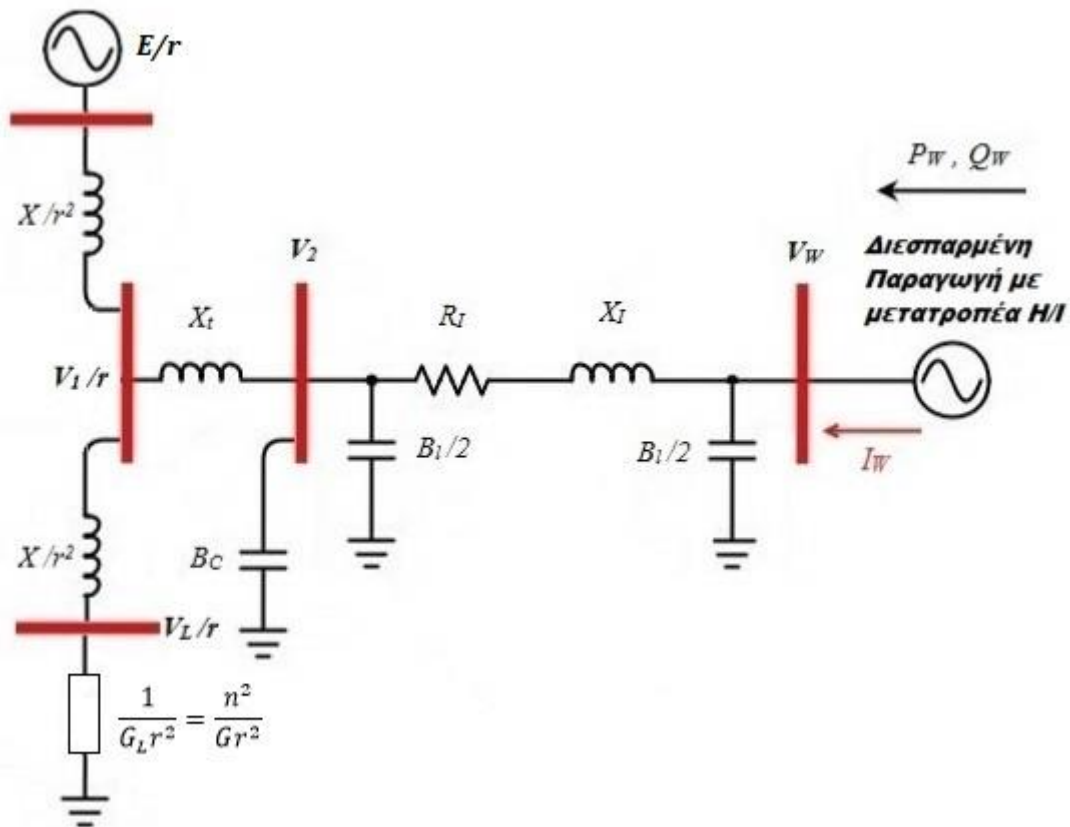
Αιολικό Πάρκο	ΔG_L (%)	G_{lim} (αμ)	Δn (%)	n_{min} (αμ)	n_{max} (αμ)	ΔT_L (s)	V_{L20} (αμ)	$V_{L2 max}$ (αμ)	$V_{L2 min}$ (αμ)
Ελίκη	0.005	1.39	0.625	0.7	1.1	10	0.9722	0.9784	0.9659
Δίδυμα	0.0055	1.495	0.625	0.7	1.1	10	0.9808	0.9870	0.9745

6.1.2 Ισοδύναμο Thevenin από το ζυγό του Φορτίου

Είναι γνωστό (Κεφ.1) ότι η εμφάνιση αστάθειας τάσεως συμπίπτει με τη συνθήκη προσαρμογής της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης των γραμμών και της σύνθετης αντίστασης φορτίου. Συνεπώς, ένας τρόπος για να εκτιμηθεί η ευστάθεια είναι να σχηματιστεί το ισοδύναμο Thevenin στο ζυγό YT του φορτίου. (Σχ. 6.2)



Σχήμα 6.2 Ισοδύναμο Thevenin ΣΗΕ από την μεριά του Φορτίου



Σχήμα 6.3 Μονογραμμικό Διάγραμμα Συστήματος Ανηγμένο στο Δευτερεύον του Μ/Σ

Δεδομένου ότι ο ζυγός ΥΤ του φορτίου τροφοδοτείται από δύο πηγές (άπειρο σύστημα και Αιολικό Πάρκο) διαφορετικών επιπέδων τάσεων, θα πρέπει να αναχθεί το σύστημα του Σχ. 6.1 σε κοινό επίπεδο τάσεων. Επιλέγεται αυτό να γίνει στο επίπεδο ΜΤ του Αιολικού Πάρκου. Το ισοδύναμο ανηγμένο στη μέση τάση φαίνεται στο Σχ. 6.3. Με την παραδοχή λοιπόν δύο πηγών τάσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί η αρχή της επαλληλίας.

Για τον υπολογισμό του ισοδύναμου Thevenin (Σχ. 6.2) πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ενώ το άπειρο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή σταθερής τάσεως και μέτρου, το Αιολικό Πάρκο στην πραγματικότητα είναι ζυγός φορτίου (PV), δηλαδή έχει σταθερό μέτρο τάσεως και σταθερή έγχυση ενεργού ισχύος. Κατά συνέπεια, το Αιολικό Πάρκο μόνο προσεγγιστικά μπορεί να αντικατασταθεί με πηγή τάσεως, ώστε να ισχύει το ισοδύναμο του Σχ.6.2. Η ακρίβεια αυτής της προσέγγισης θα εξεταστεί σε άλλο σημείο του κεφαλαίου.

Ως γνωστόν, για τον υπολογισμό της ισοδύναμης σύνθετης αντίστασης Thevenin (Z_{TH}) απαιτείται η βραχυκύκλωση των δύο πηγών τάσεως. Στην περίπτωση αυτή, συνδέεται εν σειρά αρχικά η συνολική αντίδραση X_l με την συνολική αντίσταση R_l της γραμμής μέσης τάσης, επομένως:

$$Z_0 = R_l + jX_l \quad (6.2)$$

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και στο Σχ.6.3, η σύνθετη αντίσταση Z_0 συνδέεται παράλληλα με την αγωγιμότητα $B_l/2$ της γραμμής και την αγωγιμότητα των συστοιχιών πυκνωτών B_C που έχουν συνδεθεί στον ζυγό ΜΤ, κι έτσι

$$Z_1 = Z_0 // \left(\frac{1}{jB_C} + \frac{2}{jB_l} \right) = \frac{\left(\frac{Z_0}{j \left(B_C + \frac{B_l}{2} \right)} \right)}{Z_0 + \frac{1}{j \left(B_C + \frac{B_l}{2} \right)}} \quad (6.3)$$

Ακολούθως, η σύνθετη αντίσταση Z_1 συνδέεται εν σειρά με την αντίδραση X_t του μετασχηματιστή ισχύος του υποσταθμού του Αιολικού Πάρκου. Επομένως:

$$Z_2 = Z_1 + jX_t \quad (6.4)$$

Έπειτα, η σύνθετη αντίσταση Z_2 συνδέεται παράλληλα με την ισοδύναμη αντίδραση X/r^2 του δικτύου, δηλαδή:

$$Z_3 = Z_2 // \left(\frac{jX}{r^2} \right) = \frac{Z_2 \frac{jX}{r^2}}{Z_2 + \frac{jX}{r^2}} \quad (6.5)$$

Τέλος, η σύνθετη αντίσταση Z_3 συνδέεται εν σειρά με την ισοδύναμη αντίδραση X/r^2 της γραμμής του φορτίου και ως εκ τούτου τελικά προκύπτει:

$$Z_{TH} = Z_3 + \frac{jX}{r^2} = Z_{TH} \angle \gamma \quad (6.6)$$

Ακολούθως, για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης τάσης Thevenin (\tilde{E}_{th}) ανοιχτοκυκλώνεται ο ζυγός του φορτίου και εφαρμόζεται το θεώρημα της υπέρθεσης για τις δύο πηγές τάσεως \tilde{E} , \tilde{V}_w .

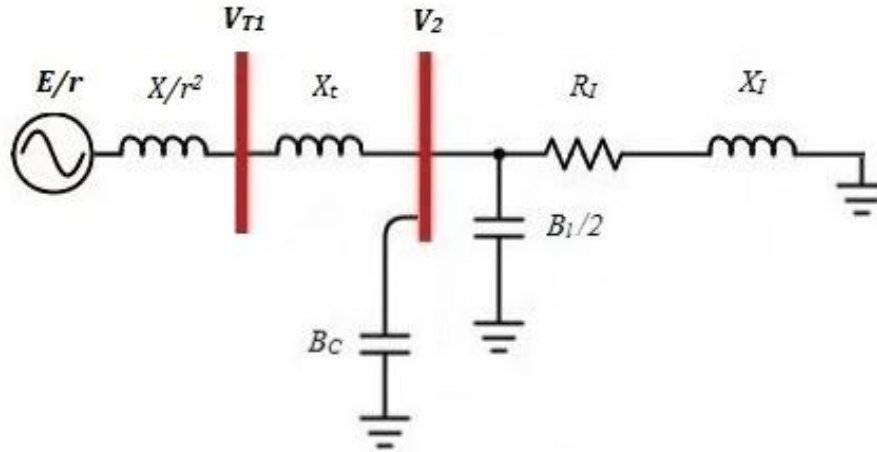
Με εφαρμογή θεωρήματος Επαλληλίας, η επιθυμητή τάση Thevenin προκύπτει ως εξής:

$$\tilde{E}_{TH} = \tilde{V}_{T1} + \tilde{V}_{T2} \quad (6.7)$$

όπου

\tilde{V}_{T1} προκύπτει από την προσεγγιστική πηγή τάσεως \tilde{V}_w και \tilde{V}_{T2} από την πηγή E/r .

Για τον υπολογισμό της \tilde{V}_{T1} βραχυκυκλώνεται η πηγή τάσης \tilde{V}_w . Ως εκ τούτου, το σύστημά μας μετασχηματίζεται ως ακολούθως (Σχ.6.4).

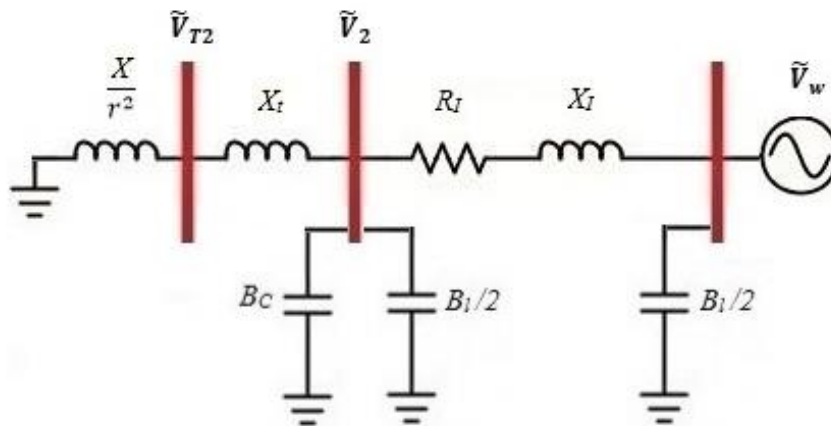


Σχήμα 6.4 Μετασχηματισμένο Σύστημα με α/k ζυγού φορτίου και $\beta/k \tilde{V}_w$

Όπως φαίνεται από το Σχ.6.4, η σύνθετη αντίσταση που συνδέεται δεξιά από τον ζυγό της τάσης \tilde{V}_{T1} είναι η Z_2 που υπολογίστηκε προηγουμένως. Συνεπώς, ο υπολογισμός της επιθυμητής τάσης \tilde{V}_{T1} γίνεται με διαίρεση τάσης και προκύπτει:

$$\tilde{V}_{T1} = \frac{Z_2}{Z_2 + \frac{jX}{r^2}} \left(\frac{E}{r} \right) \quad (6.8)$$

Εν συνεχεία, για τον υπολογισμό της τάσεως \tilde{V}_{T2} βραχυκυκλώνεται η πηγής τάσεως \tilde{E} . Στην περίπτωση αυτή, σχηματίζεται ο αστέρας του Σχ.6.5, ο οποίος μετατρέπεται σε τρίγωνο (Σχ.6.6).



Σχήμα 6.5 Μετασχηματισμένο Σύστημα με α/k ζυγού φορτίου και $\beta/k \tilde{E}$

όπου

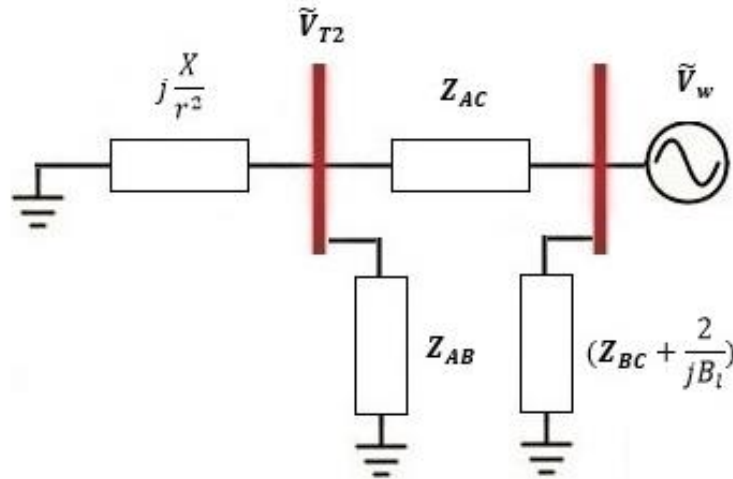
$$Z_A = jX_t \quad (6.9)$$

$$Z_B = R_l + jX_l \quad (6.10)$$

$$Z_C = \frac{1}{j \left(B_C + \frac{B_l}{2} \right)} \quad (6.11)$$

και

$$Z_{AC} = Z_A + Z_C + \frac{Z_A Z_C}{Z_B} \quad (6.12)$$



Σχήμα 6.6 Μετατροπή Αστέρα σε Τρίγωνο με βραχυκύκλωση πηγής τάσεως \tilde{E}

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.6, η σύνθετη αντίσταση Z_{AB} συνδέεται παράλληλα με την αντίδραση X/r^2 του δικτύου, κι έτσι:

$$Z_{01} = Z_{AB} // \frac{jX}{r^2} = \frac{\frac{jX}{r^2} Z_{AB}}{\frac{jX}{r^2} + Z_{AB}} \quad (6.13)$$

Τέλος, με διαίρεση τάσης προκύπτει ότι:

$$\tilde{V}_{T2} = \frac{Z_{01}}{Z_{01} + Z_{AC}} \tilde{V}_w \quad (6.14)$$

Ως εκ τούτου, από την εξίσωση (6.7) προκύπτει τελικά η επιθυμητή τάση Thevenin \tilde{E}_{TH} . Για αναγωγή στα δεδομένα του Σχ. 6.2, έχουμε τελικά:

$$\tilde{E}_T = r \tilde{E}_{TH} \quad (6.15)$$

$$Z_T = r^2 Z_{TH} \quad (6.16)$$

6.1.3 Υπολογισμός Συνθήκης Αστάθειας Ακτινικού Συστήματος

Ακολουθώντας, έχοντας ανάγκη το σύστημά μας στην μορφή του Σχ. 6.2, αναλύουμε την ευστάθεια του συστήματος οφειλόμενη στο μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ του φορτίου.

Ο μετασχηματιστής με ΣΑΤΥΦ ελέγχει την τάση στη πλευρά του φορτίου. Πρόκειται για αργό, διακριτό μηχανισμό αποκατάστασης της τάσης, αλλάζοντας το λόγο μετασχηματισμού του κατά ένα βήμα τη φορά. Ένας σημαντικός περιορισμός στη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ είναι ότι ο μεταβλητός λόγος μετασχηματισμού έχει περιορισμένο εύρος τιμών:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max} \quad (6.17)$$

Όταν ενεργοποιείται ο μηχανισμός του ΣΑΤΥΦ, θεωρούμε ότι αλλάζει ο λόγος μετασχηματισμού ακαριαία κατά ένα βήμα μεγέθους Δn . Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει μόνο σε διακριτές τιμές χρόνου, έστω t_k , $k = 0, 1, 2, \dots$, οι οποίες δίνονται από τον ακόλουθο επαναληπτικό τύπο:

$$t_{k+1} = t_k + \Delta T_k \quad (6.18)$$

Η λογική με την οποία μεταβάλλεται ο λόγος του ΣΑΤΥΦ τις χρονικές στιγμές t_{k+1} , εκφράζεται από την παρακάτω εξίσωση διαφορών:

$$n_{k+1} = n_k + \Delta n, \text{ εάν } V_{L2} > V_{L2_0} + \frac{d_2}{2} \text{ και } n_k < n_{max}$$

$$n_{k+1} = n_k - \Delta n, \text{ εάν } V_{L2} < V_{L2_0} - \frac{d_2}{2} \text{ και } n_k > n_{min} \quad (6.19)$$

$$n_{k+1} = n_k, \text{ διαφορετικά}$$

όπου

V_{L2_0} είναι η τάση αναφοράς του δευτερεύοντος και d_2 το εύρος της νεκρής ζώνης της ρύθμισης του ΣΑΤΥΦ. Όταν το σφάλμα της τάσης ξεπεράσει τα όρια της νεκρής ζώνης τότε το ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται.

Παρατηρείται από την εξίσωση (6.19) ότι το σύστημα παραμένει ευσταθές όσο επιδρά ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ n αντίθετα στην αλλαγή της τάσεως ελέγχου V_{L2} , δηλαδή μειώνεται όταν η τάση ελέγχου αυξάνεται και ξεπερνάει το άνω όριο της νεκρής ζώνης με σκοπό να την ελαττώσει, και αντίστοιχα αυξάνεται όταν η τάση ελέγχου πέσει κάτω από το όριο της νεκρής ζώνης. Η συνθήκη ευστάθειας επομένως είναι ίση με:

$$\frac{\partial V_{L2}}{\partial n} < 0 \quad (6.20)$$

Για να υπολογίσουμε το σημείο αστάθειας, συνεπώς, αρκεί να υπολογίσουμε τη συνθήκη για την οποία η μερική παράγωγος της προς έλεγχο τάσης V_{L2} ως προς το βήμα του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ n γίνεται για πρώτη φορά μηδενική, δηλαδή:

$$\frac{\partial V_{L2}}{\partial n} = 0 \quad (6.21)$$

Πρόκειται ουσιαστικά για την πρώτη χρονική στιγμή που η μερική αυτή παράγωγος από αρνητική γίνεται μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός κι ως εκ τούτου προκαλείται αστάθεια.

