



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής
Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής
Τροφοδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν. ΠΑΠΑΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής
Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής
Τροφοδότησης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εμμανουήλ Βουμβουλάκης

Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

.....
Παπαθανασίου Σταύρος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

.....

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν. ΠΑΠΑΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

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

Copyright © Δημήτριος Ν. Παπαοικονόμου 2010

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

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της σχολής των Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με τη βοήθεια του λογισμικού EUROSTAG. Επιχειρήθηκε επίσης μια μελέτη της επίδρασης του μοντέλου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ Κύπρου) και η σύγκριση της με την επίδραση ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2009- 2010 υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο και οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Εμμανουήλ Βουμβουλάκη για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επίσης, τις θερμές μου ευχαριστίες οφείλω και στον κ. Ιωάννη Μάργαρη, για τη συνεργασία και τη πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ν.
ΠΑΠΑΟΙΚΟΝΟΜΟΥ

Περίληψη

Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Επιπρόσθετα, επιχειρήθηκε η ανάπτυξη μιας σύγχρονης στρατηγικής ελέγχου της ανεμογεννήτριας με σκοπό τη βελτιστοποίηση της επίδραση της στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μοντελοποίηση του συστήματος και η προσομοίωση της συμπεριφοράς του έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας EUROSTAG.

Πιο αναλυτικά, η δομή της εργασίας οργανώνεται σε εννέα κεφάλαια:

Στο κεφάλαιο 1 «*Εισαγωγή*» παρουσιάζονται τα κίνητρα και ο σκοπός της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 με τίτλο «*Μηχανικό σύστημα και έλεγχος ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας*» εξηγείται η διαδικασία μοντελοποίησης όλων των μηχανικών μερών του συστήματος της ανεμογεννήτριας. Επιπρόσθετα, ένας έλεγχος που ενεργεί στον μηχανισμό αλλαγής γωνιάς βήματος της έλικας περιγράφεται.

Το Κεφάλαιο 3 «*Ανεμογεννήτρια με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης – Ηλεκτρικό σύστημα και έλεγχος*» εστιάζει στη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Παρουσιάζεται η θεωρία της μόνιμης και της δυναμικής κατάστασης της γεννήτριας. Επίσης, περιγράφεται το μοντέλο των μετατροπών και η στρατηγική ελέγχου τους.

Στο Κεφάλαιο 4 «*Αρχικοποίηση του συστήματος*» περιγράφεται η διαδικασία αρχικοποίησης που υιοθετήθηκε στη παρούσα εργασία.

Το Κεφάλαιο 5 «*Λογισμικό Προσομοίωσης EUROSTAG – Δημιουργία Μοντέλων στον Model Editor*» αποτελεί μια σύντομη περιγραφή του λογισμικού πακέτου EUROSTAG καθώς επίσης και του εργαλείου δημιουργίας των μοντέλων της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 6 «Προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολές του ανέμου» περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε έναν αριθμό σεναρίων μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου.

Στο Κεφάλαιο 7 «Ανεμογεννήτρια με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης - Παραμονή σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως και δυνατότητα στήριξης του δικτύου» το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης διευρύνεται για τη βελτιστοποίηση της συμπεριφοράς του συστήματος κατά τη διάρκεια διαταραχών. Αρχικά, η δυναμική συμπεριφορά της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης κατά τη διάρκεια διαταραχών αναλύεται λεπτομερώς. Στη συνέχεια και βάση της ανάλυσης αυτής, παρουσιάζεται ένα σύστημα προστασίας και ελέγχου το οποίο δίνει τη δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως και να στηρίζει την ευστάθεια του δικτύου.

Το Κεφάλαιο 8 «Μοντελοποίηση του ΣΗΕ Κύπρου – Παρουσίαση των Σεναρίων και των Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης» περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου με την βοήθεια του EUROSTAG καθώς επίσης και παρουσιάζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έλαβαν χώρα σε αυτό.

Τέλος, τα συμπεράσματα και μια περίληψη των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 9.

Για την καλύτερη και πληρέστερη κατανόηση και αξιολόγηση του μοντέλου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθούν τα παρακάτω παραρτήματα:

Το Παράρτημα 1 περιλαμβάνει μια αναλυτική περιγραφή των στοιχειωδών μπλοκ του Model Editor, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Το Παράρτημα 2 παρουσιάζει το μοντέλο της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας όπως δημιουργήθηκε στον Model Editor.

Τα Παραρτήματα 3 και 4 περιλαμβάνουν κάποιες επιπλέον προσομοιώσεις της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος σε διάφορα σενάρια μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου και βύθισης τάσεως αντίστοιχα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:

Ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών, γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων, ελεγκτής γωνίας βήματος πτερυγίων με Gain Scheduling, μετατροπέας, παραμονή σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα, δυνατότητα υποστήριξης των επιπέδων τάσης του δικτύου, EUROSTAG.

Abstract

In this thesis, we are focusing on the modeling of a variable speed wind turbine equipped with a Doubly Fed Induction Generator. The main intention is to develop advanced control strategies for variable speed wind turbine, which improve the wind turbine's impact on the power system. As indicated in the title, one main issue forms the kernel of the research work: the modeling of a Variable Speed Wind Turbine equipped with a Doubly Fed Induction Generator. The modeling as well as the simulation of the system was carried through with the use of the EUROSTAG software package.

Analytically, the structure of this thesis is composed of ten chapters:

Chapter 1 "*Introduction*" presents the motivation, as well as the objectives of this Thesis. Moreover, a synopsis is also included.

In Chapter 2 titled "*Mechanical system and control of variable speed wind turbine*" the modeling process of all mechanical parts of the wind turbine system is explained. A control acting on the blade pitching mechanism is also described.

Chapter 3 "*Doubly Fed Induction Generator wind turbine – Electrical system and control*" focuses on the doubly-fed induction generator wind turbine concept. The theory of the generator's steady state as well as dynamic performance is presented. The modeling of the power converters as well as their control strategy is explained and described analytically.

In Chapter 4 titled "*Initialization of the system*" the entire initialization process is described thoroughly.

Chapter 5 "*Software simulation package EUROSTAG - Model Editor of EUROSTAG*" is an introduction to the software package which was used to carry through the simulations and to create the models of this Thesis.

In Chapter 6 titled “*Simulation of the system’s dynamic behavior during wind speed variations*” the simulation results of a number of different wind speed variations scenarios are included.

In Chapter 7 titled “*Doubly Fed Induction Generator wind turbine - fault ride through and grid support capability*” the control system of the DFIG wind turbine is extended by a specific control strategy for fault ride through and grid support capability. First, the dynamic behavior of DFIG wind turbines in case of grid faults is analyzed in detail. Based on this, a control and protection system is implemented, which enables wind turbines to ride-through faults and to support power system stability.

Chapter 8 “*Modeling of Power System of Cyprus – presentation of simulation scenarios and results*” includes a description of software package EUROSTAG, the modeling of Cyprus Power System in EUROSTAG as well as the simulation results carried through in it.

Finally, the conclusions as well as a synopsis of the current Thesis are presented in chapter 9 titled “*General comments and conclusions*”.

In order to achieve better understanding and evaluation of the model that was developed in the current Thesis, the following appendixes were included:

Appendix 1 presents a description of the basic blocks in Model Editor.

Appendix 2 presents the model of the current Thesis, as it was created in EUROSTAG.

In appendixes 3 and 4 the results in a number of supplementary simulations are presented regarding different scenarios of wind speed variations and voltage drop.

KEY WORDS:

Variable speed wind turbine, doubly fed induction generator, pitch control, pitch controller with Gain Scheduling, converter, Low Voltage Ride Through, active crowbar, grid support capability, EUROSTAG, Model Editor.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	16
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	20
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
1.1 Κίνητρα	23
1.2 Σκοπός της εργασίας.....	24
2 ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	27
2.1 Σύστημα Μετάδοσης της Κίνησης	28
2.1.1 Μοντέλο δυο - μαζών.....	28
2.1.2 Μοντέλο μιας – μάζας.....	34
2.1.3 Προσομοίωση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή.....	35
2.2 Μοντέλο Αεροδυναμικού Συστήματος.....	36
2.2.1 Γενικές σχέσεις.....	36
2.2.2 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά πτερυγίων της Α/Γ που μοντελοποιήθηκε.....	38
2.2.3 Χαρακτηριστική ελέγχου του βήματος της έλικας.....	45
2.2.4 Αριθμητικά προσεγγιστικό μοντέλο του δρομέα της Α/Γ.....	47
2.3 Έλεγχος του Μηχανικού Συστήματος – Ελεγκτής Γωνίας Βήματος	50
2.3.1 Ποσοτική ανάλυση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της έλικας.....	50
2.3.2 Έλεγχος γωνίας βήματος	52
3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ – ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ	63
3.1 Εισαγωγή	63
3.2 Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.....	64
3.2.1 Αρχή λειτουργίας	64
3.2.2 Λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση.....	67
3.2.3 Δυναμικό μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	78
3.3 Έλεγχος Ηλεκτρικού Συστήματος Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης.....	86
3.3.1 Συνολικό σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	86
3.3.2 Μοντέλο μετατροπών ισχύος σε συνδεσμολογία back – to – back	89
3.3.3 Έλεγχος των μετατροπών.....	92
4 ΑΡΧΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	105
4.1 Εισαγωγή	105
4.2 Αρχικοποίηση του Μοντέλου.....	106

5 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ EUROSTAG – ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΤΟΝ MODEL EDITOR	117
5.1. Εισαγωγή	117
5.2. Λειτουργία και Εφαρμογές του EUROSTAG	117
5.3 Τεχνική Περιγραφή του EUROSTAG	118
5.4 Γραφικός Προ – επεξεργαστής Μοντέλων (Model Editor) του EUROSTAG	123
5.4.1 Εισαγωγή	123
5.4.2 Γενική περιγραφή του Model Editor του EUROSTAG	126
5.4.3 Υποπρογράμματα του προ – επεξεργαστή και ο ρόλος τους στη μεταγλώττιση.....	131
5.4.4 Περιγραφή βασικών στοιχειωδών μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν	132
6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ.....	135
6.1 Εισαγωγή	135
6.2 Απόκριση του συστήματος σε βηματικές αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου με ρυθμό μεταβολής 1m/s^2 οι οποίες λαμβάνουν χώρα κάθε 20s	136
6.2.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}	136
6.2.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling.....	140
6.2.3 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του μηχανικού συστήματος σε διαδοχικές βηματικές αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου.	144
6.3 Απόκριση του συστήματος σε αύξηση του ανέμου από την αρχική τιμή των 13m/s σε 15m/s	146
6.3.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}	147
6.3.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling.....	150
7 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΜΕ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ ΔΙΠΛΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΝΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ.....	155
7.1. Εισαγωγή	155
7.2 Δυναμική Συμπεριφορά Α/Γ με ΓΕΔΤ σε Διαταραχές του Δικτύου	158
7.2.1 Επίδραση της διαταραχής του δικτύου στο ηλεκτρικό σύστημα.....	159
7.2.2 Επίδραση της διαταραχής του δικτύου στο μηχανικό σύστημα.....	160
7.3 Παραμονή της Α/Γ σε Λειτουργία σε Συνθήκες Βύθισης Τάσεως (Low Voltage Ride – Through Capability).....	161
7.3.1 Σύστημα προστασίας.....	162
7.3.2 Ελεγκτής απόσβεσης των μηχανικών καταπονήσεων (Damping Controller)	167
7.4 Δυνατότητα της Α/Γ Στήριξης του Δικτύου κατά τη διάρκεια Διαταραχών	169

8 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΗΕ ΚΥΠΡΟΥ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	175
8.1. Εισαγωγή	175
8.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου στο EUROSTAG.....	175
8.3 Συνοπτική Παρουσίαση των Σεναρίων Προσομοίωσης	185
8.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο ΣΗΕ Κύπρου	189
8.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου Α (χαμηλή φόρτιση – υψηλή διείδυση).....	189
8.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου Β (υψηλή φόρτιση – υψηλή διείδυση).....	205
9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	217
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1.....	221
ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΒΑΣΙΚΩΝ ΜΠΛΟΚ ΣΤΟΝ MODEL EDITOR	221
P1.1 Μπλοκ μετρήσεων (Measurement Blocks)	221
P1.2 Μπλοκ αλγεβρικών πράξεων και συναρτήσεων (Algebraic Blocks).....	222
P1.3 Μπλοκ τριγωνομετρικών συναρτήσεων (Trigonometric Blocks)	225
P1.4 Μπλοκ συναρτήσεων (Function Blocks).....	225
P1.5 Μπλοκ λογικών πράξεων και συναρτήσεων (Logical Blocks).....	227
P1.6 Μπλοκ τα οποία χρησιμοποιούν το μετασχηματισμό Laplace (Laplace Blocks).....	231
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2.....	233
ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΤΟΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΤΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MODEL EDITOR ΤΟΥ EUROSTAG.....	233
P2.1 Μοντέλο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης	233
P2.2 Μοντέλο αεροδυναμικού συστήματος.....	237
P2.3 Μοντέλο του ελεγκτή γωνίας βήματος της έλικας.....	241
P2.4 Μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	245
P2.4.1 Μοντέλο 5 ^{ης} τάξης	245
P2.4.2 Μοντέλο 3 ^{ης} τάξης	255
P2.5 Μοντέλο συστήματος ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	257
P2.6 Μοντέλο συστήματος προστασίας της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	261
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3.....	263

ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ..... 263

Π3.1 Απόκριση του συστήματος σε ημιτονοειδή χρονοσειρά ανέμου με μέση τιμή 14m/s, συχνότητα 0.5rad/sec και πλάτος 0.5m/s 263

Π3.1.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref} 263

Π3.1.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling. 265

Π3.2 Απόκριση του συστήματος σε άνεμο η ταχύτητα του οποίου αποτελεί κανονική κατανομή Gauss, με μέση τιμή $\mu_{V_w} = 15m/s$ και τυπική απόκλιση $s_{V_w} = 2m/s$ 266

Π3.2.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref} 267

Π3.2.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling. 268

Π3.2.3 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του μηχανικού συστήματος σε άνεμο η ταχύτητα του οποίου αποτελεί κανονική κατανομή Gauss, με μέση τιμή $\mu_{V_w} = 15m/s$ και τυπική απόκλιση $s_{V_w} = 2m/s$ 270

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4..... 273

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΒΥΘΙΣΗΣ ΤΑΣΕΩΣ 273

Π4.1 Απόκριση του συστήματος σε μικρή βύθιση της τάσης 273

Π4.2 Απόκριση του συστήματος σε σημαντική βύθιση της τάσης-παραμετρική μελέτη..... 275

Π4.3 Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης και σε υψηλό άνεμο- παραμετρική μελέτη 283

Π4.4 Σύγκριση της απόκρισης του συστήματος σε βύθιση της τάσης σε χαμηλό και υψηλό άνεμο – παραμετρική μελέτη..... 284

Π4.5 Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης – σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου 5^{ης} και μοντέλου 3^{ης} τάξης 286

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 289

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Μοντέλο του μηχανικού συστήματος.....	27
Σχήμα 2.2 Μοντέλο δύο μαζών για το μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας [4].....	29
Σχήμα 2.3 Είσοδοι και έξοδοι μοντέλου μηχανικού συστήματος.....	33
Σχήμα 2.4 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p για διάφορες τιμές της γωνίας του βήματος της έλικας β	39
Σχήμα 2.5 Ταχύτητα N_{rot} του δρομέα της Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου V_w	42
Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έλεγχο της ανεμογεννήτριας.	42
Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών.	44
Σχήμα 2.8 Καμπύλη ελέγχου μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης.	45
Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική ελέγχου γωνίας βήματος.	47
Σχήμα 2.10 Αριθμητική προσέγγιση της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με έλεγχο γωνίας βήματος.	49
Σχήμα 2.11 Διακύμανση της γωνίας βήματος της έλικας πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου.	49
Σχήμα 2.12 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της έλικας – στοιχειώδεις δυνάμεις και ταχύτητες.	50
Σχήμα 2.13 Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος βασισμένη στη ταχύτητα του ανέμου.....	54
Σχήμα 2.14 Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}	55
Σχήμα 2.15 Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή (με $Gain$ Scheduling) με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}	56
Σχήμα 2.16 Συνάρτηση ευαισθησίας $dProt_{dB}$ ως προς τη γωνία βήματος β	57
Σχήμα 3.1 Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης....	64
Σχήμα 3.2 Διάγραμμα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	65
Σχήμα 3.3 Αρχή λειτουργίας της ΓΕΔΤ.	66
Σχήμα 3.4 Εύρος ταχύτητας στο διάγραμμα ροπής-ταχύτητας μιας ΓΕΔΤ.....	67
Σχήμα 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	67
Σχήμα 3.6 Ροή ισχύος στη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, όπως απεικονίζεται με χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής.....	71
Σχήμα 3.7 Ροή ισχύος σε σύστημα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης αμελώντας τις ωμικές απώλειες.....	76
Σχήμα 3.8 Σύγκριση των καμπυλών sPs και $-Pr$ [44].	77
Σχήμα 3.9 Μεγέθυνση των καμπυλών sPs και $-Pr$ στο σημείο λειτουργίας του συστήματος γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης [44].	77
Σχήμα 3.10 Σχηματική απεικόνιση του τρόπου επίλυσης των εξισώσεων.	83

Σχήμα 3.11 Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	87
Σχήμα 3.12 Μετατροπείς σε συνδεσμολογία back – to – back, εφοδιασμένοι με διακόπτες IGBT, στο κύκλωμα του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	90
Σχήμα 3.13 Μοντέλο και στρατηγική ελέγχου της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	93
Σχήμα 3.14 Πλαίσια αναφοράς τα οποία υιοθετούνται για τον έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.....	94
Σχήμα 3.16 Χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας.....	99
Σχήμα 5.1 Τρόπος λειτουργίας EUROSTAG.....	122
Σχήμα 7.1 Συνήθης μορφή καμπύλης περιορισμού LVRT.....	157
Σχήμα 7.2 Καμπύλη ορίων τάσης – Κανονισμοί Δανίας (συνεχής καμπύλη) και Ιρλανδίας (διακεκομμένη καμπύλη) [50].....	158
Σχήμα 7.3 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (Active Crowbar) για την προστασία των μετατροπέων ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου.....	163
Σχήμα 7.4 Ελεγκτής ταχύτητας για τον υπολογισμό του σήματος αναφοράς της ενεργού ισχύος σε κανονική λειτουργία και σε βύθιση τάσεως.....	168
Σχήμα 8.1 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών θερμοηλεκτρικού σταθμού με αναθέρμανση στο EUROSTAG.....	182
Σχήμα 8.2 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών θερμοηλεκτρικού σταθμού χωρίς αναθέρμανση στο EUROSTAG.....	182
Σχήμα 8.3 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών αεριοστροβίλου στο EUROSTAG.....	183
Σχήμα 8.4 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή τάσης στο EUROSTAG.....	184
Σχήμα 8.5 Ροή ισχύος στον ζυγό σύνδεσης του αιολικού πάρκου.....	188
Σχήμα Π1.1 Μπλοκ μέτρησης του μέτρου της τάσης.....	221
Σχήμα Π1.2 Μπλοκ μέτρησης της συχνότητας.....	221
Σχήμα Π1.3 Μπλοκ αθροιστή.....	222
Σχήμα Π1.4 Μπλοκ πολλαπλασιαστή και διαιρέτη.....	223
Σχήμα Π1.5 Μπλοκ κέρδους.....	223
Σχήμα Π1.6 Μπλοκ σταθεράς.....	223
Σχήμα Π1.7 Μπλοκ σημείου αναφοράς.....	224
Σχήμα Π1.8 Μπλοκ εκθετικής συνάρτησης.....	224
Σχήμα Π1.9 Μπλοκ τετραγωνικής ρίζας.....	224
Σχήμα Π1.10 Μπλοκ βασικών τριγωνομετρικών συναρτήσεων.....	225
Σχήμα Π1.11 Μπλοκ συνάρτησης καθορισμένης από το χρήστη.....	225
Σχήμα Π1.12 Μπλοκ περιοριστή.....	226
Σχήμα Π1.13 Μπλοκ «νεκρής» ζώνης.....	227

Σχήμα Π1.14 Μπλοκ λογικού H και λογικού KAI .	227
Σχήμα Π1.15 Μπλοκ λογικού H με συγκράτηση.	228
Σχήμα Π1.16 Μπλοκ διακόπτη τιμής κατωφλίου με περιορισμό ελάχιστου χρόνου κλεισίματος.	228
Σχήμα Π1.17 Μπλοκ παλμού χρονικής διάρκειας T .	229
Σχήμα Π1.18 Μπλοκ ηλεκτρονόμου.	230
Σχήμα Π1.19 Μπλοκ ηλεκτρονόμου με καθυστέρηση.	230
Σχήμα Π1.20 Μπλοκ διακόπτη με υστέρηση.	231
Σχήμα Π1.21 Μπλοκ ολοκληρωτή.	231
Σχήμα Π1.22 Μπλοκ ολοκληρωτή με περιοριστή.	232
Σχήμα Π2.1 Μπλοκ διάγραμμα για το μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.	234
Σχήμα Π2.2 Ροή σημάτων βασικών μεταβλητών (εισόδων, εξόδων και εσωτερικών μεταβλητών κατάστασης) του μοντέλου του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.	236
Σχήμα Π2.3 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 1ο.	238
Σχήμα Π2.4 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 2ο.	239
Σχήμα Π2.5 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 3ο.	240
Σχήμα Π2.6 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας θήματος 1ης στρατηγικής.	241
Σχήμα Π2.7 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας θήματος 2ης στρατηγικής.	243
Σχήμα Π2.8 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας θήματος 3ης στρατηγικής.	244
Σχήμα Π2.9 Μπλοκ διάγραμμα για το μετασχηματισμό της τερματικής τάση στο πλαίσιο SFO .	245
Σχήμα Π2.10 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη ψ_{qs} και ψ_{ds} .	246
Σχήμα Π2.11 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του δρομέα $\psi_{qr'}$ και $\psi_{dr'}$.	247
Σχήμα Π2.12 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό εντάσεων του στάτη i_{qs} και i_{ds} .	248
Σχήμα Π2.13 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό εντάσεων του δρομέα $i_{qr'}$ και $i_{dr'}$.	249
Σχήμα Π2.14 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής T_e - εξίσωση (3.75).	250
Σχήμα Π2.15 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής T_e - εξίσωση (3.76).	250
Σχήμα Π2.16 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό ταχύτητας περιστροφής του δρομέα Ω_{gen} .	251
Σχήμα Π2.17 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ενεργού P_s και άεργου Q_s ισχύος του στάτη.	252
Σχήμα Π2.18 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ενεργού P_r και άεργου Q_r ισχύος του δρομέα.	253
Σχήμα Π2.19 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης από τη γεννήτρια ενεργού και άεργου ισχύος.	254
Σχήμα Π2.20 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη ψ_{qs} και ψ_{ds} για το μοντέλο 3ης τάξης.	256
Σχήμα Π2.21 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή ενεργού ισχύος.	257

Σχήμα Π2.22 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος.	259
Σχήμα Π2.23 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή DC τάσης.	260
Σχήμα Π2.24 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης.	261
Σχήμα Π2.25 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της παρεχόμενης από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου άεργου ισχύος για όσο χρονικό διάστημα το Crowbar είναι συνδεδεμένο.	262

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Α/Γ.....	39
Πίνακας 3.1 Παράδειγμα ροής ισχύος, για διαφορετικές ολισθήσεις για ένα σύστημα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.	76
Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης που μοντελοποιήθηκε.	84
Πίνακας 4.1 Σημεία χαρακτηριστικών ελέγχου της ταχύτητας, ροπής και γωνίας θήματος της έλικας για των υπολογισμό των αρχικών τιμών των μεγεθών της ταχύτητας, της ροπής, της γωνίας θήματος, του αεροδυναμικού συντελεστή και της ταχύτητας του ανέμου.	111
Πίνακας 4.2 Τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής ίση με 13 m/s.....	113
Πίνακας 4.3 Τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος για ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής ίση με 7 m/s.....	115
Πίνακας 7.1 Κανονισμός χρόνος & τάση για Δανία και Ιρλανδία [50].	158
Πίνακας 8.1 Τιμές παραμέτρων a, b, c, d	177
Πίνακας 8.2 Παράμετροι μονάδων 1 - 3 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Βασιλικού.	177
Πίνακας 8.3 Παράμετροι μονάδας 4 (αεριοστρόβιλος) σταθμού Βασιλικού.	177
Πίνακας 8.4 Παράμετροι αεριοστρόβιλων συνδυασμένου κύκλου σταθμού Βασιλικού.	178
Πίνακας 8.5 Παράμετροι ατμοστρόβιλου συνδυασμένου κύκλου σταθμού Βασιλικού.	178
Πίνακας 8.6 Παράμετροι μονάδας 1(ατμοστρόβιλος) σταθμού Δεκέλειας.	178
Πίνακας 8.7 Παράμετροι μονάδας 2 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Δεκέλειας.	178
Πίνακας 8.8 Παράμετροι μονάδας 3 - 4 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Δεκέλειας.	178
Πίνακας 8.9 Παράμετροι μονάδων 5 - 6 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Δεκέλειας.	179
Πίνακας 8.10 Παράμετροι μονάδας 1 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	179
Πίνακας 8.11 Παράμετροι μονάδας 2 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	179
Πίνακας 8.12 Παράμετροι μονάδας 3 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	179
Πίνακας 8.13 Παράμετροι μονάδας 4 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	179
Πίνακας 8.14 Παράμετροι μονάδας 5 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	180
Πίνακας 8.15 Παράμετροι μονάδας 6 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.	180
Πίνακας 8.16 Παράμετροι μονάδων 7-10 (αεριοστρόβιλοι) σταθμού Μονής.	180
Πίνακας 8.17 Χαρακτηριστικά παραγωγής ισχύος των γεννητριών.	181
Πίνακας 8.18 Σενάρια προσομοίωσης.	185
Πίνακας 8.19 Κατανομή της παραγωγής ισχύος στις μονάδες της ΑΗΚ για καθένα από τα δύο σενάρια.	186
Πίνακας 8.20 Κατανομή της παραγωγής ισχύος στις ανεμογεννήτριες για καθένα από τα δύο σενάρια.	187

Πίνακας Π2.1 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος για το μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.	236
Πίνακας Π2.2 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος.	240
Πίνακας Π2.3 Παράμετροι $A_1, A_2, \dots, A_n$ και $B_1, B_2, \dots, B_n$ για το μπλοκ 1 – καμπύλη $\beta - V_w$	242
Πίνακας Π2.4 Πίνακας παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων των δύο ελεγκτών γωνίας βήματος (1ης και 2ης στρατηγικής).	243
Πίνακας Π2.5 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος ελεγκτή γωνίας βήματος 3ης στρατηγικής.	244
Πίνακας Π2.6 Τιμές των παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων του μοντέλου 5ης τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης	255
Πίνακας Π2.7 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή ενεργού ισχύος.	257
Πίνακας Π2.8 Παράμετροι $A_1, A_2, \dots, A_n$ και $B_1, B_2, \dots, B_n$ για το μπλοκ 1 – καμπύλη $w_r - P_{opt}$. .	258
Πίνακας Π2.9 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος.	259
Πίνακας Π2.9 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή DC τάσης.	260
Πίνακας Π2.10 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης.	262

1 Εισαγωγή

1.1 Κίνητρα

Η παραγωγή ενέργειας από συμβατικές πηγές δέχεται όλο ένα και περισσότερη κριτική. Η συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε εκπομπές CO_2 οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την θέρμανση του πλανήτη. Επίσης, από τη μια μεριά η ποσότητα των ορυκτών τα οποία χρησιμοποιούνται για την συμβατική παραγωγή ενέργειας είναι περιορισμένη, ενώ από τη άλλη μεριά μια συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση αναμένεται κυρίως από τις πιο πρόσφατα εκβιομηχανισμένες χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία. Εξαιτίας των παραπάνω, μια αυξανόμενη τάση προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λαμβάνει χώρα κυρίως στην Ευρώπη. Είναι γεγονός ότι η αιολική ενέργεια, μια από τις πιο δημοφιλείς ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, έχει επιτύχει ένα υψηλότερο ποσοστό από ότι η υδροηλεκτρική σε χώρες όπως η Γερμανία και η Δανία [60]. Στο μέλλον, μια αύξηση του αριθμού των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας αναμένεται να πραγματοποιηθεί. Επίσης η ισχύς των αιολικών πάρκων και κυρίως αυτών που βρίσκονται σε θαλάσσιο χώρο (offshore) αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς.

Η αιολική ενέργεια, όπως και οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σημαντικά με το χρόνο. Κατέχει επομένως, ένα διαφορετικό ρόλο στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Η αιολική ενέργεια δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την λειτουργία του συστήματος υπό τη προϋπόθεση ότι μόνο μονάδες μικρής ισχύος είναι εγκατεστημένες στο δίκτυο. Όμως, όταν η διείσδυση της αιολικής ενέργειας φτάσει σε υψηλά επίπεδα αντικαθιστώντας έτσι συμβατικές μονάδες παραγωγής, η επίδραση της στο σύστημα γίνεται σημαντική και πρέπει να περιοριστεί.

Η αυξανόμενη διείσδυση αιολικής ενέργειας οδηγεί σε νέες προκλήσεις για τους διαχειριστές του δικτύου, οι οποίοι πρέπει να διασφαλίζουν την αξιόπιστη και σταθερή λειτουργία του. Στις χώρες με μεγάλη διείσδυση αιολικής ενέργειας, όπως στη Δανία, στη Γερμανία και στην Ισπανία, οι διαχειριστές του δικτύου εισήγαγαν για αυτό το σκοπό μια σειρά από τεχνικούς κανονισμούς (Grid Codes) [58], [59]. Αυτοί οι κανονισμοί περιλαμβάνουν τις τεχνικές απαιτήσεις που μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας πρέπει να ικανοποιεί για να είναι σε θέση να συνδεθεί στο δίκτυο. Οι

ανεμογεννήτριες πρέπει να μπορούν να λειτουργούν ως ενεργά στοιχεία του δικτύου, δηλαδή οφείλουν να είναι σε θέση να αναλάβουν εργασίες ελέγχου οι οποίες παραδοσιακά αναλαμβάνονται από τα συμβατικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, οι τεχνικοί αυτοί κανονισμοί περιλαμβάνουν την απαίτηση η ανεμογεννήτρια να δύναται να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως. Επιπρόσθετα, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες πρέπει να είναι σε θέση να στηρίζουν το δίκτυο παρέχοντας βοηθητικές υπηρεσίες. Αυτές περιλαμβάνουν κατά πρώτο λόγο την παροχή άεργου ισχύος για την υποστήριξη του επιπέδου της τάσης και κατά δεύτερο την προσαρμογή της ενεργού ισχύος για τη διατήρηση της συχνότητας λειτουργίας του συστήματος.

Εξαιτίας όλων των παραπάνω, η παρουσία ενός κατάλληλου εξοπλισμού ελέγχου της τάσης και της ισχύος είναι απαραίτητη. Κατάλληλες στρατηγικές ελέγχου οι οποίες θα δώσουν τη δυνατότητα στις ανεμογεννήτριες να ικανοποιήσουν τους τεχνικούς κανονισμούς σύνδεσης, πρέπει να αναπτυχθούν.

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση, τον έλεγχο και την επίδραση στο δίκτυο της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Εξαιτίας των αυξανόμενων απαιτήσεων σύνδεσης, η τάση των σύγχρονων ανεμογεννητριών τείνει προς ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με διασύνδεση μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Η παρουσία των μετατροπέων ισχύος αυξάνει τις δυνατότητες ελέγχου και επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες να στηρίζουν με ενεργό τρόπο το δίκτυο.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπό της παρούσας εργασίας με τίτλο: «*Μοντελοποίηση Ανεμογεννήτριας Μεταβλητής Ταχύτητας με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης*» αποτελεί η ανάπτυξη μιας σύγχρονης στρατηγικής ελέγχου για την ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας εφοδιασμένη με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, η οποία θα βελτιστοποιήσει την επίδραση της στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Μοντελοποίηση

Για την ανάλυση της επίδρασης της ανεμογεννήτριας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, απαραίτητη κρίνεται η χρησιμοποίηση δυναμικών μοντέλων προσομοίωσης τόσο της ανεμογεννήτριας όσο και του ίδιου του δικτύου. Τα μοντέλα πρέπει να αντιπροσωπεύουν με μεγάλη ακρίβεια την δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας με σκοπό τη σωστή πρόβλεψη κρίσιμων συνθηκών του δικτύου αλλά και τη βελτίωση της δυναμικής τους απόκρισης. Επομένως, αυτό το μοντέλο της ανεμογεννήτριας πρέπει να αναπτυχθεί και να εφαρμοσθεί με τη χρήση ενός λογισμικού ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα λογισμικά πακέτα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τη βάση για την διεξαγωγή προσομοιώσεων των συστημάτων αυτών και επιτρέπουν τόσο την εκτέλεση ροής φορτίου όσο και τον υπολογισμό της δυναμική συμπεριφοράς του. Στοιχεία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας όπως, ζυγοί, γραμμές μεταφοράς, μετασχηματιστές ή συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας αποτελούν γενικά ενσωματωμένα μοντέλα τα οποία προϋπάρχουν σε ένα τέτοιο λογισμικό. Αντίθετα, μονάδες παραγωγής οι οποίες χρησιμοποιούν ανανεώσιμες μορφές ενέργειας συνήθως δεν προϋπάρχουν σε αυτό. Μία εμβάθυνση της παρούσας εργασίας, αποτελεί επομένως η ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, το οποίο μπορεί να συμπεριληφθεί στο λογισμικό με σκοπό τη βελτίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς. Το πακέτο λογισμικού που επιλέχθηκε στη παρούσα εργασία είναι το EUROSTAG, ένα προϊόν που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Electricite de France & Tractebel.

Η ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με έλεγχο της γωνίας βήματος της έλικας (Pitch Controlled Variable Speed Wind Turbine) και διασύνδεση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος αποτελεί χωρίς αμφιβολία μίας από τις κυρίαρχες διαμορφώσεις ανάμεσα στα σύγχρονα συστήματα ανεμογεννητριών. Μια τέτοια διαμόρφωση προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στην ανεμογεννήτρια να παρέχει βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, σκοπός της εργασίας αποτελεί η μοντελοποίηση της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Η μοντελοποίηση αυτή πραγματοποιείται με μια διακριτή δομή, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι κάθε ένα από τα μέρη του συστήματος μοντελοποιείται ξεχωριστά.

Έλεγχος

Στη παρούσα εργασία, το σύστημα ελέγχου που υλοποιήθηκε διαιρείται σε δύο μέρη: (i) μια βασική στρατηγική ελέγχου για κανονική χωρίς διαταραχές λειτουργία και (ii) μια στρατηγική ελέγχου για βελτίωση της δυναμικής απόκρισης του συστήματος κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου.

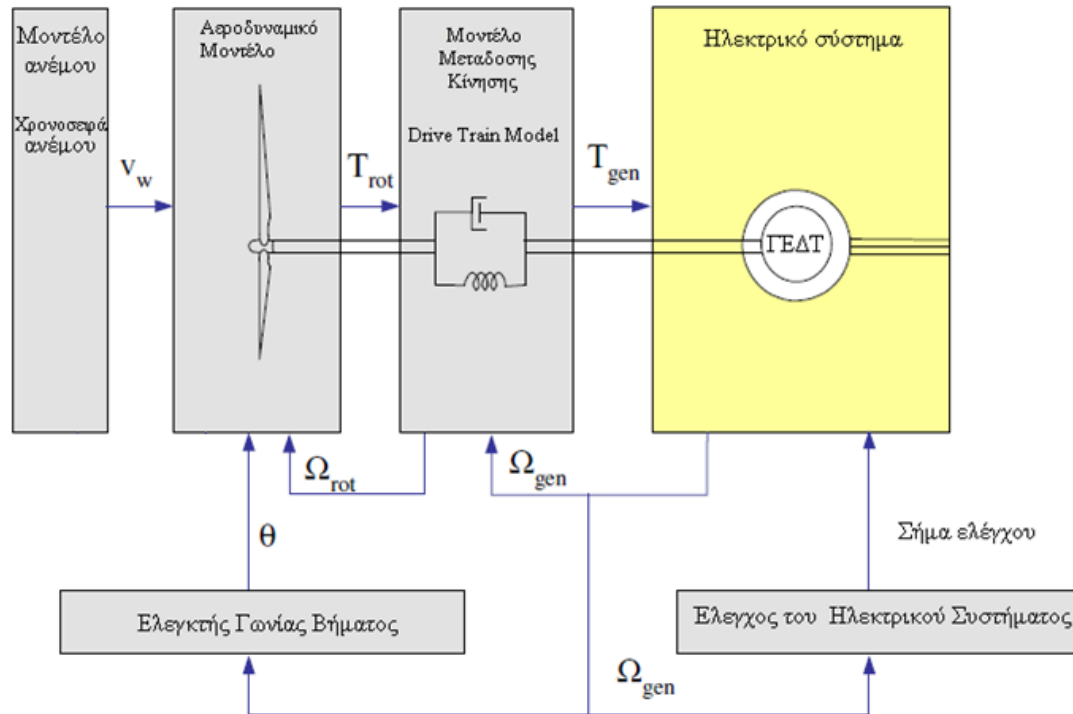
Η βασική στρατηγική ελέγχου σχεδιάζεται με σκοπό να επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης. Ο έλεγχος αλληλεπιδρά με την λειτουργία των μετατροπέων ισχύος και τον ελεγκτή γωνίας βήματος. Η εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου επαληθεύεται βάση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Η βασική στρατηγική ελέγχου διευρύνεται στη συνέχεια με μια επιπλέον επιμέρους στρατηγική ελέγχου για τη διευκόλυνση της παραμονής της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία και τη στήριξη του δικτύου κατά τη διάρκεια διαταραχών. Η παραμονή της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσεως επιτυγχάνεται με το σύστημα προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Επιπρόσθετα, το έργο της ανεμογεννήτριας να στηρίζει ενεργά το δίκτυο πραγματοποιείται με την εφαρμογή επιπλέον στρατηγικών ελέγχου οι οποίες αλληλεπιδρούν με την βασική στρατηγική η οποία εφαρμόζεται σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Επίδραση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι τεχνικοί κανονισμοί σύνδεσης στο δίκτυο είναι γενικά πιο λεπτομερείς και πιο αυστηροί για τις υψηλές ή υπερύψηλες τάσης. Επίσης, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων ολοένα και μεγαλύτερης ισχύος θα οδηγήσει σε σύνδεση τους στο δίκτυο υψηλής τάσης. Καθώς τα αιολικά πάρκα είναι συνήθως συνδεδεμένα στο δίκτυο σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου το δίκτυο είναι ασθενέστερο, η επίδραση τους στο συνολικό δίκτυο είναι ιδιαίτερα σημαντική. Σημαντική είναι επομένως η ανάλυση αυτής της επίδρασης και η διερεύνηση της δυνατότητας των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών ή ακόμη και να είναι σε θέση να υποστηρίξουν το δίκτυο και τα επίπεδα τάσης συμμετέχοντας στη παραγωγή έργου ισχύος.

2 Μηχανικό σύστημα και έλεγχος ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας



Σχήμα 2.1 Μοντέλο του μηχανικού συστήματος.

V_w ταχύτητα του ανέμου	θ γωνία βήματος έλικας
T_{rot} αεροδυναμική ροπή	Ω_{rot} μηχανική ταχύτητα του δρομέα
T_{gen} ροπή γεννήτριας	Ω_{gen} μηχανική ταχύτητα της γεννήτριας

Ο βασικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση του συστήματος ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και η εξέταση της αλληλεπίδρασης του μοντέλου με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο. Για το σκοπό αυτό, αναγκαία κρίθηκε η χρησιμοποίηση ρεαλιστικών μοντέλων τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μηχανικό μέρος του προς μοντελοποίηση συστήματος. Το μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τα μοντέλα για τον άνεμο, τον αεροδυναμικό δρομέα (αεροδυναμικό μοντέλο), τον μηχανισμό του ελεγκτή γωνίας βήματος καθώς επίσης και για το σύστημα μετάδοσης της κίνησης (μοντέλο του άξονα, Drive Train Model). Το φαινόμενο σκίασης λόγω του πύργου αγνοήθηκε γιατί έχει αποδειχτεί ότι η

επίδραση του δεν είναι σημαντική σε μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος. Στοιχεία όπως μηχανικά φρένα δεν λήφθηκαν υπόψη, καθώς η επίδραση τους δεν σχετίζεται με τις εδώ καθορισμένες καταστάσεις λειτουργίας. Επίσης, ένας έλεγχος του μηχανικού συστήματος, δηλαδή ο ελεγκτής γωνίας βήματος της έλικας, πρέπει να σχεδιαστεί και να συντονιστεί με τον έλεγχο ο οποίος θα εφαρμοστεί στο ηλεκτρικό μέρος του συστήματος. Παρακάτω, το μοντέλο για το μηχανικό σύστημα και μια στρατηγική ελέγχου για το μηχανισμό του ελεγκτή της γωνίας βήματος θα παρουσιαστούν. Μια γενική εικόνα για το μοντέλο αυτό φαίνεται στο σχήμα (2.1).

2.1 Σύστημα Μετάδοσης της Κίνησης

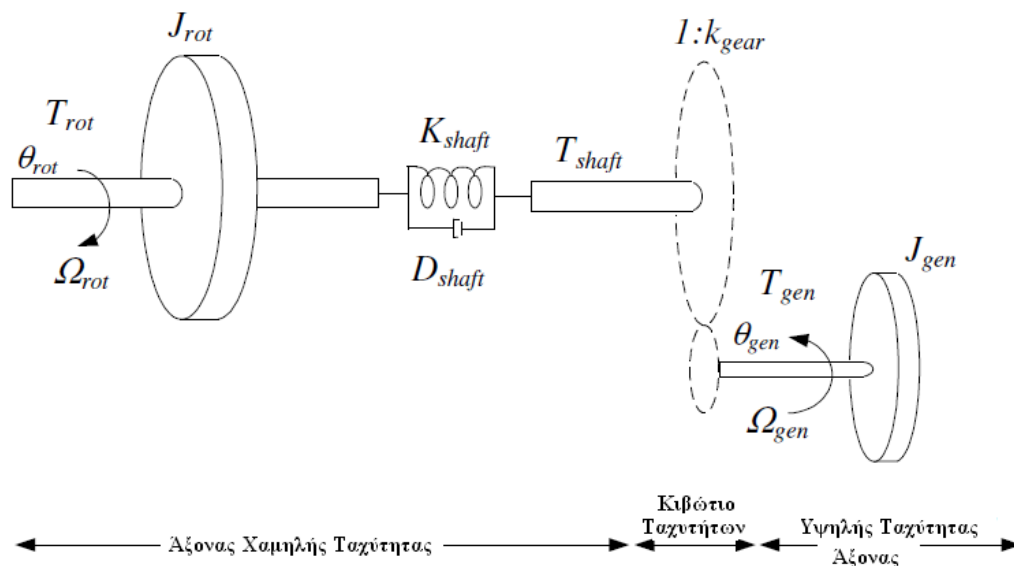
2.1.1 Μοντέλο δυο - μαζών

Σε μελέτες δυναμικής ευστάθειας, στις οποίες η απόκριση ενός συστήματος κατά τη διάρκεια ισχυρών διαταραχών αναλύεται, το μοντέλο του μηχανικού συστήματος πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα μοντέλο δύο μαζών, ενός ταλαντωτή και ενός αποσβεστήρα [1]. Αυτό οδηγεί σε μια πιο ακριβή απόκριση της δυναμικής συμπεριφοράς μια ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια κυμαινόμενων συνθηκών ανέμου ή σφαλμάτων σε διάφορα σημεία ενός ηλεκτρικού συστήματος το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο έγκυρη πρόβλεψη του βαθμού στο οποίο αυτά επηρεάζουν το σύστημα στο σύνολο του.

Το μηχανικό μοντέλο το οποίο υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι επομένως ένα μοντέλο δύο μαζών συνδεδεμένων μέσω ενός εύκαμπτου άξονα, το μοντέλο του οποίου περιλαμβάνει την ακαμψία του άξονα K_{shaft} καθώς επίσης και ένα συντελεστή απόσβεσης D_{shaft} , όπως περιγράφονται στα [2], [3]. Ο εύκαμπτος αυτός άξονας είναι θεωρητικά ισοδύναμος με ένα ταλαντωτή στρέψης συνδεδεμένου μεταξύ δύο μαζών: η μία μάζα αντιπροσωπεύει την αδράνεια του άξονα της ανεμογεννήτριας J_{rot} , ενώ η άλλη είναι ισοδύναμη με την αδράνεια του άξονα της γεννήτριας του ηλεκτρικού μέρους του συστήματος J_{gen} . Στην περίπτωση ανεμογεννήτριας με διάταξη ασύγχρονης γεννήτριας διπλής τροφοδότησης ένα ιδανικό κιβώτιο ταχυτήτων με λόγο 1: K_{gear} περιλαμβάνεται επίσης. Η ακαμψία του άξονα καθώς επίσης και ο αποσβεστήρας που περιλαμβάνεται στο μοντέλο

μοντελοποιούνται στον άξονα χαμηλής ταχύτητας, ενώ ο άξονας υψηλής ταχύτητας χαρακτηρίζεται από άπειρη ακαμψία. Το σχήμα (2.2) απεικονίζει το μοντέλο δύο μαζών, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση της μηχανικής δομής της ανεμογεννήτριας.

Στην περίπτωση ανεμογεννήτριας με διαμόρφωση η οποία περιλαμβάνει πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια, το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να εξαλειφθεί ($K_{gear} = 1$). Ακόμη και τότε όμως, το ίδιο μοντέλο του σχήματος (2.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με λόγο ταχυτήτων ίσο με 1:1. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ροπή του εύκαμπτου άξονα T_{shaft} να είναι ίση με την ροπή στον άξονα της σύγχρονης μηχανής. Επομένως, στην μόνιμη κατάσταση, η ηλεκτρική γεννήτρια περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται και ο αεροδυναμικός άξονας.



Σχήμα 2.2 Μοντέλο δύο μαζών για το μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας [4].

J_{rot}	αδράνεια αεροδυναμικού δρομέα
T_{rot}	ροπή δρομέα ανεμογεννήτριας
Ω_{rot}	ταχύτητα άξονα χαμηλής ταχύτητας
θ_{rot}	γωνιακή θέση άξονα χαμηλής ταχύτητας
K_{shaft}	ακαμψία άξονα
D_{shaft}	συντελεστής απόσβεσης του άξονα
T_{shaft}	ροπή άξονα

$1:K_{gear}$	λόγος κιβωτίου ταχυτήτων
J_{gen}	αδράνεια ηλεκτρικής γεννήτριας
T_{gen}	ροπή άξονα γεννήτριας
Ω_{gen}	ταχύτητα ηλεκτρικής γεννήτριας – άξονα υψηλής ταχύτητας
θ_{gen}	γωνιακή θέση άξονα υψηλής ταχύτητας

Στο μοντέλο του μηχανικού συστήματος το οποίο υλοποιήθηκε, έμφαση δόθηκε σε αυτά τα σημεία της δυναμικής δομής μια ανεμογεννήτριας, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση της με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, ένα μοντέλο δύο μαζών συμπεριλαμβανομένου ενός εύκαμπτου άξονα, ενός ταλαντωτή και ενός αποσβεστήρα είναι ικανοποιητικό, καθώς αυτά είναι τα κύρια μέρη της ανεμογεννήτριας τα οποία επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα της ισχύος εξόδου του συστήματος. Τα υπόλοιπα μέρη της δομής μιας ανεμογεννήτριας, όπως για παράδειγμα το φαινόμενο της σκίασης του πύργου δεν λαμβάνονται υπόψη.

Πριν την καταγραφή των εξισώσεων οι οποίες διέπουν το μοντέλο, μια μετατροπή όλων των μεγεθών που αφορούν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας είναι απαραίτητη. Για αυτό το σκοπό, δηλαδή για την αναφορά όλων των μεγεθών ως προς τον άξονα υψηλής ταχύτητας, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι μετασχηματισμοί:

$$J'_{rot} = \frac{J_{rot}}{K^2_{gear}} \quad (2.1)$$

$$D'_{shaft} = \frac{D_{shaft}}{K^2_{gear}} \quad (2.2)$$

$$K'_{shaft} = \frac{K_{shaft}}{K^2_{gear}} \quad (2.3)$$

$$\Omega'_{rot} = K_{gear} \times \Omega_{rot} \quad (2.4)$$

$$\theta'_{rot} = K_{gear} \times \theta_{rot} \quad (2.5)$$

$$T'_{rot} = \frac{T_{rot}}{K_{gear}} \quad (2.6)$$

Το μηχανικό μοντέλο μπορεί στη συνέχεια να περιγραφεί με το παρακάτω σύστημα διαφορικών εξισώσεων – εξισώσεις κίνησης (2.7) – (2.10).

$$T'_{rot} = J'_{rot} \times \frac{d\Omega_{rot}}{dt} + D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) + K'_{shaft} \times (\Theta'_{rot} - \Theta_{gen}) \quad (2.7)$$

$$-T_{gen} = J_{gen} \times \frac{d\Omega_{gen}}{dt} - D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) - K'_{shaft} \times (\Theta'_{rot} - \Theta_{gen}) \quad (2.8)$$

$$\frac{d\Theta'_{rot}}{dt} = \Omega'_{rot} \quad (2.9)$$

$$\frac{d\Theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen} \quad (2.10)$$

Το παραπάνω μοντέλο δύο μαζών έχει ως εισόδους την αεροδυναμική ροπή T_{rot} και την ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας Ω_{gen} . Με το σύστημα των τεσσάρων παραπάνω διαφορικών εξισώσεων (2.7) – (2.10) οι τέσσερις άγνωστοι, δηλαδή η ταχύτητα του δρομέα της ανεμογεννήτριας Ω_{rot} , η ροπή της ασύγχρονης γεννήτριας T_{gen} καθώς επίσης και οι γωνιακές θέσεις των δύο αξόνων υψηλής και χαμηλής ταχύτητας Θ_{gen} και Θ_{rot} αντίστοιχα, μπορούν να υπολογιστούν. Προαιρετικά επίσης, η ροπή στον άξονα μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την παρακάτω σχέση:

$$-T'_{shaft} = D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) + K'_{shaft} \times (\Theta'_{rot} - \Theta_{gen}) \quad (2.11)$$

Η ακαμψία του άξονα K_{shaft} είναι ισοδύναμη με την αλληλεπίδραση των δύο αξόνων υψηλής και χαμηλής ταχύτητας οι οποίοι με την σειρά τους χαρακτηρίζονται από τις ακαμψίες K_{gen} και K_{rot} αντίστοιχα [3]:

$$\frac{1}{K'_{shaft}} = \frac{1}{\frac{K_{rot}}{K^2_{gear}}} + \frac{1}{K_{gen}} \quad (2.12)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης D_{shaft} μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της ακαμψίας K_{shaft} , της συνολική αδράνεια του συστήματος J_{eq} καθώς επίσης και της αναλογίας απόσβεσης ξ [2]:

$$D_{shaft} = 2 \times \xi \times \sqrt{K_{shaft} \times J_{eq}} \quad (2.13)$$

όπου

$$J_{eq} = J_{rot} + K^2_{gear} \times J_{gen} \quad (2.14)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη στις εξισώσεις (2.13) και (2.14) έχουν ως αναφορά τον άξονα χαμηλής ταχύτητας ενώ αντίθετα στο σύστημα διαφορικών εξισώσεων (2.7) – (2.10) όλα τα μεγέθη αντικαθιστούνται με τα ισοδύναμα τους ως προς τον άξονα υψηλής ταχύτητας. Για τη μετατροπή αυτή, απαραίτητοι είναι οι μετασχηματισμοί (2.1) έως (2.6) στους οποίους τα τονούμενα μεγέθη είναι αυτά που έχουν ως αναφορά τον άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας, δηλαδή τον άξονα υψηλής ταχύτητας.

Η αναλογία απόσβεσης ξ μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση δ_s η οποία μειώνεται λογαριθμικά και δίνεται από το τύπο:

$$\xi = \frac{\delta_s}{\sqrt{\delta_s^2 + 4\pi^2}} \quad (2.15)$$

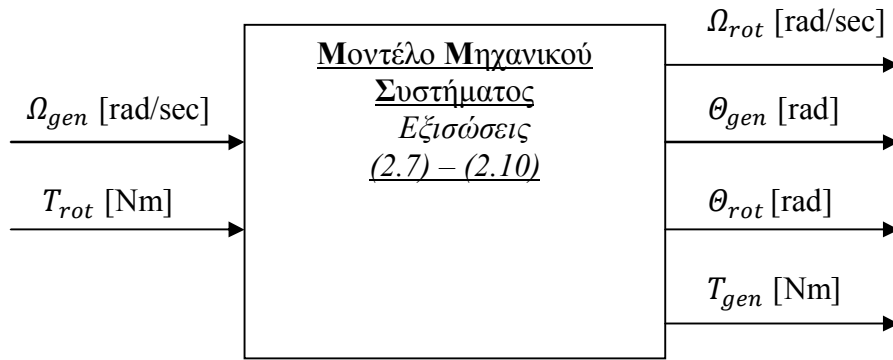
Η συνάρτηση δ_s είναι ο λογάριθμος της αναλογίας μεταξύ του πλάτους του σήματος στην αρχή της περιόδου και του πλάτους της επόμενης περιόδου της ταλάντωσης:

$$\delta_s = \ln\left(\frac{a(t)}{a(t+t_p)}\right) \quad (2.16)$$

όπου το a είναι το πλάτος του σήματος.

Το σχήμα (2.3) απεικονίζει τις εισόδους και εξόδους του μοντέλου του μηχανικού συστήματος το οποίο και υλοποιήθηκε. Σημαντικό ρόλο για τη σωστή λειτουργία του μοντέλου παίζει η αρχικοποίηση του. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αεροδυναμική ροπή πρέπει να αρχικοποιηθεί ακολουθώντας αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που η ροή της προσομοίωσης ακολουθεί. Επομένως, η αεροδυναμική ροπή αρχικοποιείται με κατεύθυνση από το ηλεκτρικό δίκτυο προς τον άνεμο και όχι αντίστροφα. Αντίθετα, οι εσωτερικές μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου θ_{rot} και Ω_{rot} αρχικοποιούνται στην κατεύθυνση που ακολουθεί και η προσομοίωση.

Στις παραπάνω εξισώσεις τα μεγέθη δεν είναι σε ανά μονάδα. Παρόλα αυτά εξαιτίας του γεγονότος ότι τα δεδομένα τα οποία προέρχονται από την εκτέλεση της ροής φορτίου όπως επίσης και η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας Ω_{gen} είναι εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα, θα πρέπει κατά την αρχικοποίηση αλλά και κατά την προσομοίωση να γίνουν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί.



Σχήμα 2.3 Είσοδοι και έξοδοι μοντέλου μηχανικού συστήματος.

Η βασική μηχανική ταχύτητα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας είναι:

$$\omega_{mb-LOW} = \omega_s \times \frac{2}{P} \times \frac{1}{K_{gear}} \quad (2.17)$$

όπου

$\omega_s = 2 \times \pi \times f_s = 2 \times \pi \times f_e$ η σύγχρονη ταχύτητα και P ο αριθμός των πόλων της ασύγχρονης γεννήτριας.

Ομοίως, η βασική ταχύτητα στον άξονα υψηλής ταχύτητας της ηλεκτρικής γεννήτριας είναι:

$$\omega_{mb-HIGH} = \omega_s \times \frac{2}{P} \quad (2.18)$$

Δηλαδή ισχύει:

$$\omega_{mb-HIGH} = K_{gear} \times \omega_{mb-LOW} \quad (2.19)$$

Επίσης, εργαζόμενοι με τον ίδιο τρόπο, η βασική ροπή στους δύο άξονες δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$T_{b-LOW} = \frac{S_b}{\omega_{mb-LOW}} \quad (2.20)$$

και

$$T_{b-HIGH} = \frac{S_b}{\omega_{mb-HIGH}} \quad (2.21)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.19) φτάνουμε στο εξής συμπέρασμα:

$$T_{b-HIGH} = \frac{T_{b-LOW}}{K_{gear}} \quad (2.22)$$

2.1.2 Μοντέλο μιας – μάζας

Όταν η ακαμψία καθώς επίσης και ο συντελεστής απόσβεσης αγνοηθούν προκύπτει για το μηχανικό σύστημα το απλοποιημένο μοντέλο μιας μάζας. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$T_{gen} - T'_{rot} = J'_{eq} \times \frac{d\Omega_{gen}}{dt} \quad (2.23)$$

όπου J'_{eq} η ισοδύναμη αδράνεια του συστήματος εκφρασμένη ως προς τον άξονα υψηλής ταχύτητας και η οποία δίνεται από το τύπο:

$$J'_{eq} = J'_{rot} + J_{gen} = \frac{J_{rot}}{K^2_{gear}} + J_{gen} \quad (2.24)$$

Η εκφρασμένη στον άξονα υψηλής ταχύτητας ροπή του αεροδυναμικού δρομέα T'_{rot} δίνεται μέσω των μετασχηματισμών (2.1) – (2.6) και είναι ίση με:

$$T'_{rot} = \frac{T_{rot}}{K_{gear}} \quad (2.25)$$

Τέλος, να αναφέρουμε εδώ ότι εξίσωση (2.23) η οποία και διέπει το μοντέλο είναι εκφρασμένη σε φυσικές μονάδες. Ότι είχε αναφερθεί για τις τιμές βάσης της ταχύτητας και της ροπής όσον αφορά το μοντέλο δύο μαζών ισχύουν και εδώ χωρίς καμιά εξαίρεση. Επομένως, τα απαραίτητα βασικά μεγέθη δίνονται και εδώ από τις σχέσεις (2.17) έως (2.22).

2.1.3 Προσομοίωση του συστήματος μετάδοσης της κίνησης με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή

Για την επίλυση από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή των εξισώσεων και την προσομοίωση της συμπεριφοράς του μηχανικού συστήματος, είναι ανάγκη να γραφούν οι εξισώσεις στο χώρο κατάστασης, δηλαδή υπό τη γενική μορφή

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (2.26)$$

όπου x το διάνυσμα κατάστασης, u το διάνυσμα των εισόδων της μηχανής και t ο χρόνος.

Το μοντέλο δύο μαζών το οποίο αναπτύχθηκε αναλυτικά στην παράγραφο (2.1.1) περιγράφεται ουσιαστικά με το σύστημα διαφορικών εξισώσεων – εξισώσεις κίνησης (2.7) – (2.10). Με βάση τα όσα αναφέραμε παραπάνω, οι εξισώσεις αυτές παίρνουν την παρακάτω μορφή για την επίλυση τους μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή:

$$J'_{rot} \times \frac{d\Omega'_{rot}}{dt} = T'_{rot} - D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) - K'_{shaft} \times (\theta'_{rot} - \theta_{gen}) \quad (2.27)$$

$$J_{gen} \times \frac{d\Omega_{gen}}{dt} = -T_{gen} + D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) + K'_{shaft} \times (\theta'_{rot} - \theta_{gen}) \quad (2.28)$$

$$\frac{d\theta'_{rot}}{dt} = \Omega'_{rot} \quad (2.29)$$

$$\frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen} \quad (2.30)$$

Με την ανωτέρω επεξεργασία οι εξισώσεις κίνησης που διέπουν τη μετάδοση της μηχανικής κίνησης έχουν έλθει στο χώρο κατάστασης. Παρατηρώντας τις παραπάνω εξισώσεις φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για ένα σύστημα 4^{ης} τάξης. Ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται η ταχύτητα του αεροδυναμικού δρομέα εκφρασμένη στον άξονα υψηλής ταχύτητας Ω'_{rot} , η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ηλεκτρικής γεννήτριας Ω_{gen} , η γωνιακή μετατόπιση του αεροδυναμικού άξονα εκφρασμένη στον άξονα υψηλής ταχύτητας θ'_{rot} και η γωνιακή μετατόπιση του άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας θ_{gen} .

Λαμβάνοντας υπόψη και την σχέση (2.11) η οποία δίνει τη ροπή στον άξονα T'_{shaft} οι εξισώσεις (2.27) – (2.30) γράφονται στη παρακάτω τελική τους μορφή:

$$J'_{rot} \times \frac{d\Omega'_{rot}}{dt} = T'_{rot} + T'_{shaft} \quad (2.31)$$

$$J_{gen} \times \frac{d\Omega_{gen}}{dt} = -T_{gen} - T'_{shaft} \quad (2.32)$$

$$\frac{d\theta'_{rot}}{dt} = \Omega'_{rot} \quad (2.33)$$

$$\frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen} \quad (2.34)$$

όπου

$$-T'_{shaft} = D'_{shaft} \times (\Omega'_{rot} - \Omega_{gen}) + K'_{shaft} \times (\theta'_{rot} - \theta_{gen}) \quad (2.35)$$

Στη περίπτωση του μοντέλου μιας - μάζας τα πράγματα είναι πιο απλά. Η εξίσωση που περιγράφει το μοντέλο αυτό, είναι ήδη σε κατάλληλη μορφή για την επίλυση της με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή και επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία:

$$J'_{eq} \times \frac{d\Omega_{gen}}{dt} = T_{gen} - T'_{rot} \quad (2.36)$$

2.2 Μοντέλο Αεροδυναμικού Συστήματος

2.2.1 Γενικές σχέσεις

Ο δρομέας της Α/Γ, περιλαμβάνοντας τα πτερύγια και το μηχανισμό αλλαγής της γωνίας βήματος τους, καθορίζει με σαφή τρόπο την επίδοση του όλου συστήματος. Καθώς το μέγεθος της Α/Γ αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, ο σχεδιασμός του δρομέα έχει καταστεί ιδιαίτερα πολύπλοκος. Στην παρούσα εργασία ο άνεμος αποτελεί μία χρονοσειρά, η οποία μπορεί να είναι είτε μια σειρά πραγματικών μετρήσεων σε συγκεκριμένο ύψος, είτε μία τεχνητή αναπαραγωγή. Για κάθε χρονική στιγμή t διαβάζεται η τιμή του ανέμου V_w και αυτή εισέρχεται στο μοντέλο του αεροδυναμικού μέρους. Η μετατροπή της αεροδυναμικής ισχύος του προσπίπτοντος ανέμου σε μηχανική από το δρομέα της Α/Γ, πραγματοποιείται μέσω της παρακάτω στατικής σχέσης:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.37)$$

όπου:

P_{rot}	Μηχανική ισχύς του δρομέα $[W]$
ρ	Πυκνότητα του αέρα $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
V_w	Ταχύτητα ανέμου $\left[\frac{m}{s}\right]$
$C_p(\lambda, \beta)$	Αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος του δρομέα
$A = \pi R^2$	Επιφάνεια δίσκου του δρομέα ακτίνας R $[m^2]$

Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p εξαρτάται από δύο παράγοντες, δηλαδή είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (2.38)$$

Ο παράγοντας β που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του αεροδυναμικού συντελεστή είναι η τιμή της γωνίας του βήματος της έλικας των πτερυγίων, και λ είναι ο λόγος της ταχύτητας του ακροπτερυγίου (tip speed ratio) προς την ταχύτητα του ανέμου και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{R\Omega_{rot}}{V_w} \quad (2.39)$$

όπου Ω_{rot} είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της έλικας (rad/sec).

Η εξίσωση (2.37) ισχύει όταν η ροή του ανέμου είναι σταθερή, κατάσταση η οποία δεν υφίσταται στην πράξη. Οι απότομες μεταβολές του ανέμου είναι δυνατό να παράσχουν ισχύ κατά πολύ μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη θεωρητικά υπολογιζόμενη, εξαιτίας των αεροδυναμικών φαινομένων. Πιο συγκεκριμένα, η στατική αυτή σχέση δεν εκφράζει την εμφάνιση των ανώτερων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή που οφείλονται στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (wind shear) και το φαινόμενο σκίασης του πύργου (tower shadow) [10, 11]. Οι ταλαντώσεις αυτές της αεροδυναμικής ροπής είναι θεμελιώδους συχνότητας $n \times f_r$, όπου n ο αριθμός των πτερυγίων (συνήθως είναι τρία) και f_r η συχνότητα περιστροφής του δρομέα. Τα φαινόμενα αυτά, ωστόσο, δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας μελέτης, στην οποία έχει χρησιμοποιηθεί ένα απλουστευμένο αεροδυναμικό μοντέλο από τη στιγμή που το ενδιαφέρον μας εστιάζεται πρωτίστως

στην ηλεκτρική συμπεριφορά της Α/Γ. Επομένως, η σχέση (2.37) υιοθετείται στη συνέχεια.

Η μηχανική αεροδυναμική ροπή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\Omega_{rot}} = \frac{1}{2} \rho A R V_w^2 C_q \quad (2.40)$$

όπου

$$C_q = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (2.41)$$

Θεωρείται επίσης ότι η ανεμογεννήτρια σταματάει την λειτουργία της σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες από $V_{wcut-in} = 3.5 \left[\frac{m}{s} \right]$ και αντίστοιχα σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από $V_{wcut-out} = 25 \left[\frac{m}{s} \right]$. Η έξοδος του αεροδυναμικού μοντέλου είναι η αεροδυναμική ροπή T_{rot} η οποία με τη σειρά της αποτελεί είσοδο στο μοντέλο του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας.

2.2.2 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά πτερυγίων της Α/Γ που μοντελοποιήθηκε

Για την εύρεση της τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή C_p υπάρχουν διάφορες αριθμητικές προσεγγίσεις, αλλά στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί μία προσεγγιστική συνάρτηση του λόγου λ και της γωνίας βήματος πτερυγίων β , που περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.42)$$

όπου:

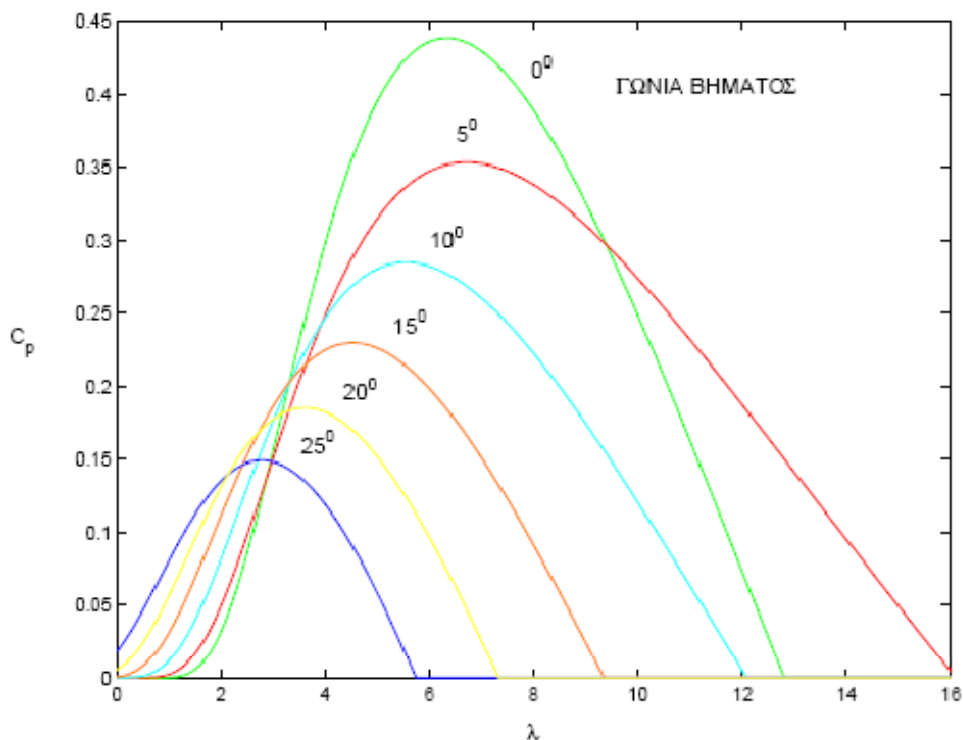
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.43)$$

Η Α/Γ που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία έχει παραμέτρους που παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα (2.1):

Χαρακτηριστικά Α/Γ	Τιμή
Διάμετρος δρομέα	75 m
Περιοχή σάρωσης δρομέα	4418 m ²
Ταχύτητα δρομέα	9 – 21 rpm
Ονομαστική ισχύς	2 MW
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12 m/s
Ταχύτητα ανέμου εισόδου (cut in)	3.5 m/s
Ταχύτητα ανέμου αποκοπής (cut out)	25 m/s
Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων	1:100

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Α/Γ.

Σχεδιάζουμε τις καμπύλες για τις διάφορες τιμές της γωνίας βήματος β , υπολογίζοντας για κάθε τιμή του λόγου ταχύτητας ακροπερυγίου λ από την προαναφερθείσα σχέση τις αντίστοιχες τιμές του αεροδυναμικού συντελεστή C_p :



Σχήμα 2.4 Ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος C_p για διάφορες τιμές της γωνίας του βήματος της έλικας β .

Η αεροδυναμική ροπή T_{rot} που αντιστοιχεί στην αεροδυναμική ισχύ που προσδιορίζεται μέσω της σχέσης (2.37), επαναλαμβάνεται εδώ για ευκολία:

$$T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\Omega_{rot}} \quad (2.44)$$

Όταν η A/Γ για κάθε ταχύτητα ανέμου περιστρέφεται με κατάλληλες στροφές, ώστε να λειτουργεί υπό μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή, τότε επιτυγχάνεται και η μέγιστη παραγωγή μηχανικής ισχύος. Επομένως, στόχος του συστήματος του ελέγχου των στροφών θα πρέπει να είναι η λειτουργία υπό του C_{pmax} . Με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab και όπως προκύπτει και από την παραπάνω γραφική παράσταση, η τιμή του β για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τιμή του αεροδυναμικού συντελεστή εντός του διαστήματος ρύθμισης $0^\circ - 35^\circ$, είναι $\beta = 0^\circ$. Για την εύρεση του μέγιστου αεροδυναμικού συντελεστή ισχύος που αντιστοιχεί σε αυτήν την τιμή της γωνίας έχουμε διαδοχικά:

$$\begin{aligned} \frac{dC_p(\lambda, \beta=0)}{d\lambda} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{638}{25\lambda^2} \exp\left(-\frac{25}{2\lambda} + \frac{7}{16}\right) + \frac{25}{2} \frac{\left(\frac{638}{25\lambda} - 1.9932\right)}{\lambda^2} \exp\left(-\frac{25}{2\lambda} + \frac{7}{16}\right) &= 0 \Rightarrow \\ \lambda_{opt} &= 6.3250 \end{aligned} \quad (2.45)$$

Έτσι από τις σχέσεις (2.42) και (2.43) προκύπτει:

$$C_p(\lambda_{opt}, 0) = 0.4382 \Rightarrow C_{p,max} = 0.4382 \quad (2.46)$$

Στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου από $V_{wcut-in}$ μέχρι V_{wnom} το βήμα της έλικας παραμένει σταθερό και ίσο με 0° . Σε αυτό το διάστημα ταχυτήτων η A/Γ λειτουργεί θεωρητικά υπό συνθήκες μεγιστοποίησης της παραγόμενης αεροδυναμικής ισχύος με $\lambda_{opt} = 6.3250$ και $C_{popt} = 0.4382$. Για τη δεδομένη, λοιπόν, ανεμογεννήτρια με C_{popt} και ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{wnom} = 12m/s$, η παραγόμενη μηχανική ισχύς προκύπτει από την εξίσωση (2.37) ίση με $2.049 MW$. Η ταχύτητα περιστροφής δρομέα της A/Γ που αντιστοιχεί σε αυτό το σημείο λειτουργίας (η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής) είναι $N_{rot-nom} = 18 \text{ Σ. Α. Λ.}$ η οποία αντιστοιχεί σε:

$$\Omega_{rot-nom} = N_{rot-nom} \frac{2\pi}{60} = 18 \frac{2\pi}{60} = 1.884955592 \text{ rad/s} \quad (2.47)$$

Η αντίστοιχη ταχύτητα από τη πλευρά της γεννήτριας δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Omega_{gen-nom} = K_{gear} \times \Omega_{rot-nom} = 100 \times 1.884955592 = 188.4955592 \text{ rad/s} \quad (2.48)$$

και

$$N_{gen-nom} = \frac{60}{2\pi} \times \Omega_{gen-nom} = \frac{60}{2\pi} \times K_{gear} \times \Omega_{rot-nom} \Rightarrow$$

$$N_{gen-nom} = \frac{60}{2\pi} \times 100 \times 1.884955592 = 1800 \text{ Σ.Α.Λ.} \quad (2.49)$$

Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται στη μικρότερη τιμή της, η οποία είναι $N_{rot-min} = 9 \text{ Σ.Α.Λ.}$ η οποία αντιστοιχεί σε:

$$\Omega_{rot-min} = N_{rot-min} \frac{2\pi}{60} = 9 \frac{2\pi}{60} = 0.942477796 \text{ rad/s} \quad (2.50)$$

Η αντίστοιχη ταχύτητα από τη πλευρά της γεννήτριας δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Omega_{gen-min} = K_{gear} \times \Omega_{rot-min} = 100 \times 0.942477796 = 94.2477796 \text{ rad/s} \quad (2.51)$$

και

$$N_{gen-min} = \frac{60}{2\pi} \times \Omega_{gen-min} = \frac{60}{2\pi} \times K_{gear} \times \Omega_{rot-nom} \Rightarrow$$

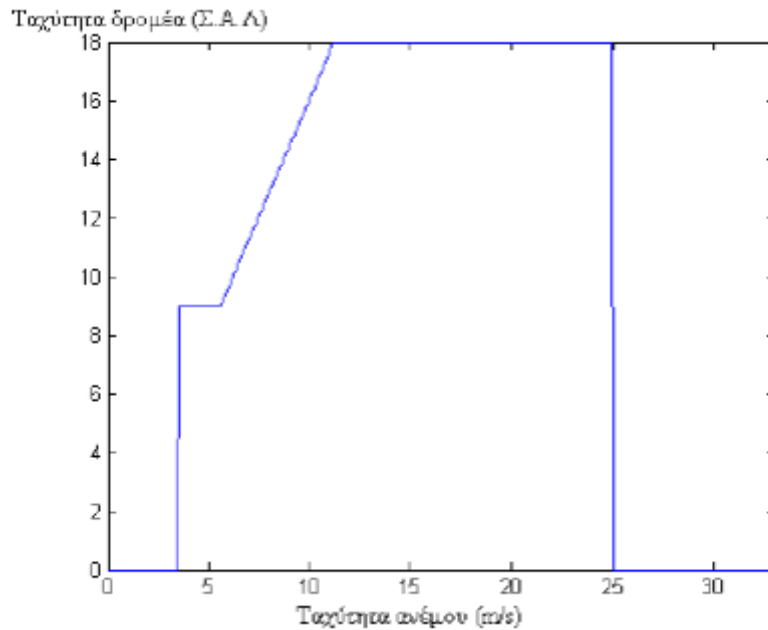
$$N_{gen-nom} = \frac{60}{2\pi} \times 100 \times 0.942477796 = 900 \text{ Σ.Α.Λ.} \quad (2.52)$$

Κατόπιν, η ταχύτητα αυξάνεται ανάλογα με την ταχύτητα ανέμου εξασφαλίζοντας συνθήκες μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος, δηλαδή $\lambda = \lambda_{opt}$. Έχουμε λοιπόν:

$$\Omega_{rot} = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \xrightarrow{\Omega_{rot} = N_{rot} \frac{2\pi}{60}} N_{rot} \frac{2\pi}{60} = \frac{\lambda_{opt} V_w}{R} \Rightarrow N_{rot} = 1.611 V_w \quad (2.53)$$

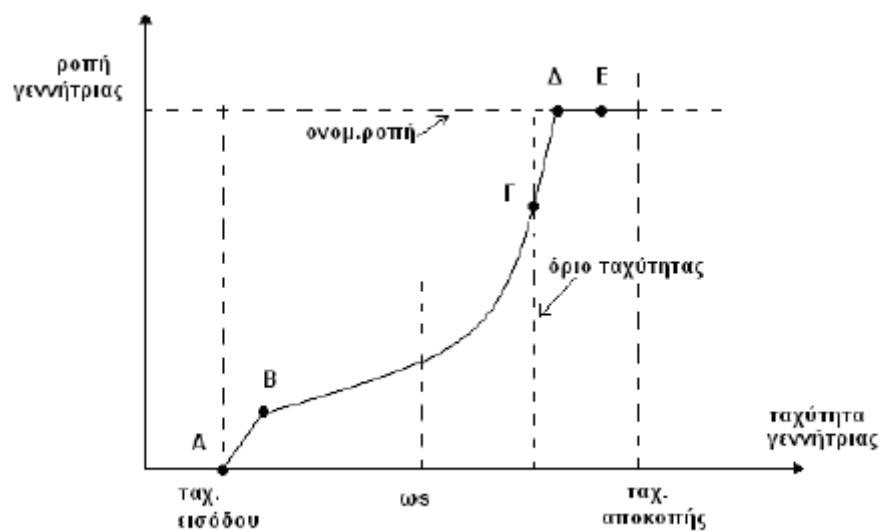
Όταν η ταχύτητα περιστροφής φτάσει την ονομαστική της τιμή (18 Σ.Α.Λ.), διατηρείται σταθερή μέχρι η ταχύτητα του ανέμου πάρει την ονομαστική της τιμή (12m/s). Αν η ταχύτητα ανέμου αυξηθεί περαιτέρω, ενεργοποιείται ο μηχανισμός αλλαγής της γωνίας βήματος των πτερυγίων, προκειμένου η παραγόμενη μηχανική

ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική της τιμή. Η διαδικασία αυτή ελέγχου ακολουθείται μέχρι η ταχύτητα ανέμου να γίνει ίση με την ταχύτητα αποκοπής, οπότε και η A/G βγαίνει εκτός λειτουργίας για προστασία από πιθανή καταστροφή από ισχυρά ρεύματα ανέμου. Έτσι, η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα N_{rot} συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου V_w προκύπτει ως εξής:



Σχήμα 2.5 Ταχύτητα N_{rot} του δρομέα της A/G συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου V_w .

Η χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας που εφαρμόστηκε για το μοντέλο ελέγχου είναι:



Σχήμα 2.6 Χαρακτηριστική ροπής-ταχύτητας για έλεγχο της ανεμογεννήτριας.

Η μέθοδος ελέγχου που εφαρμόζεται έχει στόχο την εξασφάλιση της βέλτιστης ισχύος $P_{rot-opt}$. Από τη στιγμή που η ταχύτητα του δρομέα είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου V_w , η ισχύς αυξάνεται συνάρτησε του Ω_{rot}^3 και του V_w^3 και η αντιστοιχούσα ροπή της γεννήτριας των Ω_{rot}^2 και V_w^2 [18]. Η βέλτιστη χαρακτηριστική για το μοντέλο μπορεί να προκύψει για βέλτιστη ροπή ως εξής [19]:

$$T_{rot-opt} = K_{opt} \Omega_{rot}^2 \quad (2.54)$$

Παρακάτω περιγράφουμε την συνολική στρατηγική ελέγχου της ανεμογεννήτριας η οποία και υλοποιήθηκε με σκοπό την ομαλή μετάβαση από την μια περιοχή ελέγχου στην άλλη και αντιστρόφως, καθώς επίσης και το περιορισμό των διακυμάνσεων ισχύος κατά τη λειτουργία στη περιοχή περιορισμού της.

Για μέγιστη απόδοση ισχύος λοιπόν, η καμπύλη ροπή-ταχύτητα ακολουθεί τη σχέση (2.54). Αυτό ισχύει μεταξύ των σημείων Β και Γ. Μέσα σε αυτά τα όρια λειτουργίας, κατά τη διάρκεια χαμηλών-μέτριων ταχυτήτων ανέμου, η μέγιστη δυνατή ενέργεια εξασφαλίζεται από την Α/Γ. Λόγω χαρακτηριστικών του μετατροπέα ισχύος, δεν συνηθίζεται πρακτικά να διατηρείται λειτουργία βέλτιστης ισχύος από την ταχύτητα εισόδου (cut-in) μέχρι την ονομαστική (nominal). Γι' αυτό, για χαμηλές ταχύτητες ανέμου το μοντέλο λειτουργεί σε σχεδόν σταθερή ταχύτητα περιστροφής (Α-Β). Η ταχύτητα περιστροφής περιορίζεται επίσης από το εμπόδιο του αεροδυναμικού θορύβου [25], όπου ο μετατροπέας επιτρέπει την αύξηση της ροπής, σε ουσιαστικά σταθερή ταχύτητα, μέχρι ονομαστική ροπή (Γ-Δ). Αν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί περαιτέρω σε σημείο να υπερβεί την ονομαστική ροπή της Α/Γ, ο έλεγχος ακολουθεί τη διαδρομή Δ-Ε, όπου η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι σταθερή. Όταν το σύστημα φτάσει στο Ε, αναλαμβάνει ο έλεγχος γωνίας (pitch control) από τον έλεγχο ροπής για να περιορίσει την αεροδυναμική ισχύ εισόδου. Για πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, ο έλεγχος γωνίας θα καθορίζει την ισχύ εισόδου μέχρι την ταχύτητα αποκοπής.

Άρα για ταχύτητες ανέμου ανάμεσα στην ελάχιστη (όπου $N_{rot-min} = 9 \text{ Σ.Α.Α.}$) και την ονομαστική (όπου $N_{rot-nom} = 18 \text{ Σ.Α.Α.}$) ισχύει η σχέση (2.53), η οποία προέκυψε, όπως προαναφέρθηκε, με λειτουργία υπό βέλτιστη ισχύ. Δηλαδή ισχύει:

$$N_{rot} = 1.611 V_w \Leftrightarrow V_w = \frac{N_{rot}}{1.611} \quad (2.55)$$

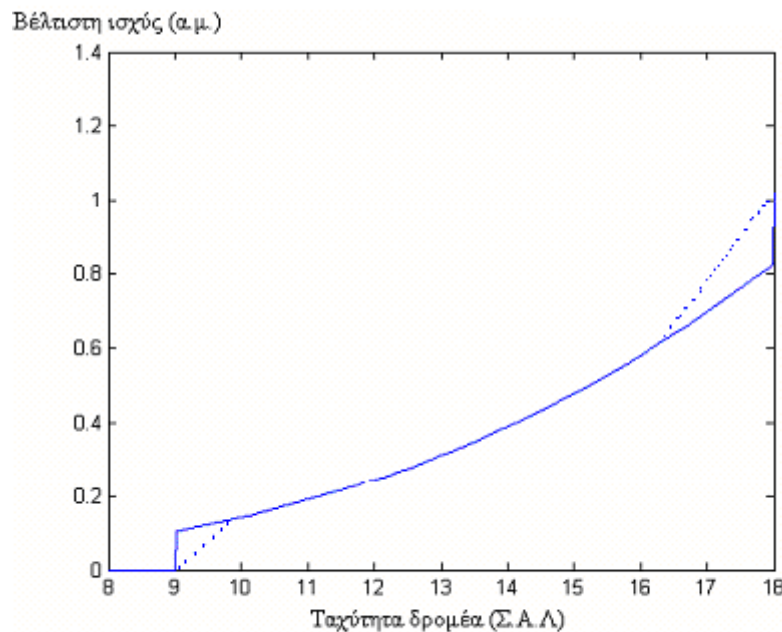
Ο αεροδυναμικός συντελεστής C_p είναι ίσος με $C_{popt} = 0.4382$. Άρα η βέλτιστη παραγόμενη μηχανική ισχύς δίνεται από την παρακάτω εξίσωση (2.56):

$$P_{rot-opt} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_{popt} \xrightarrow{V_w = \frac{N_{rot}}{1.611}} P_{rot-opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \left(\frac{N_{rot}}{1.611} \right)^3 C_{popt} \Rightarrow$$

$$P_{rot-opt} = \frac{1}{2} 1.225 \pi 37.5^2 \left(\frac{N_{rot}}{1.611} \right)^3 0.4382 \Rightarrow$$

$$P_{rot-opt} = 289.39 N_{rot}^3 \quad (2.56)$$

Παίρνοντας σαν βάση ισχύος $S_b = 2 \text{ MVA}$, προκύπτει η παρακάτω χαρακτηριστική ελέγχου των στροφών στο ανά μονάδα σύστημα (η συνεχής γραμμή):

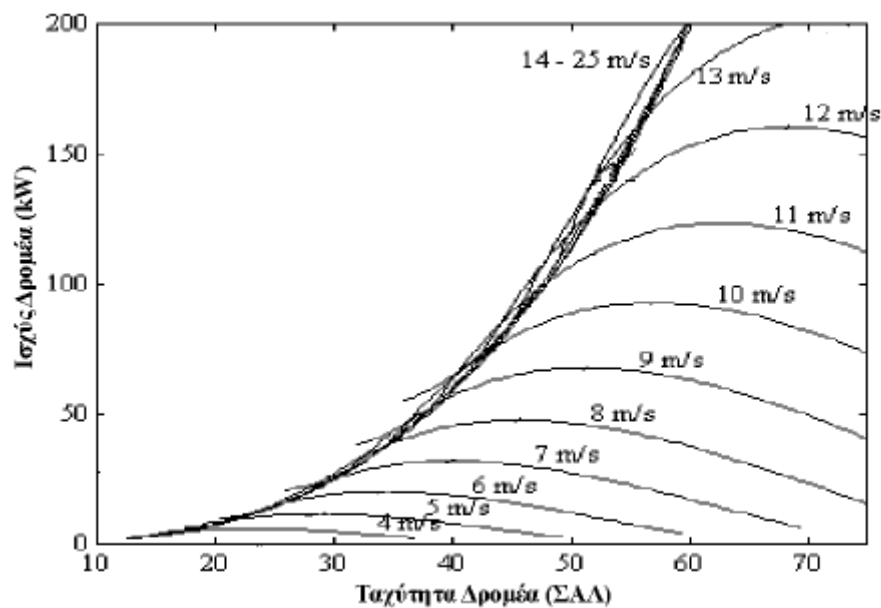


Σχήμα 2.7 Χαρακτηριστική ελέγχου στροφών.

Ο έλεγχος της ισχύος με βάση τη συνεχή γραμμή δημιουργεί παρ' όλα αυτά ορισμένα προβλήματα, διότι η επιθυμητή ισχύς δεν ορίζεται μονοσήμαντα σε μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα δρομέα και επειδή αν η ταχύτητα δρομέα μειωθεί από λίγο πάνω της ονομαστικής σε λίγο κάτω, ή από λίγο κάτω της ελάχιστης σε λίγο πάνω, η αλλαγή στην παραγόμενη ισχύ θα είναι πολύ μεγάλη. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μεγάλες διακυμάνσεις ισχύος όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι γύρω από την ονομαστική ή την ελάχιστη τιμή πράγμα ανεπιθύμητο. Για την επίλυση των δυσκολιών αυτών, ακολουθήθηκε μία χαρακτηριστική ελέγχου παρόμοια με την

προηγούμενη (συνεχής γραμμή) η οποία οδηγεί μεν σε μη βέλτιστη απόδοση, αλλά επιλύει τα προαναφερθέντα προβλήματα. Αυτή η χαρακτηριστική ελέγχου διακρίνεται με τη διακεκομμένη γραμμή.

Μια τυπική χαρακτηριστική ανεμογεννήτριας με χαραγμένη την καμπύλη μέγιστης αεροδυναμικής ισχύος ως διακεκομμένη που αποδίδει το μέγιστο C_{popt} για κάθε ταχύτητα ανέμου παρατίθεται στο ακόλουθο γράφημα:



Σχήμα 2.8 Καμπύλη ελέγχου μέγιστης αεροδυναμικής απόδοσης.

2.2.3 Χαρακτηριστική ελέγχου του βήματος της έλικας

Όσον αφορά τον έλεγχο της γωνίας βήματος των πτερυγίων της Α/Γ αναφέρθηκε παραπάνω ότι για ταχύτητες ανέμου κάτω από την ονομαστική V_{w-nom} διατηρείται σταθερή και ίση με $\beta = 0^\circ$, ενώ στη συνέχεια, εξασφαλίζοντας σταθερή την παραγόμενη ισχύ και ίση με την ονομαστική $P_{rot-nom}$, υπολογίζονται οι σωστές τιμές για τη γωνία βήματος.

Πιο αναλυτικά, για βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή C_{popt} και ονομαστική ταχύτητα ανέμου $V_{w-nom} = 12 \text{ m/s}$ η παραγόμενη μηχανική ισχύς είναι ίση με $P_{rot-nom} = 2049 \text{ MW}$. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, στην χαρακτηριστική

ελέγχου στροφών του δρομέα της Α/Γ για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής η ταχύτητα περιστροφής διατηρείται σταθερή και ίση με:

$$N_{rot-nom} = 18 \Sigma. A. \Lambda \quad (2.57)$$

Ο λόγος ταχύτητας περιστροφής του ακροπτερυγίου προς την ταχύτητα ανέμου δίνεται τότε από τη σχέση (2.39):

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{R \Omega_{rot-nom}}{V_w} \xrightarrow{\Omega_{rot} = N_{rot-nom} \frac{2\pi}{60}} \\ \lambda &= \frac{R N_{rot-nom} \frac{2\pi}{60}}{V_w} \xrightarrow{N_{rot-nom} = 18} \\ \lambda &= \frac{37.5 \times 18 \frac{2\pi}{60}}{V_w} \Rightarrow \\ \lambda &= \frac{70.69}{V_w} \end{aligned} \quad (2.58)$$

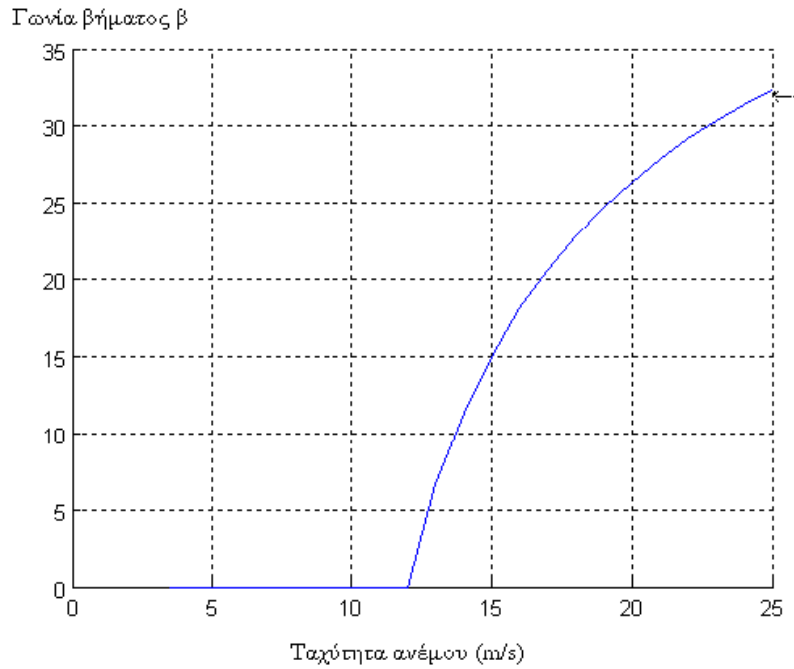
Για να εξασφαλιστεί ότι η παραγόμενη μηχανική ισχύς διατηρείται ίση με την ονομαστική, η γωνία βήματος πρέπει να παίρνει τις κατάλληλες τιμές έτσι ώστε:

$$P_{rot} = P_{rot-nom} = \frac{1}{2} \rho A V_{w-nom}^3 C_{popt} = 2049 \text{ MW} \Rightarrow$$

$$2049 = \frac{1}{2} 1.225 \pi 37.5^2 V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \xrightarrow{(2.58)}$$

$$V_w^3 C_p\left(\frac{70.69}{V_w}, \beta\right) = 742.04 \quad (2.59)$$

Προκύπτει η παραπάνω μη γραμμική εξίσωση ως προς τη γωνία βήματος β και με τη βοήθεια λογισμικού υπολογίζεται για κάθε ταχύτητα ανέμου, μεγαλύτερη της ονομαστικής V_{w-nom} , η απαιτούμενη τιμή της γωνίας β . Παρακάτω παρατίθεται γραφικά η σχέση μεταξύ της απαιτούμενης γωνία βήματος των πτερυγίων συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου:



Σχήμα 2.9 Χαρακτηριστική ελέγχου γωνίας βήματος.

2.2.4 Αριθμητικά προσεγγιστικό μοντέλο του δρομέα της Α/Γ

Η μηχανική ισχύς που ο δρομέας εξάγει από τον άνεμο υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.37), που επαναλαμβάνεται εδώ για διευκόλυνση:

$$P_{rot} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.60)$$

Ο συντελεστής απόδοσης C_p δεν εξαρτάται μόνο από το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου λ , αλλά και από τη γωνία βήματος της έλικας β [μοίρες]. Αυτό προκύπτει διότι οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών θεωρούνται ότι είναι εξοπλισμένες με έναν ελεγκτή γωνίας βήματος, όπως συνήθως γίνεται.

Χρησιμοποιήθηκε μια αριθμητική προσέγγιση της καμπύλης C_p . Η γενική δομή της εξίσωσης είναι πανομοιότυπη με αυτή που δίνεται στο [23]. Παρ' όλα αυτά, αν και οι συντελεστές σε αυτή αναφέρονται σε δρομέα ανεμογεννήτριας με έλεγχο γωνίας βήματος η τιμή τους έχει αλλάξει με σκοπό να υπάρξει καλύτερη αριθμητική προσέγγιση των καμπυλών που δίνονται στη βιβλιογραφία των κατασκευαστών [24].

Ένας παράγοντας που δυσκολεύει τη χρήση της αριθμητικής προσέγγισης της καμπύλης C_p είναι ότι η ταχύτητα του δρομέα σε μόνιμη κατάσταση για

συγκεκριμένη ποσότητα παραγόμενης ισχύος δε δίνεται από τους κατασκευαστές. Αυτό αντιμετωπίστηκε θεωρώντας ότι η ταχύτητα του δρομέα είναι ίση με την ελάχιστη τιμή της σε μηδενική ισχύ και με την ονομαστική της τιμή σε ονομαστική ισχύ. Επομένως, όταν καταστρώνεται το μοντέλο του ελεγκτή ταχύτητας παρακάτω, οι τιμές της ταχύτητας του δρομέα ανάμεσα στην ελάχιστη και στη μέγιστη τιμή μπορούν να υπολογιστούν θεωρώντας ότι η ταχύτητα ελέγχεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται μέγιστη ενεργειακή απόδοση.

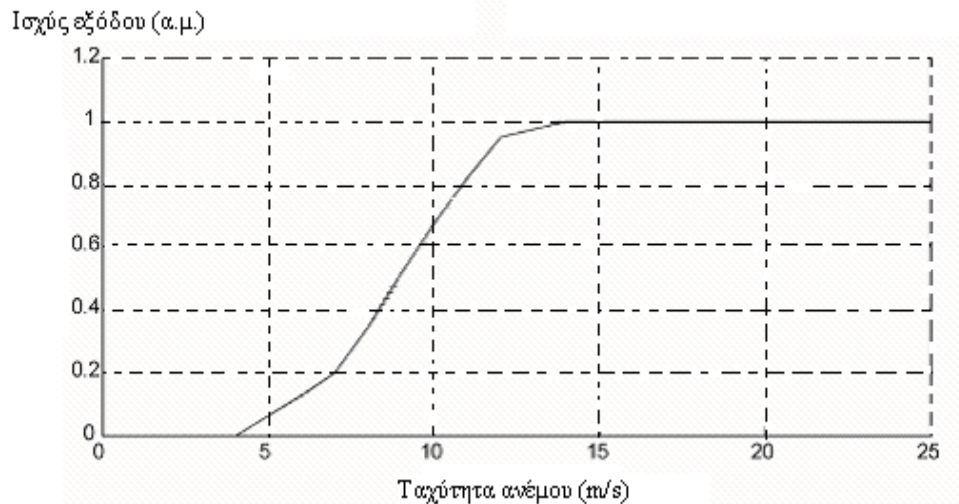
Ανακεφαλαιώνοντας, η ακόλουθη εξίσωση χρησιμοποιήθηκε για τη προσέγγιση της καμπύλης $C_p(\lambda, \beta)$:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (2.61)$$

όπου β η γωνία βήματος της έλικας, λ ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς ταχύτητα ανέμου και:

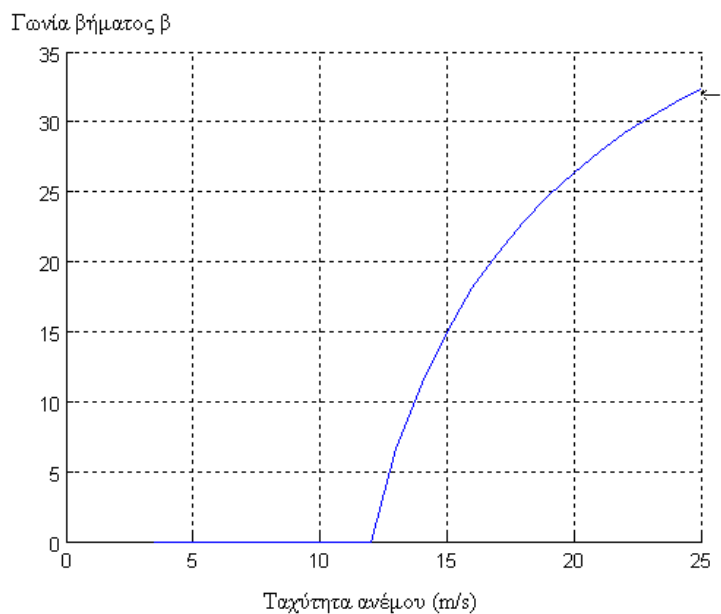
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.62)$$

Το παρακάτω σχήμα (2.10) απεικονίζει την καμπύλη ισχύος που προκύπτει όταν εφαρμόζεται η αριθμητική αυτή προσέγγιση. Επομένως, με χρήση της παραπάνω αριθμητικής προσέγγισης βάση των εξισώσεων (2.61) και (2.62) καταφέραμε να δημιουργήσουμε ένα αεροδυναμικό μοντέλο στο οποίο η μετάβαση από την περιοχή μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος στη περιοχή περιορισμού της χαρακτηρίζεται από ομαλότητα, ακρίβεια και απλότητα ενώ οι διακυμάνσεις της ισχύος στην τελευταία περιοχή ελέγχου έχουν περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό.



Σχήμα 2.10 Αριθμητική προσέγγιση της καμπύλης ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με έλεγχο γωνίας βήματος.

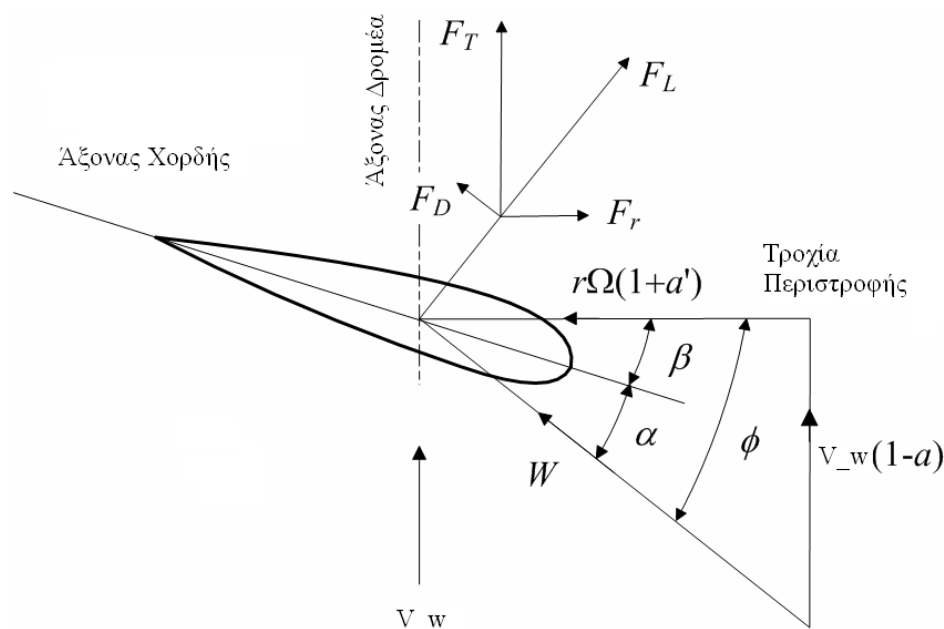
Στο παρακάτω γράφημα του σχήματος (2.11) παρουσιάζεται η προσέγγιση της γωνίας βήματος. Σε αυτό το μοντέλο δρομέα δεν περιλαμβάνεται το φαινόμενο της σκίασης του πύργου, καθώς συμπεραίνεται από μετρήσεις στη βιβλιογραφία ότι αντανακλάται ελάχιστα στην παραγόμενη ισχύ [35], [36] ενώ σκοπός μας αποτελεί η δημιουργία ενός αεροδυναμικού μοντέλου στο οποίο ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα στοιχεία τα οποία αλληλεπιδρούν με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και επομένως στην παραγόμενη ισχύ και ροπή.



Σχήμα 2.11 Διακύμανση της γωνίας βήματος της έλικας πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου.

2.3 Έλεγχος του Μηχανικού Συστήματος – Ελεγκτής Γωνίας Βήματος

2.3.1 Ποσοτική ανάλυση των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών της έλικας



Σχήμα 2.12 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της έλικας – στοιχειώδεις δυνάμεις και ταχύτητες.

Οι δυναμικές συνθήκες ανέμου καθώς επίσης και οι δυνάμεις οι οποίες ασκούνται σε μια έλικα απεικονίζονται στο παραπάνω σχήμα. Η γωνία α είναι η γωνία πρόσπτωσης ενώ η γωνία β αντιπροσωπεύει τη γωνία του βήματος της έλικας. Οι αεροδυναμικές δυνάμεις αναλύονται σε ένα σύστημα αναφοράς κάθετων αξόνων όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η ταχύτητα V_w είναι η ταχύτητα του ανέμου η οποία και είναι κάθετη ως προς τη τροχιά περιστροφής της έλικας. Όταν ο άνεμος περνάει διαμέσου της τροχιάς περιστροφής, η ταχύτητα του μειώνεται κατά μια ποσότητα ίση με $a \times V_w$ εξαιτίας της αλληλεπίδρασης η οποία λαμβάνει χώρα με τον άξονα του δρομέα. Η έλικα περιστρέφεται με μια γωνιακή ταχύτητα Ω . Επομένως, σε μια απόσταση r από τον άξονα του δρομέα η ταχύτητα περιστροφής θα είναι ίση με: $\Omega \times r$. Επίσης, εξαιτίας της αλληλεπίδρασης του ανέμου με τον άξονα του δρομέα, μια εφαπτόμενη συνιστώσα ταχύτητας ίση με: $a' \times \Omega \times r$ εισάγεται. Τότε, η συνολική καθαρή εφαπτόμενη συνιστώσα ταχύτητας της έλικας είναι ίση με: $(1 + a') \times \Omega \times r$. Η προκύπτουσα σχετική ταχύτητα της έλικας είναι ίση με:

$$W = \sqrt{V_w^2(1 - a^2) + \Omega^2 r^2(1 + a')^2} \quad (2.63)$$

όπου W η σχετική ταχύτητα της έλικας και r η απόσταση της έλικας από τον άξονα του δρομέα. Η προκύπτουσα αυτή σχετική ταχύτητα είναι υπεύθυνη για την αύξηση των αεροδυναμικών δυνάμεων οι οποίες ασκούνται την έλικα. Επομένως, η δύναμη αεροδυναμικής ανύψωσης είναι ίση με:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho c W^2 C_L \quad (2.64)$$

και η δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης δίνεται επίσης από τον παρακάτω τύπο:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho c W^2 C_D \quad (2.65)$$

όπου C_L και C_D οι συντελεστές ανύψωσης και αντίστασης αντίστοιχα και c το μήκος της χορδής της έλικας.

Στη περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας με μεταβλητή τη γωνία του βήματος της έλικας, η γωνία πρόσπτωσης α μειώνεται όταν η γωνία του βήματος β αυξάνεται όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (2.12). Η δύναμη F_L μειώνεται επίσης και αυτό προκαλεί με τη σειρά του μείωση στη μηχανική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Σύμφωνα με αυτό τον τρόπο ελέγχου, για ταχύτητες ανέμου μικρότερων της ονομαστικής η γωνία β διατηρείται σταθερή στη τιμή β_{opt} . Αυτή η βέλτιστη τιμή της γωνίας του βήματος μπορεί να υπολογιστεί ποσοτικά εφαρμόζοντας τη μέθοδο ορμής στοιχείου πτερυγίου τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της οποίας περιγράφονται παρακάτω.

Η μέθοδος ορμής στοιχείου πτερυγίου (Blade element momentum – BEM) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο υπολογισμού αεροδυναμικών φορτίων. Σύμφωνα με το [29] είναι η μέθοδος που χρησιμοποιούν τα 7 στα 8 υπολογιστικά πρότυπα [30], [31], [32], [33]. Σπανίως χρησιμοποιείται στην αρχική της μορφή καθώς λαμβάνονται υπόψη διάφορες διορθώσεις που έχουν προταθεί κατά καιρούς.

Η μέθοδος BEM ανήκει σε μια μεγάλη κατηγορία μεθόδων που βασίζονται στη μακροσκοπική εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής, η οποία στην πιο απλή της μορφή εμφανίζεται ως μέθοδος του δίσκου ενέργειας. Η μέθοδος περιορίζεται από το ότι υποθέτει ροή μόνιμη, αξονική και δισδιάστατη και θεωρεί την πτερωτή ως δίσκο [29]. Η όποια ανακυκλοφορία γύρω από την πτερωτή αγνοείται, απαιτώντας διόρθωση των συντελεστών επαγωγής για υψηλή φόρτιση. Προκείμενου να

υπερνικηθούν οι περιορισμοί που επέβαλε η αρχική μορφή της μεθόδου έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί μια σειρά μετατροπών και διορθώσεων [32], [33].

Ως υποκατηγορία της BEM μπορεί να θεωρηθεί η μέθοδος «δυναμικού επιτάχυνσης» (acceleration potential). Για πτερωτές χαμηλής φόρτισης, η μέθοδος αυτή επιτρέπει κατανομή πίεσης στο δίσκο ενέργειας κάτι που γενικεύει την αυστηρή προϋπόθεση της ομοιόμορφης κατανομής πίεσης της BEM [32].

Μια άλλη μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως είναι ο υπολογισμός των αεροδυναμικών συντελεστών με τη συνάρτηση Theodorsen ή Wagner [35], [36]. Οι παραπάνω όμως μέθοδοι εντάσσονται στην κατηγορία της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής.

Η μηχανική ισχύς της ανεμογεννήτριας θα αυξηθεί σε περίπτωση αύξησης της ταχύτητας του ανέμου. Επομένως, η ανεμογεννήτρια θα πρέπει να προστατευθεί από μεγάλα μηχανικά φορτία τα οποία θα οδηγήσουν σε πιθανή βλάβη της σε περίπτωση μεγάλων ταχυτήτων ανέμου. Η προστασία αυτή, επιτυγχάνεται επιτυχώς προσαρμόζοντας κατάλληλα τη γωνία του βήματος β σε θέση στην οποία ένα ποσοστό του εισερχόμενου ανέμου θα προσπεράσει την ανεμογεννήτρια χωρίς να αλληλεπιδράσει με τα πτερύγια της. Με αυτό τον τρόπο, η ισχύς κρατείται σταθερή στην ονομαστική της τιμή σε αυτή τη περιοχή ταχυτήτων του ανέμου.

2.3.2 Έλεγχος γωνίας βήματος

Ο σκοπός του ελέγχου της γωνίας βήματος της έλικας μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω [17]:

- 1) Στη μεγιστοποίηση της ισχύος εξόδου της ανεμογεννήτριας. Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, η γωνία βήματος διατηρείται σταθερή στη βέλτιστη τιμή της για την οποία η μηχανική ισχύς μεγιστοποιείται.
- 2) Στο περιορισμό της μηχανικής ισχύος η οποία εξάγεται από τον άνεμο, ώστε να μην υπερβεί τα όρια τα οποία έχουν προσδιοριστεί βάση του σχεδιασμού της ανεμογεννήτριας. Για ταχύτητες ανέμου οι οποίες ξεπερνούν την ονομαστική, ο έλεγχος της γωνίας βήματος αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέσο περιορισμού της

αεροδυναμικής ισχύος καθώς επίσης και των παραγόμενων στο δρομέα μηχανικών φορτίων.

3) Στην ελαχιστοποίηση των καταπονήσεων στις οποίες υπόκεινται τα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας. Είναι προφανές ότι το ο έλεγχος γωνίας βήματος έχει εξαιρετικά σημαντικό αντίκτυπο στα φορτία τα οποία βιώνονται από την ανεμογεννήτρια. Ο σχεδιασμός του ελεγκτή πρέπει να λαμβάνει υπόψη την επίδραση που έχει στα φορτία καθώς επίσης και να εγγυάται ότι επιπλέον φορτία δε θα προκύψουν από αυτή τη στρατηγική ελέγχου. Είναι δυνατό να προχωρήσουμε ακόμη περισσότερο και να σχεδιάσουμε έναν ελεγκτή ο οποίος θα έχει εκτός των άλλων, σαν επιπλέον στόχο, την ελαχιστοποίηση των μηχανικών καταπονήσεων της ανεμογεννήτριας.

2.3.2.1 Ελεγκτής γωνίας βήματος και στρατηγικές ελέγχου

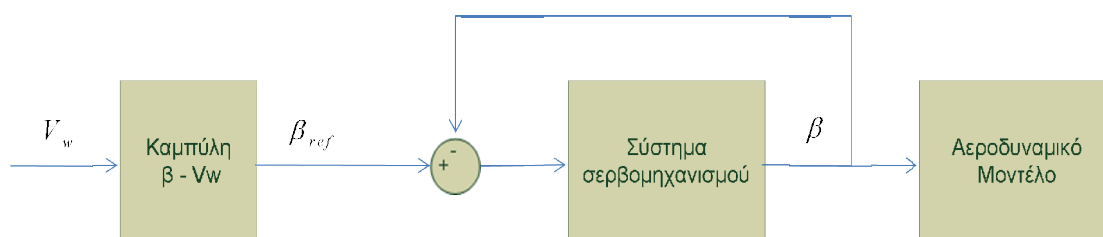
Στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας εξοπλισμένες με ένα μηχανισμό αλλαγής της γωνίας βήματος, το μηχανικό σύστημα της ανεμογεννήτριας μπορεί να ελεγχθεί σε ικανοποιητικό βαθμό μέσω αυτού του μηχανισμού. Σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής η γωνία βήματος παραμένει σταθερή, μεγιστοποιώντας την αεροδυναμική ισχύ σε αυτή τη περιοχή ταχυτήτων. Επομένως, ο ελεγκτής της γωνίας του βήματος παραμένει ανενεργός σε αυτές τις ταχύτητες ανέμου και η λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής στην ίδια περιοχή επιτυγχάνεται ουσιαστικά μέσω του συστήματος ελέγχου του ηλεκτρικού μέρους της ανεμογεννήτριας. Αντίθετα, για ταχύτητες ανέμου οι οποίες υπερβαίνουν την ονομαστική, ο ελεγκτής είναι ενεργός και προσαρμόζει τη γωνία του βήματος κατάλληλα ώστε η αεροδυναμική ισχύ η οποία εξάγεται από τον άνεμο να παραμένει σταθερή στην ονομαστική της τιμή. Για το σκοπό αυτό, ένας ελεγκτής ταχύτητας ο οποίος σταθεροποιεί τη ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας Ω_{gen} στην ονομαστική της τιμή $\Omega_{gen-rated}$ υιοθετείται. Στη πιο συνηθισμένη και συμβατική περίπτωση, η ταχύτητα περιστροφής ελέγχεται μέσω ενός αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI controller), του οποίου η έξοδος αποτελεί το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος της έλικας β_{ref} . Για να έχουμε μια όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική απόκριση του συστήματος, ένα μοντέλο συστήματος σερβομηχανισμού χρησιμοποιείται, το

οποίο ουσιαστικά περιλαμβάνει μια σταθερά χρόνου σερβομηχανισμού . Επιπρόσθετα, περιορισμοί οι οποίοι αφορούν τόσο τη τιμή της γωνίας βήματος

όσο και το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της — λαμβάνονται υπόψη. Ο περιορισμός ο οποίος αναφέρεται στο ρυθμό μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα ιδιαίτερα στη περίπτωση σφαλμάτων του ηλεκτρικού δικτύου, γιατί καθορίζει πόσο γρήγορα μπορεί η αεροδυναμική ισχύ να μειωθεί ούτως ώστε να αποφευχθεί σημαντική αύξηση της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων. Τέλος, το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος της έλικας συγκρίνεται με το πραγματικό σήμα και το σφάλμα που προκύπτει διορθώνεται μέσω του μοντέλου του συστήματος σερβομηχανισμού.

Οι πιο συνηθισμένες στη βιβλιογραφία στρατηγικές ελέγχου παρουσιάζονται παρακάτω. Το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος της έλικας , ελέγχεται μέσω των σημάτων εισόδου τα οποία για κάθε στρατηγική είναι διαφορετικά:

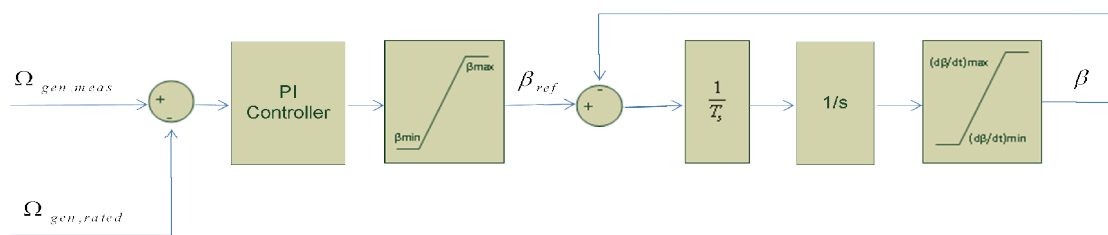
(στρατηγική): Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σήμα αναφοράς υπολογίζεται μέσω της καμπύλης του σχήματος 2.11:



Σχήμα 2.13 Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος βασισμένη στη ταχύτητα του ανέμου.

Ιδανικά, το σήμα μπορεί να υπολογιστεί με χρήση της καμπύλης . Αυτή η στρατηγική ελέγχου είναι απλή καθώς η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι άμεσα μετρήσιμη και επομένως διαθέσιμη. Παρόλα αυτά, αυτή η μέθοδος επιδέχεται αρκετή ποσότητα κριτικής καθώς είναι πρακτικά αδύνατη η συνεχής και ακριβής μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου.

(στρατηγική): Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς :



Σχήμα 2.14 Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς .

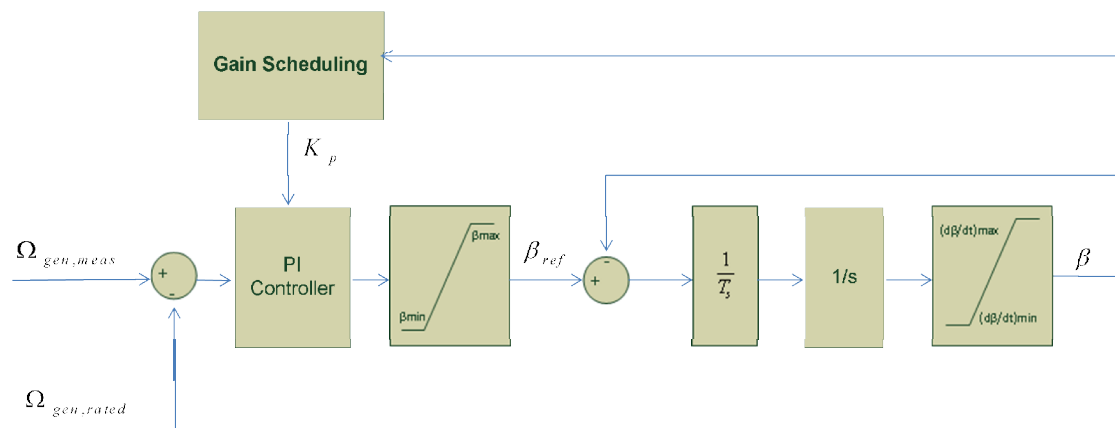
Σύμφωνα με αυτή την στρατηγική η ελεγχόμενη ταχύτητα συγκρίνεται με την ταχύτητα αναφοράς. Το σήμα σφάλματος το οποίο προκύπτει στέλνεται σε έναν αναλογικό – ολοκληρωτικό ελεγκτή (PI controller) ο οποίος παράγει με τη σειρά του το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος .

Στόχος του ελέγχου της γωνίας βήματος είναι ο περιορισμός της ταχύτητας του δρομέα. Όμως, λόγω της αργής σχετικά απόκρισης του, η τιμή αναφοράς για τη γωνία δε μπορεί να επιτευχθεί με ακρίβεια κάθε στιγμή, ενώ είναι ακόμη σε αποδεκτό εύρος γύρω από την τιμή αναφοράς. Οι τιμές των σταθερών (αναλογικό κέρδος) και (ολοκληρωτική σταθερά) του PI ελεγκτή επιλέχθηκαν με στόχο τη μικρή, σχετικά, μεταβλητότητα στροφών και μηχανικών ροπών, με συνέπεια τις μικρότερες καταπονήσεις του μηχανικού συστήματος, για διάφορες ταχύτητες μεγαλύτερης της ονομαστικής. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο που αναπτύχτηκε ήταν και [38].

Πηγαίνοντας ένα βήμα παραπέρα και μελετώντας τη καμπύλη του σχήματος (2.11), δε μπορούμε παρά να παρατηρήσουμε ότι η σχέση μεταξύ της γωνίας βήματος και της ταχύτητας του ανέμου χαρακτηρίζεται σε σημαντικό βαθμό από μη γραμμικότητα. Επιπρόσθετα, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά στην ονομαστική της τιμή, η ευαισθησία της αεροδυναμικής ροπής ως προς τη γωνία βήματος είναι πολύ μικρή. Συνεπώς, ένα πολύ μεγαλύτερο κέρδος του ελεγκτή είναι απαραίτητο σε αυτή τη περιοχή ταχυτήτων του ανέμου (δηλαδή κοντά και γύρω της ονομαστικής) σε σχέση με αυτό το οποίο απαιτείται σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου, στις οποίες μια μικρή αλλαγή στη γωνία βήματος επιφέρει σημαντική

μεταβολή στην αεροδυναμική ροπή. Συχνά, η συνάρτηση της ευαισθησίας της αεροδυναμικής ισχύος μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά ως προς τη γωνία βήματος. Επομένως, η επίδραση των μη γραμμικών αυτών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών μπορεί εξαλειφθεί μεταβάλλοντας το συνολικό κέρδος του ελεγκτή αντιστρόφως ανάλογα σε σχέση με την ευαισθησία της αεροδυναμικής ισχύος ως προς τη γωνία βήματος. Για αυτό το σκοπό μια μέθοδος παραμετροποίησης των τιμών του αναλογικού - ολοκληρωτικού ελεγκτή υλοποιείται παρακάτω και εφαρμόζεται στο μοντέλο αυτής της εργασίας. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή στη βιβλιογραφία ως *Gain Scheduling*.

(στρατηγική): *Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή (με Gain Scheduling) με έξοδο το σήμα αναφοράς* :



Σχήμα 2.15 *Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή (με Gain Scheduling) με έξοδο το σήμα αναφοράς* .

Για το σχεδιασμό αυτής της στρατηγικής ελέγχου λαμβάνουμε υπόψη τα παρακάτω:

Το συνολικό κέρδος του συστήματος , μπορεί να εκφρασθεί, σύμφωνα με τα παραπάνω, σαν το αναλογικό κέρδος του ελεγκτή πολλαπλασιασμένο με την αεροδυναμική ευαισθησία του συστήματος —:

$$\text{—} \text{—} \text{—} \quad (2.66)$$

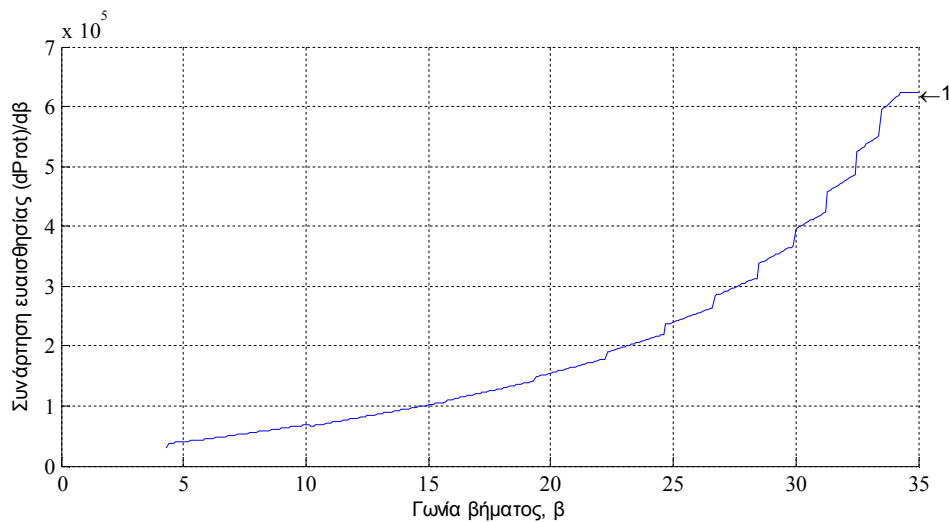
Η αεροδυναμική ευαισθησία του συστήματος εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας (την τιμή αναφοράς της αεροδυναμικής ισχύος, την ταχύτητα του ανέμου ή τη γωνία βήματος της έλικας). Όσο πιο ευαίσθητο είναι το σύστημα (μεγαλύτερες τιμές γωνίας βήματος β / υψηλότερες ταχύτητες ανέμου) τόσο μικρότερο πρέπει να είναι το κέρδος του ελεγκτή και αντίστροφα.

Το συνολικό κέρδος του συστήματος κρατείται επομένως σταθερό, αλλάζοντας το K_p με τέτοιο τρόπο ώστε να αντισταθμίζει τη μεταβολή της αεροδυναμικής ευαισθησίας $\frac{dP_{rot}}{d\beta}$. Συνεπώς χρησιμοποιώντας συνάρτηση της αεροδυναμικής ευαισθησίας έχουμε:

$$K_p = K_{basis} \times \left[\frac{dP_{rot}}{d\beta} \right]^{-1} \quad (2.67)$$

όπου το κέρδος K_{basis} αντιπροσωπεύει το σταθερό σχεδιασμένο αναλογικό κέρδος του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI controller).

Η συνάρτηση ευαισθησίας $\frac{dP_{rot}}{d\beta}$ υπολογίστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab R2009b. Παραθέτεται παρακάτω η καμπύλη της συνάρτησης ευαισθησίας η οποία χρησιμοποιήθηκε:



Σχήμα 2.16 Συνάρτηση ευαισθησίας $\frac{dP_{rot}}{d\beta}$ ως προς τη γωνία βήματος β .

2.3.2.2 Σχεδιασμός των Σταθερών Παραμέτρων του Ελεγκτή με Gain Scheduling

Υποθέτοντας ότι η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να προσεγγιστεί ικανοποιητικά ως ένα σύστημα δεύτερης τάξης, ο σχεδιασμός της διαδικασίας παραμετροποίησης του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή ταχύτητας μπορεί να βασιστεί στην ανάλυση της μεταβατικής απόκρισης ενός συστήματος δεύτερης τάξης η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{K}{Is^2 + Ds + k} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.68)$$

όπου τα I , K και D αντιπροσωπεύουν την αδράνεια, την ακαμψία και τον συντελεστή απόσβεσης του συστήματος. Συνεπώς, η φυσική συχνότητα ω_0 και η αναλογία απόσβεσης ξ (βλέπε παράγραφο 2.1.1) μπορούν να υπολογιστούν μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (2.69)$$

και

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{D}{I\omega_0} \xrightarrow{\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{I}} \Rightarrow I = \frac{K}{\omega_0^2}} \xi = \frac{D}{2K} \omega_0 \quad (2.70)$$

Επομένως, χρησιμοποιώντας τη παραπάνω σχέση (2.70), ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος D δίνεται από το τύπο:

$$D = \frac{2\xi K}{\omega_0} \quad (2.71)$$

Στη βιβλιογραφία οι πιο συνηθισμένες περιγραφές των παραμέτρων ενός PI ελεγκτή είναι δύο:

PI ελεγκτής – παραμετροποίηση^{1η}:

$$y = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) u \quad (2.72)$$

όπου το αναλογικό κέρδος και η ολοκληρωτική σταθερά μπορούν να εκφραστούν όπως παρακάτω:

$$K_i = \frac{K_{\Omega_{gen-base}}}{K_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP_{rot}}{d\beta} \right]^{-1} \quad (2.73)$$

και

$$K_p \cong 2\xi \frac{K_i}{\omega_0} \quad (2.74)$$

Σε αυτή τη μορφή της παραμετροποίησης ενός PI ελεγκτή, η τιμή της ολοκληρωτικής σταθεράς K_i είναι ανάλογη με την ακαμψία K του συστήματος, ενώ το αναλογικό κέρδος K_p είναι ανάλογο με τον συντελεστή απόσβεσης του συστήματος $D = \frac{2\xi K}{\omega_0}$. Παρατηρείστε ότι, όταν αυτή η μορφή παραμετροποίησης του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή εφαρμόζεται, οι τιμές και των δύο παραμέτρων του ελεγκτή περιέχουν τον όρο της συνάρτησης ευαισθησίας $\left[-\frac{dP_{rot}}{d\beta} \right]^{-1}$, δηλαδή και οι δύο λαμβάνουν μέρος στη διαδικασία του *Gain Scheduling*. Φυσικά κάτι τέτοιο δεν είναι επιθυμητό λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας του συστήματος. Για αυτό το λόγο η μορφή παραμετροποίησης του ελεγκτή η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρων περιγράφεται παρακάτω:

PI ελεγκτής – παραμετροποίηση 2^η:

$$y = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) u \quad (2.75)$$

όπου

η σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης T_i και το αναλογικό κέρδος K_p μπορούν να εκφραστούν όπως παρακάτω:

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} \xrightarrow{\text{σχέση (2.74)}} T_i = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (2.76)$$

και

$$K_p \cong \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{K_{\Omega_{gen-base}}}{K_{gear} \frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP_{rot}}{d\beta} \right]^{-1} \quad (2.77)$$

Αυτή η μορφή παραμετροποίησης του PI ελεγκτή είναι αυτή που τυπικά χρησιμοποιείται στα συστήματα ελέγχου. Παρατηρείστε ότι, όταν αυτή η μορφή

παραμετροποίησης του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή εφαρμόζεται, μόνο η τιμή μιας παραμέτρου του ελεγκτή (παράμετρος K_p) περιέχει τον όρο $\left[-\frac{dP_{rot}}{d\beta}\right]^{-1}$, δηλαδή μόνο το αναλογικό κέρδος K_p λαμβάνει μέρος στη διαδικασία του *Gain Scheduling*. Αντίθετα η σταθερά χρόνου ολοκλήρωσης T_i είναι ανεξάρτητη της ευαισθησίας της αεροδυναμικής ισχύος P_{rot} ως προς τη γωνία βήματος β και μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους σχεδίασης (δηλαδή την αναλογία απόσβεσης ξ και τη φυσική συχνότητα ω_0).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μορφή της παραμετροποίησης του PI ελεγκτή για προφανείς λόγους. Όσο αφορά τις τιμές των παραμέτρων σχεδίασης (αναλογία απόσβεσης ξ και φυσική συχνότητα ω_0), σύμφωνα με τη βιβλιογραφία και με σκοπό να έχουμε ρεαλιστική και καλή απόκριση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τιμές:

$$\text{αναλογία απόσβεσης } \xi = 0.66 \quad (2.78)$$

και

$$\text{φυσική συχνότητα } \omega_0 = 0.6 \text{ rad/s} \quad (2.79)$$

Αυτή η τιμή της φυσικής συχνότητας $\omega_0 = 0.6$ αντιστοιχεί σε:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{0.6}{2\pi} = 0.095492965 \cong 0.1 \text{ Hz} \quad (2.80)$$

Για τον υπολογισμό του σταθερού αναλογικού κέρδους του αναλογικού – ολοκληρωτικού ελεγκτή (PI controller) K_{basis} αρκεί να παρατηρήσουμε τη σχέση (2.67) η οποία επαναλαμβάνεται εδώ για διευκόλυνση:

$$K_p = K_{basis} \times \left[\frac{dP_{rot}}{d\beta}\right]^{-1} \Rightarrow$$

$$K_{basis} = K_p \left[\frac{dP_{rot}}{d\beta}\right] \xrightarrow{\text{σχέση (2.77)}}$$

$$K_{basis} = \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{K\Omega_{gen-base}}{K_{gear}\frac{30}{\pi}} \left[-\frac{dP_{rot}}{d\beta}\right]^{-1} \left[\frac{dP_{rot}}{d\beta}\right] \Rightarrow$$

$$K_{basis} = -\frac{2\xi}{\omega_0} \frac{K\Omega_{gen-base}}{K_{gear}\frac{30}{\pi}} \quad (2.81)$$

όπου η ταχύτητα $\Omega_{gen-base}$ είναι η βασική ταχύτητα του δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας.

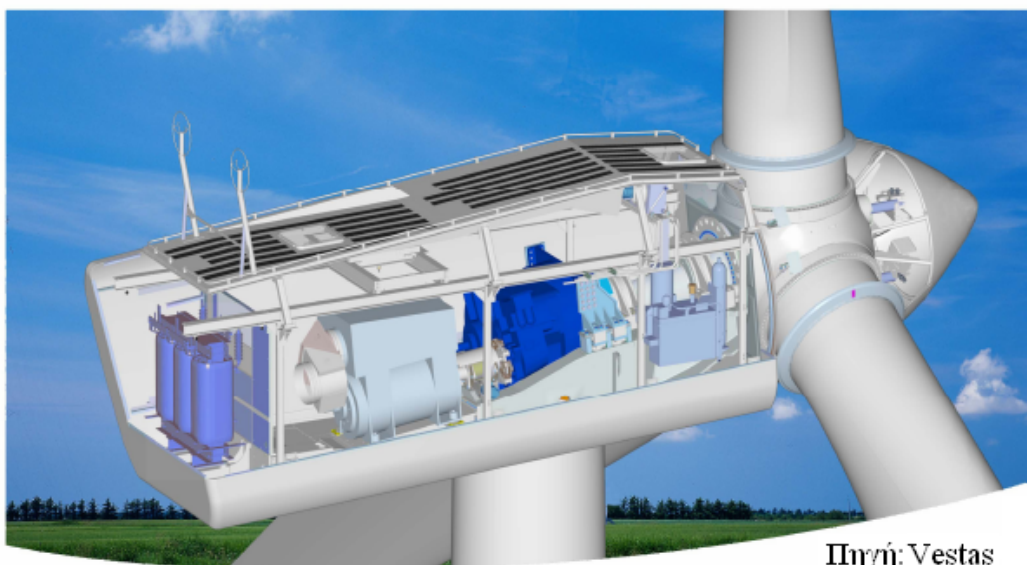
Σε όλους τους τύπους ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών, ο έλεγχος γωνίας βήματος είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό για τη λειτουργία και τη μοντελοποίηση. Καθώς στη διαμόρφωση της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης η ανεμογεννήτρια είναι περιορισμένη όσο αφορά το εύρος ταχύτητας λειτουργίας, ο έλεγχος αυτός λαμβάνει ιδιαίτερα πολύπλοκο ρόλο. Σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννήτριας, ο έλεγχος γωνίας βήματος δε χρειάζεται αποκλειστικά για περιορισμό της ισχύος και της ταχύτητας, αλλά όταν εκτελείται ανάλογα, μπορεί να συμβάλλει στη μεγιστοποίηση της ισχύος που δεσμεύεται. Τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα, δηλαδή η τιμή του συντελεστή δηλαδή C_p , σαν συνάρτηση του λόγου ακροπετυγίου λ και της γωνίας βήματος β , πρέπει να είναι γνωστά για αυτό τον τύπο ελέγχου. Από άποψη ελέγχου είναι σημαντικό να γίνει αισθητό, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, ότι η συνάρτηση του συντελεστή ισχύος είναι μια επιφάνεια στο $(C_p, \lambda, \beta) - \chi\acute{o}\rho\omicron$.

Είναι επίσης φανερό, ότι τα στοιχεία για τον άνεμο και το δρομέα μπορούν να καθορίσουν τα πιθανά όρια για την ισχύ που είναι διαθέσιμη, αλλά η πραγματική ισχύς στην έξοδο θα είναι αποτέλεσμα της επιλεγμένης μεθόδου ελέγχου, καθώς και κατά πόσο αυτή υλοποιείται ευφυώς. Η στρατηγική ελέγχου, από την άλλη μεριά, επηρεάζεται από ένα σύνθετο σύνολο παραγόντων, που περιλαμβάνουν τη δομική ισχύ, τη δυναμική συμπεριφορά και την ποιότητα ισχύος, μεταξύ άλλων. Επομένως, η στρατηγική ελέγχου είναι, ή πρέπει να είναι, σε συνδυασμό με την ολική φιλοσοφία σχεδίασης της ανεμογεννήτριας.

3 Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης – Ηλεκτρικό σύστημα και έλεγχος

3.1 Εισαγωγή

Η ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (Doubly Fed Induction Generator - DFIG) αποτελεί σήμερα το πιο διαδεδομένο τύπο συστήματος ανεμογεννήτριας [40]. Στο [41] εκτιμήθηκε ότι η κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο μέσω της χρήσης μετατροπέων ισχύος είναι η πλέον ελκυστική και συμφέρουσα. Η παρουσία των μετατροπέων ισχύος στα συστήματα ανεμογεννητριών προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες ελέγχου και ευκολία στην ικανοποίηση των απαιτήσεων και των προδιαγραφών οι οποίες πρέπει να πληρούνται για τη σύνδεση της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης χρησιμοποιεί ένα σύστημα μετατροπέων ισχύος για τη σύνδεση του δρομέα με το δίκτυο. Μέσω του συστήματος αυτού καθίσταται δυνατός ο έλεγχος της τάσης του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής. Επομένως, είναι δυνατό να επιτευχθεί ανεξάρτητα, ο έλεγχος της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος, σε μια περιοχή ταχυτήτων περιστροφής η οποία προσεγγιστικά είναι ίση με $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα [42]. Συγκρίνοντας το σύστημα αυτό, με άλλα τα οποία περιλαμβάνουν μετατροπείς ισχύος για τη διασύνδεση του στάτη της γεννήτριας με το δίκτυο, προκύπτει ότι ο μετατροπέας ισχύος χειρίζεται μικρότερη ισχύ (20% - 30% της ονομαστικής) με αποτέλεσμα μειωμένες ενεργειακές απώλειες καθώς επίσης και κόστος κατασκευής. Για όλους τους παραπάνω λόγους, το σύστημα ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης αποτελεί την πιο ελκυστική οικονομικά και σχεδιαστικά λύση, για συστήματα ανεμογεννητριών.



Πηγή: Vestas

Σχήμα 3.1 *Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.*

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Ένα περιεκτικό και αναλυτικό μοντέλο του συστήματος είχε αναπτυχθεί στο [43] και ήταν διαθέσιμο στην αρχή αυτής της διπλωματικής εργασίας. Το μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης (Drive Train Model) και ο έλεγχος του, έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 2. Τα δεδομένα σχετικά με τα μοντέλα (Model Data) που υλοποιήθηκαν, δεν είναι συνδεδεμένα με ένα συγκεκριμένο κατασκευαστή αλλά επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά μιας ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης ονομαστικής ισχύος 2 MW.

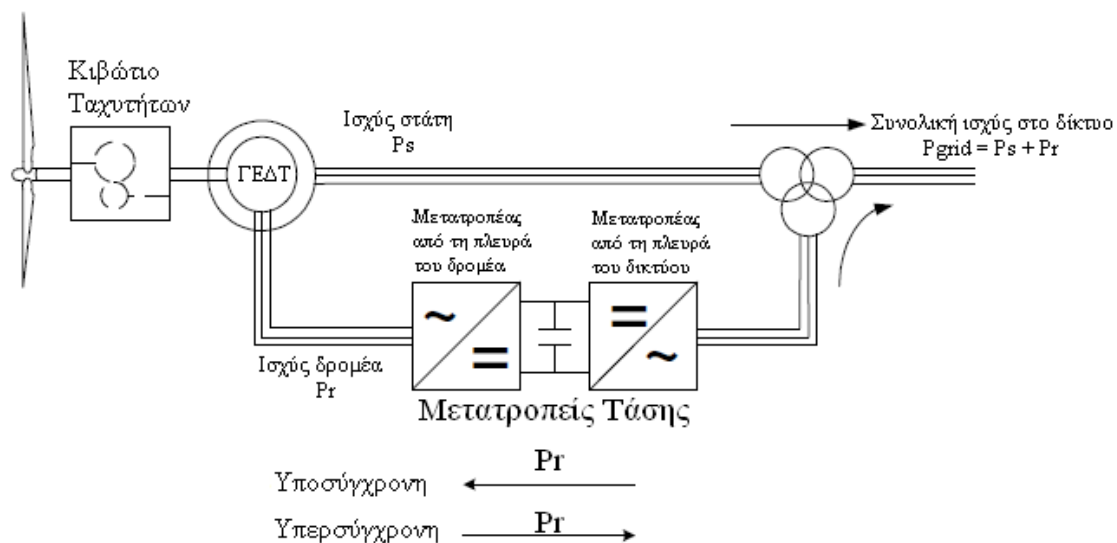
3.2 Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

3.2.1 Αρχή λειτουργίας

Το σύστημα που παρουσιάζεται και γραφικά στο σχήμα (3.2) που ακολουθεί, αποτελείται από μια Α/Γ συνδεδεμένη με μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Αυτό σημαίνει ότι ο στάτης είναι απ' ευθείας συνδεδεμένος στο δίκτυο ενώ το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται στο μετατροπέα μέσω δαχτυλιδιών (slip

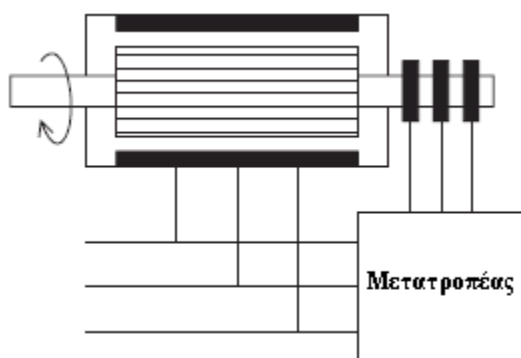
rings). Αυτό το σύστημα είναι ιδιαίτερα δημοφιλές στον τομέα των Α/Γ μεταβλητών στροφών. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χειρίζεται μόνο ένα κλάσμα (20-30%) της ολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν σε σύγκριση με σύστημα όπου ο μετατροπέας χειρίζεται την ολική ισχύ. Επιπλέον, το κόστος του μετατροπέα μειώνεται.

Η γεννήτρια είναι ουσιαστικά μια μηχανή επαγωγής η οποία όμως δεν έχει βραχυκυκλωμένο το δρομέα. Αντίθετα, ο δρομέας συνδέεται με το δίκτυο μέσω δύο μετατροπέων τάσης (Back-to-Back Voltage Source Converter). Ο μετατροπέας παρέχει μια επιπλέον τάση με συχνότητα τη συχνότητα ολίσθησης (Slip Frequency) στα τερματικά του δρομέα. Η δυνατότητα μεταβολής της τάσης του δρομέα επιτρέπει τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα καθώς επίσης και τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος η οποία παράγεται από τη γεννήτρια επαγωγής. Η γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε ταχύτητα είτε μεγαλύτερη (υπερσύγχρονη λειτουργία) είτε μικρότερη από τη σύγχρονη (υπό - σύγχρονη λειτουργία). Στη πρώτη περίπτωση η ισχύς του δρομέα εγχέεται μέσω των μετατροπέων στο δίκτυο, ενώ στη δεύτερη η ροή της ισχύος στο δρομέα έχει αντίθετη κατεύθυνση όπως φαίνεται και από το σχήμα. Επομένως, η ροή της ισχύος στο μετατροπέα μπορεί να είναι και ως προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο μετατροπέας συνεπώς πρέπει να αποτελείται από ενεργά ημιαγωγικά στοιχεία, όπως για παράδειγμα IGBT ή GTO, επιτρέποντας τη ροή της ισχύος προς τις δύο κατευθύνσεις.



Σχήμα 3.2 Διάγραμμα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

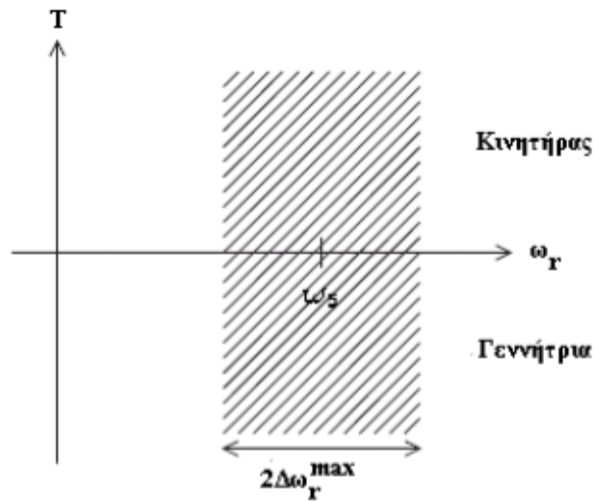
Για συστήματα μεταβλητής ταχύτητας με περιορισμένο εύρος ταχύτητας, πχ $\pm 30\%$ της σύγχρονης ταχύτητας η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (ΓΕΔΤ) μπορεί να είναι μια ενδιαφέρουσα λύση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, ο λόγος για αυτό είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος χρειάζεται να χειριστεί ένα κλάσμα (20% – 30%) της ολικής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μπορούν να μειωθούν σε σύγκριση με σύστημα όπου ο μετατροπέας χειρίζεται την ολική ισχύ. Η αρχή λειτουργίας παρουσιάζεται στο σχήμα (3.3).



Σχήμα 3.3 Αρχή λειτουργίας της ΓΕΔΤ.

Ο μετατροπέας που συνδέεται ανάμεσα στο δρομέα και στον τερματικό ζυγό της Α/Τ αποτελείται από δύο μετατροπείς, δηλ. το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής και το μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου, οι οποίοι συνδέονται μέσω της dc πλευράς τους. Στη διεθνή βιβλιογραφία το σχήμα αυτό των μετατροπέων είναι γνωστό ως back to back. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής σαν αποθήκη ενέργειας, με στόχο να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Με το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο βασικός στόχος για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

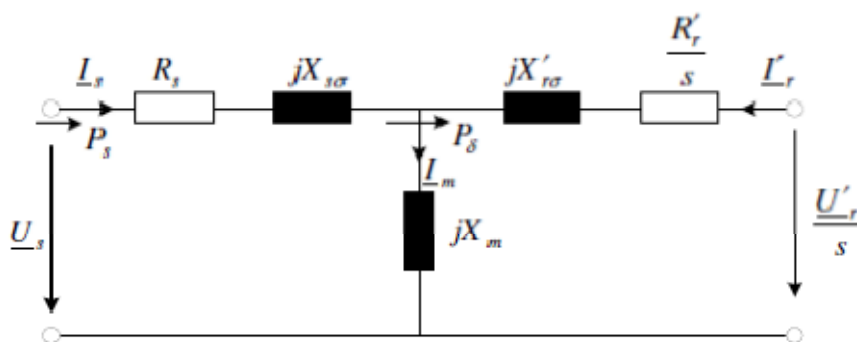
Το εύρος ταχύτητας της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης φαίνεται στο σχήμα (3.4). Όπως επίσης φαίνεται στο σχήμα, η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως κινητήρας αλλά και ως γεννήτρια με ένα εύρος στην ταχύτητα του δρομέα $\pm \Delta\omega_r^{max}$ γύρω από τη σύγχρονη ταχύτητα, ω_s .



Σχήμα 3.4 Εύρος ταχύτητας στο διάγραμμα ροπής-ταχύτητας μιας ΓΕΔΤ.

3.2.2 Λειτουργία στη μόνιμη κατάσταση

Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (χωρίς να λάβουμε υπ' όψιν τις απώλειες μαγνήτισης) παρουσιάζεται στο σχήμα (3.5). Αυτό το ισοδύναμο κύκλωμα ισχύει για μια ισοδύναμη φάση σε Y και για υπολογισμούς μόνιμης κατάστασης. Στην περίπτωση που η ΓΕΔΤ είναι συνδεδεμένη κατά Δ , η μηχανή μπορεί ακόμα να εκφραστεί με το ισοδύναμο αυτό. Σε αυτήν την παράγραφο υιοθετείται η $j\omega$ - μέθοδος για τους υπολογισμούς.



Σχήμα 3.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μόνιμης κατάστασης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Σημειώνεται εδώ ότι, αν η τάση του δρομέα, $\underline{U}_r$, στο σχήμα (3.5) βραχυκυκλωθεί, το ισοδύναμο κύκλωμα για την ΓΕΔΤ μετατρέπεται στο τυπικό ισοδύναμο κύκλωμα για

μια μηχανή επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα. Εφαρμόζοντας τον νόμο τάσης του Kirchhoff στο κύκλωμα στο σχήματος (3.5) προκύπτει:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + jX_m \underline{I}_m \quad (3.1)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{r\sigma} \underline{I}'_r + jX_m \underline{I}_m \quad (3.2)$$

Εφαρμόζοντας το νόμο ρευμάτων Kirchhoff στο μοναδικό κόμβο του σχήματος (3.5) έχουμε ακόμη μια σχέση:

$$\underline{I}_m = \underline{I}_s + \underline{I}'_r \quad (3.3)$$

όπου για τις παραπάνω σχέσεις (3.1) – (3.3) είναι:

$\underline{U}_s$ η τάση του στάτη,

$\underline{I}_s$ το ρεύμα του στάτη,

$\underline{U}'_r$ η ισοδύναμη, ως προς τη πλευρά του στάτη, τάση του δρομέα,

$\underline{I}'_r$ το ισοδύναμο, ως προς τη πλευρά του στάτη, ρεύμα του δρομέα,

$\underline{I}_m$ το ρεύμα μαγνήτισης

R_s η αντίσταση του τυλίγματος του στάτη,

R'_r η ισοδύναμη, ως προς τη πλευρά του στάτη, αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα,

$X_{s\sigma}$ η αντίδραση σκέδασης του στάτη,

$X'_{r\sigma}$ η ισοδύναμη, ως προς τη πλευρά του στάτη, αντίδραση σκέδασης του δρομέα,

X_m η αντίδραση μαγνήτισης και

s η ολίσθηση

Η ολίσθηση s είναι ίση με:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (3.4)$$

όπου ω_s η σύγχρονη ταχύτητα η οποία δίνεται από το τύπο:

$$\omega_s = 2 \times \pi \times f_s = 2 \times \pi \times f_e \quad (3.5)$$

f_e η συχνότητα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (συνήθως είναι ίση με 50 Hz)

Η ταχύτητα ω_r είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας.

Αντικαθιστώντας στις εξισώσεις (3.1) και (3.2) το ρεύμα μαγνήτισης $\underline{I}_m$ το οποίο δίνεται από τη σχέση (3.3) έχουμε:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + jX_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + jX_{s\sigma} \underline{I}_s + jX_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (3.6)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{r\sigma} \underline{I}'_r + jX_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + jX'_{r\sigma} \underline{I}'_r + jX_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (3.7)$$

Για τις αντιδράσεις σκέδασης ισχύουν επίσης:

$$X_{s\sigma} = \omega_s L_{s\sigma} \quad (3.8)$$

$$X'_{r\sigma} = \omega_s L'_{r\sigma} \quad (3.9)$$

και

$$X_m = \omega_s L_m \quad (3.10)$$

όπου

$L_{s\sigma}$ η επαγωγή σκέδασης στάτη και

$L'_{r\sigma}$ η ισοδύναμη, ως προς τη πλευρά του στάτη, επαγωγή σκέδασης δρομέα

Επομένως, οι εξισώσεις της μηχανής (3.1) και (3.2) γράφονται τότε:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_m \underline{I}_m \quad (3.11)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + j\omega_s L_m \underline{I}_m \quad (3.12)$$

και αντικαθιστώντας το ρεύμα $\underline{I}_m$ από τη σχέση (3.3) έχουμε ομοίως:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (3.13)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + j\omega_s L_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + j\omega_s L_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (3.14)$$

Επιπλέον, εάν οριστούν η ροή διακένου, η ροή στάτη και δρομέα ως εξής:

$$\underline{\Psi}_m = L_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \underline{\Psi}_m = L_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \quad (3.15)$$

$$\underline{\Psi}_s = L_{s\sigma} \underline{I}_s + L_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \underline{\Psi}_s = L_{s\sigma} \underline{I}_s + L_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \xrightarrow{\text{σχέση (3.15)}} \underline{\Psi}_s = L_{s\sigma} \underline{I}_s + \underline{\Psi}_m \quad (3.16)$$

$$\underline{\Psi}_r = L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + L_m \underline{I}_m \xrightarrow{\text{σχέση (3.3)}} \underline{\Psi}_r = L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + L_m (\underline{I}_s + \underline{I}'_r) \xrightarrow{\text{σχέση (3.15)}} \underline{\Psi}_r = L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + \underline{\Psi}_m \quad (3.17)$$

οι εξισώσεις που περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα μπορούν να γραφούν:

$$\underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s + j\omega_s L_m \underline{I}_m \Leftrightarrow \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s (L_{s\sigma} \underline{I}_s + L_m \underline{I}_m) \xrightarrow{\text{σχέση (3.16)}} \underline{U}_s = R_s \underline{I}_s + j\omega_s \underline{\Psi}_s \quad (3.18)$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + j\omega_s L_m \underline{I}_m \Leftrightarrow$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s \left(L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + L_m \underline{I}_m \right) \xrightarrow{\text{σχέση (3.17)}}$$

$$\frac{\underline{U}'_r}{s} = \frac{R'_r}{s} \underline{I}'_r + j\omega_s \underline{\Psi}_r \quad (3.19)$$

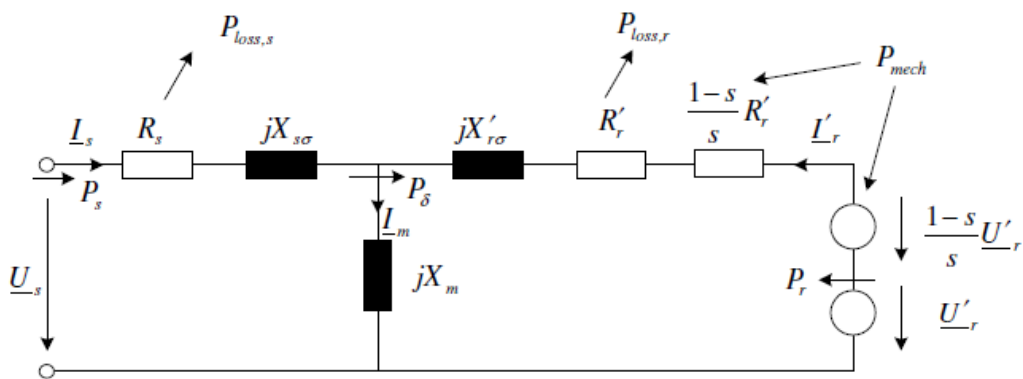
Οι απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις της μηχανής (αμελούνται εδώ οι απώλειες μαγνήτισης) είναι:

$$P_{loss} = 3 \left(R_s |\underline{I}_s|^2 + R'_r |\underline{I}'_r|^2 \right) \quad (3.20)$$

ενώ είναι δυνατόν να εκφραστεί η ηλεκτρομηχανική ροπή, T_e , ως εξής:

$$T_e = 3N_p \text{Im} \left[\underline{\Psi}_m \underline{I}'_r{}^* \right] = N_p \text{Im} \left[\underline{\Psi}_r \underline{I}'_r{}^* \right] \quad (3.21)$$

Για τη διευκόλυνση της κατανόησης της ροής ισχύος στη μηχανή, το ισοδύναμο κύκλωμα σε μόνιμη κατάσταση μπορεί κάλλιστα να διαμορφωθεί όπως στο σχήμα (3.6) παρακάτω:



Σχήμα 3.6 Ροή ισχύος στη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, όπως απεικονίζεται με χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος της μηχανής.

όπου

$P_{loss,s}$ οι ωμικές απώλειες στο τύλιγμα του στάτη

$P_{loss,r}$ οι ωμικές απώλειες στο τύλιγμα του δρομέα

P_{mech} η μηχανική ισχύς

P_{δ} η ισχύς διακένου

P_s η ισχύς στάτη

P_r η ισχύς του δρομέα

Η φαινόμενη ισχύς του στάτη S_s και του δρομέα S_r της γεννήτριας δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\begin{aligned}
 S_s &= 3 \underline{U}_s \underline{I}_s^* \xrightarrow{\text{σχέση (3.18)}} \\
 S_s &= 3 \left[R_s \underline{I}_s + j\omega_s (L_{s\sigma} \underline{I}_s + L_m \underline{I}_m) \right] \underline{I}_s^* \xrightarrow{\Psi_m = L_m \underline{I}_m} \\
 S_s &= 3 \left[R_s \underline{I}_s + j\omega_s (L_{s\sigma} \underline{I}_s + \underline{\Psi}_m) \right] \underline{I}_s^* \Leftrightarrow \\
 S_s &= 3R_s \underline{I}_s \underline{I}_s^* + 3j\omega_s L_{s\sigma} \underline{I}_s \underline{I}_s^* + 3j\omega_s \underline{\Psi}_m \underline{I}_s^* \Leftrightarrow \\
 S_s &= 3R_s \left| \underline{I}_s \right|^2 + 3j\omega_s L_{s\sigma} \left| \underline{I}_s \right|^2 + 3j\omega_s \underline{\Psi}_m \underline{I}_s^* \quad (3.22)
 \end{aligned}$$

Ομοίως:

$$\begin{aligned}
 S_r &= 3 \underline{U}'_r \underline{I}'_r \xrightarrow{\text{σχέση (3.19)}} \\
 S_r &= 3 \left[R'_r \underline{I}'_r + js\omega_s (L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + L_m \underline{I}_m) \right] \underline{I}'_r^* \xrightarrow{\Psi_m = L_m \underline{I}_m} \\
 S_r &= 3 \left[R'_r \underline{I}'_r + js\omega_s (L'_{r\sigma} \underline{I}'_r + \underline{\Psi}_m) \right] \underline{I}'_r^* \Leftrightarrow \\
 S_r &= 3R'_r \underline{I}'_r \underline{I}'_r^* + 3js\omega_s L'_{r\sigma} \underline{I}'_r \underline{I}'_r^* + 3js\omega_s \underline{\Psi}_m \underline{I}'_r^* \Leftrightarrow \\
 S_r &= 3R'_r \left| \underline{I}'_r \right|^2 + 3js\omega_s L'_{r\sigma} \left| \underline{I}'_r \right|^2 + 3js\omega_s \underline{\Psi}_m \underline{I}'_r^* \quad (3.23)
 \end{aligned}$$

Επομένως, η ενεργός ισχύς του στάτη είναι ίση με:

$$\begin{aligned}
 P_s &= \text{Re}[S_s] = 3\text{Re} \left[\underline{U}_s \underline{I}_s^* \right] \xrightarrow{\text{σχέση (3.22)}} \\
 P_s &= 3R_s \left| \underline{I}_s \right|^2 + 3\omega_s \text{Im} \left[\underline{\Psi}_m \underline{I}_s^* \right] \quad (3.24)
 \end{aligned}$$

Ομοίως, για την ενεργό ισχύ του δρομέα ισχύει:

$$P_r = \text{Re}[S_r] = 3\text{Re} \left[\underline{U}'_r \underline{I}'_r^* \right] \xrightarrow{\text{σχέση (3.23)}}$$

$$P_r = 3R'_r \left| \underline{I}'_{-r} \right|^2 + 3s\omega_s \text{Im} \left[\underline{\Psi}_m \underline{I}'_{-r}^* \right] \quad (3.25)$$

Οι ωμικές απώλειες στάτη και δρομέα υπολογίζονται εύκολα από τους παρακάτω τύπους:

$$P_{loss,s} = 3R_s \left| \underline{I}_{-s} \right|^2 \quad (3.26)$$

$$P_{loss,r} = 3R'_r \left| \underline{I}'_{-r} \right|^2 \quad (3.27)$$

Η ροή ισχύς στη μηχανή μπορεί επομένως εύκολα να υπολογιστεί, εξετάζοντας το παραπάνω σχήμα. Η ισχύς διακένου P_δ , η οποία ρέει από το στάτη μέσω του διακένου στο δρομέα, είναι ίση με:

$$P_\delta = P_s - P_{loss,s} \xrightarrow{\text{σχέση (3.26)}} P_\delta = P_s - 3R_s \left| \underline{I}_{-s} \right|^2 \quad (3.28)$$

Επιπρόσθετα, το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας του σχήματος (3.5) υποδεικνύει ότι η ενεργός ισχύς διακένου P_δ , η οποία μεταδίδεται στο δρομέα είναι ίση με:

$$P_\delta = 3 \frac{R'_r}{s} \left| \underline{I}'_{-r} \right|^2 - 3 \text{Re} \left[\frac{\underline{U}'_{-r}}{s} \underline{I}'_{-r}^* \right] \quad (3.29)$$

Η μηχανική ισχύς μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$P_{mech} = 3 \frac{(1-s)}{s} R'_r \left| \underline{I}'_{-r} \right|^2 - 3 \text{Re} \left[\frac{(1-s)}{s} \underline{U}'_{-r} \underline{I}'_{-r}^* \right] \quad (3.30)$$

Η εξίσωση (3.29) μπορεί να γραφτεί όπως παρακάτω:

$$sP_\delta = 3R'_r \left| \underline{I}'_{-r} \right|^2 - 3 \text{Re} \left[\underline{U}'_{-r} \underline{I}'_{-r}^* \right] \xrightarrow{\text{σχέσεις (3.27) \& (3.25)}} \quad (3.31)$$

$$sP_\delta = P_{loss,r} - P_r$$

Αντικαθιστώντας στη παραπάνω σχέση (3.31) την έκφραση για το P_δ η οποία δίνεται από τη σχέση (3.28) έχουμε:

$$sP_\delta = P_{loss,r} - P_r \xrightarrow{\text{σχέση (3.28)}} \quad (3.32)$$

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - P_r$$

Εάν τώρα οι ωμικές απώλειες των τυλιγμάτων του στάτη $P_{loss,s} = 3R_s \left| \underline{I}_s \right|^2$ καθώς επίσης και του δρομέα $P_{loss,r} = 3R'_r \left| \underline{I}'_r \right|^2$ αμεληθούν, η εξίσωση (3.32) γράφεται:

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - P_r \xrightarrow{P_{loss,s}=P_{loss,r}=0}$$

$$P_r = -sP_s \quad (3.33)$$

Η σχέση (3.33) αποτελεί μια ευρέως γνωστή και αποδεκτή σχέση η οποία συνδέει την ενεργό ισχύ του στάτη με αυτή του δρομέα, στην περίπτωση της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Η μηχανική ισχύς προκύπτει με παρόμοιο τρόπο παρατηρώντας το σχήμα (3.6):

$$P_{mech} = 3 \frac{(1-s)}{s} R'_r \left| \underline{I}'_r \right|^2 + 3Re \left[\frac{(1-s)}{s} \underline{U}'_r \underline{I}'^*_r \right] \Rightarrow$$

$$P_{mech} = \frac{(1-s)}{s} \left\{ 3R'_r \left| \underline{I}'_r \right|^2 + 3Re \left[\underline{U}'_r \underline{I}'^*_r \right] \right\} \xrightarrow{\text{σχέσεις (3.27) \& (3.25)}}$$

$$P_{mech} = \frac{(1-s)}{s} (P_{loss,r} + P_r) \quad (3.34)$$

Λύνοντας τη παραπάνω σχέση (3.34) ως προς την ισχύ του δρομέα P_r έχουμε:

$$P_r = \frac{s}{(1-s)} P_{mech} - P_{loss,r} \quad (3.35)$$

Αντικαθιστώντας στη συνέχεια την έκφραση του P_r στη σχέση (3.32) ισχύει:

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - P_r \xrightarrow{\text{σχέση (3.35)}}$$

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - \left[\frac{s}{(1-s)} P_{mech} - P_{loss,r} \right] \Rightarrow$$

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - \frac{s}{(1-s)} P_{mech} + P_{loss,r} \Rightarrow$$

$$s(P_s - P_{loss,s}) = -\frac{s}{(1-s)} P_{mech} + 2P_{loss,r} \quad (3.36)$$

Λύνοντας τη παραπάνω σχέση (3.36) ως προς την ισχύ του στάτη P_s έχουμε:

$$s(P_s - P_{loss,s}) = -\frac{s}{(1-s)}P_{mech} + 2P_{loss,r} \Leftrightarrow$$

$$P_s = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} + 2\frac{P_{loss,r}}{s} + P_{loss,s} \quad (3.37)$$

Εάν αμελήσουμε τις ωμικές απώλειες στάτη και δρομέα η εξίσωση (3.36) γράφεται:

$$s(P_s - P_{loss,s}) = -\frac{s}{(1-s)}P_{mech} + 2P_{loss,r} \xrightarrow{P_{loss,s}=P_{loss,r}=0}$$

$$sP_s = -\frac{s}{(1-s)}P_{mech} \Leftrightarrow$$

$$P_s = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} \quad (3.38)$$

Ακόμη λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση (3.33) η οποία ισχύει όταν αμελούνται οι ωμικές απώλειες στάτη και δρομέα φτάνουμε στο εξής συμπέρασμα:

$$P_s = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} \xrightarrow{P_r = -sP_s \Leftrightarrow P_s = -\frac{P_r}{s}}$$

$$-\frac{P_r}{s} = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} \Leftrightarrow$$

$$P_r = \frac{s}{(1-s)}P_{mech} \quad (3.39)$$

Ανακεφαλαιώνοντας, εάν λάβουμε υπόψη τις ωμικές απώλειες στάτη και δρομέα, ισχύουν:

$$s(P_s - P_{loss,s}) = P_{loss,r} - P_r \quad (3.40)$$

$$P_s = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} + 2\frac{P_{loss,r}}{s} + P_{loss,s} \quad (3.41)$$

$$P_r = \frac{s}{(1-s)}P_{mech} - P_{loss,r} \quad (3.42)$$

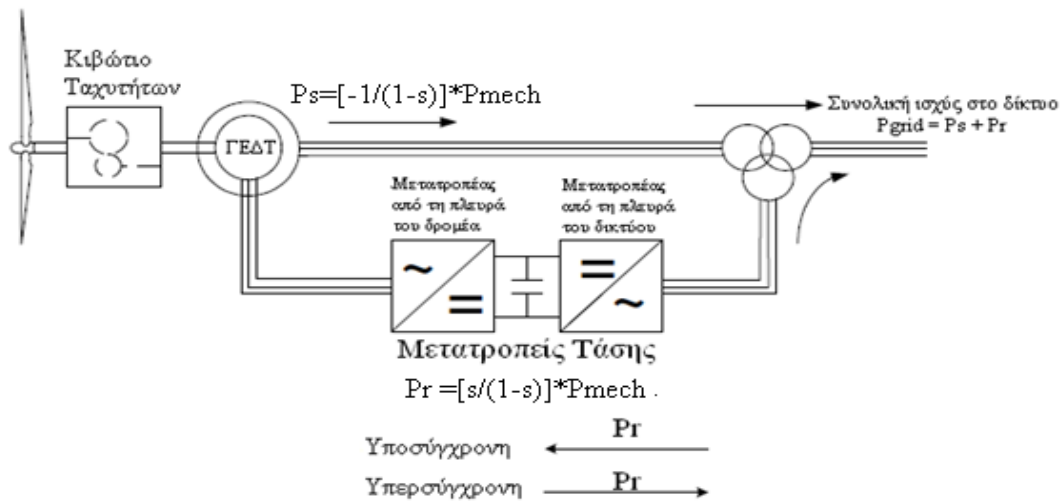
Ενώ σε περίπτωση που τις αμελήσουμε:

$$P_r = -sP_s \quad (3.43)$$

$$P_s = -\frac{1}{(1-s)}P_{mech} \quad (3.44)$$

$$P_r = \frac{s}{(1-s)} P_{mech} \quad (3.45)$$

Έτσι, η ισχύς του δρομέα είναι περίπου ίση με το αντίθετο της ισχύος του στάτη πολλαπλασιασμένη με την ολίσθηση, δηλ $P_r = -sP_s$. Με αυτόν τον τρόπο καταλήγουμε στο γνωστό συμπέρασμα ότι ο μετατροπέας που συνδέεται στο δρομέα μπορεί να διαστασιοποιηθεί σαν κλάσμα της ονομαστικής ισχύος της ΓΕΔΤ αν η μέγιστη ολίσθηση είναι χαμηλή.



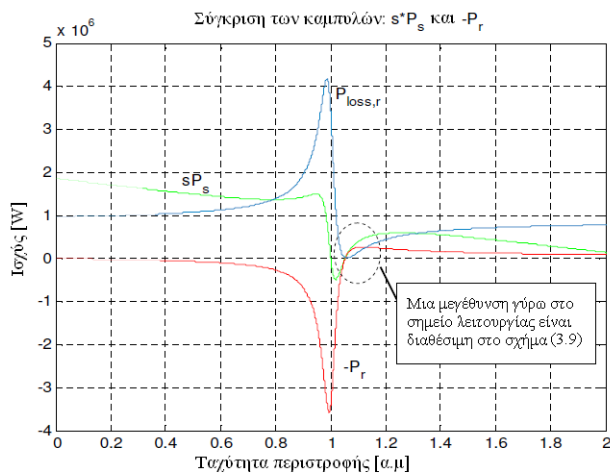
Σχήμα 3.7 Ροή ισχύος σε σύστημα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης αμελώντας τις ωμικές απώλειες.

Ένα παράδειγμα για το πώς η ισχύς του στάτη και του δρομέα εξαρτώνται από την ολίσθηση φαίνεται στον πίνακα (3.1) [43]. Μπορεί να φανεί στον πίνακα ότι ισχύς μέσω του μετατροπέα, δεδομένης της μηχανικής ισχύος, είναι υψηλότερη για θετική ολίσθηση ($\omega_r < \omega_s$). Αυτό οφείλεται στον παράγοντα $\frac{1}{(1-s)}$ στις εκφράσεις της ισχύος του δρομέα. Παρ' όλα αυτά, για μια Α/Γ, η κατάσταση δεν είναι όπως φαίνεται στον πίνακα 3.1. Για μια Α/Γ, γενικά, σε χαμηλή μηχανική ισχύ η ολίσθηση είναι θετική και για υψηλή μηχανική ισχύ είναι αρνητική.

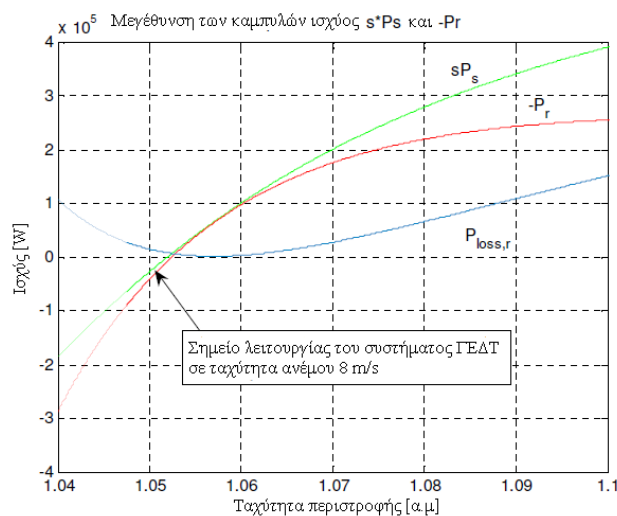
Ολίσθηση s , [%]	Ταχύτητα δρομέα ω_r , [α.μ]	Ισχύς δρομέα P_r	Ισχύς στάτη P_s
0.3	0.7	$-0.43 \times P_{mech}$	$1.43 \times P_{mech}$
0	1	0	P_{mech}
-0.3	1.3	$0.23 \times P_{mech}$	$0.77 \times P_{mech}$

Πίνακας 3.1 Παράδειγμα ροής ισχύος, για διαφορετικές ολισθήσεις για ένα σύστημα γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Όμως, έχει αποδεχτεί στο [44] ότι οι σχέσεις (3.43) – (3.45), οι οποίες ισχύουν όταν οι ωμικές απώλειες αγνοούνται, επαληθεύονται μόνο σε μια μικρή περιοχή γύρω από το σημείο μόνιμης λειτουργίας. Αυτό το συμπέρασμα εξηγείται στο σχήμα (3.8) στη περίπτωση μιας συγκεκριμένης τάσης δρομέα, η τιμή της οποίας προσαρμόζεται κατάλληλα από το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας σε ταχύτητα ανέμου 8 m/s . Το σχήμα (3.8) δείχνει τις καμπύλες μόνιμης κατάστασης sP_s και $-P_r$ καθώς επίσης και τις ωμικές απώλειες του δρομέα $P_{loss,r}$. Μια μεγέθυνση στη περιοχή γύρω από το σημείο μόνιμης λειτουργίας δίνεται επίσης στο σχήμα (3.9). Προκύπτει, μέσα από τη παρατήρηση των σχημάτων (3.8) και (3.9), ότι οι καμπύλες sP_s και $-P_r$ συγκλίνουν σε μια σχετικά μικρή περιοχή γύρω από το σημείο μόνιμης λειτουργίας.



Σχήμα 3.8 Σύγκριση των καμπυλών sP_s και $-P_r$ [44].



Σχήμα 3.9 Μεγέθυνση των καμπυλών sP_s και $-P_r$ στο σημείο λειτουργίας του συστήματος γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης [44].

3.2.3 Δυναμικό μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

3.2.3.1 Διατύπωση των Εξισώσεων του Δυναμικού Μοντέλου 5^{ης} τάξης της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

Οι εξισώσεις οι οποίες διέπουν το δυναμικό μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης προσδιορίζονται εύκολα μέσω της ανάλυσης των μηχανών επαγωγής. Οι εξισώσεις που διέπουν το δυναμικό μοντέλο είναι μετασχηματισμένες στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς SFO για το οποίο ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράζονται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς (Synchronous reference frame) χρησιμοποιώντας τις συνιστώσες d (direct) και q (quadrature).
2. Ο q -άξονας θεωρείται σε προπορεία 90° από τον d - άξονα στην κατεύθυνση της περιστροφής και επομένως το εξωτερικό γινόμενο $q \times d$ δίνει τον μηδενικό άξονα.
3. Η συνιστώσα q της τάσης του στάτη V_{qs} , που εμφανίζεται στο μοντέλο ισούται με την τερματική τάση του ζυγού της γεννήτριας και η V_{ds} ισούται με μηδέν (η θέση του άξονα d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη).
4. Χρησιμοποιείται σύμβαση κινητήρα, το οποίο σημαίνει ότι η ενεργός και η άεργος ισχύς έχουν θετικό πρόσημο όταν αντλούνται από το δίκτυο.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν τη θεωρία των μηχανών επαγωγής και ακολουθώντας μια διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο [43] και εδώ για χάριν συντομίας παραλείπεται, έχουμε τελικά τις ακόλουθες μετασχηματισμένες στο σύγχρονο πλαίσιο SFO εξισώσεις της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης:

Εξισώσεις τάσης

$$v_{qs} = \left(R_s \frac{X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{qr} \quad (3.46)$$

$$v_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \left(R_s \frac{X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi_{ds} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{dr} \quad (3.47)$$

$$v'_{qr} = -\frac{R'_r X_m}{D} \psi_{qs} + \left(\frac{R'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \quad (3.48)$$

$$v'_{dr} = -\frac{R'_r X_m}{D} \psi_{ds} - \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \left(\frac{R'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \quad (3.49)$$

Εξισώσεις ροών

$$\psi_{qs} = X_{ss} i_{qs} + X_m i'_{qr} \quad (3.50)$$

$$\psi_{ds} = X_{ss} i_{ds} + X_m i'_{dr} \quad (3.51)$$

$$\psi'_{qr} = X_m i_{qs} + X'_{rr} i'_{qr} \quad (3.52)$$

$$\psi'_{dr} = X_m i_{ds} + X'_{rr} i'_{dr} \quad (3.53)$$

όπου

$$p = \frac{d}{dt}$$

$\omega_e = \omega_s = 2\pi f_e$ η σύγχρονη ταχύτητα του πλαισίου αναφοράς,

Ω_{gen} η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης,

$$X_{ss} = X_{s\sigma} + X_m \quad (3.54)$$

$$X'_{rr} = X'_{r\sigma} + X_m \quad (3.55)$$

$$D = X_{ss} X'_{rr} - X_m^2 \quad (3.56)$$

Οι αντιδράσεις σκέδασης δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$X_{s\sigma} = \omega_s L_{s\sigma} \quad (3.57)$$

$$X'_{r\sigma} = \omega_s L'_{r\sigma} \quad (3.58)$$

$$X_m = \omega_s L_m \quad (3.59)$$

όπου

$L_{s\sigma}$ η επαγωγή σκέδασης στάτη και

$L'_{r\sigma}$ η ισοδύναμη, ως προς τη πλευρά του στάτη, επαγωγή σκέδασης δρομέα.

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι εκφρασμένες στο «ανά μονάδα» σύστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα βολικό και σκόπιμο στην παρούσα εργασία, γιατί η αναπαράσταση ενός μοντέλου στον επεξεργαστή του EUROSTAG (Model Editor) δε γίνεται σε φυσικές μονάδες. Επίσης, το ανά μονάδα σύστημα προσφέρει υπολογιστική απλότητα και η χρήση του εξυπηρετεί ιδιαίτερα τις μελέτες συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας [45].

Το δυναμικό μοντέλο ολοκληρώνεται εάν προσθέσουμε και την εξίσωση κίνησης του δρομέα εκφρασμένη στο ανά μονάδα σύστημα.

$$T_e = 2H \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + T_{gen} \quad (3.60)$$

όπου T_{gen} η μηχανική ροπή η οποία ουσιαστικά αποτελεί έξοδο του μοντέλου του συστήματος μετάδοσης της κίνησης και H η σταθερά αδράνειας με μονάδα το 1 sec η οποία ουσιαστικά ορίζεται ως το λόγο της περιστροφικής ενέργειας σε watt*sec προς την ονομαστική φαινόμενη ισχύ σε VA.

3.2.3.4 Διατύπωση των Εξισώσεων του Δυναμικού Μοντέλου 3^{ης} τάξης της Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

Αμελώντας τα μεταβατικά των ροών στις εξισώσεις του στάτη είναι σύνηθες θέμα στις μελέτες ευστάθειας που περιλαμβάνουν τόσο σύγχρονες μηχανές όσο και μηχανές επαγωγής. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της απλοποίησης είναι τα μοντέλα μειωμένης τάξης (3^{ης} τάξης) που προκύπτουν, η εύκολη διασύνδεση με το μοντέλο του δικτύου, και μεγαλύτερα βήματα ολοκλήρωσης.

Θεωρώντας επομένως ότι $p\psi_{qs} = 0$ και $p\psi_{ds} = 0$ οι εξισώσεις (3.46) – (3.49) γίνονται:

$$v_{qs} = R_s \frac{X'_{rr}}{D} \psi_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{qr} \quad (3.61)$$

$$v_{ds} = -\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + R_s \frac{X'_{rr}}{D} \psi_{ds} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{dr} \quad (3.62)$$

$$v'_{qr} = -\frac{R'_r X_m}{D} \psi_{qs} + \left(\frac{R'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \quad (3.63)$$

$$v'_{dr} = -\frac{R'_r X_m}{D} \psi_{ds} - \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \left(\frac{R'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \quad (3.64)$$

Επαναλαμβάνοντας τώρα την εξίσωση κίνησης:

$$T_e = 2H \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + T_{gen} \quad (3.65)$$

προκύπτουν οι εξισώσεις για το μοντέλο τρίτης τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης με μεταβλητές κατάστασης τις πεπλεγμένες ροές του δρομέα ψ'_{qr} , ψ'_{dr} και την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας Ω_{gen} . Οι εξισώσεις των πεπλεγμένων ροών συναρτήσει των εντάσεων των ρευμάτων είναι ίδιες με τις (3.50) – (3.53), δεν μεταβάλλονται δηλαδή στο μοντέλο 3^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

3.2.3.5 Προσομοίωση του Δυναμικού Μοντέλου 5^{ης} τάξης σε Υπολογιστή

Οι μεταβλητές κατάστασης του μοντέλου 5^{ης} τάξης είναι οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο στάτη και δρομέα ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} , και ψ'_{dr} καθώς επίσης και η ταχύτητα περιστροφής Ω_{gen} του δρομέα της γεννήτριας. Κινούμενοι προς αυτή τη κατεύθυνση λοιπόν, οι εξισώσεις (3.46) – (3.53) και (3.60) παίρνουν την παρακάτω, κατάλληλη για προσομοίωση, μορφή.

Εξισώσεις Μοντέλου 5^{ης} Τάξης Κατάλληλες για Προσομοίωση

Εξισώσεις υπολογισμού των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο – εξισώσεις κατάστασης των ροών στάτη και δρομέα

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} = v_{qs} - \frac{R_s X'_{rr}}{D} \psi_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{qr} \quad (3.67)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} = v_{ds} - \frac{R_s X'_{rr}}{D} \psi_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{dr} \quad (3.68)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} = v'_{qr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \psi'_{qr} - \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{R'_r X_m}{D} \psi_{qs} \quad (3.69)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} = v'_{dr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \psi'_{dr} + \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{R'_r X_m}{D} \psi_{ds} \quad (3.70)$$

Εξισώσεις υπολογισμού των ρευμάτων

$$i_{qs} = \frac{1}{D} (X'_{rr} \psi_{qs} - X_m \psi'_{qr}) \quad (3.71)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{D} (X'_{rr} \psi_{ds} - X_m \psi'_{dr}) \quad (3.72)$$

$$i'_{qr} = \frac{1}{D} (-X_m \psi_{qs} + X_{ss} \psi'_{qr}) \quad (3.73)$$

$$i'_{dr} = \frac{1}{D} (-X_m \psi_{ds} + X_{ss} \psi'_{dr}) \quad (3.74)$$

Εξισώσεις υπολογισμού της ηλεκτρικής ροπής

$$T_e = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (3.75)$$

ή αλλιώς

$$T_e = \psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr} \quad (3.76)$$

Εξίσωση κίνησης – εξίσωση κατάστασης για τη μεταβλητή Ω_{gen}

$$p\Omega_{gen} = \frac{T_e - T_{gen}}{2H} \quad (3.77)$$

Εξισώσεις υπολογισμού ενεργού και άεργου ισχύος στάτη

$$P_s = v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} \quad (3.78)$$

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \quad (3.79)$$

Εξισώσεις υπολογισμού ενεργού και άεργου ισχύος δρομέα

$$P_r = v'_{qr} i'_{qr} + v'_{dr} i'_{dr} \quad (3.80)$$

$$Q_r = v'_{qr} i'_{dr} - v'_{dr} i'_{qr} \quad (3.81)$$

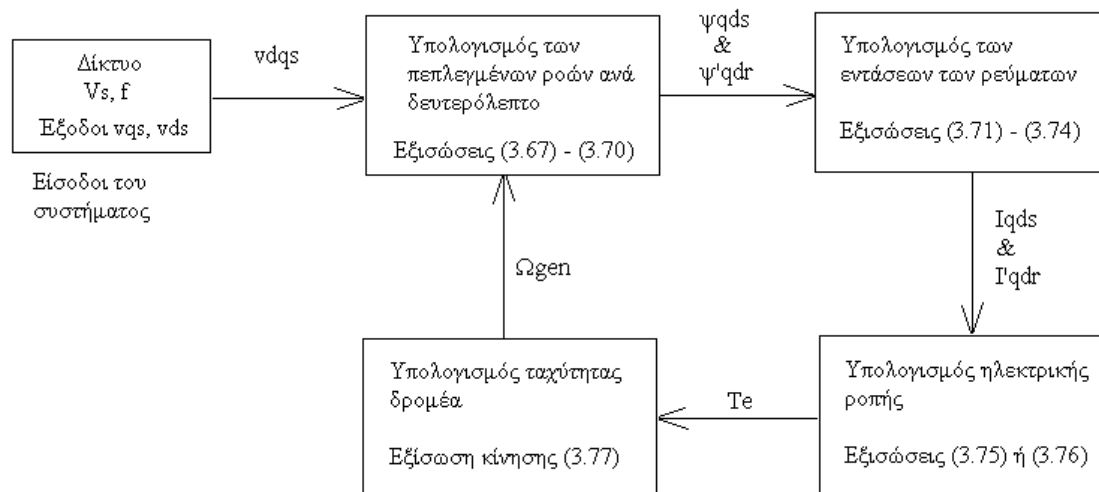
Εξισώσεις υπολογισμού συνολικής ενεργού και άεργου ισχύος της μηχανής

$$P = P_s + P_r = v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + v'_{qr} i'_{qr} + v'_{dr} i'_{dr} \quad (3.82)$$

$$Q = Q_s + Q_r = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} + v'_{qr} i'_{dr} - v'_{dr} i'_{qr} \quad (3.83)$$

Αξιοσημείωτο αναφοράς είναι ότι η συνολική ενεργό και άεργο ισχύ που υπολογίζονται μέσω των σχέσεων (3.82) και (3.83) αντίστοιχα, δεν αποτελούν απαραίτητα και την ισχύ η οποία εγχέεται στο δίκτυο. Η ισχύ η οποία τελικά ανταλλάσσεται με το δίκτυο εξαρτάται από τους μετατροπείς ισχύος, τη DC σύνδεση μεταξύ τους καθώς επίσης και τη στρατηγική ελέγχου που εφαρμόζεται.

Με την ανωτέρω επεξεργασία οι εξισώσεις λειτουργίας της μηχανής έχουν έλθει στο χώρο κατάστασης. Ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων καθώς και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα. Οι είσοδοι του συστήματος είναι οι τάσεις των ακροδεκτών v_{as} , v_{bs} , v_{cs} ή ισοδύναμα οι τάσεις v_{qs} , v_{ds} καθώς και η μηχανική ροπή στον άξονα. Οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, αλλά η πολυπλοκότητά τους έχει μειωθεί σημαντικά. Ο υπολογιστής επιλύει τις εξισώσεις και υπολογίζει τις πεπλεγμένες ροές και τη γωνιακή ταχύτητα. Ακολούθως, υπολογίζει τις εντάσεις της μηχανής βάσει των αντίστοιχων σχέσεων, δίνοντας τις εντάσεις ακροδεκτών της γεννήτριας i_{qs} , i_{ds} ή ισοδύναμα τις i_{as} , i_{bs} , i_{cs} . Τελικά, το μοντέλο είναι πέμπτου βαθμού, με τις ακόλουθες μεταβλητές κατάστασης: ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} , ψ'_{dr} και Ω_{gen} . Σχηματικά, η ροή των σημάτων παρουσιάζεται στο σχήμα (3.10).



Σχήμα 3.10 Σχηματική απεικόνιση του τρόπου επίλυσης των εξισώσεων.

Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης που μοντελοποιήθηκε δίνονται στο παρακάτω πίνακα (3.2):

Χαρακτηριστικά ΓΕΔΤ	Συμβολισμός	Τιμή
Αριθμός πόλων	P	4
Ταχύτητα γεννήτριας	N_{gen}	900 – 2000 rpm
Επαγωγή μαγνήτισης	L_m	3 α.μ.
Επαγωγή στάτη	$L_{s\sigma}$	0.1 α.μ.
Επαγωγή δρομέα ανηγμένη στο στάτη	$L'_{r\sigma}$	0.08 α.μ.
Αντίσταση στάτη	R_s	0.01 α.μ.
Αντίσταση δρομέα ανηγμένη στο στάτη	R'_r	0.01 α.μ.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης που μοντελοποιήθηκε.

3.2.3.5 Προσομοίωση του Δυναμικού Μοντέλου 3^{ης} τάξης σε Υπολογιστή

Βασική διαφορά του μοντέλου 3^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης αποτελεί η αγνόηση των μεταβατικών του στάτη. Συγκεκριμένα, οι χρονικές παράγωγοι των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στατη ψ_{qs} , και ψ_{ds} αγνοούνται με αποτέλεσμα να ισχύουν οι εξισώσεις (3.61) – (3.65) για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} , ψ'_{dr} και της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής Ω_{gen} της γεννήτριας.

Ακολουθώντας παρόμοια διαδικασία με αυτή της προηγούμενης παραγράφου, οι εξισώσεις (3.61) – (3.64) του δυναμικού μοντέλου 3^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης γράφονται όπως παρακάτω.

Λύνοντας της εξίσωση (3.61) ως προς την πεπλεγμένη ροή ανά δευτερόλεπτο ψ_{ds} έχουμε:

$$\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} = v_{qs} - R_s \frac{X'_{rr}}{D} \psi_{qs} + \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{qr} \quad (3.84)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω έκφραση της ψ_{ds} στην εξίσωση (3.62) και λύνοντας ως προς την ψ_{qs} έχουμε:

$$\left[\frac{\omega_e^2 D^2 + \omega_b^2 R_s^2 (X'_{rr})^2}{\omega_e \omega_b D^2} \right] \psi_{qs} = -v_{ds} + \frac{R_s X'_{rr}}{D} \frac{\omega_b}{\omega_e} v_{qs} + \frac{R_s^2 X'_{rr} X_m}{D^2} \frac{\omega_b}{\omega_e} \psi'_{qr} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{dr} \quad (3.85)$$

Οι εξισώσεις (3.63) και (3.64) για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του δρομέα ψ'_{qr} και ψ'_{dr} του μοντέλου, παραμένουν αμετάβλητες.

Επομένως, για την επίλυση τους από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή έχουν την ίδια μορφή με αυτή των εξισώσεων (3.69) και (3.70) του μοντέλου 5^{ης} τάξης. Το ίδιο ισχύει και για την εξίσωση κίνησης (3.65) του μοντέλου 3^{ης} τάξης καθώς και αυτή, ως αμετάβλητη, παραμένει ίδια με την (3.77) του μοντέλου 5^{ης} τάξης.

Ανακεφαλαιώνοντας, και λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω το μοντέλο τρίτης τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης διέπεται από τις παρακάτω αλγεβρικές και ολοκληρωτικές εξισώσεις:

Εξισώσεις Μοντέλου 3^{ης} Τάξης Κατάλληλες για Προσομοίωση

Εξισώσεις υπολογισμού των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο – εξισώσεις κατάστασης των ροών στάτη και δρομέα

$$\frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} = v_{qs} - R_s \frac{X'_{rr}}{D} \psi_{qs} + \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{qr} \quad (3.86)$$

$$\left[\frac{\omega_e^2 D^2 + \omega_b^2 R_s^2 (X'_{rr})^2}{\omega_e \omega_b D^2} \right] \psi_{qs} = -v_{ds} + \frac{R_s X'_{rr}}{D} \frac{\omega_b}{\omega_e} v_{qs} + \frac{R_s^2 X'_{rr} X_m}{D^2} \frac{\omega_b}{\omega_e} \psi'_{qr} - \frac{R_s X_m}{D} \psi'_{dr} \quad (3.87)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} = v'_{qr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \psi'_{qr} - \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{R'_r X_m}{D} \psi_{qs} \quad (3.88)$$

$$\frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} = v'_{dr} - \frac{R'_r X_{ss}}{D} \psi'_{dr} + \left(\frac{\omega_e - \Omega_{gen}}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{R'_r X_m}{D} \psi_{ds} \quad (3.89)$$

Εξίσωση κίνησης – εξίσωση κατάστασης για τη μεταβλητή Ω_{gen}

$$p \Omega_{gen} = \frac{T_e - T_{gen}}{2H} \quad (3.90)$$

Με την ανωτέρω επεξεργασία οι εξισώσεις λειτουργίας της μηχανής έχουν έλθει στο χώρο κατάστασης. Ως μεταβλητές κατάστασης θεωρούνται οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο των τυλιγμάτων του δρομέα ψ'_{qr} και ψ'_{dr} καθώς και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα Ω_{gen} . Επομένως, αναμενόμενα πρόκειται για ένα μοντέλο 3^{ης} τάξης.

Οι είσοδοι του συστήματος και εδώ είναι οι τάσεις των ακροδεκτών v_{as} , v_{bs} , v_{cs} ή ισοδύναμα οι τάσεις v_{qs} , v_{ds} καθώς και η μηχανική ροπή στον άξονα. Για τον υπολογισμό των εντάσεων i_{qs} , i_{ds} , i'_{qr} και i'_{dr} , της ηλεκτρικής ροπής T_e , της ενεργού

P_s και άεργου Q_s ισχύος στάτη, της ενεργού P_r και άεργου Q_r ισχύος δρομέα αλλά και της συνολικής παραγόμενης ενεργού P και άεργου Q ισχύος της μηχανής, ισχύουν οι ίδιες ακριβώς εξισώσεις με το μοντέλο 5^{ης} τάξης, δηλαδή οι (3.71) – (3.76) και (3.78) – (3.83). Σχηματικά, η ροή των σημάτων είναι ακριβώς ίδια με αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα (3.10) για το μοντέλο πέμπτης τάξης.

3.3 Έλεγχος Ηλεκτρικού Συστήματος Γεννήτριας Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης

3.3.1 Συνολικό σύστημα ελέγχου Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης

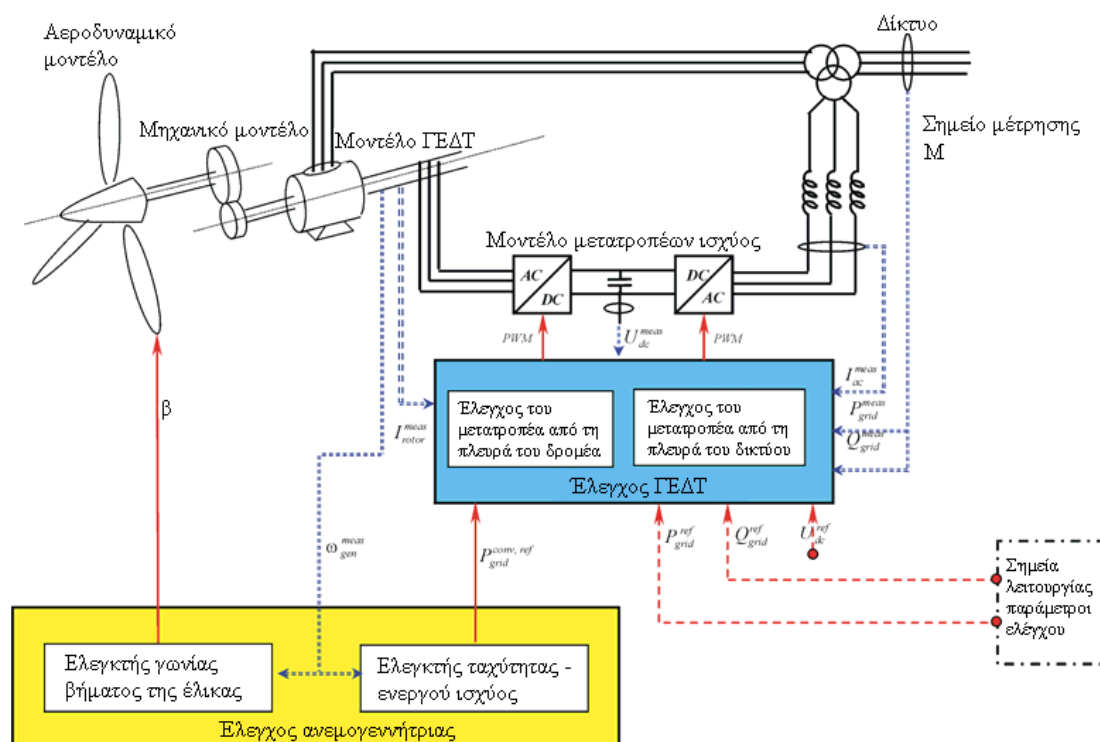
Το συνολικό σύστημα μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης περιλαμβάνει υποσυστήματα (αεροδυναμικό, μηχανικό, ηλεκτρικό) με διαφορετικές τιμές στις χρονικές σταθερές. Για παράδειγμα, τα δυναμικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα στο ηλεκτρικό σύστημα εξελίσσονται πιο γρήγορα από τα αντίστοιχα του μηχανικού. Η διαφορά αυτή των σταθερών χρόνου γίνεται ακόμη μεγαλύτερη στη περίπτωση του συστήματος ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας, εξαιτίας της παρουσίας των μετατροπέων ισχύος.

Ο έλεγχος του μηχανικού συστήματος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 και περιλαμβάνει ουσιαστικά τον ελεγκτή της γωνίας βήματος της έλικας. Ο ελεγκτής αυτός είναι ενεργός μόνο για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής και έχει ως βασικό σκοπό τον περιορισμό της ισχύος η οποία «εξάγεται» σε υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Σκοπός του συστήματος ελέγχου του ηλεκτρικού μέρους, δηλαδή της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, αποτελεί ο έλεγχος της άεργου ισχύος η οποία ανταλλάσσεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου καθώς επίσης και της ενεργού ισχύος η οποία δεσμεύεται από τον άνεμο και πρέπει να ακολουθεί την καμπύλη μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος. Η καμπύλη αυτή αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2 και απεικονίζεται στο σχήμα (2.10) του ίδιου κεφαλαίου.

Το σχήμα (3.11) απεικονίζει το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Δύο επίπεδα ελέγχου διακρίνονται:

- 1) Το σύστημα ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (έλεγχος ενεργού και άεργου ισχύος) το οποίο περιλαμβάνει τον έλεγχο των μετατροπέων ισχύος και
- 2) Το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας (έλεγχος ταχύτητας) το οποίο περιλαμβάνει τον ελεγκτή γωνίας βήματος καθώς επίσης και τον ελεγκτή ταχύτητας.



Σχήμα 3.11 Σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Το επίπεδο ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (μπλε περιοχή στο σχήμα 3.11) περιλαμβάνει τον ηλεκτρικό έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής και των μετατροπέων ισχύος. Αποτελείται από δύο κανάλια ελέγχου:

- Έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα. Περιλαμβάνει δύο ελεγκτές οι οποίοι ελέγχουν ανεξάρτητα την παραγόμενη στο σημείο M ενεργό και άεργο ισχύ.

- Έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου. Σκοπός αυτής της βαθμίδας ελέγχου αποτελεί ο έλεγχος της σταθερής τάσης της dc σύνδεσης ενώ εξασφαλίζει και την λειτουργία του συστήματος με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Η έγχυση της άεργου ισχύος στο δίκτυο σε αυτή τη περίπτωση γίνεται μόνο μέσω του στάτη.

Αντίθετα, το επίπεδο ελέγχου της ανεμογεννήτριας (κίτρινη περιοχή στο σχήμα 3.11) παρέχει τα απαιτούμενα σήματα για το επίπεδο ελέγχου της ηλεκτρικής γεννήτριας. Περιλαμβάνει δύο ελεγκτές:

- Τον ελεγκτή γωνίας βήματος (περιοριστή εξαγόμενης από τον άνεμο ισχύος) ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Σκοπός του συγκεκριμένου ελεγκτή αποτελεί ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, δηλαδή μεταβάλλει κατάλληλα τη γωνία βήματος β για να αποτρέψει την ταχύτητα περιστροφής από το να γίνει πολύ μεγάλη. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου (μικρότερες της ονομαστικής) είναι ανενεργός και διατηρεί την γωνία βήματος σταθερή ίση με $\beta_{opt} = 0^\circ$.
- Τον ελεγκτή ταχύτητας (Maximum Power Tracking Controller – MPT). Ο ελεγκτής αυτός παράγει το σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος $P_{grid}^{conv,ref}$ το οποίο στέλνεται στον ελεγκτή ενεργού ισχύος για τον έλεγχο του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα. Το παραγόμενο σήμα αναφοράς παράγεται μέσω της καμπύλης μεγιστοποίησης της ισχύος (Maximum Power Point Tracking Table) η οποία έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 2. Η χαρακτηριστική αυτή βασίζεται στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά του δρομέα της ανεμογεννήτριας και τα σημεία της αντιστοιχούν στη μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης (μεγιστοποίηση αεροδυναμικού συντελεστή C_p).

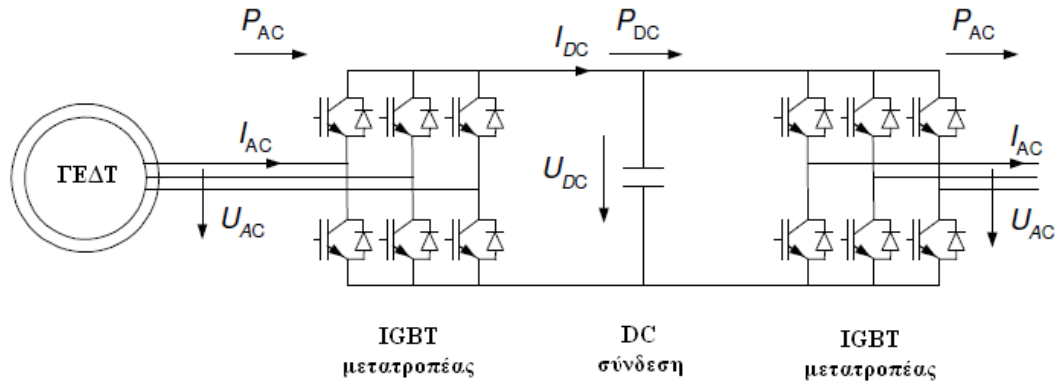
Τόσο ο ελεγκτής ταχύτητας όσο και ελεγκτής γωνίας βήματος της έλικας είναι ενεργοί στη στρατηγική περιορισμού της αεροδυναμικής ισχύος (ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής) ενώ μόνο ο πρώτος παραμένει ενεργός και σε αυτή της βελτιστοποίησης της αεροδυναμικής απόδοσης (χαμηλές ταχύτητες ανέμου).

Για παράδειγμα, για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, η ισχύς η οποία εξάγεται από τον άνεμο είναι μικρότερη του ορίου $P_{grid}^{rated,ref}$. Το επίπεδο ελέγχου της

ανεμογεννήτριας διατηρεί τη γωνία βήματος ίση με 0° (ελεγκτής γωνίας βήματος ανενεργός) ενώ ο ελεγκτής ταχύτητας παράγει με βάση την καμπύλη μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής ισχύος το σήμα αναφοράς για την ενεργό ισχύ $P_{grid}^{conv,ref}$ και επομένως και για την ηλεκτρική ροπή. Στη συνέχεια το σήμα αυτό «στέλνεται» στον ελεγκτή ενεργού ισχύος του μετατροπέα από την πλευρά του δρομέα με σκοπό τον έλεγχο του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας επαγωγής για την μεγιστοποίηση της παραγόμενης από τη γεννήτρια ισχύος. Με άλλα λόγια, ο ελεγκτής ενεργού ισχύος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα, λαμβάνει το σήμα αναφοράς για την ισχύ και προσαρμόζει κατάλληλα την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας επαγωγής με σκοπό τη διατήρηση της παραγόμενης ισχύος στην μέγιστη τιμή της η οποία παρέχεται από τον ελεγκτή ταχύτητας. Αντίθετα, στη περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει την ονομαστική, ο ελεγκτής γωνίας βήματος προσαρμόζει την γωνία β με τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς να μην υπερβαίνει την ονομαστική ενώ ο ελεγκτής ταχύτητας παράγει το σήμα αναφοράς της ισχύος το οποίο ισούται τώρα με την ονομαστική της τιμή. Ο ελεγκτής ενεργού ισχύος αναλαμβάνει να μεταβάλει (έστω και σε μικρό βαθμό) κατάλληλα την ταχύτητα περιστροφής ώστε η γεννήτρια επαγωγής να παράγει την ονομαστική της ισχύ.

3.3.2 Μοντέλο μετατροπέων ισχύος σε συνδεσμολογία back – to – back

Οι μετατροπείς ισχύος στο σύστημα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι συνδεδεμένοι στο κύκλωμα του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής. Από τη στιγμή που οι μετατροπείς πρέπει να εξασφαλίζουν ροή ισχύος και προς τις δύο κατευθύνσεις (από και προς το δίκτυο) απαραίτητο είναι να αποτελούνται από ενεργά στοιχεία. Το μοντέλο των μετατροπέων που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία χρησιμοποιεί ημιαγωγικούς διακόπτες IGBT όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.12 Μετατροπείς σε συνδεσμολογία *back – to – back*, εφοδιασμένοι με διακόπτες IGBT, στο κύκλωμα του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Το μοντέλο το οποίο εφαρμόστηκε στη παρούσα εργασία για κάθε ένα από τους δύο μετατροπείς, αντιπροσωπεύει αυτό ενός μετατροπέα πηγής τάσης ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (Sinusoidal Pulse Width Modulation Converter, SPWM Converter). Η τάση εξόδου στη περίπτωση της SPWM τεχνικής ελέγχεται από πλευράς RMS τιμής με την αυξομείωση του εύρους των πολλαπλών παλμών ενώ η συχνότητα ελέγχεται με την αυξομείωση της περιόδου του κύκλου λειτουργίας του μετατροπέα [46]. Οι ημιαγωγικοί διακόπτες IGBT θεωρούνται ιδανικοί χωρίς απώλειες. Οι μετατροπείς μοντελοποιήθηκαν με προσέγγιση στη θεμελιώδη συχνότητα, δηλαδή μόνο η θεμελιώδη ή βασική αρμονική συνιστώσα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα λήφθηκε υπόψη. Η προσέγγιση αυτή θεωρήθηκε κατάλληλη και επαρκή για μελέτες ανάλυσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές, η σχέση μεταξύ των AC και DC τάσεων του σχήματος (3.12) γράφονται ως εξής σε φυσικές μονάδες:

$$U_{ac}^{rms} = K_0 \times PWM \times U_{DC} \quad (3.91)$$

όπου U_{ac}^{rms} η *rms* τιμή της πολικής εναλλασσόμενης τάσης και *PWM* ο συντελεστής διαμόρφωσης εύρους παλμών για τον οποίο ισχύει:

$$0 \leq PWM \leq 1 \quad (3.92)$$

Η τιμή του συντελεστή K_0 εξαρτάται από την τεχνική διαμόρφωσης η οποία εφαρμόζεται. Η ημιτονοειδή, η οποία εφαρμόστηκε και στο μοντέλο της παρούσας εργασίας, αποτελεί τη συνήθη τεχνική διαμόρφωσης εύρους παλμών στις εφαρμογές

συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος γιατί έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των αρμονικών. Στη περίπτωση αυτή λοιπόν για το συντελεστή K_0 ισχύει:

$$K_0 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \quad (3.93)$$

Το σύστημα των μετατροπών θεωρήθηκε χωρίς απώλειες. Επομένως, εάν P_{ac} και P_{DC} η ισχύς στην AC και DC πλευρά αντίστοιχα ισχύει η επόμενη σχέση:

$$P_{ac} = P_{DC} = I_{DC} \times U_{DC} \quad (3.94)$$

Παρόλα αυτά, οι απώλειες μπορούν να μοντελοποιηθούν καθορίζοντας μια σειρά τριφασικών ωμικών αντιστάσεων σε κάθε μετατροπέα. Επίσης, οι μετατροπείς πηγής τάσης ημιτονοειδούς διαμόρφωσης εύρους παλμών (SPWM) συνδέονται συνήθως στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας ωμικής αντίστασης. Όμως, στο μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας οι μετατροπείς θεωρήθηκαν ιδανικοί χωρίς απώλειες.

Στην είσοδο του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα η εναλλασσόμενη τάση είναι η τάση του δρομέα U_r το μετρό της οποίας στο ανά μονάδα σύστημα δίνεται από την εξίσωση:

$$U_r = \sqrt{v_{qr}'^2 + v_{dr}'^2} \quad (3.95)$$

Όμως, για την ενσωμάτωση του μοντέλου των μετατροπών στο μοντέλο της συνολικού συστήματος το οποίο αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία, αναγκαία θεωρείται η έκφραση της σχέσης (3.91) στο ανά μονάδα σύστημα. Για αυτό το σκοπό και θεωρώντας ότι U_{DC}^B και $U_{ac,rotor}^B$ είναι οι τιμές βάσης για τη DC τάση και την AC φασική τάση του δρομέα, αντίστοιχα ισχύουν τα εξής:

$$U_r = \left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \frac{U_{DC}^B}{U_{ac,rotor}^B} \right) PWM \times U_{DC}^{\alpha.\mu.} \quad (3.96)$$

Η ισχύς η οποία ρέει στον μετατροπέα είναι ίση με την ισχύ του δρομέα P_r , η οποία κατά προσέγγιση δίνεται από το παρακάτω τύπο:

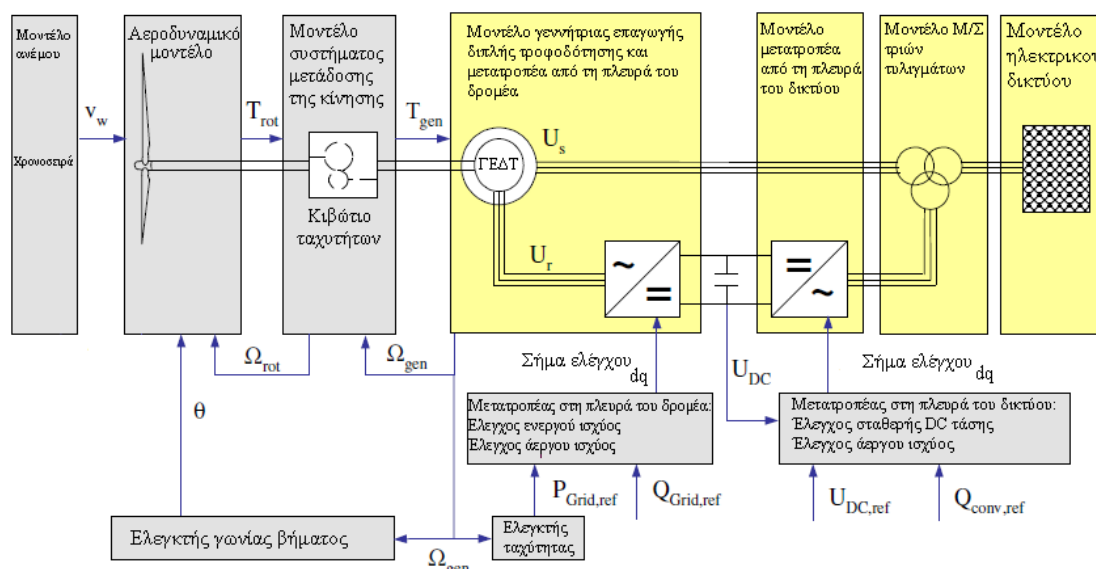
$$P_r = -sP_s \quad (3.97)$$

Αυτό σημαίνει ότι η ονομαστική ισχύ του μετατροπέα είναι αυτή που καθορίζει και το εύρος των επιτρεπόμενων ταχυτήτων του συστήματος της ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Μεγαλύτερη ονομαστική ισχύς (μεγαλύτερες διαστάσεις μετατροπέων) σημαίνει ότι περισσότερη ισχύ μπορεί να μεταφερθεί μέσω του μετατροπέα, δηλαδή μεγαλύτερη ολίσθηση μπορεί να επιτευχθεί. Επομένως, υπάρχει κάποια «διαμάχη», μεταξύ του οικονομικού όφελος της χρησιμοποίησης ενός μικρότερου, φθηνότερου μετατροπέα και του εύρους ταχυτήτων που μπορεί να επιτευχθεί. Γενικά, συνήθως αποτελεί ο σχεδιασμός των μετατροπέων ώστε να είναι ικανοί να χειριστούν το 1/3 της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, πράγμα το οποίο οδηγεί σε ένα εύρος επιτεύξιμων ταχυτήτων $\pm 30\%$ γύρω από τη σύγχρονη.