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.2 και χρησιμοποιώντας διαιρέτη τάσης, η τάση του ζυγού του φορτίου \tilde{V}_L προκύπτει ίση με:

$$\tilde{V}_L = \frac{\frac{n^2}{G} \tilde{E}_T}{\frac{n^2}{G} + Z_T} \quad (6.22)$$

και ισχύει:

$$Z_T = R_T + jX_T \quad (6.23)$$

$$\tilde{V}_{L2} = \frac{\tilde{V}_L}{n} \quad (6.24)$$

Επομένως, αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (6.23) και (6.24) στην (6.25) και επιπροσθέτως λαμβάνοντας μέτρα, τελικά προκύπτει:

$$V_{L2} = \frac{\frac{n}{G} E_T}{\sqrt{\left(\frac{n^2}{G} + R_T\right)^2 + X_T^2}} \quad (6.25)$$

Η μερική παράγωγος της εξίσωσης (6.25) ως προς n θα είναι ίση με:

$$\frac{\partial V_{L2}}{\partial n} = \frac{\frac{E_T}{G} \sqrt{\left(\frac{n^2}{G} + R_T\right)^2 + X_T^2} - \frac{n}{G} E_T \frac{\frac{2n}{G} \left(\frac{n^2}{G} + R_T\right)}{\sqrt{\left(\frac{n^2}{G} + R_T\right)^2 + X_T^2}}}{\left(\frac{n^2}{G} + R_T\right)^2 + X_T^2} \quad (6.26)$$

Μηδενίζοντας την μερική παράγωγο, προκύπτει η επιθυμητή συνθήκη αστάθειας:

$$\frac{E_T}{G} \left(\left(\frac{n^2}{G} + R_T \right)^2 + X_T^2 \right) = \frac{2n^2}{G^2} E_T \left(\frac{n^2}{G} + R_T \right) \quad (6.27)$$

από όπου τελικά:

$$\left(\frac{n^2}{G} \right)^2 + \frac{2n^2}{G} R_T + R_T^2 + X_T^2 = 2 \left(\frac{n^2}{G} \right)^2 + \frac{2n^2}{G} R_T \quad (6.28)$$

Άρα:

$$Z_T = \frac{n^2}{G} \quad (6.29)$$

η οποία αποτελεί τη συνθήκη προσαρμογής $Z_T = Z_L$ του συστήματος (βλέπε Κεφ. 1).

6.1.4 Υπολογισμός Ενεργού Ισχύος Α/Π με μοντέλο Πηγής Τάσεως

Σε αυτή την ενότητα γίνεται εκτίμηση σφάλματος λόγω θεώρησης πηγής τάσεως του PV ζυγού του Αιολικού Πάρκου. Έστω t^+ η χρονική στιγμή που σύμφωνα με την προσομοίωση ισχύει για πρώτη φορά $Z_T \geq \frac{n^2}{G}$, δηλαδή $\frac{\partial V_{L2}}{\partial n} \geq 0$ και t^- η ακριβώς προηγούμενη. Θεωρούμε ότι για t^- τα δεδομένα της προσομοίωσης είναι ορθώς υπολογισμένα και κυρίως όσον αφορά την παραδοχή της σταθερού ενεργού ισχύος του πάρκου ($P_w = ct.$).

Θα αποδειχθεί ότι η παραδοχή της σταθερής γωνίας θ του πάρκου (πηγή τάσεως ή ρεύματος αντίστοιχα) αποτελεί προσέγγιση, διότι στην προσομοίωση η μεταβολή του βήματος ΣΑΤΥΦ n οδηγεί σε μεταβολή της παραγόμενης ισχύος του πάρκου P_w , κάτι το οποίο δεν μπορεί να ισχύει σε πραγματικό σύστημα, αφού η ενεργός ισχύς του πάρκου εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. άνεμος) και δεν μπορεί να μεταβάλλεται από εσωτερικά στοιχεία του κυκλώματος. Δηλαδή θα προκύψει το ακόλουθο αποτέλεσμα: $\Delta P_w = P_w^+ - P_w^- \neq 0$.

Σύμφωνα με τις σχέσεις (6.6) και (6.7), όπως υπολογίστηκαν και προηγουμένως, η ισοδύναμη τάση και αντίσταση Thevenin, \tilde{E}_{TH} και Z_T αντίστοιχα, μεταβάλλονται σύμφωνα με την προσομοίωση μόνο σε μεταβολές του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ r , αφού $\tilde{E}_T = \tilde{E}_T(r)$ και $Z_T = Z_T(r)$. Έτσι, στην περίπτωση που εξετάζεται μόνο μεταβολή του βήματος του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ n , (από $t^- \rightarrow t^+$), ισχύει $\tilde{E}_T(t^-) = \tilde{E}_T(t^+)$ και $Z_T(t^-) = Z_T(t^+)$.

Ως εκ τούτου, για n^+ υπολογίζουμε αρχικά το ρεύμα που διέρχεται από τον κλάδο του φορτίου (Σχήμα 6.2):

$$\tilde{I}_L^+ = \frac{\tilde{E}_T^-}{Z_T^- + \frac{(n^+)^2}{G}} \quad (6.30)$$

Η υψηλή τάση V_1 προκύπτει ίση με:

$$\tilde{V}_1 = \tilde{I}_L^+ \left(jX + \frac{n^2}{G} \right) \quad (6.31)$$

Το ρεύμα του δικτύου προκύπτει εν συνεχεία ίσο με:

$$\tilde{I}_e = \frac{\tilde{E} - \tilde{V}_1}{jX} \quad (6.32)$$

Το ρεύμα που διέρχεται από τον μετασχηματιστή ισχύος ισούται με:

$$\tilde{I}_t = (\tilde{I}_L^+ - \tilde{I}_e)r \quad (6.33)$$

Η μέση τάση V_2 προκύπτει ακολούθως ίση με:

$$\tilde{V}_2 = \frac{\tilde{V}_1}{r} + jX_t \tilde{I}_t \quad (6.34)$$

Τα ρεύματα που διέρχονται από τις συστοιχίες των πυκνωτών, από τον παράλληλο κλάδο αγωγιμότητας και τέλος το ρεύμα της γραμμής είναι αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_c = jB_c \tilde{V}_2 \quad (6.35)$$

$$\tilde{I}_{b1} = \frac{jB_l}{2} \tilde{V}_2 \quad (6.36)$$

$$\tilde{I}_d = \tilde{I}_c + \tilde{I}_{b1} + \tilde{I}_t \quad (6.37)$$

Η τάση του μετατροπέα V_w είναι ίση με:

$$\tilde{V}_w = \tilde{V}_2 + \tilde{I}_d(R_l + jX_l) \quad (6.38)$$

Το ρεύμα που διέρχεται από τον δεύτερο παράλληλο κλάδο αγωγιμότητας και το ρεύμα του μετατροπέα είναι αντίστοιχα:

$$\tilde{I}_{b2} = \frac{jB_l}{2} \tilde{V}_w \quad (6.39)$$

$$\tilde{I}_w = \tilde{I}_d + \tilde{I}_{b2} \quad (6.40)$$

Ως εκ τούτου, μέσω της αντίστροφης επίλυσης του δικτύου, υπολογίζουμε την ενεργό ισχύ του Αιολικού Πάρκου για την χρονική στιγμή t^+ ως εξής:

$$P_w^+ = \text{Real}(\tilde{V}_w \tilde{I}_w^*) \quad (6.41)$$

Προφανώς η διαφορά μεταξύ P_w^+ και P_w^- εκφράζει το σφάλμα που γίνεται λόγω θεώρησης πηγής τάσεως σταθερής γωνίας και τάσεως, $V_w \angle \theta_w$.

6.2 Προσομοίωση Συστήματος με Μετασχηματιστή Φορτίου

6.2.1 Α/Π Ελίκης

6.2.1.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

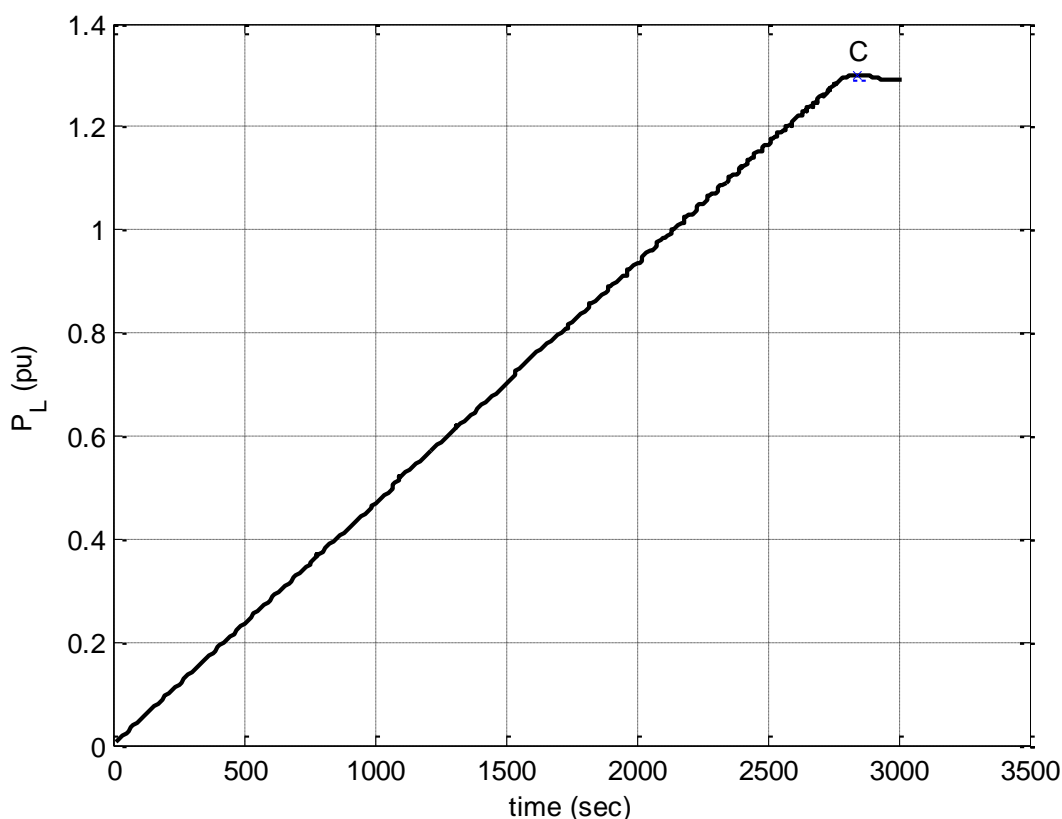
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Α/Π της Ελίκης παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, με συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης και με την προσθήκη του μετασχηματιστή φορτίου. Στα Σχήματα 6.7-6.8 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύς του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό και το Σημείο A στο σημείο που η τάση του μετατροπέα φθάνει στη μέγιστη τιμή της, $V_{w_{\max}}$, και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή αντίστοιχα. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με συνεχή έλεγχο ισούται τελικά με $130MW$ (Σχ. 6.7-6.8), δηλαδή ίδιο με την περίπτωση χωρίς την προσαρμογή του συστήματος, όπως ήταν και λογικό. Σημειώνεται από το Σχ. 6.8 ότι οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο

αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδεδειγμένων γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.

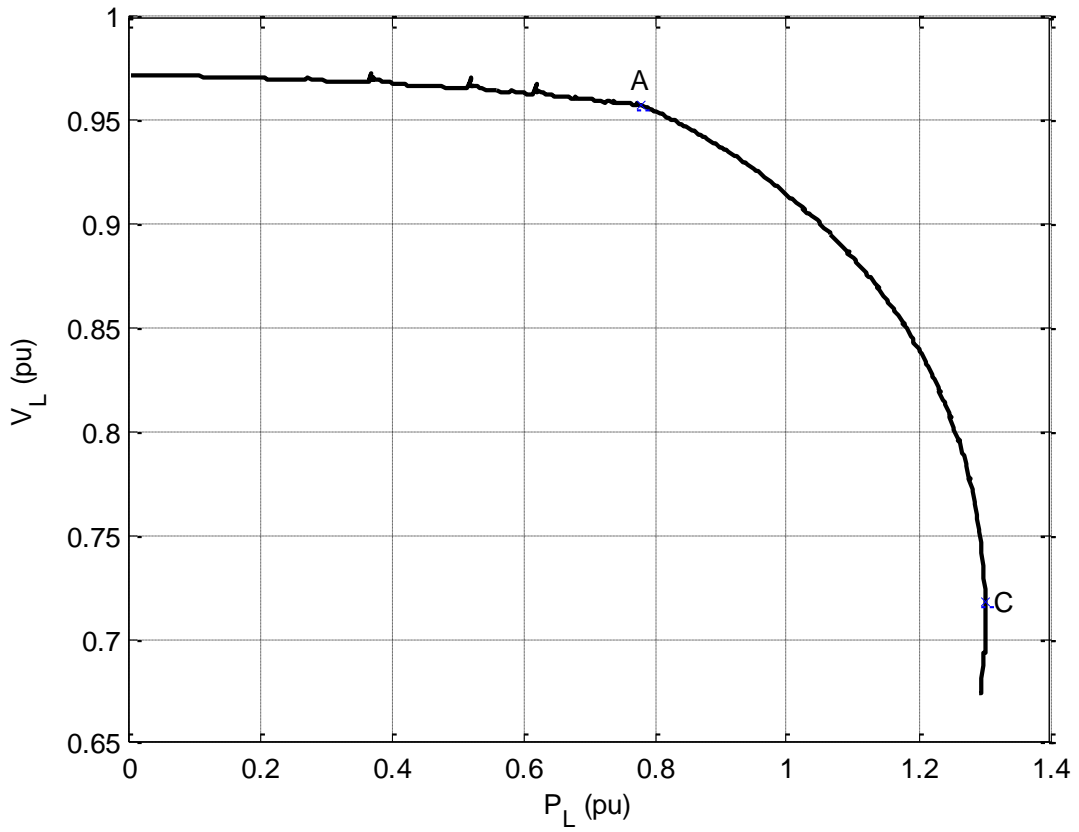
Στα Σχ. 6.9-6.11 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Α/Π, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 6.9-6.11, το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π της Ελίκης συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 1670s$ (Σημείο Α: $V_W = V_W^{lim}$), ενώ το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι $3000s$.

Από την χρονική στιγμή $t = 1670s$ κι έπειτα απενεργοποιείται ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης μέσω της προσαρμογής της V_W , αφού η τάση του Αιολικού Πάρκου της Ελίκης φθάνει το μέγιστό της όριο και σταθεροποιείται σε αυτό (V_W^{lim}). Ως εκ τούτου, αφού πλέον δεν μπορεί να ρυθμιστεί η τάση V_1 , παρατηρούμε στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 6.9) ότι αρχίζει να μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης, κάτι το οποίο τελικά οδηγεί σε αστάθεια τάσεως του συστήματος.

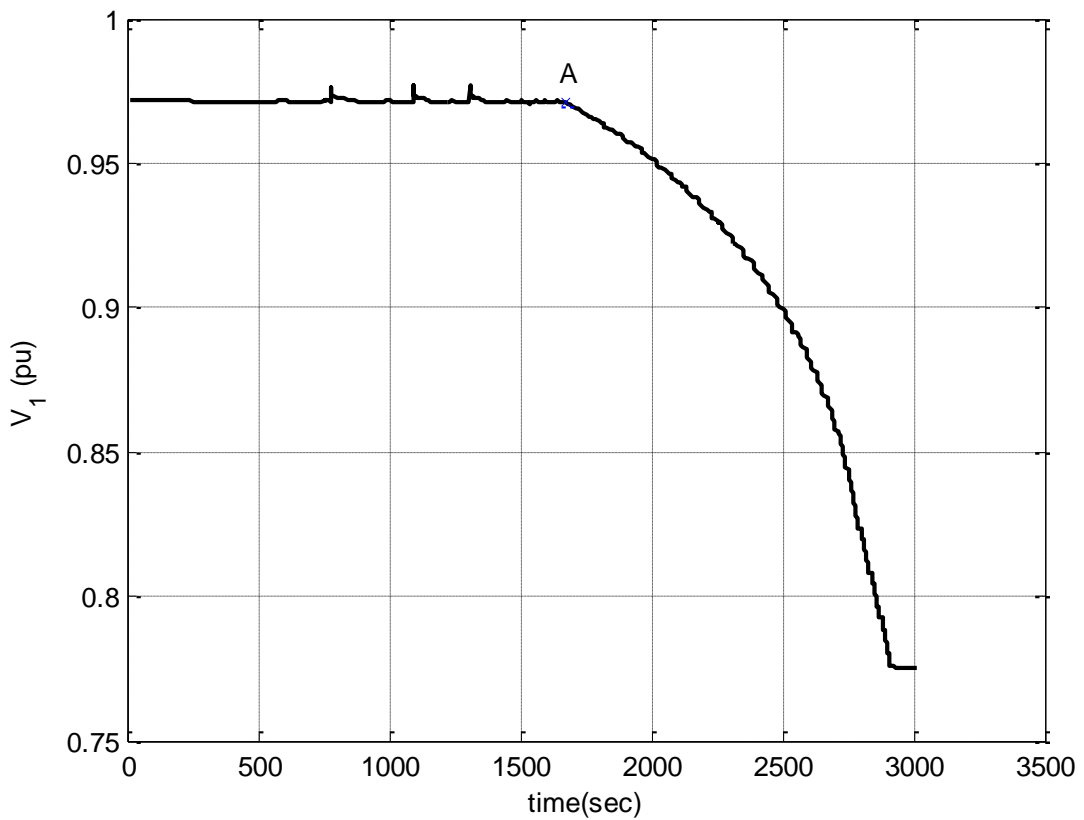
Όπως φαίνεται και στο Σχ.6.11, το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, καθώς ο έλεγχος που ασκούν τα ΣΑΤΥΦ κρατάει σχεδόν σταθερή την τάση διανομής V_2 του υποσταθμού, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.12.