3.3.3 Έλεγχος των μετατροπέων

Ποικίλες στρατηγικές ελέγχου του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης έχουν αναπτυχθεί στη βιβλιογραφία [42], [47], [48]. Η στρατηγική ελέγχου η οποία εφαρμόζεται στη παρούσα εργασία είναι βασισμένη στο [43]. Ο μετατροπέας από τη πλευρά του δρομέα εγγυάται τη λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής ενώ επιτρέπει και τον ανεξάρτητο έλεγχο της παραγόμενης ενεργού και άεργου ισχύος. Μια γενική εικόνα για το συνολικό δυναμικό μοντέλο του συστήματος της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και το σύστημα ελέγχου του απεικονίζεται στο σχήμα (3.13). Το σύστημα ελέγχου στην κανονική χωρίς διαταραχές λειτουργία, μπορεί να διακριθεί σε δύο μπλοκ ελέγχου: στον έλεγχο των μετατροπέων ο οποίος αναλαμβάνει τον έλεγχο του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας και στον έλεγχο του μηχανικού συστήματος ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω του ελεγκτή γωνίας βήματος της έλικας όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Ο ελεγκτής του μηχανικού μέρους είναι ενεργός μόνο σε υψηλές ταχύτητες ανέμου (μεγαλύτερες της ονομαστικής) ενώ ο έλεγχος των μετατροπέων εγγυάται την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ισχύος σε ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής. Ο έλεγχος των μετατροπέων διακρίνεται με τη σειρά του σε δύο μπλοκ ελέγχου: στον μπλοκ ελέγχου του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα και σε αυτό του μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου. Ο έλεγχος του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα έχει ως σήμα εξόδου μια μεταβλητή τάσης του

δρομέα το οποίο στέλνεται στο μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ενώ ο έλεγχος του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου εγγυάται τη λειτουργία με σταθερή τη τάση της DC σύνδεσης και με μηδενική άεργο ισχύ (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος). Τα παραπάνω μπλοκ ελέγχου και η λειτουργία τους περιγράφονται με λεπτομέρεια στις ακόλουθες παραγράφους.



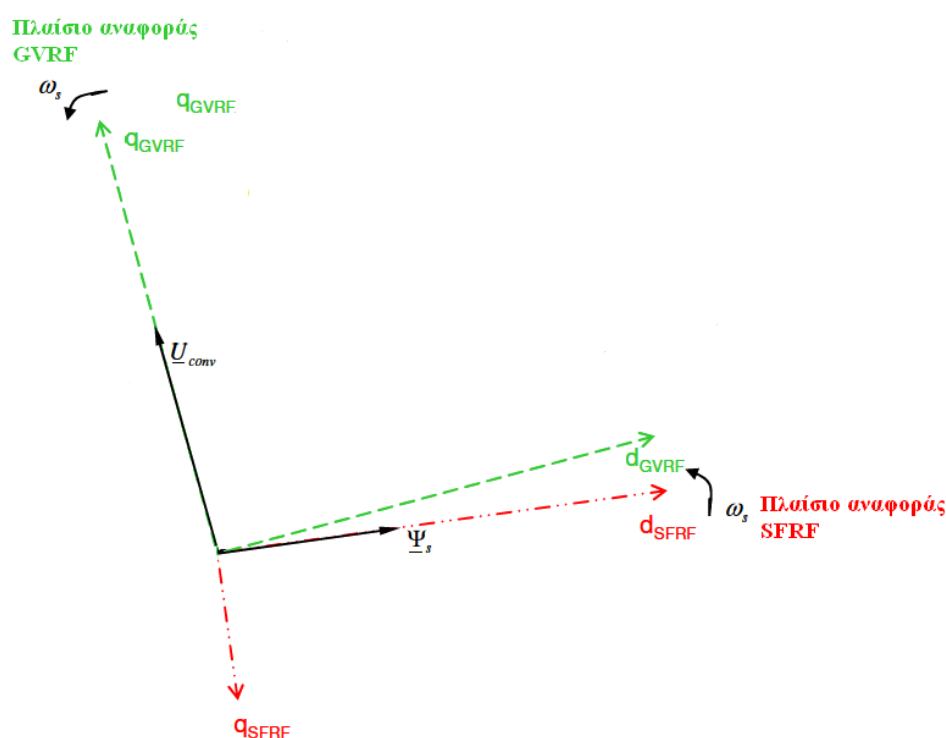
Σχήμα 3.13 Μοντέλο και στρατηγική ελέγχου της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

3.3.3.1 Περιγραφή πλαισίων αναφοράς τα οποία υιοθετήθηκαν για την υλοποίηση του ελέγχου των μετατροπέων

Ο έλεγχος των διάφορων συστημάτων γεννητριών γενικά επιτυγχάνεται μέσω της χρησιμοποίησης τεχνικών διανυσματικού έλεγχου. Οι τεχνικές αυτές βασίζονται στον έλεγχο των συνιστωσών στους d και q άξονες των διάφορων ηλεκτρικών μεγεθών (τάση, ρεύμα) της γεννήτριας. Τα τριφασικά ηλεκτρικά μεγέθη μετασχηματίζονται στις αντίστοιχες d και q συνιστώσες σύμφωνα με το επιλεγμένο πλαίσιο αναφοράς. Κάθε πλαίσιο αναφοράς ευθυγραμμίζεται στο χώρο σε ένα διάνυσμα μεταβλητών κατάστασης, το οποίο συμβολίζει συγκεκριμένες ηλεκτρικές ποσότητες της γεννήτριας και περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα διάφορα μεγέθη της γεννήτριας να μετασχηματίζονται από μεγέθη που μεταβάλλονται με ημιτονοειδή τρόπο σε σταθερούς όρους και επομένως ο επιτυχής έλεγχος επιτυγχάνεται με εύκολο και κατανοητό τρόπο. Πριν εξηγηθεί η στρατηγική

ελέγχου που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη εργασία, εισάγονται τα διάφορα αναγκαία για τον έλεγχο πλαίσια αναφοράς που υιοθετήθηκαν.

Στη γενική περίπτωση, το πλαίσιο αναφοράς επιλέγεται ώστε να η θέση των αξόνων του πλαισίου να συμπίπτουν με τη μαγνητική ροή της μηχανής. Ο τύπος αυτός διανυσματικού ελέγχου είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως έλεγχος προσανατολισμένος στο πεδίο (Field Oriented Control). Στη παρούσα εργασία, η τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος η οποία παράγεται από τη μηχανή. Τα διάφορα πλαίσια αναφοράς, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης παρουσιάζονται στο σχήμα (3.14).



Σχήμα 3.14 Πλαίσια αναφοράς τα οποία υιοθετούνται για τον έλεγχο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Πλαίσιο προσανατολισμένο στην μαγνητική ροή του στάτη της μηχανής (Stator flux reference frame, SFO).

Πρόκειται για το πλαίσιο στο οποίο είναι εκφρασμένες και οι βασικές εξισώσεις της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Στο πλαίσιο SFO η θέση του άξονα d (direct axis) συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη. Καθώς το διάνυσμα της ροής του στάτη περιστρέφεται με την ηλεκτρική συχνότητα του στάτη (σύγχρονη)

όλα τα μεγέθη του στάτη (πεπλεγμένες ροές, ρεύμα και τάση) μετασχηματίζονται σε σταθερούς όρους στο πλαίσιο αυτό. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα εφαρμόζεται στο πλαίσιο αναφοράς *SFO*. Αμελώντας τις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων του στάτη, η πεπλεγμένη ροή του στάτη είναι το ολοκλήρωμα της τάσης του στάτη. Επομένως, το διάνυσμα των τάσεων του στάτη της μηχανής είναι τότε κάθετο στο διάνυσμα των πεπλεγμένων ροών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το διάνυσμα των τάσεων του στάτη να έχει μόνο q συνιστώσα στο πλαίσιο *SFO*. Η ενεργός και άεργος ισχύς του στάτη μπορούν σε αυτή τη περίπτωση να υπολογιστούν ως εξής:

$$P_s = v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} = v_{qs}i_{qs} \quad (3.98)$$

$$Q_s = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} = v_{qs}i_{ds} \quad (3.99)$$

όπου $v_{ds} = 0$ στο πλαίσιο αναφοράς *SFO*.

Πλαίσιο προσανατολισμένο στην τερματική τάση του ζυγού σύνδεσης για τον έλεγχο του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου (Grid side converter voltage oriented reference frame, *GVRF*).

Ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου πραγματοποιείται σε ένα πλαίσιο αναφοράς στο οποίο η θέση του άξονα q συμπίπτει με το διάνυσμα της εναλλασσόμενης τερματικής τάσης του ζυγού σύνδεσης. Σε αυτή τη περίπτωση, η τάση του μετατροπέα u_{conv} αποτελείται μόνο από μια q συνιστώσα η οποία είναι ίση με την τερματική τάση U_s . Η τερματική τάση U_s είναι ίση με τη σειρά της με τη q συνιστώσα της τάσης του στάτη στο πλαίσιο *SFO*, v_{qs} . Επομένως, οδηγούμαστε στις παρακάτω εξισώσεις:

$$P_{conv} = u_{conv,d} \times i_{conv,d} + u_{conv,q} \times i_{conv,q} = v_{qs} \times i_{conv,q} \quad (3.100)$$

$$Q_{conv} = u_{conv,q} \times i_{conv,d} - u_{conv,d} \times i_{conv,q} = v_{qs} \times i_{conv,d} \quad (3.101)$$

όπου $v_{ds} = 0$ στο πλαίσιο *GVRF*.

Σκοπός του ελέγχου του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου αποτελεί η διατήρηση της συνεχούς τάσης της DC σύνδεσης σε σταθερή τιμή καθώς επίσης και ο της άεργου ισχύος που μεταφέρεται μέσω του μετατροπέα, η τιμή της οποίας πρέπει να

είναι μηδέν (λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος). Μέσω των εξισώσεων (3.100) και (3.101) φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η DC τάση μπορεί να ελεγχτεί μέσω της q συνιστώσας του ρεύματος του μετατροπέα $i_{conv,q}$, ενώ η λειτουργία με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος μπορεί να εγγυηθεί μέσω του ελέγχου της d συνιστώσας του ρεύματος του μετατροπέα $i_{conv,d}$.

3.3.3.2 Έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα

Ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα πραγματοποιείται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς SFO . Σκοπός του αποτελεί ο έλεγχος της παραγόμενης από τη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ενεργού και άεργου ισχύος. Επομένως περιλαμβάνει δύο ελεγκτές: τον ελεγκτή ενεργού και τον ελεγκτή άεργου ισχύος. Τα σήματα εξόδου των δύο αυτών ελεγκτών είναι η τάση U_r του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης, δηλαδή οι συνιστώσες της τάσης του δρομέα στους d και q άξονες του πλαισίου SFO , u_{dr} και u_{qr} αντίστοιχα. Τα σήματα αυτά στέλνονται στο μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών της μηχανής και της ταχύτητας περιστροφής της.

Η συνιστώσα της τάσης του δρομέα η οποία είναι σε φάση με την τάση του στάτη, δηλαδή στη περίπτωση μας η u_{qr} , καθορίζει την ενεργό ισχύ ενώ η άεργος ισχύς ελέγχεται από τη d συνιστώσα της τάσης του δρομέα, u_{dr} . Επομένως, ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα, προσαρμόζει τις q και d συνιστώσες της τάσης του δρομέα με σκοπό τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα. Η ενεργός και άεργος ισχύς δεν ελέγχονται με άμεσο τρόπο αλλά μέσω των εφαρμοζόμενων ρευμάτων στο δρομέα.

Ελεγκτής ταχύτητας και ενεργού ισχύος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στη παρούσα εργασία ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα υλοποιείται στο σύγχρονο πλαίσιο SFO . Το σημείο αναφοράς της ενεργού ισχύος παράγεται από τον ελεγκτή ταχύτητας δρομέα, με βάση την πραγματική τιμή της ταχύτητας του δρομέα. Αν αμεληθεί η αντίσταση του στάτη και θεωρηθεί ότι ο άξονας - d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη, που οδηγεί στο να ισούται η u_{qs} με την τερματική τάση και η u_{ds} με μηδέν, η ηλεκτρική ροπή

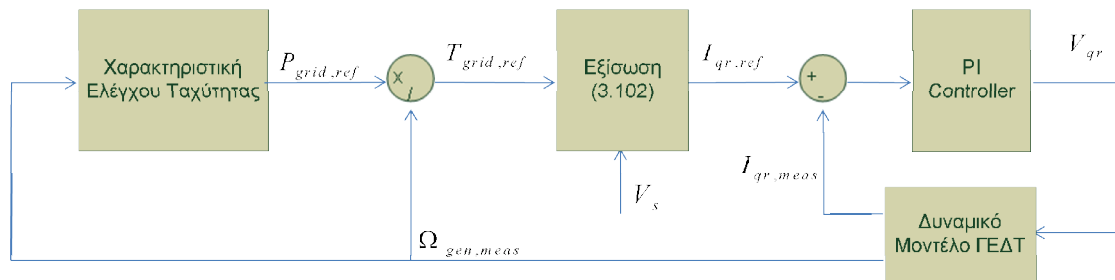
εξαρτάται από τη συνιστώσα q του ρεύματος δρομέα. Η ακόλουθη σχέση μεταξύ ηλεκτρικής ροπής και της συνιστώσας του ρεύματος i_{qr} προκύπτει από τις εξισώσεις της μηχανής [52]:

$$i_{qr} = -\frac{X_{ss} T_e}{X_m V_s} \quad (3.102)$$

όπου

V_s	η τερματική τάση	$X_{s\sigma}$	η αντίδραση σκέδασης στάτη
i_{qr}	η q συνιστώσα ρεύματος δρομέα	X_m	η αντίδραση μαγνήτισης
T_e	η ηλεκτρομαγνητική ροπή	$X_{ss} = X_{s\sigma} + X_m$	

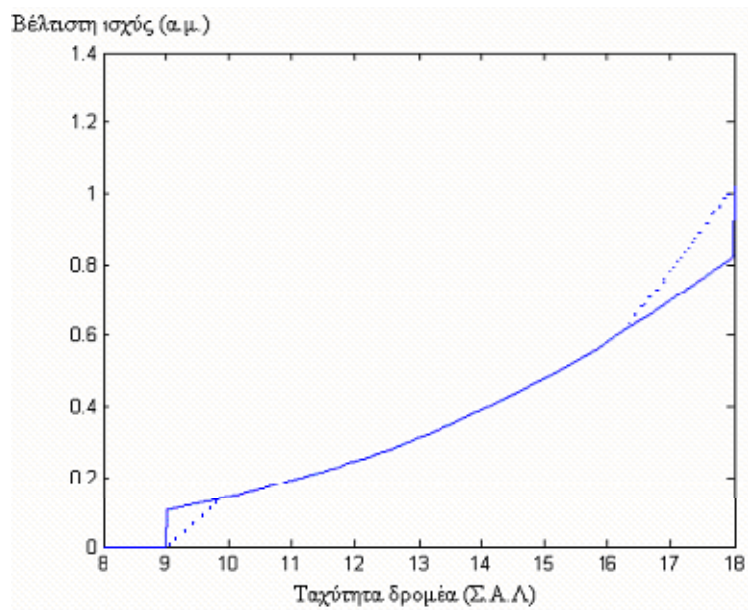
Τα μοντέλα των ελεγκτών ταχύτητας και ενεργού ισχύος τα οποία υλοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία καθώς επίσης και η διασύνδεση τους με το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα (3.15). Τα πραγματικά ή αλλιώς μετρούμενα μεγέθη της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και του ρεύματος, $\Omega_{gen,meas}$ και $i_{qr,meas}$ αντίστοιχα, παράγονται από το μοντέλο 5^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Χρησιμοποιώντας την πραγματική τιμή της ταχύτητας του δρομέα, ένα σημείο αναφοράς για την ηλεκτρική ροπή $T_{eGrid,ref}$ μπορεί να εξαχθεί από το σημείο αναφοράς της ενεργού ισχύος $P_{Grid,ref}$ που παράγεται από τον ελεγκτή της ταχύτητας του δρομέα. Στη συνέχεια, παράγεται μέσω της εξίσωσης (3.102) ένα σήμα αναφοράς για τη q συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα, $i_{qr,ref}$. Τέλος το σήμα αυτό στέλνεται σε έναν PI ελεγκτή έξοδος του οποίου αποτελεί η q συνιστώσα της τάσης του δρομέα u_{qr} , πράγμα αναμενόμενο σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση. Το σήμα αυτό εξόδου «επιστρέφει» πίσω στο μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης με σκοπό τον εκ νέου υπολογισμό των πραγματικών τιμών της ταχύτητας περιστροφής και της q συνιστώσας του ρεύματος του δρομέα.



Σχήμα 3.15 Μοντέλα του ελεγκτή ταχύτητας και ενεργού ισχύος και η διασύνδεση τους με το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Από τη μέτρηση της ταχύτητας του δρομέα, η ισχύς και η ροπή που αντιστοιχούν σε βέλτιστη λειτουργία προκύπτουν από τη χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας που φαίνεται στο σχήμα (3.16). Η καμπύλη αυτή ορίζεται από τα σημεία μεγιστοποίησης της αεροδυναμικής απόδοσης. Με χρήση αυτής της χαρακτηριστικής για ταχύτητες ανέμου μικρότερες της ονομαστικής, η ταχύτητα της περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας και επομένως και η ενεργός ισχύς προσαρμόζονται αυτόματα με σκοπό τη λειτουργία του αεροδυναμικού συστήματος με βέλτιστο λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου προς της ταχύτητα του ανέμου καθώς επίσης και μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή. Σε αυτό το εύρος ταχυτήτων του ανέμου ο μηχανισμός αλλαγής της γωνίας βήματος είναι ανενεργός και η γωνία βήματος διατηρείται σταθερή στην βέλτιστη τιμή της, η οποία είναι ίση με για την ανεμογεννήτρια η οποία μοντελοποιήθηκε στη παρούσα εργασία.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η καμπύλη αυτή προκύπτει από τη σχέση της θέτοντας για όλες τις ταχύτητες ανέμου μέχρι την ονομαστική (η συνεχής γραμμή στο σχήμα 3.16). Επομένως η βέλτιστη αεροδυναμική ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας περιστροφής για χαμηλές ταχύτητες ανέμου (μικρότερες της ονομαστικής) όπως φαίνεται και στο σχήμα (3.16). Παρ' όλα αυτά, με σκοπό να έχουμε μία – προς – μία σχέση μεταξύ ταχύτητας δρομέα και ισχύος, η καμπύλη που εφαρμόζεται είναι η διακεκομμένη του ίδιου σχήματος. Με άλλα λόγια, χρησιμοποιούμε την διακεκομμένη καμπύλη γιατί η ηλεκτρική γεννήτρια παράγει την ονομαστική της ισχύ προτού η εξαγόμενη από τον άνεμο αεροδυναμική ισχύς γίνει ίση με την ονομαστική. Ο τρόπος υπολογισμού του συνόλου των σημείων της χαρακτηριστικής αυτής έχει περιγραφεί λεπτομερώς στο κεφάλαιο 2 και έχει γίνει με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab R2009b.



Σχήμα 3.16 Χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας.

Ελεγκτής άεργου ισχύος

Όπως και στη περίπτωση του ελεγκτή ενεργού ισχύος του σχήματος (3.15), ο έλεγχος της άεργου ισχύος λαμβάνει χώρα στο σύγχρονο πλαίσιο *SFO*. Η άεργος ισχύς που εισέρχεται στο στάτη της μηχανής εξαρτάται από την d - συνιστώσα του ρεύματος δρομέα. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις της μηχανής και πάλι αμελώντας την αντίσταση του στάτη και θεωρώντας ότι ο άξονας - d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη, μπορεί να αποδειχθεί ότι [52]:

$$i_{dr} = \frac{V_s}{X_m} \frac{\omega_b}{\omega_e} - \frac{X_{ss}}{X_m} \frac{Q_s}{V_s} \quad (3.103)$$

V_s	η τερματική τάση	$X_{s\sigma}$	η αντίδραση σκέδασης στάτη
i_{dr}	η d συνιστώσα ρεύματος δρομέα	X_m	η αντίδραση μαγνήτισης
T_e	η ηλεκτρομαγνητική ροπή	$X_{ss} = X_{s\sigma} + X_m$	
ω_b	η βασική ηλεκτρική ταχύτητα	ω_e	η ηλεκτρική συχνότητα του δικτύου

Η άεργος ισχύς η οποία παράγεται από τη γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης αποτελείται από το άθροισμα της άεργου ισχύος του στάτη και του δρομέα, Q_s και Q_r αντίστοιχα. Στη παρούσα εργασία, επιθυμητή είναι η λειτουργία του μοντελοποιημένου συστήματος με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο ελεγκτής άεργου ισχύος που υλοποιήθηκε στη παρούσα εργασία [43], μπορεί να λειτουργήσει είτε σε

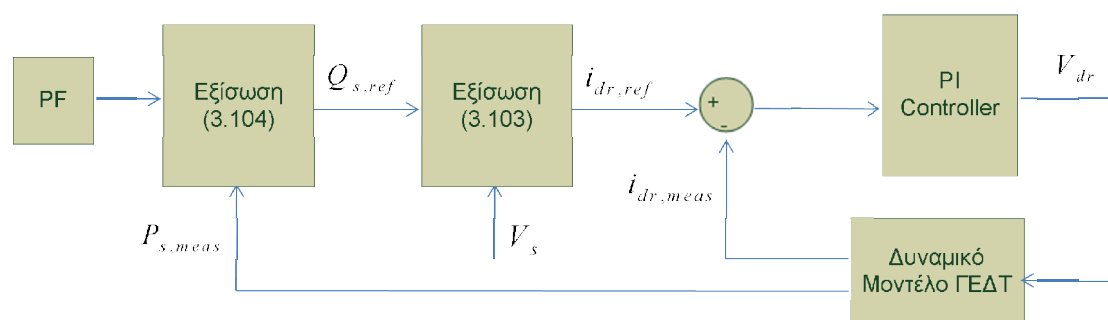
κατάσταση σταθερού συντελεστή ισχύος είτε σε κατάσταση Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης (βλέπε κεφάλαιο 8).

Στη λειτουργία με σταθερό συντελεστή ισχύος (επιλέγεται από το χρήστη, συνήθως είναι ίσος με τη μονάδα) μια τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ του στάτη παράγεται μέσω της πραγματικής - μετρούμενης τιμής της ενεργού ισχύος του στάτη και του επιλεγμένου σταθερού συντελεστή ισχύος, χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση παρακάτω σχέσης:

$$(3.104)$$

όπου η τιμή του επιλεγμένου συντελεστή ισχύος.

Στη συνέχεια μέσω της σχέσης (3.103) παράγεται το σήμα αναφοράς για τη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα, το οποίο «στέλνεται» μαζί με την πραγματική - μετρούμενη τιμή σε έναν αναλογικό - ολοκληρωτικό ελεγκτή. Έξοδος του ελεγκτή αυτού αποτελεί η συνιστώσα της τάσης του δρομέα. Το σήμα αυτό εξόδου «επιστρέφει» πίσω στο μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης με σκοπό τον εκ νέου υπολογισμό των πραγματικών τιμών ενεργού ισχύος του στάτη και της συνιστώσας του ρεύματος του δρομέα. Το μοντέλο του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος το οποίο υλοποιήθηκε στη παρούσα εργασία καθώς επίσης και η διασύνδεση του με το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.17 Μοντέλο του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος και η διασύνδεση του με το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι οι πραγματικοί ελεγκτές ενεργού και άεργου ισχύος μπορούν να διαφέρουν από το παραπάνω μοντέλο. Παρ' όλα αυτά,

αυτό ισχύει για όλα τα στοιχεία του ηλεκτρικού συστήματος: είναι ένα γενικό πρόβλημα στις προσομοιώσεις ηλεκτρικού συστήματος ότι η δομή και οι παράμετροι των μοντέλων των στοιχείων δεν είναι διαθέσιμα. Το πρόβλημα αυτό επίσης ενισχύεται από το γεγονός ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξαρτώνται σε ένα βαθμό μόνο από την ακριβή δομή και τις παραμέτρους των επιμέρους ελεγκτών. Οι παράμετροι των παραμέτρων των παραπάνω PI ελεγκτών που χρησιμοποιήθηκαν είναι: $K_p = 50$, $K_i = 5$.

3.3.3.3 Έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου

Σκοπός του ελέγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου αποτελεί η διατήρηση της τάσης της DC σύνδεσης σταθερή και η εξασφάλιση της λειτουργίας του συστήματος με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Η άεργος ισχύς στο κύκλωμα του δρομέα ελέγχεται επομένως με τέτοιο τρόπο ώστε να ισούται με μηδέν, ούτως ώστε η ανταλλαγή άεργου ισχύος με το δίκτυο να γίνεται μόνο μέσω του στάτη. Όπως και στη περίπτωση του ελέγχου του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα, ο έλεγχος και εδώ πραγματοποιείται έμμεσα, μέσω των εφαρμοζόμενων στον μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου ρευμάτων. Ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δικτύου περιλαμβάνει τους ελεγκτές DC τάσης και άεργου ισχύος του κυκλώματος του δρομέα οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο έλεγχος του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου πραγματοποιείται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς GVRF. Επομένως, ισχύουν οι εξισώσεις (3.100) και (3.101) οι οποίες επαναλαμβάνονται εδώ για ευκολία:

$$P_{conv} = v_{qs} \times i_{conv,q} \quad (3.105)$$

$$Q_{conv} = v_{qs} \times i_{conv,d} \quad (3.106)$$

με $v_{ds} = 0$ στο πλαίσιο GVRF.

Ελεγκτής άεργου ισχύος του κυκλώματος του δρομέα

Συνήθως κατά τη λειτουργία του μετατροπέα εξασφαλίζεται ότι δεν ανταλλάσσεται άεργος ισχύς με το δίκτυο [52], οπότε ισχύει:

$$Q_{conv} = 0 \Rightarrow v_{qs} \times i_{conv,d} = 0 \Rightarrow i_{conv,d} = 0 \quad (3.107)$$

Ελεγκτής της DC τάσης

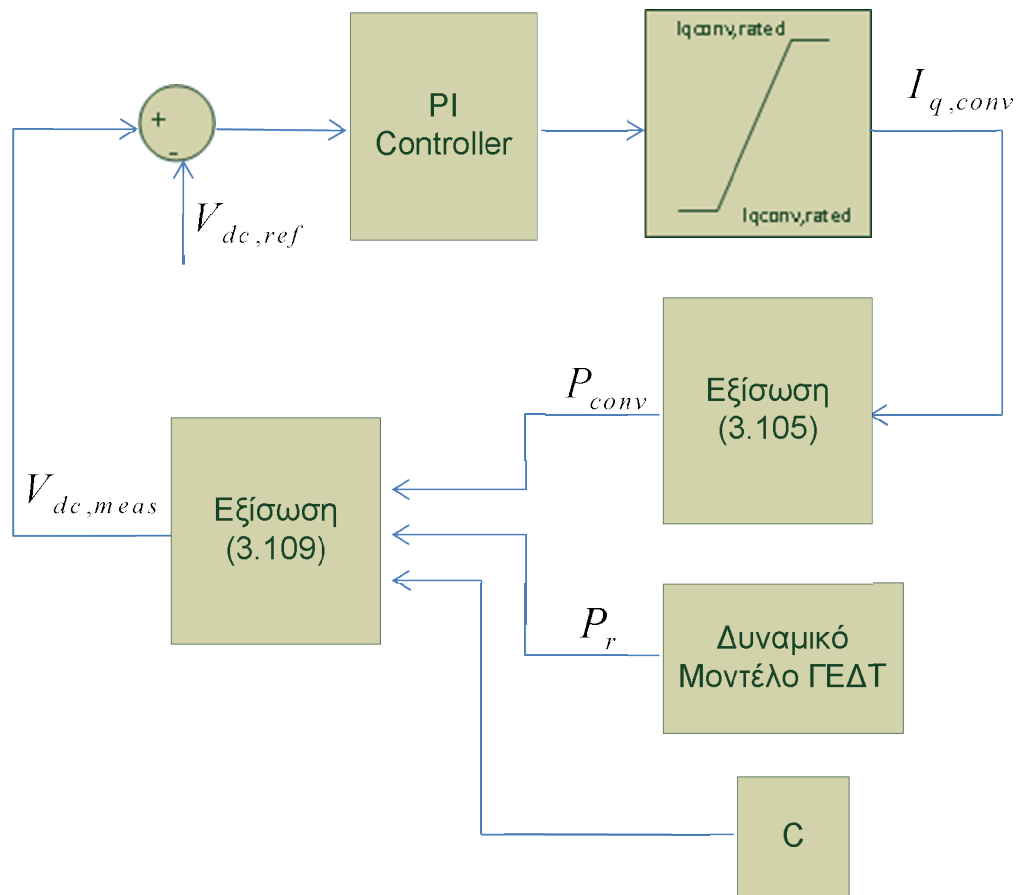
Χρησιμοποιώντας την γνωστή σχέση για τους πυκνωτές, έχοντας μοντελοποιήσει την σύνδεση συνεχούς τάσης με χωρητικότητα C κατάλληλης τιμής προκύπτει:

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{P_{conv} - P_r}{V_{dc}} \quad (3.108)$$

όπου με V_{dc} η τιμή της συνεχούς τάσης και P_r η ενεργός ισχύς που εισέρχεται στο κύκλωμα του δρομέα της γεννήτριας από το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής. Η τιμή της χωρητικότητας C έχει προκύψει μετά από κανονικοποίηση ($C = 0.0014s$ σε δευτερόλεπτα – $4500\mu F$ για $1200V DC$ [43]). Η σχέση (3.108) γράφεται λύνοντας ως προς την DC τάση V_{dc} :

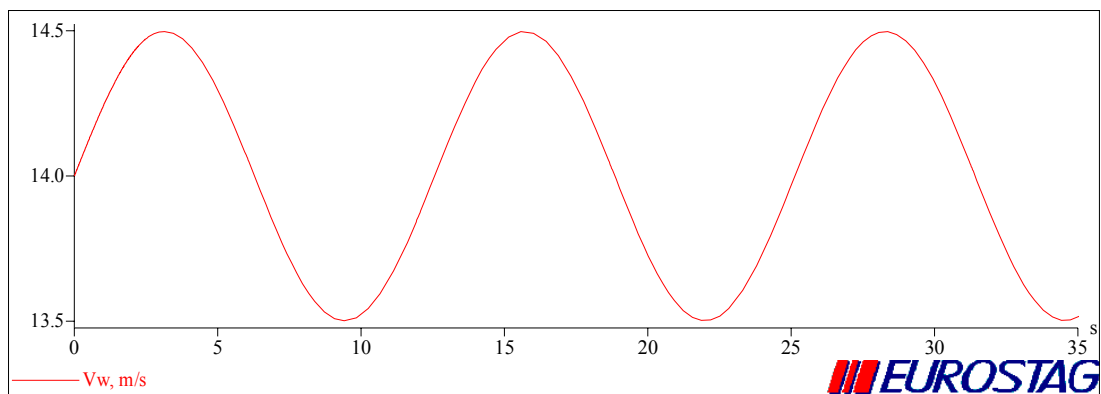
$$V_{dc} = \frac{P_{conv} - P_r}{C} \int \frac{1}{V_{dc}} dV_{dc} \quad (3.109)$$

Ο ελεγκτής της τάσης της DC σύνδεσης μοντελοποιήθηκε στη παρούσα εργασία όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (3.18). Το πραγματικό – μετρούμενο σήμα της συνεχούς τάσης $V_{dc,meas}$ παράγεται από τα πραγματικά σήματα των P_{conv} και P_r σύμφωνα με τη σχέση (3.109). Τα σήματα των P_{conv} και P_r παράγονται μέσω της σχέσης (3.105) και του μοντέλου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης αντίστοιχα. Στη συνέχεια, η μετρούμενη τιμή της συνεχούς τάσης $V_{dc,meas}$ και το σήμα αναφοράς της $V_{dc,ref}$ «στέλνονται» σε ένα PI ελεγκτή έξοδος του οποίου αποτελεί το ρεύμα $i_{conv,q}$. Το ρεύμα αυτό χρησιμεύει στον εκ νέου υπολογισμό της P_{conv} (σχέση 3.105) που με τη σειρά της χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της μετρούμενης DC τάσης σύμφωνα με τη σχέση (3.109). Συμπερασματικά, ο έλεγχος της τάσης της DC σύνδεσης πραγματοποιείται ουσιαστικά μέσω του ελέγχου της q συνιστώσας του ρεύματος του μετατροπέα $i_{conv,q}$ η οποία καθορίζει την ισχύ του μετατροπέα P_{conv} και επομένως και την ελεγχόμενη DC τάση.

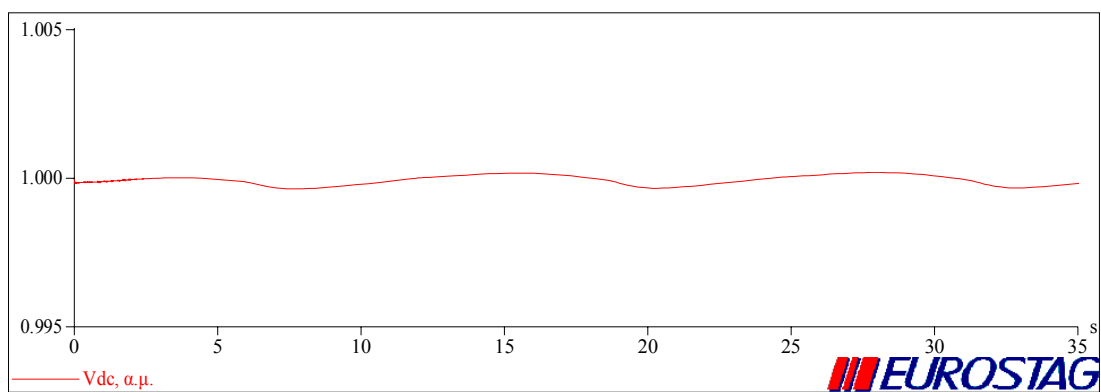


Σχήμα 3.18 Μοντέλο του ελεγκτή DC τάσης για τον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου.

Ο περιοριστής ρεύματος του παραπάνω γραφήματος εξασφαλίζει ότι το ρεύμα που εισέρχεται στον μετατροπέα δεν θα ξεπεράσει την ονομαστική αντοχή του. Οι παράμετροι του PI ελεγκτή που διακρίνεται στο παραπάνω σχήμα, δηλ. το αναλογικό κέρδος και η ολοκληρωτική σταθερά επιλέγονται έτσι ώστε, κατά τις διαταραχές ανέμου και τερματικής τάσης, οι διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης να είναι οι μικρότερες δυνατές, γεγονός που εξασφαλίζει ότι όση ισχύς παράγει η γεννήτρια τόση περνάει και στο δίκτυο. Στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές και [43]. Παρακάτω δίνεται η διακύμανση της συνεχούς τάσης για μια ημιτονοειδή χρονοσειρά ανέμου συχνότητας και πλάτους .



Γράφημα 3.1 Ημιτονοειδής χρονοσειρά ανέμου με συχνότητα 0.5 rad/sec και πλάτους 1 m/s .



Γράφημα 3.2 Διακύμανση της DC τάσης.

4 Αρχικοποίηση του Συστήματος

4.1 Εισαγωγή

Ένα σημαντικό πρόβλημα κατά την μοντελοποίηση των συστημάτων ανεμογεννητριών είναι η εύρεση του αρχικού σημείου λειτουργίας, δηλαδή ο υπολογισμός των αρχικών τιμών των μεταβλητών κατάστασης του μοντέλου οι οποίες υπολογίζονται με κάποιον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται σε κάποιες αρχικές παραδοχές για την λειτουργική κατάσταση της μηχανής.

Για την ενσωμάτωση νέων μοντέλων σε ένα λογισμικό προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (όπως είναι το EUROSTAG) το πρόβλημα αρχικοποίησης που προκύπτει πρέπει να επιλυθεί ορθά. Η σωστή αρχικοποίηση ενός μοντέλου σε ένα εργαλείο προσομοίωσης συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος οδηγεί σε εξάλειψη του κίνδυνου εμφάνισης «φανταστικών» - μη πραγματικών ηλεκτρικών μεταβατικών φαινομένων και καθιστά δυνατή τη σωστή εκτίμηση για την πραγματική δυναμική συμπεριφορά του μοντελοποιημένου συστήματος (ακόμη και στη περίπτωση προσομοίωσης διαταραχών του δικτύου). Μια δυναμική προσομοίωση απαιτεί πολύ «μικρά» βήματα χρόνου (time steps) και επομένως μεγάλο χρόνο προσομοίωσης.

Οι προσομοιώσεις συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας ξεκινούν με την εκτέλεση της ροής φορτίου. Οι υπολογισμοί της ροής φορτίου αντιπροσωπεύουν τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας του συστήματος. Για την εκτέλεση της ροής φορτίου, συγκεκριμένα δεδομένα εισόδου απαιτούνται να εισαχθούν από το χρήστη.

Η αρχικοποίηση ενός συστήματος ανεμογεννήτριας συνδεδεμένης σε δίκτυο αποτελεί μια διαδικασία διαδοχικών αρχικοποιήσεων των μοντέλων των διάφορων επί μέρους υποσυστημάτων. Βασικό πρόβλημα αποτελεί η εύρεση της σωστής αλληλουχίας σύμφωνα με την οποία κάθε μοντέλο το ένα μετά το άλλο, πρέπει να αρχικοποιηθεί. Οι εξισώσεις προσομοίωσης επιλύονται θέτοντας τις χρονικές παραγώγους των μεγεθών ίσες με μηδέν και χρησιμοποιώντας παράλληλα τα αποτελέσματα της ροής φορτίου καθώς επίσης και επιπρόσθετα μη ηλεκτρικά δεδομένα εισόδου. Απαραίτητος είναι ο σωστός διαχωρισμός μεταξύ των «γνωστών» μεταβλητών εισόδου, εξόδου και κατάστασης και αυτών που πρέπει να αρχικοποιηθούν. Από τη στιγμή που ένα μοντέλο έχει αρχικοποιηθεί, οι εξαγόμενες πληροφορίες χρησιμεύουν

στη συνέχεια για την αρχικοποίηση του επόμενου στη σειρά μοντέλου. Εάν η αρχικοποίηση δεν γίνει σωστά, οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος δεν διατηρούν την τιμή με την οποία είχαν αρχικοποιηθεί αλλά αντιθέτως αρχίζουν να αλλάζουν κατά την δυναμική προσομοίωση. Σε αυτή τη περίπτωση, ίσως χρειαστεί παραπάνω χρονικό διάστημα μέχρι την επίτευξη της μόνιμης κατάστασης ή ακόμη και αριθμητική ανισορροπία μπορεί να συμβεί πριν από αυτή. Αυτά τα δυναμικά φαινόμενα λόγω αρχικοποίησης είναι προφανώς ανεπιθύμητα στις δυναμικές προσομοιώσεις, ιδιαίτερα όταν ένα πραγματικό δυναμικό φαινόμενο εμφανίζεται στο δίκτυο χρονικά προηγούμενο της επίτευξης της μόνιμης κατάστασης. Μια σωστή εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος είναι τότε δύσκολο να εξαχθεί. Ο ακριβής και σωστός υπολογισμός των αρχικών συνθηκών του μοντελοποιημένου συστήματος είναι απαραίτητος, για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα.

4.2 Αρχικοποίηση του Μοντέλου

Κατά την αρχικοποίηση, δεδομένα μόνο από τη ροή φορτίου, δηλ. η παραγόμενη ενεργός και άεργος ισχύς και τερματική τάση, είναι διαθέσιμα και η τιμή των εσωτερικών μεταβλητών του μοντέλου πρέπει να προκύψει από αυτά, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη δομή του μοντέλου. Επομένως, η πορεία της αρχικοποίησης που υιοθετήθηκε είναι αντίστροφη της πορείας της δυναμικής προσομοίωσης, δηλαδή από την «έξοδο» (παραγόμενη ενεργός, άεργος ισχύς και τερματική τάση) στην «είσοδο» (ταχύτητα ανέμου).

Για την αρχικοποίηση ακολουθήσαμε τα εξής υπολογιστικά βήματα με την σειρά με την οποία εμφανίζονται:

1. Οι αρχικές τιμές για την τερματική τάση, την ενεργό και άεργο ισχύ υπολογίζονται από την εκτέλεση της ροής φορτίου. Η αρχική τιμή της q συνιστώσας της τάσης του στάτη u_{qs0} ισούται με τη αρχική τιμή της τερματικής τάσης V_{s0} η οποία υπολογίζεται από τη ροή φορτίου ενώ η u_{ds0} είναι ίση με μηδέν. Άρα:

$$u_{qs0} = V_{s0} \quad (4.1)$$

$$u_{ds0} = 0 \quad (4.2)$$

2. Αμελώνοντας τις απώλειες στον μετατροπέα και στις αντιστάσεις της μηχανής έχουμε ότι η μηχανική ισχύς είναι ίση με την ολική ενεργό ισχύ που εξάγεται από τη μηχανή και η οποία είναι γνωστή από την εκτέλεση της ροής φορτίου. Επομένως βρίσκεται και η γωνιακή ταχύτητα ω_{geno} από την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας. Οι ολίσθηση καθώς επίσης και η ενεργός ισχύς στάτη και δρομέα υπολογίζονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$s_o = \frac{\omega_s - \omega_{geno}}{\omega_s} \quad (4.3)$$

$$P_{r0} = -\frac{s_o}{(1-s_o)} P_o \quad (4.4)$$

$$P_{s0} = -\frac{P_{r0}}{s_o} \quad (4.5)$$

3. Τα ρεύματα i'_{dr0} και i'_{qr0} υπολογίζονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις ελέγχου του κεφαλαίου 3, όπου θεωρείται ότι αρχικά η μηχανή έχει μηδενική ανταλλαγή άεργου ισχύος με το δίκτυο (μοναδιαίος συντελεστής ισχύος).

$$Q_{s0} = 0 \quad (4.6)$$

$$i'_{dr0} = \frac{u_{qs0}}{X_m} - \frac{X_{ss}Q_{s0}}{X_m} \quad (4.7)$$

$$i'_{qr0} = \frac{-X_{ss}T_e}{X_m u_{qs0}} \quad (4.8)$$

όπου T_e είναι μια συνάρτηση της ταχύτητας ω_{gen} γνωστή κατά τμήματα, σύμφωνα με την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας (βλέπε Κεφάλαιο 2 - σχήμα 2.6).

4. Οι εξισώσεις τάσης της μηχανής επαγωγής διπλής τροφοδότησης του κεφαλαίου 3, επιλύονται για τον υπολογισμό των ρευμάτων του στάτη i_{qs0} , i_{ds0} .

$$i_{qs0} = \frac{u_{qs0} - \frac{X_{ss}(u_{ds0} + X_m i'_{qr0})}{R_s} - X_m i'_{dr0}}{R_s + \frac{X_{ss}X_{ss}}{R_s}} \quad (4.9)$$

$$i_{ds0} = \frac{u_{ds0} + X_{ss}i_{qs0} + X_m i'_{qr0}}{R_s} \quad (4.10)$$

5. Οι πεπλεγμένες ροές στάτη και δρομέα υπολογίζονται βάση των γνωστών σχέσεων του κεφαλαίου 3 ως εξής:

$$\psi_{qs0} = X_{ss}i_{qs0} + X_m i'_{qr0} \quad (4.11)$$

$$\psi_{ds0} = X_{ss}i_{ds0} + X_m i'_{dr0} \quad (4.12)$$

$$\psi'_{qr0} = X_m i_{qs0} + X'_{rr} i'_{qr0} \quad (4.13)$$

$$\psi'_{dr0} = X_m i_{ds0} + X'_{rr} i'_{dr0} \quad (4.14)$$

6. Οι τάσεις του δρομέα υπολογίζονται από τις εξισώσεις τάσης της μηχανής ως εξής:

$$v'_{dr0} = R_r i'_{dr0} - s_o \psi'_{qr0} \quad (4.15)$$

$$v'_{qr0} = R_r i'_{qr0} + s_o \psi'_{dr0} \quad (4.16)$$

7. Η αρχική τιμή του συντελεστή ισχύος για τον ελεγκτή άεργου ισχύος του στάτη μέσω του ελέγχου του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα υπολογίζεται ως εξής:

$$PF_{s0} = \cos \left[\frac{P_{s0}}{\sqrt{P_{s0}^2 + Q_{s0}^2}} \right] \quad (4.17)$$

8. Η αρχικοποίηση του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου πραγματοποιείται με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{conv0} = v_{qs0} \times i_{conv,q0} \Leftrightarrow i_{conv,q0} = \frac{P_{conv0}}{v_{qs0}} \quad (4.18)$$

$$Q_{conv0} = v_{qs0} \times i_{conv,d0} \xrightarrow{Q_{conv0}=0} i_{conv,d0} = 0 \quad (4.19)$$

όπου

$$P_{conv0} = P_{r0} = -\frac{s_o}{(1-s_o)} P_o \quad (4.20)$$

9. Σειρά έχει τώρα η αρχικοποίηση του μηχανικού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει τα μοντέλα του αεροδυναμικού συστήματος και του συστήματος μετάδοσης της μηχανικής κίνησης. Η αρχικοποίηση εδώ είναι λίγο πιο πολύπλοκη.

Οι αρχικές τιμές της ηλεκτρικής ροπής T_{e0} καθώς επίσης και της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης Ω_{gen0} είναι γνωστές και έχουν εξαχθεί σύμφωνα με την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας (έχοντας ως δεδομένο από τη ροή φορτίου την συνολική ενεργό ισχύ η οποία ανταλλάσσεται με το δίκτυο). Η αρχικοποίηση εδώ γίνεται με φυσικές μονάδες αντίθετα με το μοντέλο του ηλεκτρικού συστήματος στο οποίο οι αρχικές τιμές των μεταβλητών είναι εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα. Οι τιμές αρχικοποίησης για τη ταχύτητα περιστροφής του αεροδυναμικού δρομέα Ω_{rot0} , την αεροδυναμική ροπή T_{rot0} , την γωνιακή μετατόπιση του άξονα της γεννήτριας επαγωγής θ_{gen0} καθώς επίσης και του αεροδυναμικού άξονα υπολογίζονται ως εξής:

$$\Omega_{rot0} = \frac{\Omega_{gen0}}{K_{gear}} \quad (4.21)$$

και με αναφορά τον άξονα υψηλής ταχύτητας:

$$\Omega'_{rot0} = \Omega_{gen0} \quad (4.22)$$

$$T_{rot0} = T_{e0} \times K_{gear} \quad (4.23)$$

και με αναφορά τον άξονα υψηλής ταχύτητας:

$$T'_{rot0} = T_{gen0} \quad (4.24)$$

$$\theta'_{rot0} = \frac{T'_{rot0}}{K'_{shaft}} + \theta_{gen0} \quad (4.25)$$

Επιλέγοντας αυθαίρετα ότι $\theta_{gen0} = 0$, η παραπάνω σχέση δίνει τη τιμή αρχικοποίησης της εσωτερικής μεταβλητής του μηχανικού μοντέλου η οποία αντιπροσωπεύει την γωνιακή μετατόπιση του αεροδυναμικού άξονα με αναφορά τον γρήγορο άξονα της γεννήτριας:

$$\theta'_{rot0} = \frac{T'_{rot0}}{K'_{shaft}} \quad (4.26)$$

και με αναφορά τον αεροδυναμικό άξονα:

$$\theta_{rot0} = \frac{\theta'_{rot0}}{K_{gear}} \quad (4.27)$$

Η σχέση που συνδέει την ταχύτητα του ανέμου με την παραγόμενη ενεργό ισχύ δεν είναι ένα προς ένα. Για αυτό λόγο η αρχική τιμή για τη ταχύτητα του ανέμου δίνεται από τον ίδιο τον χρήστη με βάση την αρχική τιμή της ενεργού ισχύος η οποία υπολογίζεται από την ροή φορτίου. Η ανάθεση από το χρήστη της αρχικής ταχύτητας του ανέμου γίνεται με βάση τον πίνακα (4.1) οι τιμές του οποίου υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB R2009b. Έχοντας τώρα υπολογίσει την αρχική τιμή της ταχύτητας του ανέμου, εύκολα γίνεται και ο προσδιορισμός των αρχικών τιμών της γωνίας βήματος και του αεροδυναμικού συντελεστή. Πιο συγκεκριμένα οι απαραίτητοι αυτοί υπολογισμοί γίνονται με τη βοήθεια της καμπύλης ελέγχου της που έχει ήδη υπολογιστεί στο Κεφάλαιο 2. Ο πίνακας (4.1) παρακάτω, περιλαμβάνει τα σημεία την καμπύλης ελέγχου της ταχύτητας (2^η στήλη), της καμπύλης ελέγχου της ροπής (3^η στήλη), τον υπολογισμό με βάση αυτών της αρχικής ταχύτητας του ανέμου V_{w0} (4^η στήλη) και τελικά τον υπολογισμό των αρχικών τιμών του αεροδυναμικού συντελεστή C_{p0} (6^η στήλη) και της γωνίας βήματος β_0 (5^η στήλη) με βάση τη αντίστοιχη καμπύλη ελέγχου.

P_o Αποτέλεσμα ροής φορτίου	Ω_{gen0} α.μ. Καμπύλη ελέγχου ταχύτητας	T_{e0} α.μ. Καμπύλη ελέγχου ροπής	$V_{w0} = \frac{\Omega_0 R}{\lambda_{opt}}$ Αρχική ταχύτητα ανέμου	β_0 Καμπύλη ελέγχου γωνίας βήματος	C_{p0} Αρχική τιμή αεροδυναμικ ού συντελεστή
0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.00	0	0
0	0	0	2.00	0	0
0	0	0	3.00	0	0
0	0.400	0	4.00	0	0
0	0.500	0	5.00	0	0
0	0.600	0	6.00	0	0
0.022	0.610	0.035	6.10	0	0.070
0.043	0.620	0.069	6.20	0	0.133
0.645	0.630	1.024	6.30	0	1.907
0.086	0.640	0.134	6.40	0	0.242
0.108	0.650	0.165	6.50	0	0.289
0.129	0.660	0.195	6.60	0	0.332
0.142	0.666	0.213	6.66	0	0.355
0.166	0.700	0.237	7.00	0	0.358
0.204	0.750	0.272	7.50	0	0.358
0.248	0.800	0.310	8.00	0	0.358
0.297	0.850	0.350	8.50	0	0.358
0.353	0.900	0.392	9.00	0	0.358
0.415	0.950	0.437	9.50	0	0.358

0.484	1.000	0.484	10.00	0	0.358
0.610	1.080	0.565	10.80	0	0.358
0.675	1.100	0.614	11.00	0	0.375
0.740	1.120	0.661	11.20	0	0.389
0.805	1.140	0.706	11.40	0	0.402
0.870	1.160	0.750	11.60	0	0.412
0.935	1.180	0.792	11.80	0	0.421
1.000	1.200	0.833	12.00	0	0.428
1.000	1.200	0.833	13.00	3.455	0.336
1.000	1.200	0.833	14.00	10.570	0.269
1.000	1.200	0.833	15.00	15.402	0.219
1.000	1.200	0.833	16.00	19.079	0.180
1.000	1.200	0.833	17.00	22.022	0.150
1.000	1.200	0.833	18.00	24.451	0.127
1.000	1.200	0.833	19.00	26.492	0.108
1.000	1.200	0.833	20.00	28.252	0.092
1.000	1.200	0.833	21.00	29.774	0.080
1.000	1.200	0.833	22.00	31.120	0.069
1.000	1.200	0.833	23.00	32.315	0.061
1.000	1.200	0.833	24.00	33.376	0.053
1.000	1.200	0.833	25.00	34.335	0.047

Πίνακας 4.1 Σημεία χαρακτηριστικών ελέγχου της ταχύτητας, ροπής και γωνίας βήματος της έλικας για των υπολογισμό των αρχικών τιμών των μεγεθών της ταχύτητας, της ροπής, της γωνίας βήματος, του αεροδυναμικού συντελεστή και της ταχύτητας του ανέμου.

Για την πλήρη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση του συστήματος βάση του παραπάνω πίνακα θα χρησιμοποιήσουμε δύο παραδείγματα, ένα για αρχική ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής και ένα για μικρότερη.

Παράδειγμα αρχικοποίησης για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής

Για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης παράγει την ονομαστική της ισχύ. Για το σκοπό αυτό, ο χρήστης εισάγει στο λογισμικό προσομοίωσης (EUROSTAG) τα κατάλληλα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία το μοντελοποιημένο σύστημα στη μόνιμη κατάσταση ανταλλάσει με το δίκτυο ονομαστική ενεργό ισχύ υπό ονομαστικό - μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Ο χρήστης επίσης, εισάγει δεδομένα σχετικά με τον ζυγό σύνδεσης. Θεωρώντας ότι η τάση του ζυγού καθορίζεται ίση με 1 α.μ. στη μόνιμη κατάσταση, η εκτέλεση της ροής φορτίου δίνει ως αποτελέσματα τα εξής:

$$V_{s0} = 1 \text{ α.μ.} \quad (4.28)$$

και

$$P_o = -1 \text{ α.μ. (σύμβαση κινητήρα)} \quad (4.29)$$

Επίσης ο χρήστης επιλέγει αυθαίρετα μια αρχική ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής:

$$V_{w0} = 13 \frac{m}{s} \quad (4.30)$$

Η αρχικοποίηση του μοντέλου του ηλεκτρικού συστήματος προηγείται χρονικά σύμφωνα με τα παραπάνω και πραγματοποιείται σύμφωνα με τα βήματα αρχικοποίησης 1 – 8 και με βάση τις εξισώσεις (4.1) – (4.20). Οι αρχικές τιμές των αντίστοιχων μεταβλητών παρουσιάζονται στο πίνακα (4.2). Η τιμές αρχικοποίησης της ηλεκτρικής ροπής και της ταχύτητας περιστροφής υπολογίζονται με τη βοήθεια των αντίστοιχων χαρακτηριστικών ελέγχου τους (βάση του πίνακα 4.1) ως εξής:

$$T_{e0} = -0.833 \text{ α.μ. (σύμβαση κινητήρα)} \quad (4.31)$$

και

$$\Omega_{gen0} = 1.2 \text{ α.μ.} \quad (4.32)$$

Στη συνέχεια αρχικοποιείται το μοντέλο του μηχανικού συστήματος βάση των εξισώσεων (4.21) – (4.27). Οι αρχικές τιμές για τη γωνία βήματος και τον αεροδυναμικό συντελεστή υπολογίζονται με τη βοήθεια των αντίστοιχων χαρακτηριστικών ελέγχου τους (βάση του πίνακα 4.1) ως εξής:

$$\beta_0 = 3.4550 \quad (4.33)$$

και

$$C_{p0} = 0,336 \quad (4.34)$$

Οι τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα:

Αρχικές τιμές μεταβλητών οι οποίες υπολογίζονται από την εκτέλεση ροής φορτίου			
V_{s0}	1 α.μ.	P_o	-1 α.μ.
Αρχικές τιμές μεταβλητών οι οποίες υπολογίζονται μέσω του πίνακα (4.1)			
T_{e0}	-0.833 α.μ.	β_0	3.4550
Ω_{gen0}	1.2 α.μ.	C_{p0}	0.336
Αρχικές τιμές μεταβλητών μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος			
u_{qs0}	1 α.μ.	ψ_{ds0}	1.0083 α.μ.
u_{ds0}	0	ψ'_{qr0}	0.1522 α.μ.
s_o	-0.2	ψ'_{dr0}	1.0347 α.μ.
P_{s0}	-0.833 α.μ.	v'_{dr0}	0.0338 α.μ.
P_{r0}	-0.167 α.μ.	v_{qr0}	-0.1983 α.μ.
Q_{s0}	0	PF_{s0}	1
i'_{dr0}	0.333 α.μ.	P_{conv0}	-0.167 α.μ.
i'_{qr0}	0.8611 α.μ.	Q_{conv0}	0
i_{qs0}	-0.833 α.μ.	$i_{conv,q0}$	-0.167 α.μ.
i_{ds0}	0.0027 α.μ.	$i_{conv,d0}$	0
ψ_{qs0}	2.6881e-005 α.μ.		
Αρχικές τιμές μεταβλητών μοντέλου μηχανικού συστήματος			
V_{w0}	13 m/s	T'_{rot0}	-10606.09 Nm
Ω_{rot0}	1.884956 rad/s	θ_{gen0}	29.1437°
Ω'_{rot0}	188.4956 rad/s	θ'_{rot0}	0
T_{rot0}	-1060608.54 Nm	θ_{rot0}	0

Πίνακας 4.2 Τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της ονομαστικής ίση με **13 m/s**.

Παράδειγμα αρχικοποίησης για ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής

Για ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης παράγει μικρότερη από την ονομαστική της ισχύ. Σε αυτή τη περίπτωση ο χρήστης επιλέγει και εισάγει στο λογισμικό προσομοίωσης (EUROSTAG) τα κατάλληλα δεδομένα σύμφωνα με τα οποία το μοντελοποιημένο σύστημα στη μόνιμη κατάσταση ανταλλάσει με το δίκτυο ένα κλάσμα της ονομαστικής ισχύος. Και εδώ είναι προφανές ότι η γεννήτρια λειτουργεί με μοναδιαίο συντελεστή ισχύος. Για παράδειγμα έστω ότι στη μόνιμη κατάσταση η παράγωγή ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια είναι ίση με 0,166 α.μ. Ο χρήστης εισάγει τα κατάλληλα δεδομένα για αυτό το σκοπό αλλά και τα δεδομένα σχετικά με τον ζυγό σύνδεσης. Θεωρώντας ότι η τάση του ζυγού καθορίζεται ίση με 1 α.μ. στη μόνιμη κατάσταση, η εκτέλεση της ροής φορτίου σε αυτή τη περίπτωση δίνει ως αποτελέσματα τα εξής:

$$V_{s0} = 1 \text{ α.μ.} \quad (4.28)$$

και

$$P_o = -0,166 \text{ α.μ. (σύμβαση κινητήρα)} \quad (4.29)$$

Η αρχικοποίηση του μοντέλου του ηλεκτρικού συστήματος προηγείται χρονικά και πραγματοποιείται σύμφωνα με τα βήματα αρχικοποίησης 1 – 8 και με βάση τις εξισώσεις (4.1) – (4.20). Οι αρχικές τιμές των αντίστοιχων μεταβλητών παρουσιάζονται στο πίνακα (4.3). Η τιμές αρχικοποίησης της ηλεκτρικής ροπής και της ταχύτητας περιστροφής υπολογίζονται με τη βοήθεια των αντίστοιχων χαρακτηριστικών ελέγχου τους (βάση του πίνακα 4.1) ως εξής:

$$T_{e0} = -0,237 \text{ α.μ.} \quad (4.31)$$

και

$$\Omega_{gen0} = 0,7 \text{ α.μ.} \quad (4.32)$$

Στη συνέχεια, αρχικοποιείται το μοντέλο του μηχανικού συστήματος βάση των εξισώσεων (4.21) – (4.27). Η αρχική τιμή για την ταχύτητα του ανέμου δεν επιλέγεται από το χρήστη όπως συνέβη στην προηγούμενη περίπτωση αλλά υπολογίζεται βάση του πίνακα (4.1). Οι αρχικές τιμές για τη γωνία βήματος και τον αεροδυναμικό συντελεστή υπολογίζονται με τη βοήθεια των αντίστοιχων χαρακτηριστικών ελέγχου τους (βάση του πίνακα 4.1). Επομένως:

$$V_{w0} = 7 \frac{m}{s}, \beta_0 = 0 \quad (4.33)$$

και

$$C_{p0} = 0,358 \quad (4.34)$$

Οι τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα:

Αρχικές τιμές μεταβλητών οι οποίες υπολογίζονται από την εκτέλεση ροής φορτίου			
V_{s0}	1 α.μ.	P_o	-0.166 α.μ.
Αρχικές τιμές μεταβλητών οι οποίες υπολογίζονται μέσω του πίνακα (4.1)			
T_{e0}	-0.237 α.μ.	β_0	0
Ω_{gen0}	0.7 α.μ.	C_{p0}	0.358
Αρχικές τιμές μεταβλητών μοντέλου ηλεκτρικού συστήματος			
u_{qs0}	1 α.μ.	ψ_{ds0}	1.0024 α.μ.
u_{ds0}	0	ψ'_{qr0}	0.0433 α.μ.
s_o	0.3	ψ_{dr0}	1.029 α.μ.
P_{s0}	-0.2371 α.μ.	v'_{dr0}	0.012 α.μ.
P_{r0}	0.0711 α.μ.	v'_{qr0}	-0.2033 α.μ.
Q_{s0}	0	PF_{s0}	1
i'_{dr0}	0.333 α.μ.	P_{conv0}	0.0711 α.μ.
i'_{qr0}	0.2450 α.μ.	Q_{conv0}	0
i_{qs0}	-0.2371 α.μ.	$i_{conv,q0}$	0.0711 α.μ.
i_{ds0}	7.6497e-004 α.μ.	$i_{conv,d0}$	0
ψ_{qs0}	7.6497e-006 α.μ.		
Αρχικές τιμές μεταβλητών μοντέλου μηχανικού συστήματος			
V_{w0}	7 m/s	T'_{rot0}	-3017.5777 Nm
Ω_{rot0}	1.099558 rad/s	θ_{gen0}	8.2918°
Ω'_{rot0}	109.9558 rad/s	θ'_{rot0}	0
T_{rot0}	-301757.77 Nm	θ_{rot0}	0

Πίνακας 4.3 Τιμές αρχικοποίησης όλων των μεταβλητών του μοντελοποιημένου συστήματος για ταχύτητα ανέμου μικρότερη της ονομαστικής ίση με **7 m/s**.

Όπως παρατηρούμε στους παραπάνω πίνακες (4.2) και (4.3), επαληθεύεται το συμπέρασμα του κεφαλαίου 7 σχετικά με τη ροή ισχύος που λαμβάνει χώρα σε μια γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Πιο συγκεκριμένα, είχε αναφερθεί ότι σε χαμηλή μηχανική ισχύ (χαμηλή ταχύτητα του ανέμου) η ολίσθηση είναι θετική και η ισχύς του δρομέα ρέει από το δίκτυο (θετική για σύμβαση κινητήρα). Αντίθετα για υψηλή μηχανική ισχύ (υψηλή ταχύτητα ανέμου) ισχύουν ακριβώς τα αντίστροφα, δηλαδή η ολίσθηση είναι αρνητική και η ισχύς του δρομέα ρέει προς το δίκτυο. Και στις δύο περιπτώσεις το άθροισμα της ισχύος του στάτη και δρομέα δίνουν τη συνολική ισχύ η οποία ανταλλάσσεται με το δίκτυο.

5 Λογισμικό Προσομοίωσης EUROSTAG – Δημιουργία Μοντέλων στον Model Editor

5.1. Εισαγωγή

Το μοντέλο προσομοίωσης EUROSTAG, είναι προϊόν που δημιουργήθηκε από την εταιρεία Electricite de France & Tractebel. Παρέχει τη δυνατότητα τόσο σε σχεδιαστές, όσο και σε διαχειριστές ενός συστήματος και στην προκειμένη περίπτωση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι επιδιώκουν την βελτιστοποίηση της αποτελεσματικότητας των επενδύσεων και την ελαχιστοποίηση του κόστους να μπορούν με την αναγκαία ταχύτητα και αξιοπιστία να παράγουν τα κατάλληλα μοντέλα και προσομοιώσεις. Το λογισμικό αυτό είναι πολύ αποτελεσματικό και φιλικό προς τον χρήστη, ένας επιπλέον λόγος που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών του EUROSTAG, καθώς και συνοπτική περιγραφή των μοντέλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, για τη μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, την επίλυση των ροών φορτίου, καθώς και για τις προσομοιώσεις των διαταραχών που θα προσομοιώσουμε.

5.2. Λειτουργία και Εφαρμογές του EUROSTAG

Ανεξαρτήτως από το είδος των διαταραχών που σημειώνονται και το μέγεθος του συστήματος, το EUROSTAG δείχνει τη συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος μέχρι να επιστρέψει σε σταθερή κατάσταση, με αρκετή ακρίβεια. Ο επαναληπτικός αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το EUROSTAG, εκτελεί αυτόματο έλεγχο των προσομοιώσεων, ο οποίος πληροί τα κριτήρια ακρίβειας που καθορίζονται από τον χρήστη. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων, μπορούν να αναλυθούν οι σχέσεις και να παρουσιαστούν διαγράμματα που αναφέρονται σε δυναμικά φαινόμενα.

Η χρήση του EUROSTAG, επιτρέπει την μελέτη μεγάλων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, για μεγάλες χρονικές περιόδους, χωρίς την ανάγκη αλλαγής του αρχικού μοντέλου του συστήματος. Πιο κάτω παρατίθενται μερικά τυπικά παραδείγματα της

χρήσης του EUROSTAG, που αφορούν την μελέτη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας:

- 1) Έλεγχος της τήρησης συγχρονισμού, μετά από διάφορες διαταραχές.
- 2) Διαμόρφωση στρατηγικών σε δίκτυα, σε περιπτώσεις απόρριψης φορτίου.
- 3) Μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου, κάτω από ασταθείς συνθήκες (προληπτική ασφάλεια).
- 4) Μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου, κάτω από ακραίες ή έκτακτες συνθήκες, π.χ. κατάρρευση τάσης, απώλεια συγχρονισμού, επανασυγχρονισμό κ.τ.λ.
- 5) Μελέτη της δυναμικής ευστάθειας των μηχανών με την δυνατότητα ρυθμίσεων, καθώς και προσαρμογή του συστήματος μετάδοσης τους, γύρω από συγκεκριμένο λειτουργικό σημείο του συστήματος.
- 6) Σχεδιασμός και ρύθμιση των τοπικών συστημάτων ελέγχου (ρυθμιστές στροφών GOV και τάσης AVR, καθώς και έλεγχος των λήψεων των μετασχηματιστών TAPS).
- 7) Σχεδιασμός και καθορισμός των συστημάτων προστασίας σταθμών παραγωγής και δικτύων διανομής.

5.3 Τεχνική Περιγραφή του EUROSTAG

Το EUROSTAG βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο με χρονομεταβλητό βήμα και είναι κατάλληλο για την μελέτη βραχυπρόθεσμων, αλλά και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Έτσι, οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας (φαινόμενα που διαρκούν από μερικά ms έως μερικά δευτερόλεπτα), καθώς και οι μακροπρόθεσμες δυναμικές μελέτες (αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποιες ώρες), καλύπτονται από την ίδια προσομοίωση.

Το EUROSTAG χωρίζεται στα ακόλουθα πέντε βασικά μέρη:

- 1) Από ένα πρόγραμμα ροής φορτίου (load flow), του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς στην προσομοίωση.
- 2) Από ένα διαδραστικό προσομοιωτή, που επιτρέπει στον χρήστη να απεικονίζει τις διάφορες μεταβλητές, αλλά και να επεμβαίνει στη διαδικασία κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Computation Module).
- 3) Από ένα γραφικό προ-επεξεργαστή, που επιτρέπει την εισαγωγή νέων μοντέλων χρησιμοποιώντας σχήματα μπλοκ διαγραμμάτων (Model Editor).
- 4) Από ένα γραφικό επεξεργαστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μετά το πέρας της προσομοίωσης (Post Processor).
- 5) Από ένα τμήμα για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων, (μέσω παραμετρικού προσδιορισμού φίλτρων και δημιουργίας πινάκων).

Το EUROSTAG είναι γραμμένο σε Fortran 77 και σε C, και εγκαθίσταται σε σταθμούς εργασίας με UNIX, καθώς και σε προσωπικούς Η/Υ με λειτουργικό σύστημα WINDOWS. Κατά την αναφορά μας στην τεχνική περιγραφή του λογισμικού πακέτου EUROSTAG, κρίνεται αναγκαία, η σύντομη περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιεί, για την αναπαράσταση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι, η μοντελοποίηση του συστήματος παραμένει αναλλοίωτη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ανεξαρτήτως των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα.

Το μοντέλο λοιπόν του EUROSTAG, αποτελείται από τα εξής βασικά στοιχεία:

1) Το δίκτυο.

Το EUROSTAG χρησιμοποιεί είτε μονογραμμική, είτε τριφασική αναπαράσταση του δικτύου. Οι κόμβοι τάσεων διέπονται από την αλγεβρική εξίσωση $I=YU$, στην οποία U είναι το διάνυσμα των τάσεων των κόμβων, I το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται στους κόμβους και Y είναι η μήτρα αγωγιμότητας του δικτύου. Τα φορτία του συστήματος διέπονται από μη γραμμικές εξισώσεις, που είναι συναρτήσεις της τάσης και της συχνότητας.

2) Τις γεννήτριες.

Οι σύγχρονες μηχανές περιγράφονται από τις κλασσικές εξισώσεις του PARK. Ο δρομέας των μηχανών παριστάνεται από τέσσερα ισοδύναμα ελίγματα. Μοντελοποιείται επίσης ο μαγνητικός κορεσμός και στους δύο άξονες. Αναφορικά με την μηχανική κίνηση των γεννητριών, οι κινήσεις του δρομέα καθορίζονται από την εξίσωση στρεφομένων μαζών, που συνδέει τη διαφορά ανάμεσα σε μηχανική και ηλεκτρική ροπή με την μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής.

Τα χαρακτηριστικά της γεννήτριας καθορίζονται εξωτερικά (αντιδράσεις και σταθερές χρόνου) ή εσωτερικά (αμοιβαίες επαγωγές και αντιστάσεις), ανάλογα με το τι θα επιλέξει ο χρήστης.

3) Τις μηχανές επαγωγής.

Υπάρχουν δύο είδη μηχανών επαγωγής. Το ένα μοντέλο ονομάζεται και πλήρες μοντέλο (κυκλώματος δρομέα διπλού κλωβού), ενώ το άλλο αναφέρεται και ως απλοποιημένο μοντέλο.

4) Τους μετασχηματιστές.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μετασχηματιστών, όπως οι απλοί μετασχηματιστές, οι αυτομετασχηματιστές και οι μετασχηματιστές με taps, με πλήρη μοντέλα που λαμβάνουν υπ' όψιν τις απώλειες σιδήρου και χαλκού, τον κορεσμό, τις τάσεις βραχυκύκλωσης και τους λόγους μετασχηματισμού.

5) Τα γεγονότα.

Αυτά είναι όλα τα επεισόδια, διαταραχές και διαδικαστικές εντολές που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης. Μπορεί να είναι προγραμματισμένα εκ των προτέρων ή να δημιουργούνται στο πρόγραμμα όταν ενεργοποιείται μια αυτόματη συσκευή. Μπορεί επίσης να εισάγονται κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Τα γεγονότα στα οποία αναφερόμαστε, μπορεί να είναι βραχυκυκλώματα, κλείσιμο γραμμών, επανένωση υποδικτύων, ένταξη γεννητριών, εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων, αλλαγή του ενεργού και άεργου φορτίου στους ζυγούς, απώλειες γεννητριών κ.τ.λ.

6) Τα macroblock.

Ο χρήστης μπορεί να καθορίζει τα δικά του μοντέλα (συστήματα ελέγχου ρυθμιστών στροφών, τάσεως κ.τ.λ.), μέσω ενός γραφικού προεπεξεργαστή (*model editor*), που χρησιμοποιεί απλουστευμένα στοιχεία ενός μπλοκ διαγράμματος. Αυτό ουσιαστικά, καταργεί την ανάγκη του προγραμματισμού σε Fortran. Τα προαναφερόμενα μοντέλα αποθηκεύονται σε ειδική βιβλιοθήκη, η οποία εξαρχής περιέχει και μερικά άλλα τυποποιημένα μοντέλα (IEEE , SVC , HVDC κτλ.).

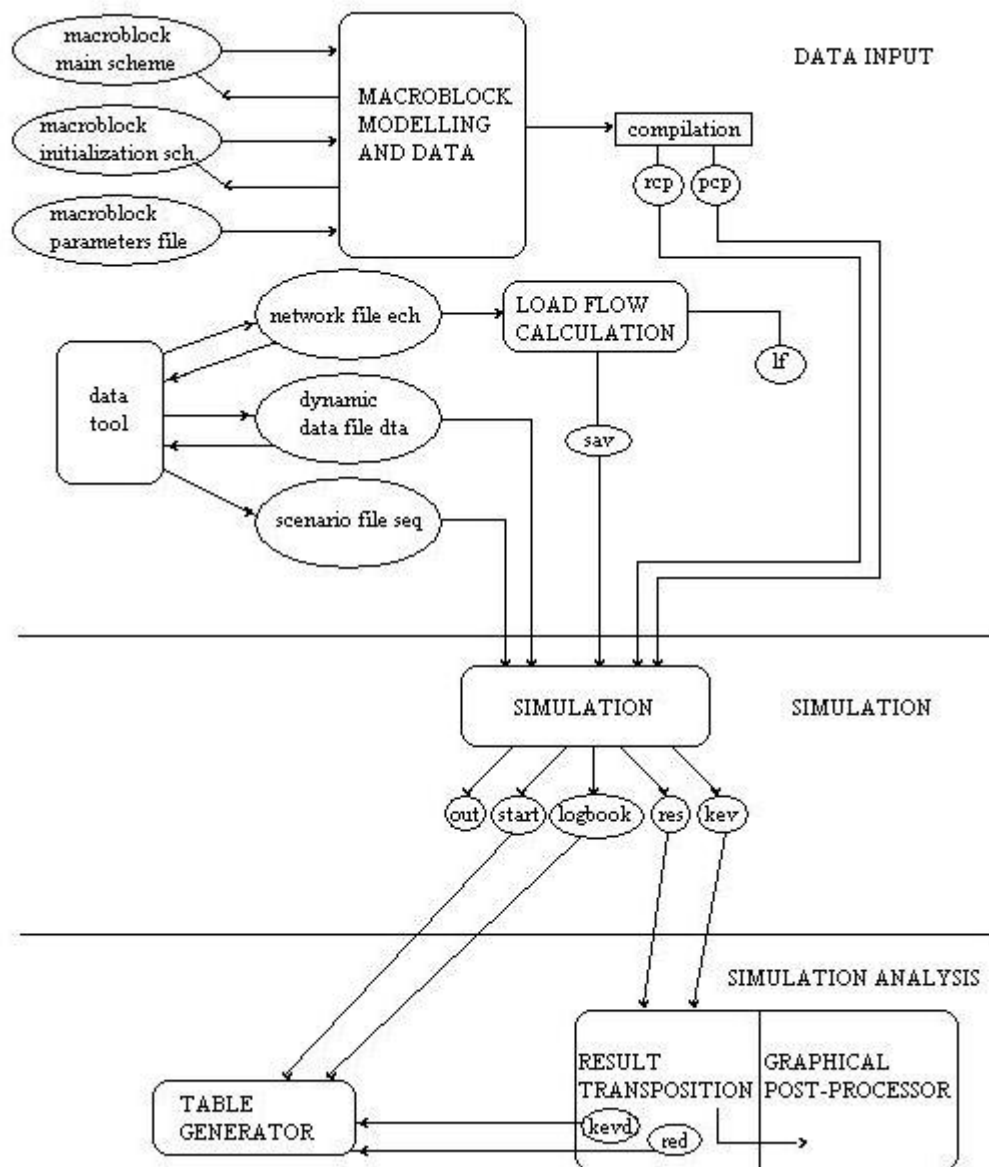
Ιδιαίτερη σημασία στην τεχνική περιγραφή του λογισμικού EUROSTAG, έχει ο τρόπος με τον οποίο εισάγονται τα δεδομένα στο μοντέλο. Αυτό γίνεται με την δημιουργία και τον χειρισμό, τριών τύπων αρχείων:

α) Του αρχείου ech, που περιλαμβάνει την τοπολογία του δικτύου με τους ζυγούς τάσεων (και τις παραγόμενες ή καταναλισκόμενες ισχύς τους), τις γραμμές μεταφοράς του ρεύματος, τους μετασχηματιστές, τους πυκνωτές αντιστάθμισης, τα φορτία του συστήματος και τις σύγχρονες γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών. Οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων παρίστανται με την μορφή φορτίου, το οποίο απορροφά άεργο ισχύ και παρέχει ενεργό ισχύ στο δίκτυο.

β) Του αρχείου dta, που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά, όσο και τους ρυθμιστές στροφών και τάσης των σύγχρονων γεννητριών του συστήματος καθώς επίσης και το μοντέλο του συστήματος της ανεμογεννήτριας με γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες στο αρχείο dta, αναφέρονται ως μηχανές επαγωγής.

γ) Του αρχείου seq, που περιλαμβάνει τις διαταραχές που ενδέχεται να προκληθούν στο σύστημα, π.χ. βραχυκυκλώματα, κλείσιμο γραμμών, ένταξη γεννητριών, εκκίνηση επαγωγικών κινητήρων, αλλαγή του ενεργού και άεργου φορτίου στους ζυγούς, καθώς και τις παραμέτρους που ορίζουν την ακρίβεια της επαναληπτικής μεθόδου, που χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων.

Τα αρχεία που προαναφέρθηκαν, παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην διεξαγωγή των προσομοιώσεων, κάτι που φαίνεται και στο ακόλουθο απλουστευμένο σχήμα, ο οποίο απεικονίζει τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το EUROSTAG.



Σχήμα 5.1 Τρόπος λειτουργίας EUROSTAG.

Όπως παρατηρούμε και από το σχήμα, το EUROSTAG χρησιμοποιώντας το αρχείο ech, σαν το κύριο αρχείο δεδομένων, το οποίο εμπεριέχει την αναπαράσταση του ηλεκτρικού μας δικτύου, μπορεί κατ' ευθεία να διεξάγει τον υπολογισμό της ροής φορτίου στο σύστημα. Τα αποτελέσματα της ροής φορτίου, παρουσιάζονται στο αρχείο If του EUROSTAG, από το οποίο μπορεί να τα δει ο χρήστης. Μετά το πέρας του υπολογισμού της ροής φορτίου, δημιουργείται το αρχείο sav (το οποίο περιέχει τα αποτελέσματα της ροής φορτίου, για εσωτερική όμως χρήση από το πρόγραμμα). Στην συνέχεια το EUROSTAG, χρησιμοποιεί τα αρχεία sav, dta και seq,

λαμβάνοντας υπ' όψιν και τα αρχεία rcr και pcr, για να προσομοιώσει την λειτουργία του συστήματος. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα αρχεία rcr και pcr, δημιουργούνται μέσω του model editor (macroblock editor), αφού προηγουμένως γίνει μεταγλωττισμός (compilation), των ρυθμιστών στροφών και τάσης καθώς επίσης και του ίδιου του μοντέλου της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης που υλοποιήθηκε.

Μετά το πέρας της προσομοίωσης, τα ακατέργαστα αποτελέσματα της αποθηκεύονται στα αρχεία **.kevn** και **.res**, όπου στην συνέχεια γίνονται κατεργασμένα αποτελέσματα (αρχεία **.kevd** και **.red** αντίστοιχα), τα οποία παρουσιάζονται μέσω του γραφικού επεξεργαστή (υπό μορφή διαγραμμάτων) και μέσω του τμήματος δημιουργίας πινάκων, με την βοήθεια των αρχείων start και logbook. Στο αρχείο **.out** περιέχονται τα δυναμικά δεδομένα του αρχείου **.dta**, καθώς και μια περίληψη της προσομοίωσης, μαζί με τα μηνύματα σφαλμάτων, τα οποία τυγχάνει να συμβαίνουν κατά την εκτέλεση της επαναληπτικής μεθόδου.

Κλείνοντας, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι τόσο το αρχείο με κατάληξη **ech**, όσο και το αρχείο **.dta**, είναι και τα δύο αρχεία κειμένου (της μορφής **.txt**). Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι μας επιτρέπει να επεμβαίνουμε στα προαναφερόμενα αρχεία, μέσω του κειμενογράφου (notepad) των WINDOWS και να προσαρμόζουμε τα δεδομένα και τις συνθήκες της κάθε προσομοίωσης με ιδιαίτερη ευκολία, χωρίς καν να χρειάζεται να χρησιμοποιούμε το λογισμικό μας. Τα πιο πάνω βέβαια μπορούν να γίνουν και μέσω του EUROSTAG, με την διαδικασία όμως να γίνεται λίγο πιο χρονοβόρα.

5.4 Γραφικός Προ – επεξεργαστής Μοντέλων (Model Editor) του EUROSTAG

5.4.1 Εισαγωγή

Ο προ – επεξεργαστής Model Editor στο EUROSTAG δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας μπλοκ διαγραμμάτων (Block Diagrams) τα οποία αντιπροσωπεύουν τις δυναμικές διαδικασίες που διέπουν το σύστημα το οποίο προσομοιώνεται. Ο διαδραστικός προσομοιωτής, ο οποίος περιλαμβάνεται σε αυτό το πακέτο

λογισμικού, επιτρέπει με τη σειρά του, μια μεγάλη ποικιλία επεξεργαστικών διαδικασιών οι οποίες καθορίζονται μέσω των δημιουργούμενων στο Model Editor μπλοκ διαγραμμάτων. Αυτές οι διαδικασίες περιλαμβάνουν την παρακολούθηση και τον έλεγχο των σύγχρονων μηχανών του ηλεκτρικού συστήματος (ο ρυθμιστής τάσης, για παράδειγμα). Ακόμη, δύναται αυτές οι διαδικασίες να λαμβάνουν χώρα μέσω της κατασκευής διάφορων μοντέλων όπως το μοντέλο μια μηχανής, ενός φορτίου, μιας συστοιχίας πυκνωτών αντιστάθμισης καθώς επίσης και μιας αυτόματης συσκευής (Macro – Automaton) η οποία θα ενεργοποιείται κάτω από καθορισμένες από το χρήστη συνθήκες (User Defined Automaton).

Αυτά τα μπλοκ διαγράμματα (Block Diagrams), τα οποία και ονομάζονται Macroblocks, ενσωματώνονται μέσα στο σύστημα μέσω του καθορισμού ενός αριθμού μεταβλητών εισόδου. Οι τύποι αλλά και το πλήθος των μεταβλητών οι οποίες είναι απαραίτητο να καθοριστούν για ένα μπλοκ διάγραμμα, εξαρτώνται από το είδος του μοντέλου το οποίο προσπαθούμε να υλοποιήσουμε με τη κατασκευή του συγκεκριμένου διαγράμματος. Για κάθε τύπο μοντέλου, συγκεκριμένες μεταβλητές αναγνωρίζονται από το εργαλείο δυναμικής προσομοίωσης του EUROSTAG και επομένως ένα υποσύνολο αυτών αποτελούν τις αναγκαίες προς καθορισμό μεταβλητές εισόδου. Πιο συγκεκριμένα:

- 1) Στη περίπτωση ενός μοντέλου ρυθμιστή τάσης ή στροφών μιας σύγχρονης μηχανής οι μεταβλητές εισόδου οι οποίες πρέπει να οριστούν περιλαμβάνουν τη τάση διέγερσης του στάτη η οποία συμβολίζεται ως EFD καθώς επίσης και τη μηχανική ροπή του άξονα συμβολισμένη με τη σειρά της ως CM.
- 2) Κατά τη δημιουργία του μπλοκ διαγράμματος ενός μετατροπέα οι αναγκαίες προς καθορισμό μεταβλητές εισόδου αποτελούνται από το πραγματικό (IPREF) και το φανταστικό (IQREF) μέρος του ρεύματος αναφοράς του μετατροπέα.
- 3) Στη περίπτωση δημιουργίας ενός μοντέλου μηχανής επαγωγής, μόνο η μηχανική στον άξονα ισχύς (CM) αποτελεί απαραίτητη προς καθορισμό μεταβλητή εισόδου.
- 4) Για τη σωστή και χωρίς προβλήματα ενσωμάτωση του μοντέλου ενός εγχυτήρα ισχύος στο σύστημα στο οποίο συνδέεται, το υποσύνολο των μεταβλητών οι οποίες επιβάλλεται να καθοριστούν διαφοροποιείται ανάλογα με το τύπο του εκάστοτε

εγχυτήρα όπως θα δούμε και παρακάτω. Οι μεταβλητές εισόδου εδώ μπορεί να είναι τα παρακάτω ζεύγη:

- το πραγματικό (G) και φανταστικό (B) μέρος της συνολικής σύνθετης αγωγιμότητας του εγχυτήρα.
- η ενεργός (PLOAD) και άεργος (QLOAD) ισχύς με την οποία αντιπροσωπεύεται σε αυτή τη περίπτωση ο εγχυτήρας τον οποίο επιδιώκουμε να μοντελοποιήσουμε.
- το μέτρο (I) και η διαφορά φάσης του ρεύματος σε σχέση με τη φάση της τάσης του προς σύνδεση ζυγού (PHI).
- το πραγματικό (IR) και φανταστικό (II) μέρος του ρεύματος του εγχυτήρα.

Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι, η ανεμογεννήτρια με ασύγχρονη γεννήτρια επαγωγής, της οποίας η μοντελοποίηση αποτελεί βασικό σκοπό της παρούσας εργασίας, μοντελοποιήθηκε ως ένας εγχυτήρας ενεργού και άεργου ισχύος. Συνεπώς, σύμφωνα με τα παραπάνω, οι αναγκαίες προς καθορισμό μεταβλητές εισόδου το μοντέλου είναι η ενεργός (PLOAD) και άεργος (QLOAD) ισχύς οι οποίες παράγονται και εγχέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο γραφικός αυτός προ – επεξεργαστής (Model Editor) αποτελεί επομένως έναν επεξεργαστή μπλοκ διαγραμμάτων (Macroblocks), ο οποίος παρέχει στο χρήστη μια πλειάδα επεξεργαστικών δυνατοτήτων, οι πιο βασικές των οποίων είναι η δημιουργία, η αλλαγή, η αποθήκευση και η εκτύπωση ενός τέτοιου διαγράμματος.

Η λειτουργία του προ – επεξεργαστή μοντέλων Model Editor του EUROSTAG βασίζεται στη συνεργασία μεταξύ μιας ομάδας υποπρογραμμάτων (ουσιαστικά αποτελούν συναρτήσεις γραμμένες σε Fortran 77 και σε C) καθένα από τα οποία διεκπεραιώνουν συγκεκριμένο σκοπό. Σε αυτή την ομάδα περιλαμβάνονται τα προγράμματα ανάλυσης της τοπολογίας του μπλοκ διαγράμματος, επεξεργασίας των τιμών των παραμέτρων και σύνδεσης αυτών των τιμών με το μεταγλωττισμένο μπλοκ διάγραμμα (Macroblock) με σκοπό τη δημιουργία ενός άμεσα αναγνώσιμου και εκμεταλλεύσιμου αρχείου από το διαδραστικό προσομοιωτή του EUROSTAG.

Τα αρχεία του επεξεργαστή αναλύονται από το υποπρόγραμμα ανάλυσης της τοπολογίας και στη συνέχεια με χρήση του κατάλληλου υποπρογράμματος αυτές

συνδέονται με κατάλληλο τρόπο με το διάγραμμα με στόχο την δυνατότητα ανάγνωσης τους από τον προσομοιωτή.

5.4.2 Γενική περιγραφή του Model Editor του EUROSTAG

Η επιφάνεια εργασίας του επεξεργαστή μοντέλων του EUROSTAG αποτελείται από τρία βασικά μέρη:

- 1) την κύρια οθόνη του μπλοκ διαγράμματος (Main Scheme)
- 2) την οθόνη, όπου το διάγραμμα αρχικοποίησης του σχεδιασμένου στη κύρια οθόνη μοντέλου απεικονίζεται (Initialization Scheme) και
- 3) την οθόνη απεικόνισης των παραμέτρων του μοντέλου και των αντίστοιχων τιμών τους (Parameter Table).

5.4.2.1 Κύρια οθόνη του μπλοκ διαγράμματος

Ένα μπλοκ διάγραμμα (Macroblock) είναι ουσιαστικά μια σύνθεση από στοιχειώδη μπλοκ (blocks). Κάθε ένα από αυτά τα στοιχειώδη “κουτιά” (blocks) εκτελεί μια απλή λειτουργία – συνάρτηση. Βασικά, αποτελούν συμβατικά, αυτόματα μπλοκ ελέγχου τα οποία υλοποιούν μια πλειάδα συναρτήσεων συμπεριλαμβανομένου αριθμητικών, λογικών καθώς επίσης και συναρτήσεων σκοπός των οποίων είναι ο υπολογισμός ενός συγκεκριμένου μεγέθους.

Επομένως ένα μπλοκ διάγραμμα αποτελείται από ένα σύνολο μπλοκ τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με σκοπό τη δημιουργία της μαθηματικής σχέσης η οποία συνδέει τις εισόδους με τις εξόδους τους. Η έξοδος κάθε στοιχειώδους μπλοκ προκύπτει με βάση τις εισόδους και τις τιμές των παραμέτρων του.

Για τη σύνδεση δύο μπλοκ δύο βασικοί τρόποι σύνδεσης εφαρμόζονται. Ο πρώτος είναι σχετικά απλός και επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο εργαλείο σύνδεσης (Connection Tool) ενώ έχει ως αποτέλεσμα τη γραφική σχεδίαση μιας ευθείας η οποία ενώνει τα δύο μπλοκ. Ο δεύτερος αν και πιο πολύπλοκος, είναι πιο

χρήσιμος και οδηγεί σε πιο εύκολη κατανόηση των μπλοκ διαγραμμάτων. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στη περίπτωση που θέλουμε να περιορίσουμε το μεγάλο αριθμό σχεδιασμένων γραμμών διασύνδεσης μπλοκ. Χρησιμοποιεί ουσιαστικά τη δυνατότητα που παρέχει ο επεξεργαστής μοντέλων στο χρήστη, να ονομάζει την έξοδο ενός μπλοκ χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η έξοδος γίνεται αυτομάτως και μεταβλητή κατάστασης η οποία πρέπει να αρχικοποιηθεί. Για το σκοπό αυτό, το όνομα το οποίο αποδίδεται στην έξοδο πρέπει να αρχίζει με το χαρακτήρα @. Επομένως σε περίπτωση που έχουμε ονομάσει την είσοδο ενός μπλοκ με το ίδιο όνομα (το οποίο ως φυσικό επακόλουθο ξεκινάει και αυτό με το χαρακτήρα @) έχουμε απλά καταφέρει να συνδέσουμε τα δύο αυτά μπλοκ και τίποτα περισσότερο. Αυτός ο τρόπος σύνδεσης μπλοκ χρησιμοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό στη κατασκευή του προς μοντελοποίηση συστήματος όπως θα παρατηρήσετε και στα διαγραμματικά σχήματα τα οποία περιλαμβάνονται παράρτημα 2 της παρούσας εργασίας.

5.4.2.2 Μεταβλητές Διασύνδεσης (Interface Variables)

Την έξοδο κάθε μπλοκ μπορούμε, δίνοντας της ένα όνομα, να τη μετατρέψουμε σε μια μεταβλητή διασύνδεσης (Interface Variable), την οποία και μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε ως είσοδο σε άλλα μπλοκ εάν χρειαστεί. Βασικός λόγος της δημιουργίας μιας μεταβλητής διασύνδεσης αποτελεί η ανάγκη να συνδέσουμε είτε διαφορετικά μπλοκ διαγράμματα (Macroblocks) μεταξύ τους, είτε με τις μηχανές και τις αυτόματες συσκευές στις οποίες αναφέρονται.

Η δημιουργία μιας τέτοιας μεταβλητής είναι επίσης πολύ σημαντική, γιατί διευκολύνει σε μεγάλο βαθμό την ανάλυση της τοπολογίας του διαγράμματος κατά τη μεταγλώττιση των αρχείων του μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, αναγκαίο αποτελεί για τη μεταγλώττιση, η μη ύπαρξη κλειστών αλγεβρικών βρόγχων στο διάγραμμα. Σε αντίθετη περίπτωση, το υποπρόγραμμα ανάλυσης της τοπολογίας δε μπορεί να προχωρήσει στην επιτυχή αναγνώριση των εξισώσεων με αποτέλεσμα την αναφορά ενός μηνύματος σφάλματος κατά τη μεταγλώττιση. Βέβαια, αξιοσημείωτη είναι και η υποχρέωση που έχουμε να αρχικοποιήσουμε κατάλληλα κάθε μεταβλητή διασύνδεσης που δημιουργούμε.

Το όνομα μιας μεταβλητής διασύνδεσης πρέπει να περιέχει έως οχτώ λατινικούς αλφαριθμητικούς χαρακτήρες (01 – 9A – Z). Επίσης, για κάθε μοντέλο το οποίο δημιουργείται, εκτός των δημιουργούμενων μεταβλητών από τον ίδιο τον χρήστη, υπάρχουν και κάποιες προ – ορισμένες από το λογισμικό μεταβλητές διασύνδεσης ανάλογα με τον τύπο του μοντέλου το οποίο δημιουργείται. Προκαθορισμένες μεταβλητές διασύνδεσης δεν υφίστανται μόνο στη περίπτωση μπλοκ διαγραμμάτων τα οποία αναφέρονται σε μοντέλα αυτόματων συσκευών. Ο τύπος αυτός των μοντέλων καθορίζεται κατά τη δημιουργία του αρχείου **dta**. Ένα υποσύνολο των μεταβλητών αυτών είναι απαραίτητο και αναγκαίο να καθοριστούν και να αρχικοποιηθούν κατάλληλα, για τη σωστή ενσωμάτωση του μοντέλου στο συνολικό σύστημα, όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω.

Στη παρούσα εργασία, ο επεξεργαστής μοντέλων (Model Editor) χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την υλοποίηση του μοντέλου του συστήματος της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Το σύστημα αυτό, βάση και των παραπάνω, μοντελοποιήθηκε στο EUROSTAG ως ένας εγχυτήρας ενεργού και άεργου ισχύος. Ακόμη, μοντελοποιήθηκε και το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου στο οποίο οι ρυθμιστές στροφών και τάσης των γεννητριών αποτελούν και αυτά μπλοκ διαγράμματα. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμο για την ευκολότερη και πληρέστερη κατανόηση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν και δημιουργήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, να συμπεριλάβουμε τη παρακάτω λίστα με τις προ – καθορισμένες μεταβλητές για τους τύπους των προς υλοποίηση μοντέλων.

Για το μοντέλο ενός εγχυτήρα ενεργού και άεργου ισχύος:

UR: πραγματικό μέρος της τάσης θετικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

UI: φανταστικό μέρος της τάσης θετικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

URI: πραγματικό μέρος της τάσης αρνητικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

UII: φανταστικό μέρος της τάσης αρνητικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

URH: πραγματικό μέρος της τάσης μηδενικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

UIH: φανταστικό μέρος της τάσης μηδενικής ακολουθίας του ζυγού σύνδεσης.

PLOAD: Ενεργός ισχύς που παράγεται και εγχέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, απαραίτητα να είναι ορισμένη στο διάγραμμα.

QLOAD: Άεργος ισχύς που παράγεται και εγχέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, απαραίτητα να είναι ορισμένη στο διάγραμμα.

Για το μοντέλο όλων των σύγχρονων μηχανών και τους ρυθμιστές στροφών και τάσεις τους:

ID: συνιστώσα ρεύματος στάτη στον d άξονα.

IQ: συνιστώσα ρεύματος στάτη στον q άξονα.

OMEGA: ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της μηχανής.

TETA: γωνιακή θέση του δρομέα (τιμή σε rad).

LAMBDAF: μαγνητική ροή τυλίγματος διέγερσης.

EFD: ισοδύναμη στο στάτη τάση διέγερσης, απαραίτητα να είναι ορισμένη στο διάγραμμα.

CM: μηχανική ροπή δρομέα, απαραίτητα να είναι ορισμένη στο διάγραμμα (τιμή σε ανά μονάδα με βάση την ονομαστική ροπή της μηχανής, p.u).

Οι τιμές των παραπάνω μεταβλητών πρέπει να είναι εκφρασμένες στο ανά μονάδα σύστημα εκτός εάν αναφέρεται το αντίθετο.

5.4.2.3 Οθόνη μπλοκ διαγράμματος αρχικοποίησης (Initialization Scheme)

Η αρχικοποίηση ενός μπλοκ διαγράμματος (Macroblock) περιλαμβάνει την παραχώρηση αρχικών τιμών στις μεταβλητές κατάστασης του συστήματος καθώς επίσης και σε συγκεκριμένα μπλοκ τα οποία είναι απαραίτητα να αρχικοποιηθούν. Αυτά τα μπλοκ όπως θα δούμε στη συνέχεια είναι ουσιαστικά μπλοκ με μνήμη (Memory Blocks). Οι απαιτούμενες αυτές αρχικές τιμές δίνονται στον προσομοιωτή μέσω αλγεβρικών εκφράσεων, οι οποίες υλοποιούνται μέσω του σχεδιαζόμενου μπλοκ διαγράμματος αρχικοποίησης και υπολογίζονται με βάση τις τιμές στην μόνιμη κατάσταση λειτουργίας. Με άλλα λόγια, η αρχική κατάσταση είναι και η μόνιμη κατάσταση λειτουργίας (οι χρονικές παράγωγοι των μεταβλητών κατάστασης είναι ίσες με μηδέν κατά την αρχικοποίηση).

Οι αντίστοιχες αρχικές τιμές των μεταβλητών κατάστασης συμβολίζονται με τον χαρακτήρα $\wedge$ και στη συνέχεια από το όνομα της μεταβλητής κατάστασης την οποία θέλουμε να αρχικοποιήσουμε. Δηλαδή, στη περίπτωση ενός ονόματος μιας μεταβλητής κατάστασης X , η αρχική της τιμής συμβολίζεται με $\wedge X$.

5.4.2.4 Παράμετροι των μπλοκ (Block Parameters)

Κάθε στοιχειώδες μπλοκ χαρακτηρίζεται από ορισμένες παραμέτρους οι οποίες και περιλαμβάνονται στο πίνακα παραμέτρων (Parameter Table). Μια παράμετρος μπορεί να είναι:

- είναι μια αριθμητική τιμή
- αποτελεί το αποτέλεσμα μιας στοιχειώδους πράξης μεταξύ δύο αριθμητικών τιμών
- αντιπροσωπεύεται από ένα συμβολικό όνομα (και σε αυτή τη περίπτωση το συμβολικό αυτό όνομα περιλαμβάνεται σε γραμμή του πίνακα παραμέτρων ενώ δίπλα του απεικονίζεται η προδιδόμενη σε αυτό από το χρήστη τιμή)
- αποτελεί το αποτέλεσμα μιας συμβολικής πράξης μεταξύ δύο άλλων παραμέτρων οι οποίες συμβολίζονται μέσω της χρήσης διαφορετικών συμβολικών ονομάτων
- είναι ίση με το αποτέλεσμα μιας πράξης μεταξύ μιας αριθμητικής τιμής και μιας παραμέτρου η οποία αντιπροσωπεύεται μέσω ενός συμβολικού ονόματος.

Ως τελεστές των στοιχειωδών αυτών πράξεων αναγνωρίζονται οι $-$, $+$, $*$, $/$.

Υπάρχουν και εδώ συγκεκριμένα συμβολικά ονόματα τα οποία είναι προκαθορισμένα και αναγνωρίσιμα από τον προσομοιωτή. Αυτά παρέχουν στο χρήστη τη δυνατότητα να επεμβαίνει στις παραμέτρους της μηχανής στην οποία το υλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα είναι συνδεδεμένο. Και σε αυτή τη περίπτωση, ένα συμβολικό όνομα μιας παραμέτρου δεν μπορεί να ξεπερνάει το μήκος των οχτώ αλφαριθμητικών χαρακτήρων, ενώ σημαντικό αποτελεί το γεγονός ότι μια παράμετρος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος σε ένα μπλοκ.

Οι δημιουργούμενες από το χρήστη παράμετροι αποθηκεύονται σε ένα αρχείο **.par** το οποίο ουσιαστικά διαβάζεται από το υποπρόγραμμα συσχέτισης των παραμέτρων (Parameter Association Program).

5.4.3 Υποπρογράμματα του προ – επεξεργαστή και ο ρόλος τους στη μεταγλώττιση

5.4.3.1 Υποπρόγραμμα ανάλυσης της τοπολογίας (Topology Analysis Program)

Το υποπρόγραμμα αυτό (Topology Analysis Program), ελέγχει την ορθότητα της τοπολογίας και της σύνταξης του γραφικά κωδικοποιημένου μπλοκ διαγράμματος. Για το σκοπό αυτό, προχωράει αρχικά στην ανάγνωση των δημιουργούμενων από τον επεξεργαστή μοντέλων (Model Editor) αρχείων, **.frm** και **.fri** τα οποία περιγράφουν την τοπολογία του διαγράμματος. Στη συνέχεια, δημιουργεί το αρχείο **.rcp**, το οποίο περιγράφει την τοπολογία του macroblock σε μορφή η οποία αναγνωρίζεται από τον διαδραστικό δυναμικό προσομοιωτή του EUROSTAG.

Επίσης, το υποπρόγραμμα ανάλυσης της τοπολογίας, παράγει ένα αρχείο εξόδου με όνομα **eurostag_mg.out** το οποίο περιέχει τη περιγραφή της τοπολογίας του μπλοκ διαγράμματος για την διευκόλυνση του ίδιου του χρήστη. Τέλος, ένα ακόμη αρχείο με κατάληξη **.reg** δημιουργείται. Το αρχείο αυτό είναι προσωρινό και μπορεί να διαγραφεί μετά τη μεταγλώττιση.

5.4.3.2 Υποπρόγραμμα συσχέτισης των παραμέτρων (Parameter Association Program)

Το υποπρόγραμμα αυτό μεταγλωττίζει το υπάρχων με κατάληξη **.par** αρχείο το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με την αντιστοίχιση αριθμητικών τιμών με τις αλφαριθμητικές παραμέτρους του μπλοκ διαγράμματος. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας, αποτελεί η δημιουργία ενός **.pcp** αρχείου το οποίο είναι απαραίτητο για την εκτέλεση της δυναμικής προσομοίωσης. Επιπρόσθετα, ένα αρχείο εξόδου με όνομα **eurostag_p.out** δημιουργείται για τη διευκόλυνση του χρήστη.