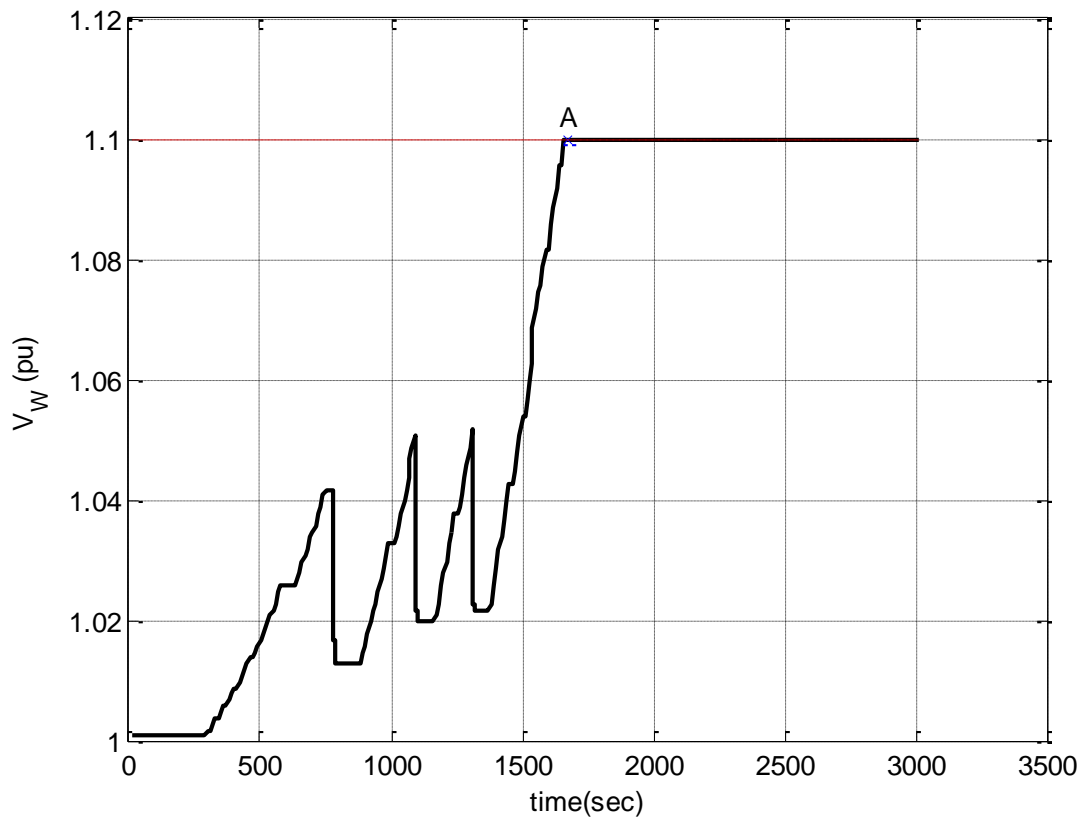
Σχήμα 6.7 Ισχύς Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



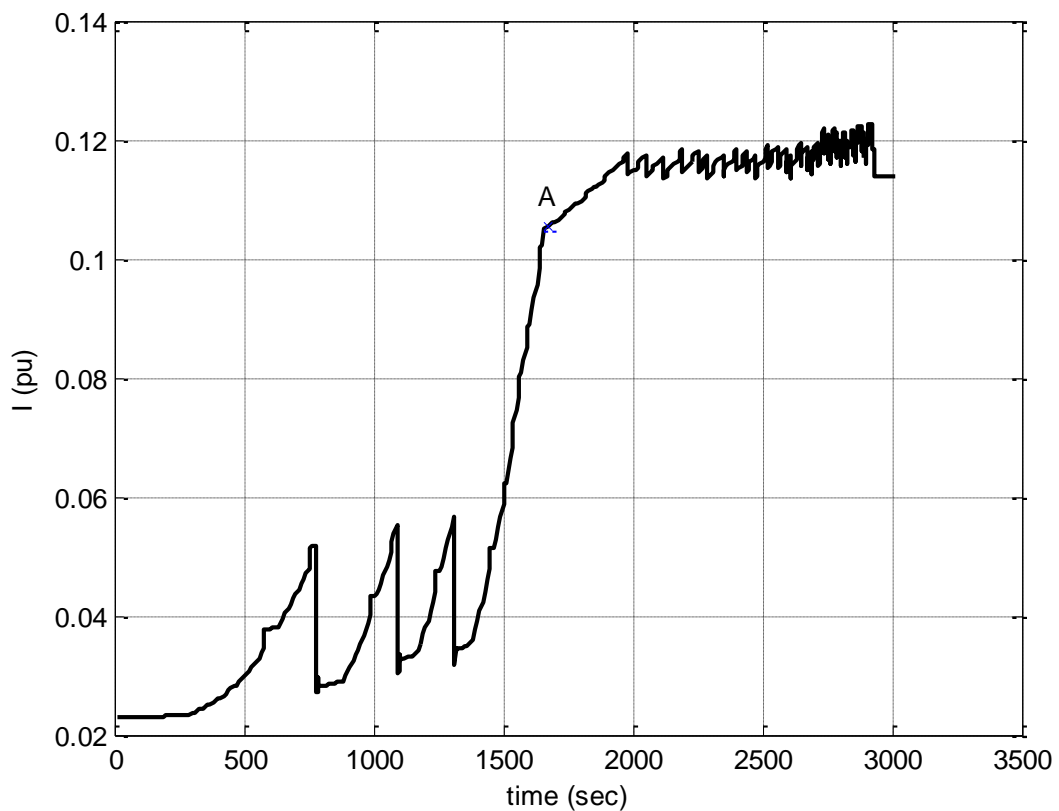
Σχήμα 6.8 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



Σχήμα 6.9 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



Σχήμα 6.10 Τάση ζυγού MT Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Συνεχής Έλεγχος)

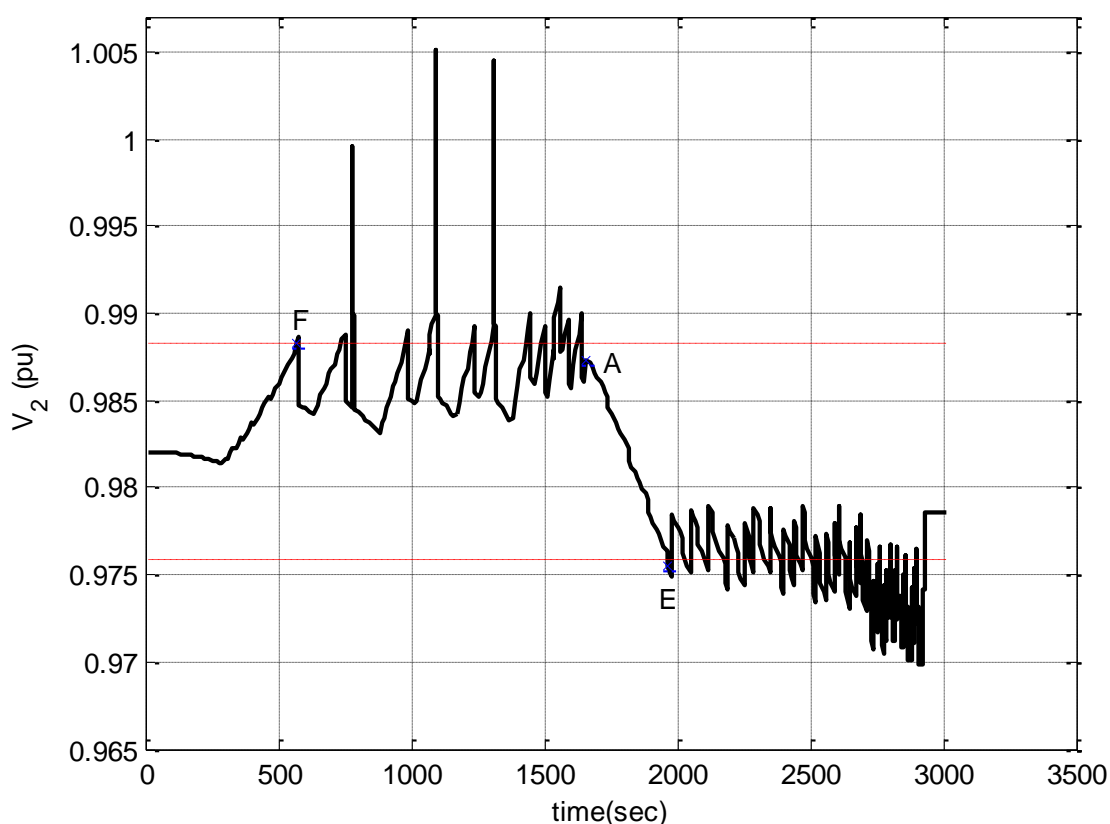


Σχήμα 6.11 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Ελίκης (Συνεχής Έλεγχος)

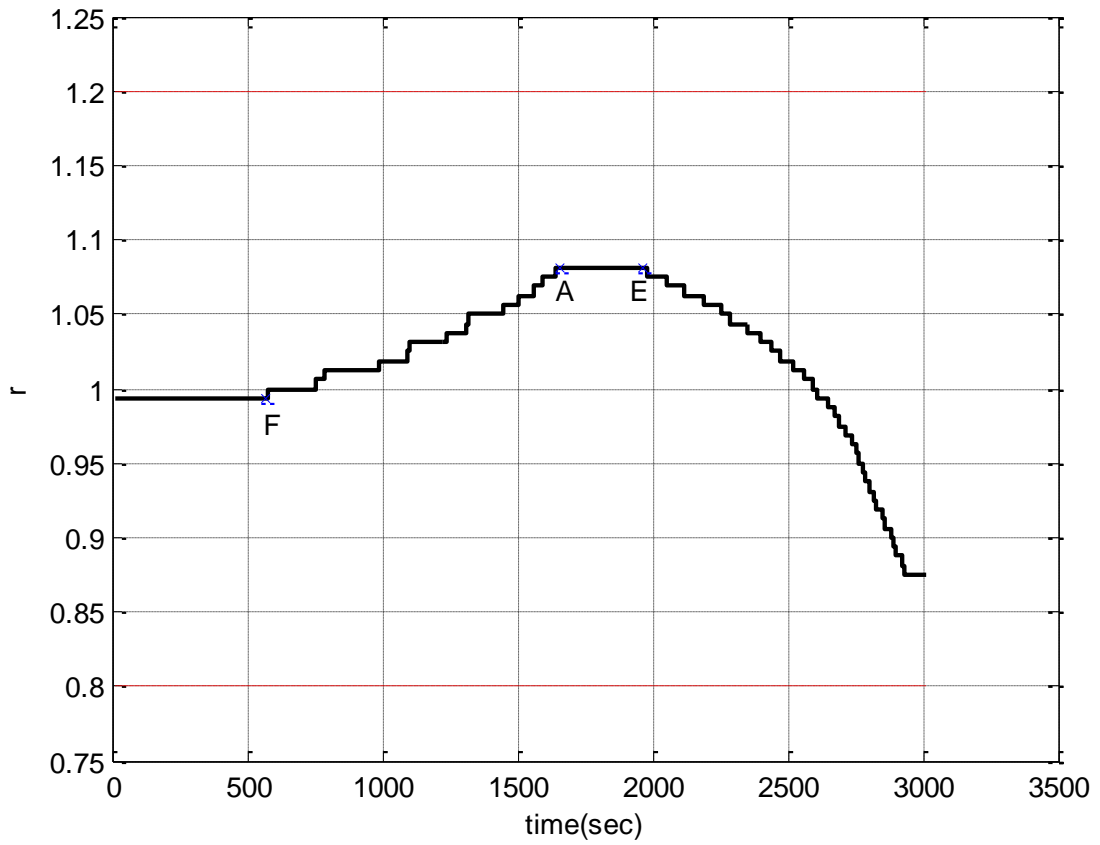
Τα Σχ.6.12-6.13 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (MT) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσει του χρόνου. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (MV) ξεπερνάει το άνω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο F: Σχ. 6.12-6.13, $t=570s$).

Το βήμα του μετασχηματιστή αρχίζει να αυξάνεται τότε, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχ. 6.12), η ταυτόχρονη αύξηση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου η προς έλεγχο τάση του αιολικού πάρκου φτάνει το άνω όριό της (Σημείο A: $V_W = V_{Wmax}$). Υπενθυμίζουμε ότι η τάση V_W , η οποία ρυθμίζεται ακαριαία μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, αυξάνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο για να ρυθμίσει αντίστοιχα την τάση V_1 (ΥΤ) εντός των επιθυμητών ορίων, μέχρι το Σημείο A ($t=1670s$), όπου εν συνεχεία σταθεροποιείται στην τιμή του άνω ορίου. Τότε, η τάση V_1 αρχίζει να μειώνεται. Ως επακόλουθο, αρχίζει και η τάση V_2 να μειώνεται.

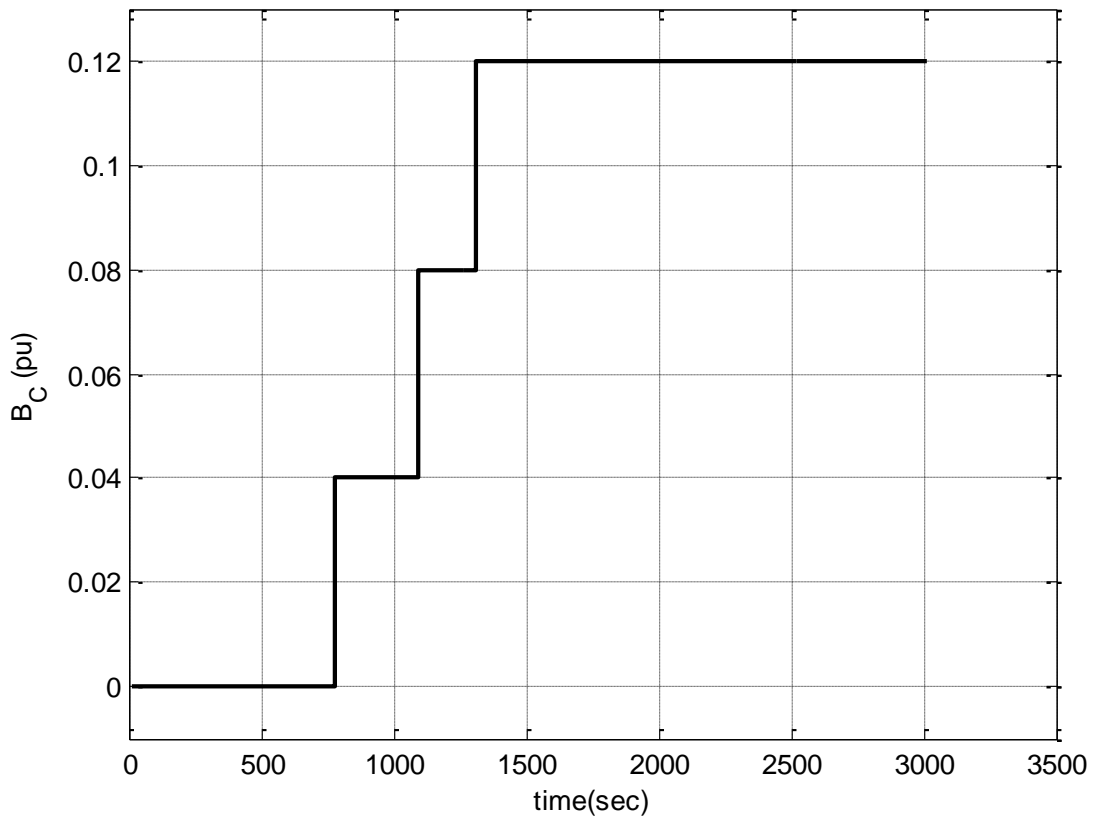
Το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό, αφού η τάση V_2 βρίσκεται εντός νεκρής ζώνης. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει το κάτω της όριο (Σημείο E: Σχ. 6.12-6.13, $t=1960s$) και ως εκ τούτου μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός νεκρής ζώνης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.12.



Σχήμα 6.12 Τάση ζυγού διανομής Υ/Σ MT (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



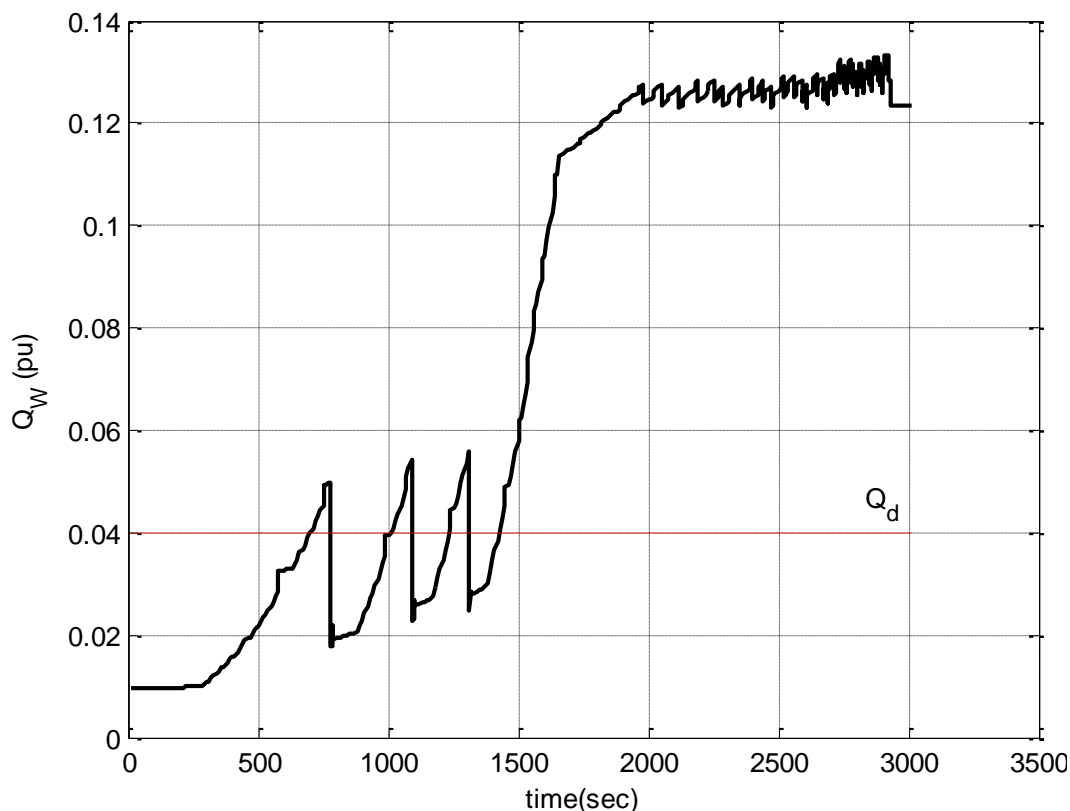
Σχήμα 6.13 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης



Σχήμα 6.14 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

Στα Σχ.6.14-6.15 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_C , καθώς και της εγχεόμενης αέργου ισχύος Q_W του Α/Π της Ελίκης.

Παρατηρείται ότι κάθε φορά που η αέργου ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_C . Όπως φαίνεται από το Σχ. 6.14, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 780s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 1090s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 1310s$.

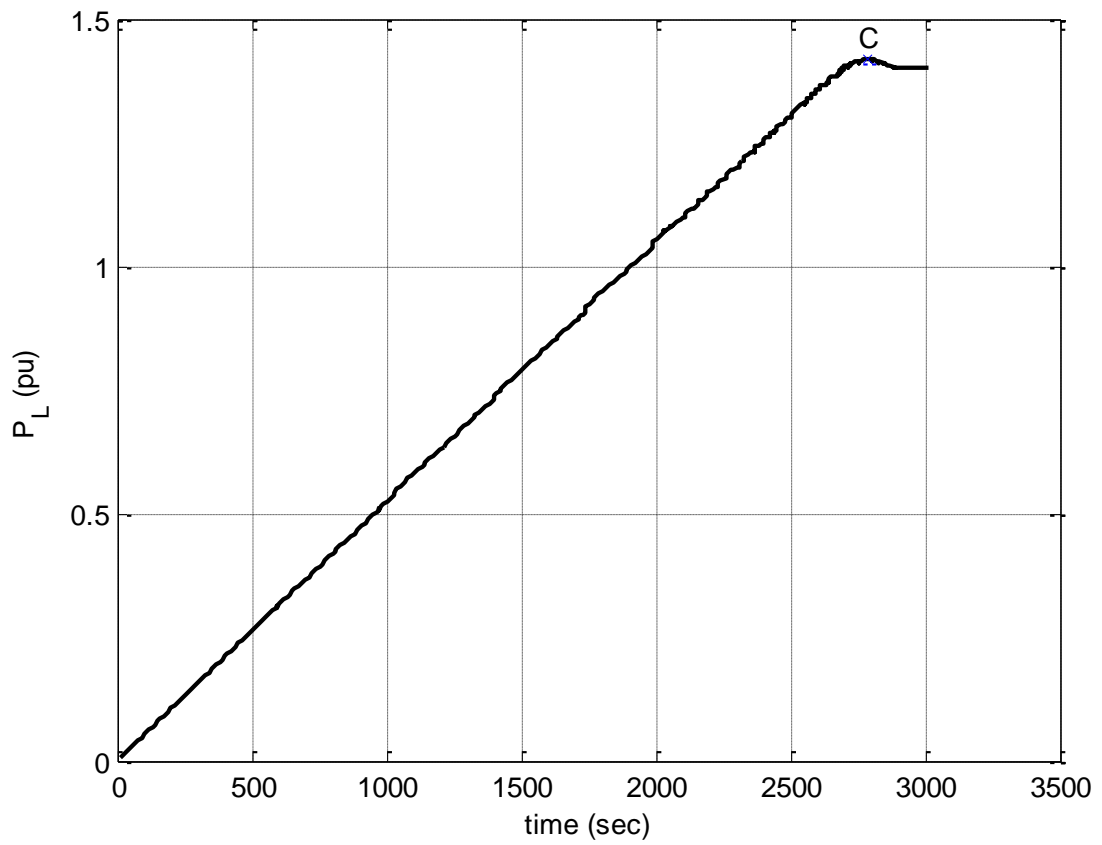


Σχήμα 6.15 Εγχεόμενη Αέργου Ισχύς Αιολικού Πάρκου Ελίκης

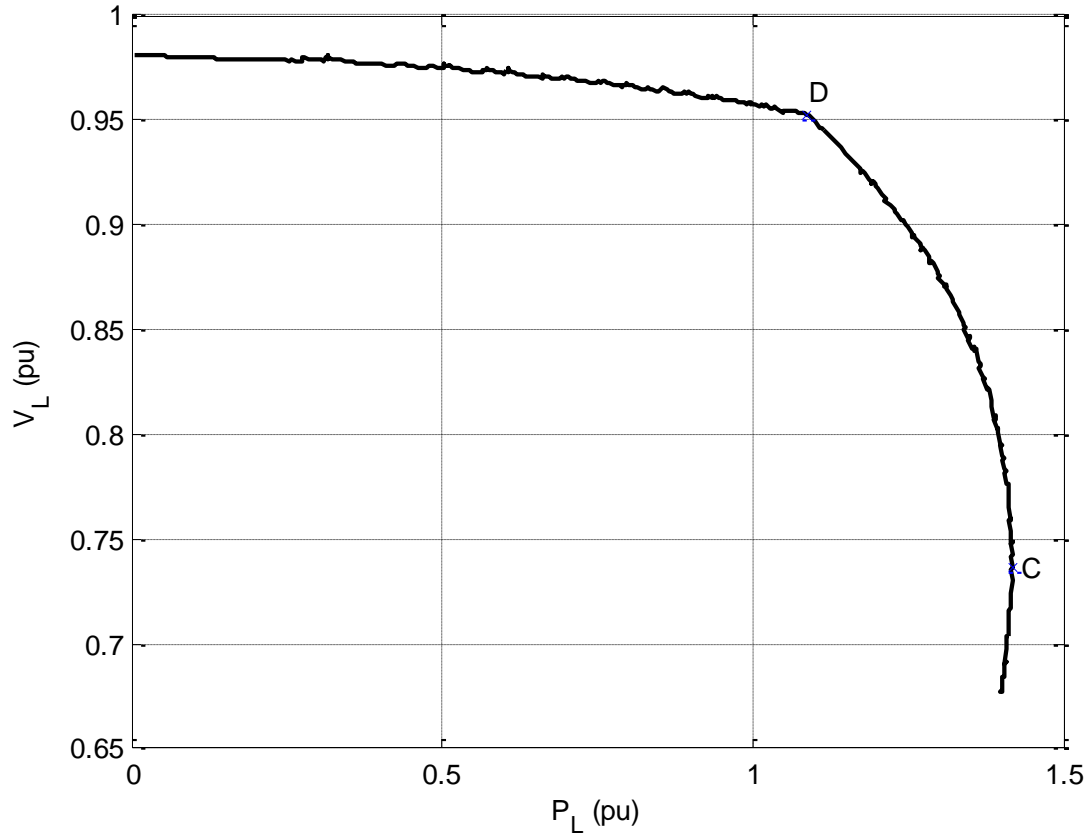
6.2.2 Α/Π Διδύμων

6.2.2.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του αλγορίθμου του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, με συνεχή έλεγχο της υψηλής τάσης. Στα Σχ. 6.16-6.17 αναπαριστώνται η χρονική μεταβολή της ισχύος του φορτίου P_L και η καμπύλη Ισχύος-Τάσης (PV καμπύλη) αντίστοιχα. Το Σημείο C αντιστοιχεί στο σημείο Μέγιστης Μεταφοράς Ισχύος(MMI) που λαμβάνει χώρα στο ζυγό και το Σημείο D στο σημείο που ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα, δηλαδή εκεί που το ρεύμα του μετατροπέα φθάνει το όριο μεγίστου επιτρεπόμενου ρεύματος. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με συνεχή έλεγχο ισούται τελικά με $142MW$ (Σχ. 6.16-6.17), δηλαδή ίδιο με την περίπτωση χωρίς την προσθήκη του μετασχηματιστή φορτίου, όπως ήταν και λογικό.



Σχήμα 6.16 Ισχύς Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

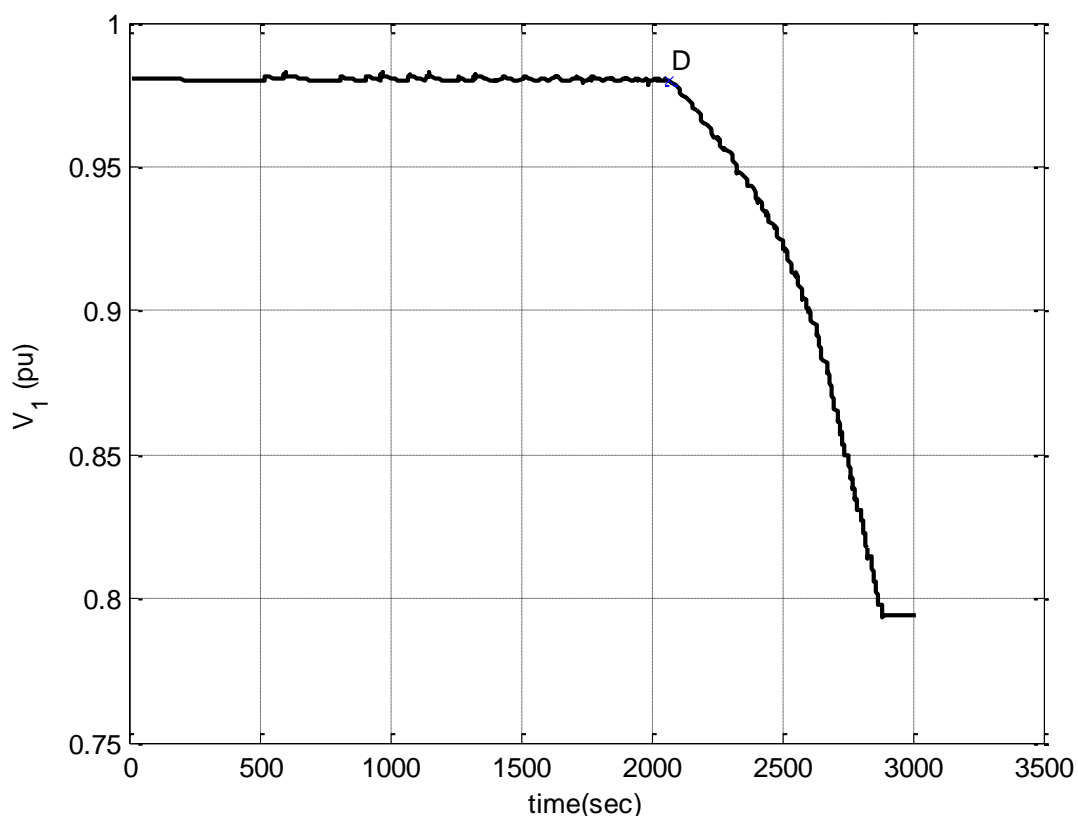


Σχήμα 6.17 Καμπύλη Ισχύος-Τάσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

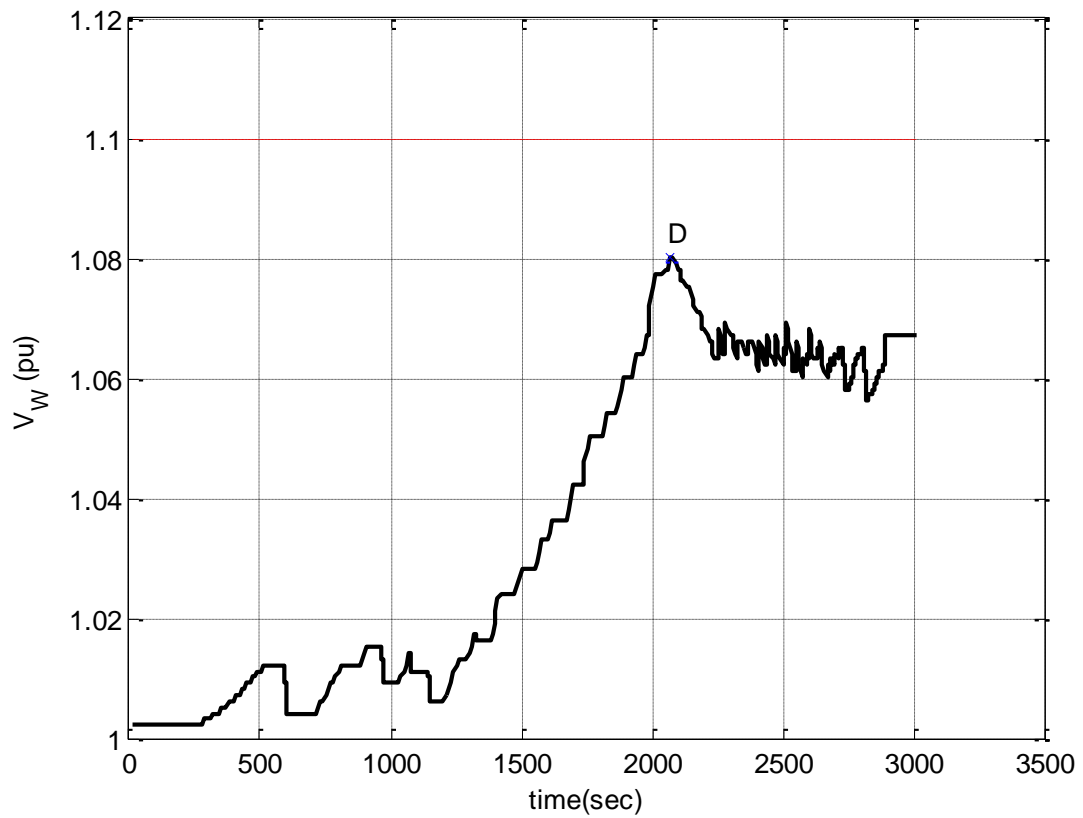
Σημειώνεται από το Σχ. 6.17 ότι οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται σε χαμηλό επίπεδο τάσης, ωστόσο αυτό συμβαίνει λόγω του στοιχειώδους συστήματος που χρησιμοποιείται για να αναπαριστά το δίκτυο μεταφοράς και δεν αντιπροσωπεύει αναγκαίο περιορισμό της προτεινόμενης εκτίμησης άεργης υποστήριξης. Η ουσία της μεθόδου έγκειται στην λεπτομερή απεικόνιση των διασυνδετικών γραμμών διανομής, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαθέσιμων αυτόματων ελέγχων που επενεργούν στο σύστημα.

Στα Σχ. 6.18-6.20 αναπαριστώνται οι χρονικές μεταβολές της υψηλής τάσης V_1 , της τάσης και του ρεύματος του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων, V_W και I_W αντίστοιχα. Ως φαίνεται και από τα Σχ. 6.18-6.20, το όριο μέγιστου επιτρεπόμενου ρεύματος συναντάται τη χρονική στιγμή $t = 2070s$ (Σημείο D: $I_W = I_W^{lim}$), ενώ το όριο μέγιστης τάσεως του ζυγού του Α/Π των Διδύμων δεν συναντάται καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η ολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 3000s.

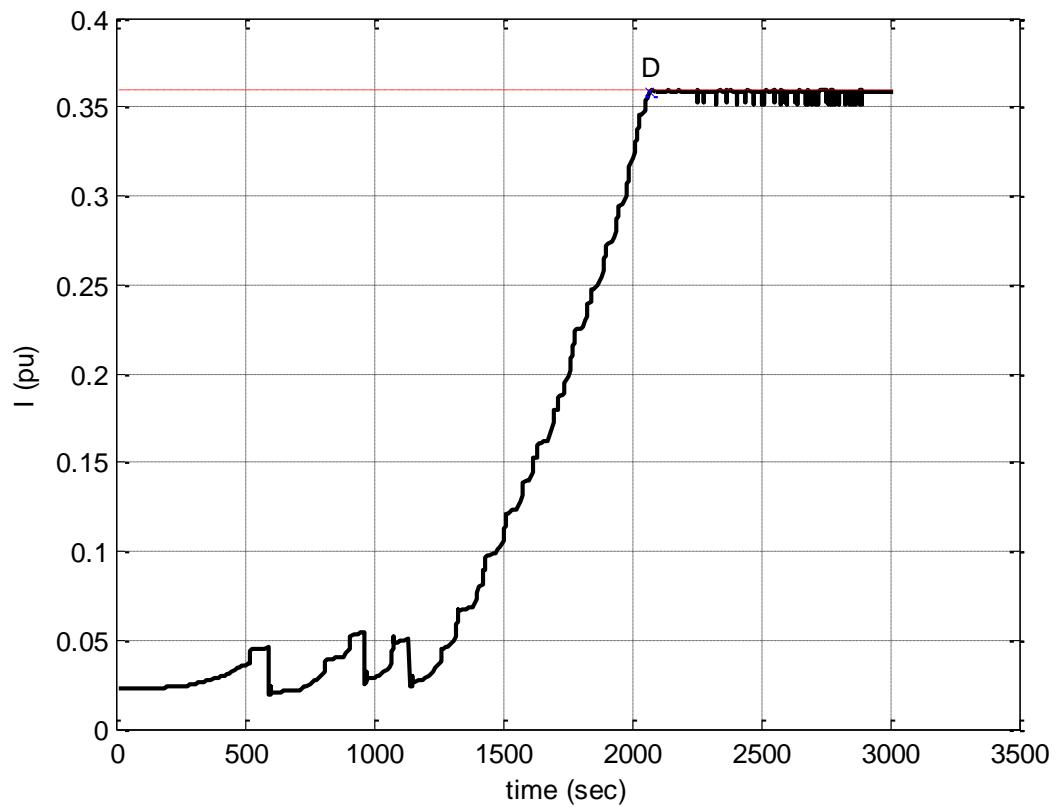
Από την χρονική στιγμή $t = 2070s$ κι έπειτα ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα και απενεργοποιείται ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης μέσω της προσαρμογής της V_W . Ως εκ τούτου, αφού πλέον δεν μπορεί να ρυθμιστεί η τάση V_1 , παρατηρούμε στην αντίστοιχη γραφική παράσταση (Σχήμα 6.18) ότι αρχίζει να μειώνεται σταδιακά μέχρι το πέρας της προσομοίωσης, κάτι το οποίο τελικά οδηγεί σε αστάθεια τάσεως του συστήματος.