5.4.3.3 Μεταγλώττιση μπλοκ διαγράμματος (macroblock compilation)

Η μεταγλώττιση ενός μπλοκ διαγράμματος είναι μια διαδικασία η οποία καλεί τα υποπρογράμματα ανάλυσης της τοπολογίας και συσχέτισης των παραμέτρων του

μπλοκ διαγράμματος. Συνεπώς, η μεταγλώττιση μπορούμε να πούμε ότι χρησιμοποιεί τα αρχεία **.frm**, **.fri** και **.par** και έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία των αρχείων με κατάληξη **rcp** και **pcp**. Διακρίνεται σε δύο στάδια:

- 1) Το στάδιο ανάλυσης της τοπολογίας του μπλοκ διαγράμματος (δημιουργία **.rcp** αρχείου).
- 2) Το στάδιο συσχέτισης των παραμέτρων με τις αριθμητικές τιμές τους (δημιουργία **.pcp** αρχείου).

Συμπερασματικά, η μεταγλώττιση του μπλοκ διαγράμματος είναι απαραίτητη γιατί μετατρέπει το διάγραμμα σε μορφή πληροφοριών η οποία μπορεί να αναγνωριστεί από τον δυναμικό προσομοιωτή του EUROSTAG, και κάνει την προσομοίωση του δημιουργούμενου μοντέλου δυνατή και υλοποιήσιμη.

5.4.4 Περιγραφή βασικών στοιχειωδών μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν

Υπάρχουν τέσσερα βασικά ήδη μπλοκ:

- 1) *Τα μπλοκ μετρήσεων (Measurement Blocks)*. Πρόκειται για μπλοκ τα οποία δεν έχουν είσοδο παρά μόνο έξοδο. Η έξοδος τους για κάθε χρονική στιγμή είναι ίση με ένα μέγεθος του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μοντελοποιείται. Παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν μπλοκ τα οποία έχουν ως έξοδο το μέτρο και τη γωνία της τάσης και του ρεύματος του ζυγού στον οποίο το μοντελοποιημένο σύστημα συνδέεται καθώς επίσης και η ενεργός και η άεργος ισχύ που εγχέεται σε αυτόν.
- 2) *Τα μπλοκ τα οποία εκτελούν λογικές πράξεις* όπως AND, OR και HOLD OR (Logical Blocks) και *συγκρίσεις*.
- 3) *Τα μπλοκ τα οποία εκτελούν στοιχειώδεις αριθμητικές πράξεις* (πρόσθεση ή/και αφαίρεση, πολλαπλασιασμός ή/και διαίρεση) ή εφαρμόζουν συγκεκριμένες *χρήσιμες συναρτήσεις* στην είσοδο. Τέτοιες συναρτήσεις είναι οι τριγωνομετρικές (ημίτονο, συνημίτονο, εφαπτομένη) και οι αντίστροφές τους, η συνάρτηση ύψωσης σε μια δύναμη καθώς επίσης και η εκθετική.

4) Τα μπλοκ με μνήμη (*Memory Blocks*). Πρόκειται για μπλοκ, των οποίων η έξοδος τους μια χρονική στιγμή είναι συνάρτηση της εξόδου τους την ακριβώς προηγούμενη στιγμή. Επομένως, είναι απαραίτητη η αρχικοποίηση των μπλοκ που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία. Μπλοκ μνήμης είναι βασικά τα μπλοκ τα οποία χρησιμοποιούν το μετασχηματισμό Laplace. Σε αυτή τη κατηγορία περιλαμβάνονται επίσης και μπλοκ οι έξοδοι των οποίων εξαρτώνται από κάποια σύγκριση μεταξύ των εισόδων τους καθώς επίσης και από την τιμή των εξόδων τους την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Για τη καλύτερη και ευκολότερη κατανόηση των μοντέλων των ρυθμιστών τάσης και στροφών αλλά κυρίως του μοντέλου του συστήματος της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης που υλοποιήθηκε, κρίθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθεί μια περιγραφή των βασικών στοιχειωδών μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (βλέπε Παράρτημα Ι).

6 Προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολές του ανέμου

6.1 Εισαγωγή

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, ένα σύνολο προσομοιώσεων της λειτουργίας του συστήματος σε διάφορες μεταβολές του ανέμου περιλαμβάνεται σε αυτό το κεφάλαιο. Η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης μοντελοποιήθηκε στις παρακάτω προσομοιώσεις με βάση το μοντέλο 5^{ης} τάξης το οποίο αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, η ανάπτυξη ενός μοντέλου ανέμου κρίθηκε περιττή στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και ουσιαστικά το μοντέλο αυτό «παριστάνεται» από μια χρονοσειρά τιμών καθορισμένη από τον χρήστη. Φαινόμενα, όπως αυτό της σκίασης του πύργου, αγνοήθηκαν στην παρούσα εργασία. Επομένως, τα διάφορα σενάρια μεταβολής του ανέμου στα οποία ο άνεμος αποτελεί ένα καθαρά ντετερμινιστικό μέγεθος, καθορίστηκαν από το χρήστη. Αρχικά, εξετάζεται η συμπεριφορά του συστήματος σε μια σειρά βηματικών αυξήσεων της ταχύτητας του ανέμου με ρυθμό μεταβολής $1m/s^s$ οι οποίες πραγματοποιούνται κάθε 20s. Βασιζόμενοι στις αποκρίσεις του συστήματος σε αυτές τις συνθήκες ανέμου, η βελτιστοποίηση της παραμετροποίησης των διάφορων ελεγκτών μπορεί να επιτευχθεί.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δύο διαφορετικές διαμορφώσεις του μηχανικού συστήματος και του ελέγχου του, αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2:

1. Μοντέλο συστήματος μετάδοσης της κίνησης μιας - μάζας (ο άξονας θεωρήθηκε άκαμπτος). Στη στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος που υιοθετήθηκε το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref} .
2. Μοντέλο συστήματος μετάδοσης της κίνησης δύο – μαζών συμπεριλαμβανομένου ενός εύκαμπτου άξονα και ενός ταλαντωτή. Η παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος έγινε με βάση την τεχνική Gain Scheduling.

Τα διάφορα σενάρια λειτουργίας (μεταβολές του ανέμου) θα προσομοιωθούν και για τις 2 παραπάνω διαμορφώσεις του μηχανικού μέρους. Περιλαμβάνεται τέλος μια σύγκριση της απόκρισης των δύο διαμορφώσεων του μηχανικού μέρους και διατύπωση των συμπερασμάτων αυτής της σύγκρισης.

Σημειώνεται ότι οι παρακάτω αποκρίσεις των γραφημάτων (6.1) – (6.49) καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό ως προς το εύρος των ταλαντώσεων αλλά και ως προς τη διάρκεια τους, από την τιμή της σταθεράς αδρανείας H (sec) ή αλλιώς από τις ροπές αδρανείας των αξόνων της ανεμογεννήτριας και της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης J_{rot} ($Kg \times m^2$) και J_{gen} ($Kg \times m^2$) αντίστοιχα.

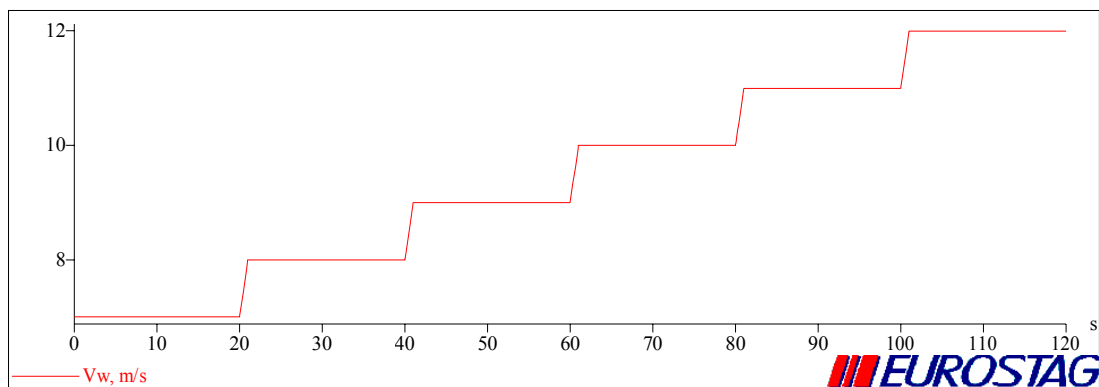
6.2 Απόκριση του συστήματος σε βηματικές αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου με ρυθμό μεταβολής $1m/s^2$ οι οποίες λαμβάνουν χώρα κάθε $20s$

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι αποκρίσεις τυπικών μεγεθών τόσο του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας (γωνία βήματος β , αεροδυναμική ροπή T_{rot}) όσο και του ηλεκτρικού μέρους της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (αναφορά ενεργού ισχύος του ελεγκτή ταχύτητας για τον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα P_{ref} , γωνιακή ταχύτητα δρομέα Ω_{gen} , ηλεκτρική ροπή T_e).

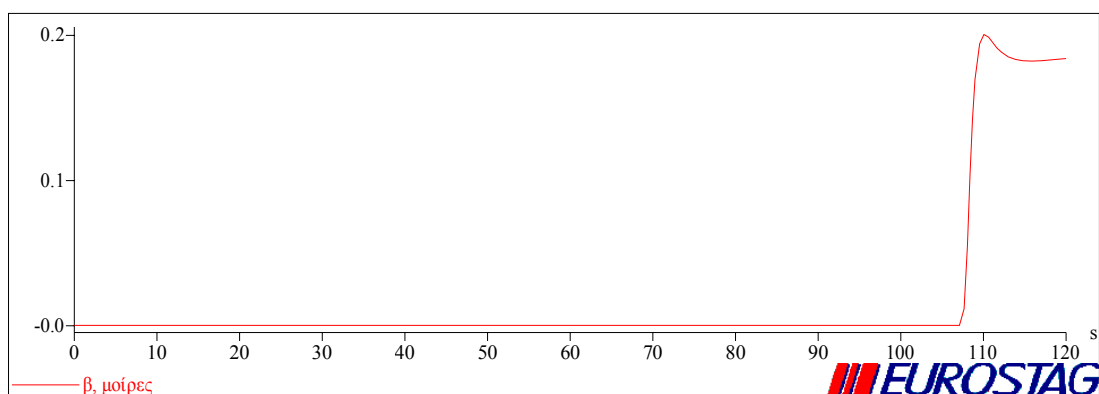
6.2.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}

Απόκριση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου

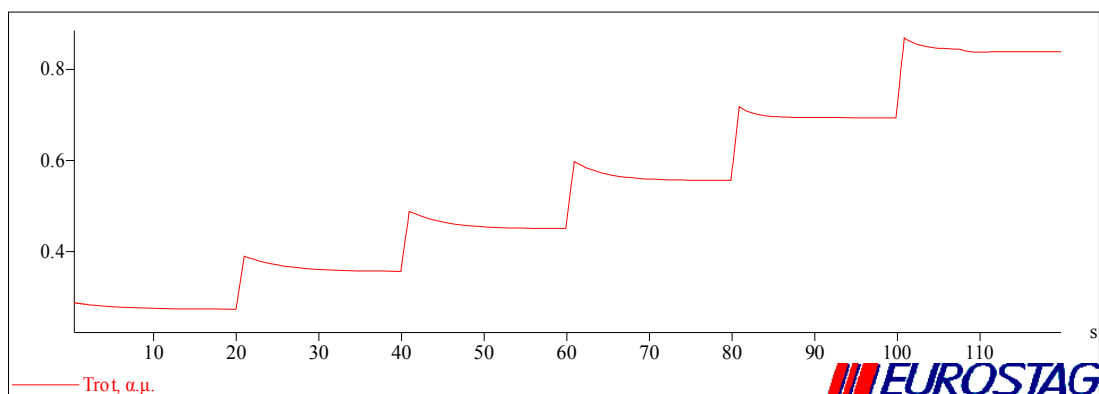
Η αρχική τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι $7m/s$ και αυξάνεται σταδιακά με ρυθμό μεταβολής $1m/s^2$. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται κατά $1m/s$ κάθε $20s$ όπως φαίνεται στο γράφημα (6.1). Η τελική ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με $12m/s$. Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της γωνίας βήματος επιλέχθηκε ίσος με $\pm 3^\circ/s$.



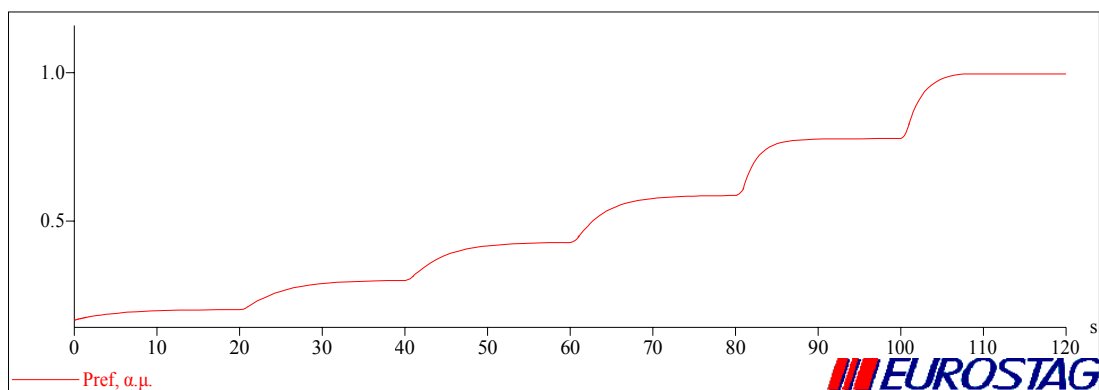
Γράφημα 6.1 Ταχύτητα του ανέμου.



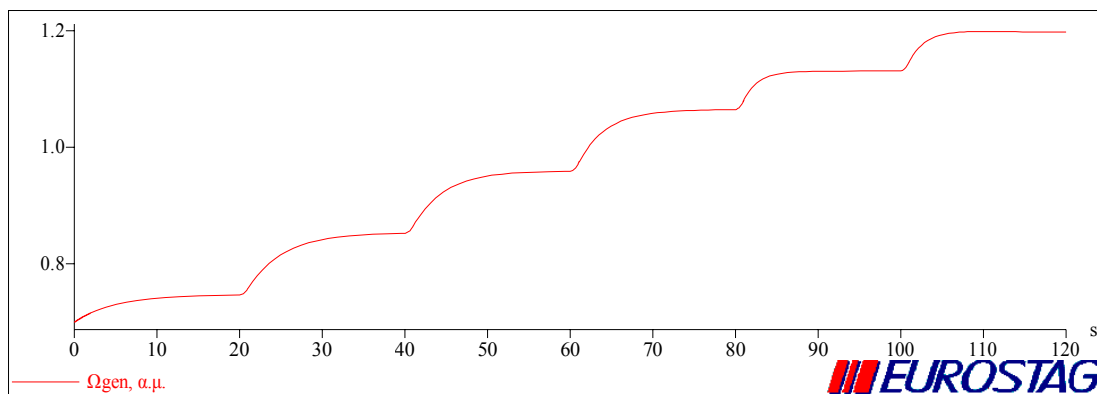
Γράφημα 6.2 Απόκριση γωνίας βήματος.



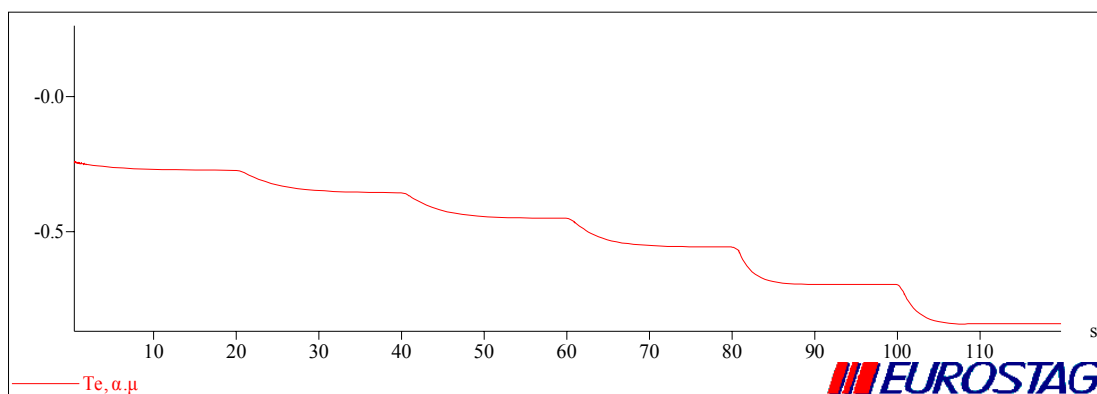
Γράφημα 6.3 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



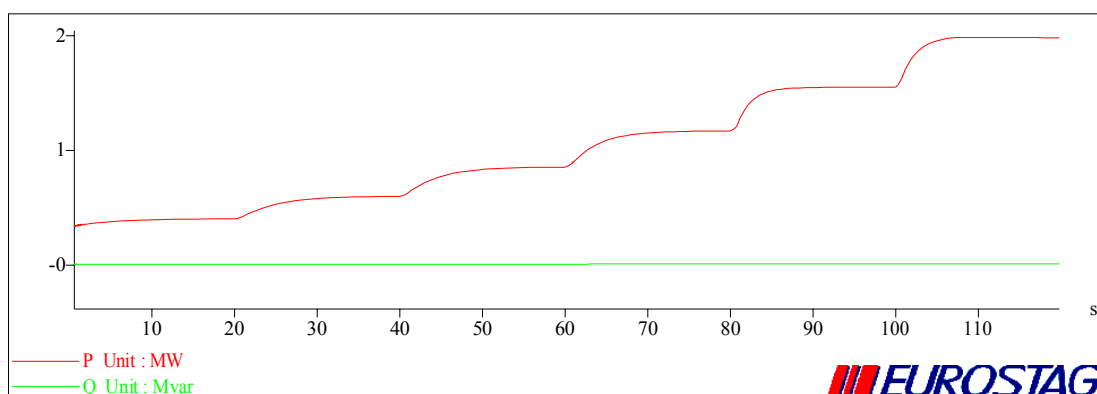
Γράφημα 6.4 Σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος.



Γράφημα 6.5 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



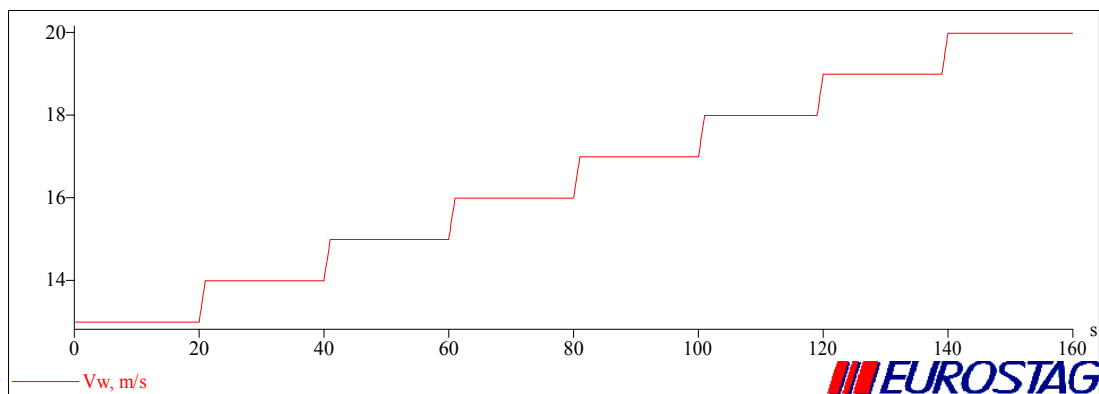
Γράφημα 6.6 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.



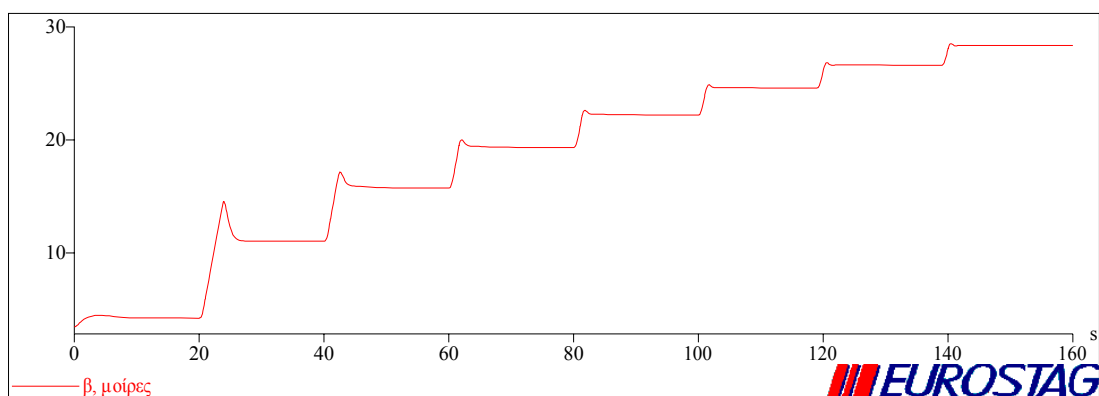
Γράφημα 6.7 Απόκριση ενεργού και άεργου ισχύος.

Απόκριση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου

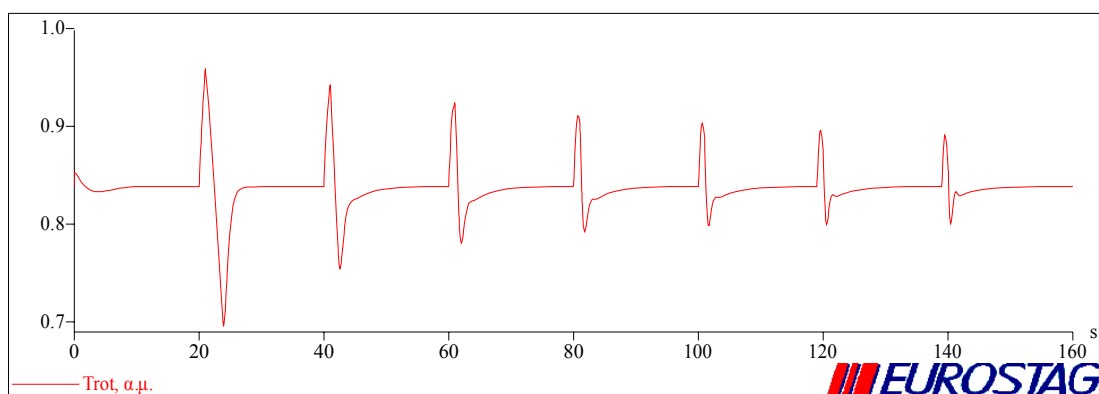
Η αρχική τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι 13m/s και αυξάνεται σταδιακά με ρυθμό μεταβολής 1m/s^2 . Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται κατά 1m/s κάθε 20s όπως φαίνεται στο γράφημα (6.8). Η τελική ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με 20m/s . Ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της γωνίας βήματος επιλέχθηκε ίσος με $\pm 3^\circ/\text{s}$.



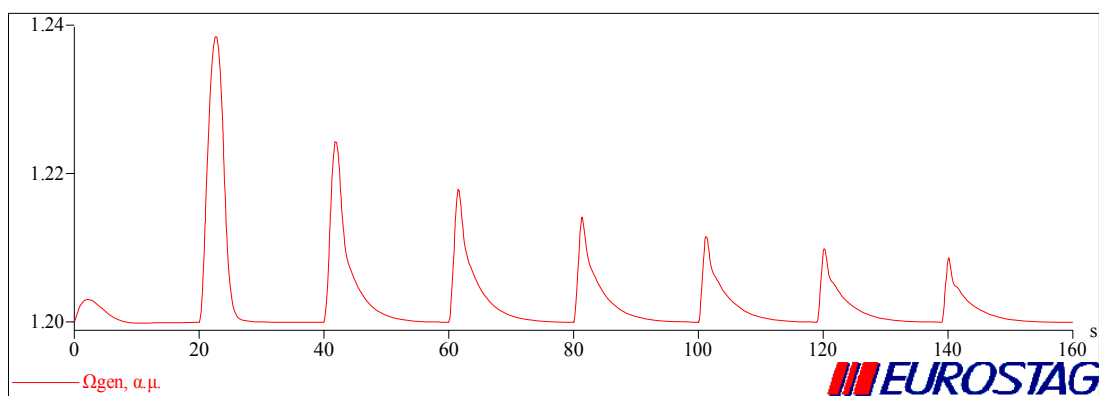
Γράφημα 6.8 Ταχύτητα του ανέμου.



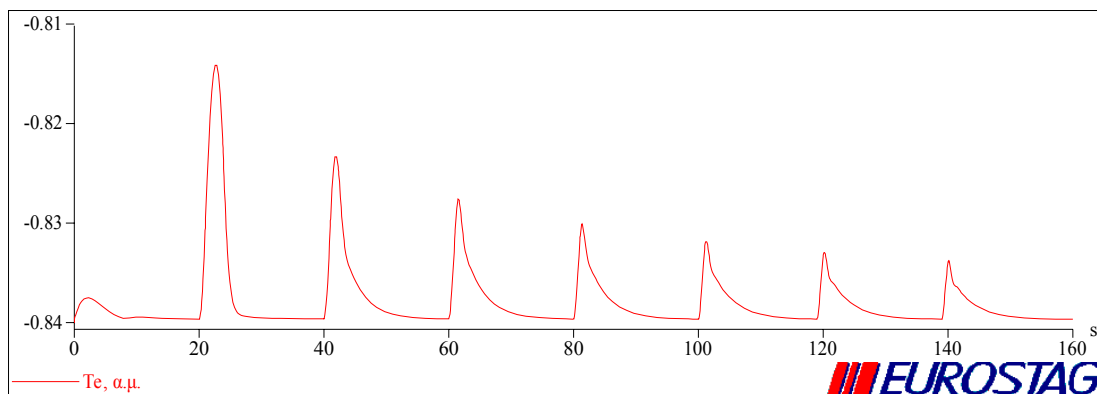
Γράφημα 6.9 Απόκριση γωνίας βήματος.



Γράφημα 6.10 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα 6.11 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

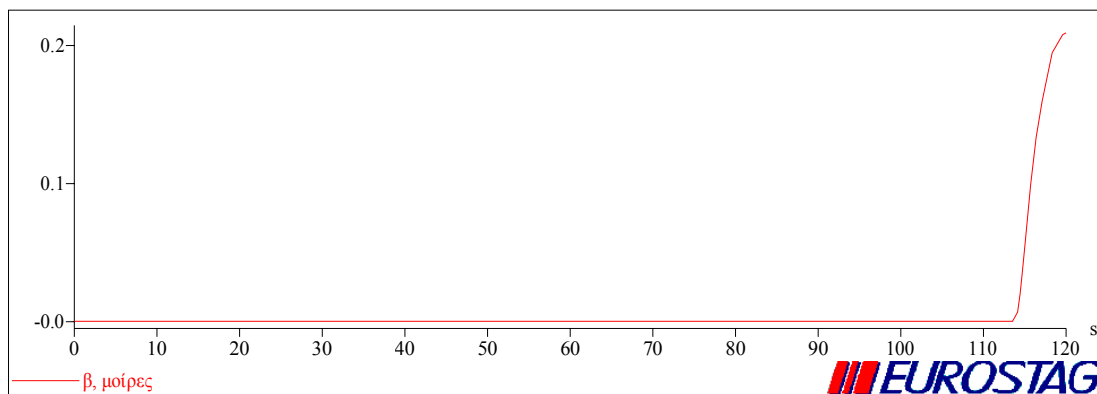


Γράφημα 6.12 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

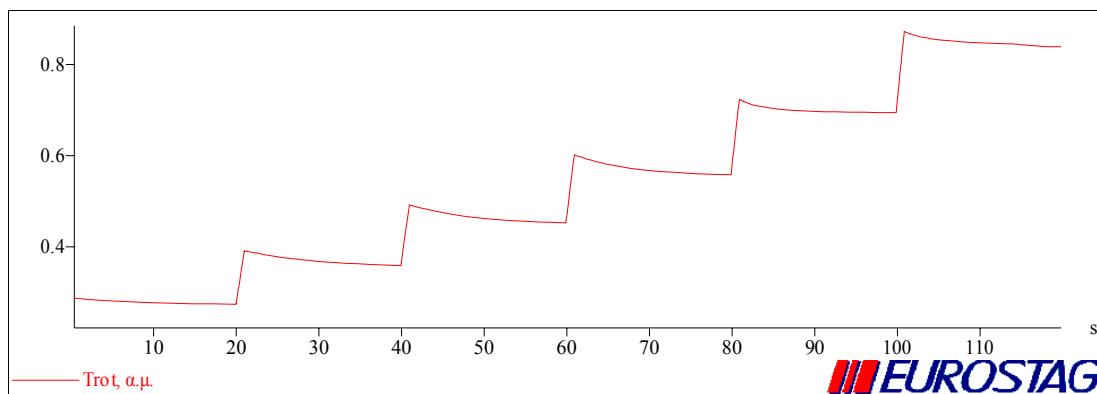
6.2.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling

Απόκριση σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου

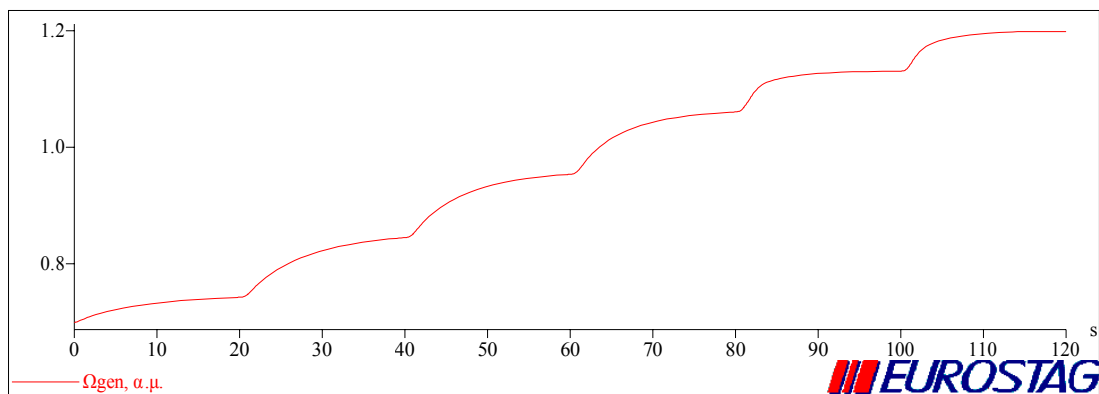
Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με βάση το γράφημα (6.1).



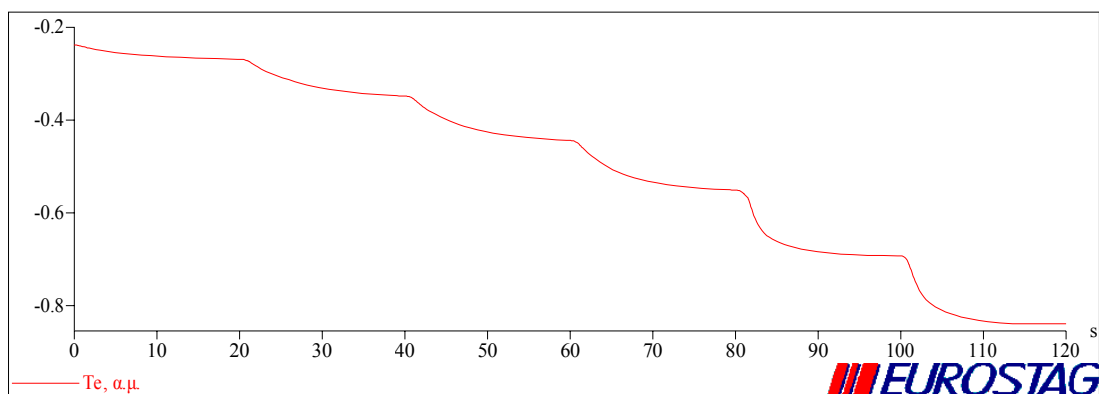
Γράφημα 6.13 Απόκριση γωνίας βήματος.



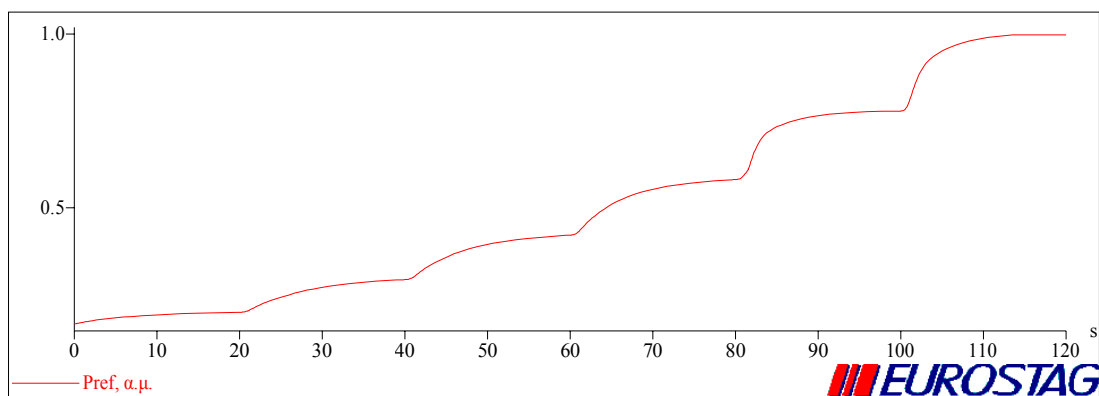
Γράφημα 6.14 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα 6.15 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



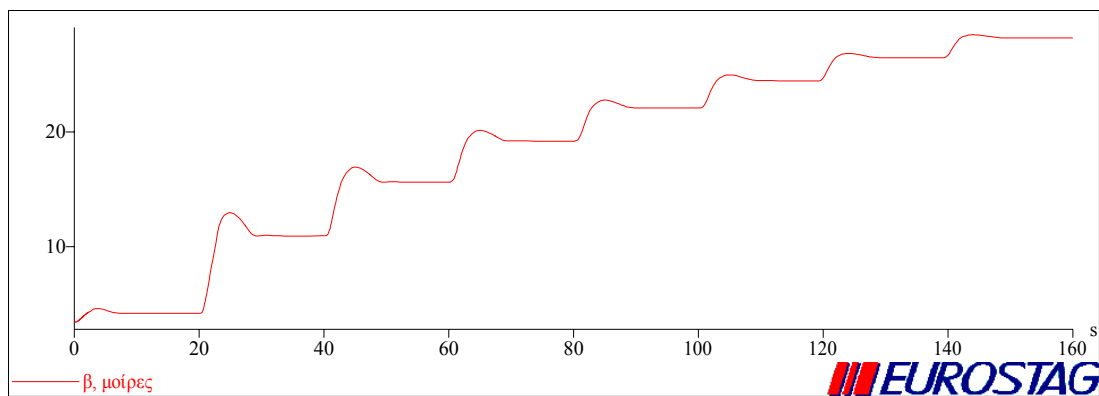
Γράφημα 6.16 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.



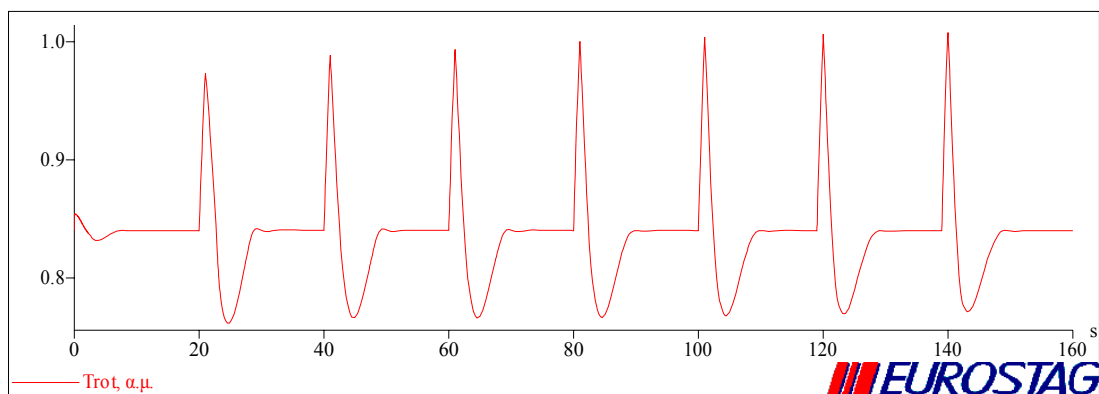
Γράφημα 6.17 Σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος.

Απόκριση σε υψηλές ταχύτητες ανέμου

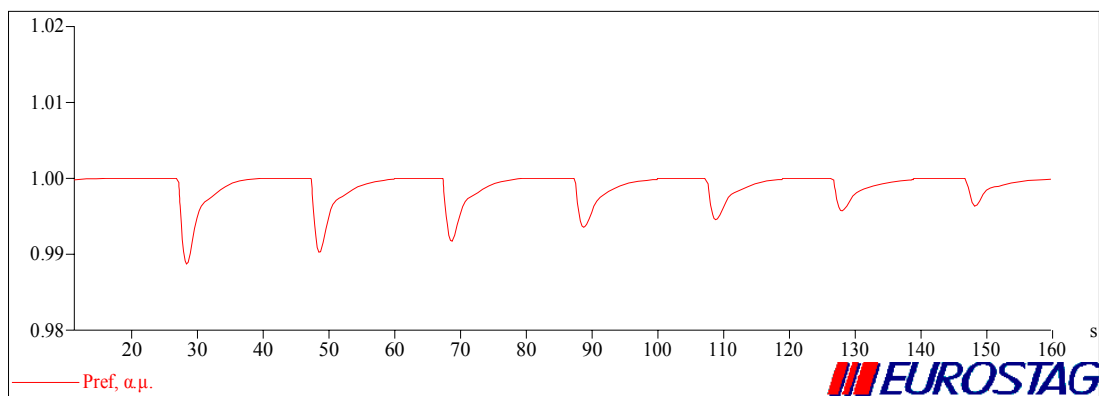
Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με βάση το γράφημα (6.8).



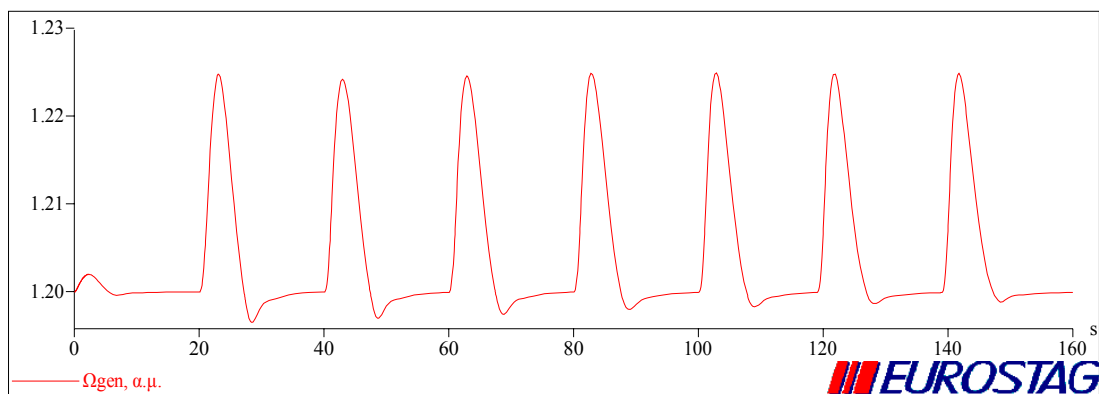
Γράφημα 6.18 Απόκριση γωνίας βήματος.



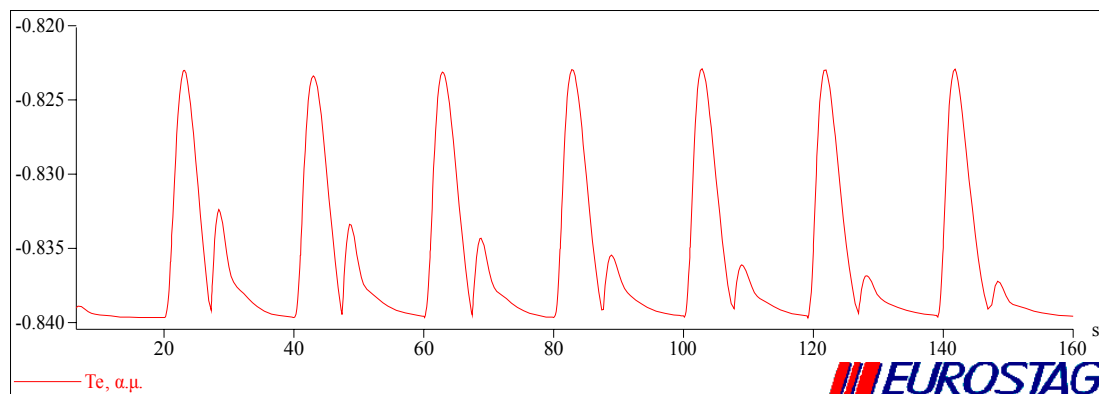
Γράφημα 6.19 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα 6.20 Σήμα αναφοράς της ενεργού ισχύος.



Γράφημα 6.21 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.



Γράφημα 6.22 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

Σύμφωνα με τα παραπάνω γραφήματα, για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 12 m/s , ο μηχανισμός αλλαγής γωνίας βήματος είναι ανενεργός και η γωνία βήματος διατηρείται σταθερή στην βέλτιστη τιμή της (ίση με μηδέν για την υπό εξέταση ανεμογεννήτρια). Όταν η ταχύτητα ανέμου έχει τιμή μικρότερη από την ονομαστική της η Α/Γ λειτουργεί υπό συνθήκες βέλτιστης ισχύος δηλ. με βέλτιστο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος $C_{p,opt}$, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς. Η τιμή της γωνίας βήματος που αντιστοιχεί σε αυτές τις λειτουργικές συνθήκες είναι $\beta_{opt} = 0^\circ$.

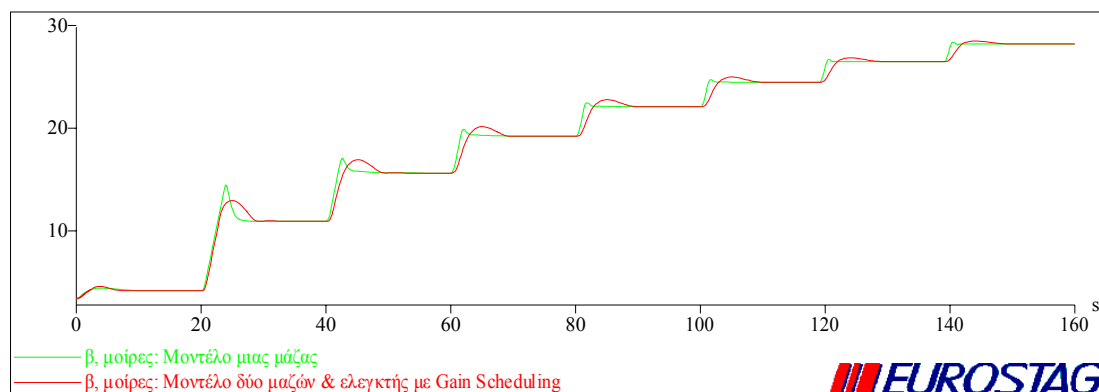
Εντωμεταξύ, ο ελεγκτής ενεργού ισχύος ελέγχει την ενεργό ισχύ με βάση το σήμα αναφοράς το οποίο παράγεται στον ελεγκτή ταχύτητας. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας προσαρμόζεται κάθε χρονική στιγμή στην ταχύτητα του ανέμου, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση της εξαγόμενης από τον άνεμο ισχύος.

Για υψηλές ταχύτητες ανέμου (μεγαλύτερες της ονομαστικής), κάθε μία επιμέρους αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, επιφέρει αλλαγές στη γωνία βήματος καθώς επίσης και στη ταχύτητα περιστροφής. Όταν αυξάνεται ο άνεμος, αυξάνεται αμέσως η προκύπτουσα αεροδυναμική ροπή με αποτέλεσμα να επιταχύνεται η μηχανή. Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο έλεγχος γωνίας βήματος ώστε να περιοριστεί η ροπή σε τιμές κάτω από την ονομαστική. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής επιστρέφει στο ίδιο σημείο ισορροπίας με τιμή 1.2 α.μ. από τη στιγμή που η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει την ονομαστική σύμφωνα με τη χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας (σχήμα 2.7). Οι αντίστοιχες αποκρίσεις της γωνίας βήματος και της ταχύτητας περιστροφής δεν παρουσιάζουν ούτε ταλαντώσεις ούτε εξαιρετικά υψηλές τιμές.

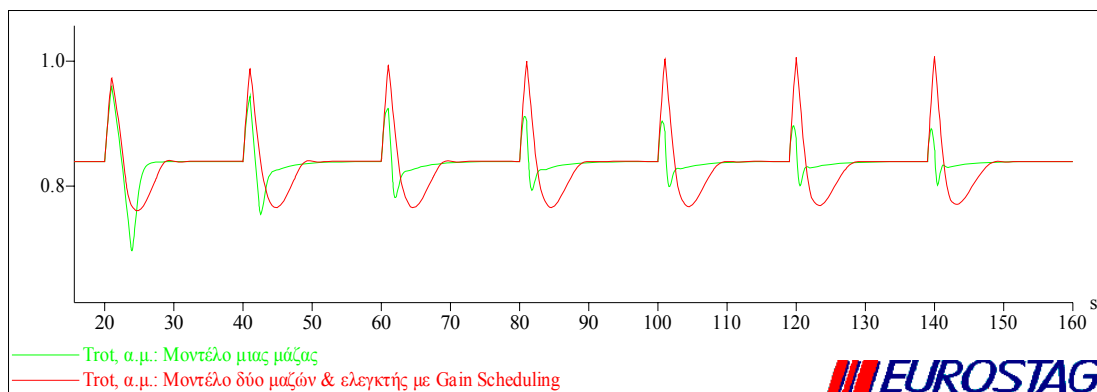
Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός, ότι για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της ονομαστικής, η απόκριση της γωνιακής ταχύτητας στο γράφημα στο οποίο το βήμα ελέγχεται με Gain Scheduling, είναι σχεδόν ίδια σε κάθε επιμέρους αύξηση του ανέμου. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι ο ελεγκτής γωνίας βήματος παραμετροποιημένος με την τεχνική Gain Scheduling, λειτουργεί σωστά και αναμενόμενα.

6.2.3 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του μηχανικού συστήματος σε διαδοχικές βηματικές αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου

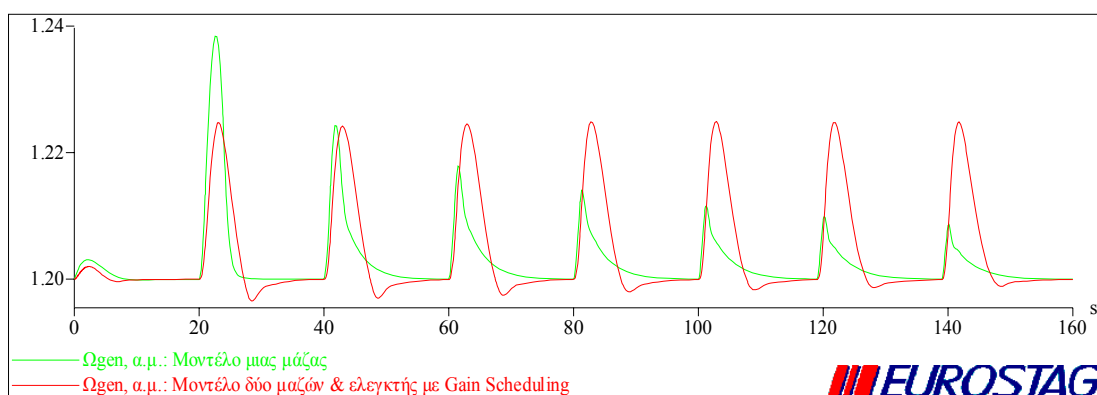
Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των αποκρίσεων των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του μηχανικού μέρους της ανεμογεννήτριας. Στις παρακάτω αποκρίσεις, η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται όπως στο γράφημα (6.8).



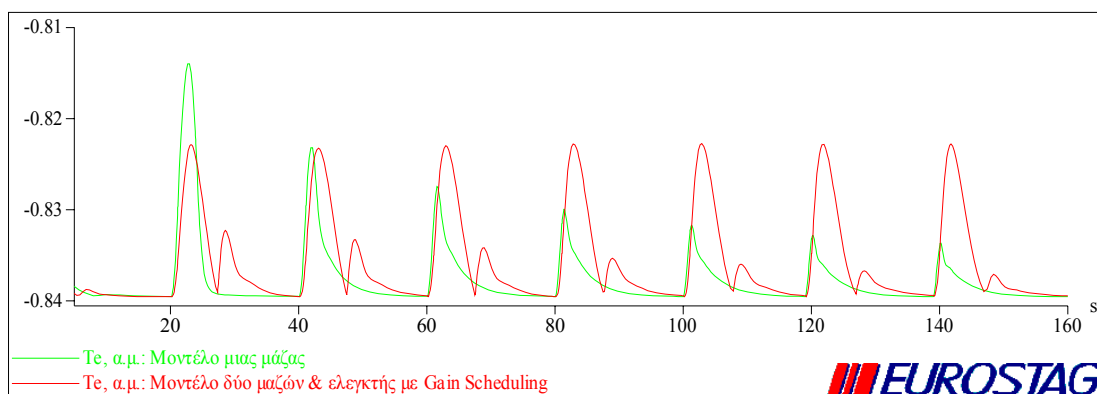
Γράφημα 6.23 Απόκριση γωνίας βήματος: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα 6.24 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα 6.25 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα 6.26 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.

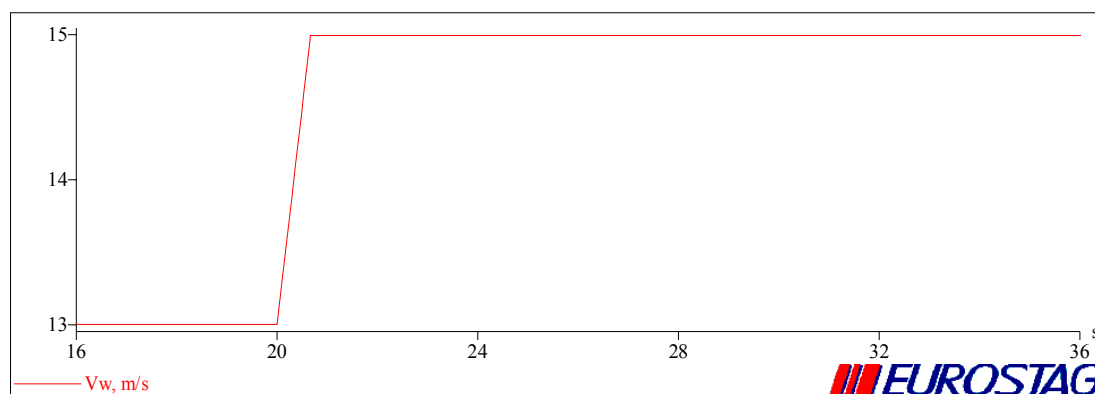
Σύμφωνα με τα όσα ειπώθηκαν στην παράγραφο (2.3.2.1), η σχέση της γωνίας βήματος β και της ταχύτητας του ανέμου V_w χαρακτηρίζεται σε σημαντικό βαθμό από μη γραμμικότητα. Για παράδειγμα, παρατηρώντας το γράφημα (6.23) για αύξηση

της ταχύτητας του ανέμου από την αρχική τιμή των 13 m/s σε αυτή των 14 m/s η γωνία βήματος β πρέπει να αυξηθεί σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι θα αυξάνονταν στη περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου μεταβαλλόταν από 15 m/s σε 16 m/s .

Η μη γραμμικότητα αυτή, έχει σαν αποτέλεσμα η απόκριση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας να είναι διαφορετική για κάθε βηματική αύξηση της ταχύτητας η οποία λαμβάνει χώρα κάθε 20 s (πράσινες καμπύλες στα γραφήματα 6.23 – 6.26). Πιο συγκεκριμένα, για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου η απόκριση του συστήματος είναι πιο ικανοποιητική από τη στιγμή που η γωνία βήματος β μεταβάλλεται από τον ελεγκτή σε μικρό ποσοστό σε σχέση με την τιμή αναφοράς για την προηγούμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Αντίθετα, με χρήση της στρατηγικής ελέγχου στην οποία η παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος γίνεται με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling, η επίδραση των μη γραμμικών αυτών αεροδυναμικών χαρακτηριστικών εξαλείφεται. Το γεγονός αυτό επαληθεύεται απόλυτα από τις αποκρίσεις του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινες γραμμές) στα γραφήματα (6.23) – (6.26). Πιο συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι για κάθε μία επιμέρους αλλαγή στη ταχύτητα του ανέμου, οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας, της αεροδυναμικής ροπής και της παραγόμενης ισχύος είναι πανομοιότυπες.

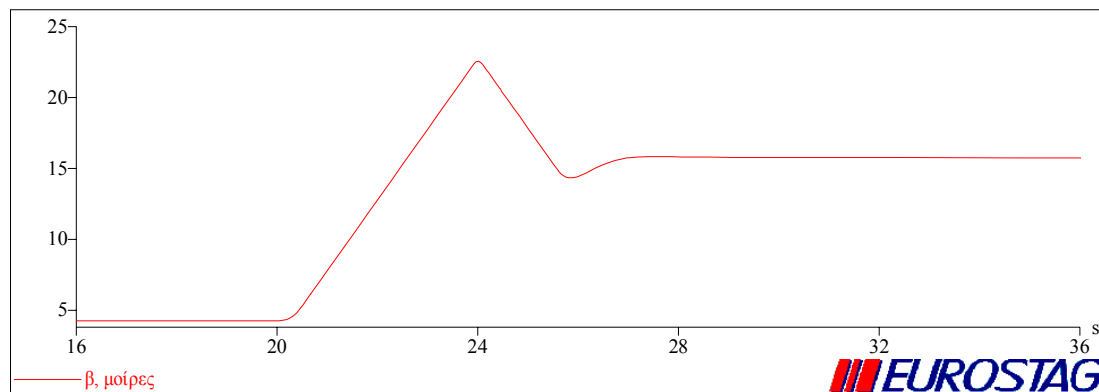
6.3 Απόκριση του συστήματος σε αύξηση του ανέμου από την αρχική τιμή των 13 m/s σε 15 m/s



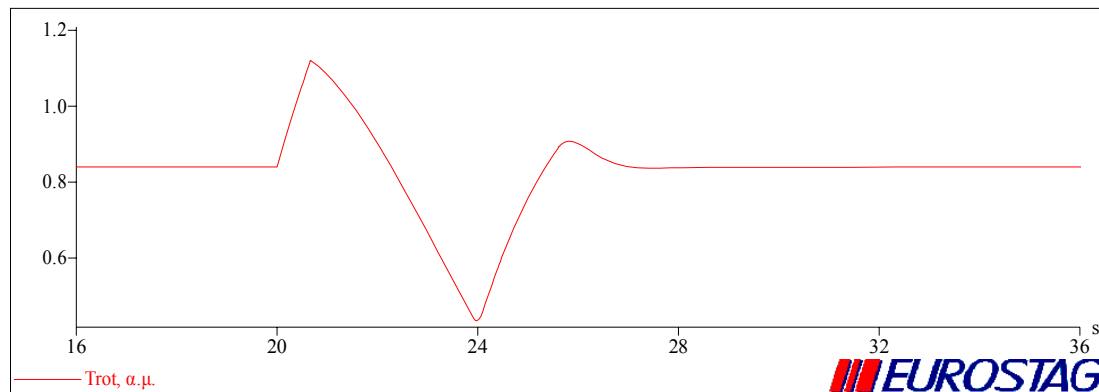
Γράφημα 6.27 Ταχύτητα του ανέμου.

Στην προσομοίωση αυτή εφαρμόστηκε μια σταδιακή αύξηση της ταχύτητας του ανέμου από τα 13m/s στα 15m/s όπως στο παρακάτω γράφημα (με ρυθμό αύξησης 3m/s^2) και παρατηρήθηκε η απόκριση των βασικών μεγεθών της Α/Γ (γωνιακή ταχύτητα περιστροφής δρομέα της Α/Γ, αεροδυναμική ροπή, ηλεκτρομαγνητική ροπή και γωνία αλλαγής κλίσης πτερυγίων).

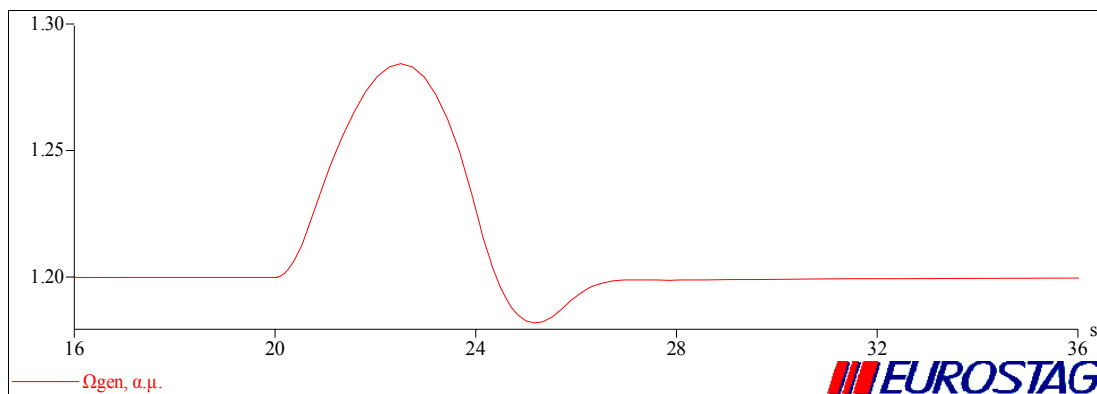
6.3.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}



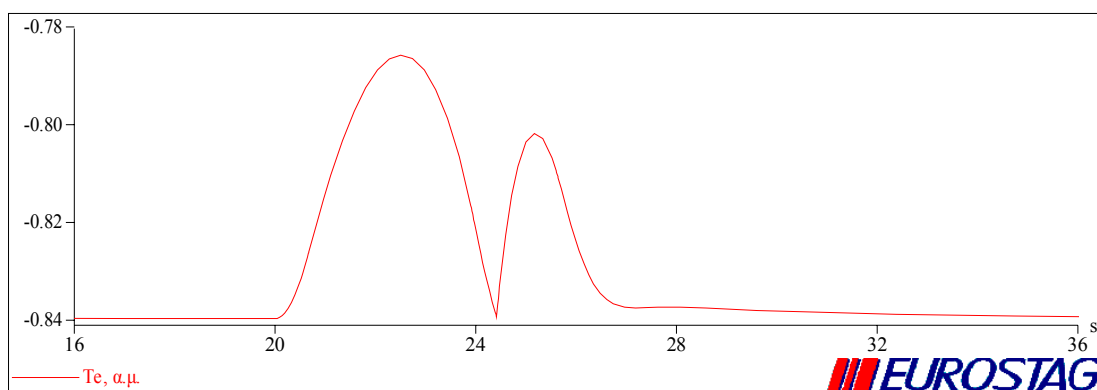
Γράφημα 6.28 Απόκριση γωνίας βήματος πτερυγίου.



Γράφημα 6.29 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.

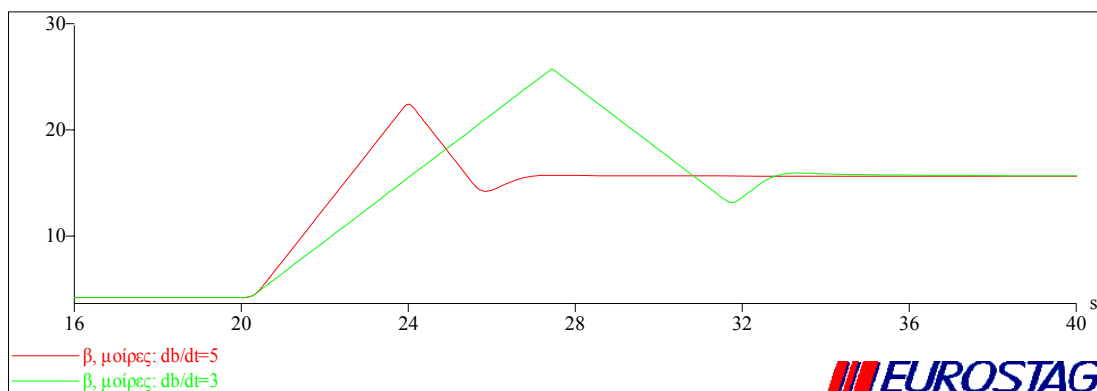


Γράφημα 6.30 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

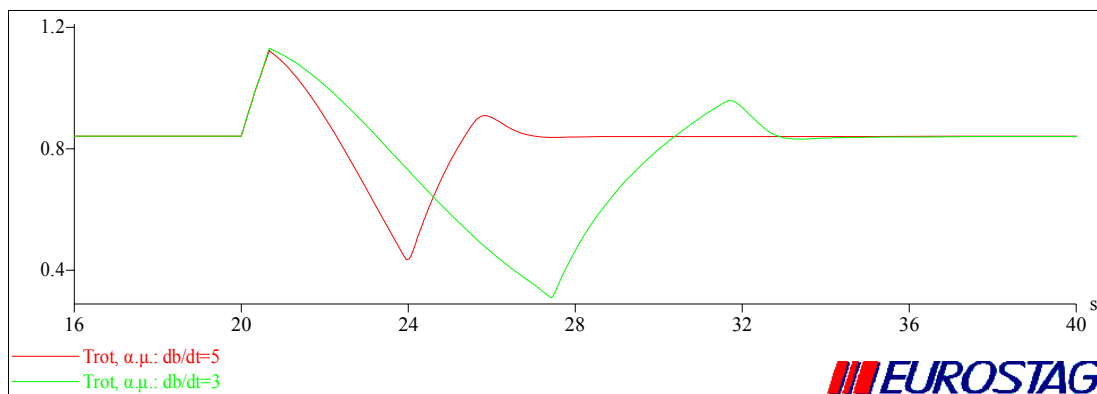


Γράφημα 6.31 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

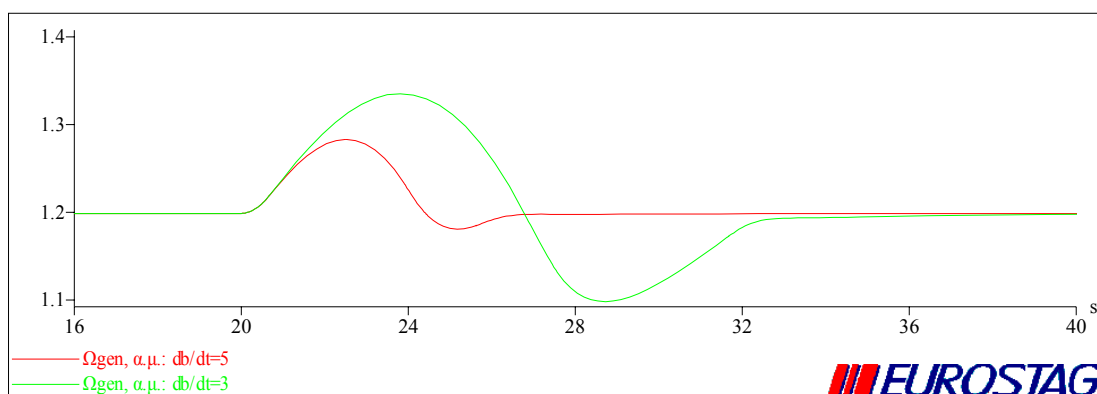
Η αύξηση της γωνίας βήματος των πτερυγίων περιορίζεται από τον περιοριστή ρυθμού ($3^\circ/s$) που έχει εισαχθεί στο μοντέλο ελέγχου της γωνίας, αφού η γωνία δε μπορεί πραγματικά να λάβει την τιμή που δίνει ο έλεγχος άμεσα. Παρακάτω ακολουθούν συγκριτικά αποτελέσματα για την ίδια αύξηση στην ταχύτητα ανέμου αλλά με περιορισμό ρυθμού αλλαγής της γωνίας βήματος ίσο με $5^\circ/s$.



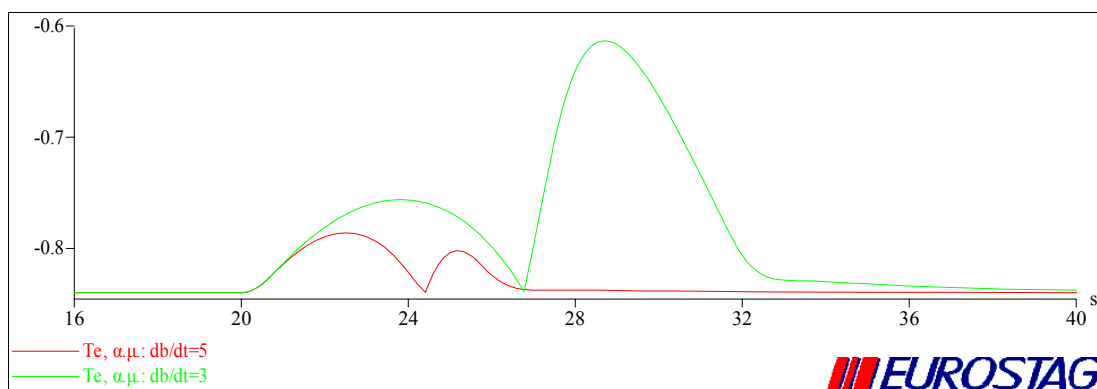
Γράφημα 6.32 Απόκριση γωνίας βήματος: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $3^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $5^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



Γράφημα 6.33 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $3^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $5^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



Γράφημα 6.34 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $3^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $5^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



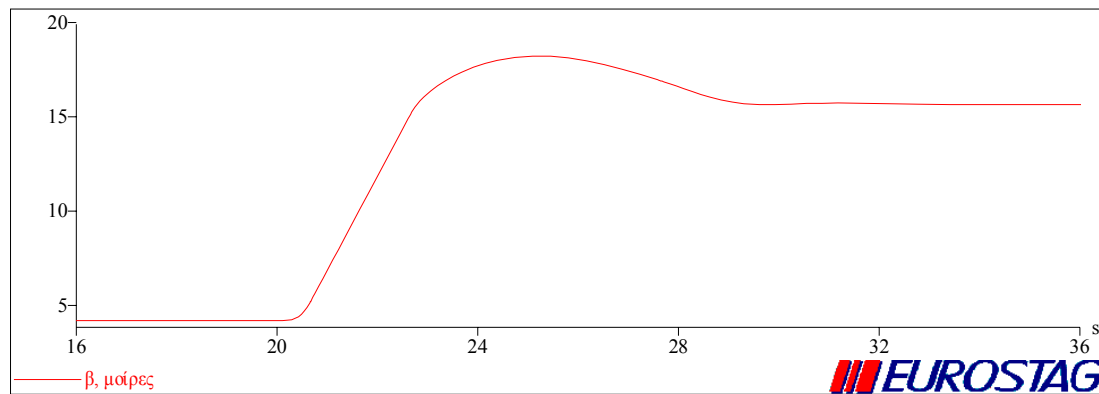
Γράφημα 6.35 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $3^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $5^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.

Όταν ο ρυθμός αλλαγής κλίσης των πτερυγίων είναι μικρότερος, δηλαδή η γωνία βήματος αργεί περισσότερο να πάρει την τιμή ελέγχου, οι αποκρίσεις των μεγεθών της Α/Γ είναι χειρότερες από άποψη τόσο εύρους ταλαντώσεων όσο και διάρκειας του μεταβατικού φαινομένου. Επομένως, ένας σημαντικός κατασκευαστικός στόχος για την Α/Γ είναι ο μηχανισμός αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να εξασφαλίζει όσο ο

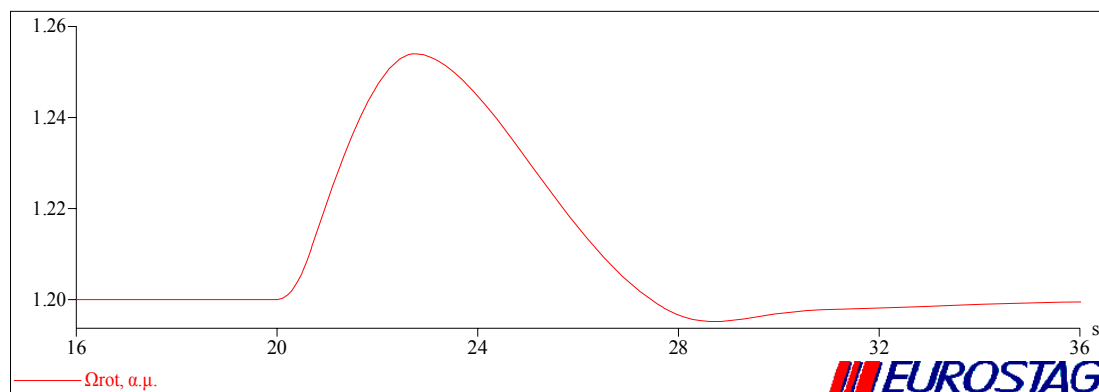
δυνατόν πιο γρήγορη απόκριση. Έτσι σε πιθανές απότομες αλλαγές του ανέμου, τα προκύπτοντα μεταβατικά θα είναι μικρότερης έκτασης.

Στα ίδια ακριβώς συμπεράσματα καταλήγουμε και για το μοντέλο δύο μαζών η απόκριση του οποίου περιγράφεται στα γραφήματα (6.36) – (6.45) της επόμενης παραγράφου (6.3.2).

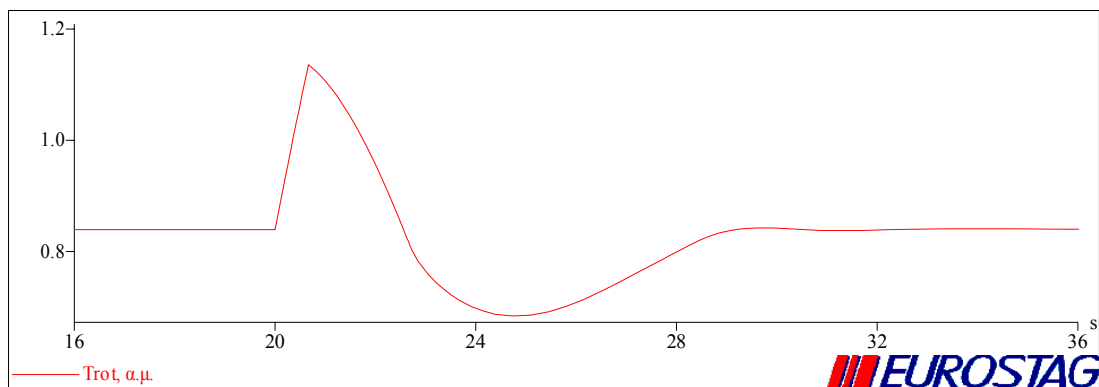
6.3.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling



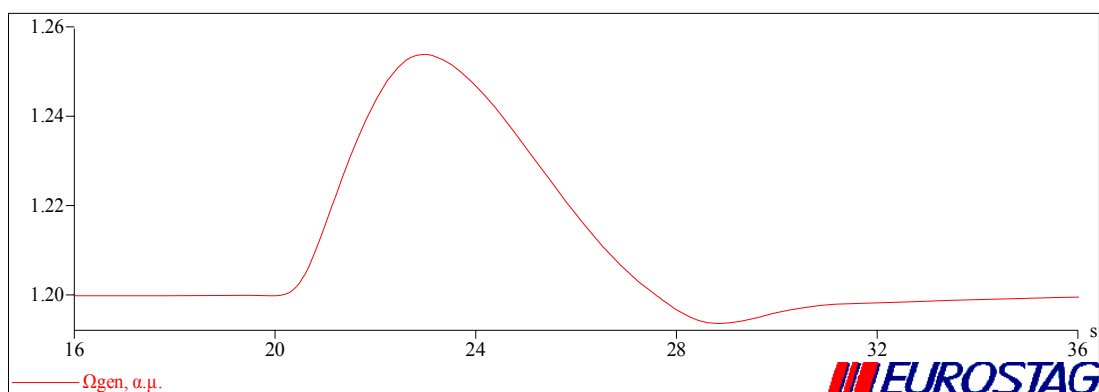
Γράφημα 6.36 Απόκριση γωνίας βήματος.



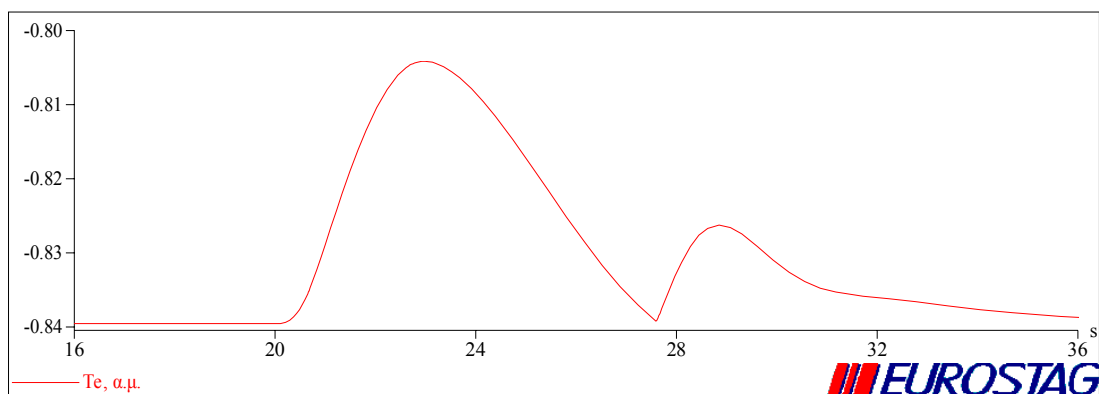
Γράφημα 6.37 Απόκριση ταχύτητας αεροδυναμικού δρομέα.



Γράφημα 6.38 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.

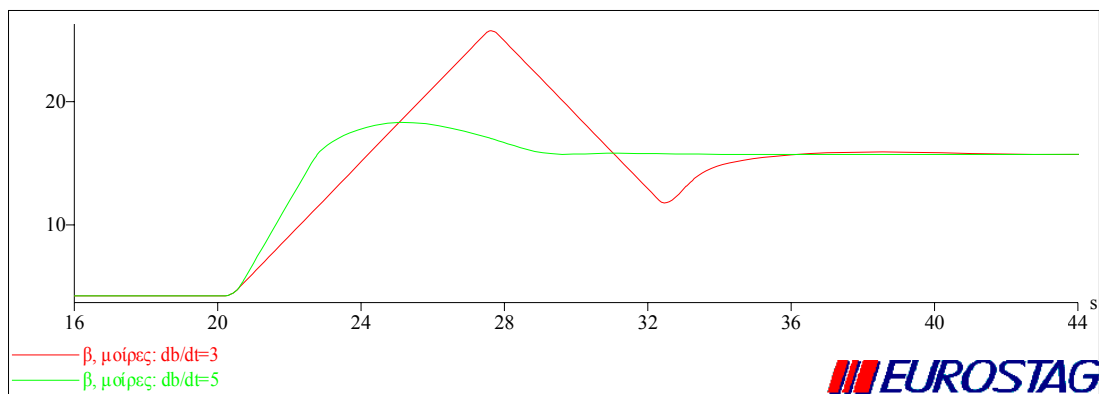


Γράφημα 6.39 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας γεννήτριας.

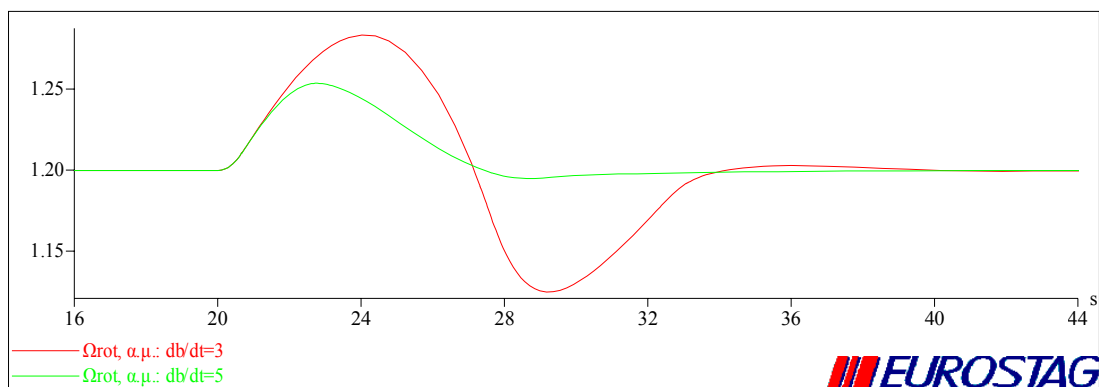


Γράφημα 6.40 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

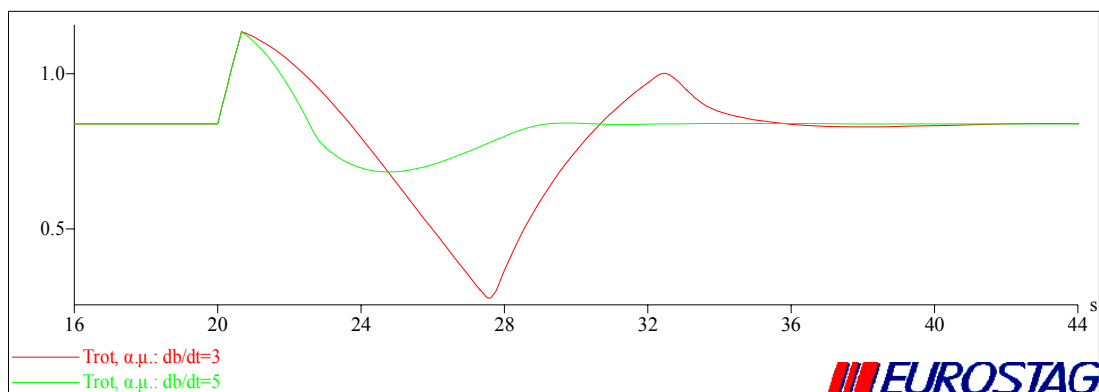
Παρακάτω ακολουθούν συγκριτικά αποτελέσματα για την ίδια αύξηση στην ταχύτητα ανέμου αλλά με περιορισμό ρυθμού αλλαγής της γωνίας βήματος ίσο με $5^\circ/s$.



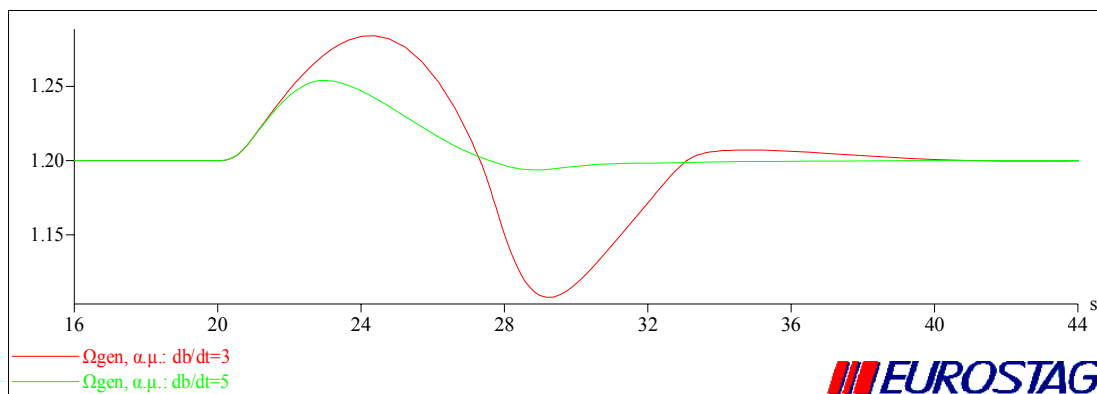
Γράφημα 6.41 Απόκριση γωνίας βήματος: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $3^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



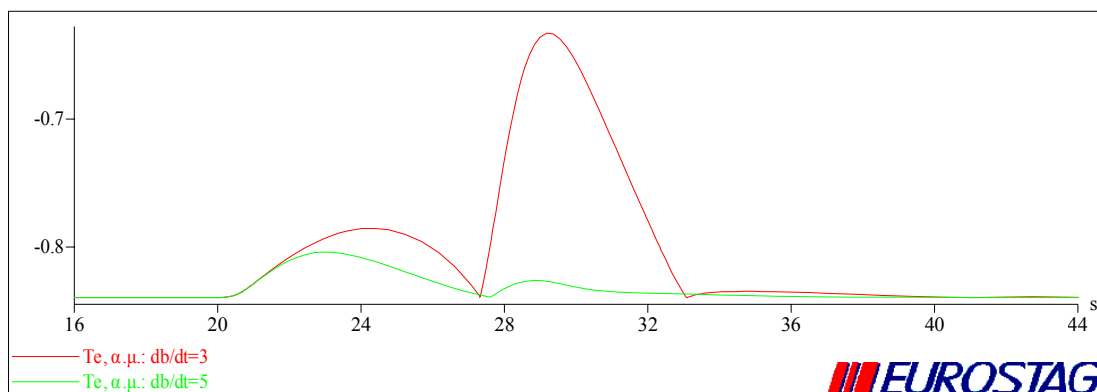
Γράφημα 6.42 Απόκριση ταχύτητας αεροδυναμικού δρομέα: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $3^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



Γράφημα 6.43 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $3^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.



Γράφημα 6.44 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $3^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.

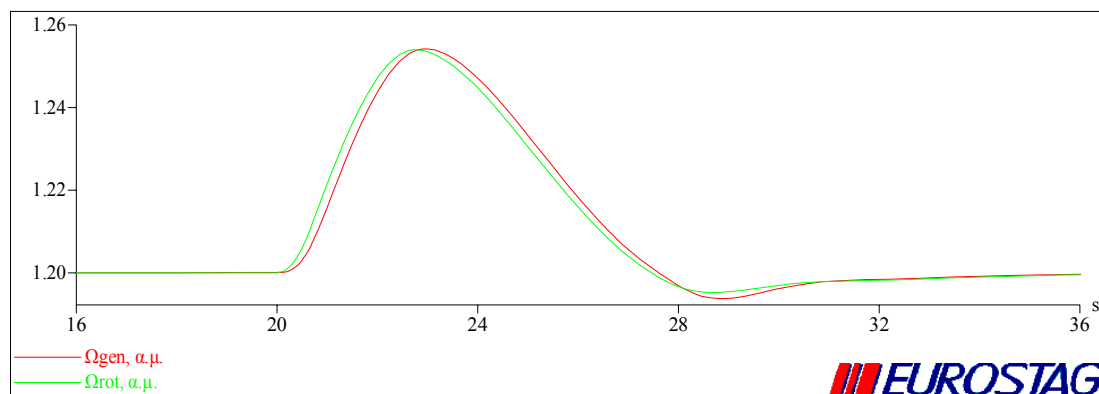


Γράφημα 6.45 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με ρυθμό αλλαγής κλίσης πτερυγίων $5^\circ/s$ (πράσινη καμπύλη) και $3^\circ/s$ (κόκκινη καμπύλη) αντίστοιχα.

Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα οι αποκρίσεις της γωνιακής ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα και του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Η επιλογή αυτών των δύο αποκρίσεων δεν είναι τυχαία. Στο μοντέλο μιας μάζας τα συγκεκριμένα μεγέθη έχουν ακριβώς την ίδια απόκριση, αποτελούν ουσιαστικά μια κοινή μεταβλητή κατάστασης η οποία αντιπροσωπεύει την ενιαία γωνιακή ταχύτητα του δρομέα του συστήματος.

Αντίθετα, στο μοντέλο δύο μαζών μια τέτοια σύγκριση έχει νόημα. Σύμφωνα με την παράγραφο (2.1.1) το μοντέλο δύο μαζών που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τη μοντελοποίηση του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης, θεωρεί τον αεροδυναμικό δρομέα και τον δρομέα της γεννήτριας δύο διαφορετικούς άξονες με διαφορετικές μάζες. Η ροπή αδράνειας του δρομέα της ανεμογεννήτριας είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή του άξονα της ΓΕΔΤ. Στην κατάσταση σταθερής ταχύτητας του ανέμου, οι ταχύτητες περιστροφής των δύο αξόνων είναι ίδιες και υπάρχει ισορροπία (η γεννήτρια στρέφεται με σταθερή

ταχύτητα). Όμως, όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξηθεί, αυξάνεται αρχικά η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της ανεμογεννήτριας και στη συνέχεια αυξάνεται ανάλογα και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της ΓΕΔΤ όπως ακριβώς φαίνεται στο σχήμα (6.46). Στη συνέχεια, ενεργοποιείται ο ελεγκτής και αυξάνει τη γωνία βήματος των πτερυγίων της έλικας. Ως αποτέλεσμα της αύξησης του β , μειώνεται αρχικά η ταχύτητα του αεροδυναμικού άξονα και ακολουθεί και ανάλογη μείωση της ταχύτητας περιστροφής της ΓΕΔΤ. Ωστόσο, εξαιτίας της μεγάλης αδράνειας του δρομέα της ανεμογεννήτριας, η γωνιακή ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας χρειάζεται περισσότερο χρονικό διάστημα μέχρι να έρθει πάλι σε ισορροπία για τη νέα ταχύτητα του ανέμου. Όλα τα παραπάνω, επαληθεύονται από τις καμπύλες του γραφήματος (6.46) παρακάτω.



Γράφημα 6.46 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας (κόκκινη καμπύλη) και γωνιακής ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα (πράσινη καμπύλη).

Κάποιες επιπλέον προσομοιώσεις για καλύτερη αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος περιλαμβάνονται στο Παράρτημα 3 στο τέλος της εργασίας.

7 Ανεμογεννήτρια με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης - Παραμονή σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως και δυνατότητα στήριξης του δικτύου

7.1. Εισαγωγή

Ο αριθμός των εγκαταστάσεων αιολικών πάρκων έχει αυξηθεί παγκοσμίως με πρωτοφανείς ρυθμούς. Σαν επακόλουθο, το μέσο μέγεθος των εγκαταστάσεων έχει αυξηθεί λόγω των μεγαλύτερων μηχανών. Το γεγονός αυτό αναγείρει την ανησυχία πώς εκτεταμένη απώλεια μηχανών μετά από μεγάλες διαταραχές στο δίκτυο θα μπορούσε να οδηγήσει σε διάδοση των ασταθειών και δυνητικά να προκαλέσει τοπικά ή ολικά κατάρρευση του συστήματος. Αυτό ανάγκασε πολλούς παραγωγούς να υιοθετήσουν την κατάλληλη τεχνολογία ώστε η Α/Γ να παραμένει σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης (στη διεθνή βιβλιογραφία χρησιμοποιείται ο όρος Low Voltage Ride Through - LVRT). Η απαίτηση αυτή προσθέτει βέβαια ένα επιπλέον κόστος διασύνδεσης στον κατασκευαστή και επηρεάζει τη συνολική επένδυση. Θα αναλυθεί παρακάτω πως οι βυθίσεις τάσης επηρεάζουν τη λειτουργία των γεννητριών καθώς οι τεχνικές απαιτήσεις για την αντιμετώπιση των δυσκολιών αυτών.

Καθώς η αιολική ενέργεια αυξάνει συνεχώς το ρόλο της στο ηλεκτρικό σύστημα επιφέρει σημαντικές μεταβολές στη μελέτη του τελευταίου. Ενώ λοιπόν σε χαμηλά επίπεδα διείσδυσης η επίδραση των αιολικών στη λειτουργία και την ευστάθεια του ηλεκτρικού συστήματος θεωρούνταν αμελητέα, η είσοδος νέων μεγάλων αιολικών πάρκων οδήγησε τους μελετητές στο να αναθεωρήσουν τις επιδράσεις. Αυτές οι αλλαγές καταλήγουν σταδιακά στην γενική απαίτηση, καθώς η βιομηχανία παγκοσμίως αυξάνεται, τα αιολικά πάρκα να υιοθετήσουν τις ίδιες λειτουργικές προδιαγραφές οι οποίες προς το παρόν αναφέρονται μόνο στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής.

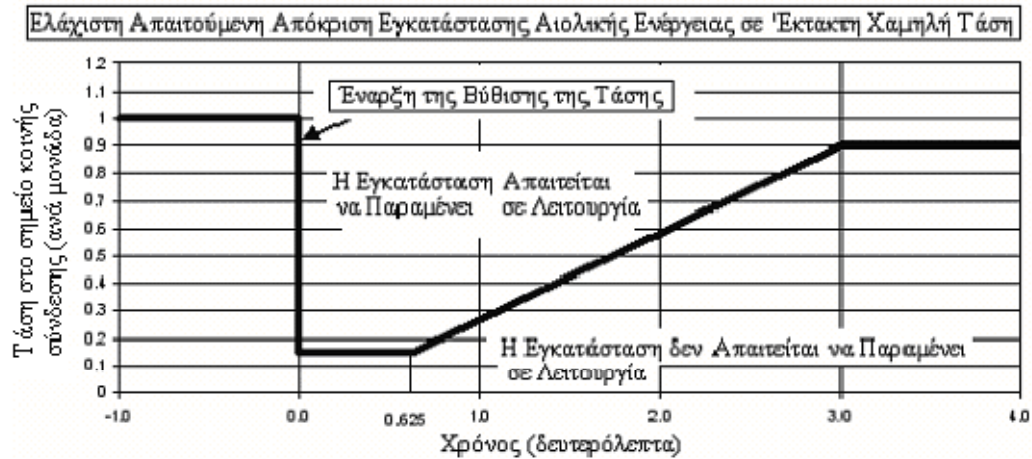
Πολλές Α/Γ είναι βασισμένες στις ασύγχρονες μηχανές, με ένα μεγάλο αριθμό να ακολουθεί την τοπολογία της απ' ευθείας σύνδεσης μηχανής επαγωγής τύπου κλωβού. Επομένως η άεργος ισχύς είναι ένα θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος, όχι μόνο για λόγους αντιστάθμισης των απαιτήσεων του ίδιου του αιολικού πάρκου αλλά και με στόχο τη στήριξη της τάσης του δικτύου. Οι περισσότερες από τις απαιτήσεις

ορίζουν τυπικά όρια μέσα στα οποία πρέπει να λειτουργεί το Α/Π [49]. Οι μέθοδοι ελέγχου της άεργου ισχύος αφήνονται στους σχεδιαστές και μπορεί να έχουν τη μορφή χωρητικών στοιχείων αντιστάθμισης, συσκευές βασισμένες σε μετατροπείς στατικής ισχύος (SVC, TSC, ή STATCOM) ή χρησιμοποιώντας μηχανές κατάλληλες για έλεγχο άεργου ισχύος, όπως η τοπολογία της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης (DFIG).

Το θέμα του LVRT φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε θέματα διατήρησης ευστάθειας, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη διείσδυση των αιολικών πάρκων. Πρόωρη έξοδος Α/Γ από τη λειτουργία λόγω ενεργοποίησης του συστήματος προστασίας σε περίπτωση τοπικών διαταραχών του δικτύου μπορεί να οδηγήσει με τη σειρά του σε ενίσχυση των αποτελεσμάτων της διαταραχής. Αυτό υποδεικνύει και την έντονη ανησυχία για διατήρηση της ευστάθειας του Α/Π και του συνδεδεμένου συστήματος κατά τη διάρκεια των εμφανιζόμενων διαταραχών του ηλεκτρικού συστήματος.

Το θέμα του ελέγχου της ισχύος εξόδου των Α/Π γίνεται ολοένα και πιο σημαντικό και η τάση είναι προς την κατεύθυνση ώστε οι εφαρμογές τελικά να απαιτούν από τις Α/Γ να λειτουργούν σε τρόπο ανάλογο των συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτή η είναι μια απαίτηση που είναι ακόμα υποκείμενη σε πολύ έρευνα και ανάλυση καθώς η αιολική ενέργεια συχνά αντιμετωπίζεται, μάλλον άδικα, σαν αναξιόπιστη από πλευράς παραγωγής ισχύος και ότι πρέπει να τηρείται μια μεγάλη στρεφόμενη εφεδρεία, σχεδόν ισοδύναμη με την εγκαταστημένη ισχύ. Παρ' όλα αυτά, μεγάλο κομμάτι από την έρευνα στην Ευρώπη προσπαθεί να αποδείξει το αντίθετο, ίσως σαν αποτέλεσμα αυστηρών προδιαγραφών πάνω στις απαιτήσεις του ελέγχου της ισχύος των Α/Γ εκεί.

Συνεχώς διαμορφώνονται τεχνικοί κανονισμοί που πρέπει να τηρούν οι εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας ως προς τη συμπεριφορά των Α/Γ σε περιπτώσεις βύθισης της τάσης λόγω σφάλματος στο δίκτυο. Η συνήθης μορφή αυτών περιλαμβάνει κάποιους περιορισμούς επιπέδου τάσης και χρονικών περιόδων με τη μορφή της καμπύλης που ακολουθεί. Κάθε εγκατάσταση, λοιπόν, αιολικής ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να παραμένει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών της τάσης μέχρι τους χρόνους εκείνους και τα αντίστοιχα επίπεδα τάσης που δίνονται στο σχήμα (7.1). Οι κανονισμοί αυτοί εφαρμόζονται σε τάση που μετράται στο σημείο κοινής σύνδεσης (PCC: point of common coupling).



Σχήμα 7.1 Συνήθης μορφή καμπύλης περιορισμού LVRT.

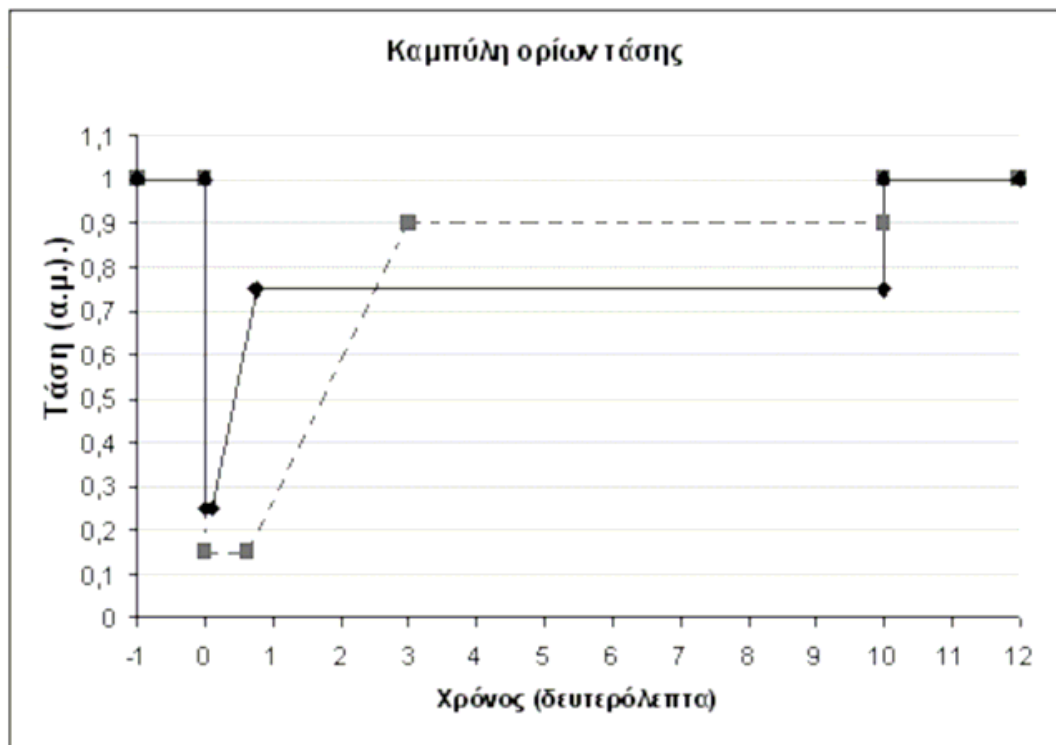
Η καμπύλη δείχνει το λόγο της πραγματικής προς την ονομαστική τιμή της τάσης στον κατακόρυφο άξονα, και το χρόνο στον οριζόντιο. Πριν το χρόνο 0.0, η τάση στο μετασχηματιστή είναι η ονομαστική τάση. Στο χρόνο 0.0 η τάση πέφτει. Αν η τάση παραμείνει σε επίπεδο μεγαλύτερο από 15 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης για μια περίοδο που δεν υπερβαίνει τα 0.625 δευτερόλεπτα, η εγκατάσταση πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία. Επιπλέον, αν η τάση επιστρέψει στο 90 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης μέσα σε 3 δευτερόλεπτα από τη βύθιση της τάσης (με την τάση να μην πέφτει ποτέ κάτω από την ελάχιστη τάση που δίνεται με τη συνεχή γραμμή στο σχήμα 7.1.), η εγκατάσταση πρέπει να παραμείνει σε λειτουργία. Ο πελάτης που συνδέεται δεν έχει το δικαίωμα να απενεργοποιήσει τον εξοπλισμό που εξασφαλίζει ότι η Α/Γ θα παραμείνει σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσης, όσο η αιολική εγκατάσταση είναι σε λειτουργία. Δύο χαρακτηριστικά-κλειδιά αυτού του κανονισμού είναι:

1. Μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας πρέπει να έχει δυνατότητα παραμονής σε λειτουργία για τάση μέχρι και 15 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης γραμμής για 0.625 δευτερόλεπτα.
2. Μια εγκατάσταση αιολικής ενέργειας πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργεί συνεχώς σε τάση 90 επί τοις εκατό της ονομαστικής τάσης γραμμής, μετρούμενη στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή του υποσταθμού.

Σημειώνεται στο σημείο αυτό ότι οι τιμές που αναφέρονται παραπάνω ως προς το χρόνο και τα επίπεδα τάσης ανανεώνονται συνεχώς. Παρακάτω επισυνάπτονται δύο παραδείγματα κανονισμών της Δανίας και της Ιρλανδίας.

Κανονισμός Δανίας		Κανονισμός Ιρλανδίας	
Χρόνος [s]	Τάση [αμ]	Χρόνος [s]	Τάση [αμ]
0	1	0	1
0.1	0.25	0.625	0.15
0.75	0.75	3	0.9
10	0.75	10	0.9
10.01	1	10.01	1

Πίνακας 7.1 Κανονισμός χρόνος & τάση για Δανία και Ιρλανδία [50].



Σχήμα 7.2 Καμπύλη ορίων τάσης – Κανονισμοί Δανίας (συνεχής καμπύλη) και Ιρλανδίας (διακεκομμένη καμπύλη) [50].

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι υλοποίησης των παραπάνω ιδεών. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες μέθοδοι για την εξασφάλιση της λειτουργίας της Α/Γ σε βύθιση τάσης, με έμφαση στη λειτουργία του ενεργού κυκλώματος βραχυκύκλωσης δρομέα (Active Crowbar).

7.2 Δυναμική Συμπεριφορά Α/Γ με ΓΕΔΤ σε Διαταραχές του Δικτύου

Στην ακόλουθη παράγραφο, περιγράφεται η απόκριση της Α/Γ με ΓΕΔΤ εφοδιασμένη μόνο με το σύστημα ελέγχου το οποίο έχει περιγραφεί στα κεφάλαια 2 και 3

(κατάλληλο μόνο σε κανονική λειτουργία κατά την οποία διαταραχές στο δίκτυο δεν λαμβάνουν χώρα), κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου. Στην αρχική αυτή ανάλυση, δεν υιοθετείται κάποιος επιπλέον ελεγκτής ή κάποιο σύστημα προστασίας για την βελτιστοποίηση της απόκρισης του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης.

7.2.1 Επίδραση της διαταραχής του δικτύου στο ηλεκτρικό σύστημα

Η βύθιση της τερματικής τάσης στο ζυγό σύνδεσης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης οδηγεί με τη σειρά της σε μείωση των ροών στάτη και δρομέα. Ως αποτέλεσμα μειώνονται εξίσου η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η παραγόμενη ενεργός ισχύς. Καθώς η μαγνητική ροή του στάτη μειώνεται, η ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο του στάτη πρέπει να με κάποιο τρόπο να απελευθερωθεί. Αυτός ο απομαγνητισμός της γεννήτριας λαμβάνει χώρα στο κύκλωμα του στάτη έχοντας ως αποτέλεσμα της ραγδαία αύξηση της άεργου ισχύος του στάτη τη χρονική στιγμή του σφάλματος.

Εξαιτίας της μεταβαλλόμενης τάσης και ροής στη γεννήτρια, υψηλά μεταβατικά ρευμάτων εμφανίζονται στα τυλίγματα τόσο του στάτη όσο και του δρομέα. Για να αντισταθμίσει την αύξηση του ρεύματος του δρομέα, ο έλεγχος του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα αυξάνει την τάση του δρομέα, πράγμα το οποίο οδηγεί σε αύξηση της ισχύος του δρομέα η οποία ρέει μέσω των μετατροπέων. Επιπρόσθετα, καθώς η τάση του δικτύου έχει μειωθεί ακαριαία τη στιγμή του σφάλματος, ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου δεν είναι σε θέση να μεταφέρει όλη την ισχύ του δρομέα στο δίκτυο. Ο έλεγχος του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου φτάνει γρήγορα στα όρια του. Ως αποτέλεσμα, η επιπλέον ενέργεια φορτίζει την χωρητικότητα της DC σύνδεσης και η συνεχής τάση V_{DC} αυξάνεται ραγδαία. Το ρεύμα του δρομέα και η τάση της DC σύνδεσης παίρνουν πολύ υψηλές τιμές, πράγμα το οποίο μπορεί αποβεί μοιραίο για τους μετατροπείς. Τα επιτρεπόμενα όρια για τη τάση και το ρεύμα των μετατροπέων ισχύος καθορίζονται γενικά από τους κατασκευαστές [52], [53], [54]. Το [1] προτείνει μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές για το ρεύμα του δρομέα και για την συνεχή τάση V_{DC} , ίσες με 2 α.μ. και 1.25 α.μ. αντίστοιχα.

Αμέσως μετά την «εκκαθάριση» του σφάλματος, η τάση του στάτη αποκαθίσταται ενώ η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ενεργός ισχύς αρχίζουν να αυξάνονται. Καθώς η τερματική τάση και η μαγνητική ροή αυξάνονται, τα μερικώς απομαγνητισμένα κυκλώματα στάτη και δρομέα αντιστέκονται σε αυτή την αύξηση της ροής οδηγώντας επομένως σε εκ νέου μεταβατικά των ρευμάτων στάτη και δρομέα.

7.2.2 Επίδραση της διαταραχής του δικτύου στο μηχανικό σύστημα

Σε μελέτες δυναμικής ευστάθειας, στις οποίες η απόκριση ενός συστήματος κατά τη διάρκεια ισχυρών διαταραχών αναλύεται, το μοντέλο του μηχανικού συστήματος πρέπει να περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα μοντέλο δύο μαζών, ενός ταλαντωτή και ενός αποσβεστήρα [1] όπως περιγράφηκε στη παράγραφο (2.1.1). Αυτό οδηγεί σε μια πιο ακριβή απόκριση της δυναμικής συμπεριφοράς μια ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια κυμαινόμενων συνθηκών ανέμου ή σφαλμάτων σε διάφορα σημεία ενός ηλεκτρικού συστήματος το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα μια πιο έγκυρη πρόβλεψη του βαθμού στο οποίο αυτά επηρεάζουν το σύστημα στο σύνολο του.

Κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο, καθώς η ηλεκτρομαγνητική ροπή μειώνεται σημαντικά, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης (Drive train) συμπεριφέρεται σαν ένας ταλαντωτής. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, η αεροδυναμική – μηχανική ροπή και επομένως και η ταχύτητα της γεννήτριας αρχίζουν να ταλαντώνονται με την επονομαζόμενη φυσική συχνότητα του συστήματος η οποία μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης [55]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{shaft}}{J_{eq}}} \quad (7.1)$$

όπου J_{eq} η ισοδύναμη αδράνεια του συστήματος των δύο αξόνων η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$J_{eq} = \frac{J_{rot} \times K_{gear}^2 \times J_{gen}}{J_{rot} + K_{gear}^2 \times J_{gen}} \quad (7.2)$$

Καθώς, αυτές οι ταλαντώσεις μπορεί να επηρεάσουν την λειτουργία των μετατροπέων τόσο κατά τη διάρκεια της διαταραχής όσο και για κάποιο χρονικό

διάστημα μετά τον «καθαρισμό» του σφάλματος, η μοντελοποίηση του άξονα ως μοντέλο δύο μαζών κρίνεται απαραίτητη.