Σχήμα 6.18 Υψηλή Τάση Υ/Σ σύνδεσης (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 6.19 Τάση ζυγού ΜΤ Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)

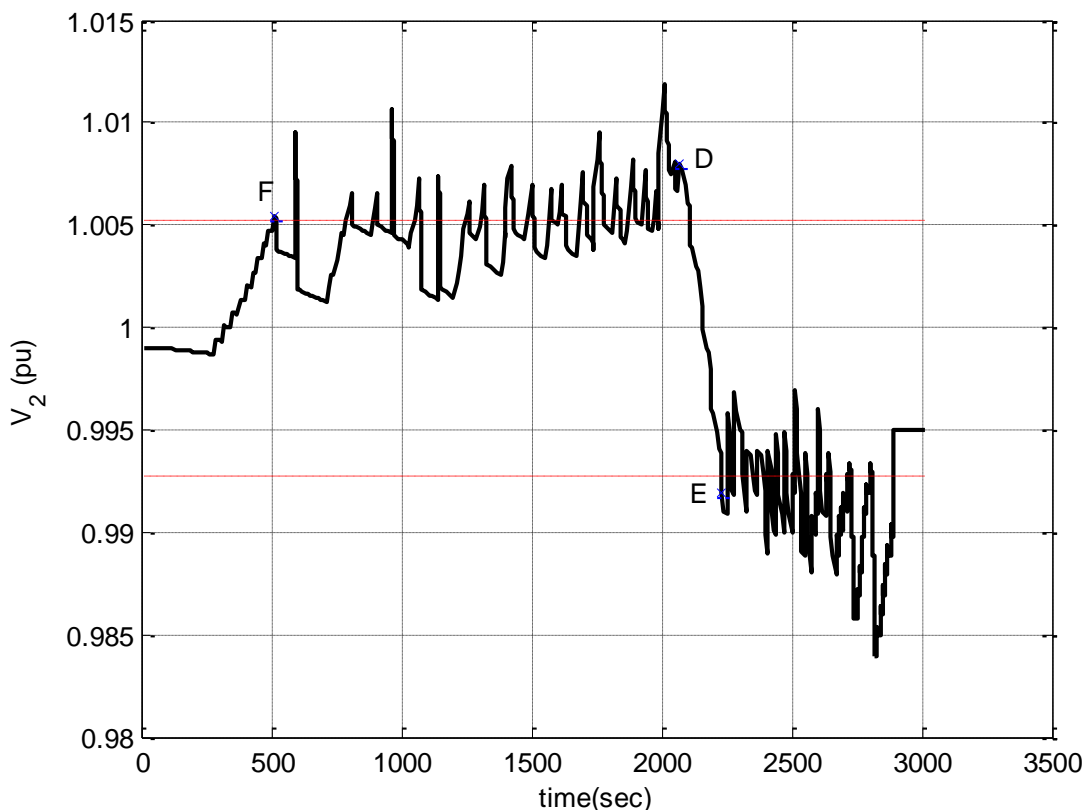


Σχήμα 6.20 Ρεύμα Αιολικού Πάρκου Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)

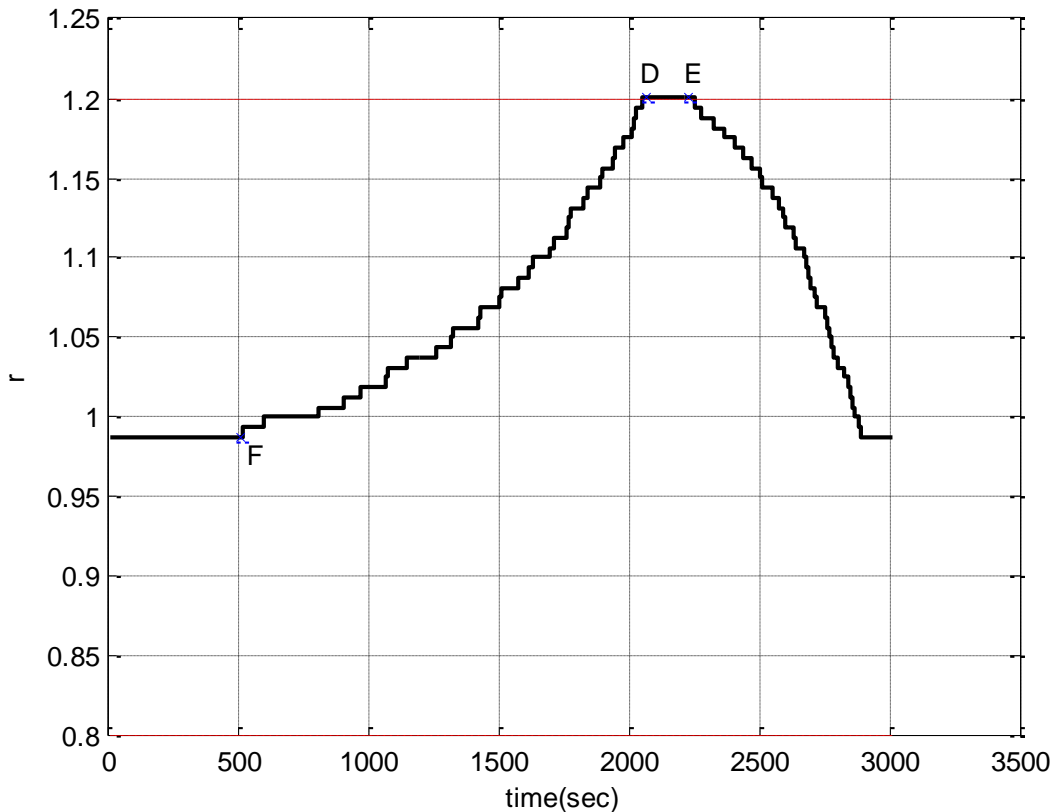
Όπως φαίνεται και στο Σχ.6.20 , το ρεύμα του Α/Π παραμένει σχεδόν σταθερό για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, αφού ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα λειτουργεί επαναλαμβανόμενα και κρατάει την τιμή του ρεύματος του αιολικού πάρκου μικρότερη ή ίση του άνω ορίου (Σημείο D: $t=2070s$). Σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται ότι η τάση του Αιολικού Πάρκου των Διδύμων παραμένει σχεδόν σταθερή ούτως ώστε να διατηρεί τη μέγιστη τιμή του ρεύματος (Σχ. 6.19) , καθώς και ότι οι επαναλαμβανόμενες κινήσεις του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ κρατάνε τη δευτερεύουσα τάση V_2 (Μέση Τάση Διανομής) σχεδόν σταθερή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.21.

Τα Σχ.6.21-6.22 αναπαριστούν τις γραφικές παραστάσεις της τάσεως διανομής V_2 (ΜΤ) και του βήματος του ΣΑΤΥΦ r συναρτήσεως του χρόνου. Η λειτουργία του ΣΑΤΥΦ ενεργοποιείται την χρονική στιγμή όπου για πρώτη φορά η τάση V_2 (ΜV) ξεπερνάει το άνω όριο, με καθυστέρηση 10s, η οποία είναι η χρονική καθυστέρηση ενεργοποίησης του βήματος από την στιγμή που η τάση βρίσκεται εκτός της νεκρής ζώνης (Σημείο F: Σχ. 6.21-6.22, $t=520s$).

Το βήμα του μετασχηματιστή αρχίζει να αυξάνεται τότε, προσπαθώντας να μειώσει την αντίστοιχη τάση ελέγχου V_2 . Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της τάσης (Σχ. 6.21), η ταυτόχρονη αύξηση της τάσης V_2 και του βήματος ΣΑΤΥΦ r για να την αντισταθμίσει συμβαίνει μέχρι την χρονική στιγμή όπου πετυχαίνουμε το άνω όριό του ($t = 2050sec$) και προφανώς από εκείνη την στιγμή κι έπειτα σταθεροποιείται το βήμα σε αυτή την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει. Ταυτόχρονα παρατηρείται ότι μετά από 20s ενεργοποιείται ο περιοριστής ρεύματος του μετατροπέα, αφού το ρεύμα ξεπερνάει για πρώτη φορά την μέγιστη τιμή του (Σημείο D), το οποίο προκαλεί την απενεργοποίηση του ελεγκτή ρυθμίσεως τάσης V_1 (ΥΤ). Τότε, η τάση V_2 αρχίζει να μειώνεται.



Σχήμα 6.21 Τάση ζυγού διανομής V_2 (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

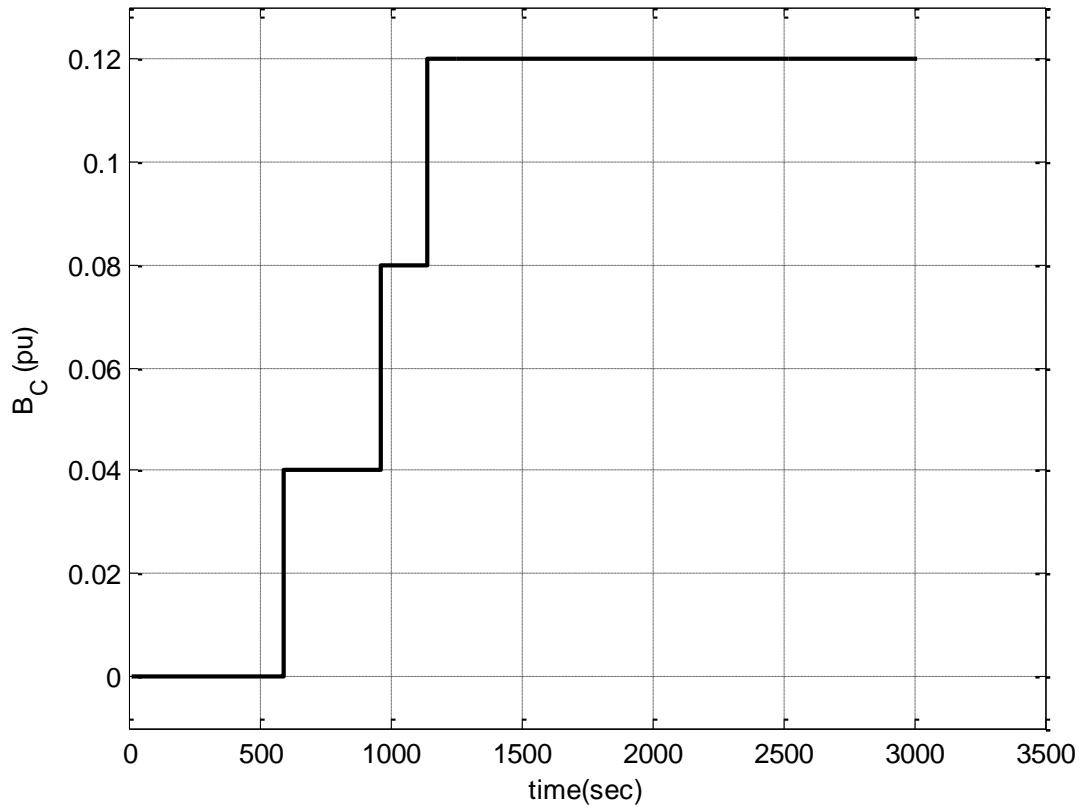


Σχήμα 6.22 Λόγος Μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων

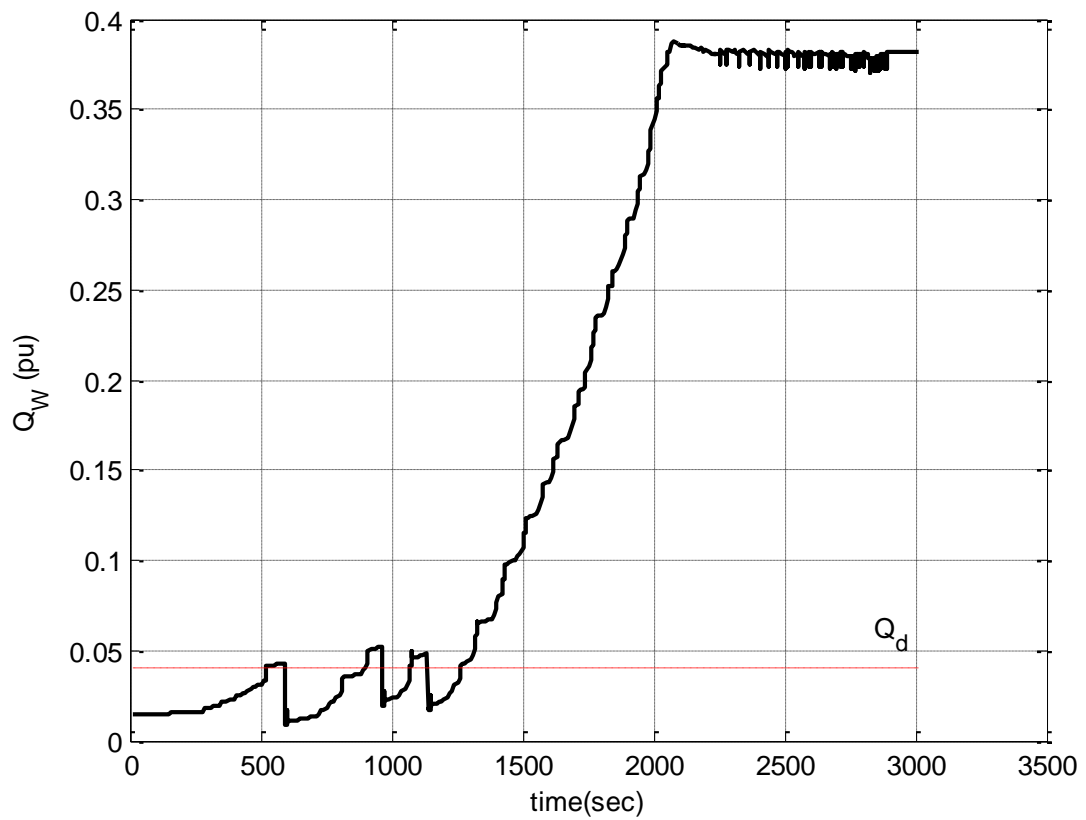
Ως επακόλουθο, αρχίζει και η τάση V_2 να μειώνεται, ενώ εάν δεν είχε ενεργοποιηθεί ο περιοριστής εκείνη την χρονική στιγμή, τότε με την σταθεροποίηση του λόγου μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ κανονικά θα είχαμε αύξηση της τάσης V_2 . Το βήμα ΣΑΤΥΦ μένει σταθερό για ένα χρονικό διάστημα, αφού η τάση V_2 βρίσκεται εντός νεκρής ζώνης. Σε κάποια χρονική στιγμή όμως, η τάση V_2 ξεπερνάει το κάτω της όριο (Σημείο E: Σχ. 6.21-6.22, $t=2230s$) και ως εκ τούτου μετά από 10s ενεργοποιείται εκ νέου ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ. Για να αντισταθμίσει την μείωση της τάσης V_2 , ο μηχανισμός μεταβολής βήματος ΣΑΤΥΦ αρχίζει να μειώνει το λόγο μετασχηματισμού. Έτσι, κρατάει για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα την τάση V_2 εντός νεκρής ζώνης, όπως φαίνεται και στο Σχ. 6.21.

Στα Σχ.6.23-6.24 φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις της αυτόματης ζεύξης-απόζευξης της συστοιχίας των πυκνωτών μέσω της μεταβολής της χωρητικής αγωγιμότητας B_c , καθώς και της εγχεόμενης αέρου ισχύος Q_w του Α/Π των Διδύμων.

Παρατηρείται ότι κάθε φορά που η αέρου ισχύς η οποία εγχέεται στον ζυγό μέσης τάσης του Υ/Σ ξεπερνάει το όριο Q_d για χρονική διάρκεια 60s, συνδέεται μια συστοιχία πυκνωτών ΔB_c . Όπως φαίνεται από το Σχ. 6.23, η ζεύξη της πρώτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_1 = 590s$, η ζεύξη της δεύτερης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_2 = 960s$ και τέλος η ζεύξη της τρίτης συστοιχίας συμβαίνει την χρονική στιγμή $t_3 = 1140s$.



Σχήμα 6.23 Χωρητική Αγωγιμότητα Πυκνωτών (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 6.24 Εγχεόμενη Αεργος Ισχύς Α/Π Διδύμων (Συνεχής Έλεγχος)

6.3 Ανάλυση Αστάθειας

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η λειτουργία του μετατροπέα του Αιολικού Πάρκου δεν είναι ακριβώς λειτουργία πηγής τάσεως, διότι η ενεργός ισχύς P_w είναι σταθερή και δεν προκύπτει από το κύκλωμα θεωρώντας πηγή τάσεως σταθερή κατά μέτρο και γωνία, $V_w \angle \theta_w$. Ως εκ τούτου, η ισοδύναμη αντίσταση Thevenin Z_T είναι προσεγγιστική. Εν συνεχεία θα φανεί η προσέγγιση ως προς την ευστάθεια του συστήματος.

Το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί σύστημα δύο μεταβλητών. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τους δύο λόγους μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ, r και n αντίστοιχα. Παρότι στην προσομοίωση έχει χρησιμοποιηθεί το διακριτό μοντέλο μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ, το συνεχές μοντέλο αποτελεί μια χρήσιμη και απαραίτητη προσέγγιση για διερεύνηση του συστήματος 2^{ος} τάξης. Η συνεχής εξίσωση διαφορών του συστήματος είναι:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{r} \\ \Delta \dot{n} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta r \\ \Delta n \end{bmatrix} \quad (6.42)$$

όπου

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_2}{\partial r} & \frac{\partial V_2}{\partial n} \\ \frac{\partial V_{L2}}{\partial r} & \frac{\partial V_{L2}}{\partial n} \end{bmatrix} \quad (6.43)$$

ο (2x2) πίνακας μεταβλητών κατάστασης του συστήματος 2^{ος} τάξης.