Όταν η ηλεκτρομαγνητική ροπή της γεννήτριας μειώνεται εξαιτίας της βύθισης τάσης, η αεροδυναμική ροπή της γεννήτριας μειώνεται επίσης. Η μείωση όμως της αεροδυναμικής ροπής είναι πολύ πιο μικρή και αργή από την αντίστοιχη της ηλεκτρομαγνητικής και επομένως η γεννήτρια επιταχύνεται. Η επιτάχυνση αυτή της ηλεκτρικής γεννήτριας περιορίζεται από τον ελεγκτή γωνίας βήματος ο οποίος περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Το μηχανικό σύστημα επανέρχεται στην αρχική κατάσταση πολύ πιο αργά σε σύγκριση με το ηλεκτρικό εξαιτίας της μεγάλης αδράνειας του αεροδυναμικού δρομέα. Επίσης λόγω της μεγάλης διαφοράς των ροπών οι οποίες δρουν στον άξονα, το σύστημα υπόκειται σε σημαντικές μηχανικές καταπονήσεις.

7.3 Παραμονή της Α/Γ σε Λειτουργία σε Συνθήκες Βύθισης Τάσεως (Low Voltage Ride – Through Capability)

Η παράγραφος αυτή παρουσιάζει μια στρατηγική ελέγχου, η οποία δίνει τη δυνατότητα λειτουργίας της ΓΕΔΤ σε συνθήκες βύθισης τάσεως και διευκολύνει της παροχή άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, η στρατηγική αυτή περιλαμβάνει:

- 1) το σύστημα προστασίας των μετατροπέων (Crowbar),
- 2) τον ελεγκτή γωνίας βήματος ο οποίος αναλαμβάνει το ρόλο περιορισμού της ταχύτητας κατά τη διάρκεια σφαλμάτων,
- 3) τον ελεγκτή τερματικής τάσης στον μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα και
- 4) την αύξηση της παροχής άεργου ισχύος της γεννήτριας με σκοπό την υποστήριξη του δικτύου κατά τη διάρκεια σφαλμάτων.

Στα παρακάτω, θεωρείται ότι η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης έχει αρχικοποιηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να λειτουργεί σε ονομαστικές συνθήκες. Η παραδοχή αυτή αντιπροσωπεύει την πιο δυσμενή κατάσταση (worst case scenario) καθώς κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης, η διαφορά μεταξύ της εξαγόμενης από τον

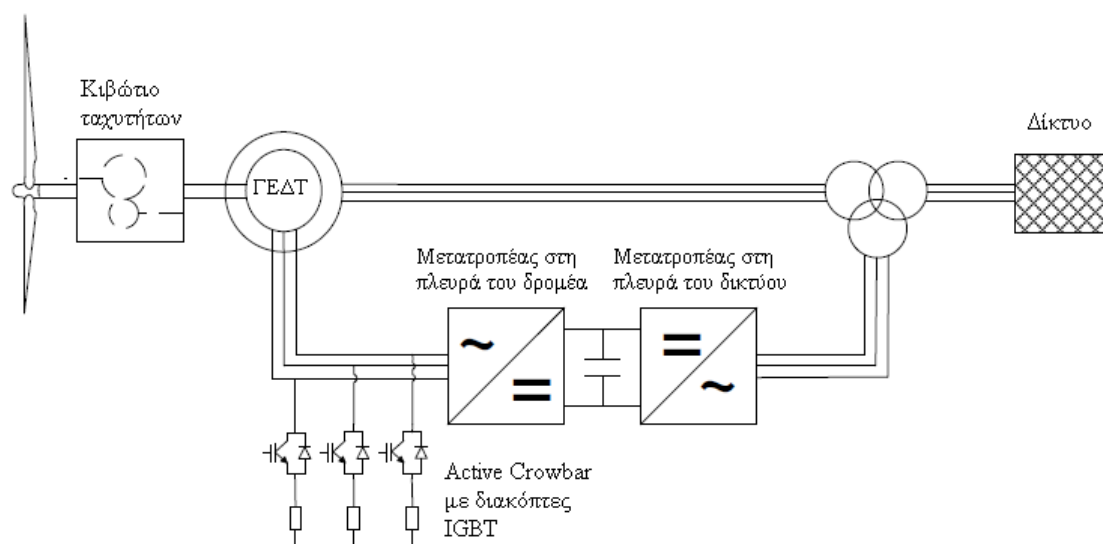
άνεμο αεροδυναμικής ισχύος και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος μεγιστοποιείται. Η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται σταθερή κατά τις προσομοιώσεις καθώς η διάρκεια της διαταραχής είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με αλλαγές στη ταχύτητα του ανέμου. Ένα τριφασικό σφάλμα στο δίκτυο θεωρείται σχετικά σπάνιο σε σύγκριση με άλλους τύπους σφαλμάτων (μονοφασικά, διφασικά σφάλματα). Παρ' όλα αυτά, το τριφασικό βραχυκύκλωμα θεωρείται ότι αποτελεί τη δυσμενέστερη κατάσταση εξίσου, καθώς οι επιπτώσεις του θεωρούνται οι πιο δυσμενείς για το δίκτυο [51].

7.3.1 Σύστημα προστασίας

Ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα – Active Crowbar

Σύμφωνα με την παράγραφο (7.2.1), σε περιπτώσεις διαταραχών του δικτύου, υψηλά μεταβατικά στο ρεύμα του δρομέα και σημαντική αύξηση της τάσης της DC σύνδεσης λαμβάνουν χώρα δημιουργώντας πρόβλημα στην λειτουργία των μετατροπέων. Εξαιτίας αυτών, η εφαρμογή ενός κατάλληλου συστήματος προστασίας κρίνεται επιβεβλημένη. Μια απλή μέθοδος προστασίας αποτελεί η βραχυκύκλωση του δρομέα μέσω εξωτερικών αντιστάσεων (Crowbar Protection), (σχήμα 7.3) όταν ανιχνευθεί υψηλό ρεύμα δρομέα ή η συνεχής τάση υπερβεί το επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας. Στη παρούσα εργασία, τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια για το ρεύμα του δρομέα και τη συνεχή τάση επιλέχθηκαν ίσα με 1.3 και 1.25 ανά μονάδα αντίστοιχα. Η σύνδεση του Crowbar προστατεύει το σύστημα των μετατροπέων και διευκολύνει την παραμονή της A/Γ σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσεως. Ως αποτέλεσμα η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι σε θέση να συνεισφέρει στην παραγωγή ισχύος άμεσα μετά τον «καθαρισμό» του σφάλματος. Όμως, όσο το Crowbar είναι ενεργοποιημένο, ο μετατροπέας από τη πλευρά του δρομέα δεν βρίσκεται σε λειτουργία (ο δρομέας έχει βραχυκυκλωθεί) και η δυνατότητα ελέγχου της ενεργού και άεργου ισχύος προσωρινά χάνεται. Το σχήμα (7.3) παρουσιάζει την γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με προστασία Crowbar. Οι αντιστάσεις του Crowbar συνδέονται σε κάθε φάση με έναν πλήρως ελεγχόμενο ημιαγωγικό διακόπτη IGBT. Η χρησιμοποίηση τέτοιων πλήρως ελεγχόμενων ημιαγωγικών διακοπών, δίνει την δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του Crowbar

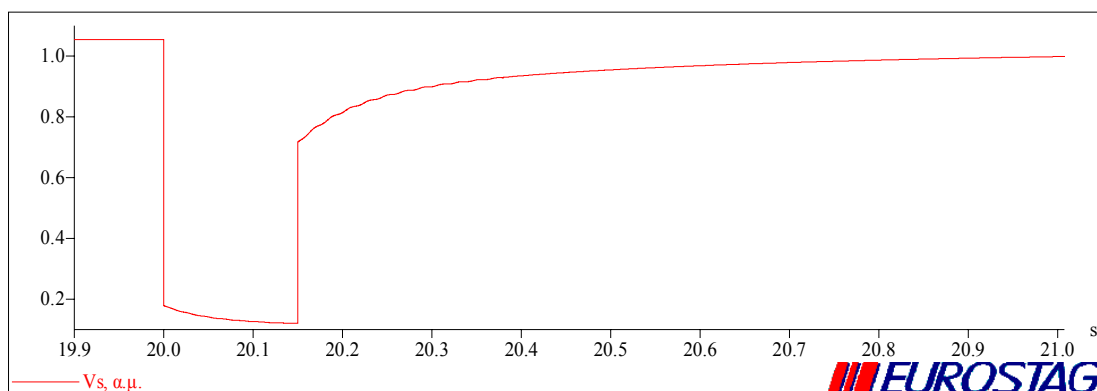
εξωτερικά. Πρόκειται δηλαδή για ένα ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (Active Crowbar), το οποίο σημαίνει ένα σύστημα προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος από ρεύματα κατά τη διάρκεια σφαλμάτων στο συνδεδεμένο δίκτυο, με χρήση ημιαγωγικών διακοπών που εκτός από την ενεργοποίησή του, είναι σε θέση να το θέσει επίσης και εκτός λειτουργίας. Αντίθετα ένα παθητικό κύκλωμα βραχυκύκλωσης (Passive Crowbar) αποτελείται τυπικά από Θυρίστορ και βραχυκυκλώνει τον δρομέα, αλλά δεν είναι σε θέση να ανοίξει ξανά το κύκλωμα όταν απαιτείται παρά μόνο όταν το ρεύμα του δρομέα μηδενιστεί. Στη παρούσα εργασία ένα ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης χρησιμοποιήθηκε για την προστασία των μετατροπέων ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών.



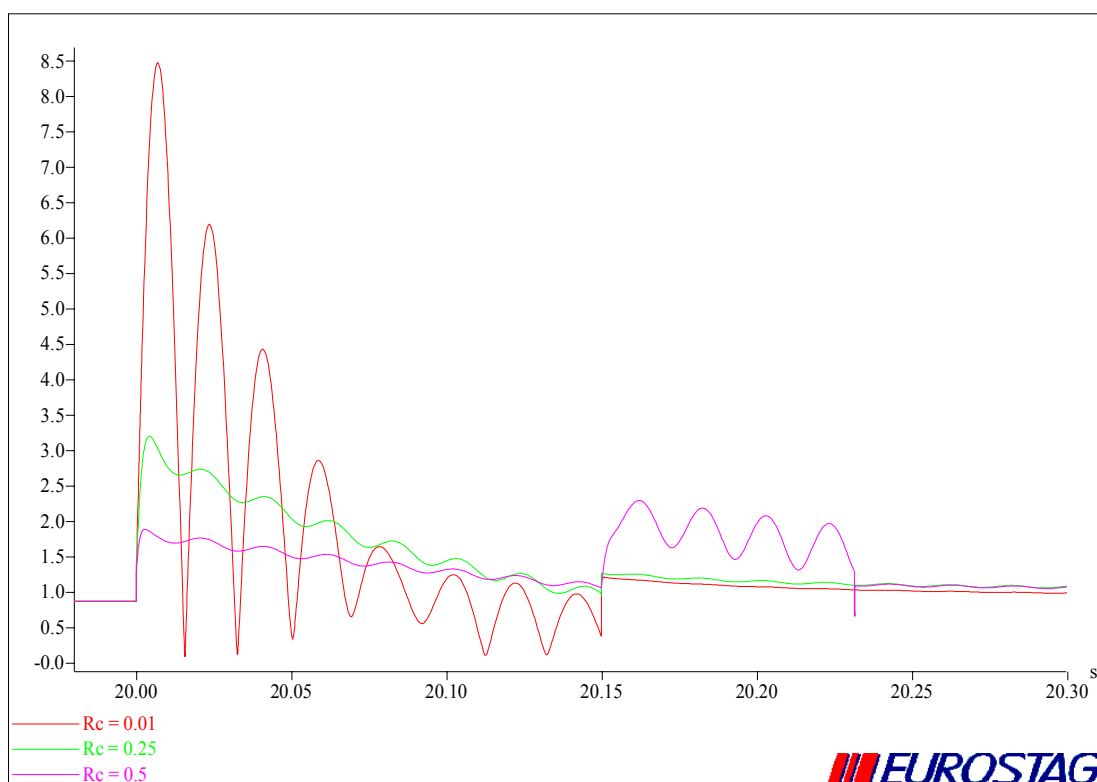
Σχήμα 7.3 Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης με ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης δρομέα (Active Crowbar) για την προστασία των μετατροπέων ισχύος κατά τη διάρκεια διαταραχών του δικτύου.

Τα γραφήματα (7.1) – (7.4) απεικονίζουν τα αποτελέσματα ενός αριθμού δυναμικών προσομοιώσεων οι οποίες έγιναν για διαφορετικές τιμές της αντίστασης του Crowbar στην περίπτωση ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος διάρκειας 100 ms στο ζυγό σύνδεσης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι αποκρίσεις του ρεύματος του δρομέα, της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και της άεργου ισχύος. Αυτά τα ηλεκτρικά σήματα παράχθηκαν χρησιμοποιώντας το πλήρες μοντέλο 5^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Τη στιγμή του σφάλματος, το ρεύμα του δρομέα αρχίζει να αυξάνεται έως ότου το Crowbar ενεργοποιηθεί και αναιρέσει τον μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα.

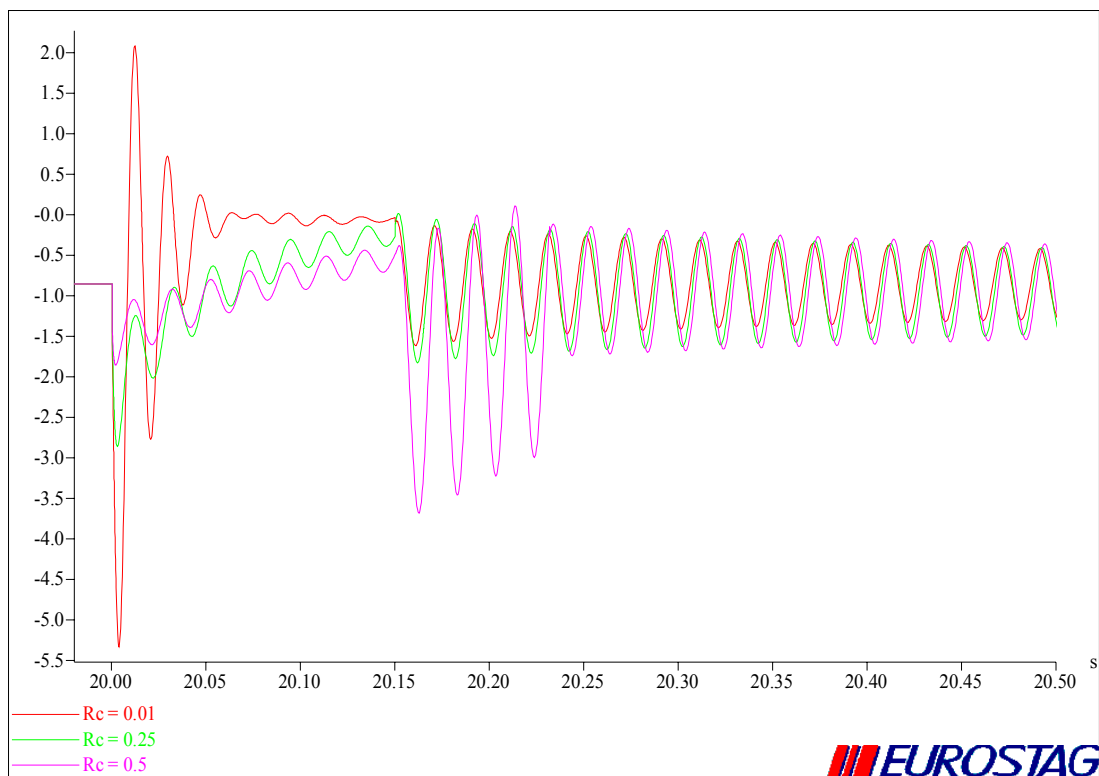
Τα γραφήματα (7.1) – (7.4) αποδεικνύουν τόσο τη λειτουργία του Crowbar να περιορίζει το ρεύμα του δρομέα όσο και την επίπτωση που αυτό έχει στις απαιτήσεις άεργου ισχύος της γεννήτριας. Χαμηλές τιμές αντίστασης του Crowbar οδηγούν σε μεγάλη τιμή του ρεύματος του δρομέα και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής τη στιγμή του σφάλματος. Αντίθετα, μια υψηλότερη τιμή στην αντίσταση Crowbar οδηγεί σε μια πιο αποτελεσματική απόσβεση των μεταβατικών του ρεύματος και της ροπής.



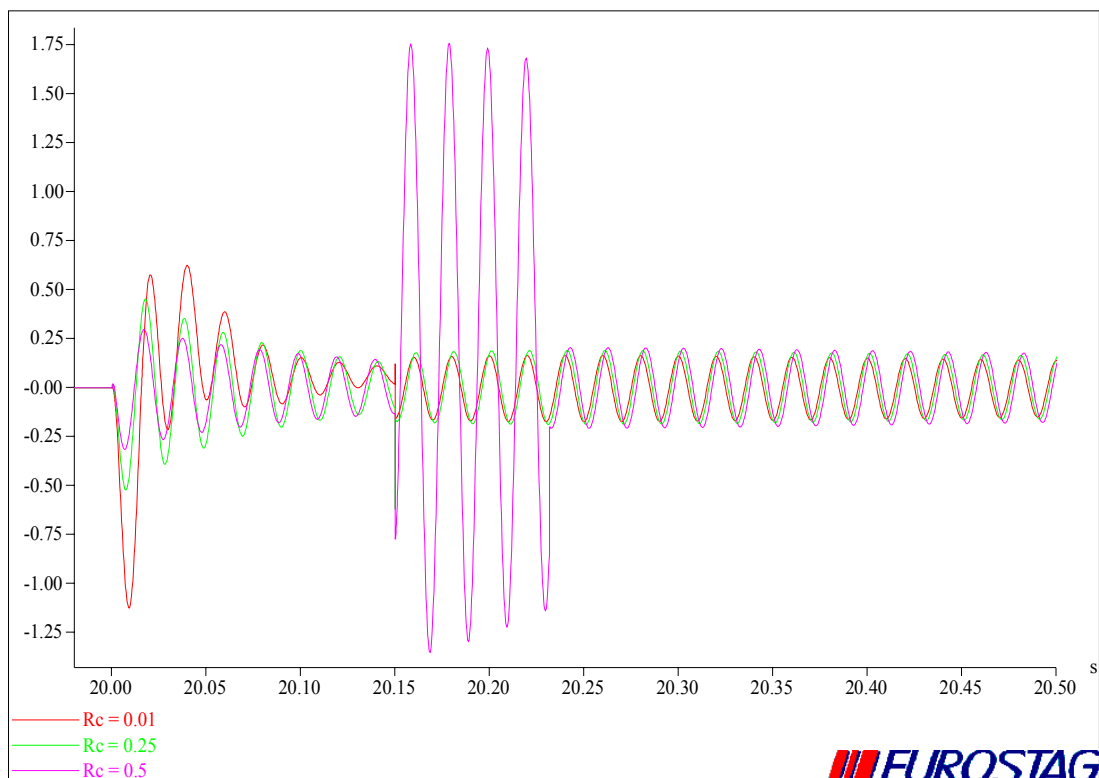
Γράφημα 7.1 Τερματική τάση γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.



Γράφημα 7.2 Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c .



Γράφημα 7.3 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c .



Γράφημα 7.4 Απόκριση άεργου ισχύος για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c .

Η χρησιμοποίηση μιας πολύ μεγάλης αντίστασης Crowbar εμπεριέχει το κίνδυνο εμφάνισης υψηλών μεταβατικών του ρεύματος, της ροπής και της άεργου ισχύος όταν

το Crowbar αποσυνδεθεί. Επιπρόσθετα, περιορισμοί σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας των αντιστάσεων, το μέγεθος και το κόστος που περιλαμβάνουν, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μια σωστή επιλογή της αντίστασης Crowbar πρέπει να γίνει με βάση όλα τα παραπάνω. Συγκρίνοντας, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των γραφημάτων (7.1) – (7.4), μια αντίσταση Crowbar ίση με 0.25 α.μ. μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για το συγκεκριμένο σενάριο σφάλματος .

Μια ακόμη σημαντική παράμετρος της λειτουργίας του Crowbar αποτελεί το χρονικό διάστημα το οποίο αυτό παραμένει συνδεδεμένο. Από τη μια πλευρά, στόχος αποτελεί η αποσύνδεση του Crowbar όσο το δυνατόν γρηγορότερα και η επανασύνδεση του μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα με σκοπό την επανάκτηση του ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Όμως, τη στιγμή της «εκκαθάρισης» του σφάλματος, υψηλά μεταβατικά ρεύματος μπορεί να λάβουν εκ νέου χώρα πράγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει το crowbar σε επανασύνδεση. Στις προσομοιώσεις των σχημάτων (7.5) – (7.7), το Crowbar άγει για 100 ms όσο δηλαδή διαρκεί και η διαταραχή στο ζυγό σύνδεσης (σχήμα 7.4). Παρόλα αυτά, για την αποφυγή επανασύνδεσης του Crowbar χρονικά μετά τον «καθαρισμό» του σφάλματος, σε μερικά σενάρια προσομοίωσης το χρονικό αυτό διάστημα είναι μεγαλύτερο, δηλαδή το ενεργό κύκλωμα βραχυκύκλωσης αποσυνδέεται αφού το σφάλμα έχει παρέλθει.

Η περίπτωση χρησιμοποίησης του Crowbar ως μέσο προστασίας μιας γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης η οποία λειτουργεί με ταχύτητα μικρότερη της σύγχρονης απαιτεί μια πιο λεπτομερή ανάλυση. Όταν η ΓΕΔΤ λειτουργεί με θετική ολίσθηση και το Crowbar αρχίζει να άγει, τότε αυτή αρχίζει να συμπεριφέρεται ως μια τυπική γεννήτρια επαγωγής. Όμως, μια γεννήτρια επαγωγής με θετική ολίσθηση λειτουργεί ως κινητήρας και απορροφά ενεργό ισχύ από το δίκτυο. Το γεγονός αυτό δεν αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρος σε μελέτες ευστάθειας μιας και κατά τη διάρκεια ενός σφάλματος η τάση είναι εξαιρετικά χαμηλή και επομένως και η απορρόφηση ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια επαγωγής είναι εξίσου χαμηλή. Ωστόσο, η συμπεριφορά της γεννήτριας ως κινητήρας επαγωγής είναι ιδιαίτερα σημαντική μετά την εκκαθάριση του σφάλματος στη περίπτωση που το Crowbar παραμένει συνδεδεμένο. Σε αυτή τη περίπτωση πολύ μεγαλύτερη κατανάλωση ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια επαγωγής θα λάβει χώρα, ενώ η ξαφνική αλλαγή

στην ισχύ θα προκαλέσει μεγάλες διαφορές στις ροπές στον άξονα οι οποίες θα οδηγήσουν σε μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις του συστήματος.

Προστασία από αύξηση της ταχύτητας

Ένα βραχυκύκλωμα προκαλεί βύθιση της τάσης στο τερματικό ζυγό, το οποίο με τη σειρά του προκαλεί μείωση της ενεργού ισχύος και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Επομένως η γεννήτρια αρχίζει να επιταχύνεται. Επειδή η γεννήτρια λειτουργεί ως γεννήτρια επαγωγής κατά τη διάρκεια που το Crowbar άγει, η επιτάχυνση του δρομέα της γεννήτριας προκαλεί μια αυξημένη κατανάλωση έργου ισχύος από τη γεννήτρια σε υπερσύγχρονες ταχύτητες. Τόσο η αύξηση της ταχύτητας όσο και οι αυξημένες απαιτήσεις έργου ισχύος έχουν μια αρνητική επίδραση στην ευστάθεια των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, σημαντική αύξηση της ταχύτητας της γεννήτριας μπορεί να οδηγήσει σε αποσύνδεση της από το δίκτυο. Είναι επομένως απαραίτητο να περιορίσουμε αυτή την αύξηση της ταχύτητας με κάποιο τρόπο.

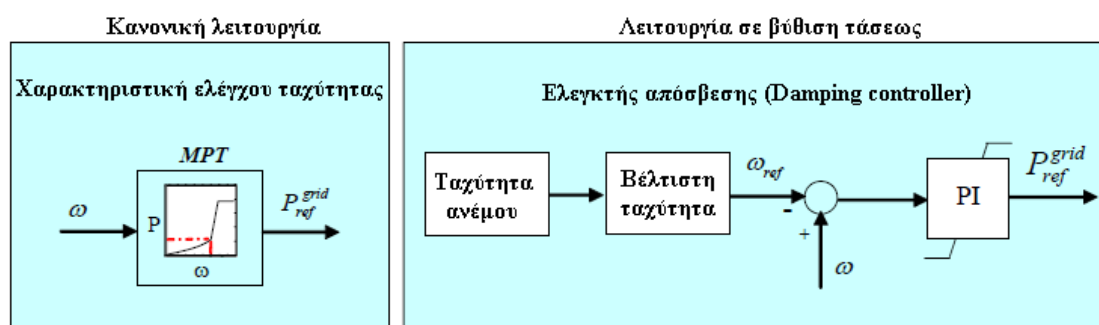
Το ρόλο αυτό τον αναλαμβάνει ο ελεγκτής γωνίας βήματος ο οποίο περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2. Καθώς, ο ελεγκτής αυτός ελέγχει άμεσα την ταχύτητα της γεννήτριας, είναι σε θέση να λειτουργήσει και ως περιοριστής της ταχύτητας σε διαταραχές του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της ταχύτητας, ο ελεγκτής γωνίας βήματος ενεργοποιείται και μειώνει την αεροδυναμική ροπή η οποία εξάγεται από τον άνεμο ενώ η ταχύτητα ελέγχεται στην ονομαστική της τιμή. Επομένως, ο μέγιστος ρυθμός μεταβολής της γωνίας βήματος του σερβομηχανισμού στον ελεγκτή, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο καθώς καθορίζει πόσο γρήγορα μπορεί η αεροδυναμική ροπή να μειωθεί.

7.3.2 Ελεγκτής απόσβεσης των μηχανικών καταπονήσεων (Damping Controller)

Για την εξάλειψη των μεγάλων μηχανικών καταπονήσεων στην ανεμογεννήτρια κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο, ένα ελεγκτής απόσβεσης των ταλαντώσεων (Damping Controller) όπως προτείνεται στα [56], [57] υιοθετήθηκε και στη παρούσα εργασία. Ο ελεγκτής αυτός οδηγεί σε καλύτερη απόκριση της γωνιακής ταχύτητας

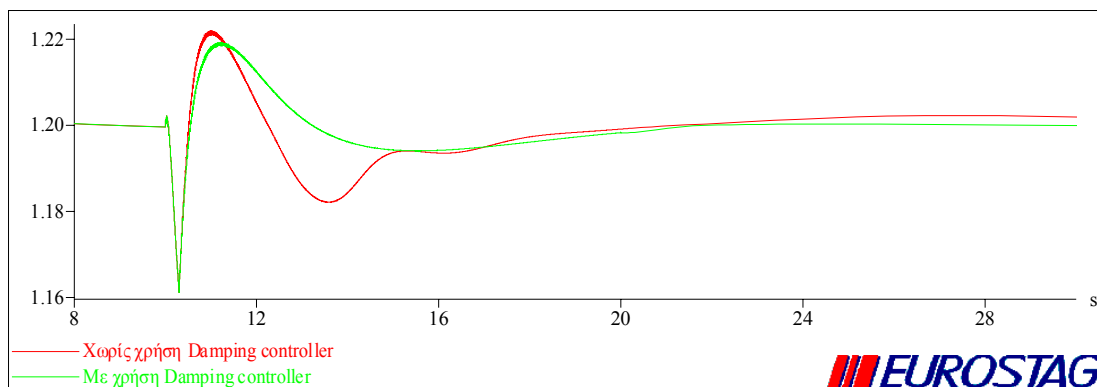
ενεργώντας στον ελεγκτή ενεργού ισχύος ο οποίος συμμετέχει στον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα (σχήμα 7.8).

Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας, η αναφορά της ενεργού ισχύος $P_{Grid,ref}$ για τον έλεγχο του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα καθορίζεται από την χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας (βλέπε κεφάλαιο 2). Αυτό σημαίνει ότι για κάθε ταχύτητα του ανέμου υπάρχει μόνο μια ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας για την οποία η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης επιτυγχάνεται. Όμως, σε περιπτώσεις διαταραχών του δικτύου, η αλλαγή στην ταχύτητα της γεννήτριας δεν οφείλεται σε αυξομείωση της ταχύτητας του ανέμου αλλά σε μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής της γεννήτριας. Αυτό σημαίνει ότι, στη περίπτωση σφαλμάτων στο δίκτυο, η αναφορά της ενεργού ισχύος $P_{Grid,ref}$ πρέπει να καθοριστεί με διαφορετικό τρόπο. Στη παρούσα εργασία το σήμα αυτό αναφοράς για την ενεργό ισχύ παράγεται μέσω ενός ελεγκτή (Damping Controller) ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα (7.4).



Σχήμα 7.4 Ελεγκτής ταχύτητας για τον υπολογισμό του σήματος αναφοράς της ενεργού ισχύος σε κανονική λειτουργία και σε βύθιση τάσεως.

Η επίδραση του ελεγκτή απόσβεσης φαίνεται ξεκάθαρα στο παρακάτω γράφημα (7.5) το οποίο παρουσιάζει τα αποτελέσματα προσομοίωσης ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο σημείο κοινής σύνδεσης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Η διαταραχή λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή 10 s και διαρκεί 300 ms.



Γράφημα 7.5 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα χωρίς χρήση (κόκκινη καμπύλη) και με χρήση (πράσινη καμπύλη) ελεγκτή απόσβεσης – Damping controller.

Βάση του παραπάνω σχήματος φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η παρουσία του ελεγκτή βελτιώνει σημαντικά την συμπεριφορά του συστήματος κατά τη διάρκεια βυθίσεων της τάσης.

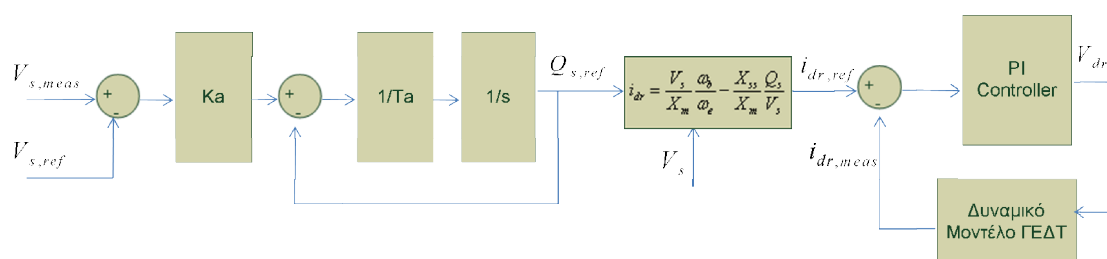
7.4 Δυνατότητα της Α/Γ Στήριξης του Δικτύου κατά τη διάρκεια Διαταραχών

Στη παράγραφο αυτή, μια στρατηγική ελέγχου της τερματικής τάσης προτείνεται, με σκοπό να δώσουμε την δυνατότητα στη ανεμογεννήτρια με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης να στηρίζει το δίκτυο. Η στρατηγική αυτή αναφέρεται στον έλεγχο των μετατροπέων ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, ο μετατροπέας από τη πλευρά του δρομέα αντιμετωπίζεται ως η προεπιλεγμένη πηγή άεργου ισχύος, ενώ ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου ως συμπληρωματική πηγή άεργου ισχύος για όσο χρονικό διάστημα το Crowbar άγει και αποκλείει τη λειτουργία του άλλου μετατροπέα.

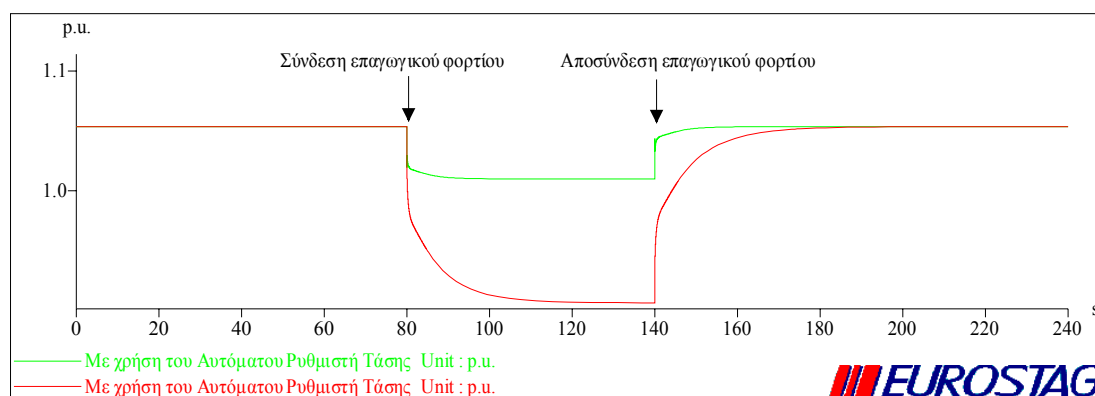
Ελεγκτής τερματικής τάσης στον μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα

Ο ελεγκτής άεργου ισχύος στο μετατροπέα από τη πλευρά του δρομέα βρίσκεται σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος. Ωστόσο, είναι δυνατό να λειτουργήσει και ως ελεγκτής τερματικής τάσης όταν αυτό κρίνεται απαραίτητο. Η λειτουργία αυτή βέβαια δεν μπορεί να υφίσταται όταν το σύστημα προστασίας (Active Crowbar) είναι συνδεδεμένο μιας και σε αυτό το χρονικό διάστημα ο μετατροπέας στη πλευρά του δρομέα είναι ουσιαστικά «μπλοκαρισμένος».

Στη λειτουργία του ελεγκτή άεργου ισχύος ως Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσης, η τιμή αναφοράς για την άεργο ισχύ δεν υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3.104) βάση ενός επιλεγμένου σταθερού συντελεστή ισχύος. Αντίθετα, η τιμή αυτή δίνεται από το σφάλμα της πραγματικής - μετρούμενης τερματικής τάσης και της τιμής αναφοράς της σύμφωνα με το σχήμα (7.5). Το σύστημα σε αυτή τη περίπτωση δεν λειτουργεί με σταθερό συντελεστή ισχύος. Επομένως, ο μετατροπέας από τη πλευρά του δρομέα λειτουργεί ως παραγωγός άεργου ισχύος στο δίκτυο. Σκοπός του ελεγκτή αυτού αποτελεί ο έλεγχος της τάσης στο ζυγό σύνδεσης προσαρμόζοντας κατάλληλα την άεργο ισχύ που παράγει ή καταναλώνει η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Η λειτουργία της γεννήτριας με αυτό τον τρόπο μπορεί να έχει είτε επαγωγικό είτε χωρητικό χαρακτήρα. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό ιδιαίτερα σε συνθήκες ανισορροπίας της άεργου ισχύος στο σύστημα, όπως για παράδειγμα όταν ένα επαγωγικό φορτίο ή γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο. Κατά τη διάρκεια σφαλμάτων και όσο το σύστημα προστασίας δεν έχει ενεργοποιηθεί, ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης μπορεί να ελέγχει την τερματική τάση παράγοντας ή απορροφώντας άεργο ισχύ.



Σχήμα 7.5 Μοντέλο του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης και η διασύνδεση του με το μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.



Γράφημα 7.6 Απόκριση τερματικής τάσης στο ζυγό σύνδεσης της ΓΕΔΤ: Συγκριτικά αποτελέσματα χωρίς χρήση (κόκκινη καμπύλη) και με χρήση (πράσινη καμπύλη) του Αυτόματου Ρυθμιστή Τάσης.

Το γράφημα (7.6) παρουσιάζει ένα παράδειγμα προσομοίωσης της τάσης στο σημείο κοινής σύνδεσης της ΓΕΔΤ, στο οποίο ένα επαγωγικό φορτίο συνδέεται την στιγμή 10 s. Η τάση πέφτει κάτω από 1 α.μ. εξαιτίας της απαίτησης για άεργο ισχύ του φορτίου που μόλις συνδέθηκε. Η τάση παραμένει στο νέο μειωμένο σημείο (κάτω από 0.9 α.μ.) όσο ο ελεγκτής άεργου ισχύος του μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα βρίσκεται σε λειτουργία σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (κόκκινη γραμμή). Αντίθετα, εάν ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης χρησιμοποιηθεί, το νέο μειωμένο σημείο της τάσης είναι μεγαλύτερο από 1 α.μ. ενώ όταν το επιπλέον φορτίο αποσυνδεθεί η επαναφορά της τάσης στα αρχικά επίπεδα γίνεται πολύ πιο γρήγορα.

Έλεγχος άεργου ισχύος στον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου

Σε περίπτωση διαταραχών του δικτύου οι οποίες προκαλούν την ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας και επομένως ο δρομέας βραχυκυκλώνεται, η χρησιμοποίηση του αυτόματου ρυθμιστή τάσης που περιγράφηκε παραπάνω δεν είναι δυνατή. Σε αντίθεση με τον μετατροπέα στη πλευρά του δρομέα, ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου μπορεί να παραμένει ενεργός κατά τη διάρκεια που το σύστημα προστασίας είναι ενεργοποιημένο. Ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου μπορεί επομένως να λειτουργεί ως μετατροπέας στατικής ισχύος STATCOM και να συνεισφέρει συμπληρωματικά στην παροχή άεργου ισχύος στο δίκτυο.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 ο έλεγχος του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου πραγματοποιείται στο σύγχρονο πλαίσιο αναφοράς GVRF. Επομένως, ισχύουν τα παρακάτω:

$$P_{conv} = v_{qs} \times i_{conv,q} \quad (7.3)$$

$$Q_{conv} = v_{qs} \times i_{conv,d} \quad (7.4)$$

με $v_{ds} = 0$ στο πλαίσιο GVRF.

Το ρεύμα από το οποίο διαρρέεται ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου υπολογίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$i_{conv} = \sqrt{i_{conv,q}^2 + i_{conv,d}^2} \quad (7.5)$$

Η ονομαστική αντοχή του μετατροπέα καθορίζεται από το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα:

$$I_{conv,rated} = 1.5 \text{ α.μ.} \quad (7.6)$$

Το ρεύμα $i_{conv,q}$ ελέγχεται από τον ελεγκτή DC τάσης ο οποίος περιγράφηκε στη παράγραφο (3.3.3.3). Στην κανονική λειτουργία, η άεργος ισχύς Q_{conv} είναι ίση με 0 επομένως και $i_{conv,d} = 0$ σύμφωνα με τη σχέση (7.4). Όμως, κατά τη διάρκεια διαταραχών και με σκοπό την παροχή άεργου ισχύος από τη γεννήτρια για την στήριξη του δικτύου, θεωρούμε ότι ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου λειτουργεί στα όρια του ούτως ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή άεργος ισχύς. Επομένως ισχύουν:

$$i_{conv} = I_{conv,rated} = 1.5 \text{ α.μ.} \quad (7.7)$$

Το ρεύμα $i_{conv,d}$ υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης (7.5) ως εξής:

$$i_{conv,d} = \sqrt{i_{conv}^2 - i_{conv,q}^2} \xrightarrow{\text{σχέσεις (7.6) \& (7.7)}} i_{conv,d} = \sqrt{1.5^2 - i_{conv,q}^2} \quad (7.8)$$

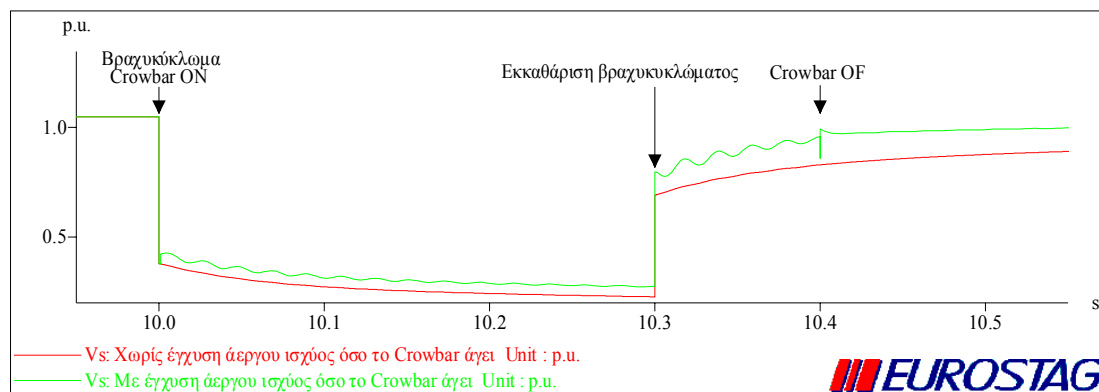
Τέλος υπολογίζεται η παρεχόμενη από το μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου ισχύς βάση της σχέσης (7.4) ως εξής:

$$Q_{conv} = v_{qs} \times i_{conv,d} \quad (7.9)$$

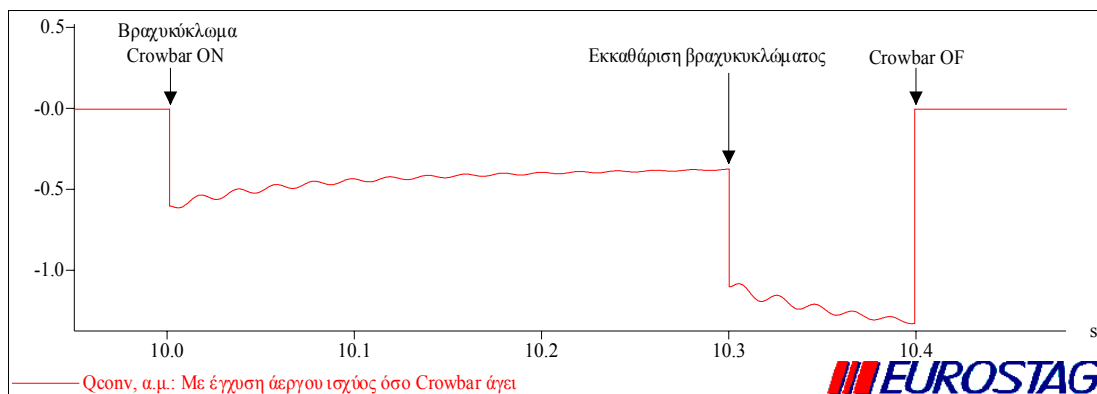
Αξιοπρόσεχτο είναι το γεγονός ότι, η ισχύς που παρέχεται στο δίκτυο εξαρτάται από την q συνιστώσα της τάσης του στάτη η οποία ουσιαστικά ισούται με την τερματική τάση στο πλαίσιο GVRF. Έτσι, παρόλο που ο μετατροπέας λειτουργεί στα όρια της ονομαστικής του αντοχής, εξαιτίας της χαμηλής τερματικής τάσης κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος, η ισχύς που τελικά παρέχεται στο δίκτυο είναι σχετικά μικρή.

Τα γραφήματα (7.7) και (7.8) παρουσιάζουν τα σήματα της τάσης στο ζυγό σύνδεσης και της παροχής άεργου ισχύος από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου κατά τη διάρκεια ενός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο τερματικό ζυγό. Το βραχυκύκλωμα ακολουθείται από μια άμεση ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας. Μετά την «εκκαθάριση» του βραχυκυκλώματος την χρονική στιγμή 10.3 s, το Crowbar

παραμένει συνδεδεμένο για τα επόμενα 100 ms, δηλαδή μέχρι τη χρονική στιγμή 10.4 s. Στο γράφημα (7.7) η τερματική τάση σχεδιάζεται για δύο περιπτώσεις: με και χωρίς έγχυση άεργου ισχύος από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου όσο το Crowbar είναι συνδεδεμένο. Για το χρονικό αυτό διάστημα, δηλαδή για όσο το Crowbar άγει και ο μετατροπέας στη πλευρά του δρομέα είναι «μπλοκαρισμένος», ο μετατροπέας στη πλευρά του δικτύου μπορεί, λειτουργώντας ως STATCOM, να συνεισφέρει στην παροχή άεργου ισχύος με σκοπό την βελτίωση των επιπέδων των τάσεων στο δίκτυο. Το γράφημα (7.8) παρουσιάζει την άεργο ισχύ που παρέχεται από τον μετατροπέα στη πλευρά το δικτύου. Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, η ισχύ αυτή είναι η μέγιστη που μπορεί να παρέχει ο μετατροπέας. Παρόλο αυτό όμως, από τη στιγμή που το επίπεδο της τάσης είναι εξαιρετικά χαμηλό κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, μειώνεται επίσης και δυνατότητα παροχής άεργου ισχύος από τον μετατροπέα. Μετά την εκκαθάριση του σφάλματος και επομένως την επαναφορά της τάσης σε σχετικά φυσιολογικά επίπεδα, ο μετατροπέας είναι σε θέση να παρέχει την ονομαστική του ισχύ. Ωστόσο, μετά την εκκαθάριση του σφάλματος η τάση δεν επανέρχεται ακριβώς στα αρχικά της επίπεδα. Η γεννήτρια συνεχίζει να λειτουργεί σαν γεννήτρια επαγωγής. Μόλις το Crowbar αποσυνδεθεί ο μετατροπέας από τη πλευρά του δρομέα επανασυνδέεται και ο ελεγκτής τερματικής τάσης παρέχει την επιπλέον άεργο ισχύ για την όσο το δυνατόν πιο γρήγορη επαναφορά του επιπέδου της τάσης.



Γράφημα 7.7 Απόκριση τερματικής τάσης στο ζυγό σύνδεσης της ΓΕΔΤ: Συγκριτικά αποτελέσματα χωρίς (κόκκινη καμπύλη) και με (πράσινη καμπύλη) παροχή άεργου ισχύος μέσω του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου, όσο το Crowbar άγει.



Γράφημα 7.8 Απόκριση άεργου ισχύος του μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου, όταν αυτός «στηρίζει» το δίκτυο όσο το Crowbar άγει.

Στο Παράρτημα 4 που ακολουθεί στο τέλος της εργασίας περιλαμβάνονται μια σειρά από προσομοιώσεις σκοπός των οποίων αποτελεί η περαιτέρω και λεπτομερής ανάλυση της απόκρισης του συστήματος σε συγκεκριμένα σενάρια βύθισης τάσεως.

8 Μοντελοποίηση του ΣΗΕ Κύπρου – Παρουσίαση των Σεναρίων και των Αποτελεσμάτων Προσομοίωσης

8.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο 5, είχαν περιγραφεί τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του EUROSTAG με ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή και εξήγηση της λειτουργίας του επεξεργαστή μοντέλων Model Editor.

Στην ενότητα αυτή, προχωράμε στη περιγραφή του τρόπου με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου, στο EUROSTAG.

Μετά λοιπόν την παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης του ΣΗΕ που υπάρχει στο νησί, το παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθεί με τις προσομοιώσεις που έγιναν κατά την περάτωση της διπλωματικής εργασίας. Στην παρούσα εργασία, μας ενδιαφέρει κυρίως η δυναμική συμπεριφορά του μοντέλου της ανεμογεννήτριας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης κατά τη διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος σε ένα συγκεκριμένο επιλεγμένο ζυγό του συστήματος. Περιλαμβάνεται επίσης, μια σύγκριση της συμπεριφοράς του μοντέλου που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία με αυτή των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας τα μοντέλα των οποίων προϋπάρχουν στη βιβλιοθήκη του EUROSTAG. Στο τέλος του κεφαλαίου αυτού, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα-γραφήματα των δύο σεναρίων προσομοίωσης που καταστρώθηκαν στην παρούσα εργασία.

8.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου στο EUROSTAG

Στην ενότητα αυτή, θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου.

Το δίκτυο

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, το EUROSTAG χρησιμοποιεί είτε μονογραμμική, είτε τριφασική αναπαράσταση του δικτύου, με τους κόμβους των τάσεων να διέπονται από τις αλγεβρικές εξισώσεις, στις οποίες είναι το διάνυσμα των τάσεων των κόμβων, το διάνυσμα των ρευμάτων που εισέρχονται στους κόμβους και η μήτρα αγωγιμότητας του δικτύου. Στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιούμε μονογραμμική αναπαράσταση του δικτύου. Τα φορτία παριστάνονται από μια μη γραμμική εξίσωση, που είναι συνάρτηση της τάσης και της συχνότητας, όπως φαίνεται και από τις πιο κάτω σχέσεις:

$$P = P_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^a \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^c \quad (8.1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^b \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^d \quad (8.2)$$

όπου:

P :η ενεργός ισχύς στον κάθε ζυγό.

P_0 :η ονομαστική ενεργός ισχύς του κάθε ζυγού.

Q :η άεργος ισχύς στον κάθε ζυγό.

Q_0 :η ονομαστική άεργος ισχύς του κάθε ζυγού.

U :η τάση του ζυγού του φορτίου.

U_0 :η ονομαστική τάση του ζυγού του φορτίου.

ω :η συχνότητα του δικτύου.

ω_0 :η ονομαστική συχνότητα του δικτύου.

a, b, c, d :οι παράμετροι που καθορίζονται από τον τύπο του φορτίου.

Τα ονομαστικά μεγέθη των ενεργών και άεργων ισχύων, καθώς και των τάσεων των ζυγών στους οποίους συνδέονται τα φορτία, δηλώνονται στο αρχείο **.ech**, κατά την εισαγωγή των φορτίων στο σύστημα.

Οι τιμές των παραμέτρων a, b, c και d εισάγονται στο αρχείο **.dta**, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα:

Παράμετρος	Τιμή
a	1.4
b	2
c	1
d	0

Πίνακας 8.1 Τιμές παραμέτρων a, b, c, d .

Οι γεννήτριες

Οι γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών της Κύπρου, είναι σύγχρονες μηχανές και συνεπώς περιγράφονται από τις κλασσικές εξισώσεις του PARK, με το δρομέα να παριστάνεται από τέσσερα ισοδύναμα ελίγματα. Μοντελοποιείται επίσης ο μαγνητικός κορεσμός και στους δύο άξονες, ενώ όσον αφορά τη μηχανική κίνηση των γεννητριών, οι κινήσεις του δρομέα καθορίζονται από την εξίσωση στρεφομένων μαζών, που συνδέει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και ηλεκτρική ροπή, με την μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής.

Οι παράμετροι των γεννητριών που χρησιμοποιούνται στο EUROSTAG για την κάλυψη του συνολικού φορτίου, περιγράφονται από τους πίνακες 8.2 έως 8.16.

X_d	2.06	T'_d	9
X_q	1.92	T'_q	1.27
X'_d	0.202	T''_d	0.056
X'_q	0.329	T''_q	0.086
X''_d	0.155	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.25
X''_q	0.164		

Πίνακας 8.2 Παράμετροι μονάδων 1 - 3 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Βασιλικού.

X_d	2.22	T'_d	5.43
X_q	2.08	T'_q	-
X'_d	0.213	T''_d	-
X'_q	0.329	T''_q	-
X''_d	-	H (constant of inertia) MWs/MVA	6.06
X''_q	-		

Πίνακας 8.3 Παράμετροι μονάδας 4 (αεριοστρόβιλος) σταθμού Βασιλικού.

X_d	1.92	T'_d	8.123
X_q	1.83	T'_q	0.7
X'_d	0.26	T''_d	0.035
X'_q	0.362	T''_q	0.07
X''_d	0.195	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.8
X''_q	0.362		

Πίνακας 8.4 Παράμετροι αεριοστρόβιλων συνδυασμένου κύκλου σταθμού Βασιλικού.

X_d	1.68	T'_d	9.755
X_q	1.59	T'_q	0.7
X'_d	0.196	T''_d	0.045
X'_q	0.373	T''_q	0.05
X''_d	0.1455	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.31
X''_q	0.373		

Πίνακας 8.5 Παράμετροι ατμοστρόβιλου συνδυασμένου κύκλου σταθμού Βασιλικού.

X_d	1.94	T'_d	7.41
X_q	1.84	T'_q	3.23
X'_d	0.223	T''_d	0.038
X'_q	0.245	T''_q	0.038
X''_d	0.144	H (constant of inertia) MWs/MVA	3.3
X''_q	0.2		

Πίνακας 8.6 Παράμετροι μονάδας 1 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Δεκέλειας.

X_d	1.96	T'_d	7.51
X_q	1.863	T'_q	3.27
X'_d	0.223	T''_d	0.038
X'_q	0.245	T''_q	0.038
X''_d	0.144	H (constant of inertia) MWs/MVA	3.3
X''_q	0.2		

Πίνακας 8.7 Παράμετροι μονάδας 2 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Δεκέλειας.

X_d	1.84	T'_d	7.41
X_q	1.71	T'_q	3.23
X'_d	0.265	T''_d	0.036
X'_q	0.29	T''_q	0.089
X''_d	0.181	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.06
X''_q	0.2		

Πίνακας 8.8 Παράμετροι μονάδας 3 - 4 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Δεκέλειας.

X_d	1.85	T'_d	7.41
X_q	1.7	T'_q	3.23
X'_d	0.26	T''_d	0.038
X'_q	0.25	T''_q	0.038
X''_d	0.18	H (constant of inertia) MWs/MVA	4
X''_q	0.18		

Πίνακας 8.9 Παράμετροι μονάδων 5 - 6 (ατμοστρόβιλοι) σταθμού Δεκέλειας.

X_d	2.13	T'_d	9
X_q	1.94	T'_q	4
X'_d	0.185	T''_d	0.029
X'_q	0.203	T''_q	0.029
X''_d	0.126	H (constant of inertia) MWs/MVA	5.49
X''_q	0.135		

Πίνακας 8.10 Παράμετροι μονάδας 1 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	2.04	T'_d	9.21
X_q	1.94	T'_q	4
X'_d	0.186	T''_d	0.029
X'_q	0.205	T''_q	0.029
X''_d	0.128	H (constant of inertia) MWs/MVA	5.49
X''_q	0.136		

Πίνακας 8.11 Παράμετροι μονάδας 2 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	2.08	T'_d	9.52
X_q	1.98	T'_q	4.12
X'_d	0.179	T''_d	0.029
X'_q	0.197	T''_q	0.03
X''_d	0.125	H (constant of inertia) MWs/MVA	5.49
X''_q	0.133		

Πίνακας 8.12 Παράμετροι μονάδας 3 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	1.8	T'_d	8.87
X_q	1.71	T'_q	3.85
X'_d	0.202	T''_d	0.029
X'_q	0.222	T''_q	0.029
X''_d	0.151	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.84
X''_q	0.161		

Πίνακας 8.13 Παράμετροι μονάδας 4 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	1.76	T'_d	8.5
X_q	1.67	T'_q	3.65
X'_d	0.195	T''_d	0.029
X'_q	0.215	T''_q	0.029
X''_d	0.145	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.84
X''_q	0.161		

Πίνακας 8.14 Παράμετροι μονάδας 5 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	1.74	T'_d	9
X_q	1.65	T'_q	3.87
X'_d	0.194	T''_d	0.03
X'_q	0.213	T''_q	0.03
X''_d	0.146	H (constant of inertia) MWs/MVA	4.84
X''_q	0.164		

Πίνακας 8.15 Παράμετροι μονάδας 6 (ατμοστρόβιλος) σταθμού Μονής.

X_d	2.22	T'_d	5.43
X_q	2.08	T'_q	-
X'_d	0.213	T''_d	-
X'_q	-	T''_q	-
X''_d	-	H (constant of inertia) MWs/MVA	6.06
X''_q	-		

Πίνακας 8.16 Παράμετροι μονάδων 7-10 (αεριοστρόβιλοι) σταθμού Μονής.

Οι μονάδες 4 του Βασιλικού και 7 έως 10 της Μονής περιγράφονται με το απλοποιημένο μοντέλο σύγχρονης γεννήτριας για αυτό και στον πίνακα (8.16) υπολείπονται οι αντίστοιχες παράμετροι.

Τα στοιχεία που έχουν παρουσιαστεί στους πίνακες που προηγήθηκαν, αφορούν κυρίως την εσωτερική φύση των γεννητριών που χρησιμοποιεί η ΑΗΚ. Ιδιαίτερο αλλά και πιο σημαντικό ενδιαφέρον για μας, έχουν τα εξωτερικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τις γεννήτριες, τα οποία αφορούν την δυναμικότητα τους στην παραγωγή ενεργού ισχύος, η οποία προσαρμόζεται ανάλογα με το κάθε προσομοιωτικό σενάριο, όπως θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Στον πίνακα που ακολουθεί, φαίνονται καθαρά τα στοιχεία των γεννητριών της ΑΗΚ που αφορούν την παραγωγή ενεργού ισχύος, όπως θα χρησιμοποιηθούν στο EUROSTAG.

Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός	Ελάχιστη παραγωγή	Μέγιστη παραγωγή	Μέγιστη επιτρεπόμενη παραγωγή
Βασιλικός (3 μον.)	60 MW/μον.	130 MW/μον.	120 MW/μον.
Συνδ. Κύκλος (2 μον.)	77MW/μον.	220 MW/μον.	202.4 MW/μον.
Δεκέλεια (6 μον.)	30 MW/μον.	60 MW/μον.	55.2 MW/μον.
Μονή (μον. 1 έως 6)	18 MW/μον.	30 MW/μον.	27.6 MW/μον.
Μονή (μον. 7 έως 10)	4 MW/μον.	37.5 MW/μον.	34.5 MW/μον.

Πίνακας 8.17 Χαρακτηριστικά παραγωγής ισχύος των γεννητριών.

Η σειρά που αναγράφονται οι ηλεκτροπαραγωγοί σταθμοί στον πίνακα, δεν είναι καθόλου τυχαία, αλλά σχετίζεται με το κόστος παραγωγής ενέργειας στην κάθε μονάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να τοποθετούνται ψηλά στον πίνακα οι μονάδες του Βασιλικού, στις οποίες η παραγωγή ενέργειας είναι πιο φτηνή σε σχέση με τις μονάδες των άλλων ηλεκτροπαραγωγών σταθμών, οι οποίοι χρησιμοποιούν παλαιότερη τεχνολογία.

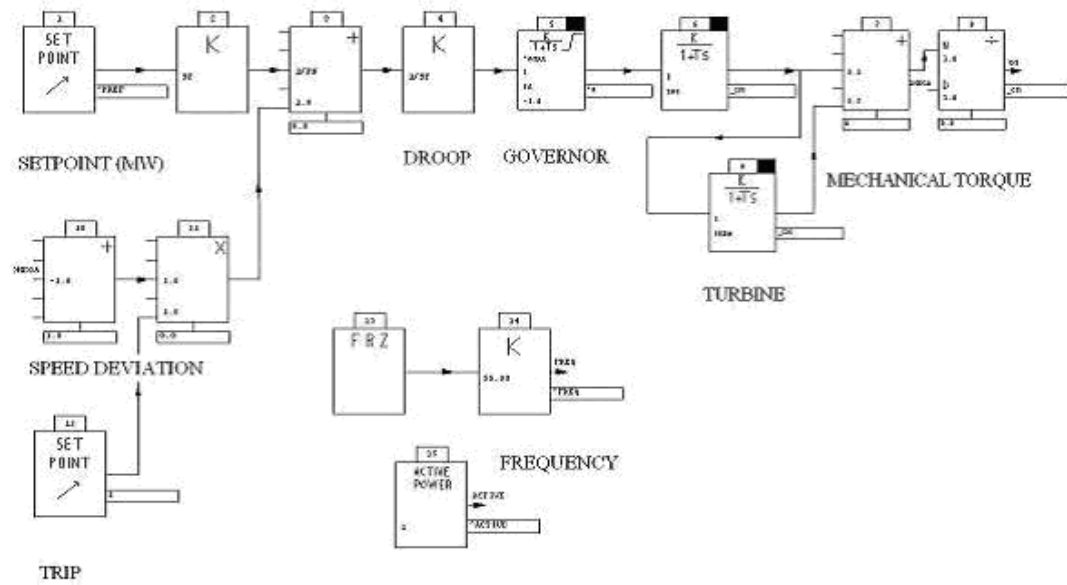
Οι αυτόματες συσκευές

Σε κάθε προσομοιωτικό σενάριο χρησιμοποιείται αυτόματος διακόπτης απόρριψης φορτίου, ο οποίος δημιουργείται στο αρχείο dta και ενεργοποιείται όταν η συχνότητα του δικτύου πέφτει κάτω από 49Hz. Η απόρριψη φορτίου σε κάθε ζυγό φορτίου, είναι της τάξης του 10 %.

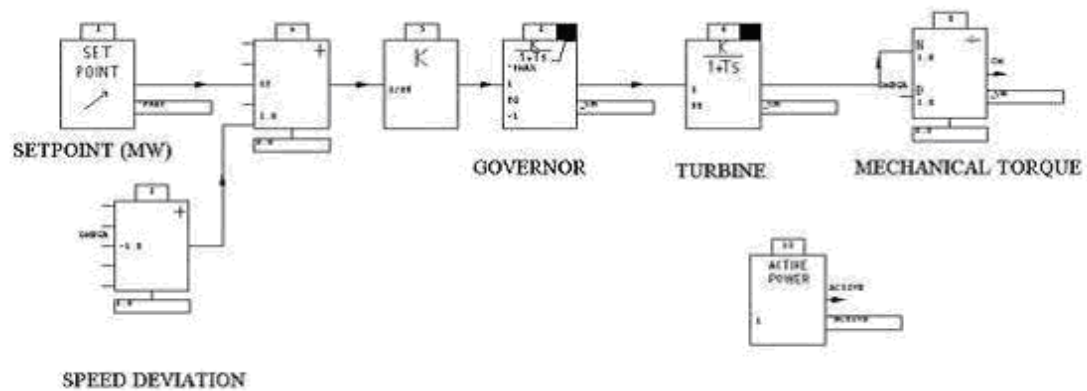
Οι ρυθμιστές τάσης και στροφών των γεννητριών

Όσον αφορά τους ρυθμιστές τάσης και στροφών που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών σταθμών του συστήματος της Κύπρου, θα γίνει μοντελοποίηση τους στο EUROSTAG με την μορφή μπλοκ διαγραμμάτων, των οποίων η λειτουργία περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 της παρούσας διπλωματικής.

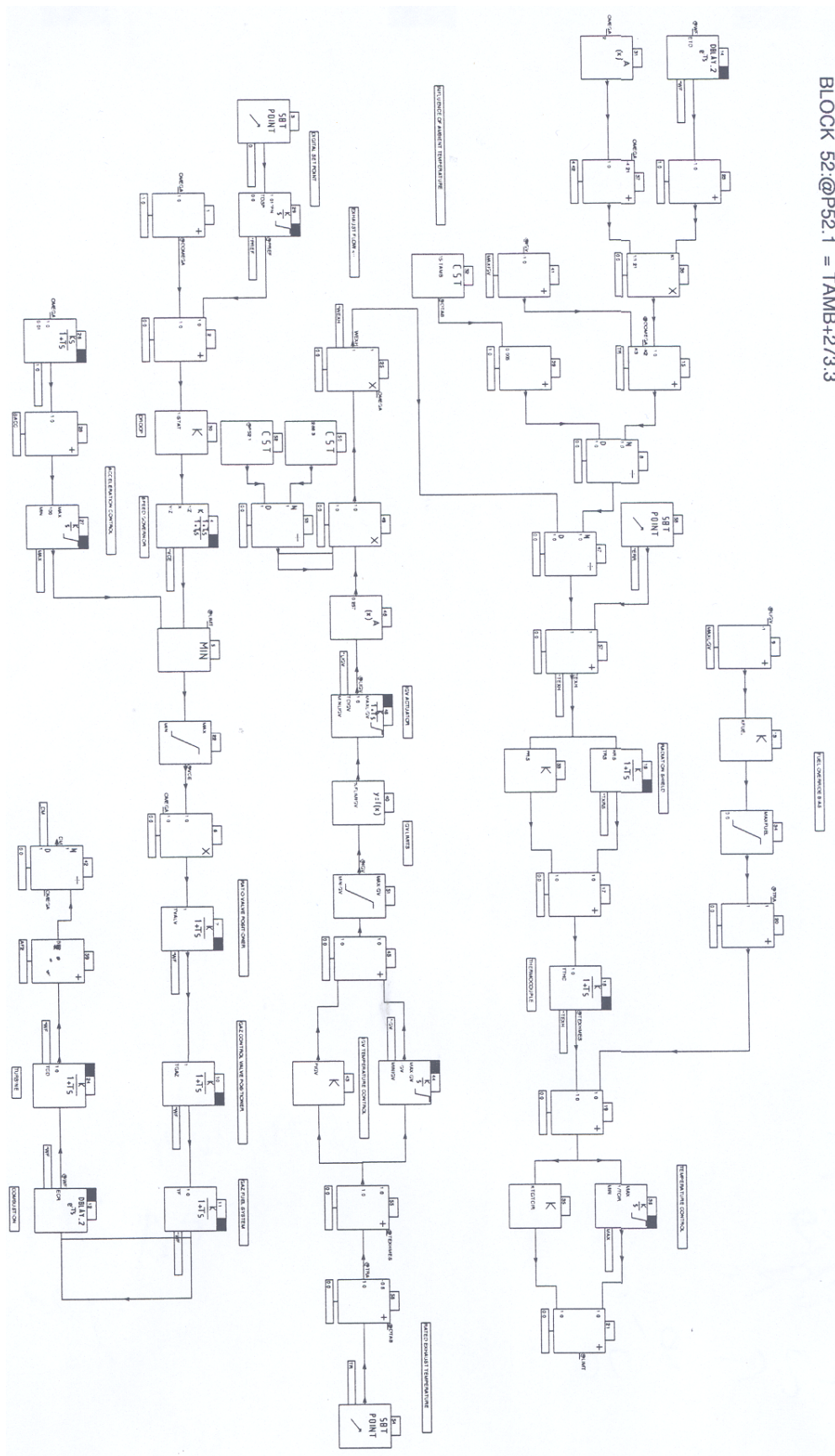
Στα ακόλουθα σχήματα (8.1 έως 8.4), παρατίθενται με την σειρά τα μπλοκ διαγράμματα των ρυθμιστών στροφών με και χωρίς αναθέρμανση, καθώς και το μπλοκ διάγραμμα του ρυθμιστή τάσης, που αφορά όλες τις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΑΗΚ.



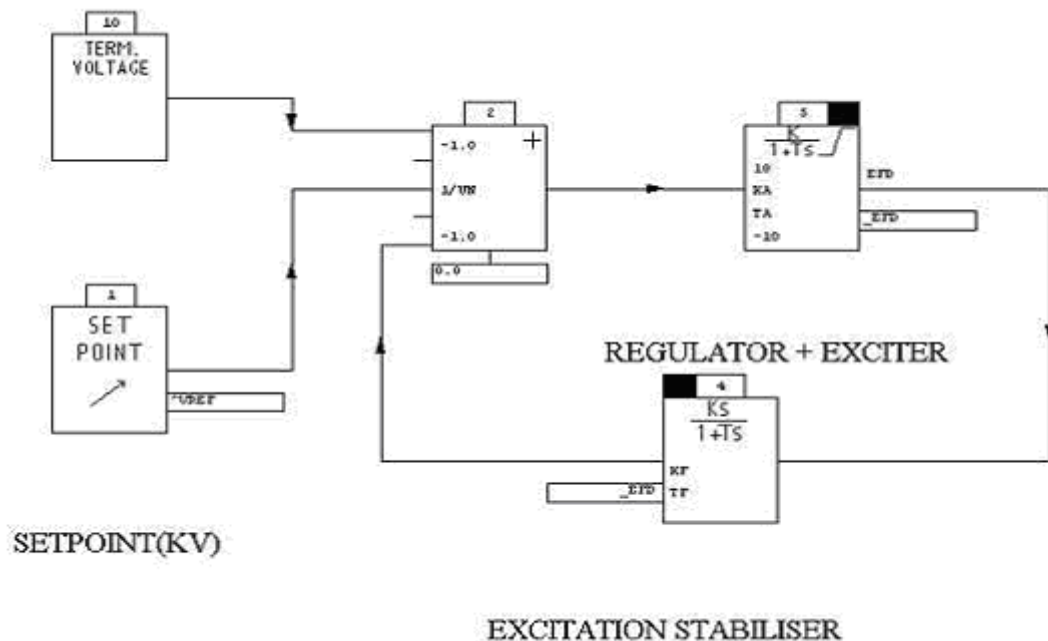
Σχήμα 8.1 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών θερμοηλεκτρικού σταθμού με αναθέρμανση στο EUROSTAG.



Σχήμα 8.2 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών θερμοηλεκτρικού σταθμού χωρίς αναθέρμανση στο EUROSTAG.



Σχήμα 8.3 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή στροφών αεριοστροβίλου στο EUROSTAG.



Σχήμα 8.4 Μπλοκ διάγραμμα ρυθμιστή τάσης στο EUROSTAG.

Οι μετασχηματιστές

Στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου, χρησιμοποιούνται κυρίως μετασχηματιστές με taps, με πλήρη μοντέλα που περιλαμβάνουν απώλειες σιδήρου, χαλκού, καθώς και τον μαγνητικό κορεσμό.

Για την σύνδεση των αιολικών πάρκων στο σύστημα, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές με λόγο μετασχηματισμού 0,4 KV / 11 KV, για την ανύψωση της τάσης λειτουργίας των ανεμογεννητριών σε μέση τάση και ακολούθως μετασχηματιστές με λόγο μετασχηματισμού 11 KV / 132 KV, για την ανύψωση σε υψηλή τάση, με την οποία γίνεται κατά κύριο λόγο η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο.

Όσον αφορά τώρα την σύνδεση των γεννητριών των τριών ηλεκτροπαραγωγών σταθμών της ΑΗΚ στο σύστημα, χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές ανύψωσης της μέσης τάσης (των 11 με 22 KV), στην υψηλή τάση (των 66 με 132 KV).

8.3 Συνοπτική Παρουσίαση των Σεναρίων Προσομοίωσης

Στην παρούσα μελέτη, το κάθε σενάριο χαρακτηρίζεται από την φόρτιση, καθώς και από το ποσοστό αιολικής διείσδυσης που υπάρχει στο σύστημα, την δεδομένη στιγμή. Πιο συγκεκριμένα, δύο σενάρια καταστρώθηκαν και προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά, τα σενάρια που προσομοιώθηκαν, για τις ανάγκες της διπλωματικής μας εργασίας:

Σενάριο	Συνολικό φορτίο (MW)	Αιολική παραγωγή (MW)	Παραγωγή μονάδων της ΑΗΚ (MW)
Αιολική Διείσδυση 30%			
A	300	90	210
B	700	210	490

Πίνακας 8.18 Σενάρια προσομοίωσης.

Παρατηρώντας τον πίνακα (8.18), γίνεται αντιληπτό ότι τα σενάρια των οποίων η προσομοίωση μας ενδιαφέρει, είναι δύο: ένα για χαμηλή φόρτιση και μεγάλη αιολική διείσδυση (σενάριο A) και ένα για υψηλή φόρτιση και υψηλή διείσδυση (σενάριο B). Με τον όρο αιολική διείσδυση, είναι φανερό ότι, αναφερόμαστε στο ποσοστό του συνολικού φορτίου, το οποίο καλύπτεται από την αιολική παραγωγή. Τι συμβαίνει όμως, με το υπόλοιπο ποσοστό του φορτίου, που δεν καλύπτεται από την ισχύ που παράγουν τα αιολικά πάρκα; Η απάντηση στο ερώτημα αυτό, δίνεται στους παρακάτω πίνακες οι οποίοι παρουσιάζουν την κατανομή της παραγωγής ισχύος στις μονάδες της ΑΗΚ για καθένα από τα δύο σενάρια. Η κατανομή αυτή στις μονάδες της ΑΗΚ έγινε με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να τηρείται η συνθήκη εφεδρείας του συστήματος, σε κάθε λειτουργική κατάσταση. Τελικά μετά την εκτέλεση της ροής φορτίου είχαμε τα παρακάτω ακριβή αποτελέσματα τα οποία ορίζουν επακριβώς τα δύο σενάρια:

Σενάριο	A	B
Φορτίο (MW)	292.67	723.68
Συνολικές απώλειες (MW)	4.87	24.11
Συνολική φόρτιση των μονάδων παραγωγής (MW)	297.54	747.73
Αιολική παραγωγή (MW)	90	209.8
Αιολική διείσδυση	30.24 %	28.1 %
Βασιλικός 1	80	120
Βασιλικός 2	80	120
Βασιλικός 3	0	120
Δεκέλεια 1	30	38
Δεκέλεια 2	0	38
Δεκέλεια 3	0	38
Δεκέλεια 4	0	38
Δεκέλεια 5	0	0
Δεκέλεια 6	0	0
Μονή 1	20	20
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Μονή 1	0	0
Συνολική Εφεδρεία (MW)	140 (>80)	128 (>120)

Πίνακας 8.19 Κατανομή της παραγωγής ισχύος στις μονάδες της ΑΗΚ για καθένα από τα δύο σενάρια.

Στον πίνακα (8.19), εκτός από την κατανομή της παραγωγής ισχύος στις μονάδες της ΑΗΚ, φαίνεται και η συνολική εφεδρεία σε MW, που είναι διαθέσιμη στο σύστημα σε κάθε σενάριο αντίστοιχα. Ο όρος της συνολικής εφεδρείας, είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον όρο «Συνολική εφεδρεία του συστήματος», αναφερόμαστε στο άθροισμα όλων των επιμέρους εφεδρειών, των εν λειτουργία μονάδων του δικτύου μας. Η εφεδρεία μιας επιμέρους μονάδας του συστήματος, προκύπτει αφαιρώντας την τρέχουσα σε κάθε σενάριο, παραγωγή της μονάδας, από την τιμή της μέγιστης παραγωγής σ' αυτήν. Η συνθήκη της εφεδρείας που πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε σενάριο ουσιαστικά εξασφαλίζει ότι η Συνολική εφεδρεία του συστήματος είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή της μεγαλύτερης μονάδας του συστήματος (δηλαδή του Βασιλικού 1, 2 ή 3). Με άλλα λόγια η συνθήκη αυτή είναι η εξής: **Συνολική εφεδρεία > Παραγωγή μεγαλύτερης μονάδας** και σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα ικανοποιείται και στα δύο σενάρια.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου αποτελεί η διερεύνηση της επίδρασης μιας διαταραχής στη συχνότητα του δικτύου σε δύο περιπτώσεις: στη περίπτωση όπου τα συνδεδεμένα αιολικά πάρκα μοντελοποιούνται ως ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης (μοντέλο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία) και σε αυτή όπου οι ανεμογεννήτριες παριστάνονται ως γεννήτριες επαγωγής σταθερών στροφών (μοντέλο το οποίο προϋπάρχει στις βιβλιοθήκες μοντέλων του EUROSTAG). Για το σκοπό αυτό, οι ανεμογεννήτριες των αιολικών πάρκων στη δεύτερη περίπτωση, μοντελοποιούνται ως ασύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών στο EUROSTAG, γι' αυτό και άλλωστε εισάγονται ως μηχανές επαγωγής στο αρχείο dta. Όσον αφορά τώρα το αρχείο ech, σ' αυτό οι ανεμογεννήτριες παρίστανται με την μορφή φορτίου, το οποίο απορροφά άεργο ισχύ και παρέχει ενεργό ισχύ στο δίκτυο. Η ενεργός ισχύς κάθε πάρκου παρουσιάζεται με αρνητικό πρόσημο, κάτι που οφείλεται στην παράσταση του πάρκου με την μορφή φορτίου, το οποίο όμως δεν απορροφά, αλλά παρέχει ενεργό ισχύ στο σύστημα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατανομή της παραγόμενης ισχύος στα 13 αιολικά πάρκα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο για καθένα από τα δύο σενάρια:

Σενάριο	A	B
Αιολική διείσδυση	30.24 %	28.1 %
Αιολική παραγωγή (MW)	90	209.8
W1	2.5	5.9
W2	7.6	17.7
W3	2.1	4.9
W3	2.1	4.9
W4	10.6	24.6
W5	8.5	19.7
W6	12.7	29.6
W7	3.8	8.9
W8	6.3	14.8
W9	10.6	24.6
W10	6.3	14.8
W11	6.3	14.8
W12	10.6	24.6
W13	2.5	5.9

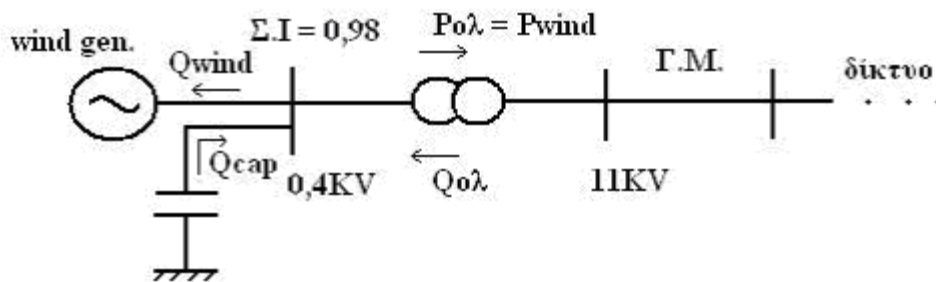
Πίνακας 8.20 Κατανομή της παραγωγής ισχύος στις ανεμογεννήτριες για καθένα από τα δύο σενάρια.

Ο συντελεστής ισχύος των ανεμογεννητριών είναι ίσος με $\lambda=0,86$. Επομένως η σχέση που ενώνει την ενεργό με την άεργο ισχύ δίνεται παρακάτω:

$$\tan[\cos^{-1}(0,86)] = \frac{Q_{wind}}{P_{wind}} \Rightarrow Q_{wind} = 0,6P_{wind} \quad (8.3)$$

Στους ζυγούς του συστήματος στους οποίους έχουμε τοποθετήσει τα αιολικά πάρκα που δόθηκαν, χρησιμοποιούμε επίσης πυκνωτές αντιστάθμισης της άεργου ισχύος. Οι πυκνωτές αυτοί δηλώνονται στο αρχείο ech, με την άεργο ισχύ που παρέχουν στο σύστημα (Q_{cap}).

Η τιμή της άεργου ισχύος του πυκνωτή στο κάθε πάρκο, είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τιμή της ενεργού ισχύος (P_{wind}), που παρέχει το αιολικό στο δίκτυο της ΑΗΚ. Για την εύρεση της σχέσης που συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη, χρησιμοποιούμε το σχήμα (8.5), στο οποίο φαίνεται η ροή ενεργού και άεργου ισχύος, στον ζυγό διασύνδεσης κάθε πάρκου.



Σχήμα 8.5 Ροή ισχύος στον ζυγό σύνδεσης του αιολικού πάρκου.

Όπως φαίνεται στο σχήμα (8.5), ο συντελεστής ισχύος στον ζυγό σύνδεσης έχει τιμή 0,98. Αυτή η τιμή έχει επιλεγθεί κοντά στην μονάδα, για να έχουμε όσο το δυνατό γίνεται μεγαλύτερη παραγωγή ενεργού ισχύος, σε σχέση με την απορρόφηση άεργου ισχύος από το κάθε αιολικό πάρκο.

Βλέποντας το σχήμα (8.5), κάνουμε την ακόλουθη ανάλυση για την εύρεση της σχέσης που συνδέει την άεργο ισχύ αντιστάθμισης Q_{cap} , με την ενεργό ισχύ P_{wind} που παρέχεται από τις ανεμογεννήτριες των πάρκων.

$$0,98 = \frac{P_{o\lambda}}{\sqrt{P_{o\lambda}^2 + Q_{o\lambda}^2}} \Rightarrow P_{o\lambda} = 4,92Q_{o\lambda} \quad (8.4)$$

Όμως ισχύει ότι:

$$Q_{ol} = Q_{wind} - Q_{cap} \quad (8.5)$$

Η εξίσωση (8.4) γράφεται με βάση τις (8.3) και (8.5):

$$P_{ol} = P_{wind} = 4,92(0,6P_{wind} - Q_{cap}) \Rightarrow Q_{cap} \cong 0,4P_{wind} \quad (8.6)$$

Η πιο πάνω σχέση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, διότι λαμβάνει υπ' όψιν και την άεργο αντιστάθμιση που γίνεται σε κάθε ζυγό διασύνδεσης αιολικού πάρκου και πρέπει να αναπροσαρμόζεται σε κάθε προσομοιωτικό σενάριο, ανάλογα με το ποσοστό της αιολικής διείσδυσης και κατ' επέκταση την τρέχουσα P_{wind} που παράγεται σε κάθε πάρκο αντίστοιχα.

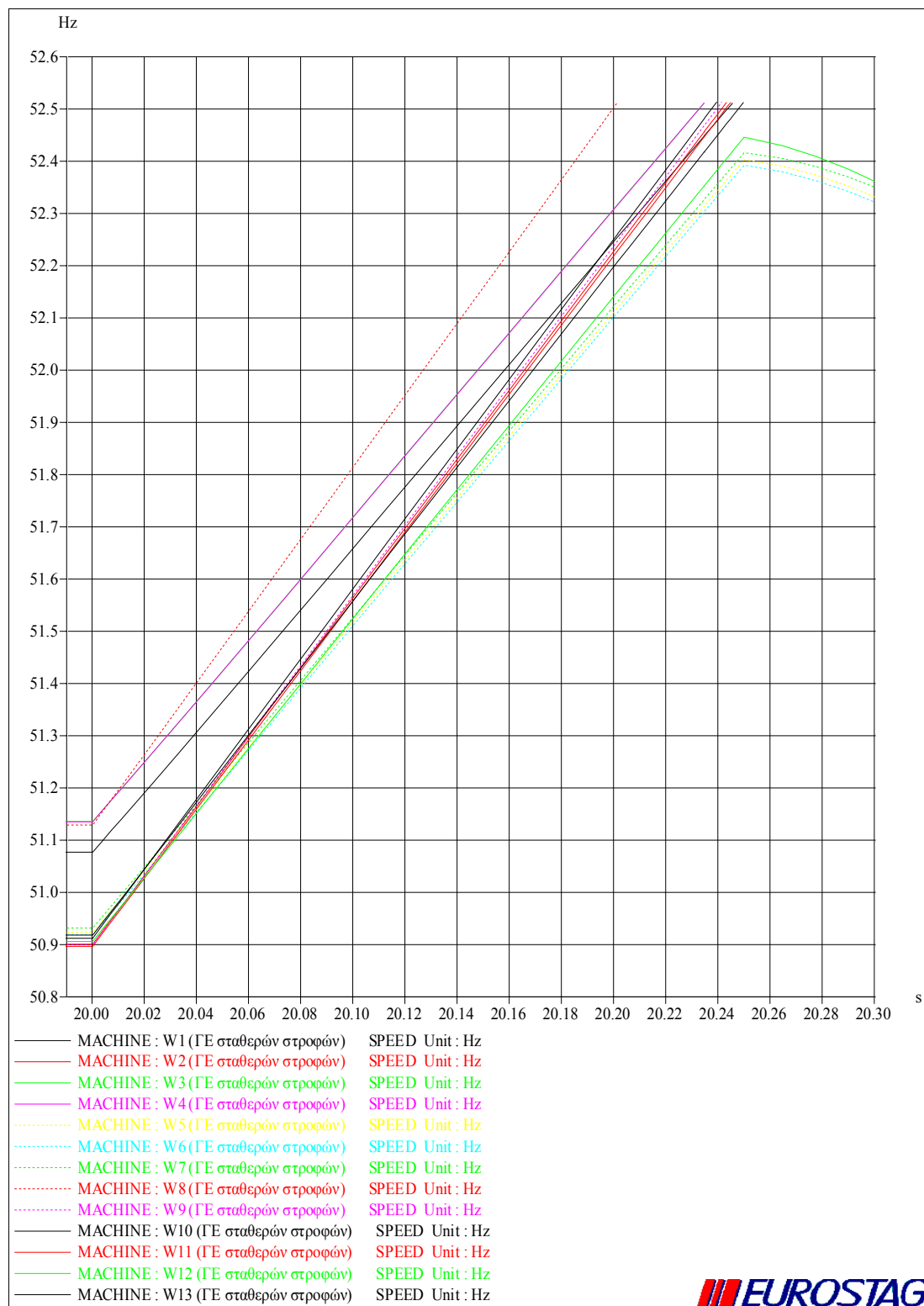
Τέλος, στο αρχείο dta έχουν προστεθεί αυτόματες συσκευές για την προστασία των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών. Σε περίπτωση που η ταχύτητα των ασύγχρονων γεννητριών ξεπεράσει τα 52.5 Hz ή πέσει κάτω από 47.5 Hz τότε αυτές για λόγους ασφαλείας αποσυνδέονται από το δίκτυο έχοντας τις αντίστοιχες δυσμενείς επιπτώσεις για την συχνότητα του δικτύου. Αντίθετα, η χρήση των αυτόματων αυτών διακοπών δεν είναι αναγκαία στην περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες παριστάνονται από το μοντέλο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία, μιας και αυτές είναι ουσιαστικά ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας.

8.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων στο ΣΗΕ Κύπρου

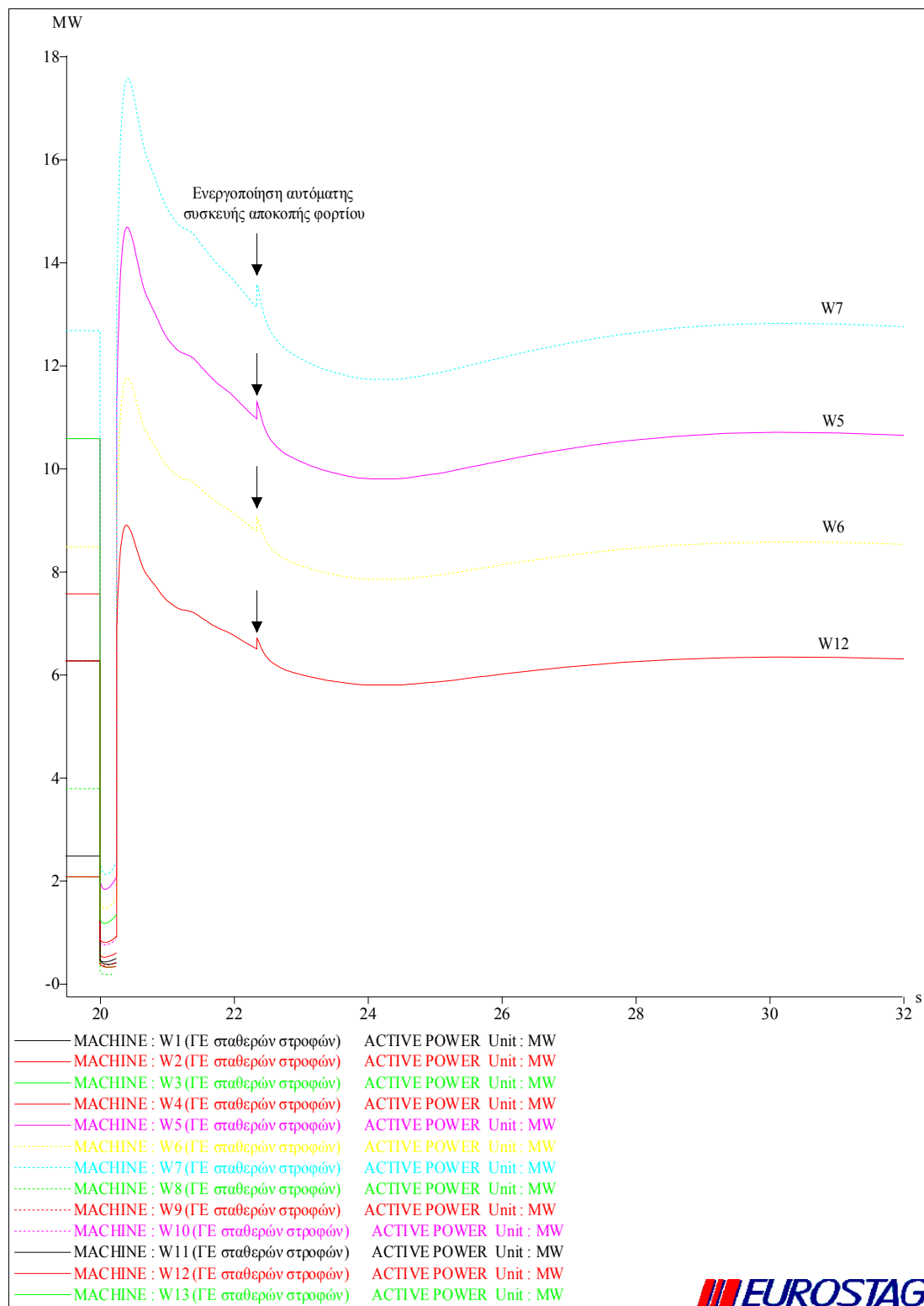
8.3.1 Αποτελέσματα σεναρίου Α (χαμηλή φόρτιση – υψηλή διείσδυση)

Στα γραφήματα (8.1) – (8.7) περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα προσομοίωσης για το σενάριο Α στη περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες μοντελοποιούνται ως ασύγχρονες γεννήτριες σταθερών στροφών. Το βραχυκύκλωμα λαμβάνει χώρα τη χρονική στιγμή 20 s. Κατά τη διάρκεια της διαταραχής οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών επιταχύνονται και ορισμένες από αυτές αποσυνδέονται τελικά από το δίκτυο τη στιγμή που ξεπεράσουν το όριο ασφαλείας των 52.5 Hz (βλέπε γράφημα 8.1). Εν συνεχεία, οι αυξημένες απαιτήσεις ισχύος για τις μονάδες ΑΗΚ του δικτύου οδηγούν τελικά σε μείωση της συχνότητας του (γραφήματα 8.4 και 8.6). Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα πέφτει κάτω από το όριο των 49 Hz με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται και

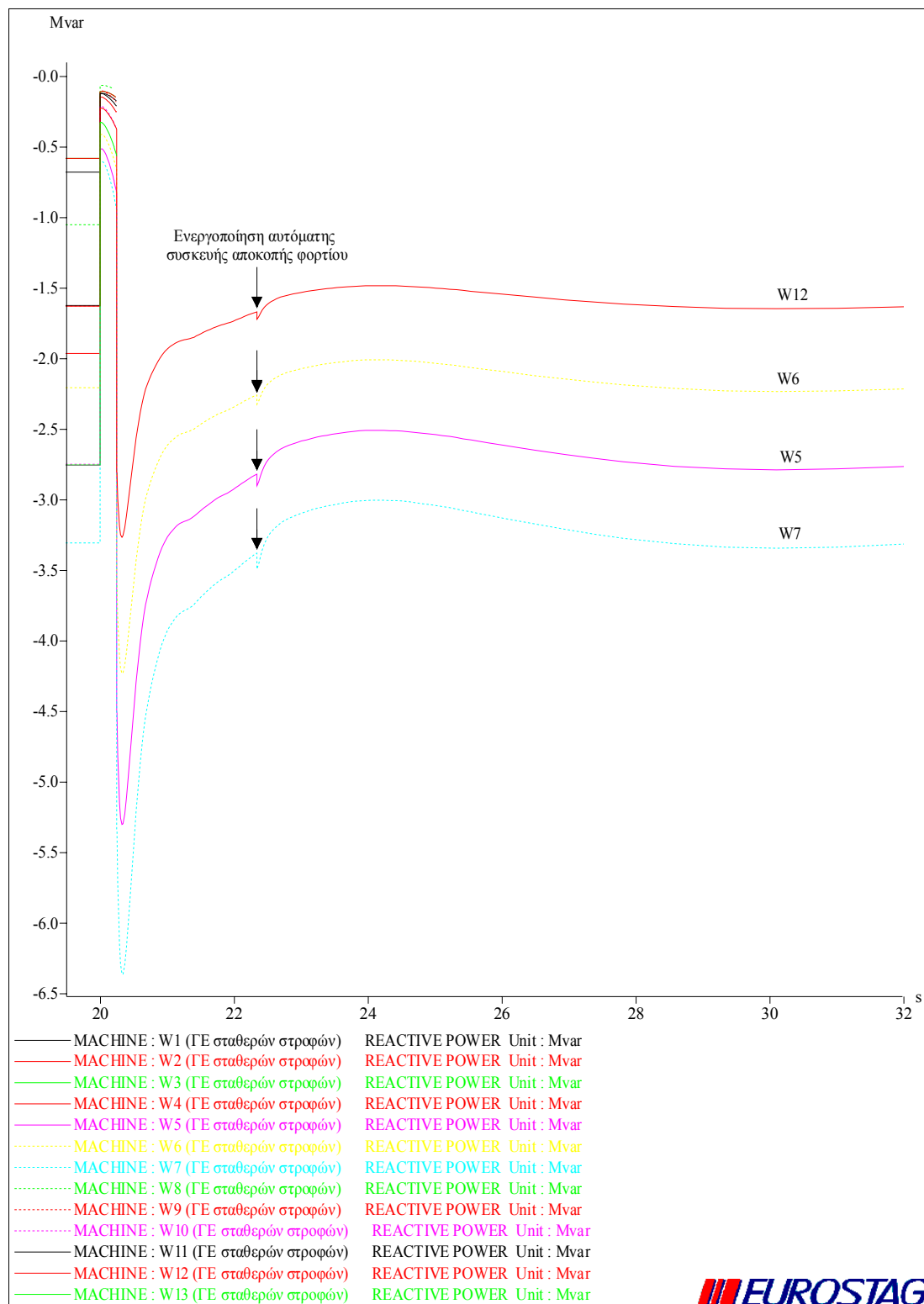
ο αυτόματος διακόπτης απόρριψης φορτίου κατάσταση η οποία είναι εξαιρετικά δυσμενής. Τελικά, η συχνότητα σταθεροποιείται στη τιμή των 49.8 Hz όπως φαίνεται στο γράφημα (8.6). Περιλαμβάνονται επίσης στα γραφήματα (8.5) και (8.7) οι αποκρίσεις της παραγόμενης ενεργού ισχύος των μονάδων ΑΗΚ του δικτύου, στα οποία και επαληθεύονται οι αυξημένες απαιτήσεις ενεργού ισχύος μετά τον καθαρισμό του σφάλματος.



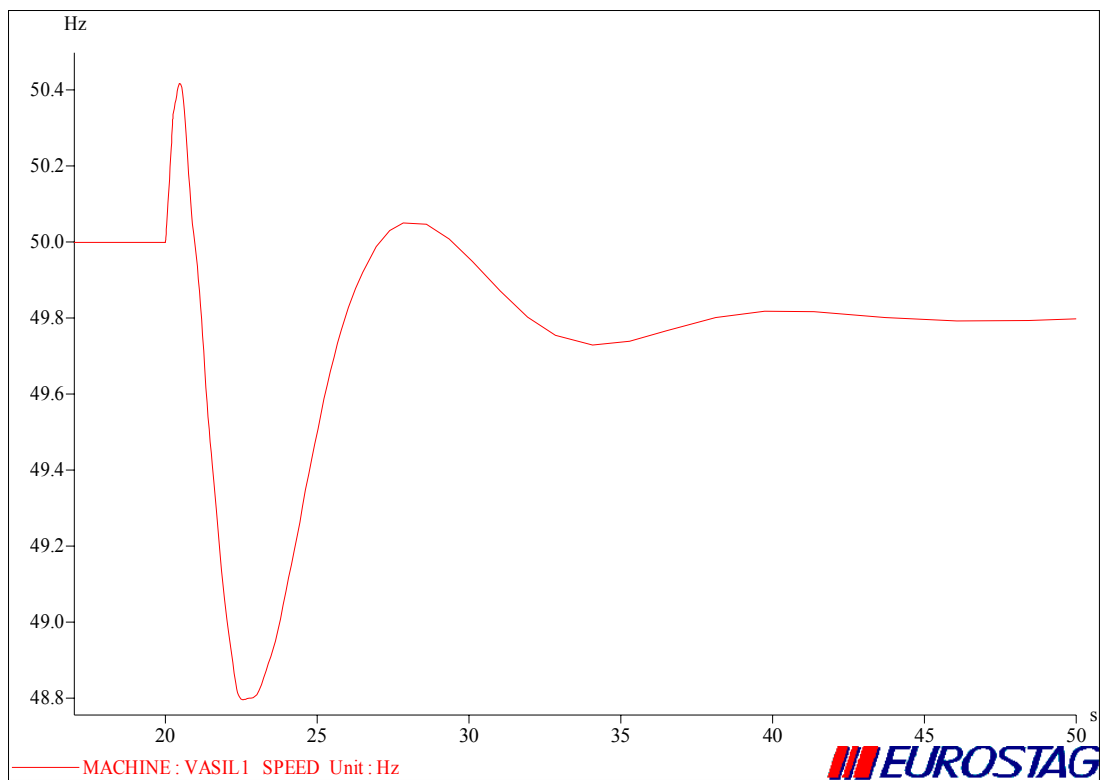
Γράφημα 8.1 Αποκρίσεις ταχύτητας των ασύγχρονων γεννητριών σταθερών στροφών –
μεγέθυνση τη χρονική στιγμή του σφάλματος.



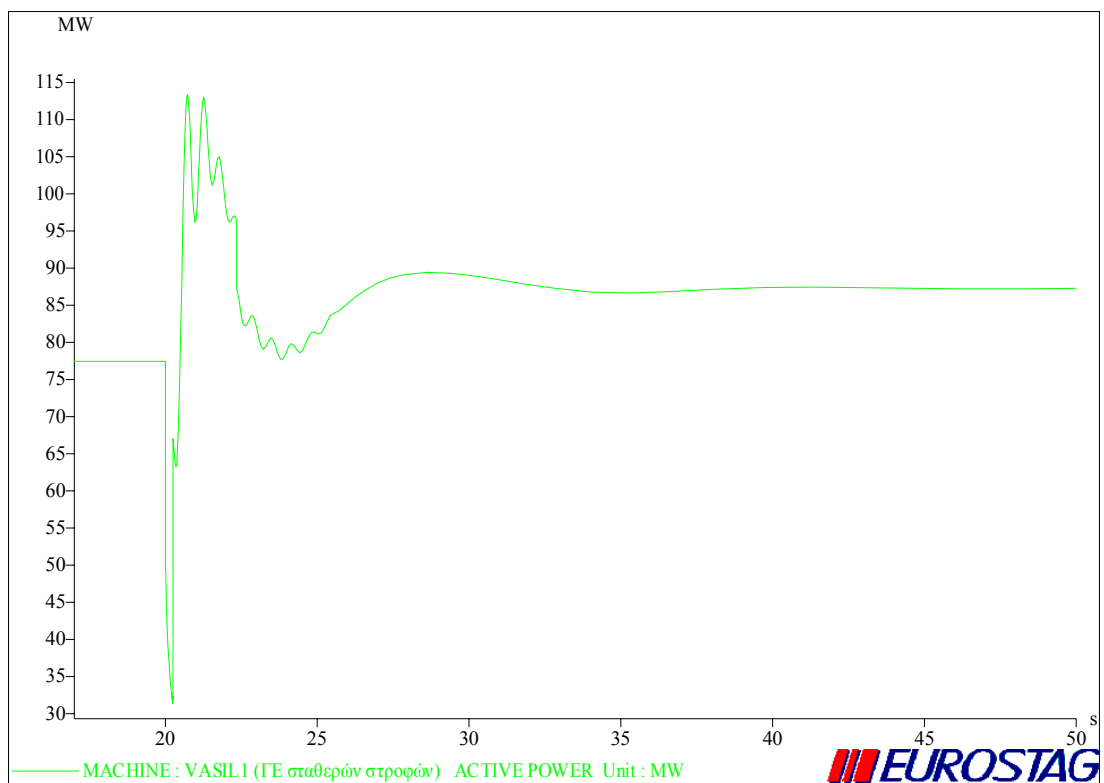
Γράφημα 8.2 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των ασύγχρονων γεννητριών σταθερών στροφών – σημειώνεται η χρονική στιγμή ενεργοποίησης του αυτόματου διακόπτη αποκοπής φορτίου.



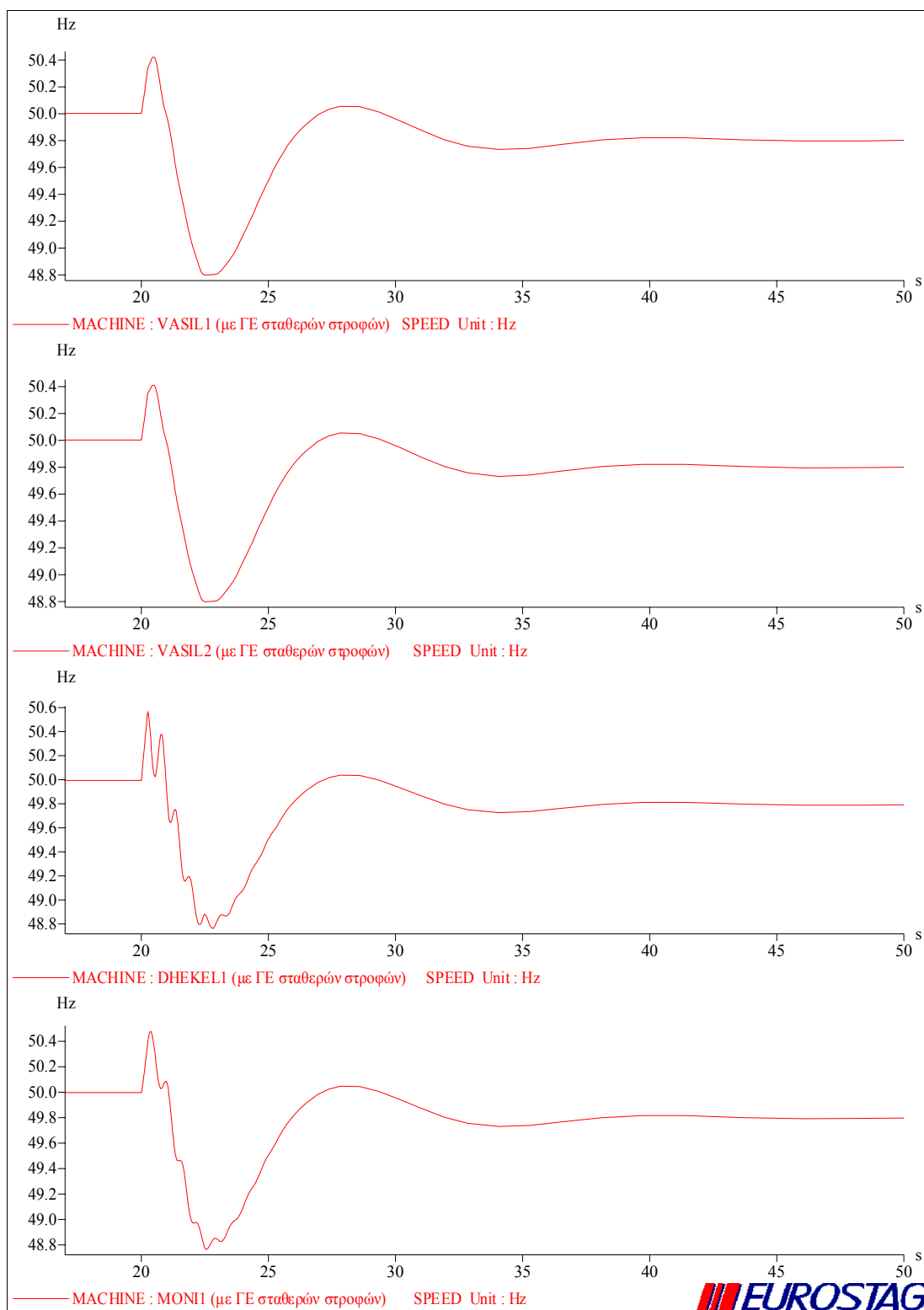
Γράφημα 8.3 Αποκρίσεις της άεργου ισχύος των ασύγχρονων γεννητριών σταθερών στράφων – σημειώνεται η χρονική στιγμή ενεργοποίησης του αυτόματου διακόπτη αποκοπής φορτίου.



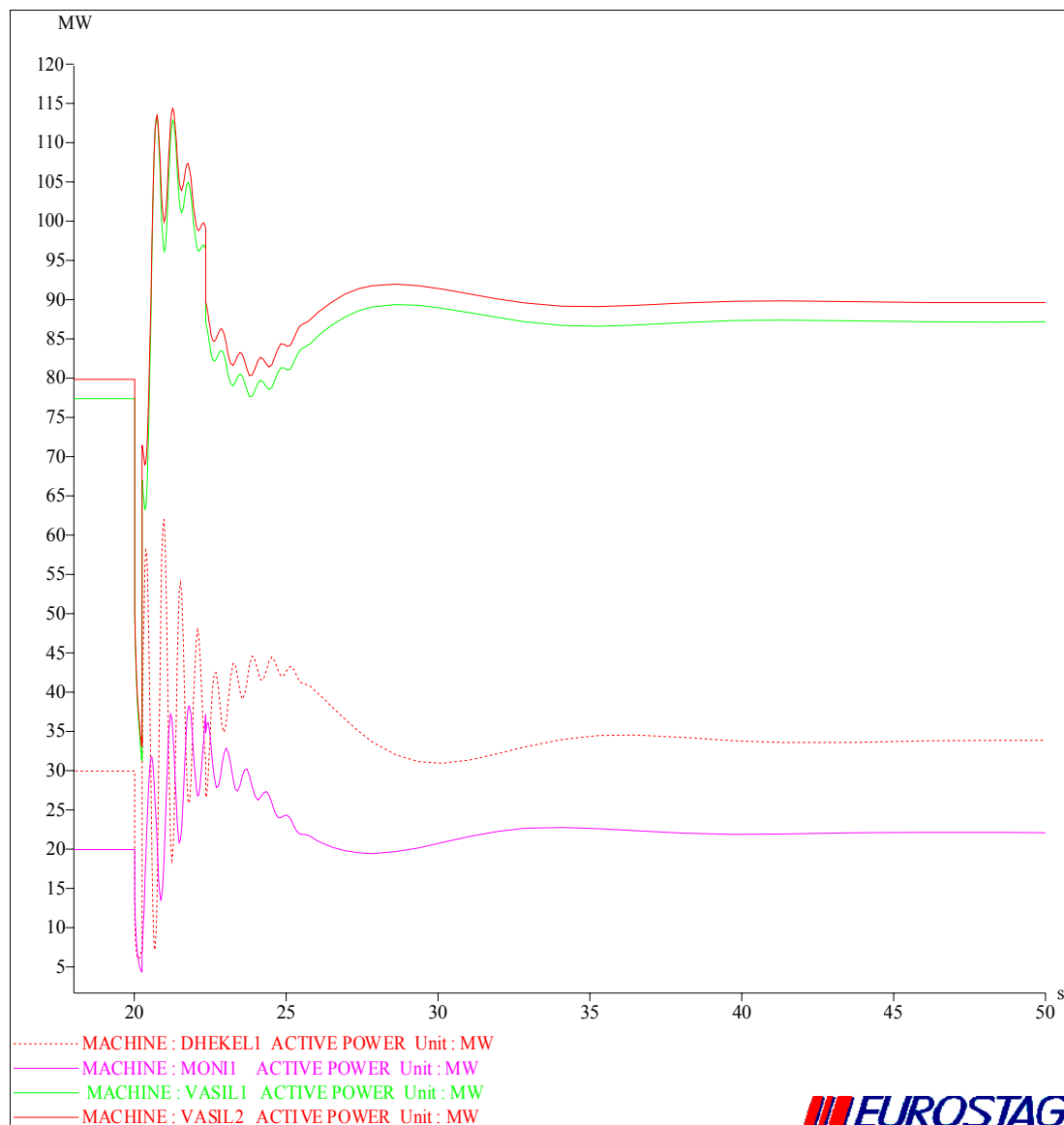
Γράφημα 8.4 Απόκριση της ταχύτητας της μονάδας του Βασιλικού Ι.



Γράφημα 8.5 Απόκριση της ενεργού ισχύος της μονάδας του Βασιλικού Ι.



Γράφημα 8.6 Απόκριση των ταχυτήτων των μονάδων: Βασιλικός Ι, Δεκέλεια Ι και Μονή Ι.

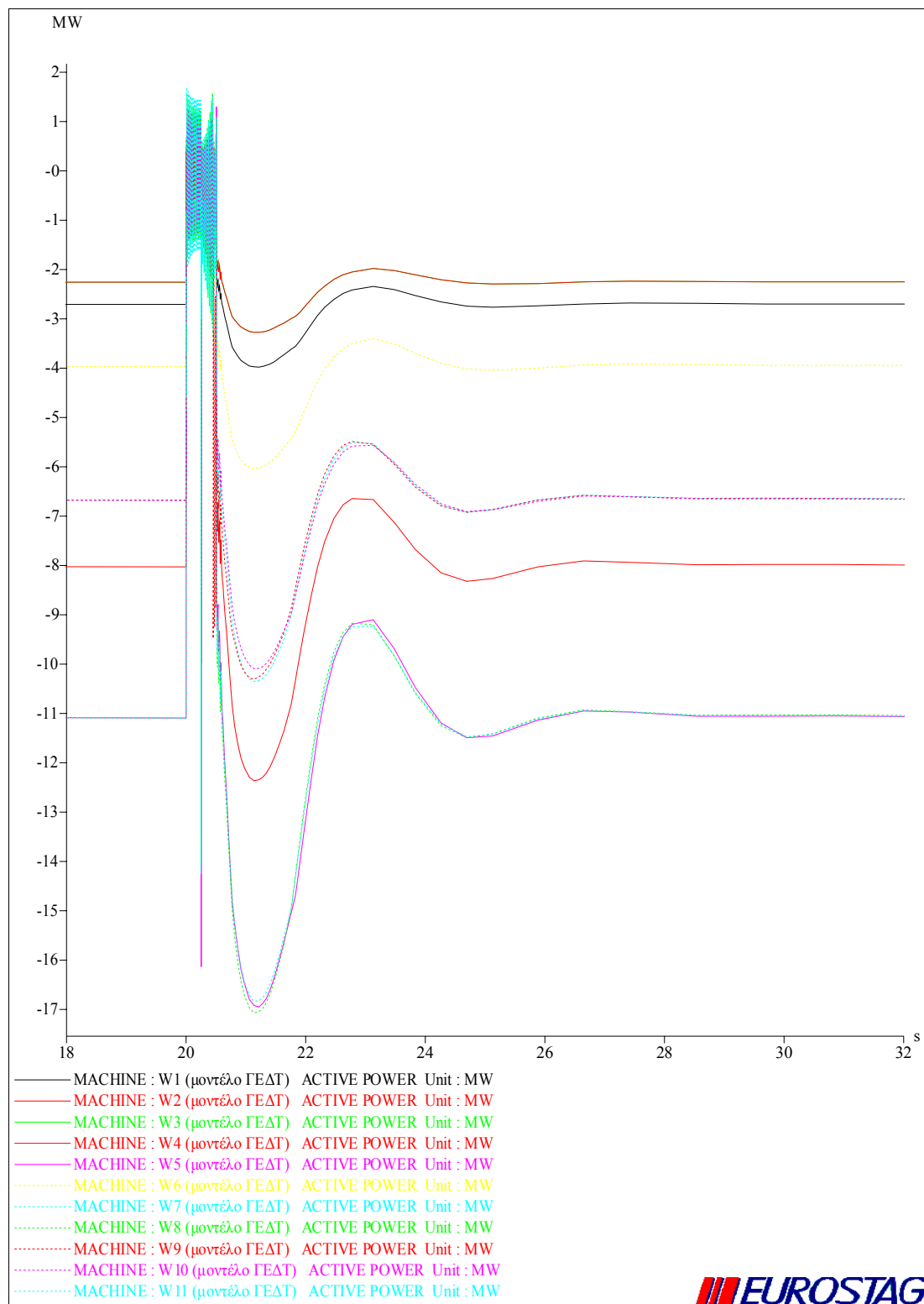


Γράφημα 8.7 Απόκριση της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός 1, Βασιλικός 2, Δεκέλεια 1 και Μονή 1.

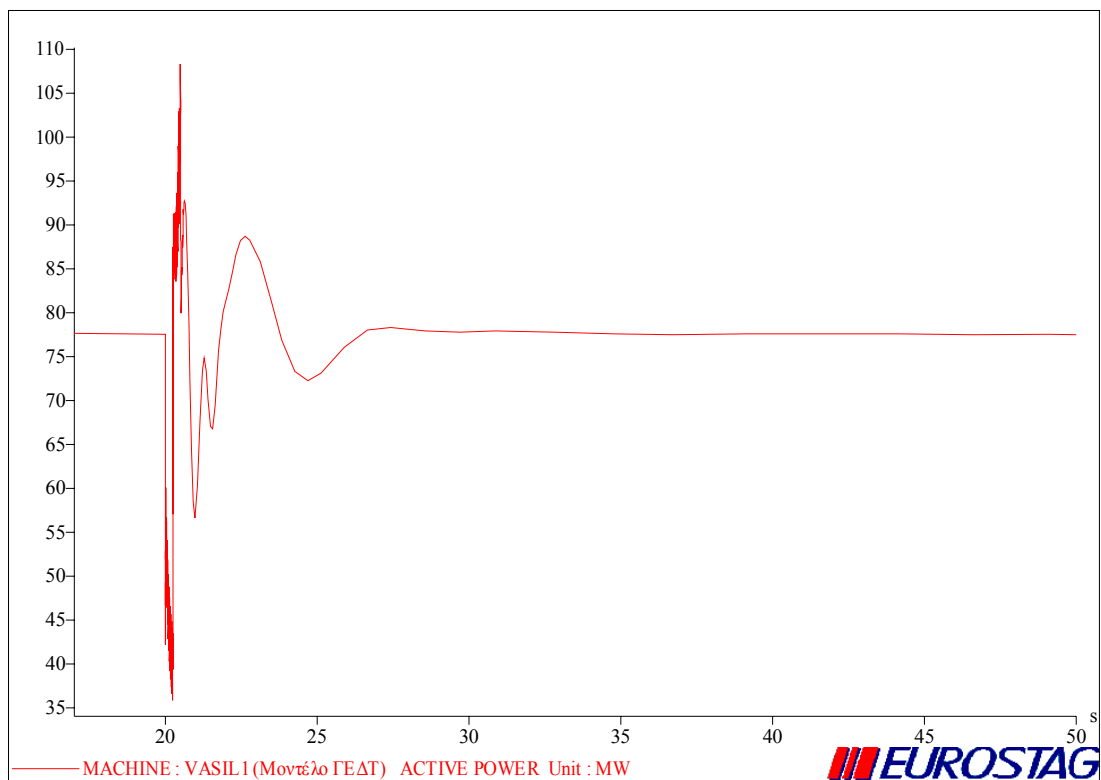
Στη συνέχεια, περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ίδιου σεναρίου (σενάριο Α και διαταραχή) στη περίπτωση που οι ανεμογεννήτριες παριστάνονται από το μοντέλο που αναπτύχθηκε στη παρούσα εργασία. Η επιτάχυνση των γεννητριών επαγωγής διπλής τροφοδότησης περιορίζεται από τον ελεγκτή γωνίας βήματος και δεν οδηγεί σε αποσύνδεση τους από το δίκτυο. Επίσης, η ενεργοποίηση του συστήματος προστασίας (Active Crowbar) περιορίζει το ρεύμα του δρομέα και μειώνει την ενεργό ισχύ των ανεμογεννητριών (γράφημα 8.8) κατά τη διάρκεια του σφάλματος, πράγμα το οποίο τις δίνει την δυνατότητα να παραμένουν σε λειτουργία και να είναι σε θέση να παράσχουν την ονομαστική ισχύ τους μετά την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος. Η αντίσταση Crowbar που χρησιμοποιήθηκε

είναι διαφορετική για κάθε γεννήτρια. Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειώσουμε ότι σε ορισμένες ανεμογεννήτριες το Crowbar παραμένει ενεργοποιημένο ακόμη και μετά την εκκαθάριση του σφάλματος με σκοπό τον περιορισμό των μεταβατικών του ρεύματος τα οποία επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τόσο της ίδια την ανεμογεννήτρια όσο και το συνολικό δίκτυο. Ως αποτέλεσμα της παραμονής των ανεμογεννητριών σε λειτουργία κατά τη διάρκεια της διαταραχής, η απόκριση της συχνότητας του δικτύου είναι πολύ καλύτερη (γραφήματα 8.10 και 8.12) και επομένως δεν ενεργοποιείται ο αυτόματος διακόπτης απόρριψης φορτίου.

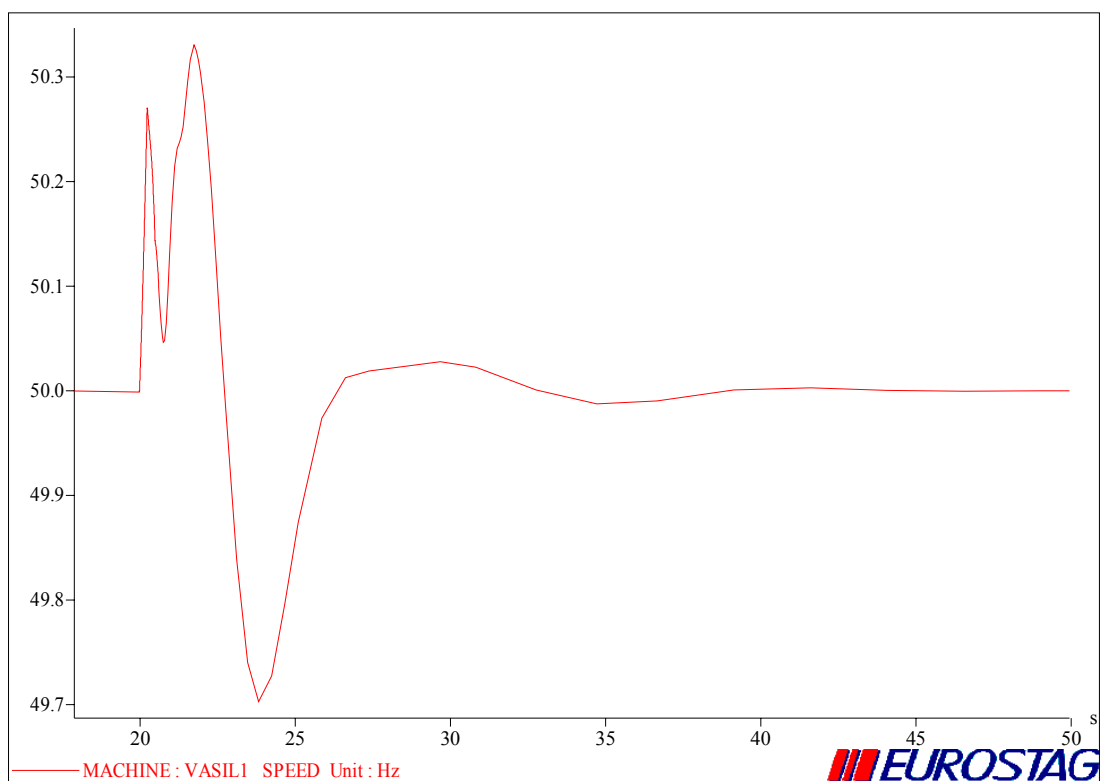
Μια σύγκριση των αποκρίσεων ενεργού ισχύος και συχνότητας των μονάδων ΑΗΚ για τις δύο περιπτώσεις (ασύγχρονη γεννήτρια σταθερών στροφών και μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης) παρουσιάζεται στα γραφήματα (8.13) – (8.16). Η σύγκριση αυτή, επαληθεύει τα συμπεράσματα μας για την πολύ καλύτερη απόκριση στη δεύτερη περίπτωση.



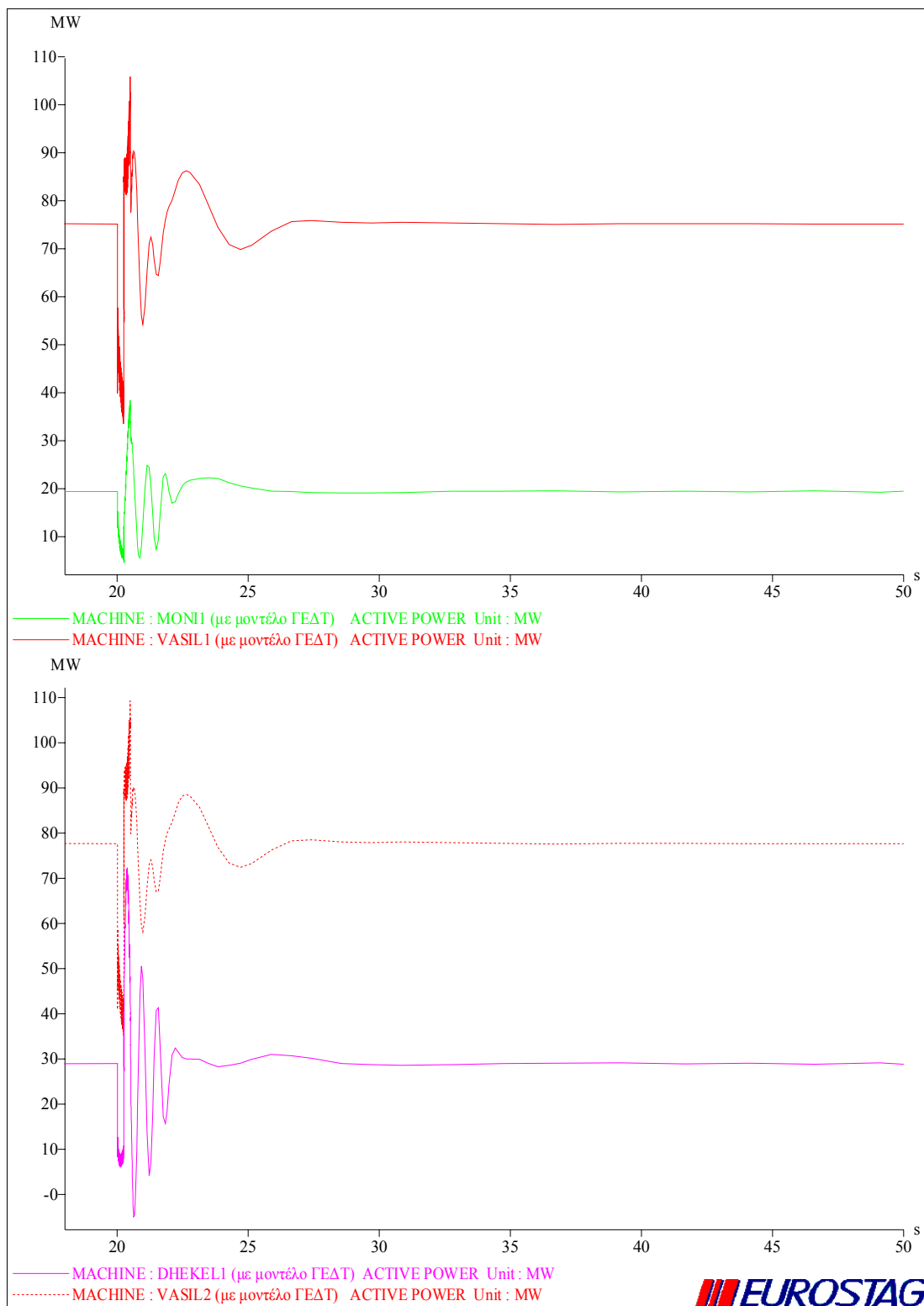
Γράφημα 8.8 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ.



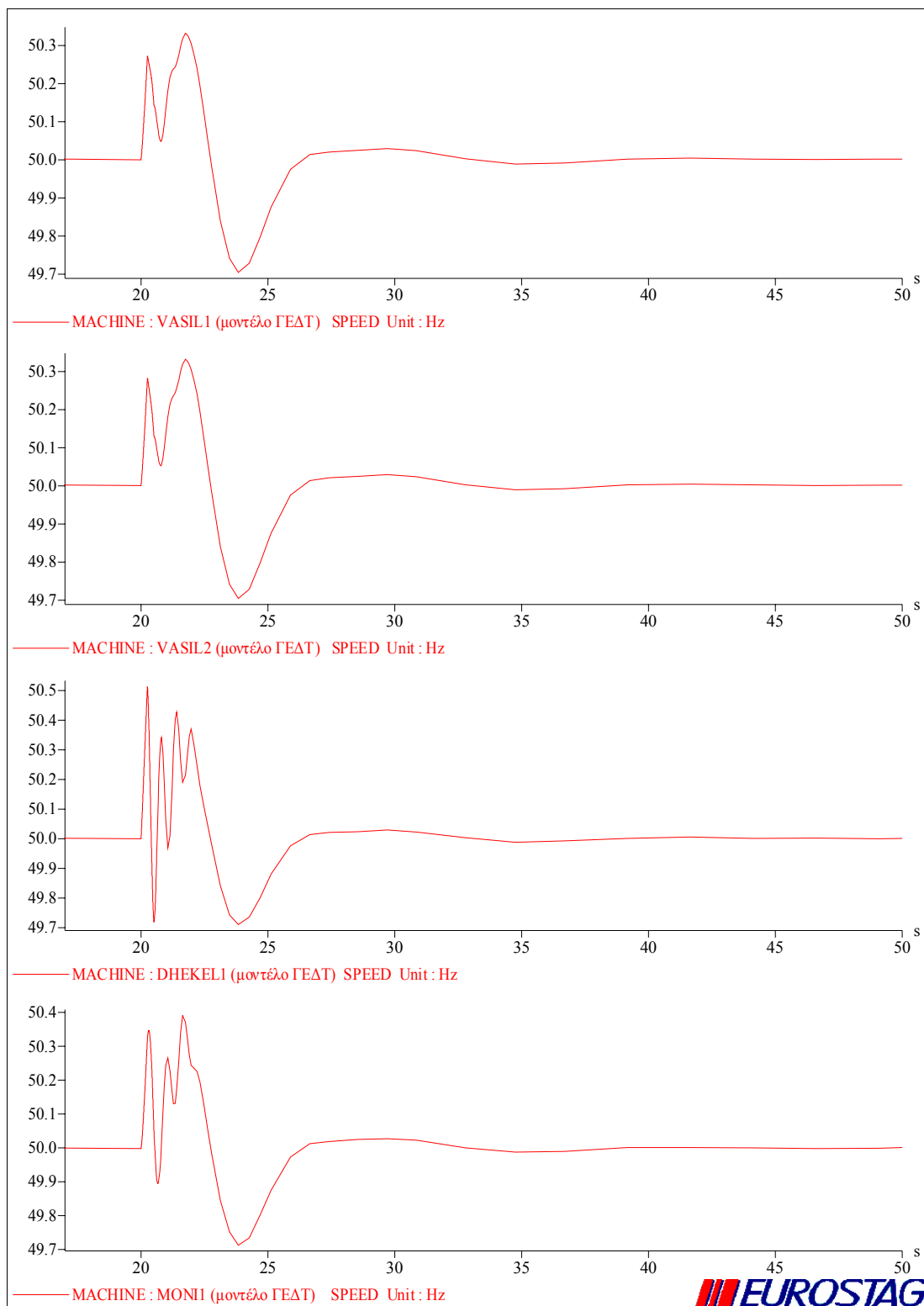
Γράφημα 8.9 Απόκριση της ενεργού ισχύος της μονάδας του Βασιλικού 1.



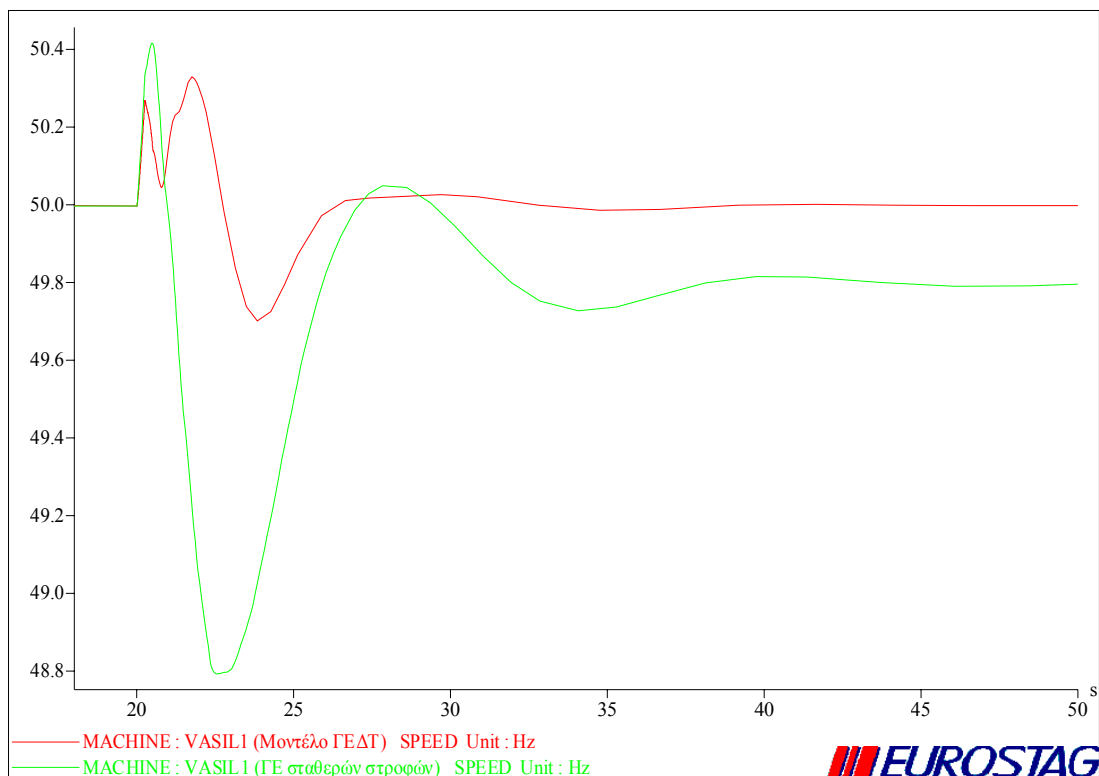
Γράφημα 8.10 Απόκριση της ταχύτητας της μονάδας του Βασιλικού 1.



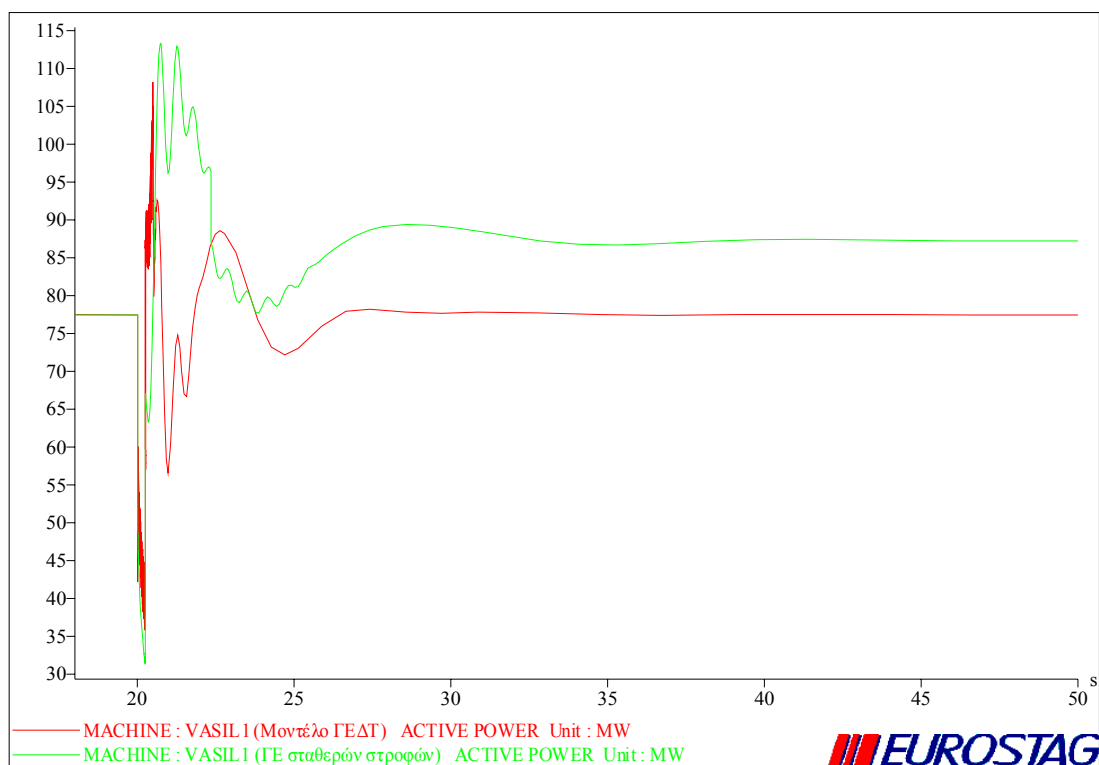
Γράφημα 8.11 Απόκριση της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός 1, Βασιλικός 2, Δεκέλεια 1 και Μονή 1.



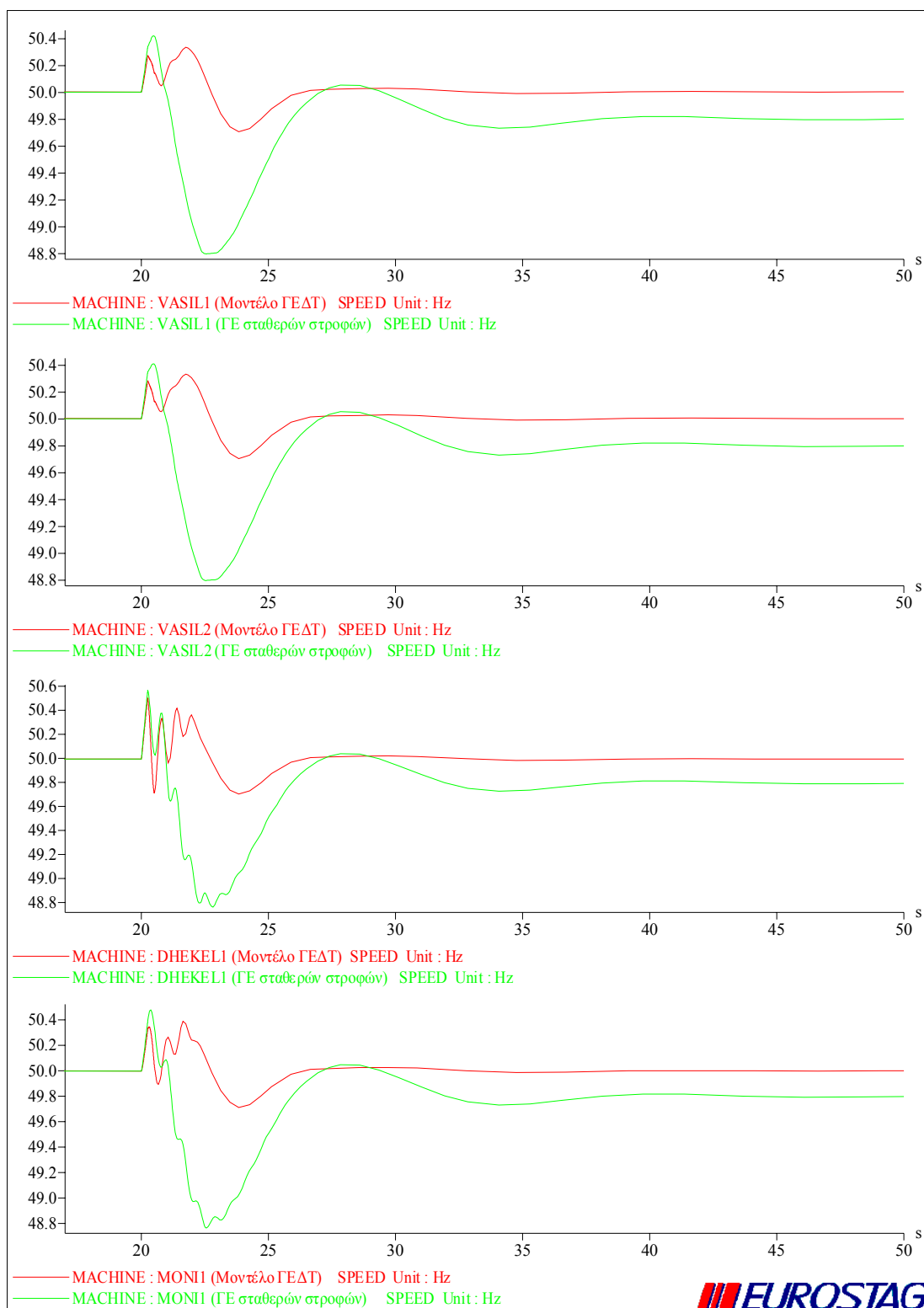
Γράφημα 8.12 Απόκριση των ταχυτήτων των μονάδων: Βασιλικός 1, Δεκέλεια 1 και Μονή 1.



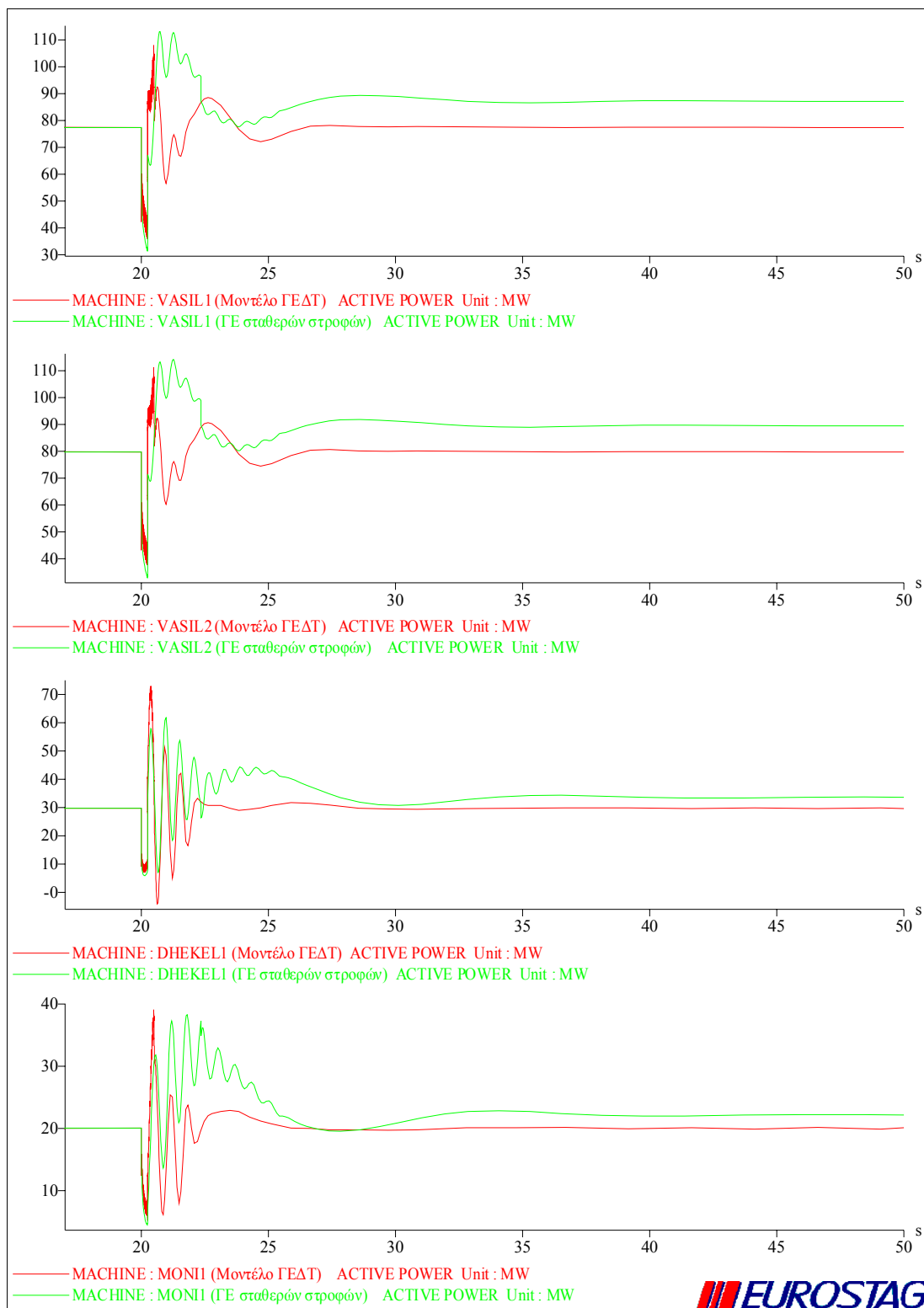
Γράφημα 8.13 Απόκριση της ταχύτητας της μονάδας του Βασιλικού 1 – συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



Γράφημα 8.14 Απόκριση της ενεργού ισχύος της μονάδας του Βασιλικού 1 – συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



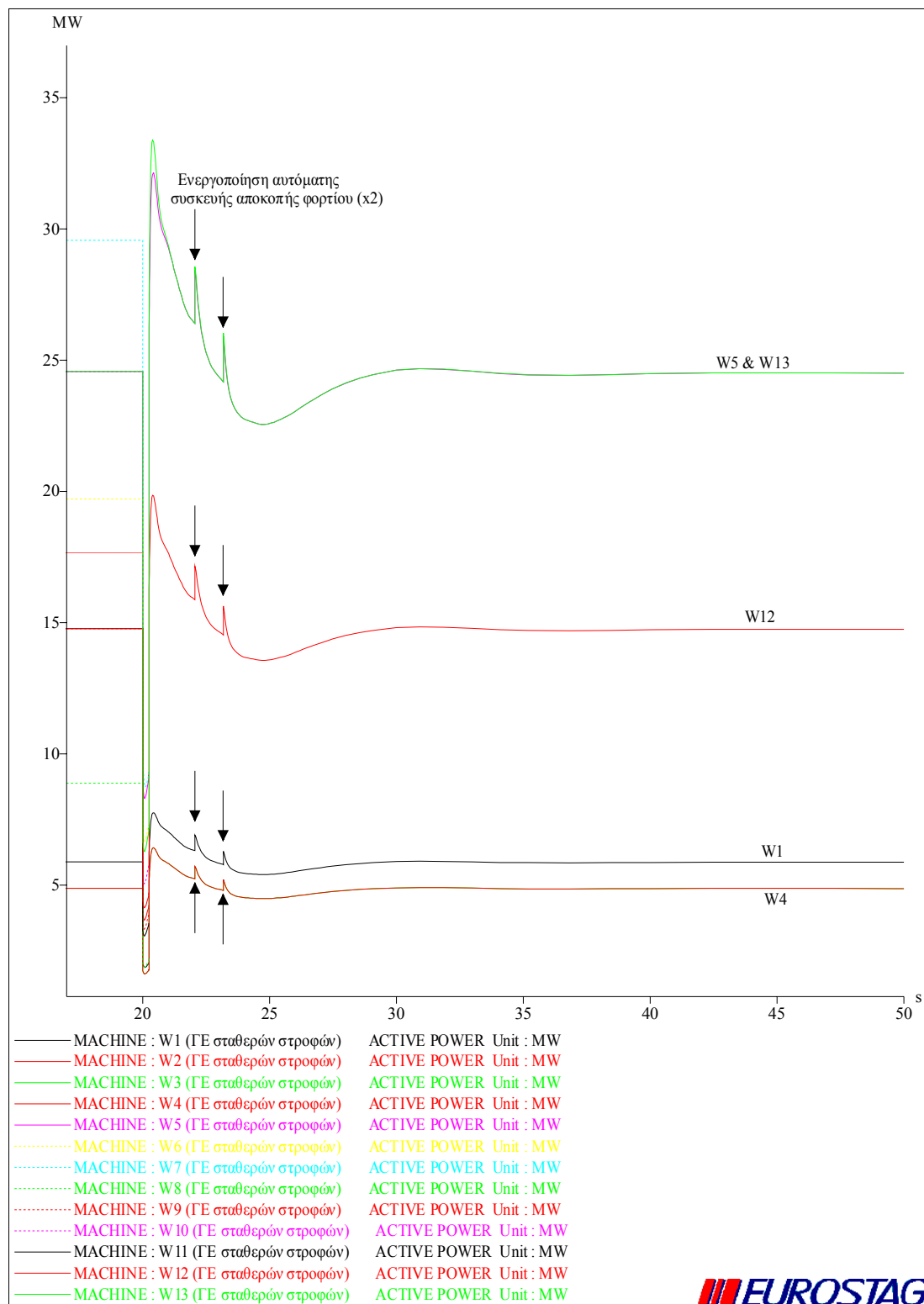
Γράφημα 8.15 Απόκριση των ταχυτήτων των μονάδων: Βασιλικός 1, Δεκέλεια 1 και Μονή 1 - συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΑΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



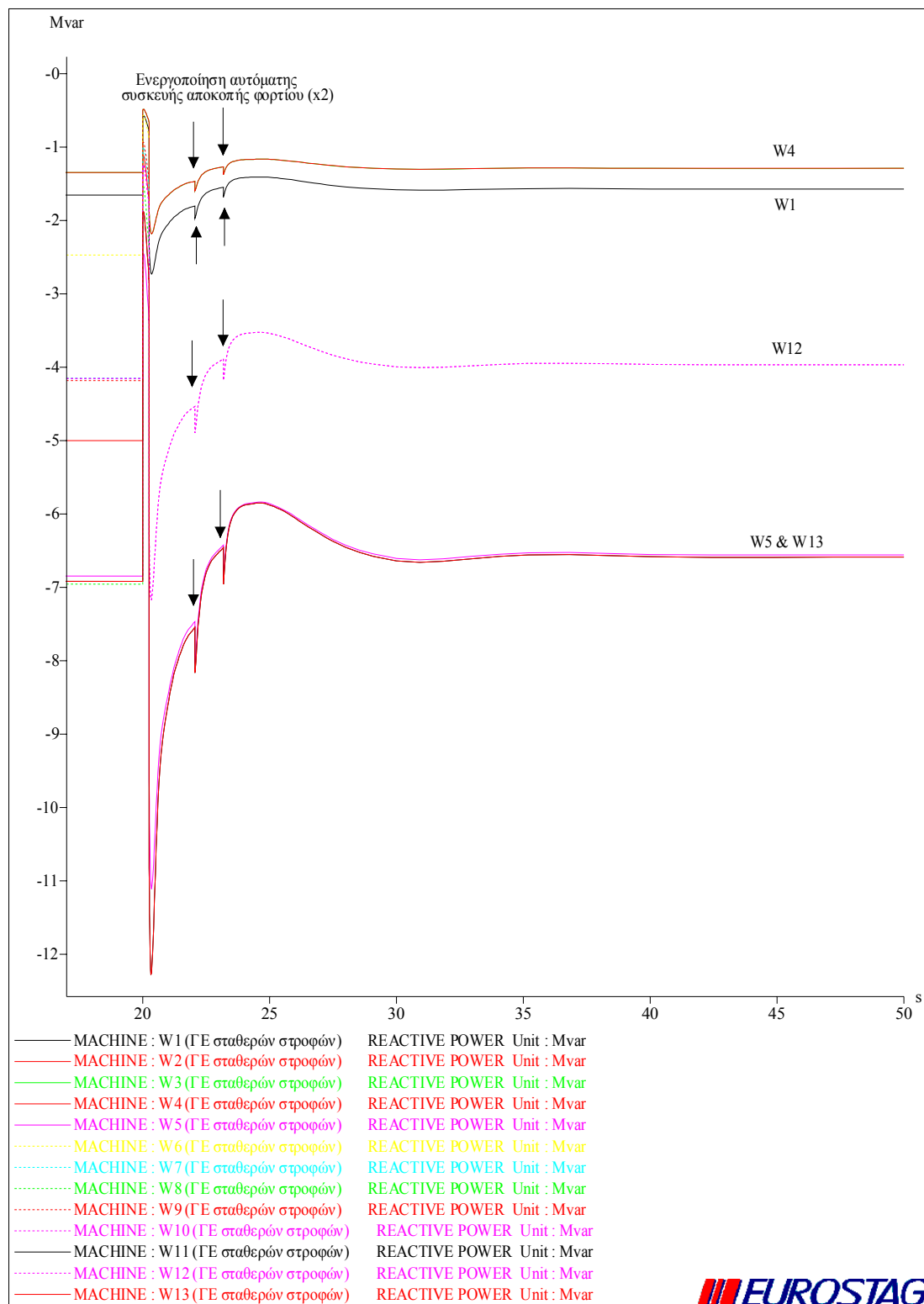
Γράφημα 8.16 Απόκριση της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός 1, Δεκέλεια 1 και Μονή 1 - συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).

8.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου Β (υψηλή φόρτιση – υψηλή διείσδυση)

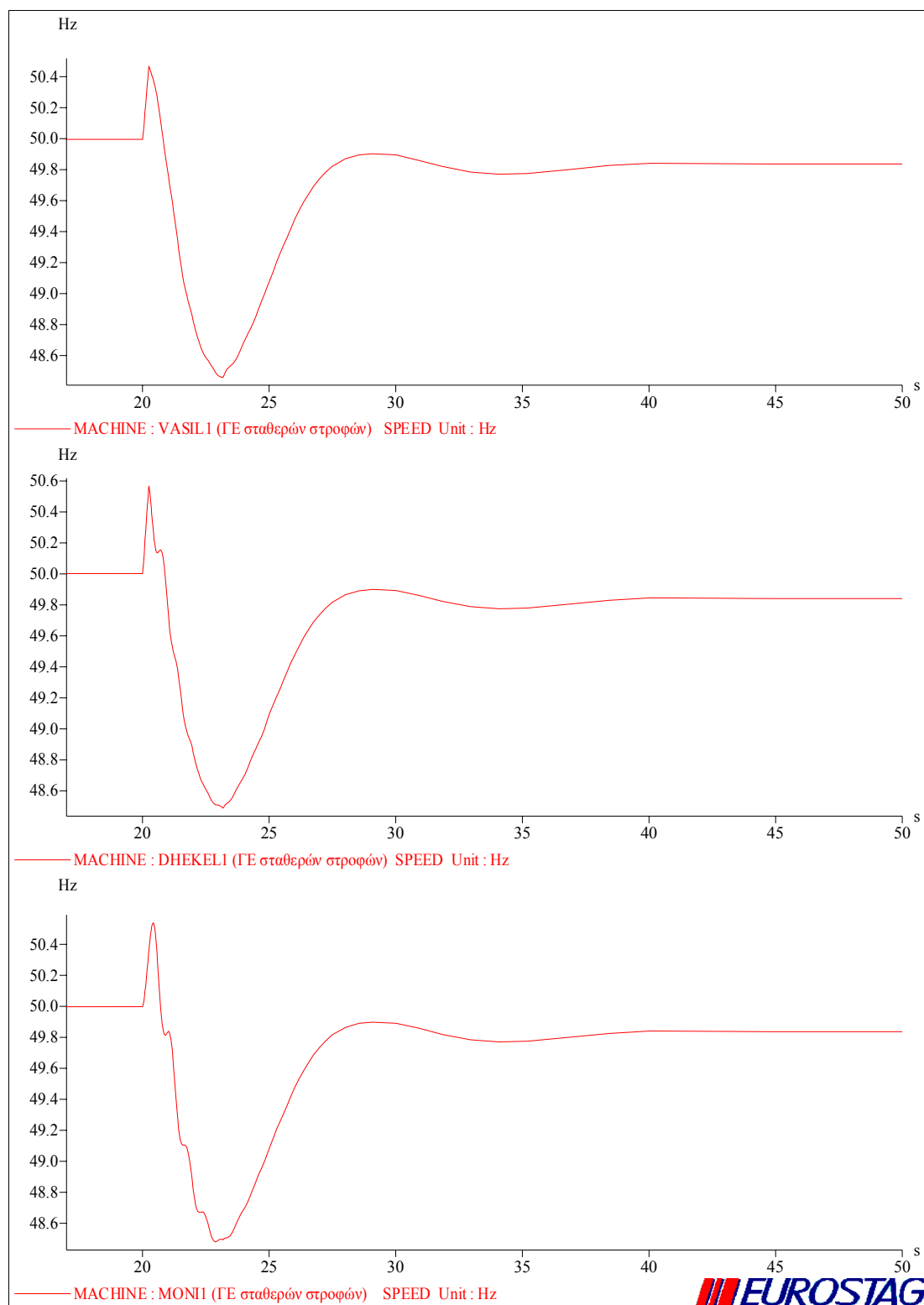
Τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα παρουσιάζονται για το σενάριο Β στα παρακάτω γραφήματα (8.17) – (8.27). Με προσεκτική μελέτη των παρακάτω, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι η κατάσταση η οποία δημιουργείται σε αυτή τη περίπτωση είναι δυσμενέστερη. Ο συνολικός αριθμός των γεννητριών σταθερών στροφών που αποσυνδέονται μπορεί να είναι μειωμένος κατά 1, αλλά η υψηλή φόρτιση του δικτύου σε συνδυασμό με το ίδιο ποσοστό αιολικής διείσδυσης οδηγούν σε μεγαλύτερη μείωση της συχνότητας του δικτύου (γράφημα 8.19). Ως αποτέλεσμα, ο διακόπτης απόρριψης φορτίου ενεργοποιείται δύο φορές αντί για μία (σενάριο Α). Τέλος, να αναφέρουμε επίσης ότι και σε αυτό το σενάριο (Β) χρησιμοποιήθηκαν ίδιες αντιστάσεις Crowbar με το σενάριο Α για το σύστημα προστασίας των ΓΕΔΤ.



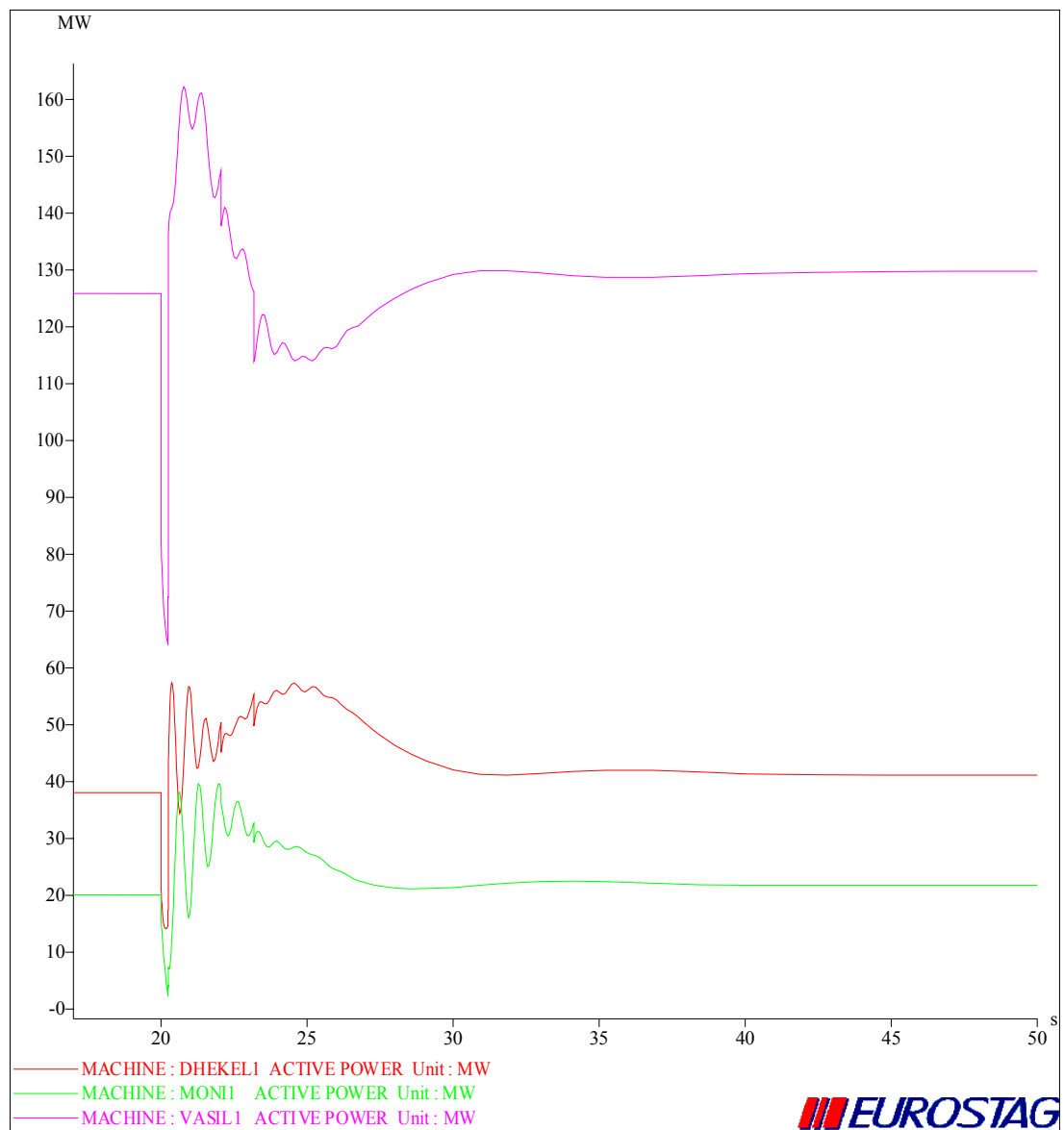
Γράφημα 8.17 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των ασύγχρονων γεννητριών σταθερών στροφών
 – σημειώνονται οι δύο χρονικές στιγμές ενεργοποίησης του αυτόματου διακόπτη αποκοπής φορτίου.



Γράφημα 8.18 Αποκρίσεις της άεργου ισχύος των ασύγχρονων γεννητριών σταθερών στροφών
 – σημειώνονται οι δύο χρονικές στιγμές ενεργοποίησης του αυτόματου διακόπτη απόρριψης φορτίου.

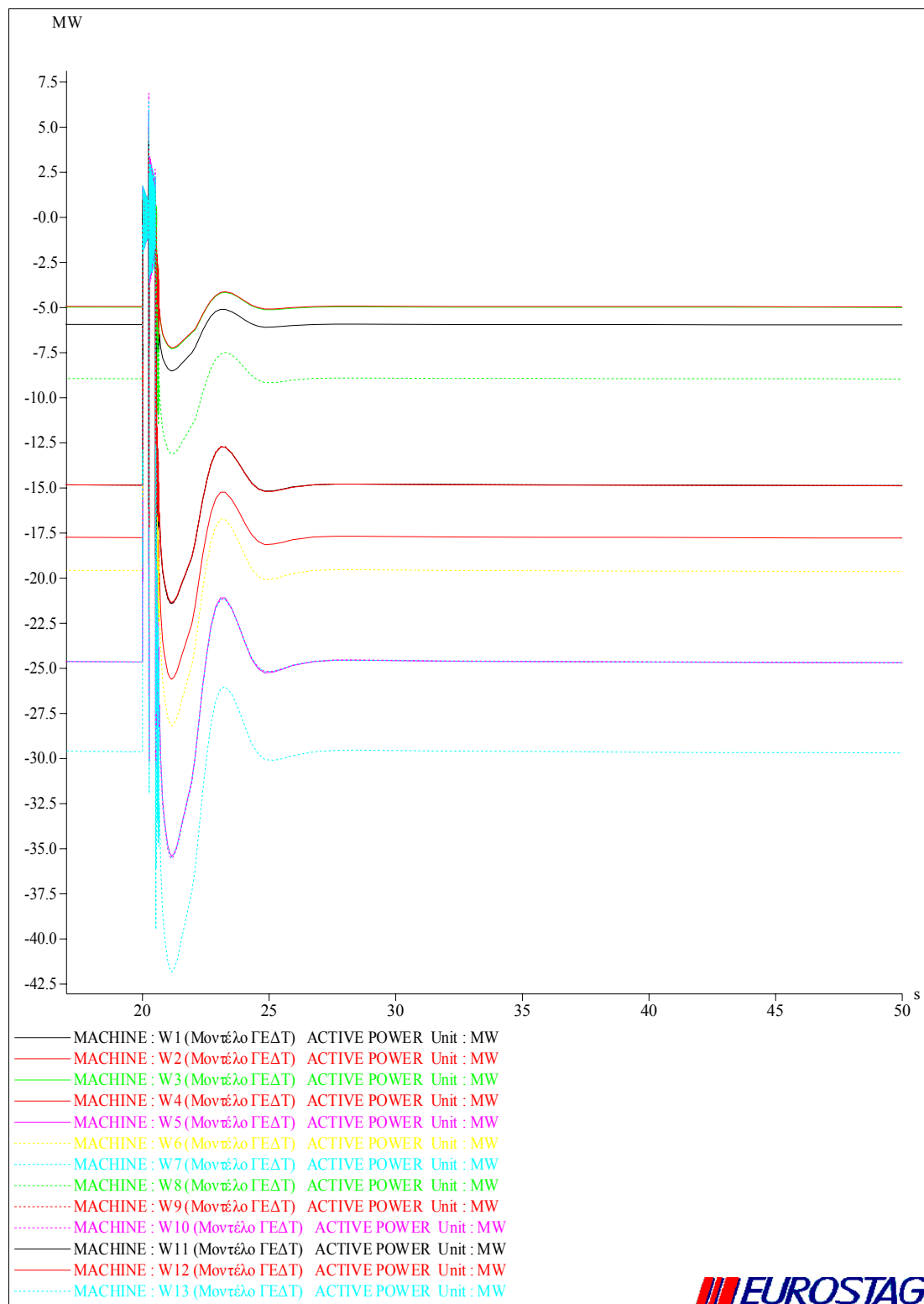


Γράφημα 8.19 Απόκριση της ταχύτητας των μονάδων: Βασιλικός Ι, Δεκέλεια Ι και Μονή Ι.

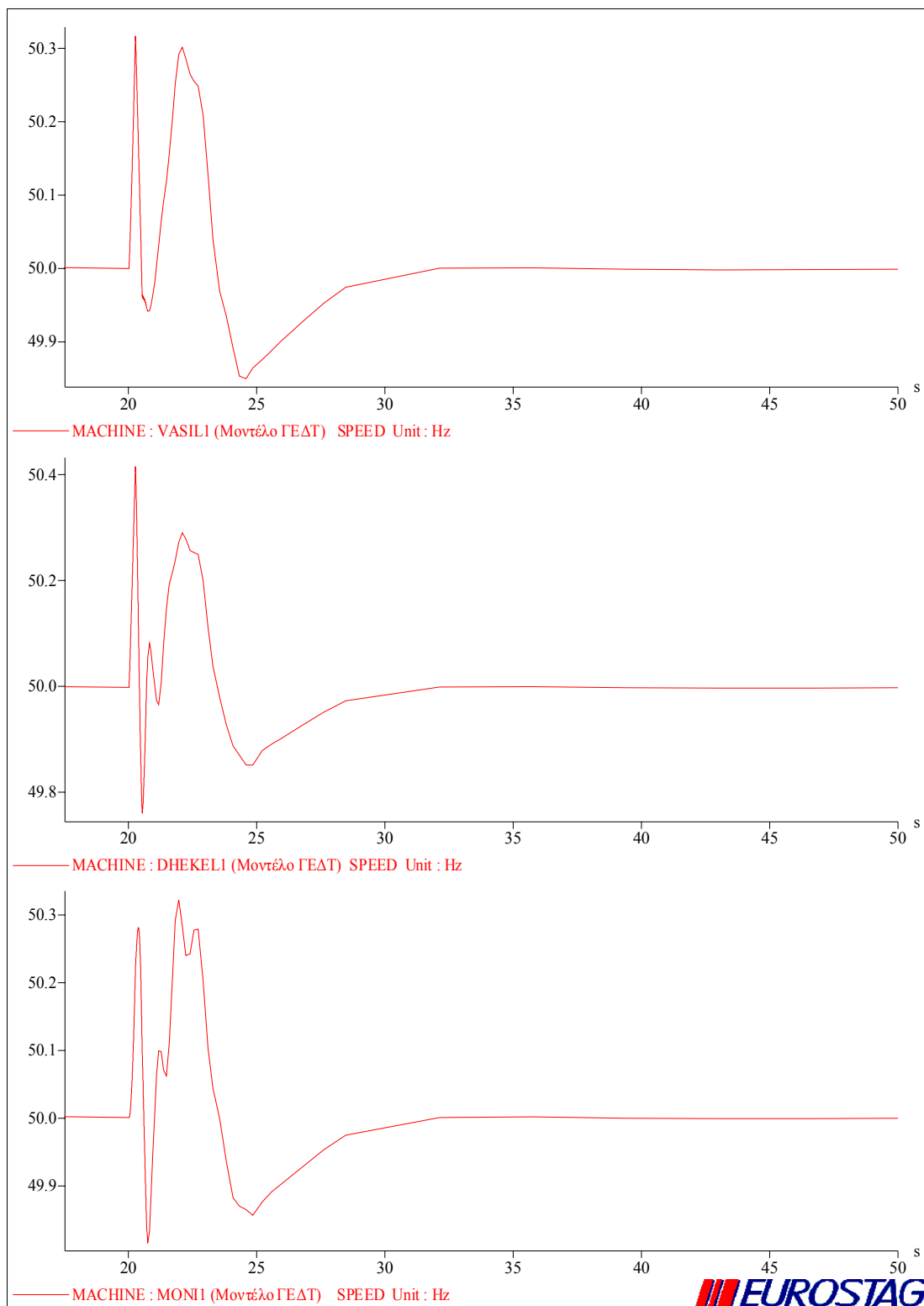


Γράφημα 8.20 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός 1, Δεκέλεια 1 και Μονή

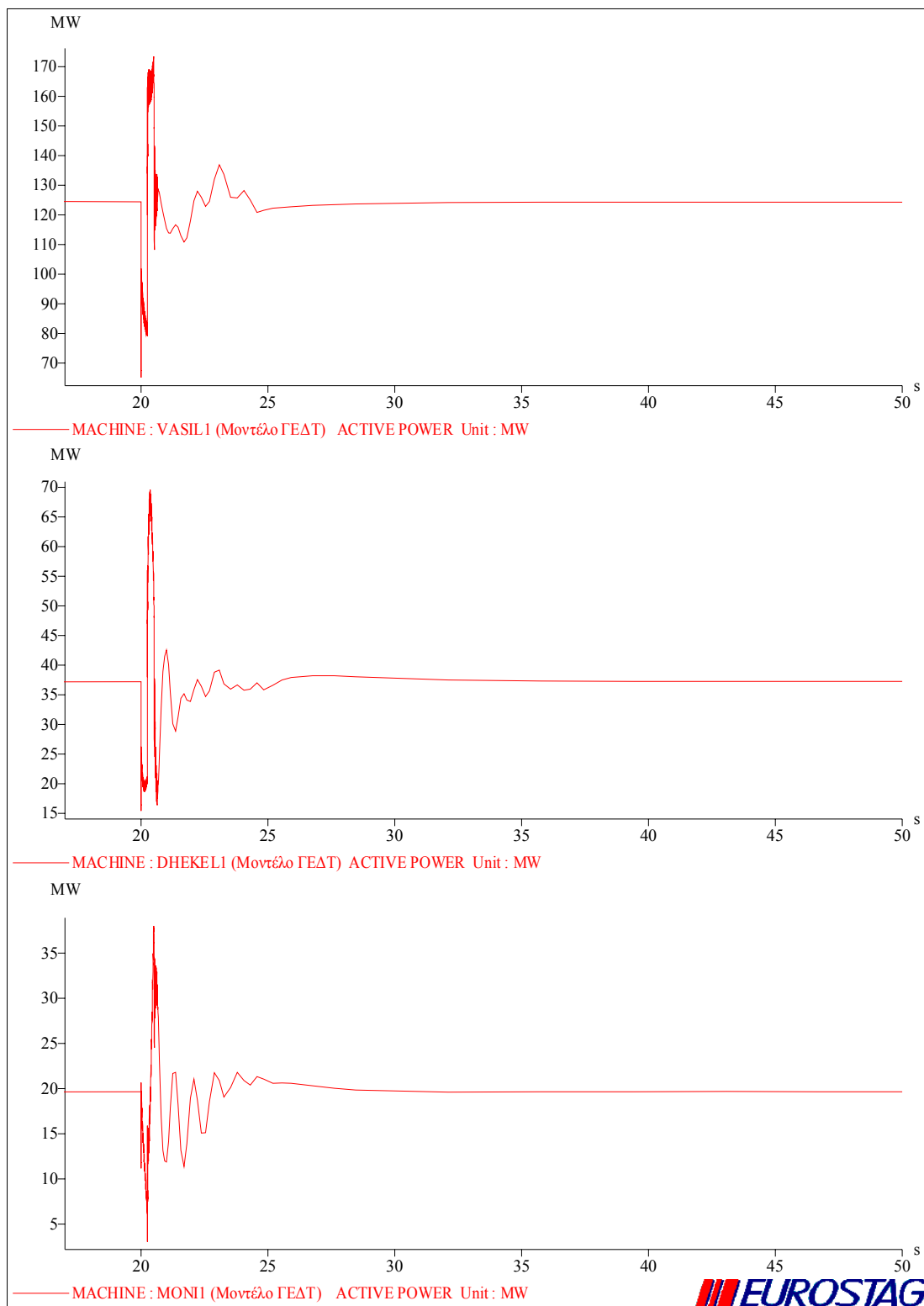
1.



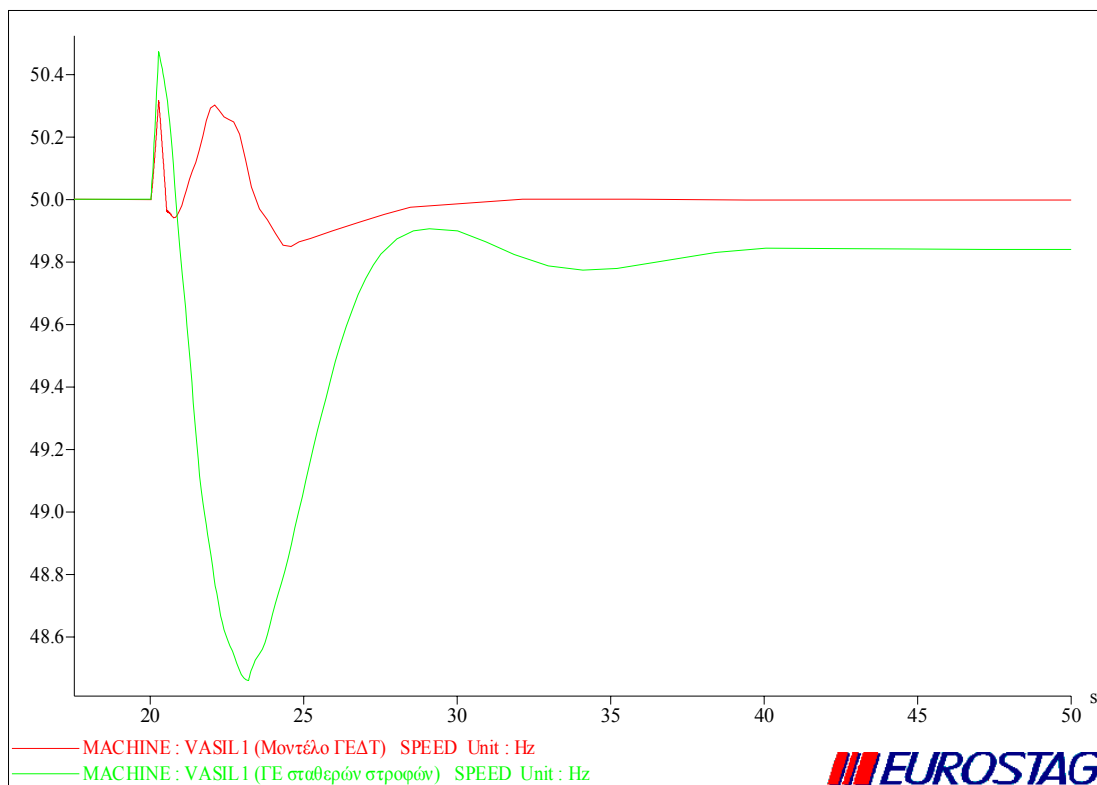
Γράφημα 8.21 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας με ΓΕΔΤ– ο αυτόματος διακόπτης αποκοπής φορτίου δεν ενεργοποιείται.



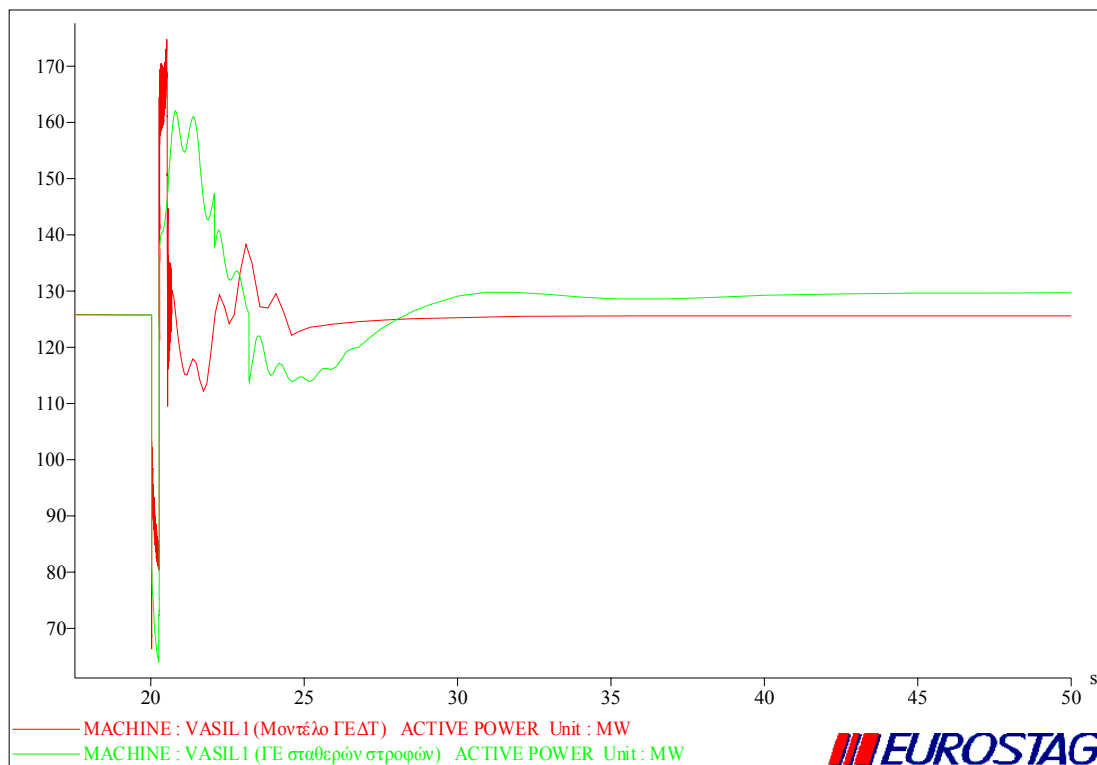
Γράφημα 8.22 Αποκρίσεις της ταχύτητας των μονάδων: Βασιλικός Ι, Δεκέλεια Ι και Μονή Ι.



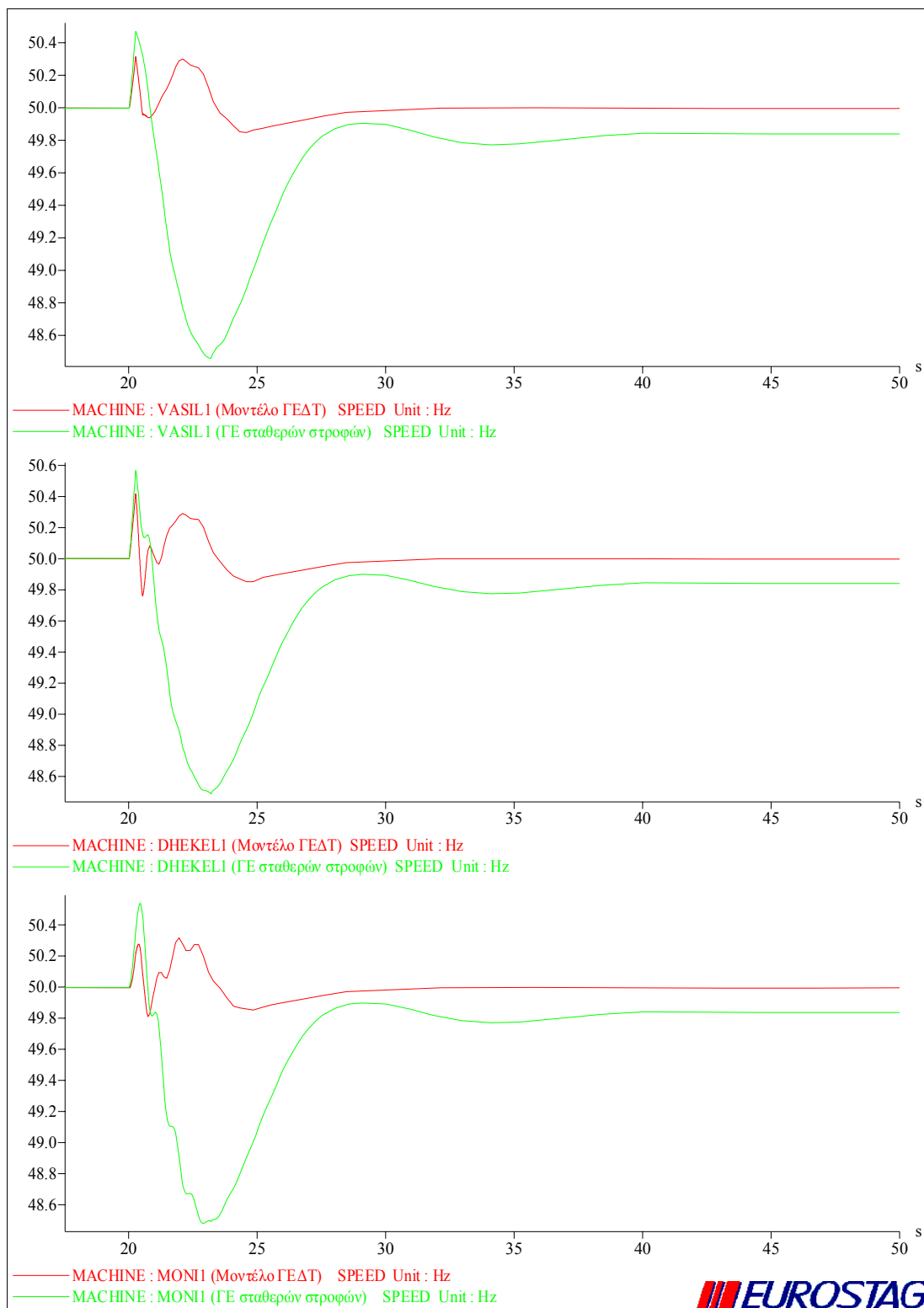
Γράφημα 8.23 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός Ι, Δεκέλεια Ι και Μονή Ι.



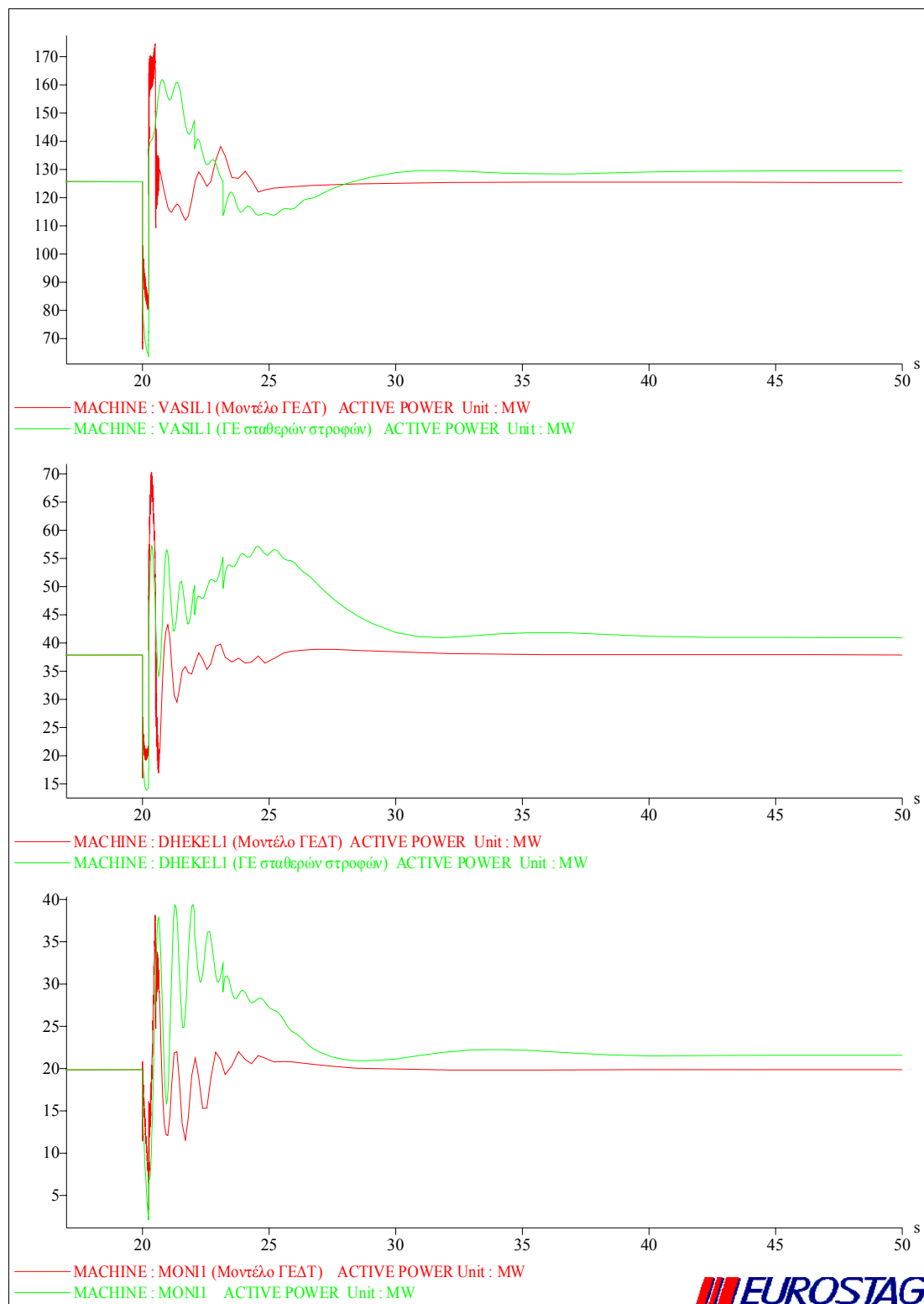
Γράφημα 8.24 Απόκριση της ταχύτητας της μονάδας του Βασιλικού 1 – συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



Γράφημα 8.25 Απόκριση της ενεργού ισχύος της μονάδας του Βασιλικού 1 – συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



Γράφημα 8.26 Αποκρίσεις της ταχύτητας των μονάδων: Βασιλικός 1, Δεκέλεια 1 και Μονή 1 - συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΑΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).



Γράφημα 8.27 Αποκρίσεις της ενεργού ισχύος των μονάδων: Βασιλικός Ι, Δεκέλεια Ι και Μονή Ι - συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μοντέλου της ΓΕΔΤ (κόκκινη καμπύλη) και του μοντέλου της ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών (πράσινη καμπύλη).

9 Γενικά Σχόλια και Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική προσομοιώθηκε και μελετήθηκε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης, με κιβώτιο ταχυτήτων και με ελεγκτή βήματος των πτερυγίων (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως Pitch Control), με τη βοήθεια του λογισμικού EUROSTAG.

Το πρώτο βασικό τμήμα της εργασίας ασχολείται με τη μοντελοποίηση και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας. Το δεύτερο κομμάτι ασχολείται με τη στρατηγική ελέγχου που υλοποιήθηκε ενώ το τρίτο με τις δυνατότητες του συστήματος που μοντελοποιήθηκε για παραμονή σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης και τη επίδραση της σύνδεσης του μοντέλου σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (συγκεκριμένα της Κύπρου στη παρούσα διπλωματική) .

Έγινε ακριβής μαθηματική μοντελοποίηση του μηχανικού και του αεροδυναμικού μέρους της ανεμογεννήτριας και υλοποιήθηκε ο ελεγκτής του βήματος γωνίας των πτερυγίων. Οι παράμετροι του ελεγκτή διαπιστώθηκε ότι επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την απόκριση του αεροδυναμικού μέρους σε μεταβολές του ανέμου. Με κριτήριο την καλύτερη δυνατή απόκριση του ελέγχου της γωνία κλίσης των πτερυγίων επιλέχθηκαν οι παράμετροι με τους οποίους τελικά μοντελοποιήθηκε το σύστημα. Υλοποιήθηκε επίσης και ένας ελεγκτής παραμετροποιημένος με την τεχνική Gain Scheduling τα αποτελέσματα του οποίου συγκρίθηκαν με τον «απλό» ελεγκτή γωνίας βήματος.

Οι εξισώσεις της μηχανής εκφράστηκαν σε dq πλαίσιο με βάση τις γνωστή θεωρία μετασχηματισμών και πλαισίων αναφοράς. Συμπεριλήφθησαν τα μεταβατικά του στάτη στις εξισώσεις της μηχανής δίνοντας το μοντέλο 5ης τάξης της μηχανής, ενώ κατά τις προσομοιώσεις έγιναν και συγκρίσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του απλοποιημένου μοντέλου 3ης τάξης. Υιοθετήθηκε η μέθοδος του διανυσματικού ελέγχου με κατάλληλα πλαίσια αναφοράς για κάθε έναν από τους δύο μετατροπείς που συνδέονται στο δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Υλοποιήθηκε μια συγκεκριμένη στρατηγική ελέγχου της ταχύτητας του δρομέα. Η βασική στρατηγική ελέγχου σχεδιάζεται με σκοπό να επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση

της αεροδυναμικής απόδοσης. Ο έλεγχος αλληλεπιδρά με την λειτουργία των μετατροπέων ισχύος και τον ελεγκτή γωνίας βήματος. Η εφαρμοζόμενη στρατηγική ελέγχου επαληθεύτηκε βάση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα με βάση τη χαρακτηριστική έλεγχου ταχύτητας, η οποία προκύπτει με κριτήρια βελτιστοποίησης της παραγόμενης ισχύος για κάθε ταχύτητα ανέμου μικρότερης της ονομαστικής και την πραγματική τιμή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα προκύπτει η τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική ροπή που αναπτύσσεται. Αυτή με τη σειρά της δίνει την τιμή αναφοράς για τη μία από τις δύο συνιστώσες του ρεύματος του δρομέα (i_{qr}). Η άεργος ισχύς, από την άλλη πλευρά, που εισέρχεται στο στάτη της μηχανής εξαρτάται από την άλλη συνιστώσα του ρεύματος του δρομέα (i_{dr}). Η τιμή αναφοράς της άεργου ισχύος προκύπτει από τον τρόπο έλεγχου του μετατροπέα στην πλευρά του δικτύου (έλεγχος τερματικής τάσης ή έλεγχος συντελεστή ισχύος). Άρα η γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης είναι σε θέση να μεταβάλλει την άεργο ισχύ που ανταλλάσσει με το δίκτυο και άρα να συμβάλλει στον έλεγχο της τερματικής τάσης. Οι δοκιμές που έγιναν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε έγιναν με τον ελεγκτή άεργου ισχύος σε κατάσταση σταθερού συντελεστή ισχύος (μοναδιαίος).

Με κατάλληλη επιλογή του πλαισίου αναφοράς για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου εξασφαλίζεται ότι η άεργος που ανταλλάσσεται ανάμεσα στο μετατροπέα και το δίκτυο είναι μηδενική. Βασική λειτουργία του μετατροπέα αυτού είναι η διατήρηση της συνεχούς τάσης σε σταθερή τιμή. Οι τιμές των παραμέτρων του ελεγκτή της συνεχούς τάσης καθορίζουν την ποιότητα της απόκρισης του ελεγκτή αυτού. Με βάση τα αποτελέσματα προσομοιώσεων και κριτήριο τις μικρότερες δυνατές διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων αυτών.

Το τρίτο τμήμα της παρούσας διπλωματικής επιχειρεί να μελετήσει και να προσομοιώσει τις δυνατότητες του συγκεκριμένου ηλεκτρικού σχήματος (γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης) για παραμονή σε λειτουργία σε συνθήκες βύθισης τάσης. Οι απαιτήσεις πλέον στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, στα οποία συνδέονται ανεμογεννήτριες θέτουν ως σημαντικό όριο λειτουργίας οι ανεμογεννήτριες να παραμένουν σε λειτουργία κατά τη διάρκεια διαταραχών στο δίκτυο και να συμμετέχουν έτσι στη διατήρηση της ευστάθειας του συστήματος.

Η βασική στρατηγική ελέγχου διευρύνθηκε με μια επιπλέον επιμέρους στρατηγική ελέγχου για τη διευκόλυνση της παραμονής της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία και τη στήριξη του δικτύου κατά τη διάρκεια διαταραχών. Η παραμονή της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία κατά τη διάρκεια βύθισης τάσεως επιτυγχάνεται με το σύστημα προστασίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Επιπρόσθετα, το έργο της ανεμογεννήτριας να στηρίζει ενεργά το δίκτυο πραγματοποιείται με την εφαρμογή επιπλέον στρατηγικών ελέγχου οι οποίες αλληλεπιδρούν με την βασική στρατηγική η οποία εφαρμόζεται σε συνθήκες κανονικής λειτουργίας.

Το σύστημα προστασίας που αναπτύχθηκε και μοντελοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της διπλωματικής είναι η βραχυκύκλωση του δρομέα της γεννήτριας με ειδικό ελεγχόμενο κύκλωμα (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως Active Crowbar). Με τον τρόπο αυτό τα υπερρεύματα που προκύπτουν κατά τη βύθιση της τάσης στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας καταλήγουν στο κύκλωμα προστασίας, προστατεύοντας έτσι τα ηλεκτρονικά ισχύος του μετατροπέα από καταστροφή. Έχοντας ως κριτήριο το μέγεθος του ρεύματος δρομέα και της συνεχούς τάσης μεταξύ των δύο μετατροπέων, ενεργοποιείται το κύκλωμα προστασίας όταν ανιχνευθούν τιμές μεγαλύτερες των κρισίμων και αντίστοιχα όταν το μεταβατικό παρέλθει επανέρχεται η κανονική λειτουργία του μετατροπέα. Εφαρμόστηκαν διάφορα είδη βύθισης τάσης, και ως προς το εύρος της βύθισης και ως προς τη διάρκεια της διαταραχής. Με παράμετρο την τιμή της αντίστασης του ειδικού κυκλώματος προστασίας βρέθηκαν οι βέλτιστες ρυθμίσεις για το κύκλωμα ανάλογα με το είδος της βύθισης. Τα ίδια φαινόμενα βύθισης προσομοιώθηκαν και σε διαφορετικές συνθήκες ανέμου. Τέλος, για να επισημανθούν οι διαφορές στην απόκριση του συστήματος όταν αυτό μοντελοποιείται με το μοντέλο 5^{ης} ή 3^{ης} τάξης της γεννήτριας, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις που παρουσιάζουν τα μεταβατικά θεμελιώδους συχνότητας που εμφανίζονται στα ηλεκτρικά μεγέθη της γεννήτριας όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο 5^{ης} τάξης.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης και συνέχειας της παρούσας διπλωματικής θα μπορούσε να είναι η εξέταση της ποιότητας ισχύος στην έξοδο του συστήματος (πτώσεις τάσης, flicker). Επίσης θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος όταν αυτό συνδέεται σε δίκτυο και διερεύνηση για την απόκριση του σε διαταραχές σε διάφορα σημεία του δοσμένου δικτύου. Επιπλέον θα

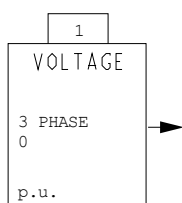
μπορούσε να διερευνηθεί εναλλακτικός τρόπος ελέγχου των μετατροπών και συγκριτική αντιπαράθεση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας. Τέλος θα μπορούσε να επιχειρηθεί βελτιστοποίηση της προσομοίωσης του αεροδυναμικού συστήματος, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπ' όψιν και η εμφάνιση των ανωτέρων αρμονικών στην αεροδυναμική ροπή, που οφείλονται στη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (Wind Shear) και στο φαινόμενο σκίασης πύργου (Tower Shadow).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας των βασικών μπλοκ στον Model Editor

Π1.1 Μπλοκ μετρήσεων (Measurement Blocks)

1. Μπλοκ μέτρησης του μέτρου της τάσης (Voltage Module)



Σχήμα Π1.1 Μπλοκ μέτρησης του μέτρου της τάσης.

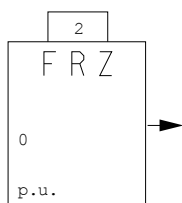
Είσοδοι: 0

Παράμετροι: 3

Λειτουργία: Δίνει ως έξοδο την τερματική τάση του ζυγού σύνδεσης

Σχόλια: Το μπλοκ αυτό έχει τρεις παραμέτρους. Ανάλογα με τις τιμές αυτών των παραμέτρων ο τύπος της τάσης εξόδου είναι διαφορετικός. Στα μοντέλα της παρούσας εργασίας, το μπλοκ αυτό θα χρησιμοποιηθεί όπως ακριβώς φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων του είναι 3 PHASE, 0 και p.u.. Η έξοδος του μπλοκ τάσης με αυτές τις παραμέτρους είναι το μέτρο της τριφασικής στο abc πλαίσιο τάσης του ζυγού σύνδεσης, εκφρασμένη στο ανά μονάδα σύστημα.

2. Μπλοκ μέτρησης της συχνότητας (Frequency Module)



Σχήμα Π1.2 Μπλοκ μέτρησης της συχνότητας.

Είσοδοι: 0

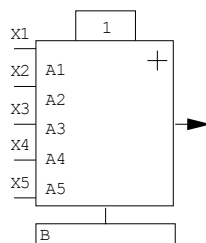
Παράμετροι: 2

Λειτουργία: Δίνει ως έξοδο τη τιμή της ηλεκτρικής συχνότητας στο ζυγό σύνδεσης του εξοπλισμού που μοντελοποιείται

Σχόλια: Το μπλοκ αυτό έχει δύο παραμέτρους. Ανάλογα με τις τιμές αυτών των παραμέτρων η τιμή της συχνότητας εξόδου μπορεί να είναι διαφορετική. Για παράδειγμα για διαφορετικές τιμές παραμέτρων η έξοδος αυτού του μπλοκ μπορεί να είναι η συχνότητα που επικρατεί σε εξοπλισμό μιας άλλης περιοχής του δικτύου και όχι στη περιοχή σύνδεσης του μοντελοποιημένου εξοπλισμού. Στα μοντέλα της παρούσας εργασίας, το μπλοκ αυτό θα χρησιμοποιηθεί όπως ακριβώς φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Δηλαδή οι τιμές των παραμέτρων του είναι 0 και $p.u.$. Η έξοδος του μπλοκ τάσης με αυτές τις παραμέτρους είναι η τιμή της ηλεκτρικής συχνότητας του ζυγού σύνδεσης, εκφρασμένη στο ανά μονάδα σύστημα.

Π1.2 Μπλοκ αλγεβρικών πράξεων και συναρτήσεων (Algebraic Blocks)

1. Μπλοκ αθροιστή (Summer)



Σχήμα Π1.3 Μπλοκ αθροιστή.

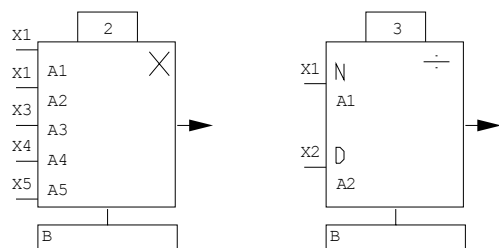
Είσοδοι: 1 έως 5: $X_1, X_2, \dots, X_5$

Παράμετροι: 2 έως 6: $A_1, A_2, \dots, A_5, B$

Συνάρτηση εξόδου: $y = \sum_i A_i X_i + B \Rightarrow y = A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots A_5 X_5 + B$

2, 3. Μπλοκ πολλαπλασιαστή (Multiplier) και διαιρέτη (Divider)

Με ακριβώς παρόμοιο τρόπο όπως και το μπλοκ αθροιστή λειτουργούν και τα μπλοκ του πολλαπλασιαστή (Multiplier) και διαιρέτη (Divider) η μορφή των οποίων απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

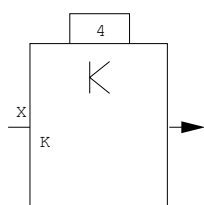


Σχήμα Π1.4 Μπλοκ πολλαπλασιαστή και διαιρέτη.

Συνάρτηση εξόδου πολλαπλασιαστή: $y = \prod_i A_i X_i + B$

Συνάρτηση εξόδου διαιρέτη: $y = \frac{A_1 X_1}{A_2 X_2} + B$

4. Μπλοκ κέρδους (Gain)



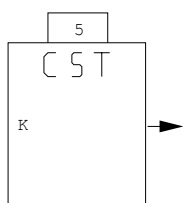
Σχήμα Π1.5 Μπλοκ κέρδους.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 1: K

Συνάρτηση εξόδου: $y = KX$

5. Μπλοκ σταθεράς (Constant)



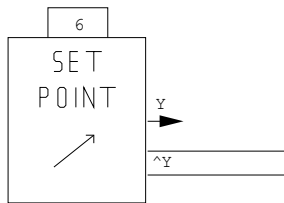
Σχήμα Π1.6 Μπλοκ σταθεράς.

Είσοδοι: 0

Παράμετροι: 1: K

Συνάρτηση εξόδου: $y = K$

6. Μπλοκ σημείου αναφοράς (Set Point)



Σχήμα Π1.7 Μπλοκ σημείου αναφοράς.

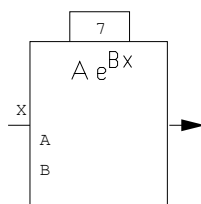
Είσοδοι: 0

Παράμετροι: 1: ^{Y}

Συνάρτηση εξόδου: $y = ^Y$

Σχόλιο: Αυτό το μπλοκ παίζει τον ίδιο ρόλο με το μπλοκ σταθεράς (Constant), αλλά η τιμή της εξόδου είναι ίση με την τιμή αρχικοποίησης της ^{Y} . Επομένως, αυτή καθορίζεται στο μπλοκ διάγραμμα αρχικοποίησης.

7. Μπλοκ εκθετικής συνάρτησης (Constant)



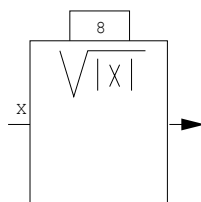
Σχήμα Π1.8 Μπλοκ εκθετικής συνάρτησης.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 2: A, B

Συνάρτηση εξόδου: $y = A \exp(BX)$

8. Μπλοκ τετραγωνικής ρίζας (Square Root)



Σχήμα Π1.9 Μπλοκ τετραγωνικής ρίζας.

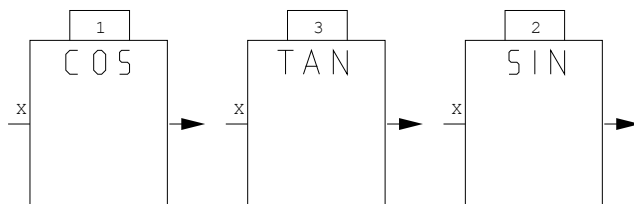
Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 0

Συνάρτηση εξόδου: $y = \sqrt{X}$

Π1.3 Μπλοκ τριγωνομετρικών συναρτήσεων (Trigonometric Blocks)

1, 2, 3. Μπλοκ συνάρτησης συνημίτονου (Cos), ημίτονου (Sin) και εφαπτομένης (Tan)



Σχήμα Π1.10 Μπλοκ βασικών τριγωνομετρικών συναρτήσεων.

Για καθένα από τα παραπάνω τρία μπλοκ τα οποία υλοποιούν τις βασικές τριγωνομετρικές συναρτήσεις ισχύει:

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 0

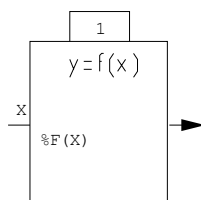
Συναρτήσεις εξόδου: $y = \cos X$

$$y = \tan X$$

$$y = \sin X$$

Π1.4 Μπλοκ συναρτήσεων (Function Blocks)

1. Μπλοκ συνάρτησης F καθορισμένης από το χρήστη (Function)



Σχήμα Π1.11 Μπλοκ συνάρτησης καθορισμένης από το χρήστη.

Είσοδοι: 1 (Το όνομα της συνάρτησης, πρέπει να ξεκινάει αναγκαστικά με %F)

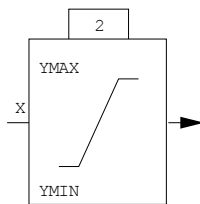
Παράμετροι: 2n: A1, B1, A2, B2, ... ,An, Bn εμφανίζονται στο αρχείο με κατάληξη **.par**, όχι στο γραφικό διάγραμμα.

$$\begin{aligned} \text{Συνάρτηση εξόδου: } y &= \frac{B2-B1}{A2-A1} (X - A1) + B1, & \text{εάν } X \leq A1 \\ y &= \frac{B(i+1)-Bi}{A(i+1)-Ai} (X - Ai) + Bi, & \text{εάν } Ai \leq X \leq A(i+1) \\ y &= \frac{Bn-B(n-1)}{An-A(n-1)} [X - A(n-1)] + B(n-1), & \text{εάν } An \leq X \end{aligned}$$

Περιορισμοί: $A(i+1) \neq Ai$, για όλα τα i

Σχόλια: Ο χρήστης δίνει τον πίνακα με τις τιμές της συνάρτησης για κάθε είσοδο της επιλογής του. Με αυτό τον τρόπο για κάθε Ai (στήλη εισόδων του μπλοκ του πίνακα που δίνεται από το χρήστη) υπάρχει και το αντίστοιχο Bi (στήλη εξόδων του μπλοκ του πίνακα που δίνεται από το χρήστη). Επίσης, ο χρήστης μπορεί να δώσει όσα σημεία της συνάρτησης θέλει. Επομένως, εάν ο πίνακας έχει n στήλες τότε θα υπάρχουν An και Bn παράμετροι, δηλαδή συνολικά $2n$ παράμετροι. Οι τιμές της εξόδου για τιμές της εισόδου μεταξύ δύο διαδοχικών παραμέτρων Ai και $A(i+1)$ υπολογίζονται με γραμμική παρεμβολή σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις.

2. Μπλοκ περιοριστή (Limiter)



Σχήμα Π1.12 Μπλοκ περιοριστή.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 2: YMIN, YMAX

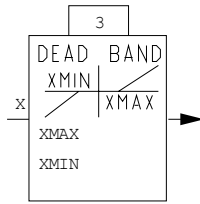
Συνάρτηση εξόδου: $y = X$ εάν $YMIN \leq X \leq YMAX$

$y = YMAX$ εάν $X \geq YMAX$

$y = YMIN$ εάν $X \leq YMIN$

Περιορισμός: $YMAX - YMIN > 10 \text{ YEPSRE}$ (YEPSRE η καθορισμένη σχετική ακρίβεια για κάθε μεταβλητή)

3. Μπλοκ «νεκρής» ζώνης (Dead Band)



Σχήμα Π1.13 Μπλοκ «νεκρής» ζώνης.

Είσοδοι: 1: X

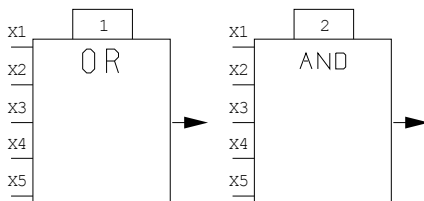
Παράμετροι: 2: XMIN, XMAX

Συνάρτηση εξόδου: $y = X - XMIN$ εάν $X < XMIN$
 $y = 0$ εάν $XMIN \leq X \leq XMAX$
 $y = X - XMAX$ εάν $X > XMAX$

Περιορισμός: $XMAX - XMIN > 10 YEPSRE$ (YEPSRE η καθορισμένη σχετική ακρίβεια για κάθε μεταβλητή)

Π1.5 Μπλοκ λογικών πράξεων και συναρτήσεων (Logical Blocks)

1, 2. Μπλοκ λογικού H (Logical OR), και λογικού KAI (Logical AND)



Σχήμα Π1.14 Μπλοκ λογικού H και λογικού KAI.

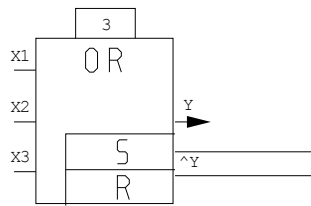
Τα δύο μπλοκ του σχήματος (2.14), τα οποία εκτελούν τις πλέον βασικές λογικές πράξεις έχουν τον ίδιο αριθμό εισόδων και παραμέτρων όμως διαφοροποιούνται στη συνάρτηση της εξόδου τους.

Είσοδοι: 1 έως 5: X1, X2, ..., X5

Παράμετροι: 0

Συνάρτηση εξόδου: Μπλοκ λογικού H: $y = 0$ εάν $X_i \leq 0, i = 1, \dots, n$
 $y = 1$ αλλιώς
Μπλοκ λογικού KAI: $y = 1$ εάν $X_i > 0, i = 1, \dots, n$
 $y = 0$ αλλιώς

3. Μπλοκ λογικού *H* με συγκράτηση (Logical OR with Hold)



Σχήμα Π1.15 Μπλοκ λογικού *H* με συγκράτηση.

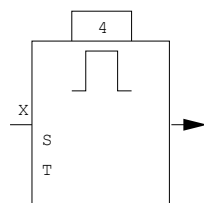
Είσοδοι: 3: X1, X2, X3

Παράμετροι: 1: ^Y

Συνάρτηση εξόδου: $y = 0$ εάν $X_i \leq 0$ και $y \leq 0$
 $y = 1$ αλλιώς

Σχόλια: Πρόκειται για ένα μπλοκ με μνήμη. Είναι προφανές ότι η έξοδος του κάθε στιγμή εξαρτάται από το πρόσημο της τιμής της την προηγούμενη χρονική στιγμή. Επομένως, απαραίτητη είναι η αρχικοποίηση του μπλοκ αυτού. Η αρχική του τιμή συμβολίζεται με ^Y και αποτελεί την μοναδική παράμετρο του μπλοκ. Αναλύοντας την λειτουργία αυτού του στοιχειώδους μπλοκ, συμπεραίνουμε με βάση τη συνάρτηση εξόδου του, ότι η αλλαγή της εξόδου από 0 σε 1 λαμβάνει χώρα όταν μια από τις εισόδους γίνει θετική. Από τη στιγμή που η έξοδος γίνει 1 δεν γίνεται να αλλάξει.