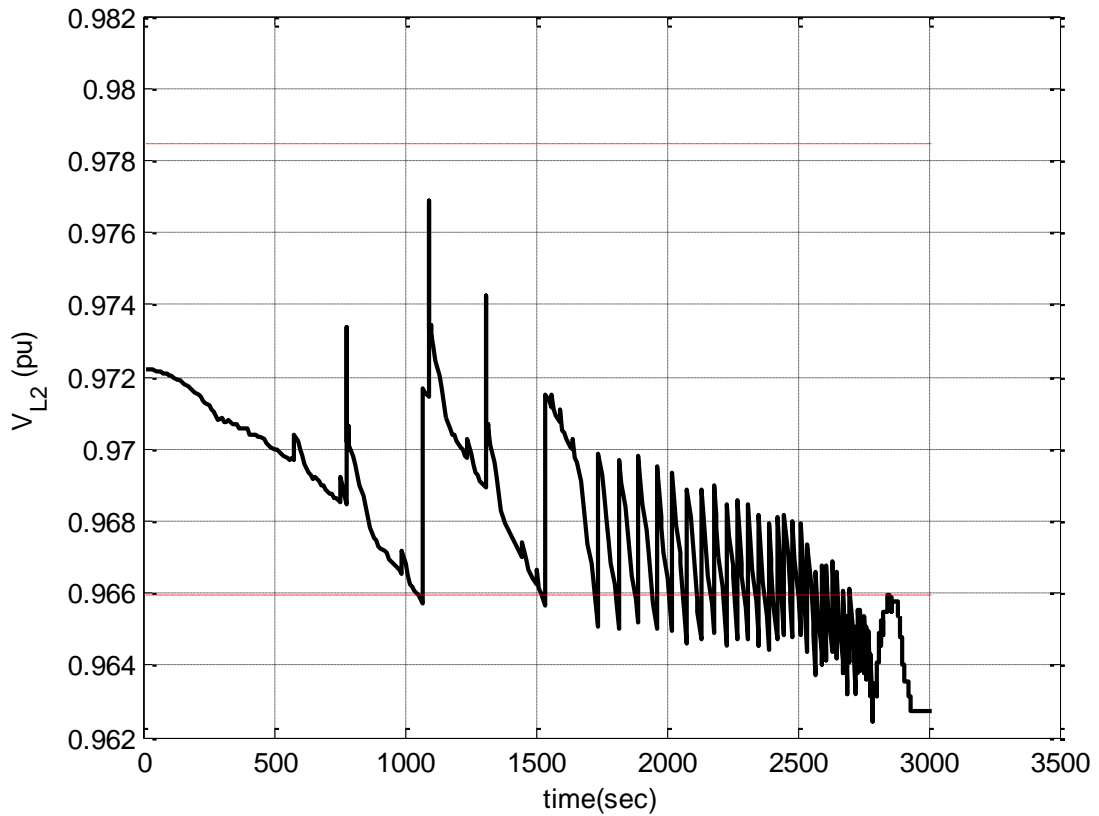
Παρατηρείται επομένως ότι οι δύο μεταβλητές συνδέονται μέσω της εξίσωσης (6.42), κάνοντας την ανάλυση αστάθειας πιο δύσκολη λόγω αλληλεπίδρασης. Έτσι, για λόγους απλότητας και επιπροσθέτως για να μπορέσει να εξεταστεί η συμπεριφορά του συστήματος μόνο από την διάταξη αυτόματης επαναφοράς του φορτίου, θεωρείται ο λόγος μετασχηματισμού r ως παράμετρος καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Με αυτόν τον τρόπο, θεωρείται το εξεταζόμενο σύστημα ως σύστημα 1^{ης} τάξης και αναλύεται η ευστάθειά του μόνο μέσω της μερικής παραγωγού της ελεγχόμενης τάσης φορτίου ως προς τον λόγο μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ φορτίου n , δηλαδή των ιδιοτιμών του στοιχείου $A_{2,2}$ του πίνακα μεταβλητών κατάστασης (όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1).

Ακολούθως, εξετάζεται η ευστάθεια του συστήματος για τα δύο διαφορετικά Αιολικά Πάρκα.

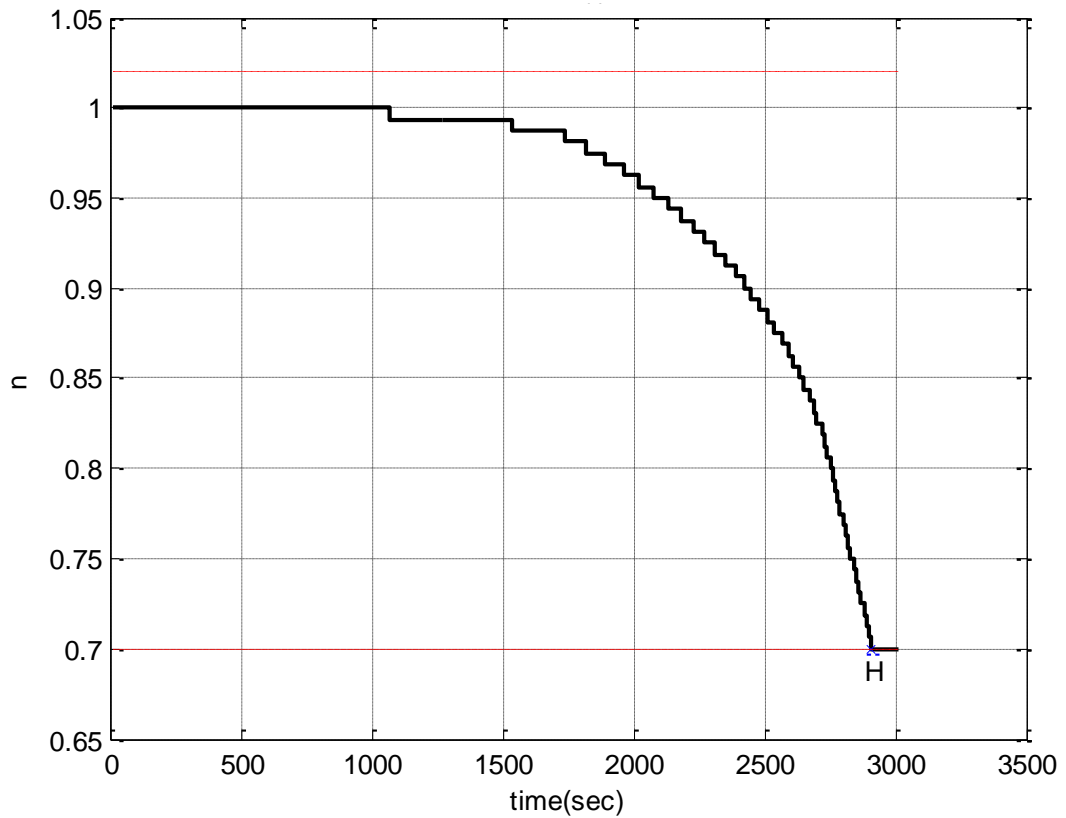
6.3.1.1 Α/Π Ελίκης

Στα Σχ. 6.25-6.26 αναπαρίστανται οι χρονικές μεταβολές της ελεγχόμενης τάσης του φορτίου από τον μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ και του αντίστοιχου λόγου μετασχηματισμού n .

Παρατηρείται ότι ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ r (Σχ. 6.13), στην προσπάθειά του να κρατήσει την μέση τάση V_2 , επηρεάζει την ελεγχόμενη τάση V_{L2} του φορτίου, μειώνοντάς την κάθε φορά που μειώνεται (αφού με την μείωση του r επιτυγχάνεται αύξηση της τάσης V_2 για επαναφορά εντός των ορίων). Συγχρόνως, όμως, μειώνεται και ο λόγος μετασχηματισμού n στην προσπάθεια επαναφοράς της τάσης V_{L2} , ο οποίος αυξάνει την αντίστοιχη τάση. Για αυτό τον λόγο παρατηρούνται οι ακαριαίες απότομες μεταβολές που εμφανίζονται στο Σχ. 6.25 (π.χ. για $t = 2820s, 2830s$).



Σχήμα 6.25 Ελεγχόμενη Τάση Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Ελίκης

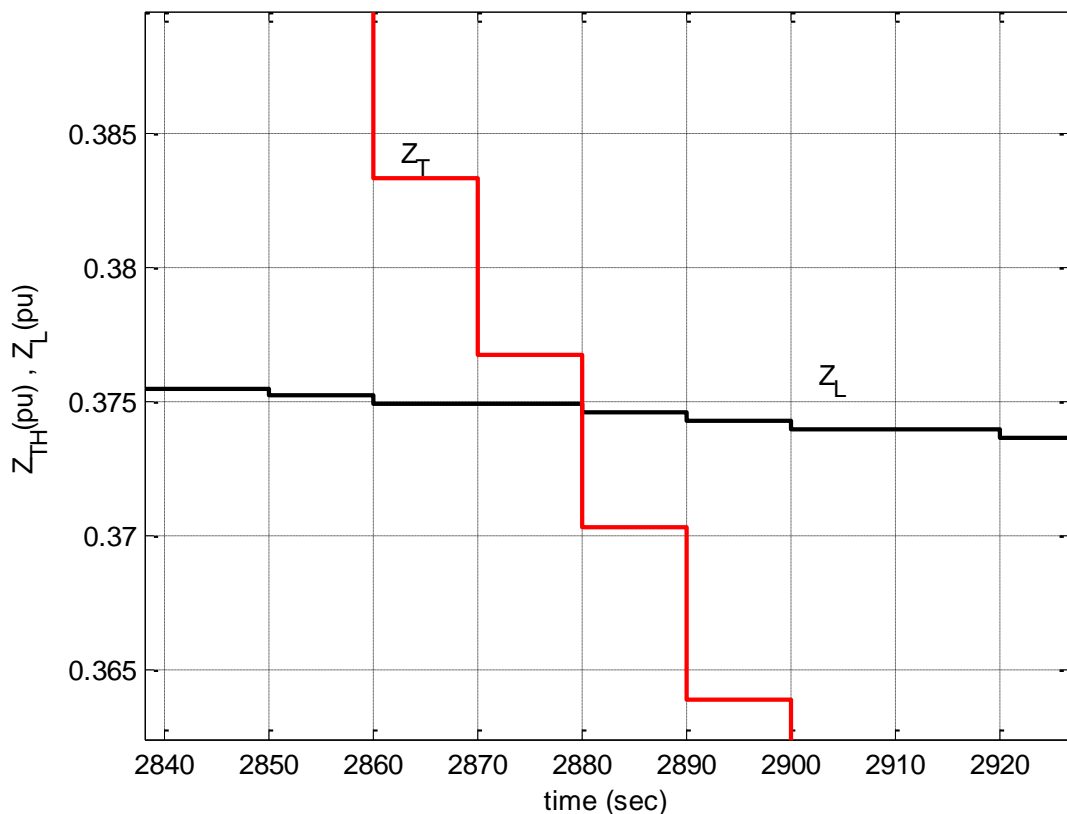


Σχήμα 6.26 Λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ του φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π 1

Δηλαδή, την ίδια χρονική στιγμή μειώνεται η τάση V_{L2} λόγω της μείωσης του βήματος r και αυξάνεται λόγω της μείωσης του βήματος n (παρότι συμβαίνει την ίδια χρονική στιγμή, διατηρούνται και οι δύο διακριτές αλλαγές για καλύτερη εποπτεία του συστήματος).

Η αστάθεια εμφανίζεται την χρονική στιγμή $t = 2880s$ (Σημείο Κ: Σχ. 6.27-6.28), όπου είναι η πρώτη χρονική στιγμή για την οποία, ενώ επενεργούν και οι δύο λόγοι μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ και μάλιστα ο λόγος μετασχηματισμού n μειώνεται (r από $t^- \rightarrow t^+$, και n από $t^+ \rightarrow t^{++}$), η τάση V_{L2} μειώνεται. Δηλαδή πρόκειται για την χρονική στιγμή όπου ισχύει για πρώτη φορά $\frac{\Delta V_{L2}}{\Delta n} \geq 0$.

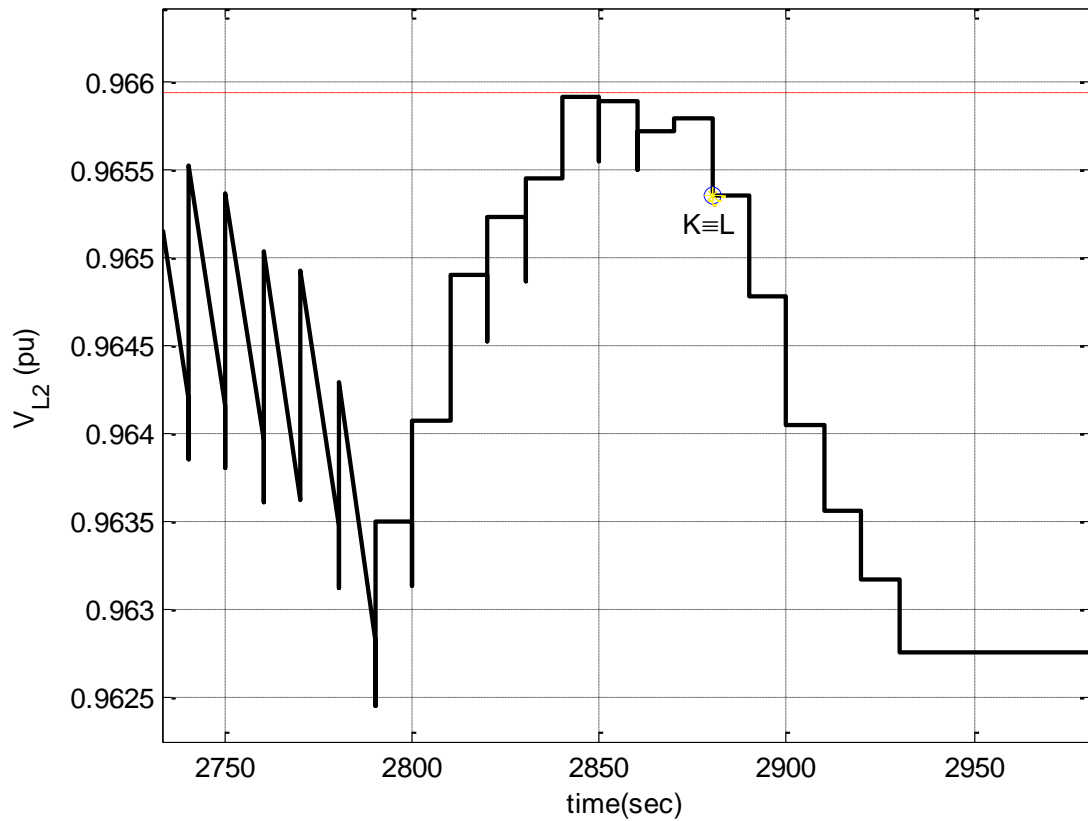
Παράλληλα παρατηρείται ότι η πρώτη χρονική στιγμή όπου ισχύει η προσεγγιστική συνθήκη αστάθειας $Z_T \geq \frac{n^2}{G}$ (Σχέση 6.29), συμβαίνει για $t = 2880s$ (Σημείο Λ: Σχ. 6.27-6.28), δηλαδή την ίδια χρονική στιγμή όπου επιτυγχάνεται η πραγματική αστάθεια του συστήματος. Παρότι οι παραδοχές του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ r ως παράμετρο και της σταθερής γωνίας θ του πάρκου (πηγή τάσεως) αποτελεί προσέγγιση, διότι στην προσομοίωση η μεταβολή του βήματος ΣΑΤΥΦ n οδηγεί σε μεταβολή της παραγόμενης ισχύος του πάρκου P_w , για το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης ωστόσο η χρονική στιγμή εμφάνισης της αστάθειας βρέθηκε ίδια και στις δύο περιπτώσεις.



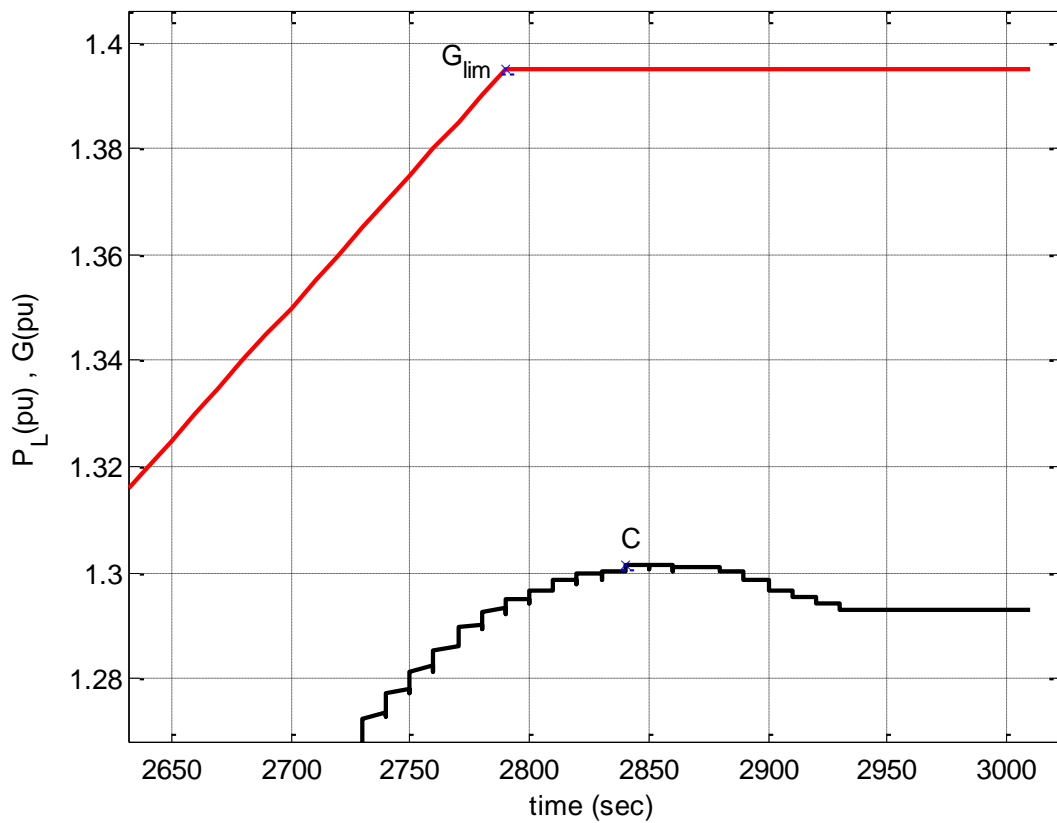
Σχήμα 6.27 Ισοδύναμη Αντίσταση Thevenin και Αντίσταση Φορτίου, Α/Π Ελίκης

Τέλος, παρατηρείται από το Σχ.6.29 ότι ενώ η αύξηση του φορτίου σταματάει την χρονική στιγμή $t=2790s$, αφού τότε συναντάται το άνω όριο της αγωγιμότητας του φορτίου, G_{lim} , οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται 50s αργότερα, δηλαδή την χρονική στιγμή $t=2840s$, αποδεικνύοντας ότι το εξεταζόμενο

σύστημα καταλήγει σε αστάθεια ανεξαρτήτως επιπρόσθετης αύξησης του φορτίου από το άνω θεσπισμένο όριο.



Σχήμα 6.28 Μεγέθυνση Ελεγχόμενης Τάσης Φορτίου, Α/Π Ελίκης



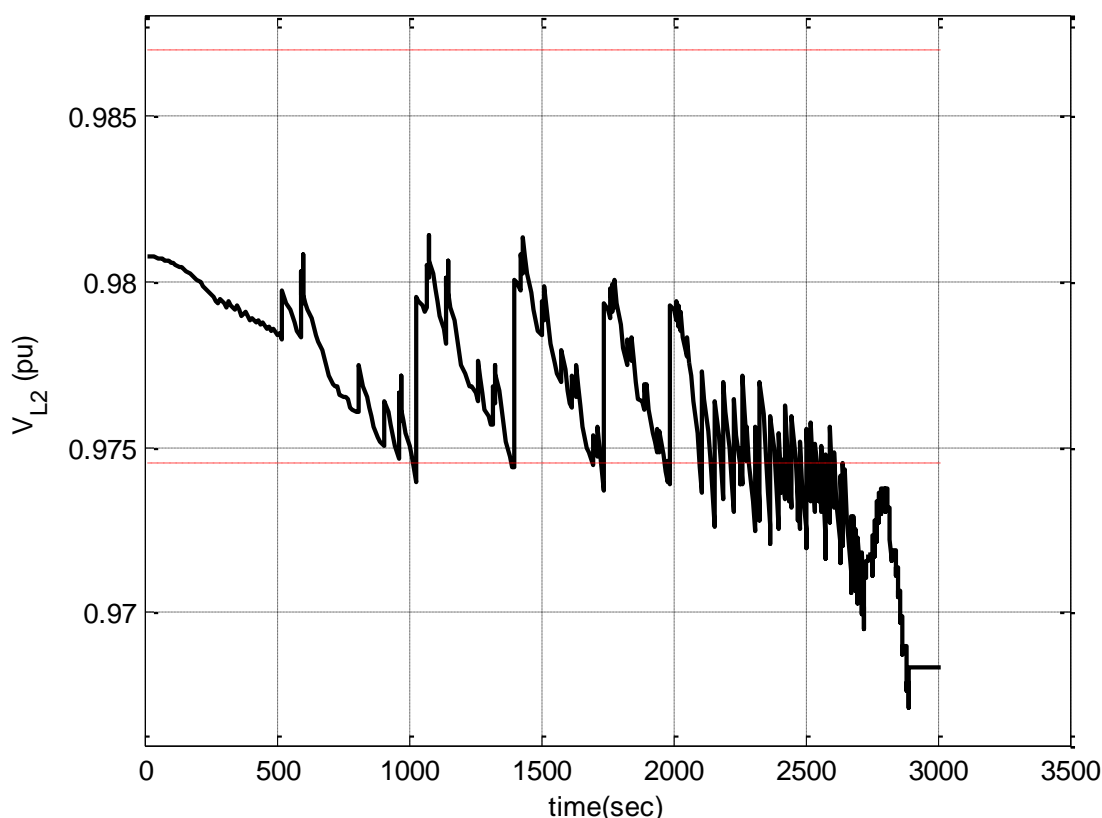
Σχήμα 6.29 Μεγέθυνση Ισχύος και Αγωγιμότητας Φορτίου, Α/Π Ελίκης

Ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι η συνθήκη αστάθειας προβλέπει επακριβώς την χρονική στιγμή όπου θα εμφανιστεί αστάθεια στον ζυγό του φορτίου και επιπροσθέτως η προσέγγιση που έχει ληφθεί, όσον αφορά το ισοδύναμο Thevenin του συστήματος και τη θεώρηση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ r ως παράμετρο, δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.

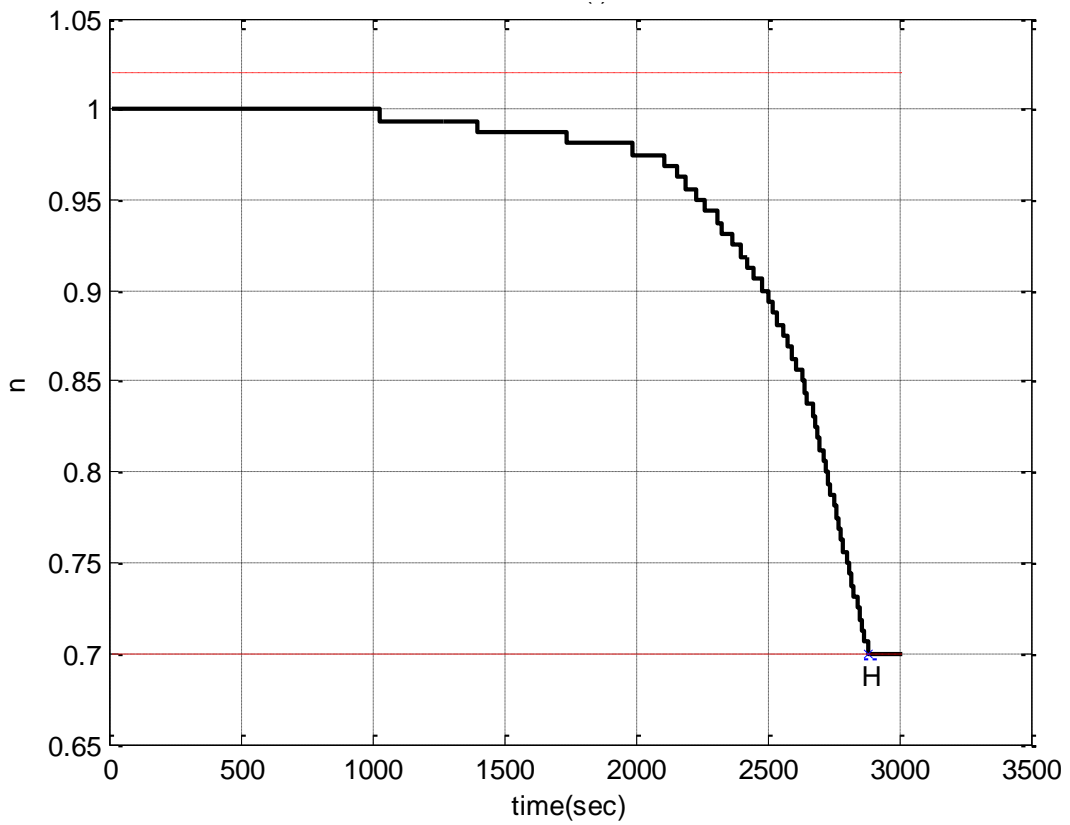
6.3.1.2 Α/Π Διδύμων

Στα Σχ. 6.30-6.31 αναπαρίστανται οι χρονικές μεταβολές της ελεγχόμενης τάσης του φορτίου από τον μετασχηματιστή με ΣΑΤΥΦ και του αντίστοιχου λόγου μετασχηματισμού n .

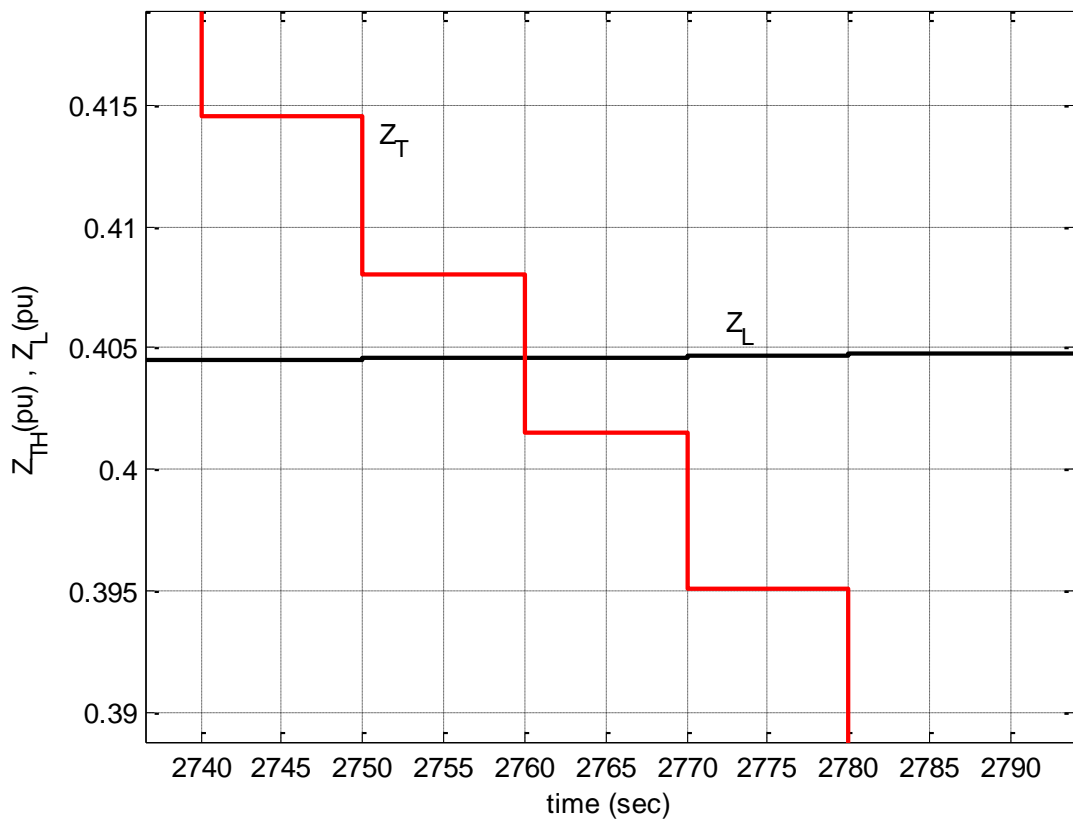
Παρατηρείται ότι ο λόγος μετασχηματισμού του ΣΑΤΥΦ r (Σχ. 6.22), στην προσπάθειά του να κρατήσει την μέση τάση V_2 , επηρεάζει την ελεγχόμενη τάση V_{L2} του φορτίου, μειώνοντάς την κάθε φορά που μειώνεται (αφού με την μείωση του r επιτυγχάνεται αύξηση της τάσης V_2 για επαναφορά εντός των ορίων). Συγχρόνως, όμως, μειώνεται και ο λόγος μετασχηματισμού n στην προσπάθεια επαναφοράς της τάσης V_{L2} , ο οποίος αυξάνει την αντίστοιχη τάση. Για αυτό τον λόγο παρατηρούνται οι ακαριαίες απότομες μεταβολές που εμφανίζονται στο Σχ. 6.30. Δηλαδή, την ίδια χρονική στιγμή μειώνεται η τάση V_{L2} λόγω της μείωσης του βήματος r και αυξάνεται λόγω της μείωσης του βήματος n (παρότι συμβαίνει την ίδια χρονική στιγμή, διατηρούνται και οι δύο διακριτές αλλαγές για καλύτερη εποπτεία του συστήματος).



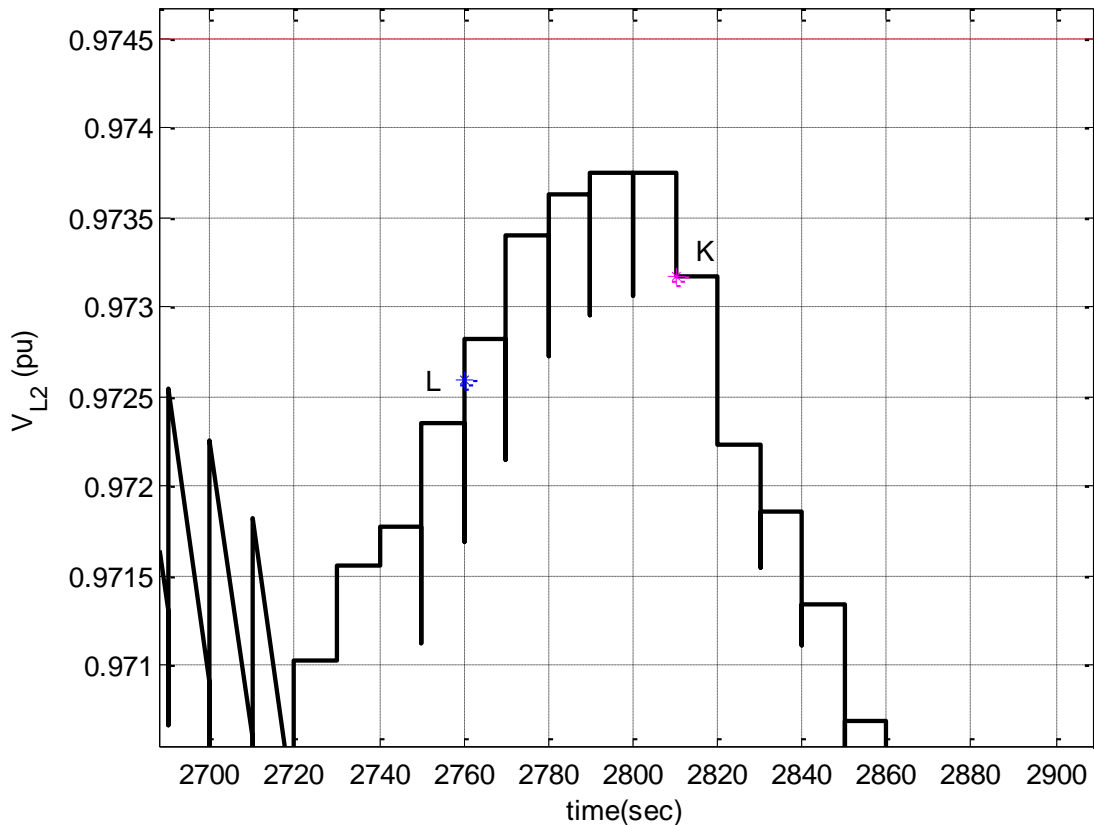
Σχήμα 6.30 Ελεγχόμενη Τάση Φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π Διδύμων



Σχήμα 6.31 Λόγος μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ του φορτίου (Συνεχής Έλεγχος), Α/Π 2



Σχήμα 6.32 Ισοδύναμη Αντίσταση Thevenin και Αντίσταση Φορτίου, Α/Π Διδύμων

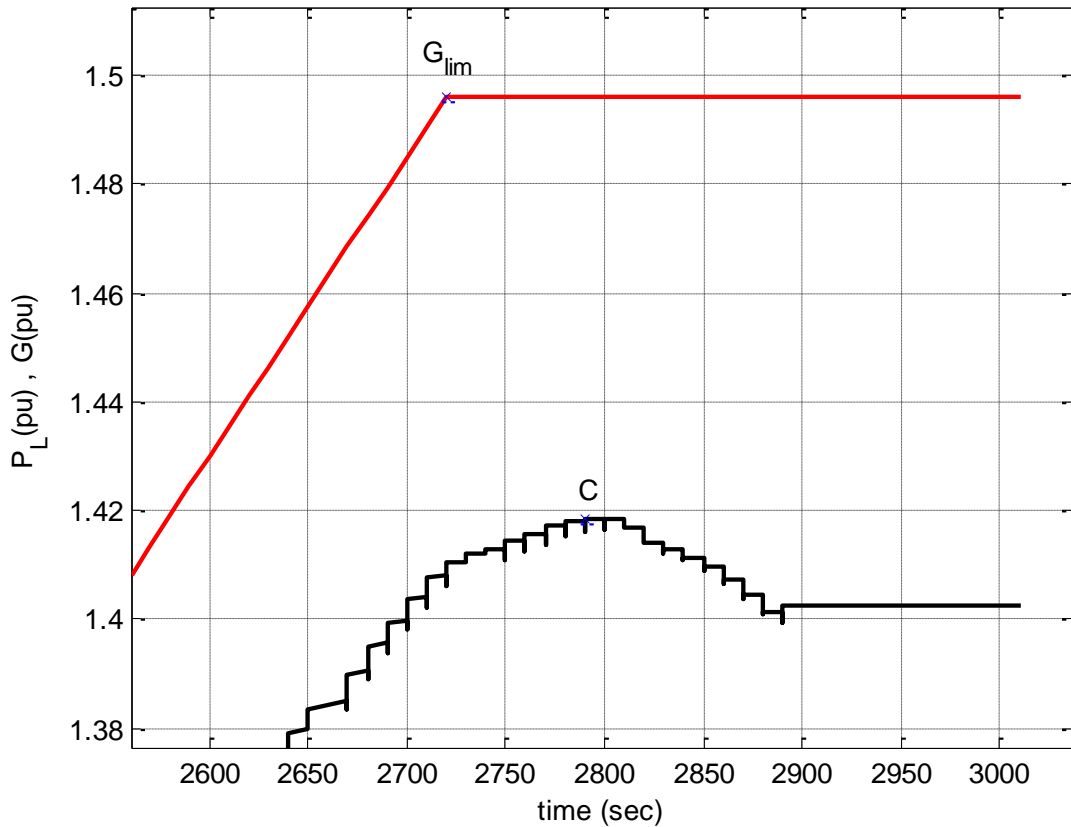


Σχήμα 6.33 Μεγέθυνση Ελεγχόμενης Τάσης Φορτίου, Α/Π Διδύμων

Η αστάθεια εμφανίζεται την χρονική στιγμή $t = 2810s$ (Σημείο K: Σχ. 6.33), όπου είναι η πρώτη χρονική στιγμή για την οποία, ενώ επενεργούν και οι δύο λόγοι μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ και μάλιστα ο λόγος μετασχηματισμού n μειώνεται (r από $t^- \rightarrow t^+$, και n από $t^+ \rightarrow t^{++}$), η τάση V_{L2} μειώνεται. Δηλαδή πρόκειται για την χρονική στιγμή όπου ισχύει για πρώτη φορά $\frac{\Delta V_{L2}}{\Delta n} \geq 0$.

Παράλληλα παρατηρείται ότι η πρώτη χρονική στιγμή όπου ισχύει η προσεγγιστική συνθήκη αστάθειας $Z_T \geq \frac{n^2}{G}$ (Σχέση 6.29), συμβαίνει για $t = 2760s$ (Σημείο L: Σχ. 6.32-6.33), δηλαδή 50s πριν από την χρονική στιγμή όπου εκδηλώνεται η πραγματική αστάθεια του συστήματος. Παρότι η παραδοχή της σταθερής γωνίας θ του πάρκου (πηγή τάσεως) αποτελεί προσέγγιση, διότι στην προσομοίωση η μεταβολή του βήματος ΣΑΤΥΦ n οδηγεί σε μεταβολή της παραγόμενης ισχύος του πάρκου P_w , για το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης ωστόσο η χρονική στιγμή εμφάνισης της αστάθειας βρέθηκε ίδια και στις δύο περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι υπολογίστηκε θεωρητικά και προσεγγιστικά η αστάθεια σε χρονική στιγμή προτού πραγματοποιηθεί η πραγματική αστάθεια του συστήματος, καθιστά την μέθοδο υλοποίησης πολύ καλή ως προληπτικό μέτρο αστάθειας της τάσης και του γενικότερου συστήματος που εξετάζεται.