4. Μπλοκ διακόπτη τιμής κατωφλίου με περιορισμό ελάχιστου χρόνου κλεισίματος (Temporary Overshoot for a Threshold)



Σχήμα Π1.16 Μπλοκ διακόπτη τιμής κατωφλίου με περιορισμό ελάχιστου χρόνου κλεισίματος.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 2: S, T

Συνάρτηση εξόδου:

$$y(t) = 1 \quad \text{εάν} \quad X > S \text{ ή } X \leq S \text{ και } (t - \bar{t}) < T$$

$$y(t) = 0 \quad \text{εάν} \quad X(t) \leq S \text{ και } (t - \bar{t}) \geq T$$

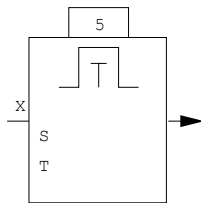
όπου

$\bar{t}$ η τελευταία χρονική στιγμή αλλαγής της εξόδου y από 0 σε 1

Περιορισμός: $T \geq 0$

Σχόλια: Η αλλαγή της εξόδου y από 0 σε 1 (διακόπτης κλειστός – switching on) λαμβάνει χώρα όταν η είσοδος ξεπεράσει τη τιμή κατωφλίου S . Η είσοδος παραμένει 1 τουλάχιστον για χρονικό διάστημα T . Έπειτα, η έξοδος γίνεται πάλι 0 (άνοιγμα διακόπτη – switching off) σε περίπτωση που η τιμή της εξόδου γίνει ή είναι ήδη μικρότερη από την τιμή κατωφλίου S .

5. Μπλοκ παλμού χρονικής διάρκειας T (Pulse)



Σχήμα Π1.17 Μπλοκ παλμού χρονικής διάρκειας T .

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 2: S, T

Συνάρτηση εξόδου:

$$\bar{t}(0) = -\infty$$

Εάν $(t - \bar{t} < T)$ τότε

$$y(t) = 1$$

αλλιώς εάν $[X(t) \geq S \text{ και } X(t - h) < S]$ τότε

$$\bar{t} = t$$

$$y(t) = 1$$

αλλιώς

$$y(t) = 0$$

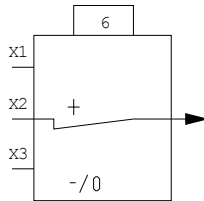
όπου

$\bar{t}$ η τελευταία χρονική στιγμή αλλαγής της εξόδου y από 0 σε 1

Περιορισμός: $T \geq 0$

Σχόλια: Η αλλαγή της εξόδου y από 0 σε 1 λαμβάνει χώρα όταν η είσοδος ξεπεράσει τη τιμή κατωφλίου S . Η είσοδος παραμένει 1 για χρονικό διάστημα T . Έπειτα, με το τέλος του χρονικού διαστήματος εξόδος γίνεται πάλι 0 όποια και να είναι η είσοδος.

6. Μπλοκ ηλεκτρονόμου - ρελέ (Relay)



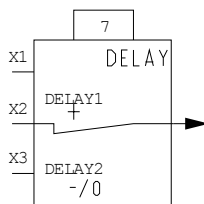
Σχήμα Π1.18 Μπλοκ ηλεκτρονόμου.

Είσοδοι: 3: $X1$, $X2$, $X3$

Παράμετροι: 0

Συνάρτηση εξόδου: $y = \begin{cases} X2 & \text{εάν } X1 > 0 \\ X3 & \text{εάν } X1 \leq 0 \end{cases}$

7. Μπλοκ ηλεκτρονόμου με καθυστέρηση (Relay with Delay)



Σχήμα Π1.19 Μπλοκ ηλεκτρονόμου με καθυστέρηση.

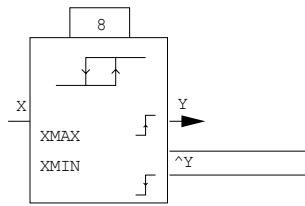
Είσοδοι: 3: $X1$, $X2$, $X3$

Παράμετροι: 2: $DELAY1$, $DELAY2$

Λειτουργία:

- Η αλλαγή της εξόδου y από $X2$ σε $X3$ καθυστερεί $DELAY2$ δευτερόλεπτα από τη χρονική στιγμή που η αρχικά θετική είσοδος $X1$ γίνεται 0 ή αρνητική.
- Η αλλαγή της εξόδου y από $X3$ σε $X2$ καθυστερεί $DELAY1$ δευτερόλεπτα από τη χρονική στιγμή που η αρχικά αρνητική ή 0 είσοδος $X1$ γίνεται θετική.

8. Μπλοκ διακόπτη με υστέρηση (Switching with Hysteresis)



Σχήμα Π1.20 Μπλοκ διακόπτη με υστέρηση.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 3: XMIN, XMAX, ^Y

Συνάρτηση εξόδου: $y = 0$ εάν $X - XMAX + y(XMAX - XMIN) \leq 0$
 $y = 1$ εάν $X - XMAX + y(XMAX - XMIN) > 0$

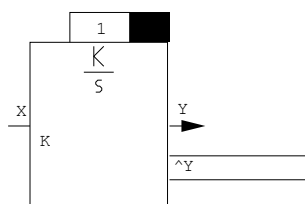
Περιορισμός: $XMIN < XMAX$

Σχόλια:

- Εάν $y = 0$, το y παραμένει ίσο με το 0 όσο ισχύει $X \leq XMAX$ και γίνεται ίσο με 1 μόλις $X > XMAX$.
- Εάν $y = 1$, το y παραμένει ίσο με το 1 όσο ισχύει $X > XMIN$ και γίνεται ίσο με 0 μόλις $X \leq XMIN$.

Π1.6 Μπλοκ τα οποία χρησιμοποιούν το μετασχηματισμό Laplace (Laplace Blocks)

1. Μπλοκ ολοκληρωτή (Integrator)



Σχήμα Π1.21 Μπλοκ ολοκληρωτή.

Είσοδοι: 1: X

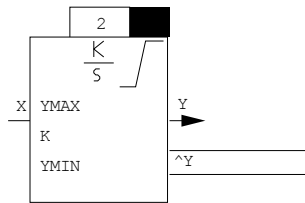
Παράμετροι: 2: K, ^Y

Συνάρτηση εξόδου: $\dot{y} = KX$

Περιορισμός αρχικοποίησης: πρέπει να ισχύει $X(0) = 0$

Σχόλιο: Πρόκειται ουσιαστικά για μπλοκ με μνήμη και για αυτό πρέπει να αρχικοποιηθεί κατάλληλα με την τιμή ^{Y} .

2. Μπλοκ ολοκληρωτή με περιοριστή (Limited Integrator)



Σχήμα Π1.22 Μπλοκ ολοκληρωτή με περιοριστή.

Είσοδοι: 1: X

Παράμετροι: 4: K, YMIN, YMAX, ^{Y}

Συνάρτηση εξόδου: $\dot{y} = KX$ εάν $YMIN < y < YMAX$

ή $YMIN = y$ και $KX \geq 0$

ή $YMAX = y$ και $KX \leq 0$

$\dot{y} = 0$ αλλιώς

Περιορισμός: $YMIN < YMAX$

Περιορισμοί στην αρχικοποίηση: πρέπει να ισχύει $X(0) = 0$

ή $^Y = YMIN$ και $KX(0) \leq 0$

ή $^Y = YMAX$ και $KX(0) \geq 0$

Σχόλιο: Πρόκειται ουσιαστικά για μπλοκ με μνήμη και για αυτό πρέπει να αρχικοποιηθεί κατάλληλα με την τιμή ^{Y} .

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

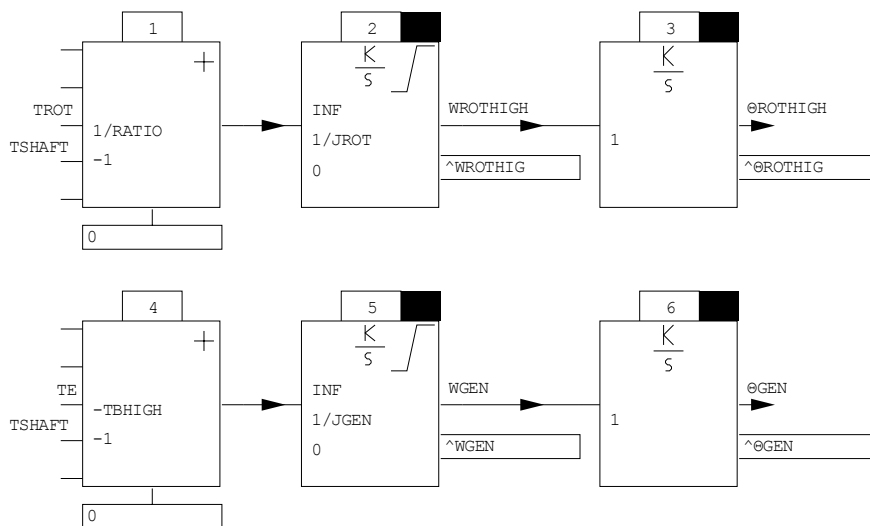
Υλοποίηση του μοντέλου στον επεξεργαστή μοντέλων Model Editor του EUROSTAG

Για τη καλύτερη κατανόηση των μπλοκ διαγραμμάτων τα οποία θα παρουσιαστούν παρακάτω, συνιστάται η προσεκτική μελέτη του κεφαλαίου 5 και του παραρτήματος 1 στα οποία οι βασικές αρχές του λογισμικού EUROSTAG, τα βασικά χαρακτηριστικά του επεξεργαστή μοντέλων αλλά και μια αναλυτική περιγραφή των βασικών στοιχειωδών μπλοκ που χρησιμοποιήθηκαν, περιλαμβάνονται.

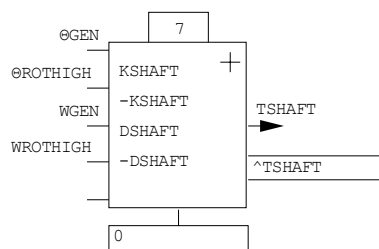
Π2.1 Μοντέλο του συστήματος μετάδοσης της κίνησης

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το μοντέλο δύο μαζών για το μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης (Drive Train Model), σχεδιασμένο με τη βοήθεια του επεξεργαστή μοντέλων Model Editor του λογισμικού EUROSTAG. Το μοντέλο αυτό ουσιαστικά περιγράφεται από το σύστημα των εξισώσεων (2.27) – (2.30).

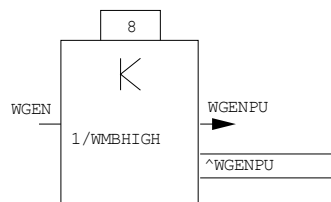
Όπως παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα, υπάρχουν δύο «αλυσίδες» συνδεδεμένων μπλοκ. Η πρώτη αποτελείται από τα μπλοκ 1, 2, 3 και υλοποιεί τις εξισώσεις (2.27) και (2.29) ενώ αυτή η οποία σχηματίζεται από τα μπλοκ 4, 5, 6 υλοποιεί τις (2.28) και (2.30). Τέλος, το μπλοκ 7 υπολογίζει τη ροπή στον άξονα T'_{shaft} .



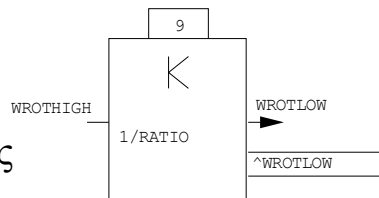
Υπολογισμός Tshaft



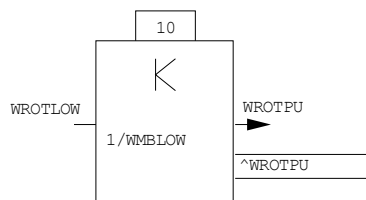
Μετατροπή της ταχύτητας της ηλεκτρικής γεννήτριας στο ανά μονάδα σύστημα



Μετατροπή της ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας



Μετατροπή της ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα στο ανά μονάδα σύστημα



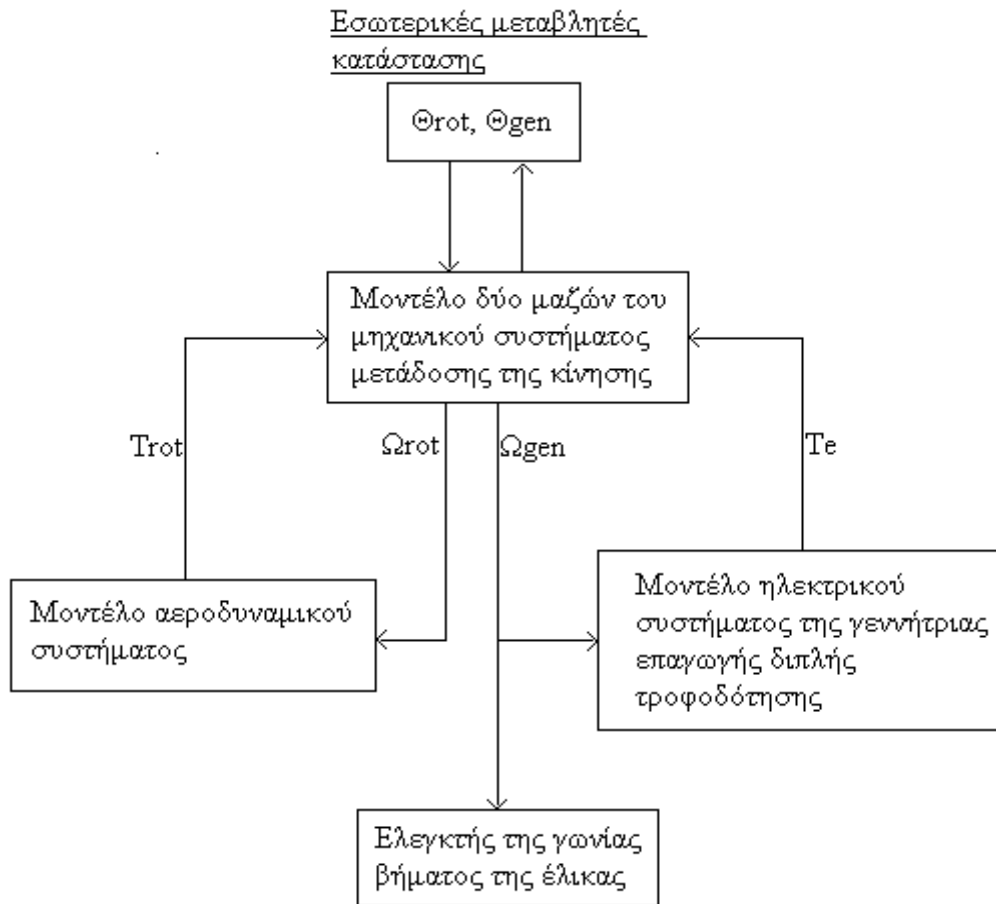
Σχήμα Π2.1 Μπλοκ διάγραμμα για το μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.

Είσοδοι του μοντέλου αυτού είναι η αεροδυναμική ροπή T_{rot} και η ηλεκτρική ροπή T_e . Η T_{rot} αποτελεί την έξοδο του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, ενώ η ηλεκτρική ροπή υπολογίζεται στο μοντέλο του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Η αεροδυναμική ροπή T_{rot} γίνεται

διαθέσιμη από το αεροδυναμικό μοντέλο σε φυσικές μονάδες αλλά εκφρασμένη στον αεροδυναμικό άξονα χαμηλής ταχύτητας. Για αυτό το λόγο, όπως φαίνεται και στο μπλοκ 1 του σχήματος (Π2.1) διαιρείται με τον λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων *ratio*, σύμφωνα με τη σχέση (2.6). Επιπρόσθετα, η ηλεκτρική ροπή T_e «έρχεται» από το μοντέλο του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας εκφρασμένη στο ανά μονάδα σύστημα. Επομένως, απαραίτητος είναι ο πολλαπλασιασμός της, με την βασική ροπή του άξονα υψηλής ταχύτητας η οποία δίνεται από τη σχέση (2.21). Η μετατροπή αυτή της ηλεκτρικής ροπής σε φυσικές μονάδες λαμβάνει χώρα στο μπλοκ 4.

Βασικές έξοδοι του μοντέλου αυτού, αποτελούν η ταχύτητα του αεροδυναμικού δρομέα Ω_{rot} και η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης Ω_{gen} . Η Ω_{rot} αποτελεί είσοδο του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος ενώ η ταχύτητα της ηλεκτρικής γεννήτριας Ω_{gen} χρησιμοποιείται ως είσοδος στο μοντέλο του ηλεκτρικού συστήματος της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης. Για να αποτελέσει η ταχύτητα Ω_{rot} είσοδο του αεροδυναμικού συστήματος απαιτείται η έκφραση της στον άξονα χαμηλής ταχύτητας, πράγμα το οποίο πραγματοποιείται στο μπλοκ με άξοντα αριθμό 9. Ακόμη, στο μπλοκ 8 η ταχύτητα Ω_{gen} μετατρέπεται στο ανά μονάδα σύστημα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια ως είσοδος του μοντέλου τόσο του ηλεκτρικού συστήματος όσο και του ελεγκτή ταχύτητας.

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα Π2.2 Ροή σημάτων βασικών μεταβλητών (εισόδων, εξόδων και εσωτερικών μεταβλητών κατάστασης) του μοντέλου του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του μοντέλου του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης:

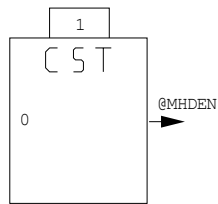
Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Επεξήγηση
<i>RATIO</i>	100	—	Λόγος κιβωτίου ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας
<i>INF</i>	$+\infty$	—	—
<i>JROT</i>	8.6×10^6	$Kg \times m^2$	Αδράνεια αεροδυναμικού άξονα της ανεμογεννήτριας
<i>TBHIGH</i>	12.73×10^3	Nm	Βασική ροπή άξονα υψηλής ταχύτητας
<i>JGEN</i>	150.9	$Kg \times m^2$	Αδράνεια άξονα της ηλεκτρικής γεννήτριας
<i>WMBHIGH</i>	157.079633	rad/s	Βασική μηχανική ταχύτητα άξονα υψηλής ταχύτητας
<i>WMBLOW</i>	1.57079633	rad/s	Βασική μηχανική ταχύτητα άξονα χαμηλής ταχύτητας
<i>DSHAFT</i>	800.6328	Nm/rad	Συνολική ακαμψία στον άξονα υψηλής ταχύτητας
<i>KSHAFT</i>	363.9240	Nm/rad	Συντελεστής απόσβεσης στον άξονα υψηλής ταχύτητας

Πίνακας Π2.1 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος για το μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης.

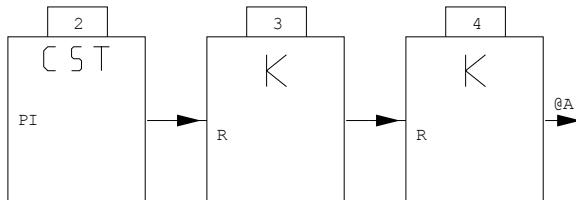
Π2.2 Μοντέλο αεροδυναμικού συστήματος

Στα παρακάτω σχήματα, απεικονίζονται τα μπλοκ διαγράμματα για την υλοποίηση του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος. Για κάθε ένα διάγραμμα συγκεκριμένα σχόλια περιλαμβάνονται με σκοπό τη διευκόλυνση της κατανόησης.

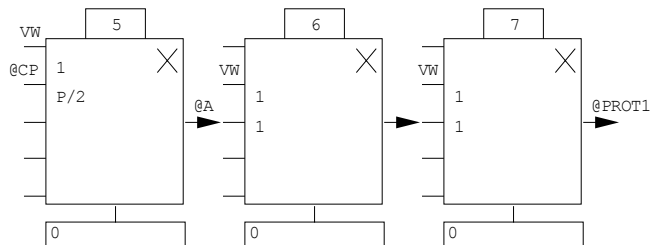
Στο πρώτο σχήμα, αρχικά, υπολογίζεται το εμβαδό $A = \pi R^2$ του δίσκου του δρομέα ακτίνας R ενώ στη συνέχεια η σχέση $T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\Omega_{rot}} = \frac{\frac{1}{2}\rho A V_w^3 C_p(\lambda, \beta)}{\Omega_{rot}}$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της αεροδυναμικής ισχύος. Τέλος, περιλαμβάνεται επίσης ο έλεγχος για τις περιπτώσεις που ταχύτητα του ανέμου V_w είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της $V_{wcut-in}$ ή $V_{wcut-out}$ αντίστοιχα. Στο δεύτερο μέρος του μπλοκ διαγράμματος του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, οι σχέσεις (2.39) και (2.43) εφαρμόζονται για τον υπολογισμό των λ και $\frac{1}{\lambda_i}$ αντίστοιχα. Τέλος, στο τρίτο μέρος (σχήμα Π2.5) η εύρεση της τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή $C_p(\lambda, \beta)$ γίνεται με βάση την εξίσωση (2.42).



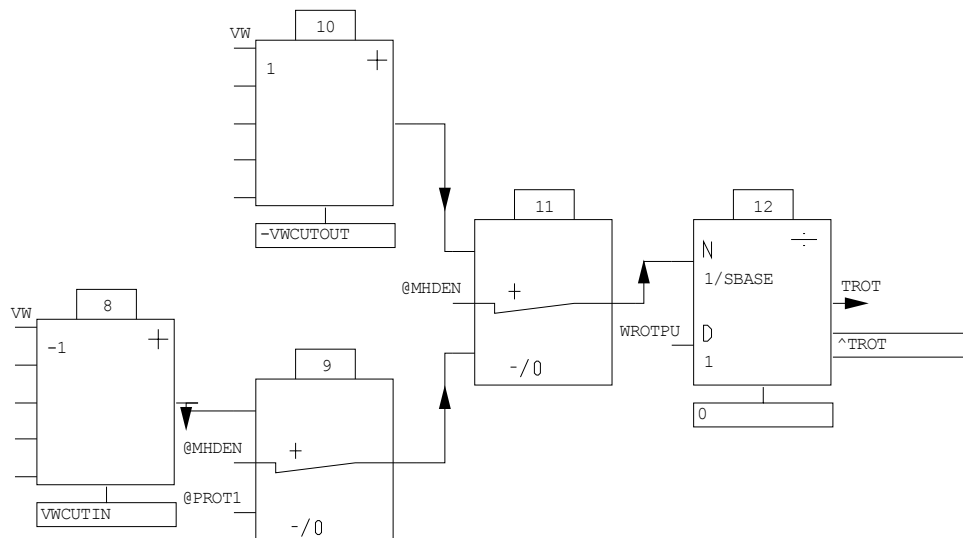
Υπολογισμός εμβαδού $A = \pi r^2$



Υπολογισμός αεροδυναμικής ισχύος $P = (1/2)\rho A C_p V_w^3$

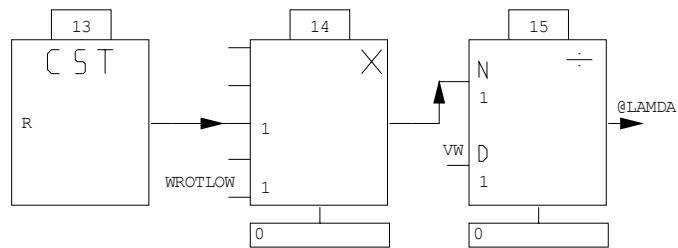


Έλεγχος για $V_{wcut-in}$ και $V_{wcut-out}$ και υπολογισμός αεροδυναμικής ροπής T_{rot} στο ανά μονάδα σύστημα

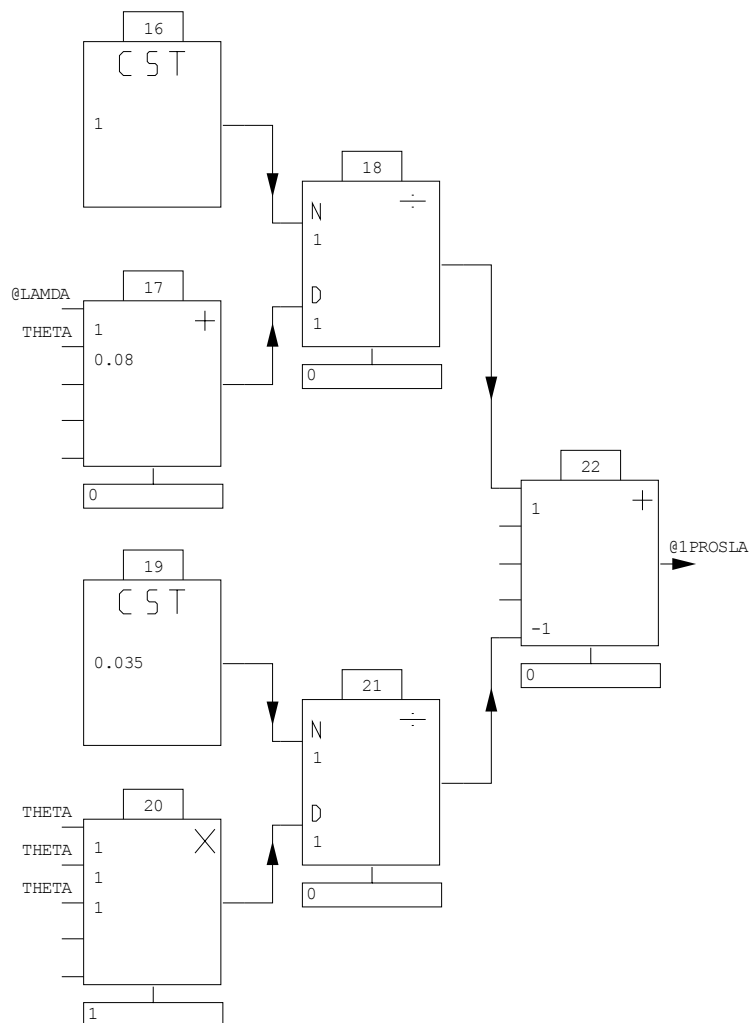


Σχήμα Π2.3 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 1^ο.

Υπολογισμός $\lambda = \Omega_{rot} \cdot r / V_w$

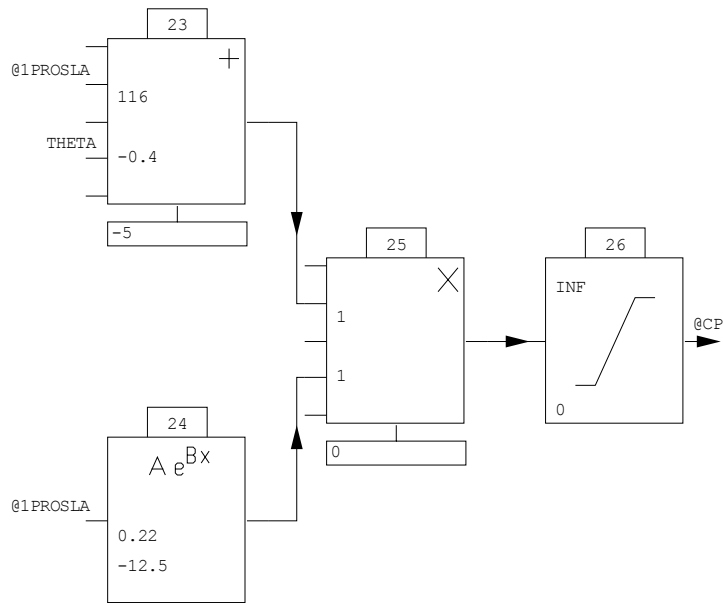


Υπολογισμός του λόγου $1/\lambda_{\lambda_i}$



Σχήμα Π2.4 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 2^ο.

Υπολογισμός αεροδυναμικού συντελεστή C_p



Σχήμα Π2.5 Μπλοκ διάγραμμα του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος, Μέρος 3^ο.

Παρακάτω, παρουσιάζουμε τον πίνακα των παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων σχημάτων (Π2.3) – (Π2.5):

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Εξήγηση φυσικής σημασίας της παραμέτρου
PI	3.141593	—	Πρόκειται για το π
R	37.5	m	Ακτίνα δρομέα της ανεμογεννήτριας
P	1.225	Kg/m^3	Πυκνότητα αέρα
$VWCUTIN$	3.5	m/s	Ταχύτητα ανέμου εισόδου
$VWCUTOUT$	25	m/s	Ταχύτητα ανέμου αποκοπής
$SBASE$	2	MW	Βασική ισχύς
INF	$+\infty$	—	—

Πίνακας Π2.2 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος.

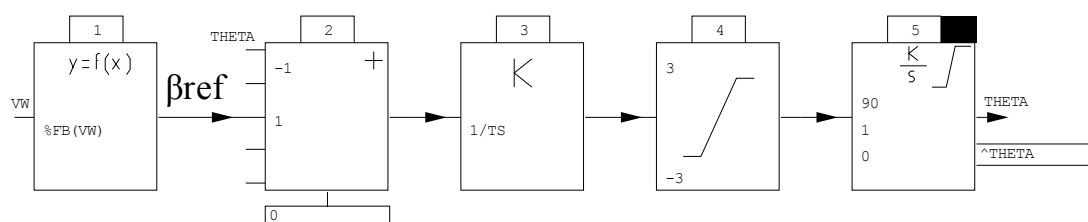
Μοναδική έξοδος του μοντέλου του αεροδυναμικού συστήματος αποτελεί σύμφωνα με τα παραπάνω σχήματα η αεροδυναμική ροπή T_{rot} εκφρασμένη στο ανά μονάδα σύστημα, η οποία «πάει» ως είσοδος στο μοντέλο του μηχανικού συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Είσοδοι του μοντέλου, αποτελούν η ταχύτητα του ανέμου V_w , η ταχύτητα περιστροφής του αεροδυναμικού δρομέα Ω_{rot} και η γωνία βήματος της έλικας β . Η ταχύτητα Ω_{rot} είναι έξοδος του μοντέλου του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας ενώ η τιμή της γωνίας βήματος της έλικας β είναι διαθέσιμη μέσω

του ελεγκτή γωνίας βήματος. Τέλος, στην παρούσα εργασία μοντέλο ανέμου δεν συμπεριλήφθηκε. Επομένως, οι τιμές τις οποίες η ταχύτητα του ανέμου V_w παίρνει κάθε στιγμή καθορίζεται άμεσα από το χρήστη. Με άλλα λόγια η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί μια ορισμένη από το χρήστη χρονοσειρά.

Π2.3 Μοντέλο του ελεγκτή γωνίας βήματος της έλικας

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, περιορισμοί οι οποίοι αφορούν τόσο το μέγιστο ρυθμό μεταβολής της $[MAX(DB/DT) - MIN(DB/DT)] = \left(\pm \frac{3^\circ}{s}\right)$ όσο και τη τιμή της γωνίας βήματος $[MAX(B) - MIN(B)] = (0^\circ - 90^\circ)$, λαμβάνονται υπόψη. Επιπρόσθετα, θεωρούμε ότι η ονομαστική ολίσθηση της γεννήτριας είναι -20% ή -0.2 . Επομένως, η ονομαστική ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας είναι ίση με 1.2 α.μ., δηλαδή $\omega_{ref} = 1.2$. Τέλος, η σταθερά χρόνου σερβομηχανισμού T_s επιλέχθηκε ίση με 0.25 .

Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σήμα αναφοράς β_{ref} υπολογίζεται μέσω της καμπύλης $\beta - V_w$ του σχήματος 2.11:



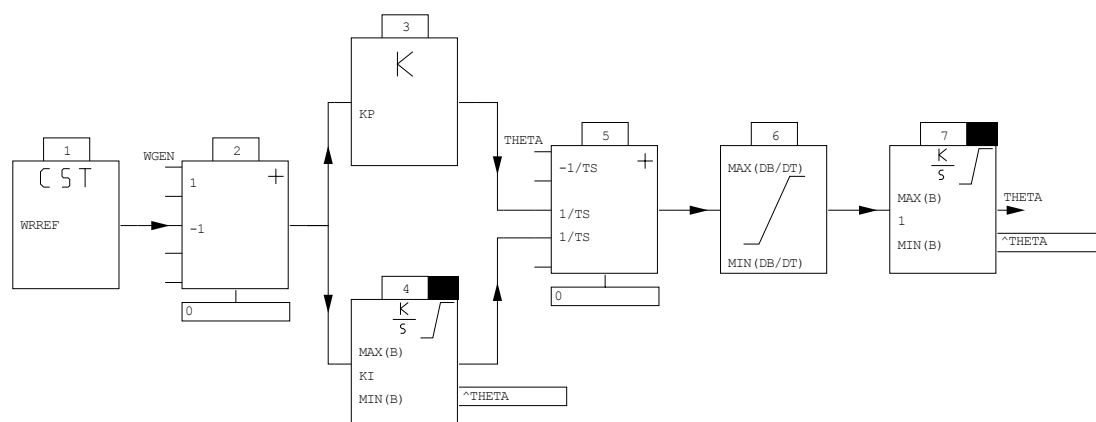
Σχήμα Π2.6 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας βήματος 1ης στρατηγικής.

Η καμπύλη $\beta - V_w$ υλοποιείται στο μπλοκ 1. Οι τιμές των παραμέτρων $A_1, A_2, \dots, A_n$ και $B_1, B_2, \dots, B_n$ (βλέπε παράρτημα 1 – επεξήγηση βασικών στοιχειωδών μπλοκ) για αυτό το μπλοκ δίνονται στο παρακάτω πίνακα. Πρόκειται ουσιαστικά για σημεία της καμπύλης $\beta - V_w$ όπου η στήλη A_i είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή (δηλαδή η τιμή της ταχύτητας του ανέμου V_w) ενώ η στήλη B_i αντιπροσωπεύει το σήμα αναφοράς για τη γωνία βήματος β_{ref} για κάθε τιμή της ταχύτητας του ανέμου V_w . Οι τιμές του παρακάτω πίνακα, υπολογίστηκαν με τη διαδικασία η οποία περιγράφηκε στη παράγραφο (2.2.4), με τη βοήθεια του λογισμικού Matlab R2009b.

i	Ai	Bi
1	0	0
2	1	0
3	2	0
4	3	0
5	4	0
6	5	0
7	6	0
8	7	0
9	8	0
10	9	0
11	10	0
12	11	0
13	12	0
14	13	3.455
15	14	10.5703
16	15	15.4024
17	16	19.0788
18	17	22.0217
19	18	24.4505
20	19	26.4919
21	20	28.2519
22	21	29.7735
23	22	31.1203
24	23	32.3149
25	24	33.376
26	25	34.3352

Πίνακας Π2.3 Παράμετροι $A1, A2, \dots, An$ και $B1, B2, \dots, Bn$ για το μπλοκ I – καμπύλη $\beta - V_w$.

Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref} .



Σχήμα Π2.7 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας βήματος 2^{ης} στρατηγικής.

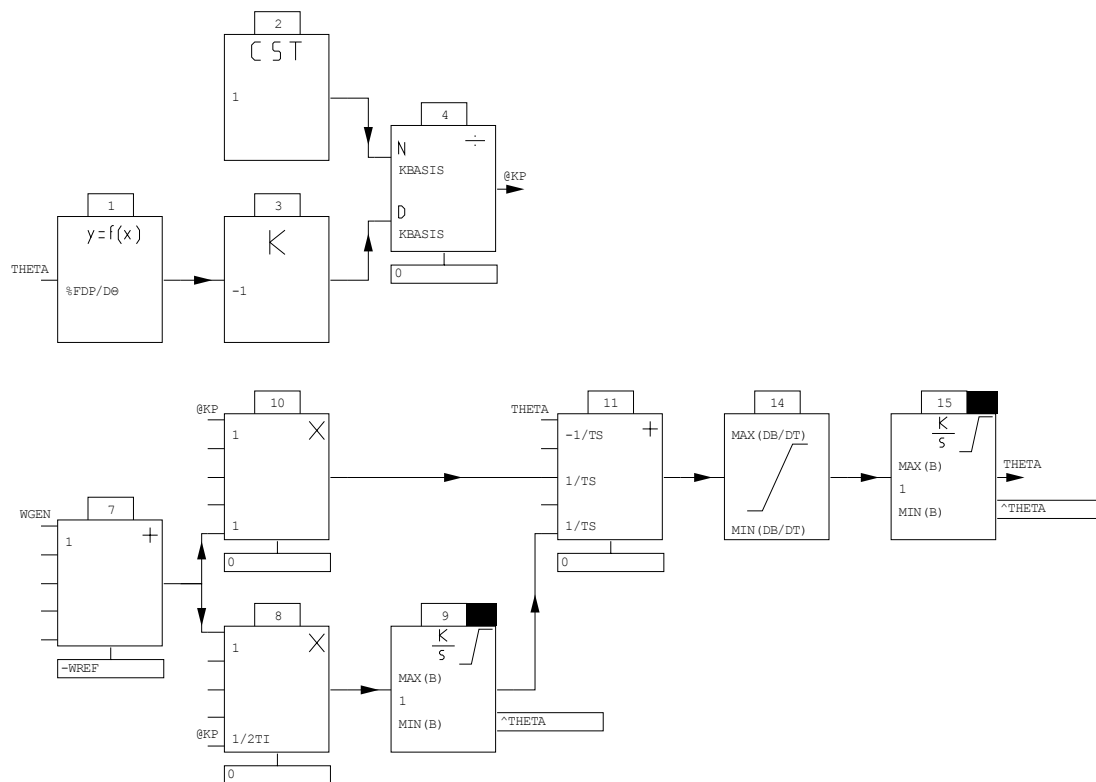
Παράμετρος	Τιμή	Εξήγηση απόδοσης τιμών των παραμέτρων
$WREF$	1.2 α.μ.	Ονομαστική ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας
KP	200	Αναλογικό κέρδος ελεγκτή PI
KI	60	Ολοκληρωτική σταθερά ελεγκτή PI
TS	0.25	Σταθερά σερβομηχανισμού
$MAX(B)$	90°	Μέγιστη τιμή της γωνίας βήματος της έλικας
$MIN(B)$	0°	Ελάχιστη τιμή της γωνίας βήματος της έλικας
$MAX(DB/DT)$	3°/s	Μέγιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας
$MIN(DB/DT)$	-(3°/s)	Ελάχιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας

Πίνακας Π2.4 Πίνακας παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων των δύο ελεγκτών γωνίας βήματος (1^{ης} και 2^{ης} στρατηγικής).

Στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή (με Gain Scheduling) με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref} .

Το σχεδιασμένο στον επεξεργαστή μοντέλων του EUROSTAG μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή της γωνίας βήματος με Gain Scheduling απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

Η καμπύλη $\frac{dP_{rot}}{d\beta}$ ως προς τη γωνία βήματος β υλοποιείται στο μπλοκ 1. Οι τιμές των παραμέτρων $A_1, A_2, \dots, A_n$ και $B_1, B_2, \dots, B_n$ (βλέπε παράρτημα 1 – επεξήγηση βασικών στοιχειωδών μπλοκ) υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab R2009b. Η καμπύλη της συνάρτησης ευαισθησίας $\frac{dP_{rot}}{d\beta}$ ως προς τη γωνία βήματος β έχει σχεδιαστεί στο σχήμα (2.16).



Σχήμα Π2.8 Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή γωνίας βήματος 3^{ης} στρατηγικής.

Παράμετρος	Τιμή	Εξήγηση απόδοσης τιμών των παραμέτρων
$WREF$	1.2 α. μ.	Ονομαστική ταχύτητα αναφοράς της γεννήτριας
K_{basis}	157.2229	Σταθερό κέρδος ελεγκτή PI
TI	1.1	$T_i = \frac{K_p}{K_i}$, όπου K_p και K_i το αναλογικό και ολοκληρωτικό κέρδος του PI ελεγκτή
TS	0.25	Σταθερά σερβομηχανισμού
$MAX(B)$	90°	Μέγιστη τιμή της γωνίας βήματος της έλικας
$MIN(B)$	0°	Ελάχιστη τιμή της γωνίας βήματος της έλικας
$MAX(DB/DT)$	$3^\circ/s$	Μέγιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας
$MIN(DB/DT)$	$-(3^\circ/s)$	Ελάχιστη τιμή του ρυθμού μεταβολής της γωνίας βήματος της έλικας

Πίνακας Π2.5 Πίνακας παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος ελεγκτή γωνίας βήματος 3^{ης} στρατηγικής.

Π2.4 Μοντέλο γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Π2.4.1 Μοντέλο 5^{ης} τάξης

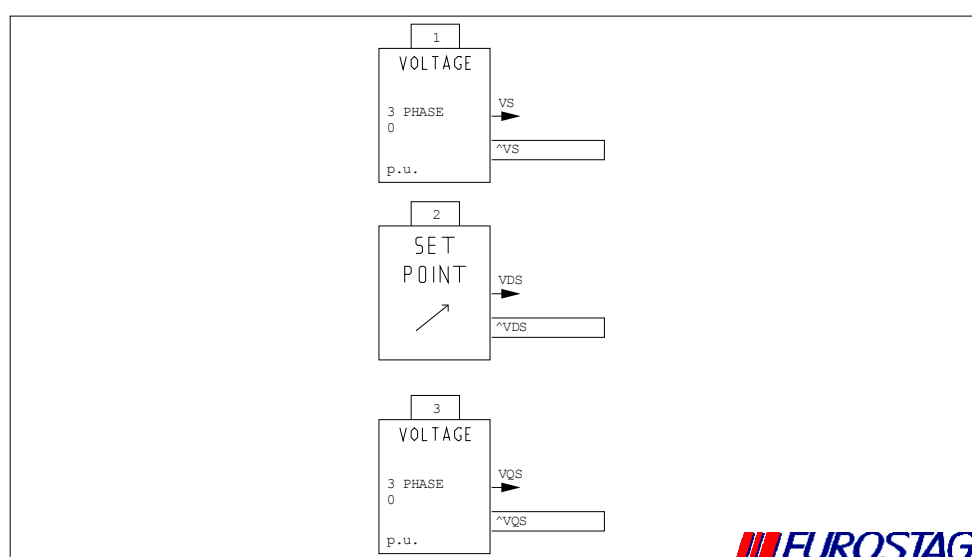
Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζουμε την υλοποίηση του δυναμικού μοντέλου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης με χρήση του επεξεργαστή μοντέλων του λογισμικού EUROSTAG. Το μοντέλο αυτό και η φιλοσοφία του, συνοψίζονται στις εξισώσεις (3.67) – (3.83) και στη ροή των σημάτων η οποία φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα (3.10).

1) Μπλοκ διάγραμμα για το μετασχηματισμό της τερματικής τάση στο πλαίσιο *SFO*.

Το δίκτυο, ή αλλιώς ο ζυγός σύνδεσης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης χαρακτηρίζεται από την τερματική τάση v_s και τη θεμελιώδη συχνότητα f_e . Σύμφωνα με την επιλογή του σύγχρονου πλαισίου αναφοράς *SFO* η συνιστώσα q της τάσης του στάτη v_{qs} , που εμφανίζεται στο μοντέλο ισούται με την τερματική τάση v_s του ζυγού της γεννήτριας και η v_{ds} ισούται με μηδέν (η θέση του άξονα d συμπίπτει με το μέγιστο της ροής του στάτη – *Stator Flux Orientation*). Δηλαδή:

$$v_{qs} = v_s \quad (\Pi 2.1)$$

$$v_{ds} = 0 \quad (\Pi 2.2)$$

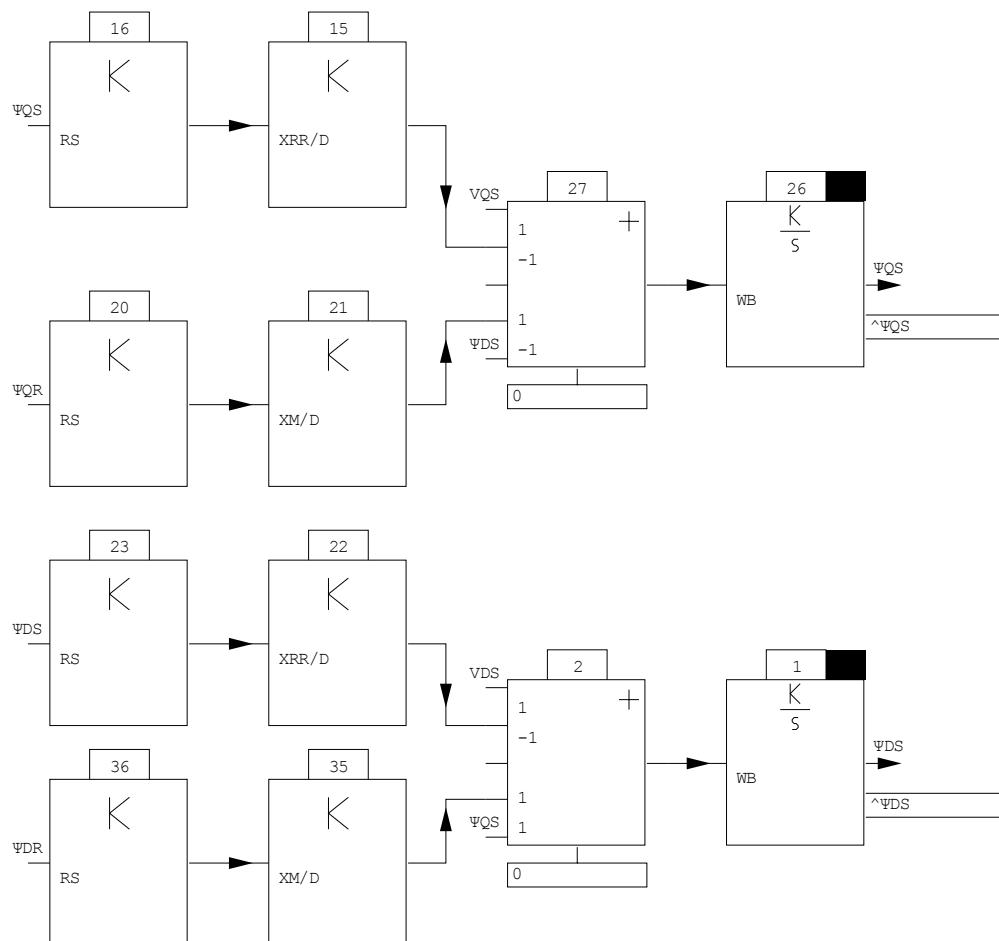


Σχήμα Π2.9 Μπλοκ διάγραμμα για το μετασχηματισμό της τερματικής τάση στο πλαίσιο *SFO*.

2) Μπλοκ διαγράμματα για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο μέσων των εξισώσεων (3.67) – (3.70).

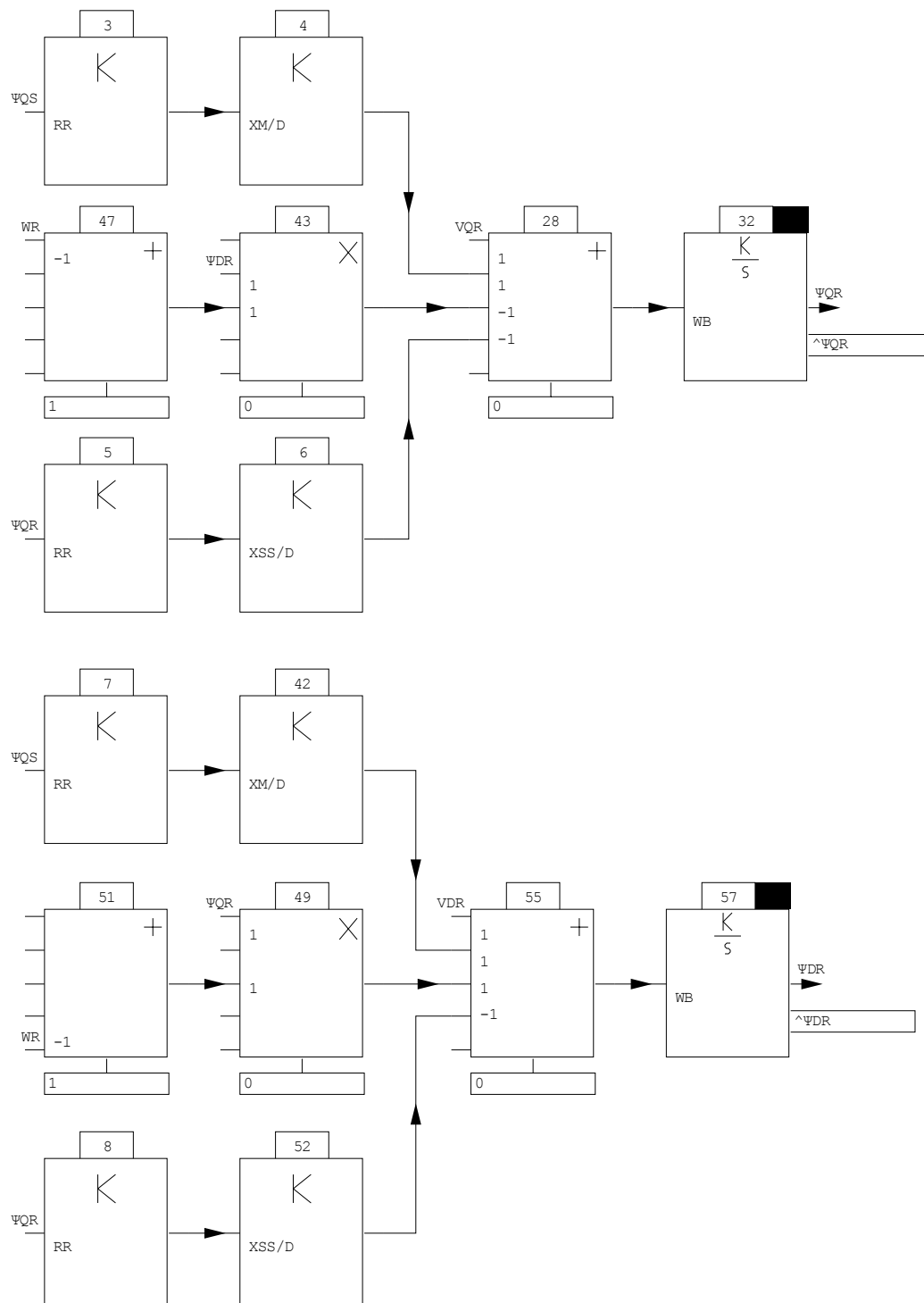
Ο υπολογισμός των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} , ψ'_{dr} , γίνεται με βάση τις εξισώσεις (3.67) – (3.70). Είσοδοι του μπλοκ διαγράμματος αυτού αποτελούν οι τάσεις v_{qs} , v_{ds} , v'_{qr} και v'_{dr} . Οι δύο πρώτες, δηλαδή οι v_{qs} και v_{ds} είναι έξοδοι του μοντέλου του ζυγού σύνδεσης στο πλαίσιο *SFO* το οποίο υλοποιείται μέσω του μπλοκ διαγράμματος του σχήματος (Π2.9). Αντίθετα, οι τάσεις του δρομέα στο *qd0* πλαίσιο, v'_{qr} και v'_{dr} , προσδιορίζονται μέσω του εφαρμοζόμενου ελέγχου των μετατροπών ισχύος.

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη



Σχήμα Π2.10 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη ψ_{qs} και ψ_{ds} .

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του δρομέα

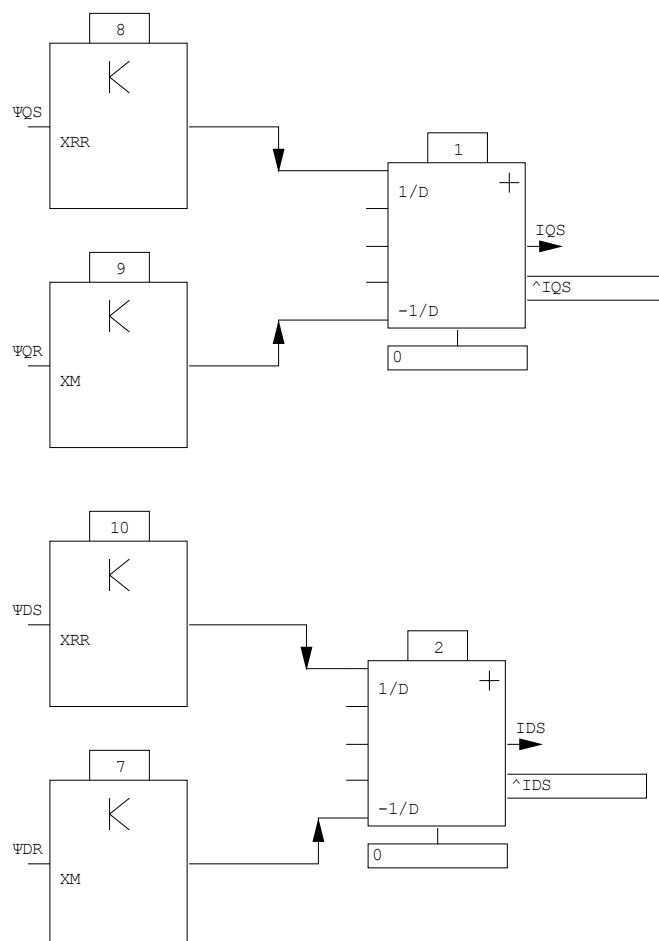


Σχήμα Π2.11 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του δρομέα Ψ'_{qr} , και Ψ'_{dr} .

3) Μπλοκ διαγράμματα για τον υπολογισμό των εντάσεων μέσω των εξισώσεων (3.71) – (3.74).

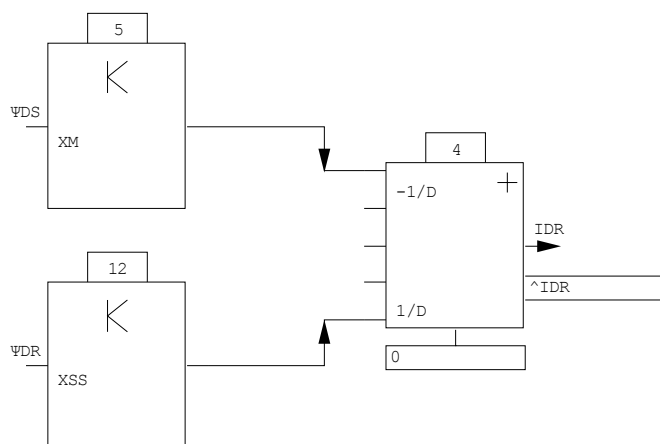
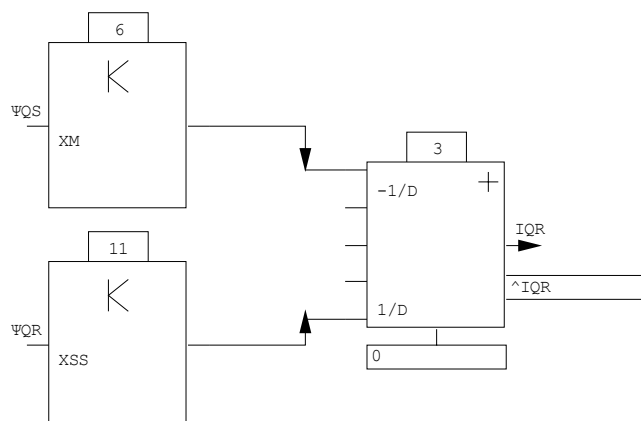
Ο υπολογισμός των εντάσεων των ρευμάτων i_{qs} , i_{ds} , i'_{qr} και i'_{dr} , γίνεται με βάση τις εξισώσεις (3.71) – (3.74). Είσοδοι του μπλοκ διαγράμματος αυτού αποτελούν οι πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} και ψ'_{dr} οι οποίες είναι έξοδοι του των μπλοκ διαγραμμάτων των σχημάτων (Π2.9) και (Π2.10).

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό των εντάσεων του στάτη



Σχήμα Π2.12 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό εντάσεων του στάτη i_{qs} και i_{ds} .

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό των εντάσεων του δρομέα

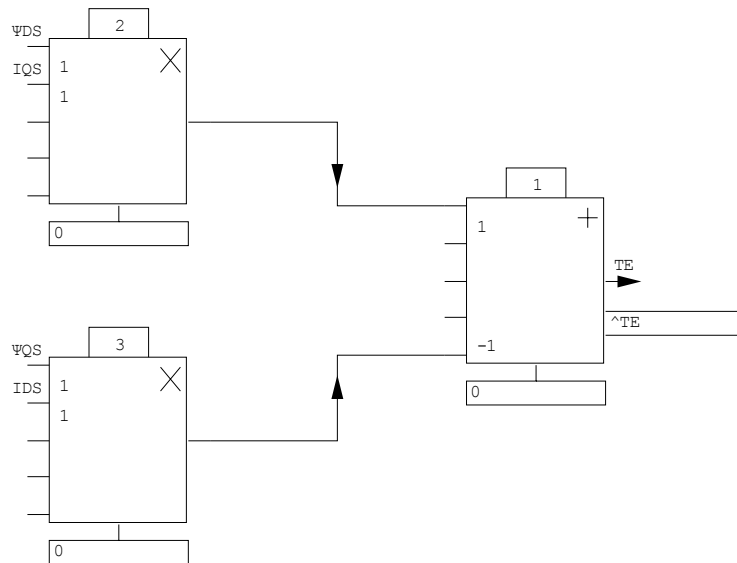


Σχήμα Π2.13 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό εντάσεων του δρομέα i'_{qr} και i'_{dr} .

4) Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής της γεννήτριας μέσω της εξίσωσης (3.75) ή (3.76).

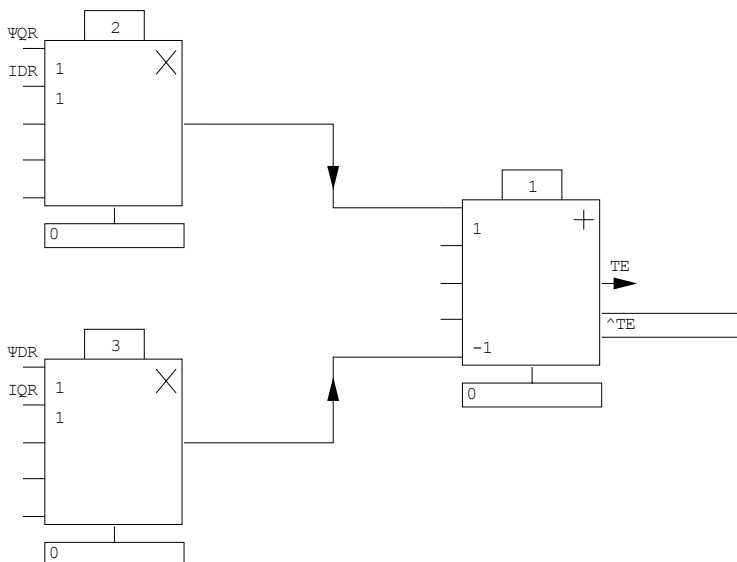
Ο υπολογισμός της ηλεκτρικής ροπής T_e γίνεται με βάση την εξίσωση (3.75) ή (3.76). Είναι προφανές, ότι σε περίπτωση που η ηλεκτρική ροπή υπολογιστεί μέσω της (3.75) τότε σαν είσοδο του μπλοκ διαγράμματος έχουμε τις πεπλεγμένες ροές ανά δευτερόλεπτο και τις εντάσεις του στάτη ψ_{qs} , ψ_{ds} και i_{qs} , i_{ds} αντίστοιχα. Αντίθετα, εάν η ηλεκτρική ροπή εκφραστεί σε συνάρτηση των μεταβλητών του δρομέα σύμφωνα με την εξίσωση (3.76) τότε είσοδοι αποτελούν οι μεταβλητές του δρομέα ψ'_{qr} , ψ'_{dr} , i'_{qr} και i'_{dr} . Σε κάθε περίπτωση, οι μεταβλητές εισόδου είναι διαθέσιμες μέσω των μπλοκ διαγραμμάτων των σχημάτων (Π2.9) – (Π2.13) τα οποία και αναλύσαμε παραπάνω.

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής μέσω της εξίσωσης (3.75)



Σχήμα Π2.14 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής T_e - εξίσωση (3.75).

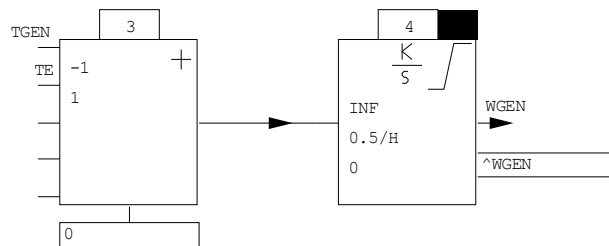
Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής μέσω της εξίσωσης (3.76).



Σχήμα Π2.15 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ηλεκτρικής ροπής T_e - εξίσωση (3.76).

4) Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της γεννήτριας μέσω της εξίσωσης κίνησης (3.77).

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό της ταχύτητας περιστροφής

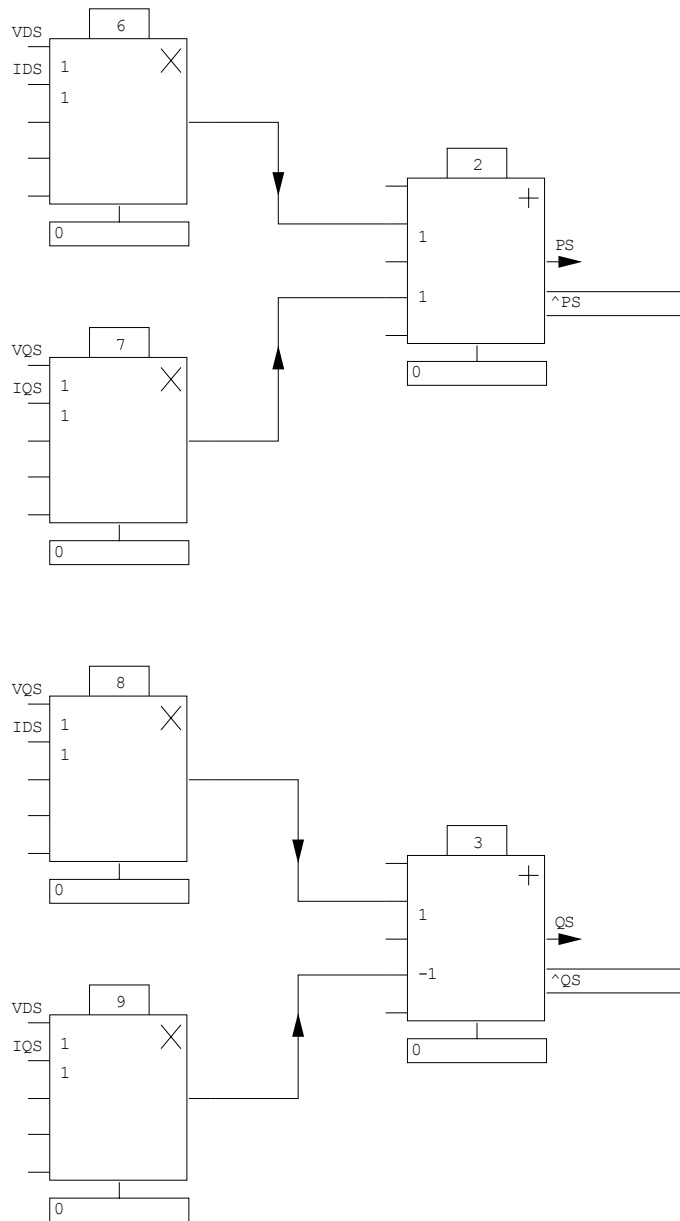


Σχήμα Π2.16 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό ταχύτητας περιστροφής του δρομέα Ω_{gen} .

4) Μπλοκ διαγράμματα για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος του στάτη και του δρομέα καθώς επίσης και της συνολικής παραγόμενης ισχύος μέσω των εξισώσεων (3.78) – (3.83).

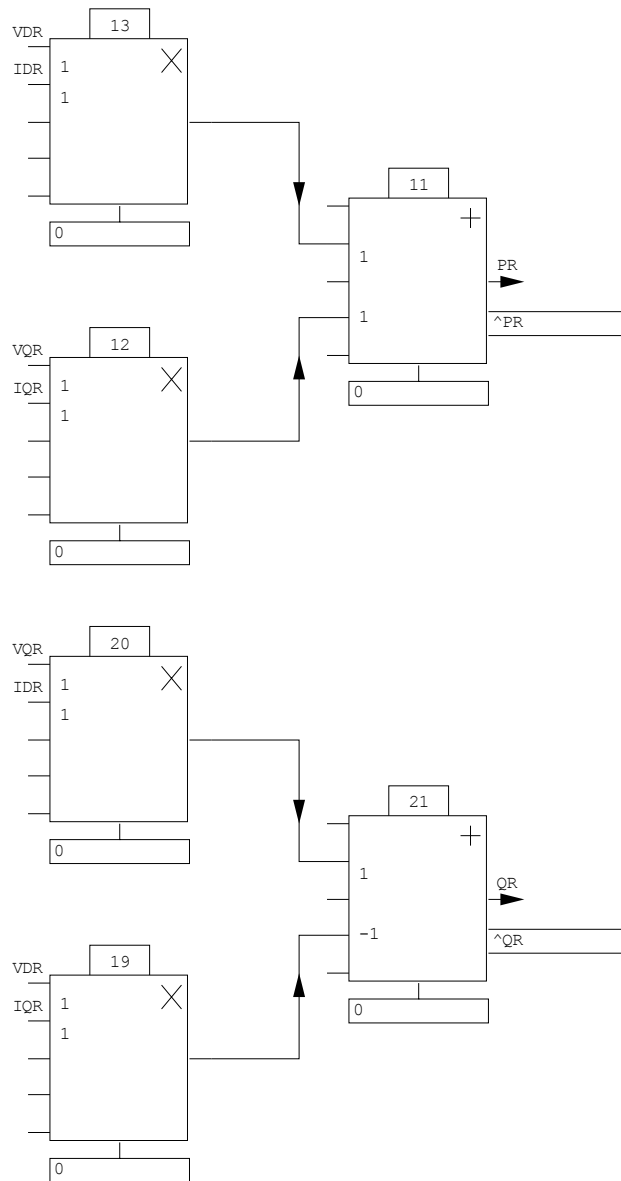
Οι έξοδοι των μπλοκ διαγραμμάτων που θα παρουσιαστούν παρακάτω είναι η ενεργός P_s και άεργος Q_s ισχύς του στάτη, η ενεργός P_r και άεργος Q_r ισχύς του δρομέα καθώς επίσης και η συνολική παραγόμενη ενεργός P και άεργος Q ισχύς. Είσοδοι των διαγραμμάτων αποτελούν οι τάσεις v_{qs} , v_{ds} , v'_{qr} και v'_{dr} και οι εντάσεις i_{qs} , i_{ds} , i'_{qr} και i'_{dr} .

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος του στάτη.



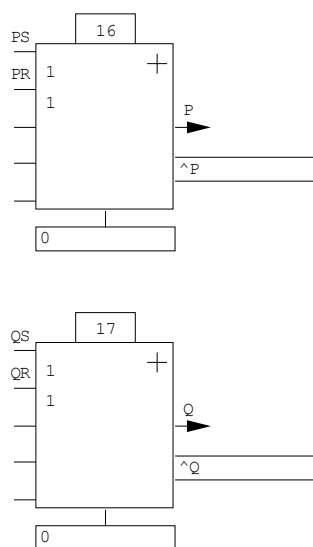
Σχήμα Π2.17 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ενεργού P_s και άεργου Q_s ισχύος του στάτη.

Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό της ενεργού και άεργου ισχύος του δρομέα.



Σχήμα Π2.18 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της ενεργού P_r και άεργου Q_r ισχύος του δρομέα.

Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης από τη γεννήτρια ενεργού και άεργου ισχύος.



Σχήμα Π2.19 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της συνολικής παραγόμενης από τη γεννήτρια ενεργού και άεργου ισχύος.

Μέσω παρατήρησης των μπλοκ διαγραμμάτων των σχημάτων (Π2.9) – (Π2.19), συμπεραίνουμε ότι οι μεταβλητές οι οποίες πρέπει να αρχικοποιηθούν είναι οι: v_s , v_{qs} , v_{ds} , ψ_{qs} , ψ_{ds} , ψ'_{qr} , ψ'_{dr} , i_{qs} , i_{ds} , i'_{qr} , i'_{dr} , T_e , Ω_{gen} , P_s , Q_s , P_r , Q_r , P και Q . Οι αντίστοιχες τιμές αρχικοποίησης τους συμβολίζονται με: $\wedge v_s$, $\wedge v_{qs}$, $\wedge v_{ds}$, $\wedge \psi_{qs}$, $\wedge \psi_{ds}$, $\wedge \psi'_{qr}$, $\wedge \psi'_{dr}$, $\wedge i_{qs}$, $\wedge i_{ds}$, $\wedge i'_{qr}$, $\wedge i'_{dr}$, $\wedge T_e$, $\wedge \Omega_{gen}$, $\wedge P_s$, $\wedge Q_s$, $\wedge P_r$, $\wedge Q_r$, $\wedge P$ και $\wedge Q$. Για την εύρεση των αρχικών αυτών τιμών ακολουθείται η διαδικασία αρχικοποίησης του κεφαλαίου 4.

Τιμές παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων των σχημάτων (Π2.9) – (Π2.19) τα οποία υλοποιούν το ηλεκτρικό μοντέλο της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης.

Ο πίνακας (Π2.6) παρακάτω, παρουσιάζει τις τιμές των παραμέτρων οι οποίες εμφανίζονται στα μπλοκ διαγράμματα των σχημάτων (Π2.9) – (Π2.19). Επίσης, σκόπιμο θεωρήθηκε να συμπεριληφθεί μια στήλη με την εξήγηση σχετικά την επιλογή - υπολογισμό της τιμής κάθε παραμέτρου. Για αυτό το σκοπό επαναλαμβάνουμε εδώ κάποιες βασικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων:

$$X_{ss} = X_{s\sigma} + X_m \quad (\Pi 2.3)$$

$$X'_{rr} = X'_{r\sigma} + X_m \quad (\text{Π2.4})$$

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_m^2 \quad (\text{Π2.5})$$

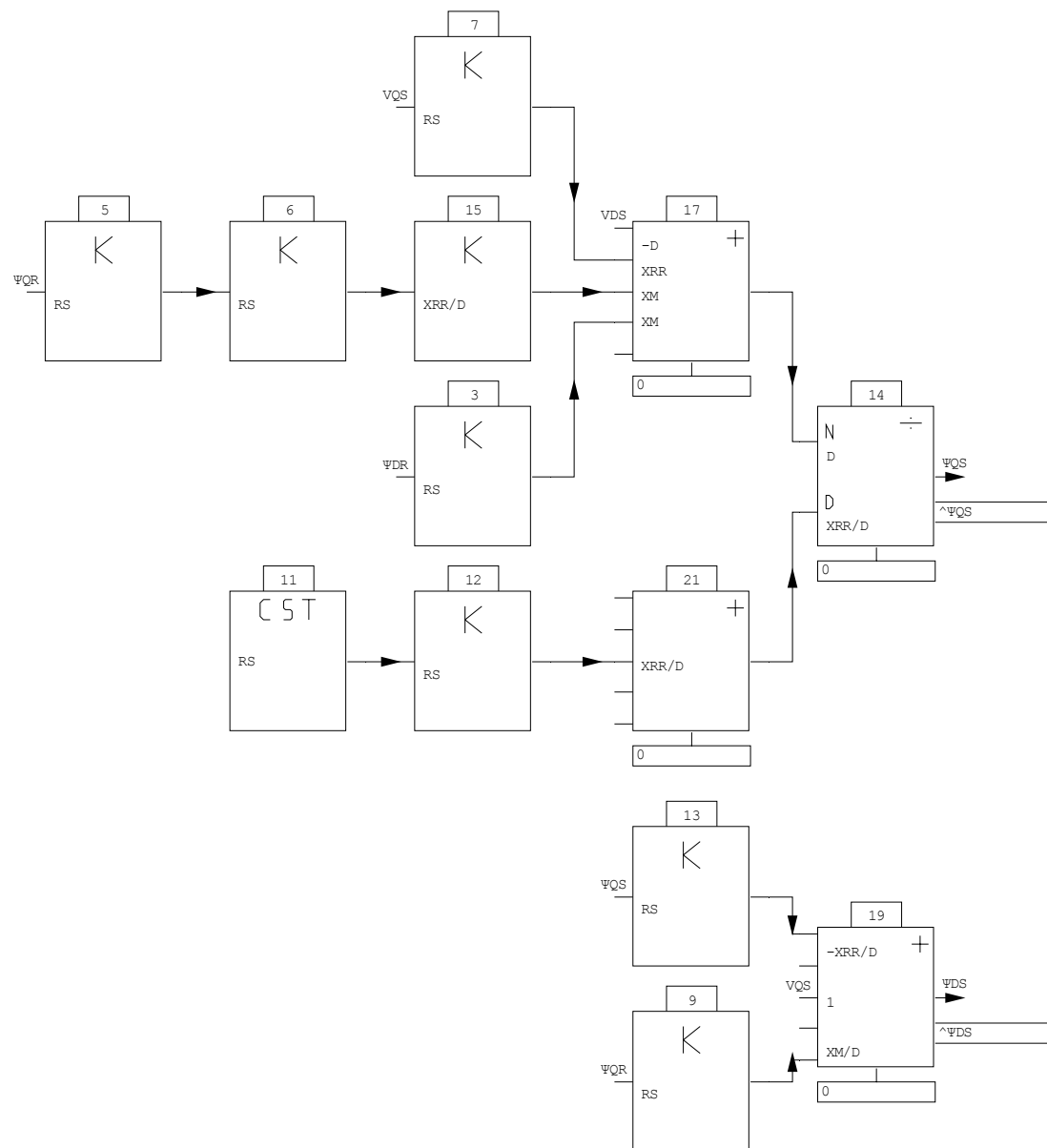
Παράμετρος	Τιμή α.μ.	Εξήγηση απόδοσης τιμής
RS	0.01	Πίνακας (3.2)
RR	0.01	Πίνακας (3.2)
XSS	3.1	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.3)
XRR	3.08	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.4)
XM	3	Πίνακας (3.2)
D	0.548	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.5)
WB	$2\pi f_e$	Βασική ταχύτητα
H	2.5	Σταθερά αδράνειας (σε sec)
INF	$+\infty$	—

Πίνακας Π2.6 Τιμές των παραμέτρων των μπλοκ διαγραμμάτων του μοντέλου 5^{ης} τάξης της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Π2.4.2 Μοντέλο 3^{ης} τάξης

Η μόνη αλλαγή του μοντέλου 3^{ης} τάξης είναι οι δύο διαφορετικές εξισώσεις για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη. Επομένως, τα μπλοκ διαγράμματα των σχημάτων (Π2.9) και (Π2.11) – (Π2.19) εφαρμόζονται και εδώ χωρίς διαφορές. Η μόνη αλλαγή αφορά το μπλοκ διάγραμμα του σχήματος (Π2.10) για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται τώρα μέσω των εξισώσεων (3.86) και (3.87). Τέλος, οι τιμές των παραμέτρων δίνονται και σε αυτή τη περίπτωση από τον πίνακα (Π2.6) ενώ η διαδικασία της αρχικοποίησης παραμένει ίδια όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4.

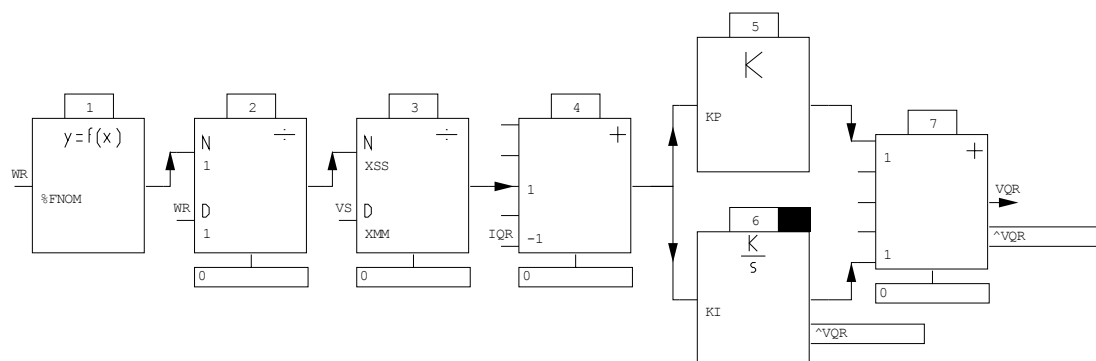
Μπλοκ διάγραμμα στον Model Editor για τον υπολογισμό των πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη για το μοντέλο 3^{ης} τάξης.



Σχήμα Π2.20 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό πεπλεγμένων ροών ανά δευτερόλεπτο του στάτη ψ_{qs} και ψ_{ds} για το μοντέλο 3^{ης} τάξης.

Π2.5 Μοντέλο συστήματος ελέγχου της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

1) Μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή ενεργού ισχύος.



Σχήμα Π2.21 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή ενεργού ισχύος.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Εξήγηση απόδοσης τιμής
$\%FNOM$	—	—	Χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας
XSS	3.1	α.μ.	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.3)
XMM	3	α.μ.	Πίνακας (3.2)
KP	50	—	Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή
KI	5	—	Ολοκληρωτική σταθερά PI ελεγκτή

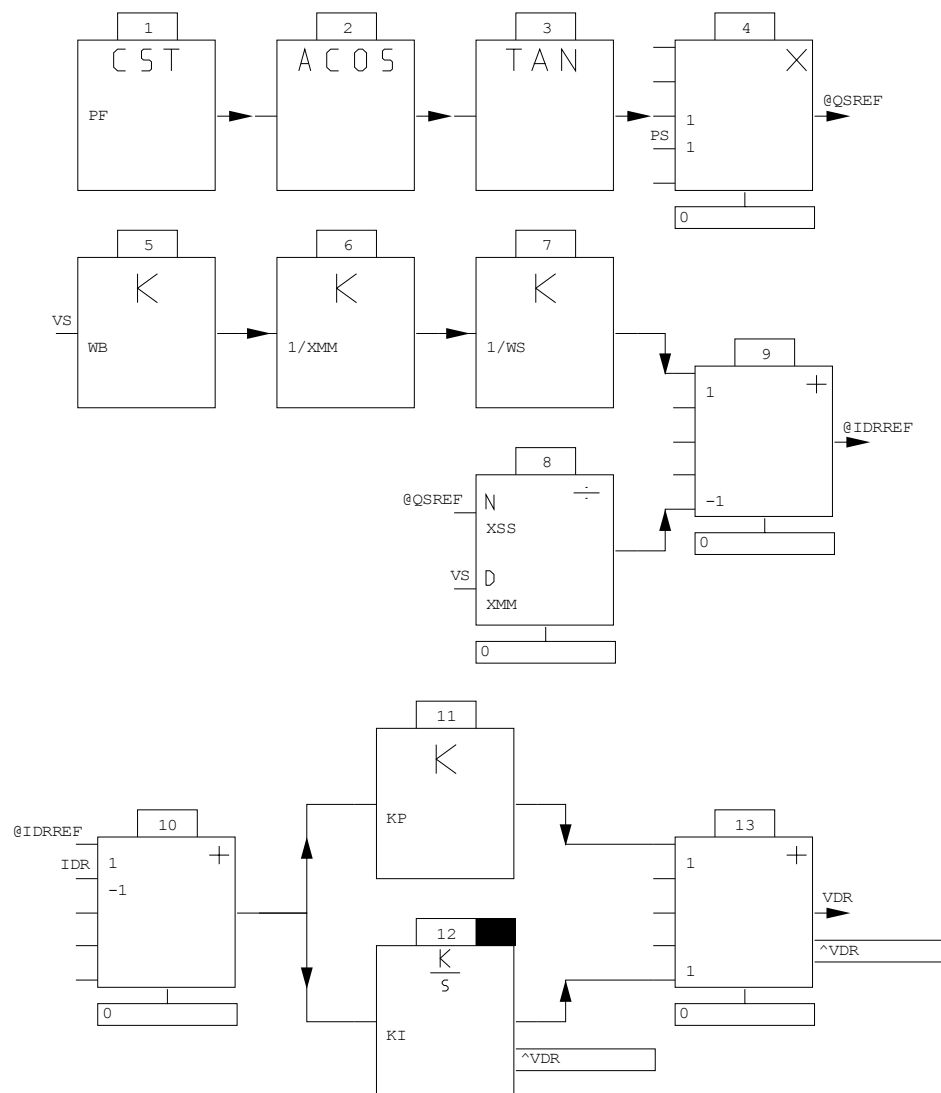
Πίνακας Π2.7 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή ενεργού ισχύος.

Η χαρακτηριστική ελέγχου ταχύτητας έχει περιγραφεί αναλυτικά στη παράγραφο (2.2.2) και σχεδιάστηκε στο σχήμα (2.7). Παρακάτω παραθέτουμε τις παραμέτρους A_i και B_i της συνάρτησης $FNOM$ η οποία αντιπροσωπεύει την χαρακτηριστική αυτή:

i	Ai	Bi
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0.40	0
6	0.50	0
7	0.60	0
8	0.61	0.021500
9	0.62	0.043000
10	0.63	0.645000
11	0.64	0.086000
12	0.65	0.107500
13	0.66	0.129000
14	0.67	0.141900
15	0.70	0.166115
16	0.75	0.204314
17	0.80	0.247962
18	0.85	0.297421
19	0.90	0.353055
20	0.95	0.415227
21	1.00	0.484300
22	1.08	0.610079
23	1.10	0.675000
24	1.12	0.740000
25	1.14	0.805000
26	1.16	0.870000
27	1.18	0.935000
28	1.20	1.000000

Πίνακας Π2.8 Παράμετροι $A1, A2, \dots, An$ και $B1, B2, \dots, Bn$ για το μπλοκ l – καμπύλη $\mathbf{w}_r$ – P_{opt} .

2)Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος.

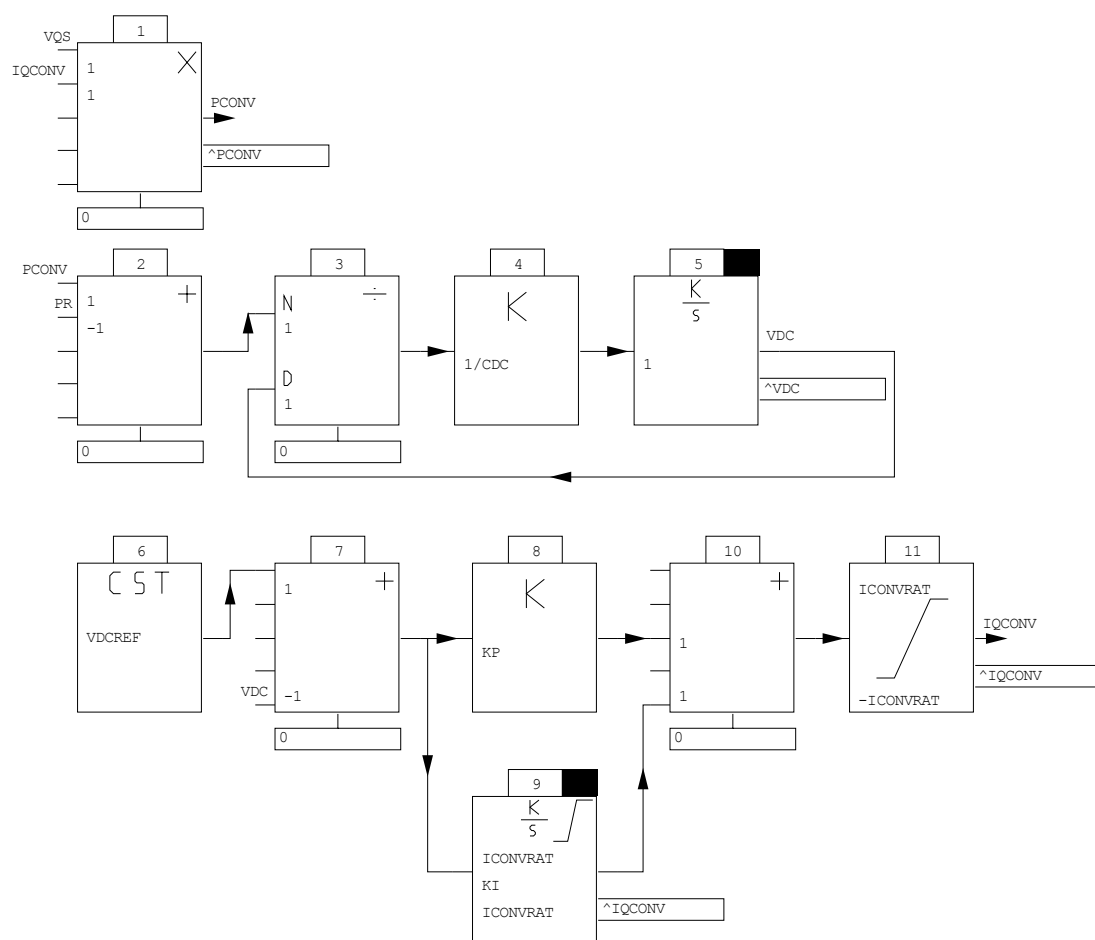


Σχήμα Π2.22 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Εξήγηση απόδοσης τιμής
PF	1	—	Επιλεγμένος ΣΙ λειτουργίας
XSS	3.1	α.μ.	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.3)
XMM	3	α.μ.	Πίνακας (3.2)
WB	$2\pi f_e$	rad/sec	Βασική ταχύτητα
WS	$2\pi f_e$	rad/sec	Σύγχρονη ταχύτητα
KP	50	—	Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή
KI	5	—	Ολοκληρωτική σταθερά PI ελεγκτή

Πίνακας Π2.9 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία σταθερού συντελεστή ισχύος.

3) Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή DC τάσης.



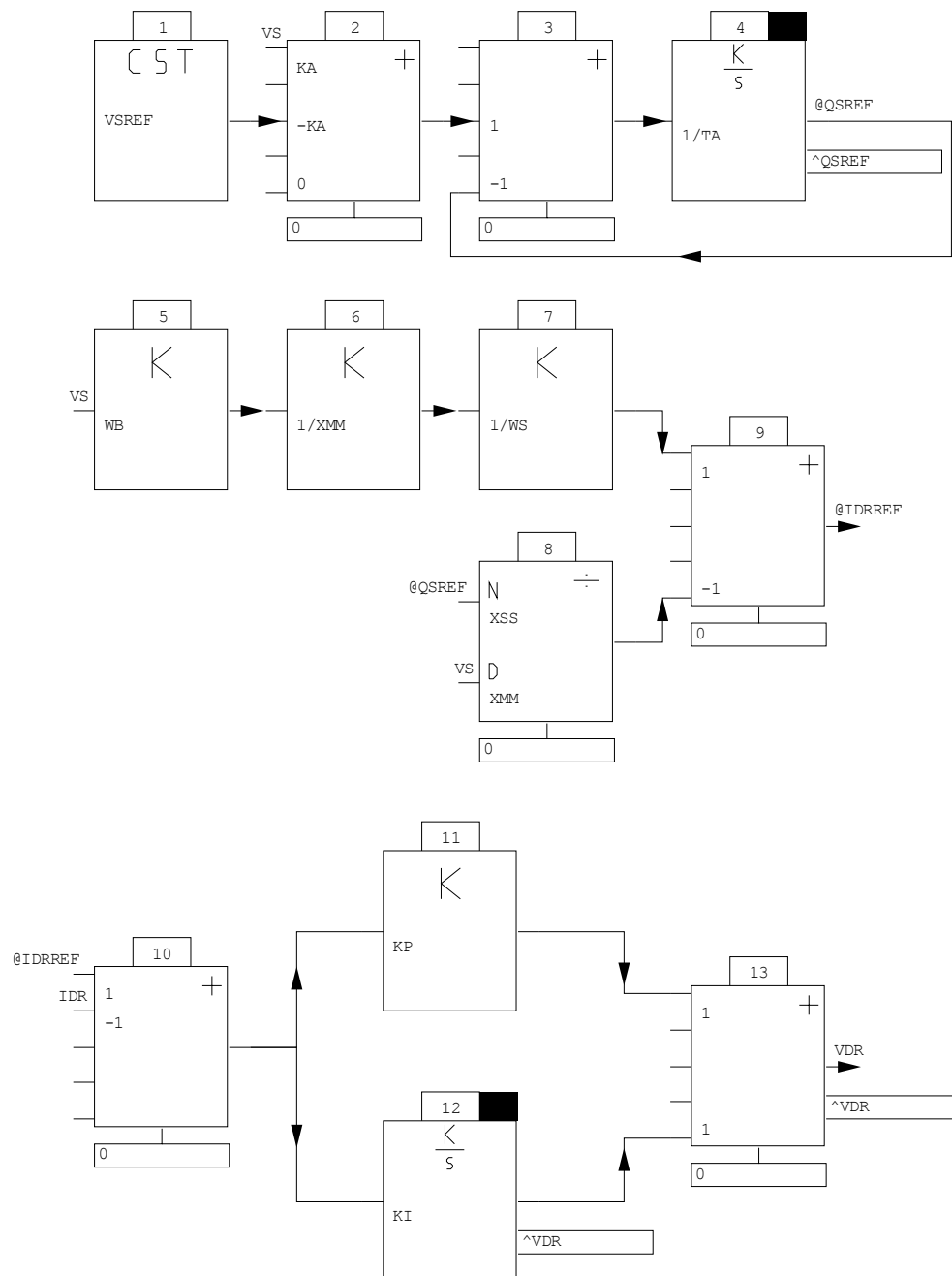
Σχήμα Π2.23 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή DC τάσης.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Εξήγηση απόδοσης τιμής
CDC	0.0014	s	Χωρητικότητα σύνδεσης συνεχούς τάσης
$VDCREF$	1	$\alpha. \mu.$	Τιμή αναφοράς συνεχούς τάσης
KP	50	—	Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή
KI	5	—	Ολοκληρωτική σταθερά PI ελεγκτή
$ICONVRAT$	1.5	$\alpha. \mu$	Ονομαστικό ρεύμα μετατροπέα

Πίνακας Π2.9 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή DC τάσης.

Π2.6 Μοντέλο συστήματος προστασίας της γεννήτριας επαγωγής διπλής τροφοδότησης

Το υλοποιημένο στον επεξεργαστή μοντέλων του EUROSTAG μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης απεικονίζεται παρακάτω:



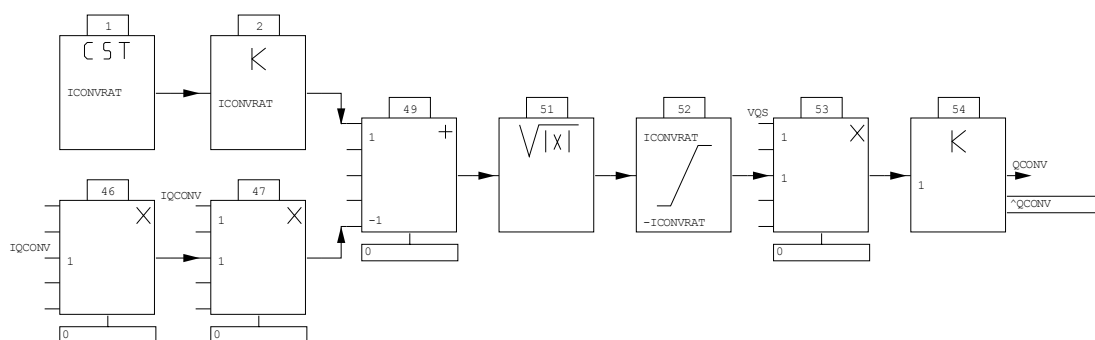
Σχήμα Π2.24 Μπλοκ διάγραμμα του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης.

Ο πίνακας παραμέτρων του παραπάνω μπλοκ διαγράμματος περιλαμβάνεται παρακάτω:

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Εξήγηση απόδοσης τιμής
XSS	3.1	α.μ.	Πίνακας (3.2) & Εξίσωση (Π2.3)
XMM	3	α.μ.	Πίνακας (3.2)
WB	$2\pi f_e$	rad/s	Βασική ταχύτητα
WS	$2\pi f_e$	rad/s	Σύγχρονη ταχύτητα
KA	100	—	—
TA	0.01	—	—
KP	50	—	Αναλογικό κέρδος PI ελεγκτή
KI	5	—	Ολοκληρωτική σταθερά PI ελεγκτή

Πίνακας Π2.10 Τιμές των παραμέτρων του μπλοκ διαγράμματος του ελεγκτή άεργου ισχύος σε λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή τάσης.

Το υλοποιημένο στον επεξεργαστή μοντέλων του EUROSTAG μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της παρεχόμενης από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου άεργου ισχύος για όσο χρονικό διάστημα το Crowbar είναι συνδεδεμένο, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



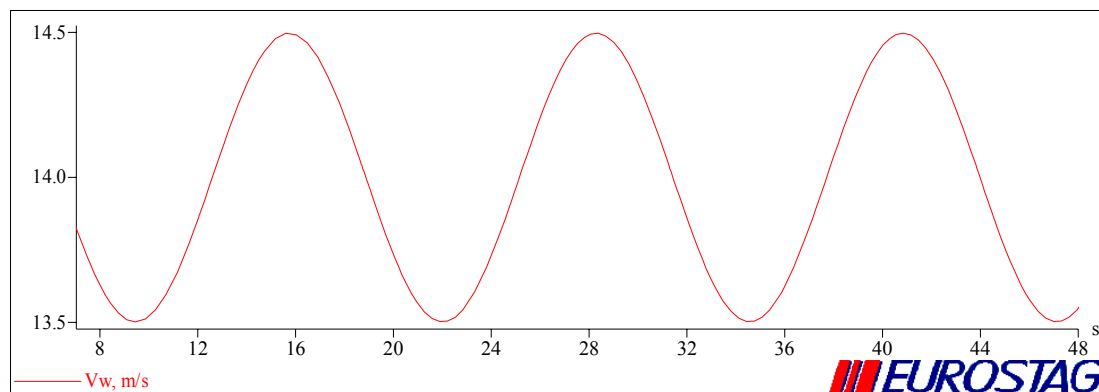
Σχήμα Π2.25 Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό της παρεχόμενης από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου άεργου ισχύος για όσο χρονικό διάστημα το Crowbar είναι συνδεδεμένο.

Η μοναδική παράμετρος του παραπάνω διαγράμματος είναι η ονομαστική ένταση του μετατροπέα, $ICONVRAT$ η οποία είναι ίση με 1.5 α.μ.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

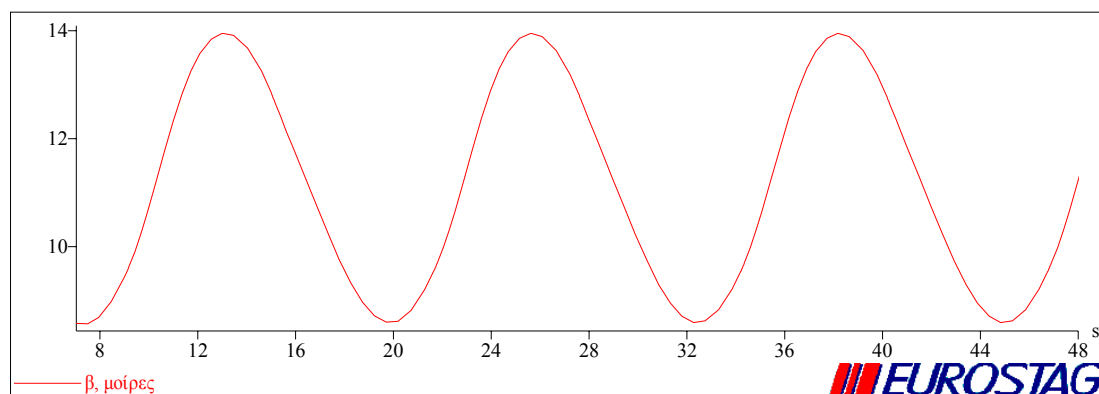
Επιπλέον προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του συστήματος σε μεταβολές του ανέμου

Π3.1 Απόκριση του συστήματος σε ημιτονοειδή χρονοσειρά ανέμου με μέση τιμή 14m/s, συχνότητα 0.5rad/sec και πλάτος 0.5m/s

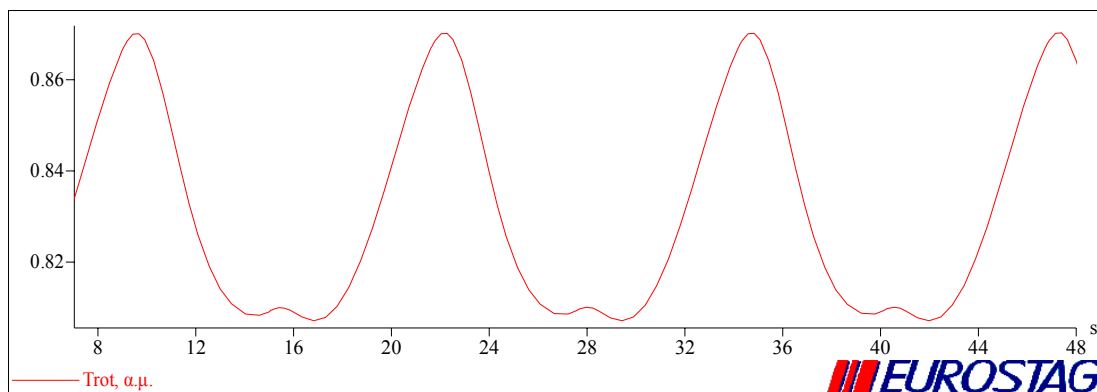


Γράφημα Π3.1 Ταχύτητα του ανέμου.

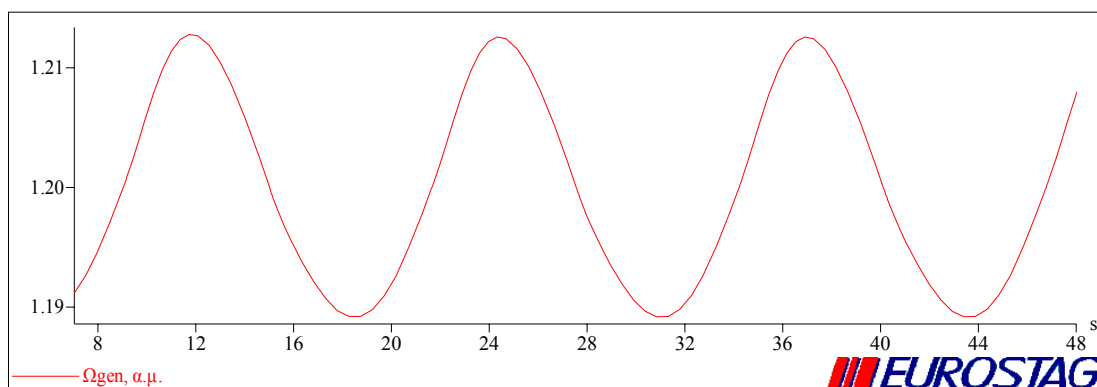
Π3.1.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}



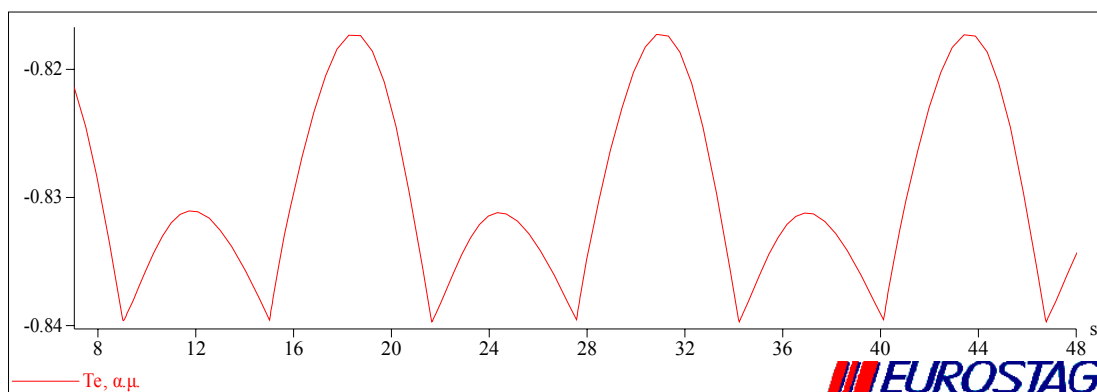
Γράφημα Π3.2 Απόκριση γωνίας βήματος.



Γράφημα Π3.3 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



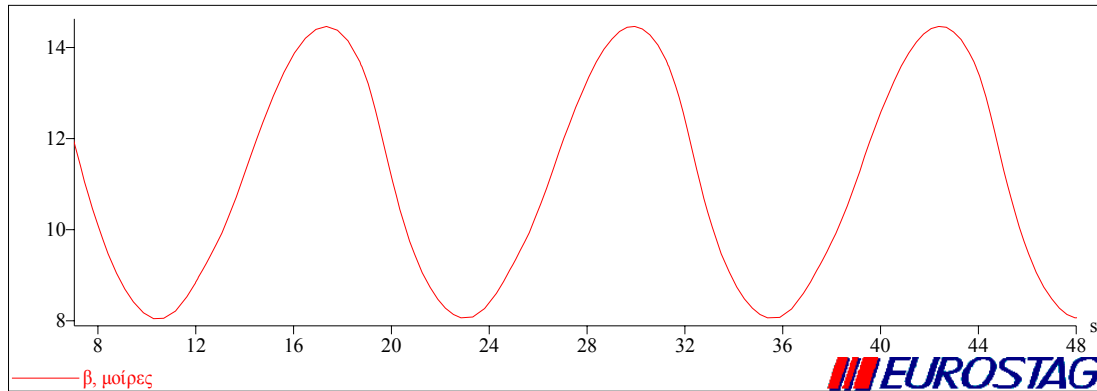
Γράφημα Π3.4 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας γεννήτριας.



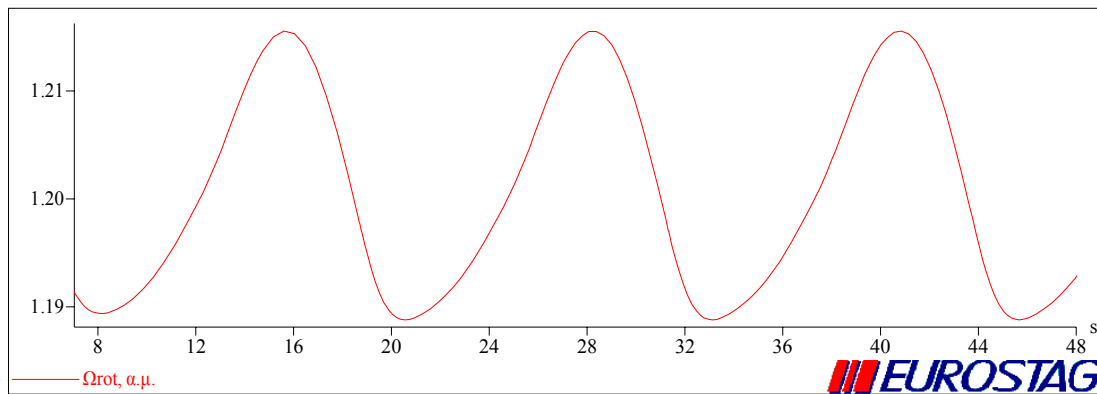
Γράφημα Π3.5 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

Στην περίπτωση αυτή η μεταβολή της ταχύτητας ανέμου είναι ιδιαίτερα γρήγορη με αποτέλεσμα να μην προλαβαίνει το σύστημα αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να δώσει τη σωστή με βάση τον έλεγχο τιμή γωνίας. Έτσι όταν αυξάνεται ο άνεμος, αυξάνεται η αεροδυναμική ροπή με αποτέλεσμα να επιταχύνεται ο δρομέας της Α/Γ. Όταν γίνει αυτό, αναλαμβάνει το σύστημα αλλαγής κλίσης των πτερυγίων να αυξήσει τη γωνία βήματος αλλά στο μεταξύ ο άνεμος έχει ήδη αρχίσει να μειώνεται. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή ακολουθώντας τον έλεγχο που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας ακολουθεί τις μεταβολές της ταχύτητας του δρομέα.

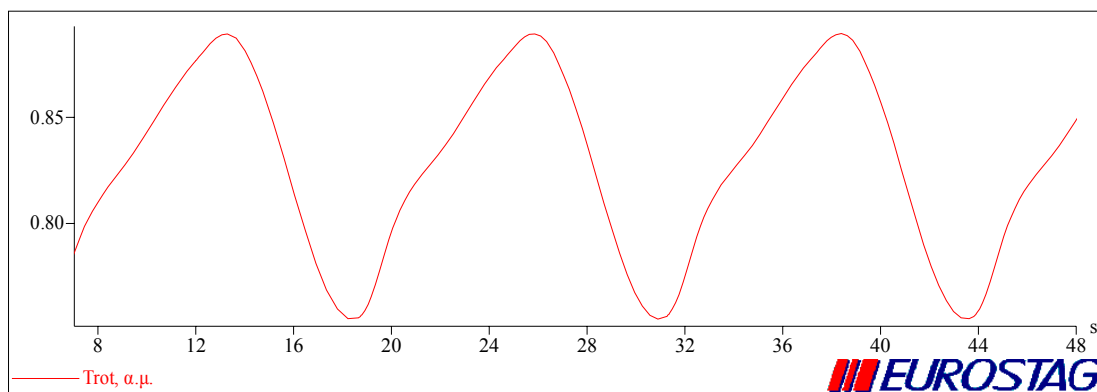
Π3.1.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling



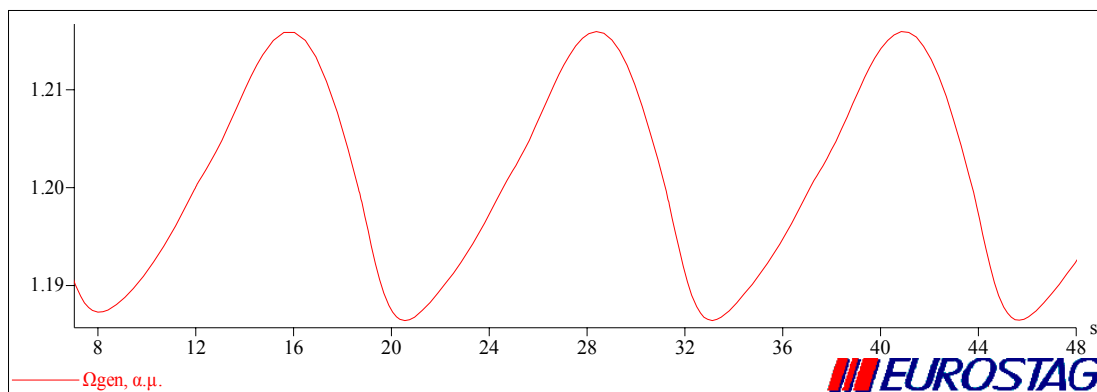
Γράφημα Π3.6 Απόκριση γωνίας βήματος.



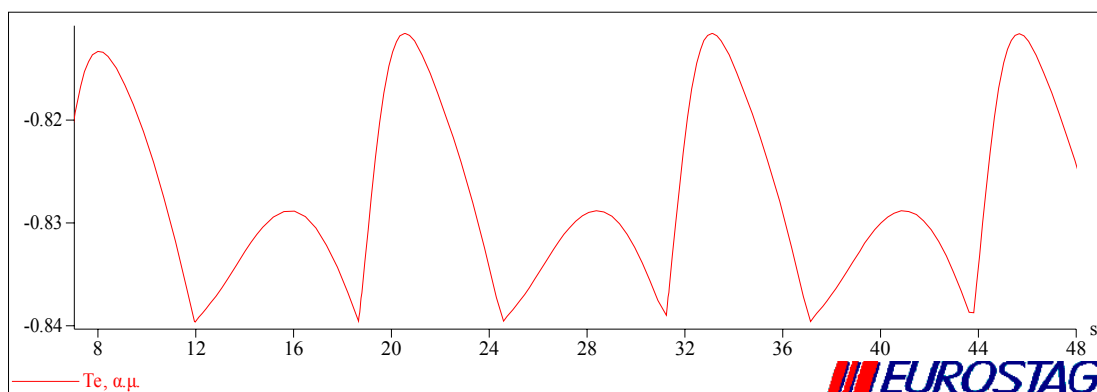
Γράφημα Π3.7 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας αεροδυναμικού άξονα.



Γράφημα Π3.8 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



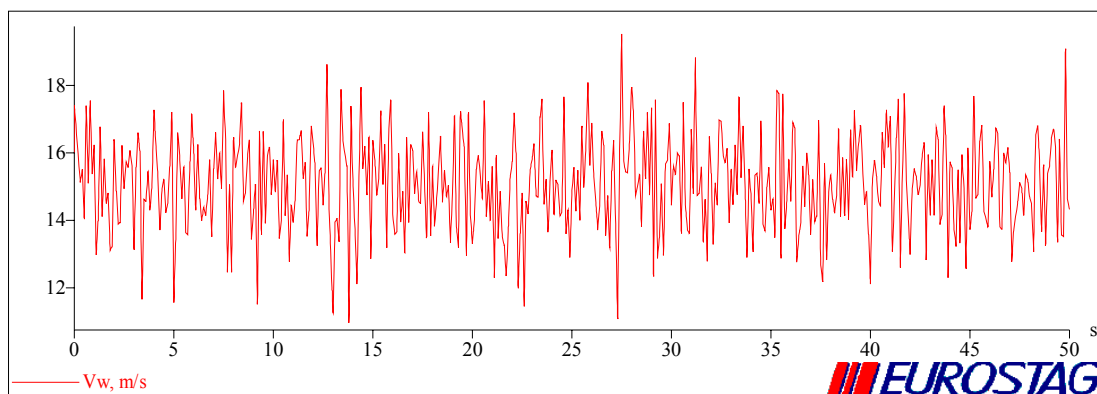
Γράφημα Π3.9 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας.



Γράφημα Π3.10 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

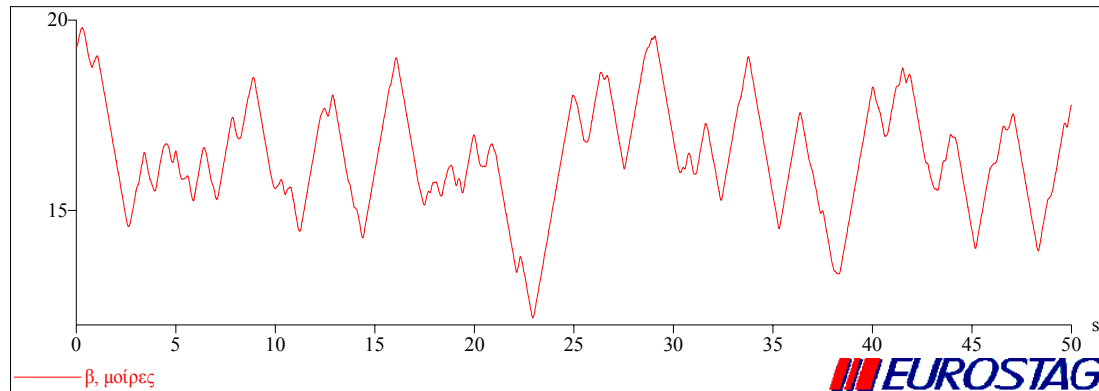
Π3.2 Απόκριση του συστήματος σε άνεμο η ταχύτητα του οποίου αποτελεί κανονική κατανομή Gauss, με μέση τιμή $\mu_{Vw} = 15m/s$ και τυπική απόκλιση $s_{Vw} = 2m/s$

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται όπως στο παρακάτω γράφημα (Π3.11) ενώ οι προσομοιώσεις για αυτό το σενάριο ανέμου ο μέγιστος ρυθμός αλλαγής κλίσης πτερυγίων επιλέχθηκε ίσος με $3^\circ/s$.

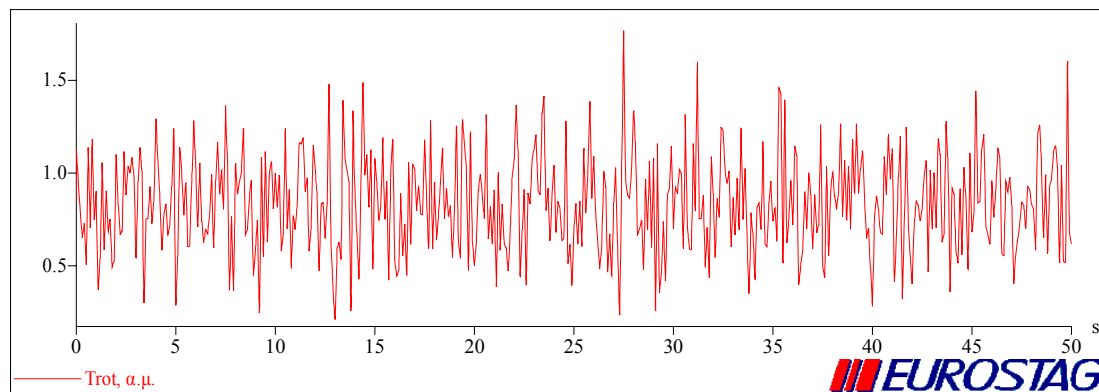


Γράφημα Π3.11 Ταχύτητα του ανέμου.

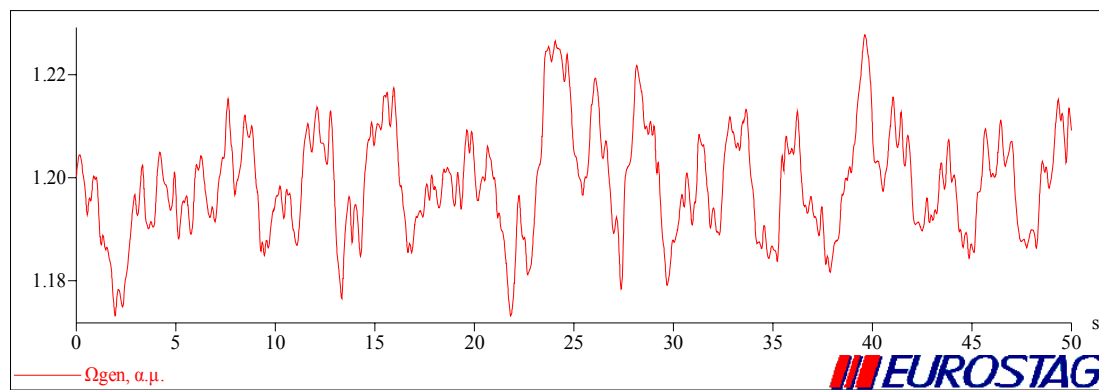
Π3.2.1 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο μιας μάζας και στρατηγική ελέγχου γωνίας βήματος στην οποία το σφάλμα ταχύτητας ελέγχεται μέσω ενός PI – ελεγκτή με έξοδο το σήμα αναφοράς β_{ref}



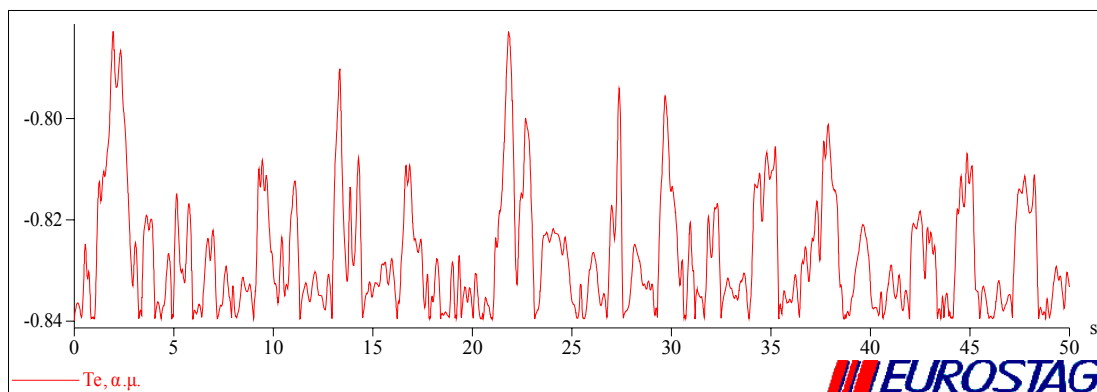
Γράφημα Π3.12 Απόκριση γωνίας βήματος.



Γράφημα Π3.13 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.

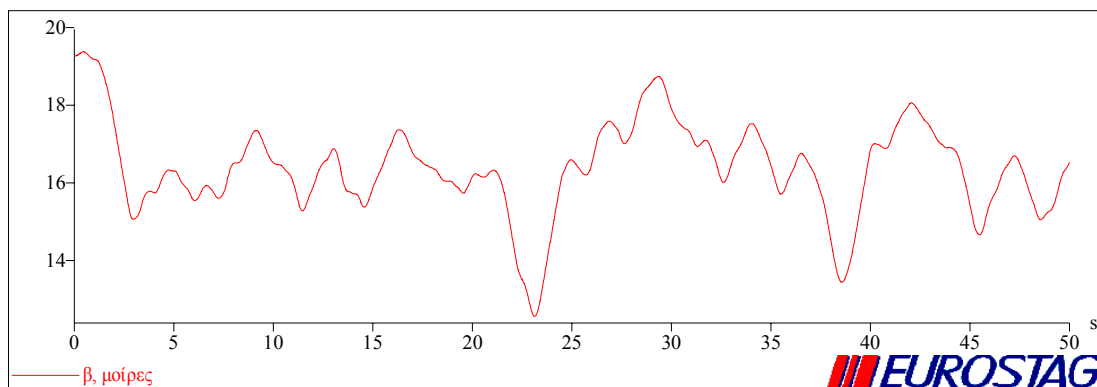


Γράφημα Π3.14 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

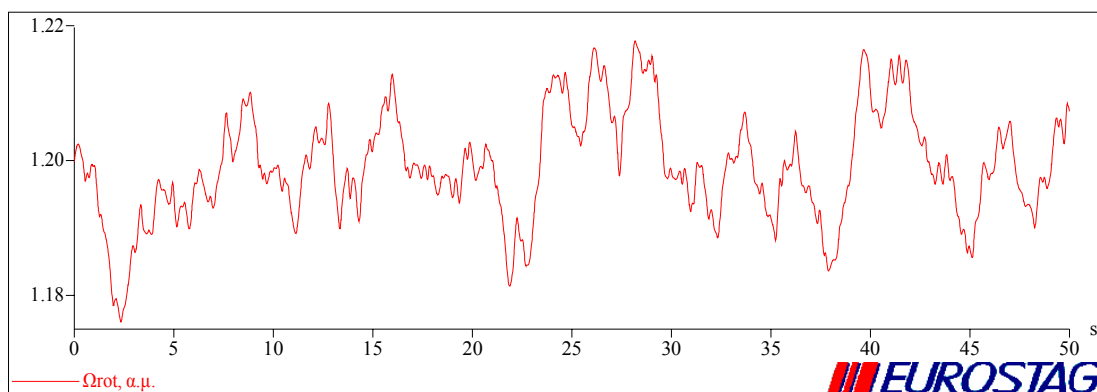


Γράφημα Π3.15 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

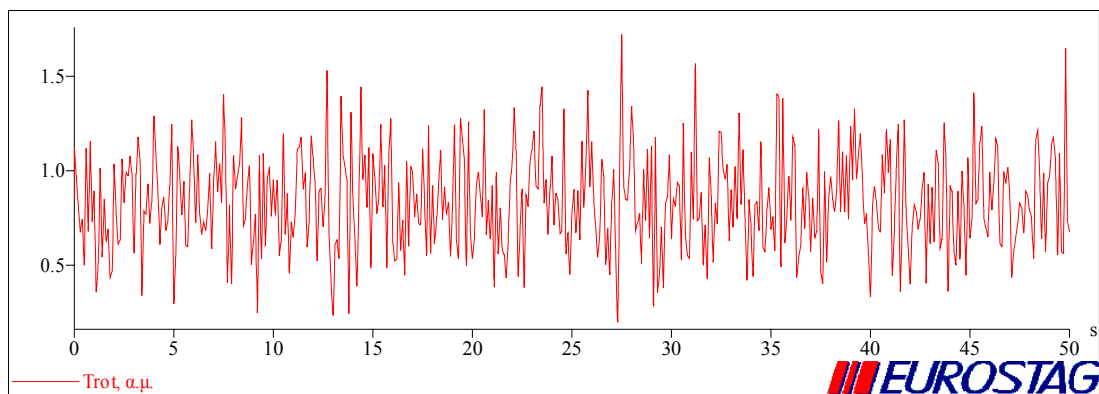
Π3.2.2 Απόκριση του συστήματος με μηχανικό μοντέλο δύο μαζών και παραμετροποίηση του ελεγκτή γωνίας βήματος με χρήση της τεχνικής Gain Scheduling



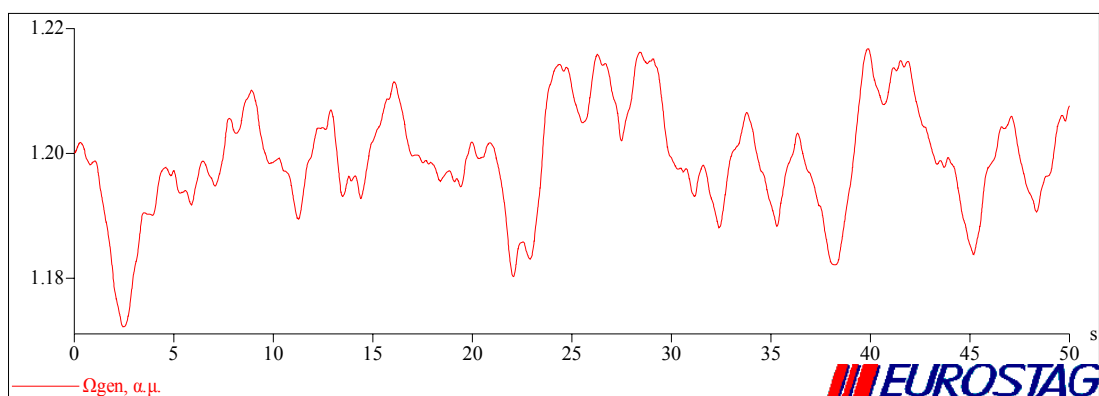
Γράφημα Π3.16 Απόκριση γωνίας βήματος.



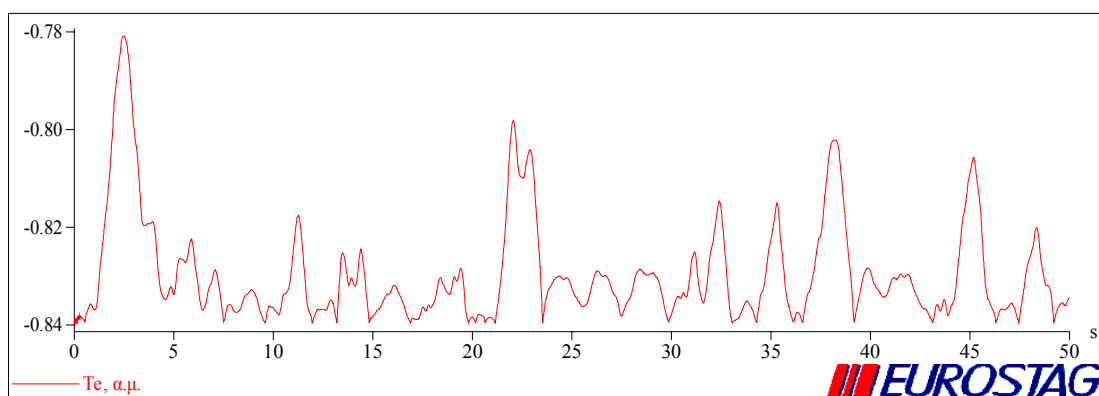
Γράφημα Π3.17 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας αεροδυναμικού άξονα.



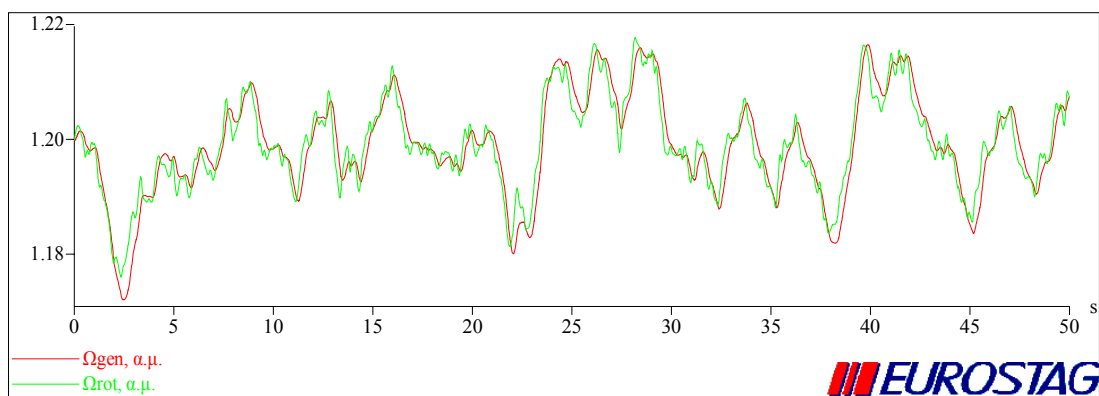
Γράφημα Π3.18 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής.



Γράφημα Π3.19 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας.

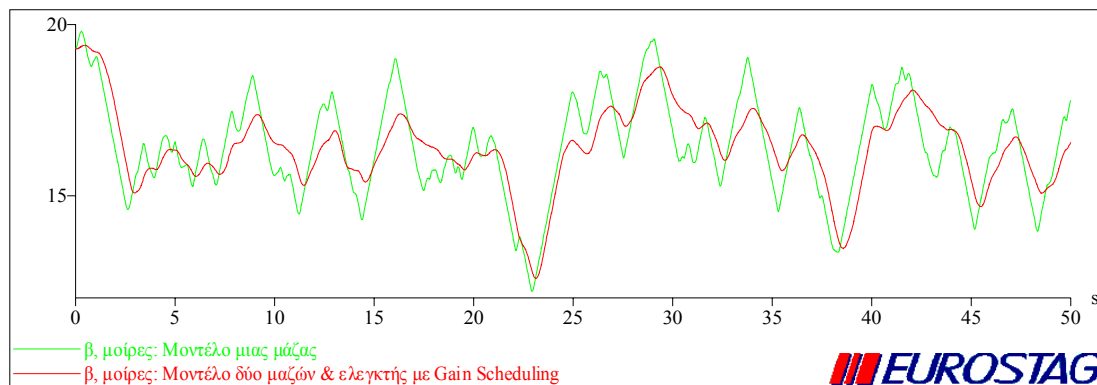


Γράφημα Π3.20 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής.

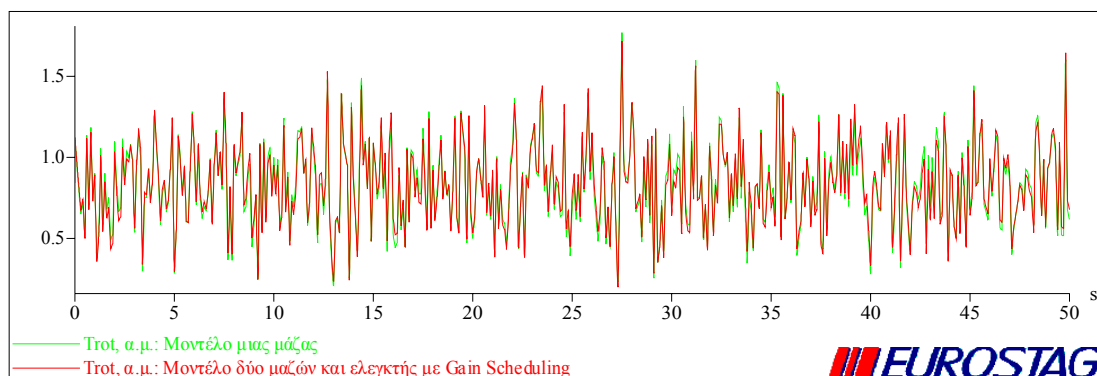


Γράφημα Π3.21 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας του δρομέα της γεννήτριας (κόκκινη καμπύλη) και γωνιακής ταχύτητας του αεροδυναμικού δρομέα (πράσινη καμπύλη).

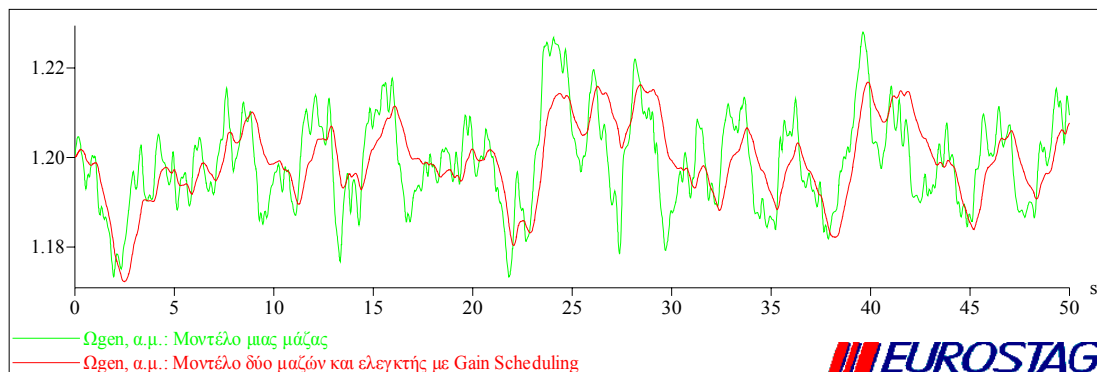
Π3.2.3 Σύγκριση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο διαφορετικών διαμορφώσεων του μηχανικού συστήματος σε άνεμο η ταχύτητα του οποίου αποτελεί κανονική κατανομή Gauss, με μέση τιμή $\mu_{Vw} = 15m/s$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{Vw} = 2m/s$



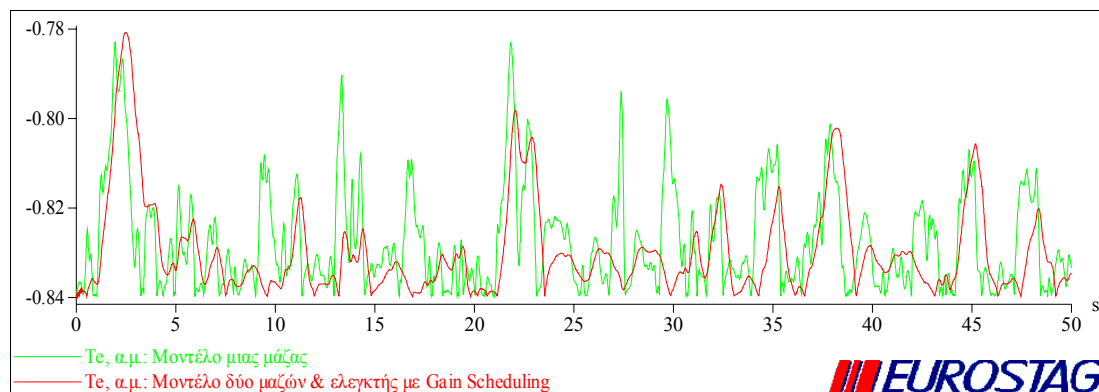
Γράφημα Π3.22 Απόκριση γωνίας βήματος: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα Π3.23 Απόκριση αεροδυναμικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα Π3.24 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.



Γράφημα Π3.25 Απόκριση ηλεκτρικής ροπής: Συγκριτικά αποτελέσματα με χρήση του μηχανικού μοντέλου μιας μάζας (πράσινη καμπύλη) και του μοντέλου δύο μαζών (κόκκινη καμπύλη) εφοδιασμένο με ελεγκτή με Gain Scheduling.

Εδώ η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου είναι εξαιρετικά γρήγορη. Το σύστημα αλλαγής κλίσης των πτερυγίων δεν προλαβαίνει να δώσει τη σωστή, με βάση τον έλεγχο, τιμή γωνίας. Ωστόσο, μια βασική διαφορά υφίσταται στις αποκρίσεις των δύο διαμορφώσεων του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας. Η απόκριση του παραμετροποιημένου με την τεχνική Gain Scheduling ελεγκτή, είναι πολύ καλύτερη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στη τελευταία περίπτωση το κέρδος του ελεγκτή είναι ουσιαστικά μια συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου. Ως αποτέλεσμα, τα μη γραμμικά αεροδυναμικά χαρακτηριστικά ουσιαστικά εξαλείφονται και η απόκριση της γωνίας βήματος χαρακτηρίζεται από μια «ομαλότερη» καμπύλη. Αυτή η απόκριση της γωνίας βήματος, οδηγεί με τη σειρά της σε καλύτερη απόκριση της γωνιακής ταχύτητας και επομένως και της ηλεκτρικής ροπής.

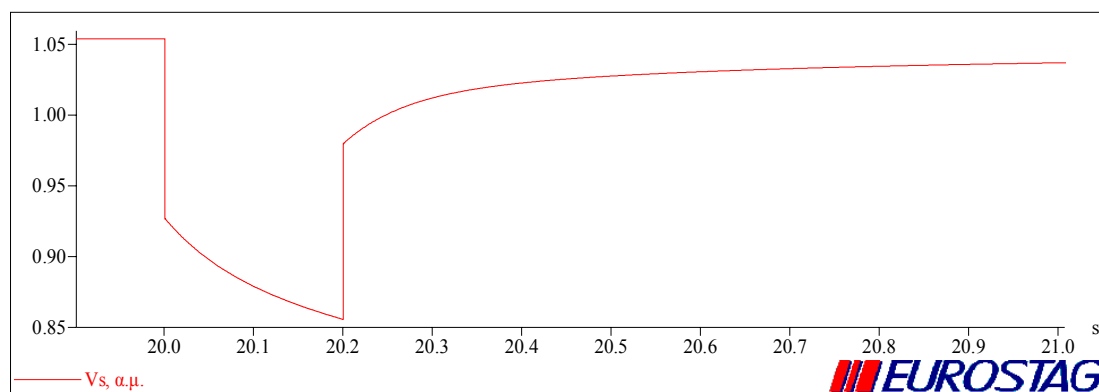
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4

Προσομοιώσεις της δυναμικής απόκρισης του συστήματος σε διάφορα σενάρια βύθισης τάσεως

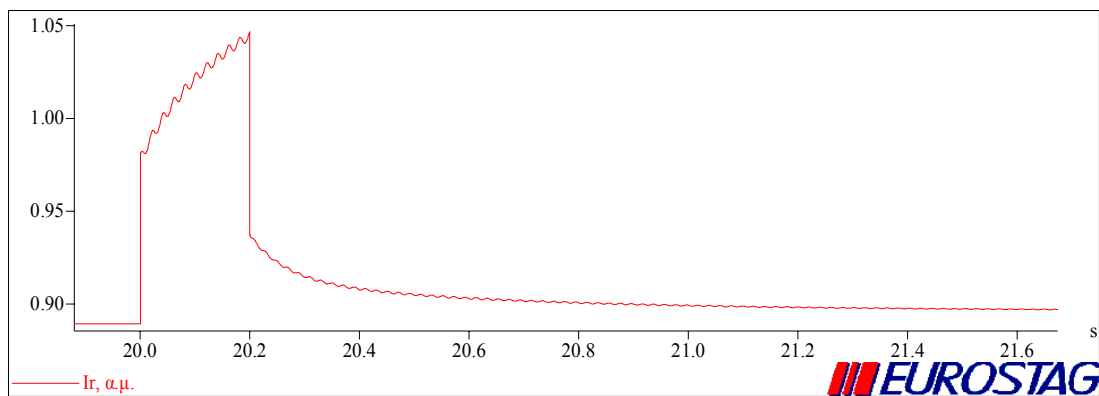
Στις προσομοιώσεις των σεναρίων που ακολουθούν, σκοπός αποτελεί η ανάλυση της απόκρισης του συστήματος σε συγκεκριμένα σενάρια βύθισης τάσεως. Επομένως, μόνο το σύστημα προστασίας θεωρείται ενεργό σε αυτές. Με άλλα λόγια, τόσο ο αυτόματος ρυθμιστής τάσης όσο και η έγχυση άεργου ισχύος από τον μετατροπέα στη πλευρά του δικτύου στο δίκτυο, δεν λαμβάνονται υπόψη.

Π4.1 Απόκριση του συστήματος σε μικρή βύθιση της τάσης

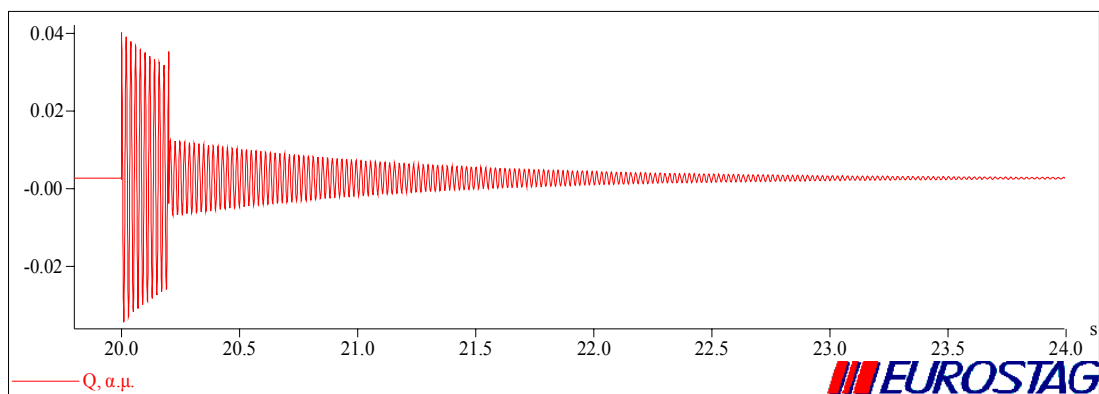
Στο συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμόζεται μια μικρή βύθιση τάσης στον τερματικό ζυγό της γεννήτριας η οποία δεν οδηγεί σε ενεργοποίηση του μηχανισμού Crowbar. Η βύθιση αυτή πραγματοποιείται εξαιτίας της σύνδεσης επαγωγικού φορτίου τη χρονική στιγμή 20 s. Η αποσύνδεση του φορτίου λαμβάνει χώρα τη στιγμή 20.2 s.



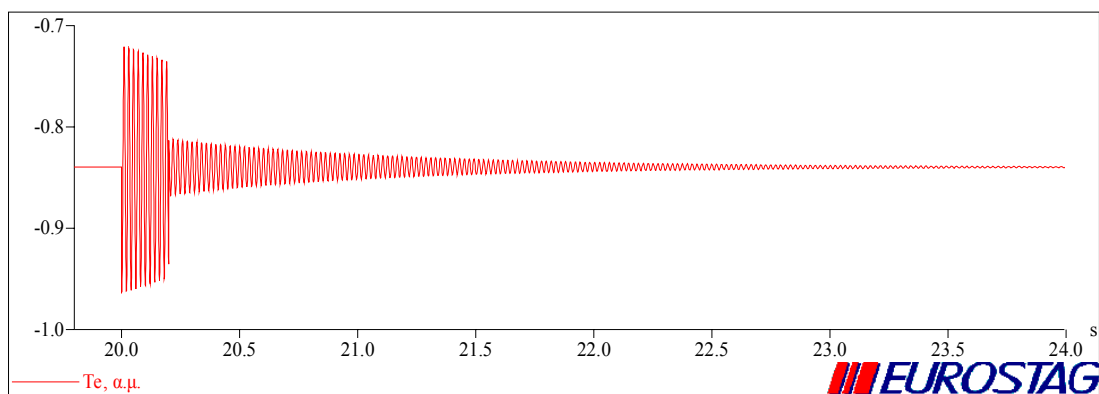
Γράφημα Π4.1 Απόκριση τερματικής τάσης (μικρή βύθιση).



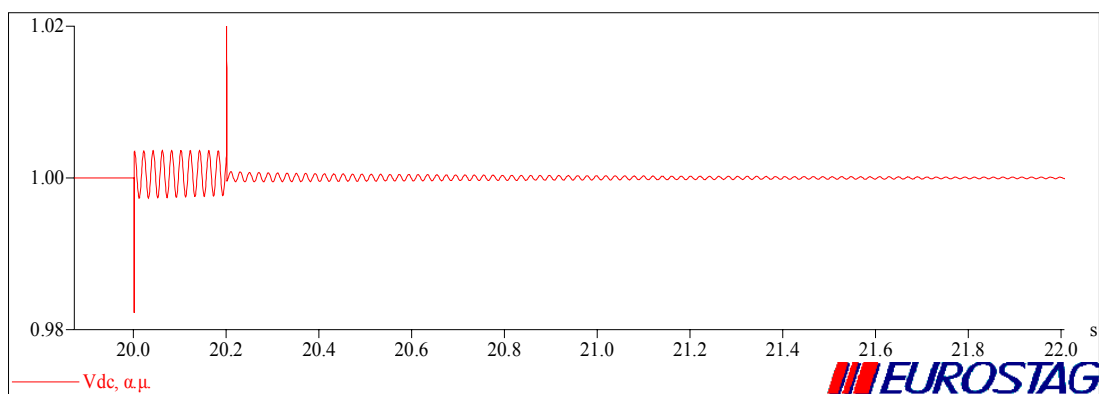
Γράφημα Π4.2 Απόκριση ρεύματος δρομέα.



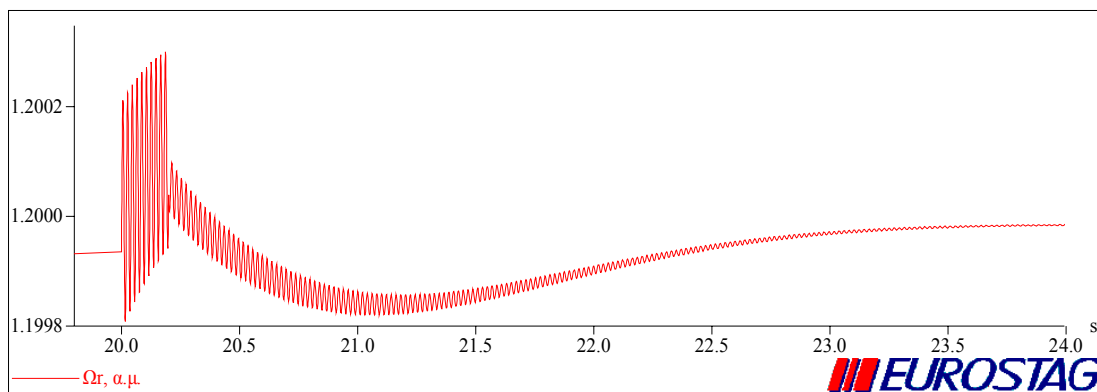
Γράφημα Π4.3 Απόκριση άεργου ισχύος.



Γράφημα Π4.4 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα Π4.5 Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.

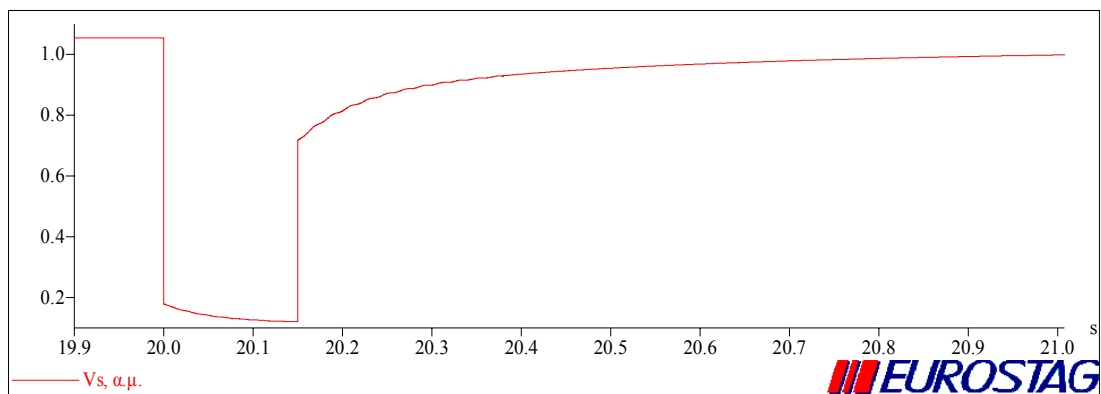


Γράφημα Π4.6 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

Λόγω μικρής βύθισης της τάσης δεν ενεργοποιείται ο μηχανισμός προστασίας του μετατροπέα οπότε η μηχανή συνεχίζει και λειτουργεί κανονικά με έλεγχο από το μετατροπέα. Όσο η τάση είναι χαμηλή τα ρεύματα αυξάνονται, προκαλώντας και τα μεταβατικά στην άεργο ισχύ και την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Είναι ευδιάκριτες οι ταλαντώσεις θεμελιώδους συχνότητας στα ηλεκτρικά μεγέθη της γεννήτριας, γεγονός που οφείλεται στην μοντελοποίηση της γεννήτριας με το μοντέλο 5^{ης} τάξης, δηλαδή με τα μεταβατικά του στάτη να συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο.

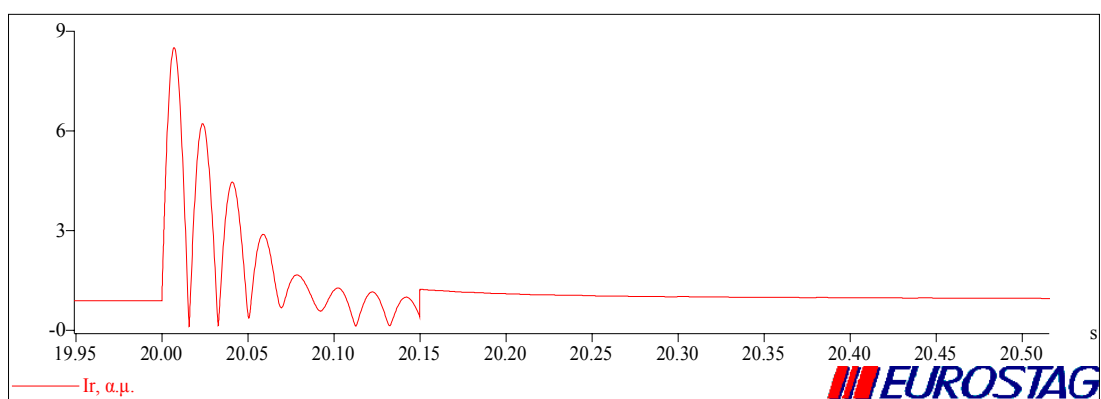
Π4.2 Απόκριση του συστήματος σε σημαντική βύθιση της τάσης-παραμετρική μελέτη

Εδώ εφαρμόστηκε βύθιση στην τερματική τάση η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα (Π4.7). Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τέσσερις διαφορετικές τιμές της αντίστασης του Crowbar. Η ενεργοποίηση του Crowbar πραγματοποιείται όταν το ρεύμα του δρομέα ή η τάση της DC σύνδεσης ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή. Για την αποφυγή εκ νέου ενεργοποίησης του Crowbar κατά τη διάρκεια που το σφάλμα δεν έχει ακόμη «καθαριστεί», επιλέχθηκε η απενεργοποίηση του Crowbar να γίνεται όταν η τάση ξεπεράσει την τιμή 0.6 α.μ., τιμή η οποία εξασφαλίζει την εκκαθάριση του βραχυκυκλώματος.

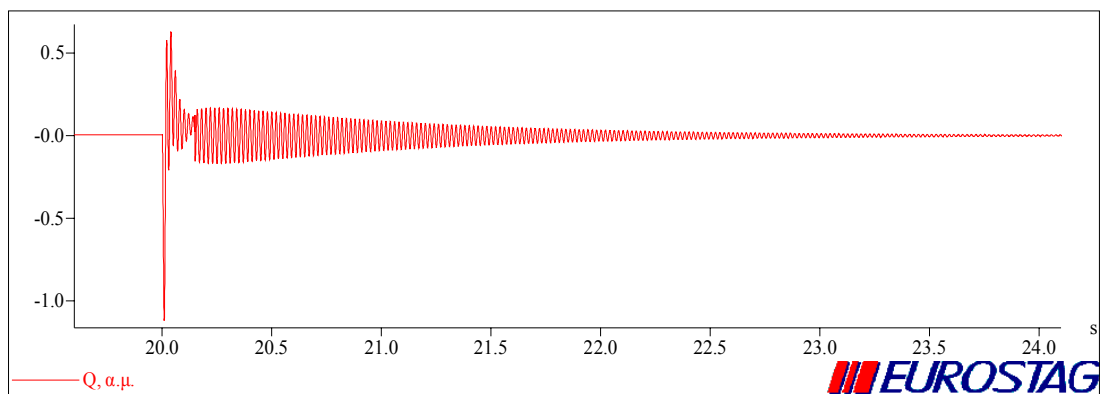


Γράφημα Π4.7 Απόκριση τερματικής τάσης (σημαντική βύθιση).

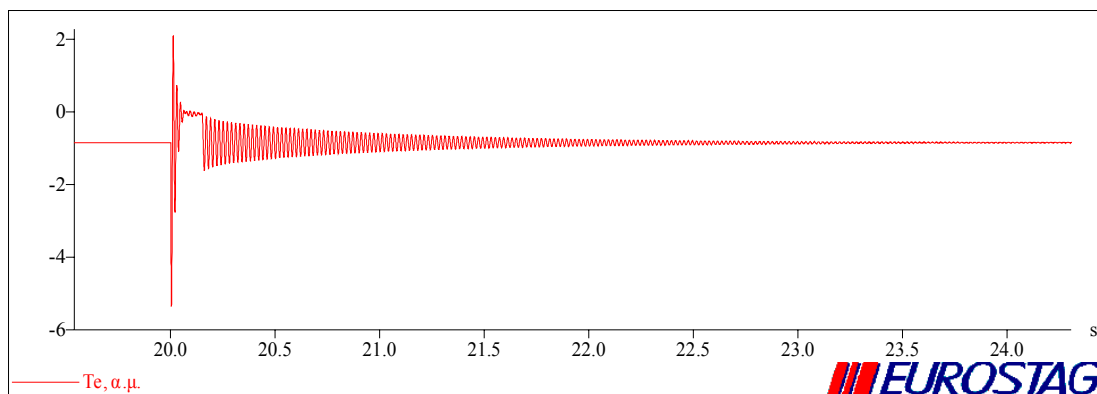
- $R_c = 0.01$ α.μ.



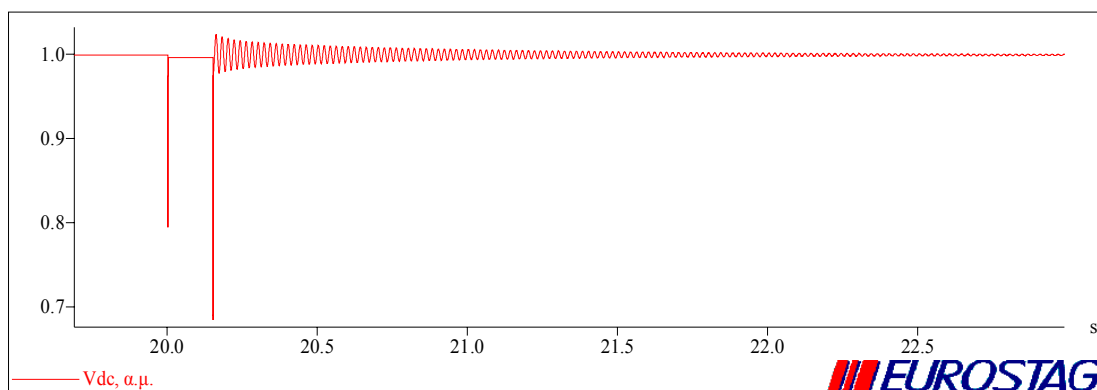
Γράφημα Π4.8 Απόκριση ρεύματος δρομέα.



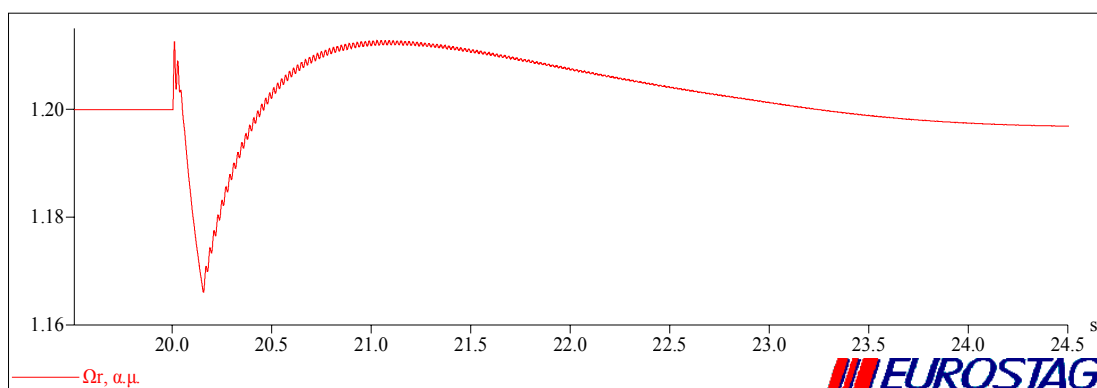
Γράφημα Π4.9 Απόκριση άεργου ισχύος.



Γράφημα Π4.10 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα Π4.11 Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.

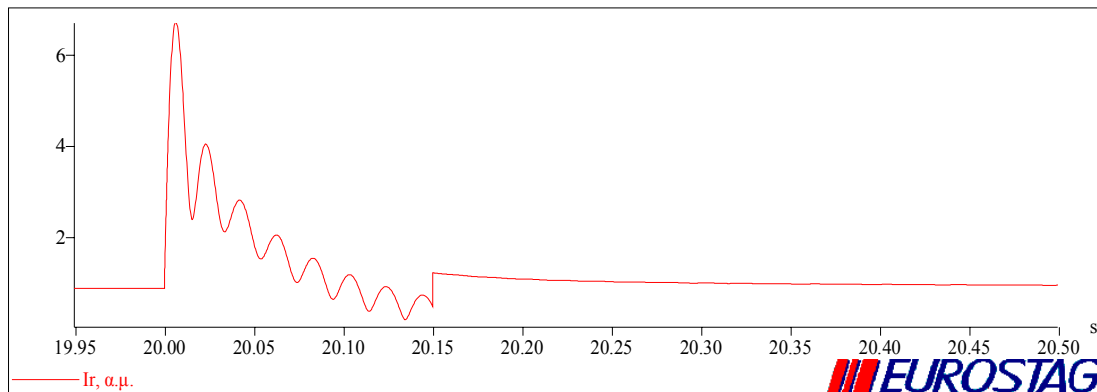


Γράφημα Π4.12 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

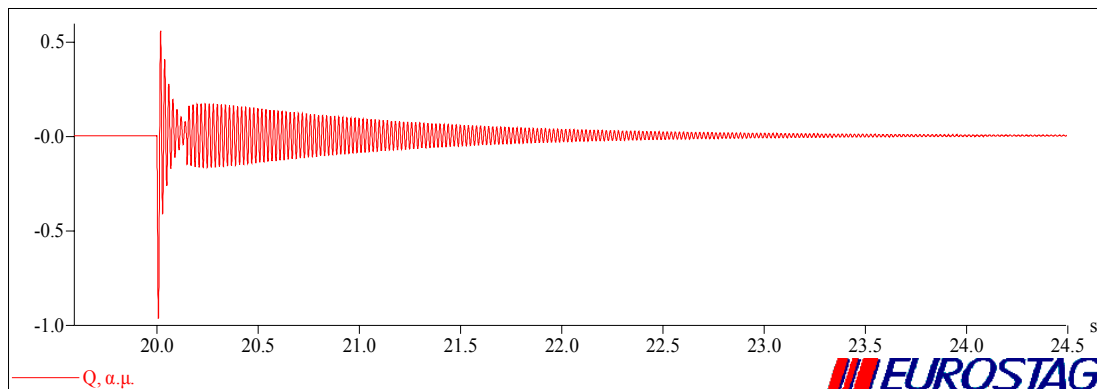
Αμέσως μετά την εμφάνιση του σφάλματος, το Crowbar ενεργοποιείται εξ' αιτίας του υψηλού ρεύματος δρομέα. Όσο ο δρομέας είναι βραχυκυκλωμένος μέσω της αντίστασης του Crowbar, η μηχανή συμπεριφέρεται σαν απλή μηχανή επαγωγής. Λόγω της μεγάλης ολίσθησης, η μεταβολή της άεργου ισχύος κατά τη διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου είναι μεγάλη. Κατά τη διάρκεια της φάσης σβέσης του ρεύματος δρομέα η DC τάση αυξομειώνεται, ενώ όταν η μηχανή επιστρέψει σε κανονική λειτουργία, η τάση επανέρχεται στην ονομαστική της τιμή μέσω της δράσης του PI ελεγκτή. Ο δρομέας επίσης επιταχύνεται καθώς η μεγάλη βύθιση της τάσης

οδηγεί σε μείωση της ροής της μηχανής και επομένως της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Καθώς η ταχύτητα του δρομέα υπερβαίνει την προβλεπόμενη τιμή, ο έλεγχος της γωνίας βήματος αυξάνει την γωνία ώστε να εξάγεται λιγότερη ισχύ από τον άνεμο και να αποφεύγεται η επιτάχυνση του δρομέα. Αυτό οδηγεί στο μεταβατικό που διαρκεί αρκετά *sec* μετά την αποκατάσταση της τάσης.

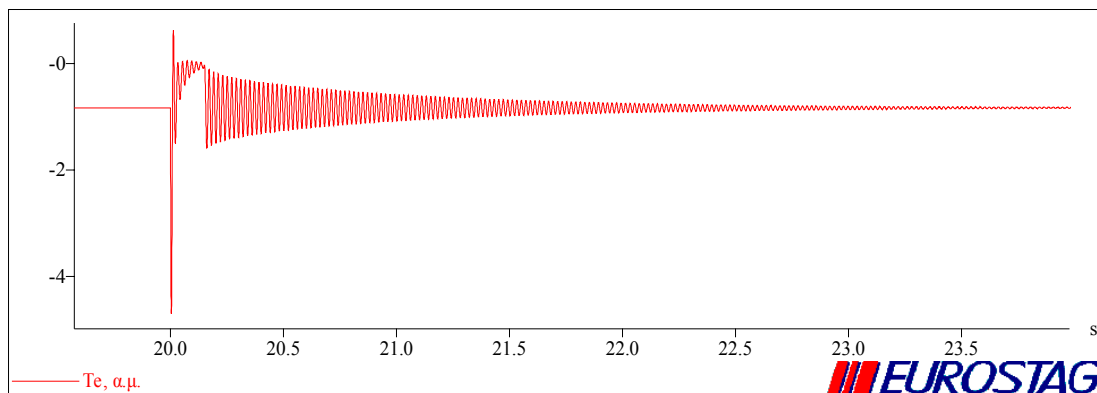
- $R_c = 0.05$ α.μ.



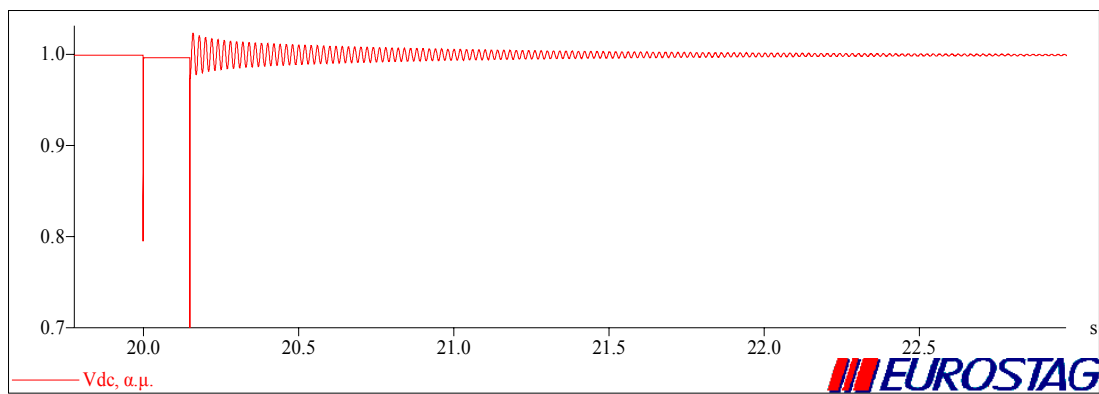
Γράφημα Π4.13 Απόκριση ρεύματος δρομέα.



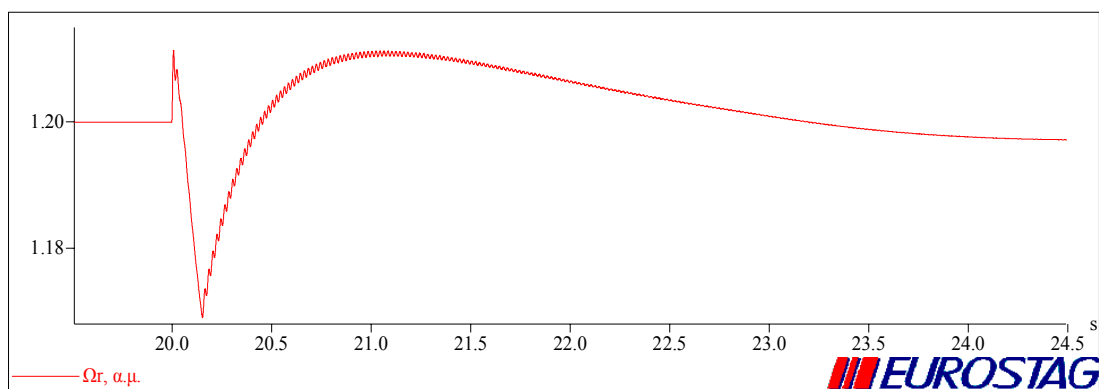
Γράφημα Π4.14 Απόκριση άεργου ισχύος.



Γράφημα Π4.15 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

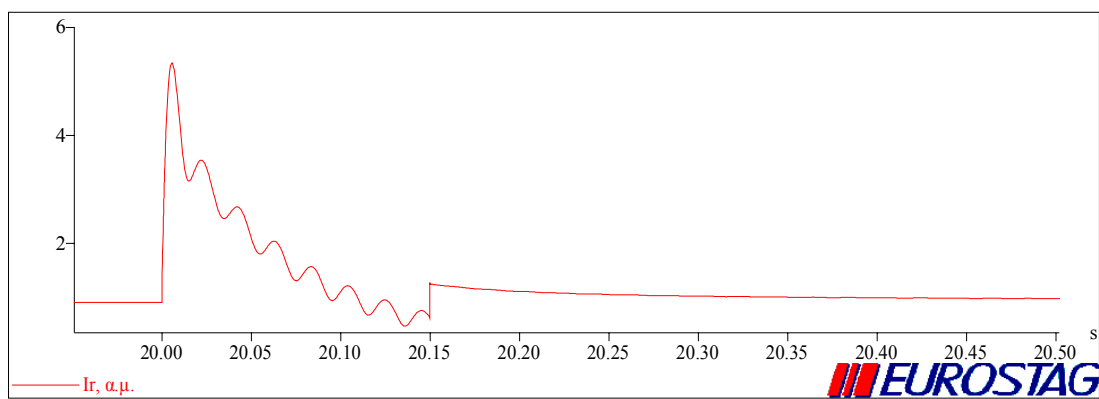


Γράφημα Π4.16 Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.

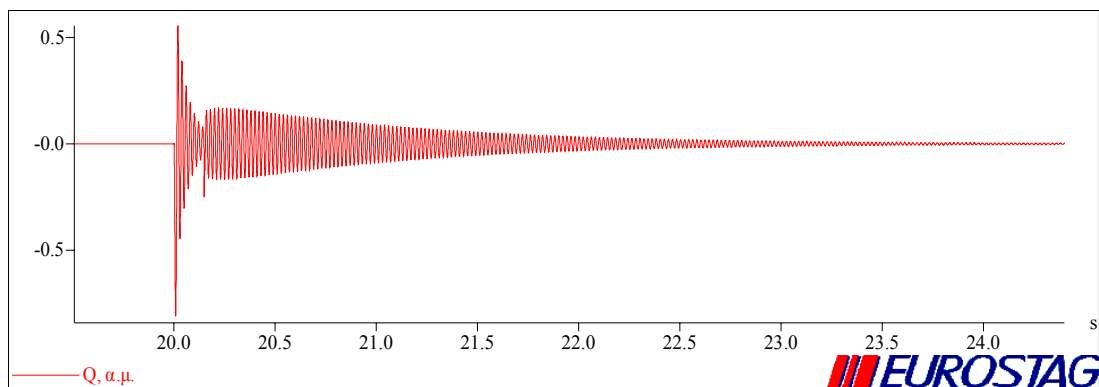


Γράφημα Π4.17 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

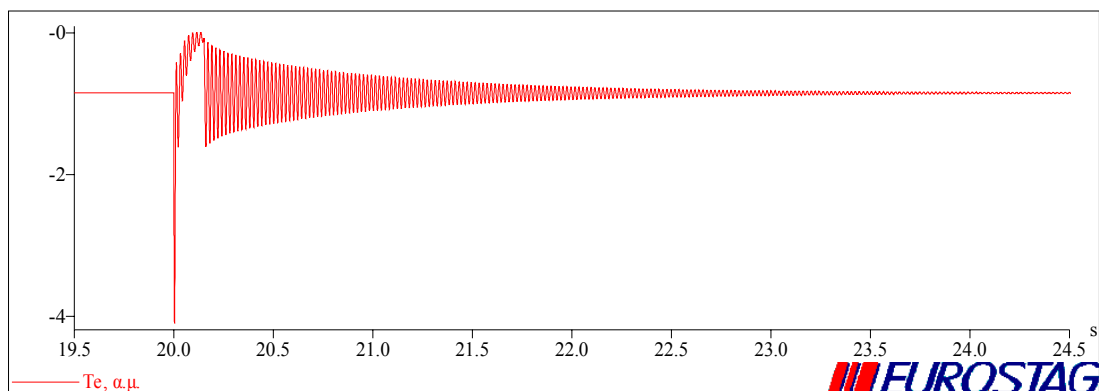
- $R_c = 0.1$ α.μ.



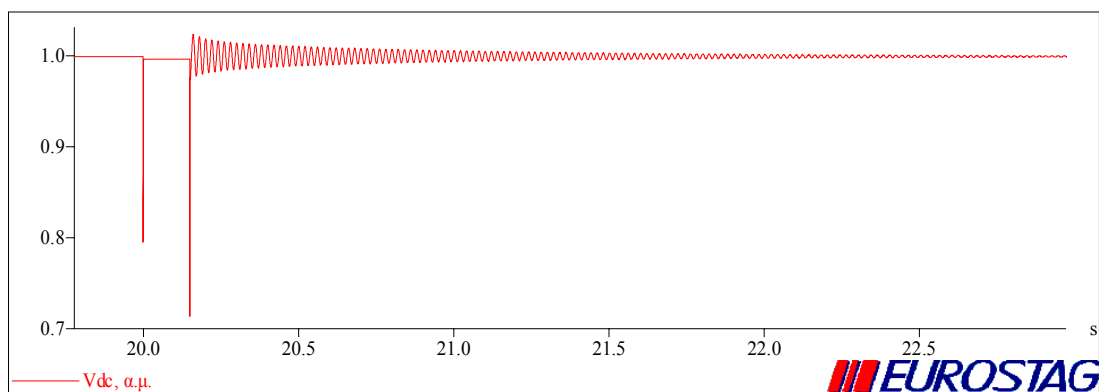
Γράφημα Π4.18 Απόκριση ρεύματος δρομέα.



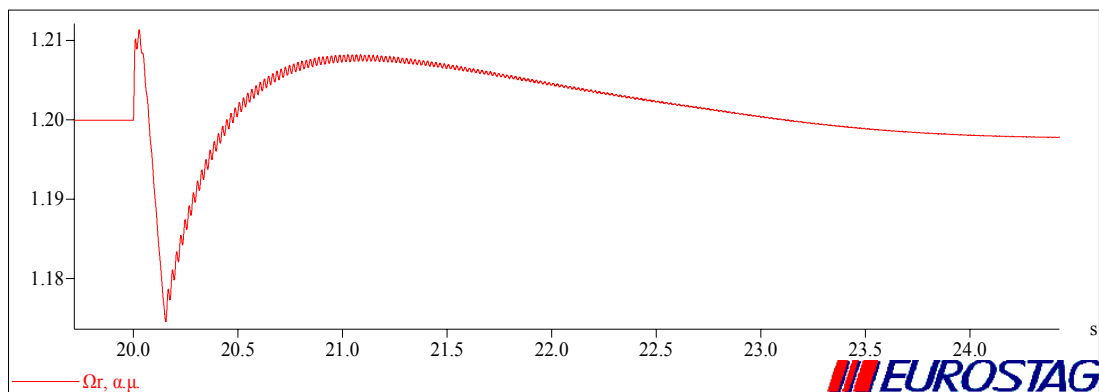
Γράφημα Π4.19 Απόκριση άεργου ισχύος.



Γράφημα Π4.20 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



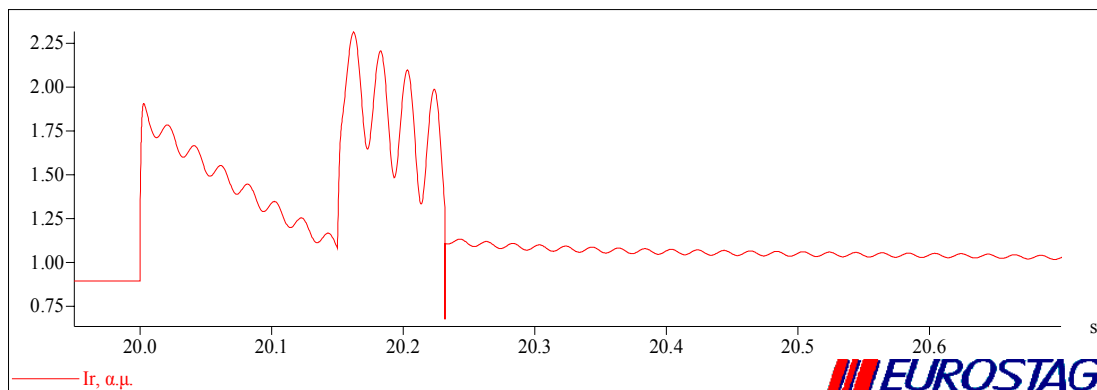
Γράφημα Π4.21 Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.



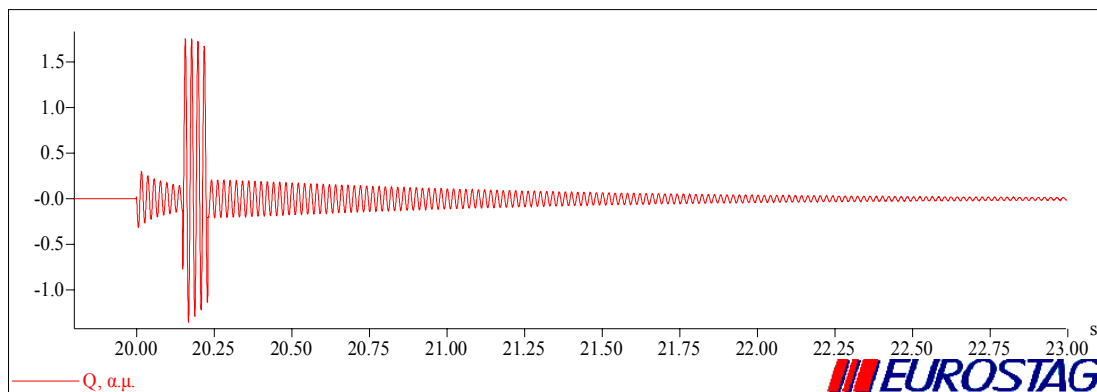
Γράφημα Π4.22 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

- $R_c = 0.5 \text{ α.μ.}$

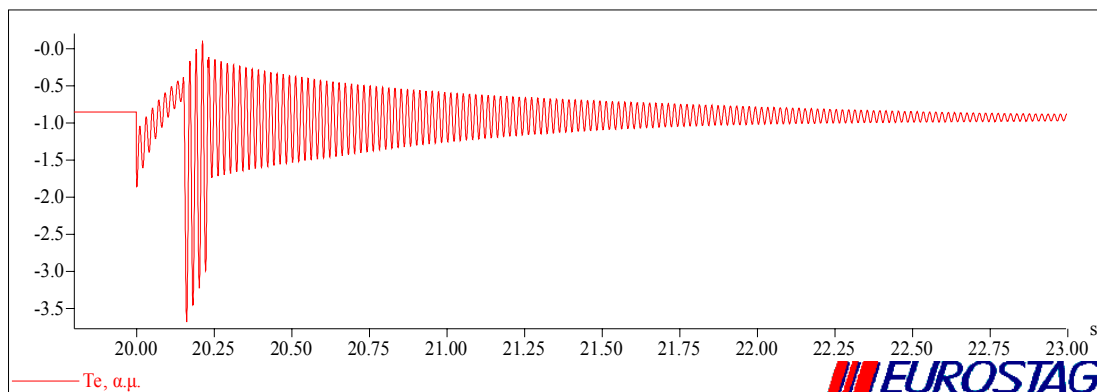
Με αυτή την τιμή της αντίστασης του Crowbar, όπως φαίνεται και στα γραφήματα που ακολουθούν, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα τη στιγμή του βραχυκυκλώματος δεν ξεπερνάει τη 2 α.μ.. Ωστόσο μετά την απενεργοποίηση του Crowbar την πρώτη φορά, το ρεύμα δρομέα αρχίζει να αυξάνεται και πάλι οδηγώντας σε δεύτερη ενεργοποίηση του Crowbar οπότε ακολουθεί στη συνέχεια τη γνωστή λειτουργία έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 7.



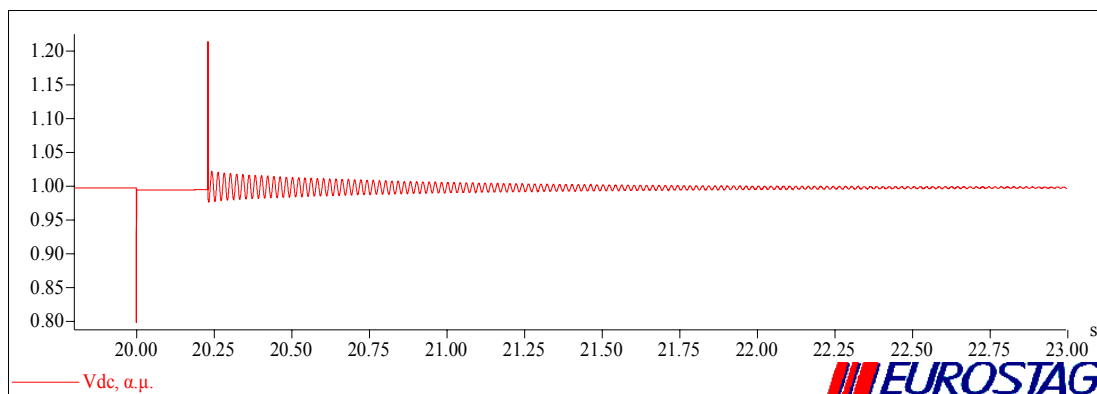
Γράφημα Π4.23 Απόκριση ρεύματος δρομέα.



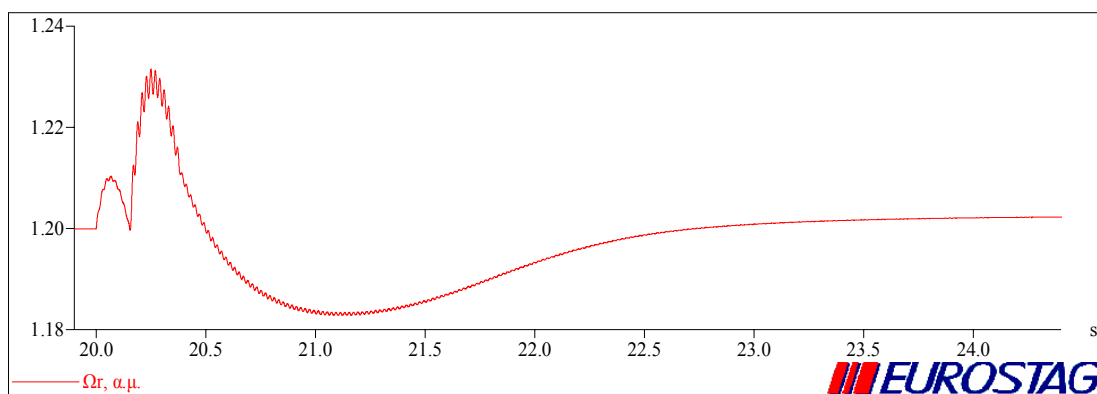
Γράφημα Π4.24 Απόκριση άεργου ισχύος.



Γράφημα Π4.25 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

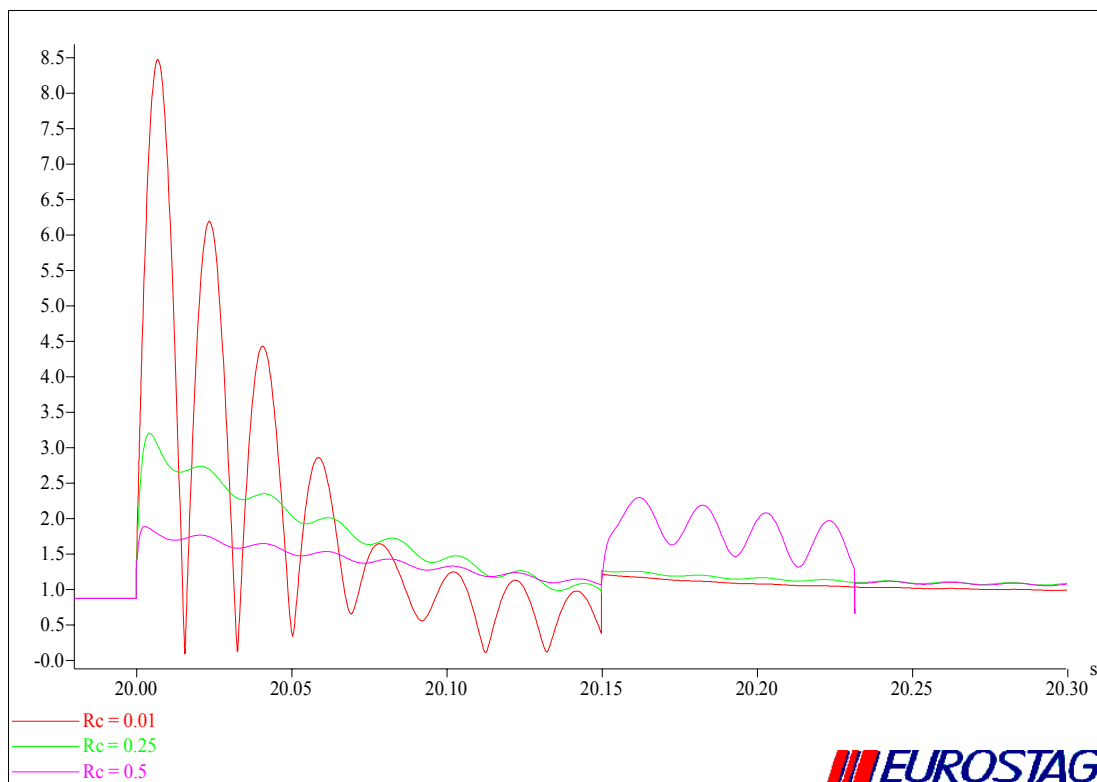


Γράφημα Π4.26 Απόκριση DC τάσης στο μετατροπέα.



Γράφημα Π4.27 Απόκριση γωνιακής ταχύτητας.

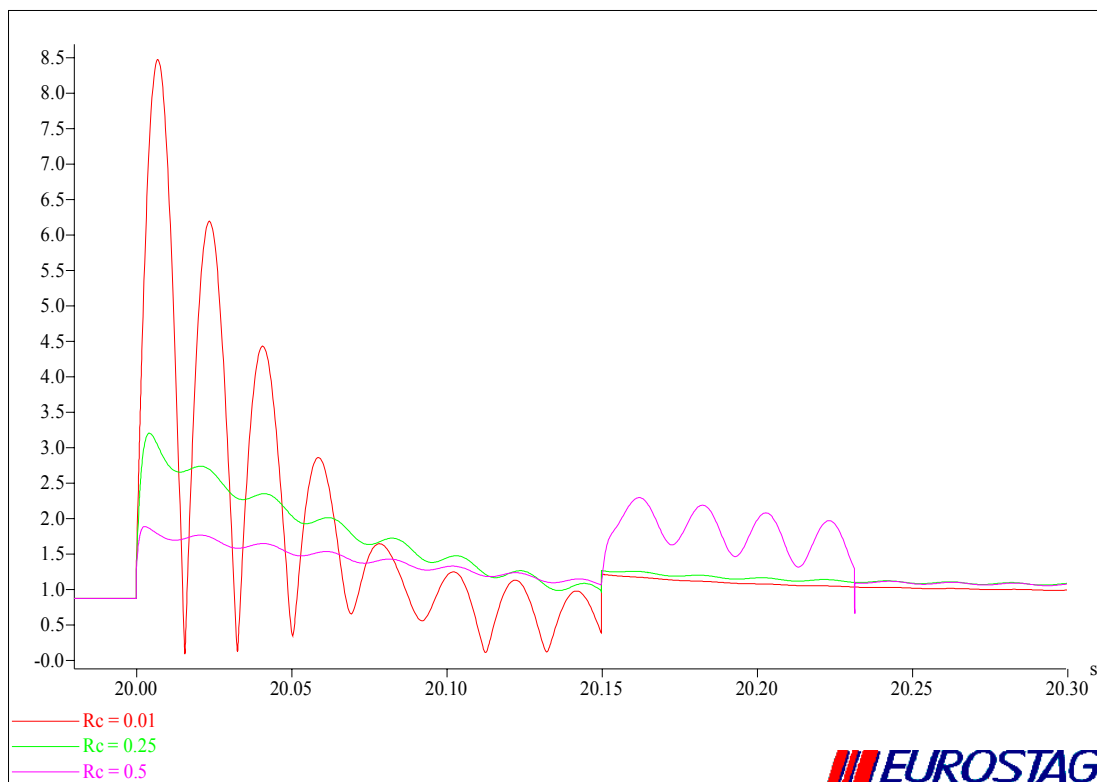
Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές της αντίστασης Crowbar, μπορούμε να πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα ως προς το ρεύμα του δρομέα.



Γράφημα Π4.28 Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c .

Π4.3 Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης και σε υψηλό άνεμο-παραμετρική μελέτη

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη λειτουργία του LVRT σε συνθήκες υψηλού ανέμου. Μέχρι τώρα όλα τα παραπάνω γραφήματα έχουν εξαχθεί για ταχύτητα ανέμου $V_w = 13m/s$. Το διάγραμμα που ακολουθεί αφορά σύστημα που λειτουργεί σε συνθήκες ανέμου $V_w = 17m/s$ και με βύθιση στην τερματική τάση ίδια με αυτή του γραφήματος (Π4.7). Η αντίσταση του Crowbar έχει ρυθμιστεί σε 0.1 α.μ..

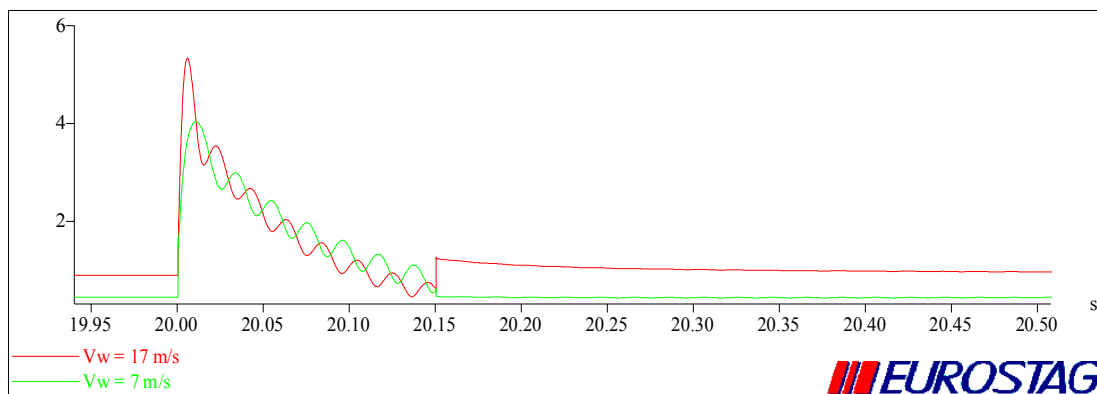


Γράφημα Π4.29 Απόκριση ρεύματος δρομέα για διάφορες τιμές της αντίστασης R_c με ταχύτητα ανέμου $V_w = 17\text{m/s}$.

Προκύπτει δηλαδή από τα παραπάνω ότι η συμπεριφορά του συστήματος σε συνθήκες βύθισης τάσης είναι η ίδια ανεξάρτητα από την ταχύτητα ανέμου.

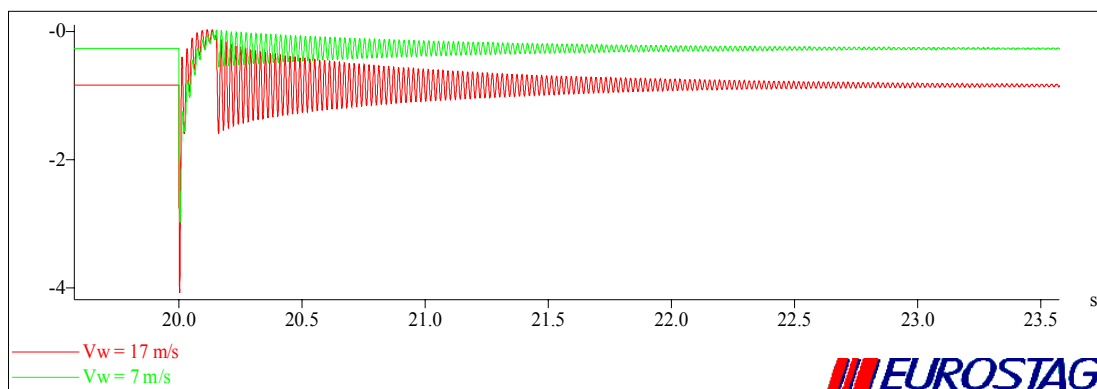
Π4.4 Σύγκριση της απόκρισης του συστήματος σε βύθιση της τάσης σε χαμηλό και υψηλό άνεμο – παραμετρική μελέτη

Εφαρμόζοντας την ίδια βύθιση τάσης αλλά σε χαμηλότερο άνεμο, $V_w = 7\text{m/s}$, παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα. Η αντίσταση του Crowbar έχει ρυθμιστεί σε 0.1 α.μ..



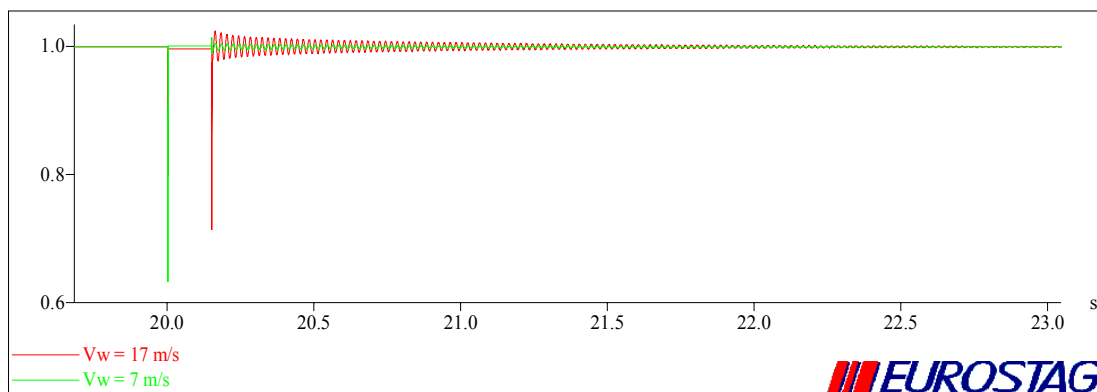
Γράφημα Π4.30 Απόκριση ρεύματος δρομέα: συγκριτικά αποτελέσματα για ταχύτητα ανέμου

$V_w = 17 \text{ m/s}$ (κόκκινη καμπύλη) και $V_w = 7 \text{ m/s}$ (πράσινη καμπύλη.)



Γράφημα Π4.31 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής: συγκριτικά αποτελέσματα για ταχύτητα

ανέμου $V_w = 17 \text{ m/s}$ (κόκκινη καμπύλη) και $V_w = 7 \text{ m/s}$ (πράσινη καμπύλη.)



Γράφημα Π4.32 Απόκριση DC τάσης μετατροπέα: συγκριτικά αποτελέσματα για ταχύτητα

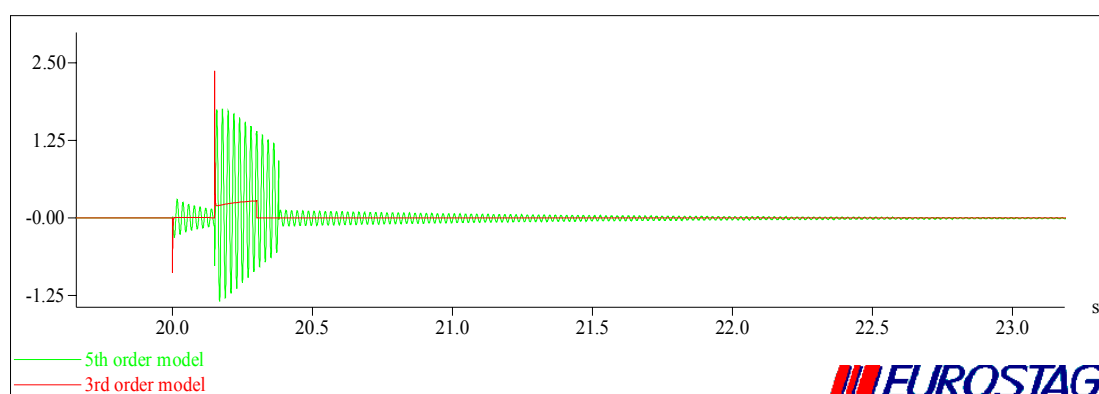
ανέμου $V_w = 17 \text{ m/s}$ (κόκκινη καμπύλη) και $V_w = 7 \text{ m/s}$ (πράσινη καμπύλη.)

Προκύπτει δηλαδή, ότι αν και εφαρμόζεται η ίδια βύθιση τάσης το ρεύμα που αναπτύσσεται ενεργοποιεί το σύστημα προστασίας αλλά η μέγιστη του τιμή είναι μικρότερη. Δηλαδή, στην περίπτωση χαμηλής ταχύτητας του ανέμου ($V_w = 7 \text{ m/s}$) ο κίνδυνος για τον μετατροπέα είναι σχετικά μικρότερος. Επίσης η ταλάντωση του σήματος της DC τάσης του μετατροπέα είναι μικρότερη και διαρκεί λιγότερο, πράγμα το οποίο ισχύει και για το ηλεκτρικό σήμα της ηλεκτρομαγνητικής ροπής.

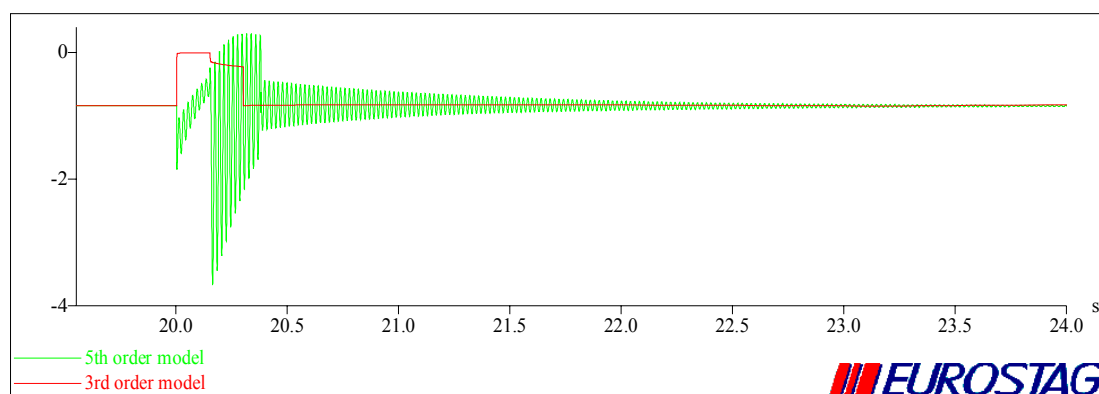
Π4.5 Απόκριση του συστήματος σε βύθιση της τάσης – σύγκριση αποτελεσμάτων με χρήση μοντέλου 5^{ης} και μοντέλου 3^{ης} τάξης

Στο σημείο αυτό επιχειρήθηκε να δοθούν κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων με βύθιση τάσης έτσι ώστε να προκύψουν συμπεράσματα γύρω από το ζήτημα αγνόησης των μεταβατικών του στάτη. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που ακολουθούν έχουν ληφθεί από προσομοιώσεις, στις οποίες ο άνεμος είναι σταθερός και ίσος με την τιμή που είχε στην αρχικοποίηση, δηλαδή $V_w = 13\text{m/s}$.

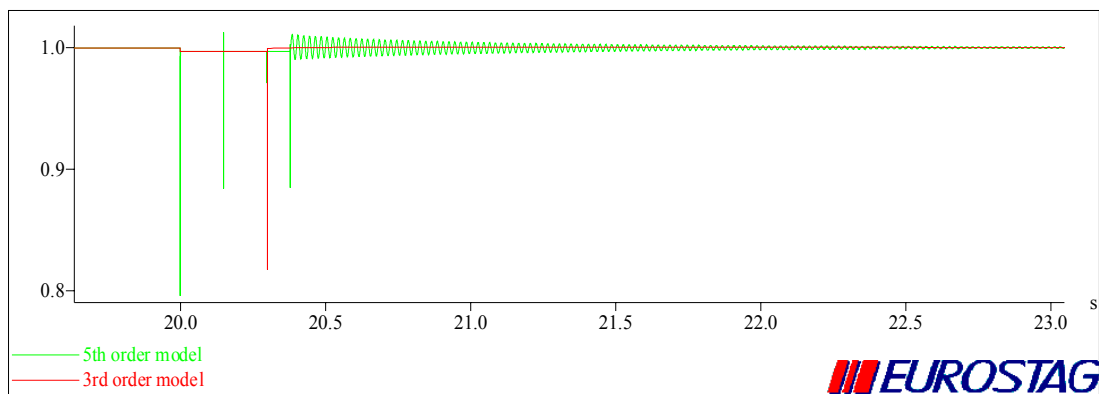
Εφαρμόζοντας βύθιση τάσης στον τερματικό ζυγό (Π4.7) και έχοντας ρυθμίσει την αντίσταση του Crowbar σε 0.5 α.μ. προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Είναι ευδιάκριτα στα γραφήματα που ακολουθούν τα μεταβατικά των 50Hz στο μοντέλο 5^{ης} τάξης σε σχέση με το μοντέλο 3^{ης} τάξης.



Γράφημα Π4.33 Απόκριση άεργου ισχύος.

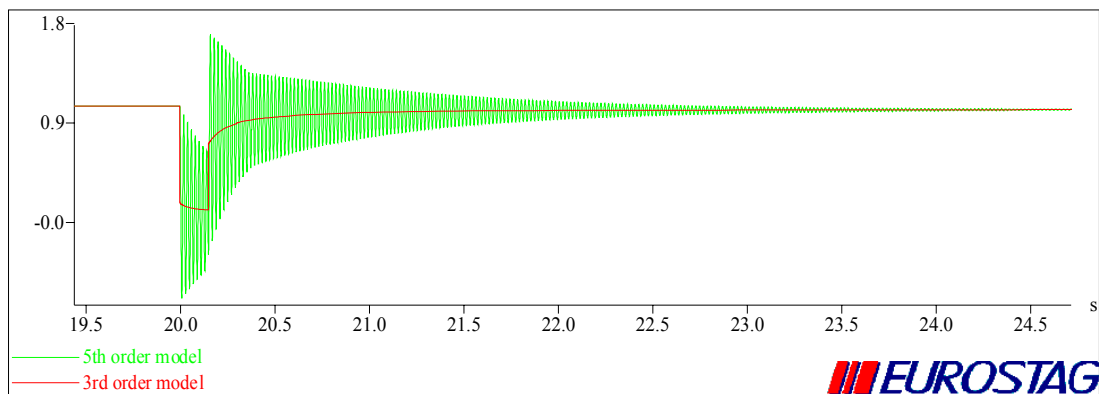


Γράφημα Π4.34 Απόκριση ηλεκτρομαγνητικής ροπής.



Γράφημα Π4.35 Απόκριση DC τάσης του μετατροπέα.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η απόκριση της συνιστώσας της ροής του στάτη στον άξονα d . Φαίνονται ευδιάκριτα τα μεταβατικά θεμελιώδους συνιστώσας (50 Hz) που εμφανίζονται στο μοντέλο 5^{ης} τάξης.



Γράφημα Π4.36 Απόκριση της συνιστώσας της ροής του στάτη στον άξονα d .

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Akhmatov V.**, “*Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power*”, PhD thesis, Ørsted DTU, Denmark, 2003.
- [2] **Hansen A.D., Jauch C., Sørensen P., Iov F., Blaabjerg F.**, “*Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT*”, Risoe Report R-1400(EN), Risø National Laboratory, Denmark, 2003.
- [3] **Iov F., Hansen A.D., Sørensen P., Blaabjerg F.**, “*Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink General Overview and Description of the Models*”, Aalborg University, Denmark 2004.
- [4] **Gabriele Michalke**, “*Variable Speed Wind Turbines – Modeling, Control, and Impact on Power Systems*”, Department for Renewable Energies, Institute of Electrical Power Systems, RisØ Wind Energy Department, RisØ National Laboratory, PhD Thesis, Darmstadt Technical University, Germany 2007.
- [5] **Hansen A.D. (2004)**, “*Generators and Power Electronics for wind turbines*”, Chapter in “*Wind Power in Power Systems*”, John Wiley & Sons, Ltd, 24 p, to be published in 2004.
- [6] **Hansen, L.H., Helle L., Blaabjerg F., Ritchie E., Munk – Nielsen S., Binder, H., Sørensen, P. and Bak – Jensen, B. (2001)** “*Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines*”, Risø-R-1205 (EN), 2001.
- [7] **Muller, S. Deicke, M. De Doncker, R.W.**, “*Doubly fed induction generator systems for wind turbines*” IEEE Industry Applications Magazine, Volume: 8 Issue: 3, May – June 2002, pp: 26 – 33.
- [8] **Weigand, C.H., Lauw, H.K. and Marckx, D.A.** “*Variable – Speed Generation Subsystem Using the Doubly Fed Generator.*” NREL, April 1999.
- [9] **J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Grundling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey**, “*A Survey on Variable – Speed Wind Turbine System*” Federal University of Santa Maria – UFSM, Group of Power Electronics and Control – GEPOC, UFSM/CT/NUPEDEE,

Campus Universitario, Camobi, 97015 – 900, Santa Maria, RS, Brazil,
<http://www.ufsm.br/gepoc>.

- [10] **Σταύρος Αθ.Παπαθανασίου**, Λέκτορας ΕΜΠ, “Συμβολή στην ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος”, Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Φεβρουάριος 1997.
- [11] **Δ.Αλιπραντής**, “Μελέτη συμπεριφοράς ηλεκτρογεννήτριας-μετατροπέων ισχύος”, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα, Ιούνιος 1999.
- [12] **Park, J.**, “*The Wind Power Book*”, Chesire Books, Palo Alto, California, 1981.
- [13] **Jasen, W.A.M and Smulders, P.T.** “*Rotor Design for Horizontal Axis Windmills*” S.W.D., Netherlands, 1977.
- [14] **Bossany, E.A. (2000)**, “*The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines*”, Wind Energy, vol. 3, p. 149 – 163.
- [15] **Binder H., Rebsdorf A., Byberg W. (1997)**, “*Experimental Investrigation of Combined Variable Speed / variable pitch Controlled Wind Turbines*”, EWEC, Dublin, 4p.
- [16] **D. Aouzellag, K. Ghedamsi, E.M. Berkouk**, “*Power Control of a Variable Speed Wind Turbine Driving an DFIG*”, Electrical engineering Department, A. Mira University, Bejaia, Algeria.
- [17] **Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu**, “*Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines*”, DRPT2008, 6 – 9 April 2008, Nannjing, China.
- [18] **G.A Smith, K.Nigim, and A.Smith**, “*Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator*”, IEE Proc. C, vol.128, no.6, pp. 317-324, 1981.
- [19] “*Erganzede Netzanschlussregeln fur Windenergieanlagen*”, E-On Netz, 2001.
- [20] **J.Arrilaga, N.R. Watson**, “*Computer modeling of electrical power systems*”, J.Wiley & Sons, Ltd.:Chicester, 2nd edition, 2001.
- [21] **J.G. Slootweg, PhD**, “*Wind Power- Modelling and Impact on Power System Dynamics*”, Delft University, 2003.

- [22] From Angle of attack in Wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_attack
- [23] **Leithead, W.E.; de la Salle, S.; Reardon, D.**, “*Role and objectives of control for wind turbines*”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C, Volume: 138, Issue: 2, pp: 135 – 148, March 1991.
- [24] **Muljadi, E. and Butterfield, C.P.**, “*Pitch – Controller Variable speed Wind Turbine generation*”, IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Phoenix, Arizona, October 1999.
- [25] **Yang Ye Kazerani, M. Quintana** “*Current-Source Converter based STATCOM: modelling and control*”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol 20, pp 795-800. Apr. 2005.
- [26] **Peterson Andreas, Harnefors Lennart and ZThiringer Torbjorn**, “*Evaluation of Current Control Methods for Wind Turbines Using Double – Fed Induction Machines*”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 20, No 1, PP 227 – 235, January 2005.
- [28] **Slootweg, J. G.; Polinder H.; Kling, W. L. (2001)**, “*Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator*”, IEEE Trans. on Power Systems 2001.
- [29] **Rasmussen, F., Hansen, M.H. Thomsen, K., Larsen, T.J., Bertagnolio, F., Johansen, J., Madsen, H.A., Bak, C. and A.M. Hansen**, “*Present Status of Aeroelasticity of Wind Turbines*”, Wind Energy, 2003, Vol. 6, pp. 213 - 228.
- [30] **Kondo, H.**, “*Aeroelastic response and stability of wind turbine generators*”, JSME International Journal, Series III, 1988, Vol. 31, pp. 719 - 726.
- [31] **Patil, M.J. and D.H. Hodges**, “*Limit-cycle oscillations in high-aspect-ratio wings*”, Journal of Fluids and Structures, 2001, Vol. 15, pp.107 - 132.
- [32] **Snel, H.**, “*Review of the present status of rotor aerodynamics*”, Wind Energy, 1998, Vol. 1, pp. 46 - 49.

- [33] **Thomsen, K. and P. Sorensen**, “*Fatigue loads for wind turbines operating in wakes*”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, Vol. 80, pp. 121 – 136.
- [34] **Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and E. Bossanyi**, “*Wind Energy Handbook*”, Wiley, Chichester, UK, 2001.
- [35] **Kim, S.H. and I. Lee**, “*Aeroelastic analysis of a flexible airfoil with a freeplay non-linearity*”, Journal of Sound and Vibration, 1996, Vol. 193, pp. 823 - 846.
- [36] **Virgin, L.N., Dowell, E.H. and M.D. Conner**, “*On the evolution of deterministic non-periodic behavior of an airfoil*”, International Journal of Non-Linear Mechanics, 1999, Vol. 34, pp. 499 - 514.
- [37] **Αικατερίνη Α. Μπαζεβάνου, Μεταδιδακτορική Ερευνήτρια, Νικόλαος Σπ. Βλάχος, Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας**, “*Ανασκόπηση Μεθόδων Μελέτης Αεροελαστικότητας Μέρος Α: Γενικά Χαρακτηριστικά για Ανεμογεννήτριες*”, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, IV, τεύχ. 1-2 2004, Tech. Chron. Sci. J. TCG, IV, No 1-2.
- [38] **G.Tsourakis, C.D.Vournas**, “*Simulation of Low voltage ride through capability of wind turbines with Doubly Fed Induction generator*”, EWEC, March 2006.
- [39] **Morten H. Hansen, Anca Hansen, Torben J. Larsen, Stig Øye, Poul Sørensen and Peter Fuglsang**, “*Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine*”, Risø National Laboratory, Roskilde Denmark, January 2005.
- [40] **Hansen A.D., Hansen L.**, “*Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years (1995-2004)*”, Wind Energy, Volume 10, Issue 1, pp 81 – 97, January/ February 2007.
- [41] **Hansen A.D., Iov F., Blaabjerg F., Hansen L.H.**, “*Review of Contemporary wind turbine Concepts*”, Wind Engineering, Volume 28, No. 3, 2004.
- [42] **Leonhard W.**, “*Control of electrical drives*”, Springer Verlag Stuttgart, ISBN: 3-540-41820-2, 3rd edition, 2001.
- [43] **Ιωάννης Δ. Μάργαρης**, “*Προσομοίωση ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών με γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης και μελέτη δυνατότητας παραμονής της σε*

λειτουργία κατά τη διάρκεια βυθίσεων τάσης”, Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2006.

[44] **Gail G., Hansen A. D., Hartkopf T.**, “*Controller design and analysis of a variable speed wind turbine with doubly-fed induction generator*”, European Wind Energy Conference EWEC, Athens, Greece, 2006.

[45] **P. Kundur**, “*Power System Stability and Control*”, McGraw Hill, 1994.

[46] **Στέφανος Ν. Μανιάς Καθηγητής Ε.Μ.Π, Αθανάσιος Καλετσάνος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π**, “*Βιομηχανικά Ηλεκτρονικά*”, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2003.

[47] **Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P.**, “*Power Electronics: converters, Application and design*”, John Wiley and Sons, 1989.

[48] **Novotny D. W., Lipo T. A.**, “*Vector control and dynamics of AC drivers*”, Oxford University Press, 1998.

[49] **C.Abbey, B.Khodabakhchian, F Zhou., S.Dennetiere, J.Mahseredjian, G.Joos**, “*Transient modeling of wind generator topologies*”, PST05-131, Inter. Conf. on Power Systems Transients (IPST '05), Montreal, Canada, June 19-23, 2005.

[50] “*Response of generating units with low symmetrical short-circuit current component*”, Elsam report, WP9, UPWind, 2006.

[51] **Balzer G.**, “*Energieversorgung Teil I*”, Lecture book, Department of Electrical Power Systems, Technical University of Darmstadt, 2006.

[52] **SEMIKRON International GmbH Deutschland Germany**, www.semikron.de, accessible November 2007.

[53] **Infineon Technologies AG**, www.infineon.com, accessible November 2007.

[54] **Woodward SEG GmbH & Co KG**, “*CONCYCLE® “Wind - Modular frequency converters with enhanced dynamic grid fault performance”*”, www.woodwardseg.com, www.seg-pq.com, accessible November 2007.

- [55] Soerensen P., Hansen A. D., Christensen P., Mieritz M., Bech J., Bak-Jensen B., Nielsen H., “*Simulation and Verification of Transient Events in Large Wind Power Installations*”, Risø National Laboratory, Risø Report Risø-R-1331(EN), Denmark, October, 2003.
- [56] Akhmatov V., “*Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators Part III: Model with the Back-to-back Converters*”, Wind Engineering, Volume 27, No. 2, pp 79-91, 2003.
- [57] Hansen A. D., Michalke G., Soerensen P., Lund T., Iov F., “*Co-ordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults*”, Wind Energy, Volume 10, Issue 1, Pages 51-68, January/February 2007.
- [58] E.ON. Netz GmbH, “*Netzanschlussregeln, Hoch- und Höchstspannung*”, www.eon-netz.com, 2006.
- [59] Energinet.dk, “*Wind Turbines Connected to Grids with Voltage above 100kV*”, Technical regulation TF 3.2.5, www.energinet.dk, 2004.
- [60] Bundesministerium für, Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Brochure, “*Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung- Stand: Juni 2007*”, www.erneuerbare-energien.de, accessible November 2007.
- [61] “*Eurostag 4.2 , Package , User’s Guide*”, Electricite de France and Tractebel.