Τέλος, παρατηρείται από το Σχ.6.34 ότι ενώ η αύξηση του φορτίου σταματάει την χρονική στιγμή $t=2720s$, αφού τότε συναντάται το άνω όριο της αγωγιμότητας του φορτίου, G_{lim} , οι συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος επιτυγχάνονται 70s αργότερα, δηλαδή την χρονική στιγμή $t=2790s$, αποδεικνύοντας ότι το εξεταζόμενο σύστημα καταλήγει σε αστάθεια ανεξαρτήτως επιπρόσθετης αύξησης του φορτίου από το άνω θεσπισμένο όριο.



Σχήμα 6.34 Μεγέθυνση Ισχύος και Αγωγιμότητας Φορτίου, Α/Π Διδύμων

Ως εκ τούτου συμπεραίνεται ότι στο Αιολικό Πάρκο των Διδύμων η συνθήκη αστάθειας προβλέπει προληπτικά την χρονική στιγμή όπου θα εμφανιστεί αστάθεια στον ζυγό του φορτίου και επιπροσθέτως η προσέγγιση που έχει ληφθεί, όσον αφορά το ισοδύναμο Thevenin του συστήματος και τη θεώρηση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΥΦ r ως παράμετρο, επιφέρει επιθυμητά και αποδεκτά αποτελέσματα.

7

Συμπεράσματα – Προοπτικές

7.1 Σύνοψη και κύρια Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση που μπορεί να ασκήσει η Διεσπαρμένη Παραγωγή ορισμένων Αιολικών Πάρκων στο όριο φόρτισης ενός συστήματος. Εξετάστηκε η αύξηση του περιθωρίου ασφαλείας, όσον αφορά τον κίνδυνο μακροπρόθεσμης αστάθειας τάσης, που μπορεί να προκύψει, μέσω της άεργης υποστήριξης του συστήματος μεταφοράς από διεσπαρμένες παραγωγές. Επελέγει ένα σχετικά ασθενές δίκτυο μεταφοράς, στο μέσο του οποίου θεωρήθηκε η δυνατότητα σύνδεσης ενός Αιολικού Πάρκου μέσω γραμμής διανομής και υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσεως. Χρησιμοποιήθηκαν τα υπάρχοντα δεδομένα για δύο Αιολικά Πάρκα της περιοχής της Πελοποννήσου, το πάρκο της Ελίκης (18.9 MVA) και το πάρκο των Διδύμων (36 MVA), τα οποία συνδέονται εναλλακτικά με βάση τα πραγματικά χαρακτηριστικά της γραμμής σύνδεσης μέσης τάσης, του υποσταθμού μέσης/υψηλής τάσεως και της παραγόμενης ενεργού ισχύος, θεωρώντας ένα στιγμιότυπο καλοκαιρινού φορτίου αιχμής το οποίο συμπίπτει κατά κανόνα με περίοδο άπνοιας, για αυτό και η τιμή της ενεργού ισχύος είναι μικρή για τα δύο Αιολικά Πάρκα (2.1 MW για την Ελίκη και 1.76 MW για τα Δίδυμα). Όπως αναφέρθηκε και στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, εξετάστηκαν συμβατικά και εναλλακτικά σενάρια για τον έλεγχο του ζυγού υψηλής τάσης στον υποσταθμό σύνδεσης της διεσπαρμένης παραγωγής. Ακολούθησε η διεξαγωγή προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB χωρίς καμία μορφή ελέγχου της υψηλής τάσης και εν συνεχεία για τις δύο διαφορετικές μορφές ελέγχου που προτάθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η συνεχής ρύθμιση της υψηλής τάσης και μία μορφή ευφυούς ελέγχου της υψηλής τάσης μέσω εντολής άεργης υποστήριξης.

Αρχικά προσδιορίστηκε η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς του συστήματος δοκιμής χωρίς καμία μορφή ελέγχου του ζυγού υψηλής τάσης, ώστε να καθοριστούν τα βασικά μεγέθη για σύγκριση των εξεταζόμενων τεχνικών ελέγχου και να μπορέσει να τεκμηριωθεί η αύξηση που επιφέρει ο αυτόματος έλεγχος της υψηλής τάσης. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς χωρίς έλεγχο προέκυψε ίση με 121MW για το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης και 129MW για το Αιολικό Πάρκο των Διδύμων. Η διαφορά οφείλεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά των γραμμών σύνδεσης μέσης τάσης, του υποσταθμού σύνδεσης και της παραγόμενης ενεργού ισχύος των Αιολικών Πάρκων.

Εν συνεχεία, εξετάστηκε η επιρροή που ασκεί ο συνεχής έλεγχος της υψηλής τάσης. Παρατηρήθηκε ότι με αυτή τη μορφή ελέγχου του ζυγού υψηλής τάσης προκύπτει μια

αύξηση της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος κατά 7.5% και 10% για το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης και των Διδύμων αντίστοιχα, σε σχέση με τη περίπτωση χωρίς καμία μορφή ελέγχου της τάσης. Η Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς με συνεχή έλεγχο προέκυψε ίση με 130MW για την Ελίκη και 142MW για τα Δίδυμα. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι απαιτεί συνεχή κανάλια επικοινωνίας μεγάλης ακρίβειας, ταχύτητας και αξιοπιστίας. Αυτό μπορεί να προβεί ένας πολύ περιοριστικός παράγοντας, καθιστώντας την εφαρμογή αυτού του σεναρίου πρακτικά ανέφικτη στις περισσότερες περιπτώσεις.

Για αυτό τον λόγο και κρίθηκε απαραίτητο ένα νέο πιθανό απλουστευμένο σενάριο επικοινωνίας και στρατηγικής ελέγχου της Υψηλής Τάσης, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4, που απαιτεί μόνο ένα διακριτό σήμα το οποίο θα ζητάει μέγιστη άεργη υποστήριξη από την διεσπαρμένη παραγωγή (σε αυτή την περίπτωση από το Αιολικό Πάρκο). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός φθηνού κι εύκολου να αποκτηθεί καναλιού επικοινωνίας, είτε ασύρματα (π.χ. κινητό τηλέφωνο) ή ενσύρματα από τις γραμμές μεταφοράς. Εξετάστηκε η επίδραση που έχει στη Μέγιστη Μεταφερόμενη Ισχύς του συστήματος δοκιμής η προτεινόμενη ευφυής μορφή ελέγχου, δηλαδή η εντολή άεργης υποστήριξης, και βρέθηκε ότι επιτυγχάνονται οι ίδιες συνθήκες μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος με την περίπτωση συνεχούς ελέγχου. Παρότι υπάρχουν διαφορές στην χρονική συχνότητα διαφόρων ελέγχων, το γεγονός ότι συμπίπτουν οι συνθήκες μέγιστης μεταφοράς ισχύος και επίσης ότι αυτή η μέθοδος αποτελεί μία οικονομικότερη και λιγότερο πολύπλοκη λύση, καθιστά την προτεινόμενη μέθοδο ως βέλτιστη.

Στον πίνακα 7.1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κυριότερα αποτελέσματα της εργασίας, όπως παρουσιάστηκαν και στον Πίνακα 5.1:

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1 Όριο Μέγιστης Μεταφερόμενης Ισχύος (MW)

Αιολικό Πάρκο	Χωρίς Έλεγχο	Συνεχής Έλεγχος Τάσης	Αύξηση Περιθωρίου	Έξυπνη Μορφή Ελέγχου
Ελίκη	121	130	9	130
Δίδυμα	129	142	13	142

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 εξετάζεται η συμπεριφορά των δύο Αιολικών Πάρκων και αναλύεται η ευστάθεια του συστήματος μεταφοράς. Η ευστάθεια συνδέεται με τη δυναμική του ΣΑΤΥΦ που προστίθεται στο ζυγό σύνδεσης του φορτίου. Αρχικά, γίνεται η διεξαγωγή προσομοιώσεων στο λογισμικό MATLAB για το σύστημα με την προσθήκη του μετασχηματιστή φορτίου. Ακολούθως, προσδιορίζεται η συνθήκη αστάθειας του εξεταζόμενου ακτινικού συστήματος, λαμβάνοντας δύο παραδοχές. Η λειτουργία του μετατροπέα του Αιολικού Πάρκου θεωρείται ως λειτουργία πηγής τάσεως, κάτι το οποίο αποτελεί προσέγγιση, αφού η ενεργός ισχύς του Αιολικού Πάρκου είναι σταθερή και δεν προκύπτει από το κύκλωμα θεωρώντας πηγή τάσεως σταθερή κατά μέτρο και γωνία. Επιπροσθέτως, επειδή το εξεταζόμενο σύστημα αποτελεί σύστημα δύο μεταβλητών και συγκεκριμένα των δύο λόγων μετασχηματισμού των ΣΑΤΥΦ, θεωρείται για λόγους απλότητας ο λόγος μετασχηματισμού του συστήματος μεταφοράς ως παράμετρος κι έτσι η ανάλυση ευστάθειας του συστήματος εξετάζεται μόνο ως προς την μεταβολή του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ του φορτίου. Ως εκ τούτου, η συνθήκη προσαρμογής που υπολογίστηκε βασίζεται σε παραδοχές και έτσι εξετάστηκε εάν συμπίπτει με την εκδήλωση της πραγματικής αστάθειας του συστήματος της προσομοίωσης. Για το Αιολικό Πάρκο της Ελίκης προέκυψε ότι η συνθήκη αστάθειας προβλέπει επακριβώς την χρονική στιγμή όπου θα εμφανιστεί αστάθεια στον ζυγό του φορτίου και έτσι η προσέγγιση που έχει ληφθεί, όσον αφορά το ισοδύναμο Thevenin του συστήματος και τη θεώρηση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ r ως παράμετρο, δεν επηρεάζει το

τελικό αποτέλεσμα, καθιστώντας την προσέγγιση ορθή. Για το Αιολικό Πάρκο των Διδύμων συμπεραίνεται ότι η συνθήκη αστάθειας προβλέπει προληπτικά την χρονική στιγμή όπου θα εμφανιστεί αστάθεια στον ζυγό του φορτίου και ως εκ τούτου η προσέγγιση που έχει ληφθεί, όσον αφορά το ισοδύναμο Thevenin του συστήματος και τη θεώρηση του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ r ως παράμετρο, επιφέρει επιθυμητά και αποδεκτά αποτελέσματα.

Περαιτέρω ανάλυση και έρευνα είναι απαραίτητη, καθώς μερικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά του συστήματος, στις παραδοχές που έχουν ληφθεί και τέλος στο εξεταζόμενο σύστημα μπορεί να οδηγήσουν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

7.2 Προοπτικές για μελλοντική έρευνα

Όπως είναι φανερό, υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω ανάπτυξη της παρούσας εργασίας σε μελλοντική έρευνα.

Καταρχάς, στη παρούσα εργασία εξετάστηκε ένα απλό ακτινικό δίκτυο, στη πράξη όμως τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά πιο πολύπλοκα. Αυτή η πολυπλοκότητα των δικτύων λοιπόν μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα των διαφόρων σεναρίων ελέγχου που εξετάστηκαν. Ρεαλιστικότερα αποτελέσματα λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν αν η μελέτη της παρούσας εργασίας πραγματοποιηθεί σε ένα μη ακτινικό δίκτυο.

Επίσης, σε όλες τις προσομοιώσεις θεωρήθηκε ότι το διασυνδεδεμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αντιπροσωπεύεται από μία σταθερή ισοδύναμη πηγή Thevenin, κάτι το οποίο στην πραγματικότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και μεταβάλλεται. Ρεαλιστικότερα αποτελέσματα λοιπόν, μπορούν να εξαχθούν αν η μελέτη της παρούσας εργασίας πραγματοποιηθεί σε ένα δίκτυο με περισσότερες αναχωρήσεις και διακλαδώσεις που να συνθέτουν το πλήρες σύστημα.

Η χρήση των Μετατροπών Πηγής Τάσης για άεργη υποστήριξη βασίστηκε σε αρκετές παραδοχές και απλοποιήσεις. Αρχικά, θεωρήθηκε ότι τα Αιολικά Πάρκα διαθέτουν πράγματι τέτοιους μετατροπείς ισχύος, ενώ κάτι τέτοιο μπορεί να μην ισχύει. Ένα πρώτο σημαντικό βήμα, επομένως, θα ήταν ο έλεγχος της διαθεσιμότητας τέτοιων μετατροπών στα πάρκα. Επίσης, στα σενάρια που εξετάστηκαν δεν υπήρχε χρονική καθυστέρηση λόγω της γρήγορης απόκρισης των ηλεκτρονικών ισχύος. Σε περίπτωση εισαγωγής μιας μικρής χρονικής καθυστέρησης το μοντέλο θα είναι πιο ρεαλιστικό διότι θα αναπαρίστανται οι χρονικές καθυστερήσεις των ρυθμιστών.

Οι διάφορες μορφές ελέγχου που εξετάστηκαν θεωρήθηκαν ακαριαίας απόκρισης. Όμως, σε ένα ρεαλιστικό σύστημα υπεισέρχονται χρονικές καθυστερήσεις (π.χ. μηχανικές) και έτσι με την προσθήκη αυτών στο μοντέλο της προσομοίωσης μπορούν να εξαχθούν ορθότερα και ρεαλιστικότερα αποτελέσματα.

Ενώ το άπειρο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή σταθερής τάσεως και μέτρου, το Αιολικό Πάρκο στην πραγματικότητα είναι ζυγός φορτίου (PV), δηλαδή έχει σταθερό μέτρο τάσεως και σταθερή έγχυση ενεργού ισχύος. Κατά συνέπεια, η εξέταση του συστήματος θεωρώντας το Αιολικό Πάρκο ως ζυγό φορτίου θα εξασφάλιζε καλύτερα αποτελέσματα.

Ένα άλλο κομμάτι που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης και επέκτασης αφορά τις ικανές συνθήκες ευστάθειας που χρησιμοποιούνται από το σύστημα προστασίας ώστε αν

είναι δυνατόν να μετατραπούν σε αναγκαίες συνθήκες, εξασφαλίζοντας ακόμα καλύτερη ανίχνευση επερχόμενης αστάθειας τάσης. Επιπροσθέτως, η προσέγγιση του συστήματος 2^{ας} τάξης με 1^{ης} μέσω της παραδοχής του λόγου μετασχηματισμού ΣΑΤΥΦ του συστήματος μεταφοράς ως παράμετρο, επηρεάζει τον υπολογισμό της πραγματικής συνθήκης αστάθειας, κι έτσι κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση του πραγματικού συστήματος 2^{ας} τάξης για τον εντοπισμό του σημείου αστάθειας.

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

8

Βιβλιογραφία

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [2] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα 2001.
- [3] Β. Κ. Παπαδιά, Κ. Βουρνά, "Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας και Έλεγχος Συχνότητας και Τάσεως, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991.
- [4] Β. Κ. Παπαδιά, "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής ενέργειας", Τόμοι Ι, ΙΙ, Αθήνα 1985.
- [5] T. Van Cutsem and C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [6] Ι. Α. Αναγνωστόπουλος, "Επίδραση Άεργης Υποστήριξης από Αιολικά Πάρκα στο Όριο Φόρτισης Συστήματος", ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Φεβρουάριος 2015.
- [7] C. Vournas and P.A. Christoforidis, "Investigation of alternative methods for distribution voltage control: Impact on maximum loadability", IFAC Symposium, Power Plants and Power Systems Control, Toulouse, France, June 2012.
- [8] Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D. ,D'haeseleer W., Belmans R., "Distributed Generation: Definition, Benefits and Issues", K.U.Leuven - Energy Institute, 2003.
- [9] F. Coyle, "Introduction to Wind Power", The English Press, 2011
- [10] B. Otomega, M. Glavic and T. Van Cutsem, "Wide-Area Adaptive Load Shedding Control to Counteract Voltage Instability", IFAC PPPSS, Toulouse, France, September 2012.
- [11] Κ. Βουρνάς, (Επιστημονικός Υπεύθυνος), "Ανάπτυξη Λογισμικού για την Ανάλυση Ευστάθειας Τάσεως - Εφαρμογή στο Ελληνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα", Αθήνα, Απρίλιος 1999.

- [12] S. C. Savulescu, "Real-Time Stability in Power Systems", Springer, 2014.
- [13] ΑΔΜΗΕ, "Δεκαετής Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2014-2023", Αθήνα, 2014.
- [14] Β. Χ. Νικολαΐδης, "Σχεδίαση Προστασίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας από Μακροπρόθεσμη Αστάθεια Τάσης", ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Απρίλιος, 2007.
- [15] Γ. Τσουράκης, "Συμβολή της Αιολικής Δείσδυσης στην Ευστάθεια των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας", Διδακτορική Διατριβή, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Μάρτιος, 2010.
- [16] Δημήτριος Π. Πετρόπουλος, "Μοντελοποίηση και Ανάλυση της Δυναμικής Ευστάθειας της HVDC Διασύνδεσης της Κρήτης με το Κεντρικό Δίκτυο", Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Οκτώβριος 2013.
- [17] C. Vournas, C. Lambrou, I. Anagnostopoulos, G. Christoforidis, J. Kabouris "Distributed reactive support and voltage stability limits: the example of Peloponnese in the Hellenic Interconnected System", IEEE/PES General Meeting, Denver Co., July 2015.
- [18] C. Vournas, "Maximum Power Transfer in the Presence of Network Resistance", IEEE/PES, November 2014.
- [19] J. A. Peças Lopes, A. Mendonça, N. Fonseca, L. L. A. Seca, , "Voltage and Reactive Power Control Provided by DG Units", CIGRE Symposium, Power Systems with Dispersed Generation, Athens, April 2005.
- [20] Γ. Χριστοφορίδης, Ι. Καμπούρης, Β. Νικολαΐδης, Κ. Βουρνάς, "Δείκτες Ασφάλειας Τάσης και Επίδραση Πρόσφατων Ενισχύσεων Συστήματος Μεταφοράς", Ημερίδα Ελληνική Επιτροπή CIGRE, 2015
- [21] T. Van Cutsem, J. Kabouris, G. Christoforidis, C. D. Vournas, "Application of realtime voltage security assessment to the Hellenic Interconnected System", IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution, Vol.: 152, pp. 123- 131, Jan. 2005
- [22] Σ. Ν. Μανιάς, "Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά", Αθήνα, 2003
- [23] Σ. Ν. Μανιάς, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Αθήνα, 2012
- [24] Α. Δ. Ουλής-Ρούσης, "Ανάλυση αιολικού πάρκου ανεμογεννητριών με μηχανές διπλής τροφοδότησης διασυνδεδεμένων στο δίκτυο", Διπλωματική Εργασία, ΣΗΜΜΥ, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούλιος 2013